ETM-105

การใช้คลื่นไมโครเวฟอบแห้งขนุนในสภาวะสุญญากาศ

Jackfruit Drying Using Microwave – Vacuum Technique

กระวี ตรีอำนรรค[1*], ธัญญรัตน์ อ่างทอง[2], พิสิฐมนต์ โมกขพันธ์[2] และ เทวรัตน์ ตรีอำนรรค[3]

[1] สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
[2] ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110
[3] สาขาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
*ติดต่อ: krawee@sut.ac.th, 044 224 476, เบอร์โทรสาร 044 224 643

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับสภาวะสุญญากาศในการอบแห้งผลิตผลเกษตรที่มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบสูงและเกิดความเสียหายจากความร้อนได้ง่ายโดยใช้ขนุนเป็นวัสดุทดสอบ ห้องอบแห้งสุญญากาศที่พัฒนาขึ้นใช้โครงสร้างเหล็ก มิติ กXยXส เป็น 450 mm x 450 mm x 300 mm ติดตั้งปั๊มสุญญากาศและอุปกรณ์กำเนิดคลื่นไมโครเวฟ (Magnetron) ขนาด 700 W ควบคุมกำลังของไมโครเวฟแบบสลับเปิด-ปิด (Pulse) ด้วยวงจรขับและวงจรไทเมอร์ ทดสอบหาค่า SMER (Specific Moisture Extraction Rate) กับผ้าชุบน้ำบิดหมาด ที่จังหวะการเปิด-ปิด Magnetron เป็น 5-1, 7-1, 10-1, 5-2, 7-2 และ 10-2 sec-min พบว่า ค่า SMER ที่เหมาะสมคือ 0.032 และ 0.035 kg_{water}/kW·hr ที่จังหวะการทำงาน 7 s – 2 min และ 10 s – 2 min ตามลำดับ เพราะเกิดอุณหภูมิในวัสดุทดสอบเพียง 65 ^{O}C แม้ว่าจะให้ค่า SMER ไม่สูงก็ตาม จากนั้นทดสอบอบแห้งขนุนสด ตามจังหวะการทำงานทั้ง 2 ค่าที่เลือก พบว่าให้ค่าการอบแห้งไม่แตกต่างกัน โดยใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 36-38 hr จนขนุนเหลือความชื้นสุดท้าย 14%wb ที่ DR (Drying Rate) 0.018 kg_{water}/hr และมีอุณหภูมิเฉลี่ยขณะอบแห้ง 35 ^{O}C โดยที่ จังหวะการทำงาน 7 s – 2 min ได้ขนุนอบแห้งสีคล้ำน้อยกว่าจังหวะการทำงาน 10 s – 2 min เล็กน้อย

คำหลัก: การอบแห้ง; ไมโครเวฟ; สุญญากาศ; ผลไม้

Abstract

The objective of this research was studied on microwave-vacuum drying for the high sugar content fruits. Jackfruit used in this research because of its color rapidly change respected to the high drying temperature. The developed dryer is 450 mm x 450 mm x 300 mm in WxLxH and made from the steel. The vacuum in drying chamber was provided by the vacuum pump. The 700 W of Magnetron used as the Microwave produced device installed in the dryer and controlled the power by pulse on-off timer circuit. The wet cotton towels were used in the drying condition test. The proper drying condition was investigated by pulsing of 5-1, 7-1, 10-1, 5-2, 7-2 and 10-2 sec-min of magnetron working. The result found that the pulse of 7 s – 2 min and 10 s – 2 min of magnetron working gave a 0.032 and 0.035

kg_{water}/kW·hr of SMER and were the proper condition of drying because of the lower temperature (less than 65 ^{O}C). In the testing of Jackfruit drying, the proper pulses of magnetron working were not difference in drying. The drying periods are 36-38 hr at drying temperature of 35 ^{O}C and the final moisture content in product is 14%wb at 0.018 kg_{water}/hr of DR. The pulse of 7 s – 2 min working condition is lower in color change than the 10 s – 2 min condition.

***Keywords**:* Drying; Microwave; Vacuum; Fruits

1. บทนำ

การอบแห้งเป็นกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวที่สำคัญกระบวนการหนึ่งสำหรับผลิตผลทางการเกษตร เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ช่วยยืดอายุในการเก็บรักษาและเป็นกระบวนการตั้งต้นในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มมูลค่า รูปแบบการอบแห้งทั่วไปจะใช้การอบแห้งด้วยลมร้อน ซึ่งการอบแห้งด้วยลมร้อนกลไกการอบแห้งจะเริ่มต้นที่ผิววัสดุโดยลมหรืออากาศร้อนถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุ ความชื้นหรือน้ำที่ผิวของวัสดุจะระเหยแล้วถูกลมร้อนพาออกไปจากห้องอบแห้งทำให้วัสดุแห้ง[1] แต่การอบแห้งด้วยลมร้อนมีข้อจำกัดคือหากต้องการให้อัตราการอบแห้งเกิดขึ้นเร็วต้องใช้อุณหภูมิสูง จึงไม่เหมาะกับวัสดุที่มีน้ำตาลสูง เพราะจะทำให้สีของผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลและทำให้คุณภาพด้านกลิ่นและรสชาติเสียไป เทคนิคหนึ่งในการเพิ่มอัตราการอบแห้งโดยยังคงสภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งได้ดีคือทำการอบแห้งในสภาวะสุญญากาศ [2] เนื่องจากน้ำในผลิตภัณฑ์สามารถระเหยออกจากวัสดุได้ง่ายเพราะผลของความดันที่ต่ำกว่าบรรยากาศ นอกจากนี้ในปัจจุบันมีการนำไมโครเวฟมาใช้ในการอบแห้งเพิ่มมากขึ้นในลักษณะของความร้อนร่วม [2] เพราะสามารถกระจายพลังงานในเนื้อวัสดุได้อย่างสม่ำเสมอ ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ใกล้เคียงกันและช่วยในการประหยัดพลังงาน [3] ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงขนาด 2,450 GHz ทำให้โมเลกุลของน้ำในผลิตภัณฑ์เกิดการสั่นสะเทือนและชนโมเลกุลอื่นต่อไปจนเกิดเป็นพลังงานจลน์และเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานความร้อน การกำจัดน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการนี้จึงดีกว่าวิธีอื่น เพราะไม่เสียพลังงานความร้อนให้แก่ตัวกลางเช่นอากาศในการอบแห้ง [4] การทดลองอบแห้งพริกสดด้วยสภาวะสุญญากาศ โดยใช้หลอดฮาโลเจนขนาด 500 W เป็นแหล่งความร้อนพบว่าที่อุณหภูมิ 70 ^{O}C และเวลาการอบแห้ง 2 ชั่วโมง สามารถลดความชื้อของพริกสดลง 70% โดยที่สีผลิตภัณฑ์คล่ำลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับพริกสด [5] ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าการอบแห้งด้วยวิธีการอื่นๆมาก ขนุนเป็นผลไม้ภายในผลประกอบไปด้วยยวง ซึ่งเป็นเนื้อวงหุ้มรอบๆเมล็ด มีหลายสี ขึ้นอยู่กับขนุนแต่ละสายพันธุ์ ซึ่งมีลักษณะหวาน หอม แตกต่างกันออกไป พันธุ์ขนุนที่ได้รับความนิยมในประเทศไทยคือพันธุ์ทองประเสริฐ ทั้งนี้เพราะผลมีลักษณะทรงกลม เนื้อยวงเป็นสีเหลืองทอง รสหวาน เนื้อกรอบแน่น มีเปอร์เซ็นต์เนื้อสูง [6]

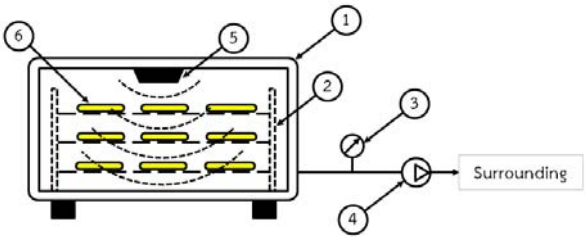
จะเห็นได้ว่าการใช้สภาวะสุญญากาศขณะอบแห้งผลิตภัณฑ์มีข้อดีในการลดเวลาการอบแห้งลงได้มาก โดยใช้อุณหภูมิในการอบแห้งไม่สูงและไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีในผลิตภัณฑ์มากเกินไป เมื่อรวมกับข้อได้เปรียบของการใช้คลื่นไมโครเวฟในการให้พลังงานกับน้ำในวัสดุโดยตรง ที่สามารถประหยัดพลังงานได้มากแล้ว จึงน่าจะเป็นสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมกับผลผลิตที่มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบสูง คณะผู้วิจัยจึงต้องการที่จะทดสอบการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟในสภาวะสุญญากาศ โดยใช้ขนุนซึ่งเป็นผลไม้ที่มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบสูงเป็นวัสดุทดสอบ เพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมและให้คุณภาพด้านความชื้นและสีที่ดีที่สุดต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 เครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้น

ETM-105

เครื่องอบแห้งที่ใช้ประกอบไปด้วย ห้องอบแห้งสุญญากาศและส่วนกำเนิดคลื่นไมโครเวฟและควบคุม

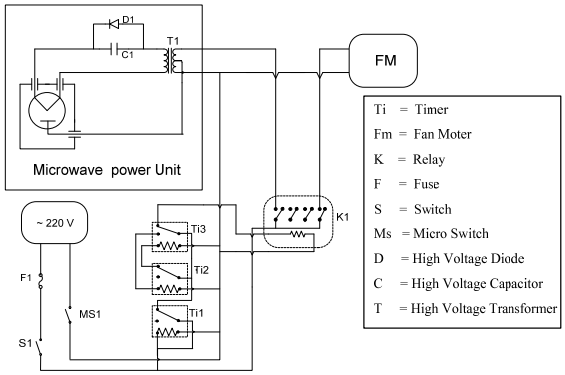


ภาพที่ 1 ห้องอบแห้ง

ห้องอบแห้ง (ภาพที่ 1) ประกอบไปด้วย (1) ห้องสุญญากาศทำจากแผ่นและโครงสร้างเหล็กมิติ กxยxส เป็น 450 mm x 450 mm x 300 mm มีประตูเปิดปิดที่ผนึกขอบได้ ถูกออกแบบให้ทดแรงดันไม่น้อยกว่า 2 bar ภายในติดตั้ง (2) ชั้นและถาดรองรับขนุนทำจากพลาสติก acrylic เจาะรูเพื่อลดการสะท้อนคลื่นไมโครเวฟจากการใช้โลหะ (3) ติดตั้งท่อ มาตรวัดความดันและ (4) และปั้มสุญญากาศ

ส่วนกำเนิดคลื่นไมโครเวฟและควบคุม (ภาพที่ 2) ใช้ Magnetron ขนาด 700 W ซึ่งถูกขับด้วยวงจรขับ (Microwave Power Unit) ควบคุมกำลังของไมโครเวฟแบบจังหวะสลับเปิด-ปิด (Pulse) ด้วยวงจรไทเมอร์ (Ti) ตั้งเวลาการทำงานได้ทั้งช่วงการเปิดและการปิดอย่างอิสระ โดยที่ Fan Motor จะทำงานตลอดเวลาเพื่อระบายความร้อนออกจากส่วนกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ

หัว Magnetron ถูกติดตั้งในห้องอบแห้ง (หมายเลข 5 ภาพที่ 1) เพื่อให้กระจายคลื่นสู่เนื้อยวงขนุน (หมายเลข 6 ภาพที่ 1) อย่างสม่ำเสมอ



ภาพที่ 2 วงจรส่วนกำเนิดคลื่นไมโครเวฟและควบคุม

2.2 การทดสอบ

แบ่งการทดสอบเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบหาสภาวะการทำงานของเครื่องที่เหมาะสม และการทดสอบอบแห้งขนุน

การทดสอบสภาวะการทำงาน ทดสอบหา SMER (Specific Moisture Extraction Rate) [7] ของการอบแห้ง ในหน่วย $kg_{water}/kW{\cdot}hr$ ตามสมการ (1) โดยการใช้ผ้าขนหนูชุบน้ำบิดหมาดเป็นวัสดุทดสอบ

$$SMER = \frac{m_{p,i} - m_{p,f}}{P_e} \qquad (1)$$

เมื่อ $m_{p,i}$ = น้ำหนักก่อนอบแห้ง (kg)

$m_{p,f}$ = น้ำหนักหลังอบแห้ง (kg)

P_e = ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ ($kW{\cdot}hr$)

ทดสอบการอบแห้งด้วยเครื่องที่พัฒนาขึ้น (ภาพที่ 3) โดยเปิดปั้มสุญญากาศให้ทำงานตลอดเวลา และใช้จังหวะการเปิด-ปิด Magnetron เป็น 5-1, 7-1, 10-1, 5-2, 7-2 และ 10-2 sec-min ตามลำดับ เป็นระยะเวลา 10 นาที บันทึกอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับผ้าขนหนู จากนั้นใช้สภาวะการอบแห้งที่มีค่าอุณหภูมิไม่เกิน $65^{\circ}C$ เป็นสภาวะสำหรับทดสอบการอบแห้งขนุนต่อไป

ภาพที่ 3 เครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้น

การทดสอบอบแห้งขนุน ใช้เนื้อยวงขนุนสด น้ำหนักเริ่มต้น 1,000 g วางบนถาดอบแห้งดังภาพที่ 4 จากนั้นอบแห้งขนุนด้วยสภาวะที่ได้จากการทดสอบแรก ประเมินการอบแห้งของเครื่องด้วยค่า SMER ค่า DR (Drying Rate) ค่า M_D (Moisture Content in Dry Basis) ด้วยสมการ (2) และ (3) ตามลำดับ จากนั้นนำตัวอย่างหลังอบแห้งมาวัดค่าสี L* a* b* ด้วยเครื่อง Colorimeter เปรียบเทียบกับค่าสีของตัวอย่างก่อนอบแห้งและคำนวณเป็นค่าการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์ ΔE^* ตามสมการ (4) [7]

ภาพที่ 4 ถาดบรรจุขนุน สำหรับใส่ในเครื่อง

$$DR = \frac{m_{p,i} - m_{p,f}}{t} \qquad (2)$$

เมื่อ DR = Drying Rate (kg/hr)

t = เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (hr)

$$M_D = \frac{W_t - W_d}{W_d} x10 \qquad (3)$$

เมื่อ M_D = ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%db)

W_t = น้ำหนักเริ่มต้นของวัสดุชื้น (kg)

W_d = น้ำหนักของวัสดุแห้ง (kg)

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \qquad (4)$$

เมื่อ ΔL^* = การเปลี่ยนแปลงค่าสี L ก่อน – หลังการอบแห้ง

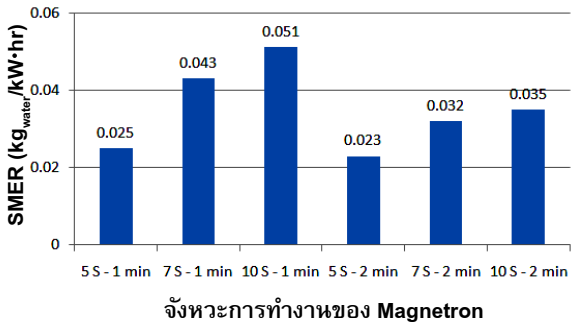
Δa^* = การเปลี่ยนแปลงค่าสี a ก่อน – หลังการอบแห้ง

Δb^* = การเปลี่ยนแปลงค่าสี b ก่อน – หลังการอบแห้ง

3. ผลการทดลอง

การสูบอากาศออกจากห้องอบแห้ง พบว่าเครื่องอบแห้งที่ออกแบบขึ้นสามารถทำความดันต่ำสุดได้ 0.2 bar_{abs} และมีผลการทดลองดังนี้

สภาวะการทำงาน ค่า SMER ของการอบแห้งแสดงได้ดังภาพที่ 5 พบว่าการเปิด Magnetron เป็น



ภาพที่ 5 ค่า SMER การทดสอบสภาวะการทำงาน

ETM-105

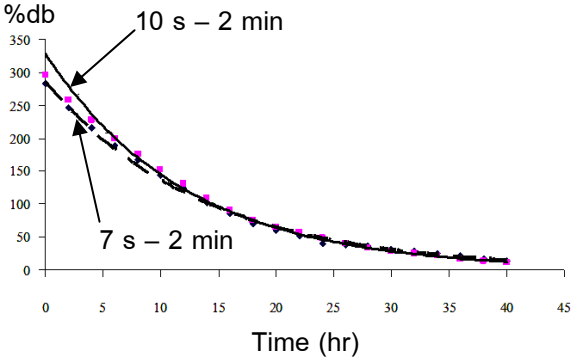
เวลา 10 sec และหยุดพักนาน 1 min จะให้ค่าการระเหยน้ำจำเพาะดีที่สุด คือ 0.051 $kg_{water}/kW{\cdot}hr$ แต่พบว่าเกิดความร้อนสูงมากโดยมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 80 - 100^{O}C ในวัสดุทดสอบ เช่นเดียวกับทุกจังหวะการเปิด-ปิดที่หยุดพักเพียง 1 min มีเพียงจังหวะการเปิด-ปิด 2 min ที่เกิดความร้อนน้อยกว่า โดยมีค่าอุณหภูมิผิวของวัสดุทดสอบต่ำกว่า 70 ^{O}C และเนื่องจากการเปิด-ปิด 5 s – 2 min มีค่า SMER ต่ำเกินไป ดังนั้นจึงเลือกการเปิด-ปิด 7 s – 2 min และ 10 s – 2 min เป็นจังหวะที่เหมาะสมในการทดสอบอบแห้งขนุนต่อไป

การอบแห้งขนุน ค่า SMER กับ DR แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่า DR และ SMER ของการอบแห้งขนุน

จังหวะการเปิด-ปิด Magnetron	DR (kg_{water}/hr)	SMER (kg_{water}/kw•hr)
7 S - 2 min	0.017	0.11
10 S - 2 min	0.018	0.08

จากตารางที่ 1 จะเห็นว่า ค่า DR ของทั้ง 7 S - 2 min และ 10 S - 2 min มีค่าใกล้เคียงกันมาก ร่วมถึงค่า SMER ซึ่งสภาวะ 7 S - 2 min มีค่าดีกว่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่า %db กับระยะเวลาการอบแห้ง (ภาพที่ 6)

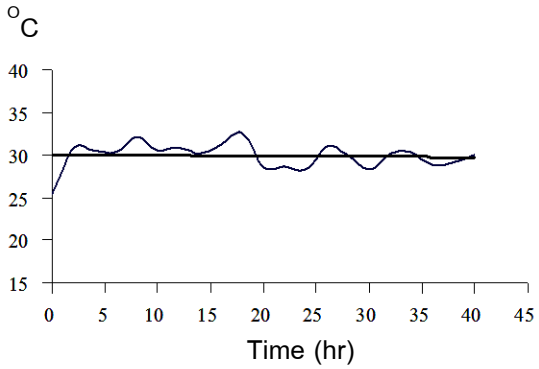


ภาพที่ 6 Drying Curve ที่สภาวะการอบแห้งขนุน

จากเส้น Curve fitting ในภาพที่ 6 จะเห็นว่าสภาวะการอบแห้ง 10 s – 2 min สามารถระเหยน้ำในช่วงต้นของการอบแห้งได้เร็วกว่า สภาวะ 7 s – 2 min แต่เมื่อเวลาผ่านไป 15 hr แล้ว ลักษณะการลดลงของความชื้นมีความแตกต่างกันน้อยมาก จากนั้นยุติการอบแห้งที่ความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์เป็น 14%wb พบว่าแต่ละสภาวะการอบแห้งใช้เวลาใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 2) โดยมีอุณหภูมิผิวขนุนในขณะอบแห้งอยู่ในช่วง 25 ^{O}C - 35 ^{O}C ดังภาพที่ 7

ตารางที่ 2 ความชื้นสุดท้ายและเวลาในการอบแห้ง

จังหวะการเปิด-ปิด Magnetron	M_W (%wb)	Drying time (hr)
7 S - 2 min	14	38
10 S - 2 min	14	36



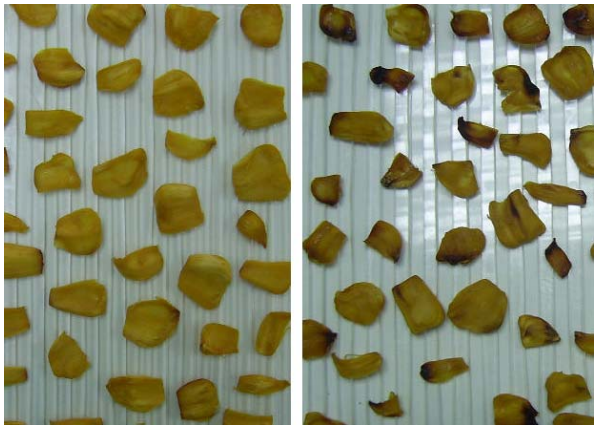
ภาพที่ 7 อุณหภูมิผิวขนุนที่สภาวะ 7 s – 2 min

สำหรับการเปลี่ยนแปลงสีของขนุนหลังอบแห้งพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงในทางเข้มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับขนุนสด โดยจังหวะการเปิด-ปิด 7 S - 2 min ให้สีอ่อนกว่า 10 S - 2 min (ค่าΔE^* =26.38) ดังตารางที่ 3 และตัวอย่างผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งแสดงในภาพที่ 8 ซึ่งพบว่าเกิดสีน้ำตาลเข้มในส่วนขอบของขนุนมากที่สุด เนื่องจากเมื่อเกิดความร้อนจากการรับคลื่นไมโครเวฟแล้ว ไม่สามารถถ่ายเทความร้อน

ภายในชิ้นวัสดุได้เร็วพอ ความร้อนที่สะสมจึงทำให้เกิดสีเข้มไหม้ของน้ำตาลในเนื้อขนุน (Browning) ในที่สุด

ตารางที่ 3 การเปลี่ยนแปลงสีของขนุนอบแห้ง

สภาวะการอบแห้ง	ΔE^*
7 S - 2 min	26.38
10 S - 2 min	28.74



(a) (b)

ภาพที่ 8 ผลิตภัณฑ์ขนุนอบแห้งที่ (a) 7s – 2 min และ (b) 10 S - 2 min

4. สรุป

การทดสอบอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ ในสุญญากาศพบว่า มีความเป็นไปได้สูงที่จะประยุกต์ใช้กับการอบแห้งผลผลิตที่ไวต่อการเกิดสีเข้มคล้ำเนื่องจากการไหม้ของน้ำตาลในวัสดุ โดยที่จังหวะการเปิด-ปิด ของ Magnetron ที่เหมาะสมคือ 7 s – 2 min และ 10 s – 2 min การทดสอบอบแห้งขนุนจนเหลือความชื้นสุดท้าย 14%wb พบว่ามี DR = 0.018 kg_{water}/hr และมีอุณหภูมิเฉลี่ยขณะอบแห้ง 35 ^{o}C โดยที่ จังหวะการทำงาน 7 s – 2 min ได้ขนุนอบแห้งสีคล้ำน้อยกว่าจังหวะการทำงาน 10 s – 2 min

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวและแปรสภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่สนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Artnaseaw, A., Theerakulpisut, S., & Benjapiyaporn, C. (2010). Development of a vacuum heat pump dryer for drying chilli. Biosystems Engineering, 105, pp. 130-138.

[2] สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ (2540). การอบแห้งเมล็ดธัญพืช, กรุงเทพฯ: คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

[3] ศิรประภา คลังทอง และ ศิริวิไล อนุกูลประชา (2546). การอบแห้งใบหอมสับแบบฟลูอิดไดเซชันร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ, ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร, คระวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยแม่โจ้. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต

[4] วิไล รังสาดทอง (2543). เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร, กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 270 น.

[5] สามารถ ดอกกุหลาบ ปฐมพงษ์ อัสสรัตนะพงษ์ และจักรรินทร์ มูลทองชุน (2548). ชุดทดลองการอบแห้งโดยวิธีสุญญากาศ, โครงงานวิศวกรรมระดับปริญญาตรี ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล. คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. ปทุมธานี.

[6] ธวัชชัย รัตนชเลศ และศิวาพร ธรรมดี (2542). คู่มือเลือกพันธุ์สำหรับผู้ปลูกพันธุ์ไม้ผลการค้าในประเทศไทย, กรุงเทพฯ: ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 192 น.

[7] ปัณณธร ภัทรสถาพรกุล (2548). เอกสารประกอบการเรียนวิชาคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตผลเกษตร, ปทุมธานี: คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีการเกษตร. สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล.