



รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ การอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสีกด้วยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน

โดย

นายณัฐพล ภูมิสะอาด

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ธันวาคม 2552

สัญญาเลขที่MRG4680033

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ การอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสีกด้วยตัวไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน

โดย

นายณัฐพล ภูมิสะอาด

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคามในการอำนวยความสะดวกด้านเครื่องมือในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ ผศ. ดร.สิริธร ศิริอมรพรรณ และอาจารย์ ดร.อัศวิน อมรสิน ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆ ทั้งในเรื่องวิชาการ งานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณมนตรี มนตรีพิลา คุณวัชรานนท์ จุฑาจันทร์และเจ้าหน้าที่ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคามทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในการวิจัย

Abstract

Project Code: MRG4680033

Project Title: Drying of cooked sticky rice by superheated steam and heated air.

Investigator: Mr. Nattapol Poomsa-ad

Faculty of Engineering, Mahasarakham University

E-mail Address: nattapol.p@msu.ac.th

Project Period: July, 2002 – December 2007

The objective of this research are to comparative thin layer drying kinetic of cooked glutinous rice for superheated steam and hot air temperature 130,150 and 170°C . In the experiments, moisture content of cooked rice are 12,14 and 16%db. And comparative physical property of drying product and frying products in term of bulk density, true density and expansion ratio. The experimental result show that at temperature of 130°C, the drying rate of cooked glutinous rice using the hot air is considerably higher than that of using the superheated steam , However, when temperature increase more than 150°C, the moisture reduction rate obtained from the use of both mediums is almost same. The two term equation was suitable for predicting the drying rate of cooked glutinous rice . The physical properties of cooked glutinous rice in term of Lightness after dried and after frying with hot air were higher than superheated steam. But Redness and yellowness superheated steam were higher than hot air . The moisture content affected the bulk density and true density after dried and fried . The moisture content increase bulk density increase from 536.57 to 568.14 kg/m³ for hot air and from 541.92 to 563.96 kg/m³ for superheated steam , respectively, with an increase in moisture content true density decrease from 1077.84 to 1001.33 kg/m³ for hot air and from 1186.29 to 1057.98 kg/m³ for superheated steam . The fried product also ,when the moisture content increase bulk density increase from 285.77 to 307.72 kg/m³ for hot air and from 273.44 to 308.35 kg/m³ for superheated steam , respectively, with an increase in moisture content true density decrease from 371.66 to 309.12 kg/m³ for hot air and from 409.69 to 375.90 kg/m³ for superheated steam . The expansion ratio after with out significant difference ($P \geq 0.05$)

Keywords : Airless drying; Dehydration; Drying equation; Grain; Sticky rice

บทคัดย่อ

โครงการเลขที่: MRG4680033

ชื่อโครงการ: การอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสีกด้วยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน

ผู้วิจัย: นายณัฐพล ภูมิสะอาด

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

E-mail Address: nattapol.p@msu.ac.th

ระยะเวลาดำเนินการ: กรกฎาคม 2547 – ธันวาคม 2551

งานวิจัยนี้มีความมุ่งหมายเพื่อทดลองเปรียบเทียบข้าวเหนียวหนึ่งสีกโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนประกอบด้วยสมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบางข้าวเหนียวหนึ่งสีกโดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 130, 150 และ 170 °C ที่ความชื้น 12, 14 และ 16% db. สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งและหลังการทอดประกอบด้วย สี ความหนาแน่นปรากฏ ความหนาแน่นจริง สัดส่วนช่องว่างอากาศ และคุณภาพหลังการทอด อัตราการพองตัวของผลิตภัณฑ์ จากการศึกษาพบว่าอัตราการอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสีกด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ต่ำกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน และในช่วง 150-170 องศาเซลเซียส สมการ Two term equation ใช้ทำนายผลการอบแห้งชั้นบางได้ดีที่สุดโดยค่า SSE เท่ากับ 0.00299 สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง และ 0.00971 สำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ตัวกลางในการอบแห้งมีอิทธิพลต่อค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งและทอด ผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งด้วยอากาศร้อนมีค่าความสว่างสูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งให้ค่าสีแดงและค่าสีเหลืองสูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งด้วยอากาศร้อน ค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ มีผลต่อความหนาแน่นปรากฏและความหนาแน่นจริงหลังการอบและทอด ความหนาแน่นปรากฏเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นความหนาแน่นปรากฏเพิ่มในช่วง 536.57-568.14 kg/m³ สำหรับอากาศร้อน และ 541.92-563.96 kg/m³ สำหรับไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เมื่อความชื้นเพิ่มความหนาแน่นจริงจะมีค่าลดลง 1077.84-1001.33 kg/m³ สำหรับอากาศร้อน และ 1186.29-1057.98 kg/m³ สำหรับไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ผลิตภัณฑ์หลังการทอดความหนาแน่นปรากฏเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นความหนาแน่นปรากฏเพิ่มในช่วง 285.77-307.72 kg/m³ สำหรับอากาศร้อน และ 273.44-308.35 kg/m³ สำหรับไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เมื่อความชื้นเพิ่มความหนาแน่นจริงจะมีค่าลดลง 371.66-309.12 kg/m³ สำหรับอากาศร้อน และ 409.69-375.90 kg/m³ สำหรับไอน้ำร้อนยวดยิ่ง อัตราการพองตัวของผลิตภัณฑ์หลังการทอดไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P \geq 0.05$)

คำสำคัญ : การอบแห้งไร้อากาศ; การทำแห้ง; สมการการอบแห้ง; เมล็ดพืช; ข้าวเหนียว

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญของปัญหาและที่มาของงานวิจัย

ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยเป็นบริเวณที่มีการการเพาะปลูกข้าวเหนียวเพื่อการบริโภคภายในท้องถิ่นจำนวนมาก ปัจจุบันได้มีการส่งออกข้าวเหนียวหนึ่งสูกตากแห้งทั้งในแบบสำเร็จรูปและกึ่งสำเร็จรูปเพื่อนำไปแปรรูปสินค้าเพื่อการบริโภค เช่นการทำข้าวพองสไตล์ ญี่ปุ่น (Japaneses puffed rice) ปัญหาที่พบในการผลิตข้าวเหนียวหนึ่งสูกตากแห้งคือ การใช้เวลาและพื้นที่ในการตากแห้งมาก กล่าวคือมีการกระจายการจ้างให้หนึ่งข้าวเหนียวและตากแห้งตามครัวเรือนต่างๆ จึงเป็นปัญหาในด้านปริมาณและคุณภาพในการผลิต คือต้องมีการตระเวนจัดเก็บในบริเวณกว้าง และการควบคุมปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ ให้สม่ำเสมอ การอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งจึงเป็นน่าจะเป็นทางออกในการแก้ปัญหาดังที่กล่าวมาเบื้องต้นได้

การอบแห้งเป็นกระบวนการไล่ความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์โดยการระเหย โดยทั่วไปจะอาศัยอากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน อัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง การอบแห้งจะช่วยรักษาให้ผลิตภัณฑ์ไว้ได้นาน และป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ซึ่งเป็นสาเหตุของการเน่าเสีย

ในงานวิจัยครั้งนี้จึงได้ทำการศึกษาการอบแห้งข้าวเหนียวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เพื่อศึกษาความชื้นสมดุล จลศาสตร์การอบแห้งข้าวเหนียวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง และคุณภาพของข้าวเหนียวหนึ่งที่ได้รับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งว่าแตกต่างจากอากาศร้อนอย่างไร

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งระดับปฏิบัติการทดลอง
2. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบจลนพลศาสตร์การอบแห้งและสมการการอบแห้งชั้นบางสำหรับข้าวเหนียวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน
3. เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพของข้าวเหนียวหนึ่งสุกหลังการอบแห้ง
4. เพื่อศึกษาคุณภาพของข้าวเหนียวหนึ่งสุกหลังการทอด
5. ทำการศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสุกด้วยวิธีต่างๆ เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพของข้าวเหนียวหนึ่งหลังจากการอบแห้งด้วยวิธีตากแดด เปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยวิธีการใช้ลมเป่า ลมร้อน และไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

ขอบเขตงานวิจัย

1. ข้าวเหนียวที่ใช้ในการศึกษาคือ พันธุ์ กข.6
2. อุณหภูมิที่ทำการอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสุกด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 130-170 องศาเซลเซียส
3. สมบัติทางกายภาพที่ทำการศึกษาได้แก่สี มิติ ความหนาแน่นจริง และความหนาแน่นปรากฏ
4. คุณภาพที่ทำการศึกษาคือ ความสามารถในการพองตัวหลังการทอด

สถานที่ทำการศึกษา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ความสำคัญของการวิจัย

1. เพื่อใช้เป็นแนวทางการอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสุกที่มีคุณภาพหลังการอบแห้งและเหมาะสมต่อการนำไปแปรรูปผลิตภัณฑ์จากข้าวเหนียวหนึ่งสุก
2. เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองการอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสุก สามารถทำนายสภาวะการอบแห้งได้จากสมการจลนศาสตร์และสมการอบแห้งชั้นบางที่สร้างขึ้น
3. ได้ข้อมูลเพื่อใช้ในการออกแบบสร้างเครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

การถนอมอาหารโดยวิธีการทำให้แห้งเป็นวิธีที่นิยมและแพร่หลาย เนื่องจากวิธีดังกล่าวสามารถเก็บรักษาคุณภาพอาหารได้เป็นเวลานาน การอบแห้งมีหลายวิธี แต่ละวิธีมีข้อดี และข้อเสียแตกต่างกัน เช่นการอบแห้งโดยวิธีตากแห้งเป็นวิธีที่ง่าย และประหยัดพลังงาน แต่ใช้เวลาในการอบแห้งนาน การควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทำได้ยากเนื่องจากขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมทางธรรมชาติ สำหรับการอบแห้งโดยการเป่าอากาศร้อนผ่านวัสดุชั้นซึ่งในกรณีนี้พื้นที่ในการอบแห้งอยู่ในขอบเขตจำกัด การควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์เช่นความชื้น สามารถทำได้ง่าย และให้คุณภาพในด้านความสะอาดที่มากกว่า อย่างไรก็ตามการอบแห้งโดยวิธีนี้มีความสิ้นเปลืองพลังงานในเกณฑ์ที่สูงถ้ากระบวนการการจัดการในการอบแห้งกระทำอย่างไม่มีประสิทธิภาพ โดยทั่วไปการอบแห้งโดยวิธีเป่าอากาศร้อนมีความสิ้นเปลืองพลังงานสูงกว่าวิธีการตากแห้ง แต่สามารถชดเชยในเรื่องเวลาการอบแห้ง โดยการอบแห้งแบบมีการเป่าอากาศร้อนจะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่ามาก และความสามารถในการอบแห้งสูง

2.1 ข้าวเหนียว พันธุ์ กข.6

ข้าวเหนียว พันธุ์ กข.6 มีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Oryza sativa* L. กรมวิชาการเกษตรให้เป็นพันธุ์รับรอง และแนะนำให้เกษตรกรปลูกเมื่อวันที่ 4 พฤษภาคม 2520 ข้าวพันธุ์ กข 6 เป็นพันธุ์ข้าวเหนียวหอม ไร่ต่อช่วงแสง เป็นพันธุ์ข้าวเหนียวที่ได้รับการปรับปรุงพันธุ์ข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 โดยใช้รังสีแกมมาที่ 20 กิโลเรด ที่สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติแห่งประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2508 ปลูกและคัดเลือกข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ฉายรังสีซ้ำที่ 2 ที่สถานีทดลองข้าวบางเขน ปลูกซ้ำที่ 3 ที่สถานีทดลองข้าวพิมาย จังหวัดนครราชสีมา ฯลฯ คัดเลือกได้ข้าวสายพันธุ์ดี ทั้งสายพันธุ์ข้าวเจ้าและข้าวเหนียว ปลูกทดสอบผลผลิตระหว่างสถานีและในนาเกษตรกรในภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือระหว่างปี พ.ศ. 2514- 2519 ผลปรากฏว่า สายพันธุ์ KDML 105'65-G3U-68-254 ซึ่งเป็นสายพันธุ์ข้าวเหนียว นุ่ม มีกลิ่นหอม ทนแล้ง และมีคุณภาพการหุงต้มรับประทานดี ให้ผลผลิตเฉลี่ยสูงสุดเป็นอันดับหนึ่งและให้ผลผลิตสูงกว่าพันธุ์เหนียวสันป่าตอง ซึ่งเป็นพันธุ์ข้าวเหนียวที่นิยมปลูกกันแพร่หลายในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (จดหมายข่าวผลิใบ , 2545)

2.2 พื้นฐานการอบแห้ง

ในการอบแห้งทั่วไปมักใช้ลมร้อนในการอบแห้งความร้อนจะถ่ายเทจากลมร้อนไปยังวัสดุ ความร้อนส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้ในการระเหยน้ำ โดยของเหลวที่อยู่ภายในวัสดุจะเคลื่อนที่ ออกมายังผิวโดย Capillary flow ซึ่งเป็นผลมาจากแรงตึงผิว (Surface force) ส่วนไอน้ำในวัสดุจะ เคลื่อนที่เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Vapor diffusion) และความดันไอ (Partial pressure of vapor) ที่แตกต่างระหว่างไอน้ำในวัสดุกับลมร้อน ถ้าผิวของวัสดุมีน้ำอยู่เป็น จำนวนมากอุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวก็จะคงที่ ซึ่งส่งผลให้อัตราการอบแห้งคงที่ ด้วย ถ้าอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็ว ของลมร้อนมีค่าคงที่ และเมื่อผิวของวัสดุมีปริมาณน้ำ ลดลงมาก อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวของวัสดุย่อมเปลี่ยนไป โดยที่อุณหภูมิจะ สูงขึ้นและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวของวัสดุลดลง ซึ่งส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลงความชื้นที่ อยู่ระหว่างการอบแห้งด้วยอัตราคงที่และอัตราการอบแห้งลดลงเรียกว่า ความชื้นวิกฤต อัตราการ อบแห้งจะค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งไม่เกิดความแตกต่างของความดันไอ จะเหลือความชื้นสุดท้าย เท่ากับความชื้นสมดุล

2.3 การถ่ายเทความร้อนและมวลสาร

ในการทำแห้งจะต้องมีการให้พลังงานแก่อาหาร ทำให้น้ำในอาหารเปลี่ยนสถานะเป็นไอ แล้งเคลื่อนย้ายออกจากอาหาร แสงอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อนจากธรรมชาติและกระแสลมที่ พัดผ่านอาหารทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายไอน้ำ เนื่องจากพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ให้ อุณหภูมิได้ไม่สูงนักและกระแสลมธรรมชาติไม่สูงพอ ทำให้การตากแห้งต้องใช้เวลาานาน ดังนั้น จึงมีการพัฒนาเครื่องอบที่มีการให้พลังงานความร้อนในปริมาณที่ควบคุมได้และมีอุปกรณ์ในการ เคลื่อนย้ายไอน้ำออกจากผิวอาหาร การถ่ายเทความร้อนและมวลสารเกิดได้เร็วอาหารจึงแห้งได้ เร็วขึ้น การถ่ายเทความร้อนและมวลสารระหว่างการอบแห้งทำได้หลายวิธีคือ

2.3.1 การให้กระแสลมร้อนเคลื่อนที่ผ่านอาหาร กระแสลมร้อนจะทำหน้าที่ให้ความร้อน และเคลื่อนย้ายไอน้ำการถ่ายเทความร้อนแบบนี้เป็นการพาความร้อน (Convection)

2.3.2 การแผ่อาหารเป็นชั้นบางๆ บนพื้นผิวที่ให้ความร้อนแบบการนำความร้อน (Conduction) ทำให้ไอน้ำกระจายตัวออกไปสู่บรรยากาศเหนืออาหาร อาหารที่ร้อนจัดทำให้ไอน้ำ กระจายตัวได้ดี อาหารจึงแห้งในเวลาสั้นๆ อาจมีระบบดูดอากาศออกจากผิวอาหาร ซึ่งสามารถ ทำให้อลดความชื้นได้ต่ำลงอีกหรือไม่ต้องให้อุณหภูมิอาหารที่สูงนัก

2.3.3 การให้ความร้อนแก่อาหารในเครื่องอบด้วยการนำความร้อนหรือการแผ่รังสี ร่วมกับการดูดอากาศที่มีไอน้ำออกไปควบแน่นข้างนอก

2.3.4 การปรับสภาพความดันและอุณหภูมิให้น้ำในอาหารเป็นของแข็งที่ระดับต่ำกว่าจุดรวมสามสถานะ (triple point) แล้วให้พลังงานความร้อนหรือลดความดันลงอีกทำให้เกิดการระเหิดน้ำเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นไอโดยตรง วิธีการนี้เรียกว่าการทำแห้งด้วยการแช่เยือกแข็ง (freeze drying)

การทำแห้งอีกแบบหนึ่งที่ไม่เกี่ยวกับพลังงานความร้อนแต่เป็นการใช้ความดันออสโมติกลดปริมาณน้ำจากชิ้นอาหารได้แก่ การทำผลไม้แช่อิ่ม เมื่อแช่ชิ้นผลไม้ในน้ำเชื่อม น้ำในอาหารจะเคลื่อนย้ายออกมาที่น้ำเชื่อมข้างนอกและน้ำตาลเคลื่อนที่เข้าไปในชิ้นผลไม้ จนความเข้มข้นของน้ำตาลภายในและภายนอกชิ้นผลไม้เท่ากัน แต่วิธีนี้ยังคงเหลือน้ำในชิ้นผลไม้อีกมากจึงนิยมนำไปทำแห้งต่อ

2.4 การเคลื่อนที่ของน้ำ

การเคลื่อนที่ของน้ำเมื่อได้รับพลังงานความร้อนจากภายในชิ้นอาหารออกมาที่ผิว มี 2 วิธีคือ

2.4.1 การเคลื่อนที่ด้วยแรงคะปิลลารี (Capillary force) เป็นการเคลื่อนที่ในอาหารที่มีเซลล์โปร่งมีช่องว่างระหว่างเซลล์ต่อเนื่องกันเป็นทางแคบๆ เกิดแรงดันของน้ำขึ้นตามท่อ การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นได้สะดวกรวดเร็ว แต่จะหยุดเมื่อน้ำในทางแคบๆ นั้นขาดตอนลง

2.4.2 การเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ (Diffusion) ผ่านเซลล์ เป็นการเคลื่อนที่ในอาหารที่มีเนื้อแน่น ไม่มีช่องว่างระหว่างเซลล์ที่ต่อเนื่องเป็นทางแคบๆ หรือเกิดในอาหารที่อบแห้งไประยะหนึ่งที่แรงผ่านช่องแคบหมดไปแล้ว น้ำจะต้องแพร่ผ่านเซลล์จึงเคลื่อนที่ได้ช้า

น้ำเมื่อเคลื่อนที่มาที่ผิวอาหารแล้วจึงระเหยกลายเป็นไอ เคลื่อนย้ายออกไปกับกระแสลมหรือถูกดูดออกไปด้วยระบบสุญญากาศ

2.5 อัตราการทำแห้ง

ลักษณะการเคลื่อนย้ายของน้ำในอาหารมีผลต่ออัตราการทำแห้ง(การสูญเสียน้ำต่อหนึ่งหน่วยเวลา) การทำแห้งจะสิ้นสุดลงเมื่อความชื้นของอากาศในเตาสมดุลกับความชื้นของอาหารหรือค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเท่ากับค่าอเทอโรเอกทวิตซ์ของอาหารคูณ 100 และเรียกความชื้นของอาหารขณะนั้นว่า ความชื้นสมดุล

สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ซึ่งมีไอน้ำเป็นส่วนประกอบอย่างเดียว ความดันไอลอย (Partial pressure of vapor) จึงมีค่าเท่ากับความดันไอรวม (Total pressure) และความดันไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าสูงกว่าความดันไอน้ำในวัสดุ จึงไม่มีการแพร่ของความชื้น ดังนั้นในการ

2.5.1 ช่วงเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุ (Heat up Period)

ในช่วงแรกของการอบแห้งความร้อนที่ให้กับวัสดุ จะอยู่ในรูปของ sensible heat โดยทำให้อุณหภูมิของวัสดุสูงขึ้นจนถึงปริมาณอุณหภูมิกระเปาะเปียก สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อน แต่สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง อุณหภูมิของวัสดุจะสูงขึ้นจนถึงจุดเดือดของน้ำในวัสดุซึ่งจะเป็นช่วงที่ปริมาณความร้อนสูงและถ้าอุณหภูมิของไอน้ำร้อนไม่สูงพอจะทำให้เกิดการกลั่นตัวของไอน้ำที่ผิวของวัสดุ จะทำให้ความชื้นในวัสดุเพิ่มขึ้น ปริมาณไอน้ำกลั่นตัวจะขึ้นอยู่กับ

1. Thermal diffusivity ของวัสดุ
2. ความชื้นในวัสดุ
3. อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

2.5.2 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Rate Drying Period)

ความร้อนจากลมร้อนจะถ่ายเทไปยังผิวของวัสดุ โดยการนำความร้อนผ่านชั้นฟิล์มของก๊าซ (gas film) และวัสดุจะแพร่ความชื้นจากผิวผ่านชั้นฟิล์มของก๊าซไปยังลมร้อน โดยมีผลต่างของอุณหภูมิและผลต่างของความดันไอที่ผิวของวัสดุและลมร้อน เป็นตัวขับเคลื่อนตามลำดับ โดยวัสดุจะมีอุณหภูมิประมาณอุณหภูมิกระเปาะเปียก ส่วนไอน้ำร้อนยวดยิ่งการนำความร้อนจากชั้นฟิล์มของไอน้ำไปยังวัสดุ โดยมีผลต่างของอุณหภูมิจากไอน้ำร้อนยวดยิ่งและผิววัสดุเป็นแรงขับเคลื่อน และเนื่องจากโดยรอบวัสดุประกอบไปด้วยไอน้ำ ดังนั้นการถ่ายเทความชื้นจึงไม่ได้เกิดจากการแพร่ (diffusional mass transfer) แต่เกิดจากการพามวลของไอน้ำ ซึ่งเกิดจากความแตกต่างระหว่างความดันไอของไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับความดันไอที่ผิวของวัสดุเป็นแรงขับเคลื่อน อุณหภูมิของวัสดุจะคงที่ที่จุดเดือดของน้ำที่ความดันในระบบตลอดจนกระทั่งความชื้นลดลงจนถึงความชื้นวิกฤต

2.5.3 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling Rate Drying Period)

ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงความชื้นของวัสดุมีค่าต่ำกว่าความชื้นวิกฤต การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของวัสดุเท่านั้น แต่เกิดจากการถ่ายเทในเนื้อวัสดุด้วย การเคลื่อนที่ของไอน้ำจากภายในวัสดุมายังผิวช้ากว่าการพาความชื้นจากผิววัสดุไปยังอากาศ ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง อัตราการระเหยของน้ำจะถูกควบคุมโดยความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในวัสดุ ส่งผลให้อัตราการระเหยของน้ำลดลงในขณะที่อัตราการถ่ายเทความร้อนจากของไหลมายังวัสดุยังคงเท่าเดิม ดังนั้นจึงทำให้อุณหภูมิของวัสดุมีค่าสูง อัตราการระเหยในช่วงนี้จะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัสดุมากกว่าคุณสมบัติของตัวกลาง

อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปอัตราการอบแห้งสำหรับกระบวนการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนไม่แตกต่างกันมากนัก จุดใหญ่ที่แตกต่างกันคือ การกลั่นตัวของไอน้ำบนผิววัสดุ ในช่วงเพิ่มอุณหภูมิวัสดุและการทำให้อุณหภูมิของวัสดุสูงขึ้นซึ่งการอบแห้งแบบไอน้ำจะเร็วกว่ากันขึ้นอยู่กับ

1. ปริมาณไอน้ำกลั่นตัวที่เกิดขึ้น ถ้ามีปริมาณมากจะทำให้เวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้นซึ่งสามารถลดปัญหานี้ได้โดยให้ความร้อนแก่วัตถุอบแห้งก่อนทำการทดลอง
2. อุณหภูมิของตัวกลางสูงหรือต่ำกว่า inversion temperature ถ้าอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงกว่า inversion temperature การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะเร็วกว่าลมร้อน
3. ความดันไอของไอน้ำร้อนยวดยิ่งในระบบอบแห้ง ถ้าใช้ความดันไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนก็จะสูงตาม ทำให้การอบแห้งเร็วขึ้น

สมการอบแห้งชั้นบางสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ สมการทางทฤษฎี, สมการกึ่งทฤษฎีและสมการเอมไพริคัล โดยที่สมการอบแห้งทางทฤษฎีพิจารณาการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุที่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุน การเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุส่วนใหญ่อยู่ในรูปของของเหลวที่เป็นผลเนื่องจากความเข้มข้นของความชื้นสมการทางทฤษฎีจะแสดงการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของน้ำในลักษณะการแพร่เมื่อสมประสิทธิการแพร่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการอบแห้ง แต่อย่างไรก็ตามสมการทางทฤษฎีมีจำนวนเทอมในการวิเคราะห์จำนวนมากขึ้นอยู่กับรูปร่างของผลิตภัณฑ์

สมการอบแห้งกึ่งทฤษฎีเป็นสมการจำลองการอบแห้งแบบง่าย ๆ โดยการนำสมการทางทฤษฎีมาวิเคราะห์ให้ง่ายขึ้น และไม่ต้องนำรูปทรงของผลิตภัณฑ์มาพิจารณา ซึ่งทำให้สมการไม่มีความซับซ้อน

สมการ Henderson เป็นสมการกึ่งทฤษฎีแบบแรกที้นำมาใช้ในการคำนวณอัตราส่วนความชื้น โดยพิจารณาเฉพาะเทอมแรกในสมการทางทฤษฎี มีรูปแบบสมการดังนี้

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} = A_0 \exp(k_0 t) \quad (1)$$

สมการ Two term เป็นสมการที่อธิบายการอบแห้งการอบแห้งผลไม้ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (Lahsasni *et al.*, 2004) และการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคฟลูอิดไอดีซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (Taechapairoj *et al.*, 2003) ได้อย่างน่าพอใจ โดยมีรูปแบบสมการมาจาก การพิจารณาสองเทอมแรกในสมการทางทฤษฎี ดังนี้

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} = A_0 \exp(k_0 t) + A_1 \exp(k_1 t) \quad (2)$$

สมการอบแห้งเอมไพริคเคิลเป็นสมการที่ใช้ในการทำนายอัตราการอบแห้งได้ดี แต่มีข้อจำกัดคือเงื่อนไขการอบแห้งต้องตรงกับสภาวะการทดลอง สมการ Logarithmic equation เป็นสมการเอมไพริคเคิลที่ใช้ในการทำนายอัตราการอบแห้งใบหม่อนขาว Doymaz (2004) and Yaldiz et al. (2001) ได้ดี โดยรูปสมการจะเป็นการเพิ่มพารามิเตอร์เข้าไปในสมการอบแห้งของ Henderson รูปแบบของสมการ Logarithmic มีดังนี้

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} = A_0 \exp(k_0 t) + C \quad (3)$$

สมการอบแห้งเอมไพริคเคิลอีกแบบหนึ่งที่เป็นที่นิยมทั่วไปคือสมการ Page มีรูปแบบสมการดังนี้

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} = \exp(k_0 t^n) \quad (4)$$

สมการนี้เป็นสมการที่ใช้ในการทำนายอัตราการอบแห้งพริกไทยแดง(Doymaz and Pala, 2002)การอบแห้งข้าวโพด(Doymaz and Pala, 2003)ด้วยอากาศร้อนได้ดี

จากทั้งสี่สมการที่กล่าวมาข้างต้นใช้ในการทำนายลักษณะเฉพาะของการอบแห้งของอากาศร้อนได้ดี

สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในระยะเริ่มต้นการอบแห้งจะเกิดการควบแน่นที่ผิวของผลิตภัณฑ์ เป็นช่วงสั้นๆ และช่วงเริ่มต้นการอบแห้งสั้นๆนี้ไม่มีแบบจำลองอบแห้งทางคณิตศาสตร์ ทำนายช่วงเวลาดังกล่าวได้ (Tang et al., 2004; Taechapairoj et al., 2003)จากผลดังกล่าวจะทำให้อัตราส่วนความชื้นสูงกว่าอัตราส่วนความชื้นเริ่มต้นเล็กน้อย ดังนั้น Tang et al. (2004) จึงนำสมการอบแห้ง Page's equation มาดัดแปลงเพิ่มค่าคงที่ลงในสมการเพื่อให้เหมาะสมกับการทำนายการเกิดการควบแน่นของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและเรียกสมการนี้ว่า สมการดัดแปลง ของ Page

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} = A_0 \exp(k_0 t^n) \quad (5)$$

เมื่อ	MR	คือ อัตราส่วนความชื้น
	M_t	คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ, % dry basis
	M_e	คือ ความชื้นสมดุล, % dry basis
	M_i	คือ ความชื้นเริ่มต้น, % dry basis
	t	คือ เวลา, นาที

A_0, B_0, k_0, k_1, n คือ พารามิเตอร์ของสมการ

ในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสมการการอบแห้งได้โดยใช้เทคนิคของการวิเคราะห์ถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear regression) ของอัตราการอบแห้ง(MR)ต่อเวลา(t) ผลการวิเคราะห์การถดถอย นำมาหาความสัมพันธ์แบบแม่นยำ(The exact fitting)ระหว่างอุณหภูมิการอบแห้งกับค่าพารามิเตอร์การอบแห้งด้วยสมการQuadratic

$$\chi = a_0 T^2 + a_1 T + a_2 \quad (6)$$

เมื่อ χ ค่าพารามิเตอร์จากการทดลองจากสมการอบแห้งที่เลือกที่อุณหภูมิต่างๆ และนอกจากนี้ยังใช้ค่า The sum square error (SSE) ดังสมการ

$$SSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp}} - MR_{\text{pred}})^2 \quad (7)$$

เป็นดัชนีบ่งชี้ที่แสดงความสามารถในการทำนายของสมการที่นำมาอธิบายผลการทดลองและชี้วัดว่าสมการใดเหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้ต่อไป

2.6 การเปลี่ยนแปลงของอาหารเนื่องจากการอบแห้ง

การอบแห้งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอาหารมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของอาหารและสภาวะที่ใช้ในการอบแห้ง ดังนี้คือ

2.6.1 การหดตัว การเสียน้ำทำให้เซลล์อาหารหดตัวจากผิวนอก ส่วนที่แข็งจะคงสภาพได้ ส่วนที่อ่อนกว่าจะยุบลงไป อาหารที่มีน้ำมากจะหดตัวบิดเบี้ยวมาก การทำแห้งอย่างรวดเร็วจะหดตัวน้อยกว่าการทำแห้งอย่างช้าๆ

2.6.2 การเปลี่ยนสี อาหารที่ผ่านการทำแห้งมักมีสีเข้มขึ้นเนื่องจากความร้อนหรือปฏิกิริยาเคมีที่เกิดสีน้ำตาล อุณหภูมิและช่วงเวลาที่อาหารมีความชื้น 10 – 20 % มีผลต่อความเข้มของสี จึงควรหลีกเลี่ยงอุณหภูมิสูงในช่วงความชื้นนี้

2.6.3 การเกิดเปลือกแข็ง เป็นลักษณะที่ผิวอาหารแข็งเปลือกหุ้มส่วนในที่ยังไม่แห้งไว้เกิดจากในช่วงแรกให้น้ำระเหยเร็วเกินไป น้ำจากด้านในเคลื่อนที่มาที่ผิวไม่ทัน หรือมีสารละลายของน้ำตาล โปรตีนเคลื่อนที่มาแข็งตัวที่ผิว สามารถหลีกเลี่ยงโดยไม่ใช้อุณหภูมิสูงและใช้อากาศที่มีความชื้นสูงเพื่อไม่ให้ผิวอาหารแห้งก่อนเวลาอันควร

2.6.4 การเสียความสามารถในการคืนสภาพ อาหารแห้งบางชนิดต้องนำมาคืนสภาพแต่การคืนสภาพโดยการเติมน้ำ จะไม่ได้สภาพเหมือนเดิม เพราะเซลล์อาหารเสียความยืดหยุ่นของผนังเซลล์และโปรตีนเสียความสามารถในการดูดน้ำ อาหารที่ทำแห้งด้วยการแช่เยือกแข็งจะมีความสามารถในการคืนสภาพที่ดีที่สุด เพราะไม่ได้ให้ความร้อนที่จะทำให้ผนังเซลล์หรือเปลี่ยนโครงสร้างของสตาร์ชและโปรตีน

2.6.5 การเสียคุณค่าอาหารและสารระเหย เกิดจากการเสื่อมสลายของวิตามินซีและแคโรทีนจากปฏิกิริยาออกซิเดชันไรโบฟลาวินจากแสงไธอะมีนจากความร้อน ยิ่งใช้เวลาทำแห้งนาน การสูญเสียก็ยิ่งมาก โปรตีนมีการสูญเสียบางส่วนด้วยความร้อนเช่นเดียวกัน การสูญเสียสารระเหยเนื่องจากความร้อนทำให้กลิ่นของอาหารแห้งลดน้อยลงหรือแตกต่างไปจากเดิม

2.7 ความชื้นในวัสดุ

ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ เมื่อเทียบกับมวลของวัสดุขึ้นหรือแห้ง ความชื้นสามารถแสดงได้ 2 แบบ คือ

1. ความชื้นมาตรฐานเปียก

$$M_w = \left(\frac{w-d}{w} \right) \quad (2.1)$$

เมื่อ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (wet basis)
 w คือ มวลของวัสดุ kg
 d คือ มวลวัสดุแห้ง kg

ความชื้นแบบนี้นิยมใช้ในการการค้า โดยทั่ว ๆ ไปจะอ้างอิงในรูปของเปอร์เซ็นต์

2. ความชื้นมาตรฐานแห้ง

$$M_d = \left(\frac{w-d}{d} \right) \quad (2.2)$$

เมื่อ M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (dry basis)
 w คือ มวลของวัสดุ kg
 d คือ มวลวัสดุแห้ง kg

ความชื้นแบบนี้นิยมใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เพราะช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้น เนื่องจากมวลแห้งของวัสดุมีค่าเกือบจะคงที่ในระหว่างการอบแห้ง

จากสมการ (2.1) และ (2.2) สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง ความชื้นมาตรฐาน เปียกและความชื้นมาตรฐานแห้ง ได้ดังนี้

$$M_w = \frac{M_d}{(1 + M_d)} \quad (2.3)$$

$$M_d = \frac{M_w}{(1 - M_w)} \quad (2.4)$$

2.8 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญตัวหนึ่งที่ใช้ในการออกแบบห้องอบแห้ง และใช้ประกอบในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้ง แบ่งออกได้เป็นสองชนิด คือความหนาแน่นจริง และความหนาแน่นปรากฏ ความหนาแน่นจริงหมายถึงอัตราส่วนของมวลของวัสดุต่อปริมาตรของวัสดุ ส่วนความหนาแน่นปรากฏมักใช้กับวัสดุซึ่งกองรวมกันอยู่เป็นปริมาณมาก และหมายถึงอัตราส่วนของมวลต่อปริมาตรทั้งหมด ซึ่งรวมปริมาตรของเม็ดวัสดุและปริมาตรอากาศที่แทรกตัวอยู่ตาม ช่องว่าง สัดส่วนช่องว่างของอากาศ ความหนาแน่นจริงและความหนาแน่นปรากฏ มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_t} \quad (2.5)$$

เมื่อ ε คือ สัดส่วนช่องว่างอากาศ

ρ_b คือ ความหนาแน่นปรากฏ kg/m^3

ρ_t คือ ความหนาแน่นจริง kg/m^3

โดยทั่วไปความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นจริงและความชื้น หรือความหนาแน่นปรากฏและความชื้น มักเขียนในรูปสมการเชิงเส้น ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\rho = a + bM \quad (2.6)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่น kg/m^3

M คือ ความชื้นของวัสดุ % dry basis

a, b คือ ค่าคงที่

ค่าสัดส่วนช่องว่างอากาศมักขึ้นอยู่กับความชื้นในลักษณะเชิงเส้นเช่นกัน เขียนได้ว่า

$$\varepsilon = a + bM \quad (2.7)$$

เมื่อ ε คือ สัดส่วนช่องว่างอากาศ

M คือ ความชื้นของวัสดุ % dry basis

a, b คือ ค่าคงที่

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการทดลองหาจลนศาสตร์การอบแห้ง ทดลองเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่ อุณหภูมิที่ 130 150 และ 170°C ทดลองเปรียบเทียบคุณภาพด้านสี และสมบัติทางกายภาพของข้าวเหนียวหนึ่งสัปดาห์ที่ได้จากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ผู้วิจัยได้ดำเนินการดังนี้

อุปกรณ์การทดลองและเครื่องมือวัด

1. อุปกรณ์การทดลอง

1.1 เครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลองศึกษาในการวิจัยนี้ เป็นเครื่องอบแห้งที่นิสิตระดับปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมศาสตร์เครื่องกล(การผลิต) 4 คน และ นิสิตระดับปริญญาโทสาขาเทคโนโลยีพลังงาน ร่วมกันดำเนินการจัดสร้าง ลักษณะการทำงานเริ่มจากการป้อนไอน้ำเข้าระบบ ไอน้ำจะถูกทำให้ร้อนโดยอุปกรณ์ให้ความร้อนกลายเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่ง หลังจากนั้นจะผ่านเข้าสู่ห้องอบแห้งเพื่อลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ โดยที่ไอน้ำในระบบจะถูกหมุนเวียนโดยพัดลม ลักษณะรายละเอียดของเครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งมีอุปกรณ์หลักประกอบด้วย

1. ห้องอบแห้ง เป็นรูปทรงกระบอกทำด้วยท่อ Schedule.40 Ø 200 mm. และสูง 600 mm. ตะแกรงสำหรับบรรจุผลิตภัณฑ์ ทำจากสแตนเลส
2. อุปกรณ์ให้ความร้อน(Superheater) มีขนาด 9 kW โดยมีเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบ PID มีค่าความถูกต้อง $\pm 1^{\circ}\text{C}$
3. พัดลม(Blower) เป็นแบบเหวี่ยงใบพัดโค้งหลัง(Backward-curved centrifugal blower) สามารถปรับความเร็วรอบได้
4. เครื่องกำเนิดไอน้ำ (Boiler) ขนาด 200 kg/h

1.2 ตู้อบไฟฟ้า(Oven)

เพื่ออบหาความชื้นของข้าวเหนียวตัวอย่างที่ 103°C เป็นเวลา 72 ชม. แล้วคำนวณตามสมการที่ (3.1) และ (3.2)

1.3 เครื่องมือวัดในการทดลอง

ในการทดลองครั้งนี้มีการใช้เครื่องมือวัดประกอบด้วย

1.3.1 อุณหภูมิของอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล Type

K

1.3.2 ความเร็วของตัวกลางอบแห้งวัดด้วยเครื่องวัดความเร็วลมแบบขดลวด

(Hot-wire anemometer) ยี่ห้อ Testo รุ่น 425 ค่าความถูกต้อง $\pm 4\%$

1.3.3 เครื่องชั่งน้ำหนัก ยี่ห้อ OHAUS รุ่น Explorer ความละเอียด 0.01 g และ

0.001 g

การเตรียมตัวอย่าง

นำข้าวเหนียวพันธุ์ กข.6 10 กิโลกรัมไปทำการแช่น้ำ(soaking) 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาึ่ง(steam)ประมาณ 30-40 นาที แล้วนำใส่ภาชนะปิดปล่อยให้เย็นตัวในภาชนะปิดเป็นเวลา 12 ชม. ก่อนนำเข้าเครื่องอบแห้ง

การหาน้ำหนักแห้ง

นำข้าวเหนียวที่ต้องการหาน้ำหนักแห้งไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมงชั่งน้ำหนักหลังจากอบแห้ง จากข้อมูลน้ำหนักแห้งสามารถหาความชื้น ณ เวลาใดๆได้ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2

$$M(d.b.) = \frac{W - D}{D} \quad (3.1)$$

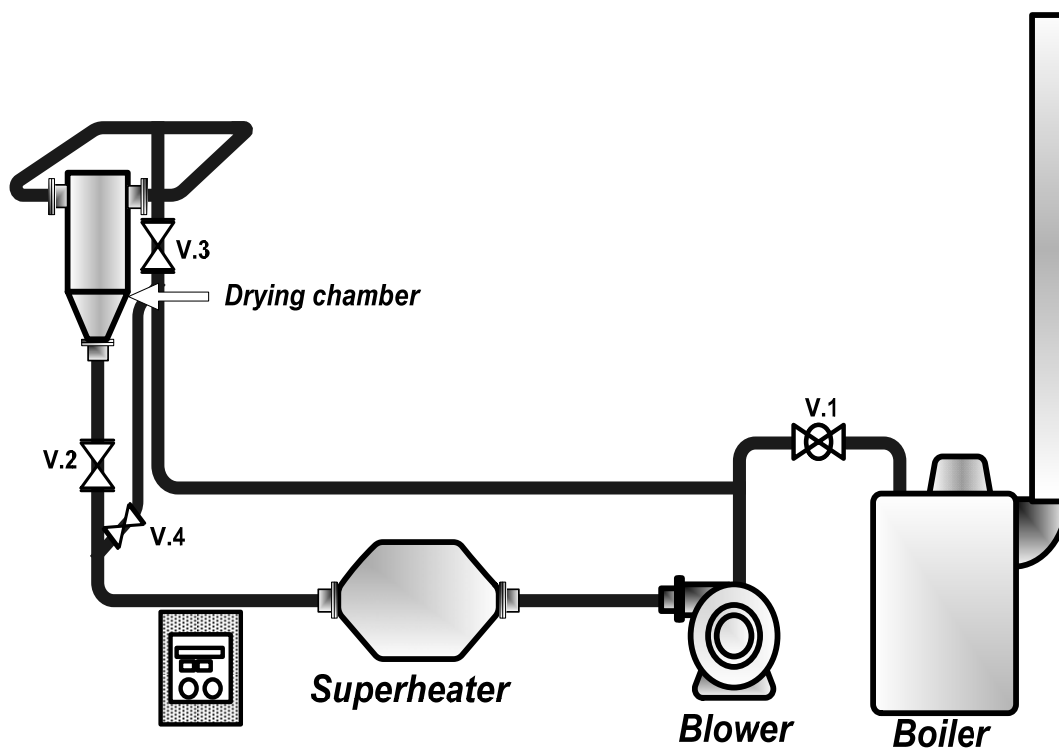
$$M(w.b.) = \frac{W - D}{W} \quad (3.2)$$

เมื่อ $M(d.b.)$ คือ ความชื้นเศษส่วนมาตรฐานแห้ง, kg/kg

$M(w.b.)$ คือ ความชื้นเศษส่วนมาตรฐานเปียก, kg/kg

W คือ น้ำหนัก ณ เวลาใด ๆ , kg

D คือ น้ำหนักแห้ง, kg



ภาพประกอบ 2 ระบบการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

การทดลองอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสัปดาห์

1.4 การอบแห้งข้าวเหนียวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

1.4.1. เปิดวาล์วตัวที่ 1 (V.1) เพื่อให้ไอน้ำเข้าสู่ระบบ โดยวาล์วในระบบทุกตัวถูกเปิดและอุปกรณ์ให้ความร้อนทำงานจนกระทั่งเห็นไอน้ำออกจากวาล์วระยะเวลาหนึ่งเพื่อให้ไอน้ำไล่อากาศที่ค้างอยู่ในระบบออกไป

1.4.2. ปิดวาล์วตัวที่ 4 (V.4)

1.4.3. เดินพัดลมที่ใช้ในการหมุนเวียนไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ปรับอัตราการไหลของไอน้ำร้อนยวดยิ่งแล้ววัดอัตราการไหลของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เท่ากับ 1 m/s

1.4.4. ปรับเครื่องให้ความร้อน ให้อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 130°C

1.4.5. ชั่งน้ำหนักตะแกรง และน้ำหนักผลิตภัณฑ์พร้อมตะแกรงก่อนการอบแห้ง

1.4.6. นำผลิตภัณฑ์พร้อมตะแกรงเข้าห้องอบ

1.4.7. ชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ทุก 10 วินาที ในช่วง 2 นาทีแรก ต่อมาจึงชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ทุกๆ 3 นาที จนกระทั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์คงที่

1.4.8. เปลี่ยนอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็น 150 และ 170 °C ตามลำดับ และดำเนินการทดลองซ้ำตั้งแต่ 4-8

1.5 การอบแห้งข้าวเหนียวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

1.5.1. ปิดวาล์วตัวที่ 1 (V.1) เพื่อใช้อากาศเป็นตัวกลางในการอบแห้ง

1.5.2. ปิดวาล์วตัวที่ 4 (V.4)

1.5.3. เดินพัดลมที่ใช้ในการหมุนเวียนอากาศ ปรับอัตราการไหลของอากาศแล้ววัดอัตราการไหลของอากาศร้อนเท่ากับ 1 m/s

1.5.4. ปรับเครื่องให้ความร้อน ให้อุณหภูมิของอากาศร้อน 130 °C

1.5.5. ชั่งน้ำหนักตะแกรง และน้ำหนักผลิตภัณฑ์พร้อมตะแกรงก่อนการอบแห้ง

1.5.6. นำผลิตภัณฑ์พร้อมตะแกรงเข้าห้องอบ

1.5.7. ชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ทุกๆ 3 นาที จนกระทั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์คงที่

1.5.8. เปลี่ยนอุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็น 150 และ 170 °C ตามลำดับ และดำเนินการทดลองซ้ำตั้งแต่ 4-8

1.6 การทดสอบสี

คุณภาพด้านสีของข้าวเหนียวอบแห้งนี้สุกด้วยเครื่อง Choma meter (Minolta: Model-CR 300) :ซึ่งวัดในเทอมตัวแปร L,a และ b โดย L แสดงค่าความสว่าง(lightness parameter) a แสดงค่าสีแดง(redness parameter) และ b แสดงค่าสีเหลือง(yellowness parameter) ก่อนการวัดทุกครั้งปรับเทียบเครื่องมือโดยใช้แผ่นมาตรฐานสีดำและสีขาว

1.7. การทอด

นำข้าวเหนียวนี้สุกมาทอดด้วยน้ำมันทานตะวัน ในหม้อทอด TOMEX รุ่น DF-243 โดยทอดตัวอย่างครั้งละ 50 กรัม ปริมาณน้ำมัน 2 ลิตร ทอดที่อุณหภูมิ 200 °C เวลา 20 วินาที หลังจากนั้นนำตัวอย่างใส่ขวดปิดผนึก ก่อนนำมาวิเคราะห์คุณภาพ

1.8 การหาอัตราส่วนการพองตัว (expansion ratio)

โดยการวัดความหนาตามแนวรัศมีของตัวอย่างก่อนทอด และหลังทอด ด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์แบบดิจิตอล Mitutoyo รุ่น CD-6" CS อัตราส่วนการ phóngตัวคำนวณโดย (Math and others:2004:429-434)

$$DE = \frac{Dia. after frying - Dia. before frying}{Dia. before frying} \times 100 \quad (3.3)$$

1.9 ความหนาแน่น (bulk density)

โดยนำตัวอย่างชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล ยี่ห้อ OHAUS รุ่น Explorer ความละเอียด 0.01 g 50 กรัม แล้วนำตัวอย่างไปใส่กระบอกตวง ขนาด 500 ml เพื่อหาปริมาตร แล้วนำมาคำนวณหาความหนาแน่น

1.10 ความหนาแน่นจริง (true density)

โดยการนำตัวอย่างไปชั่งด้วยเครื่องชั่ง ดิจิตอลยี่ห้อ OHAUS รุ่น Explorer ขนาด 30 กรัม นำทรายออกตาวาซึ่งน้ำหนักแล้วเทลงในกระบอกตวง สลับกับนำตัวอย่างเทลงในกระบอกตวง จนหมด แล้วอ่านปริมาตรทำการจดบันทึกแล้วนำผลมาคำนวณหาความหนาแน่น

1.11 การทดสอบด้วยวิธี Scanning electron microscope (SEM)

การทดสอบด้วยวิธี Scanning electron microscope (SEM) จะต้องทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งต้องส่งตัวอย่างให้ศูนย์เครื่องมือกลางมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เป็นผู้ทดสอบ โดยจะส่งตัวอย่าง 2 ลักษณะคือ ที่ผิวของเม็ดข้าวเหนียว ใช้กำลังขยาย 3,000 X และภายในของเม็ดข้าวเหนียว โดยการหักเม็ดข้าวเหนียวที่จะทดสอบบริเวณกึ่งกลาง ใช้กำลังขยาย 1,000 X และ 50 X

บทที่ 4

ผลการทดลอง

จากการทดลองศึกษาการอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสีกด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 130 150 และ 170°C ที่ผ่านมาสามารถสรุปผลการของการเปรียบเทียบจลศาสตร์การอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสีกด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและการอบแห้งด้วยอากาศร้อนตลอดจนคุณภาพด้านสี สมบัติทางกายภาพได้ดังต่อไปนี้

จลศาสตร์การอบแห้ง

ในการทดลองศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสีก แบ่งได้เป็นสองกรณี ดังนี้ คือ การอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสีกด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 130 150 และ 170°C และการอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสีกด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 130 150 และ 170°C ที่ความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศที่ไหลเข้าสู่ห้องอบ 1 m/s โดยที่มวลของผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการอบแห้ง 0.150 kg โดยได้ทดลองศึกษาผลของอุณหภูมิและตัวกลางต่ออัตราการอบแห้ง

สำหรับอัตราการอบแห้งอธิบายไว้ในรูปของอัตราส่วนความชื้น(moisture ratio) โดยสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}}$$

เมื่อ M_t คือ ความชื้นผลิตภัณฑ์ที่เวลาใดๆ, dry basis decimal

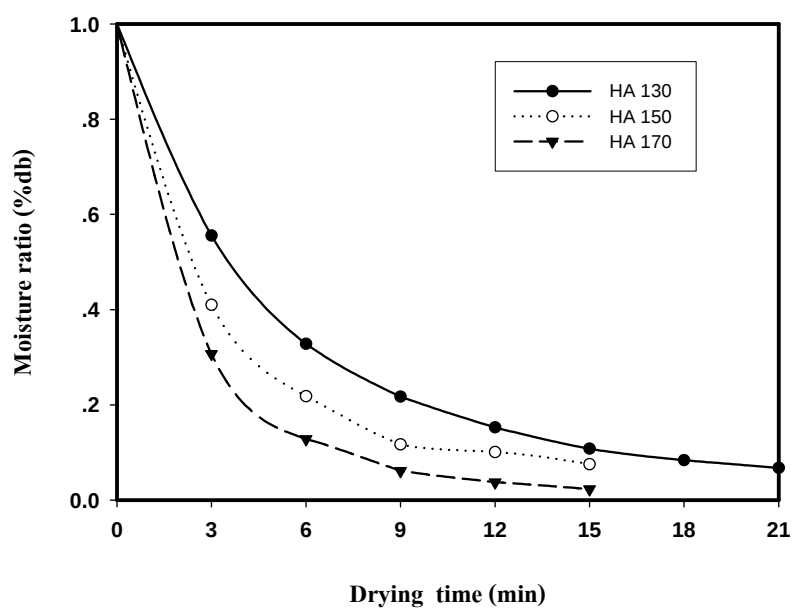
M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์, dry basis decimal

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล, dry basis decimal

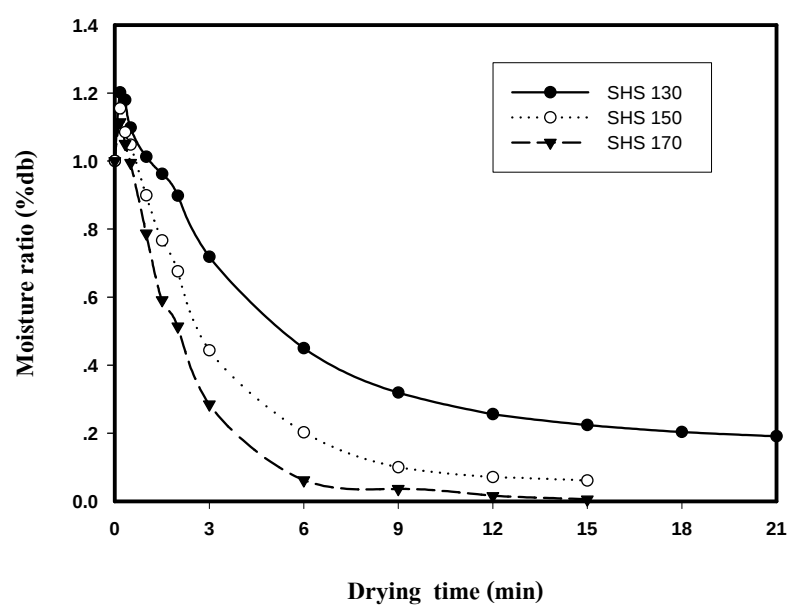
เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของน้ำ ดังนั้นความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการทดลองสมมติให้มีค่าเท่ากับศูนย์

ผลของอุณหภูมิของตัวกลางต่ออัตราการอบแห้ง

จากข้อมูลจากผลการทดลองอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสีกด้วยอากาศร้อนพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงสามารถลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ดังแสดงในภาพ ประกอบ 3 เนื่องจากสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของอากาศร้อนที่อุณหภูมิสูง



ภาพประกอบ 3 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่ 130 150 และ 170°C

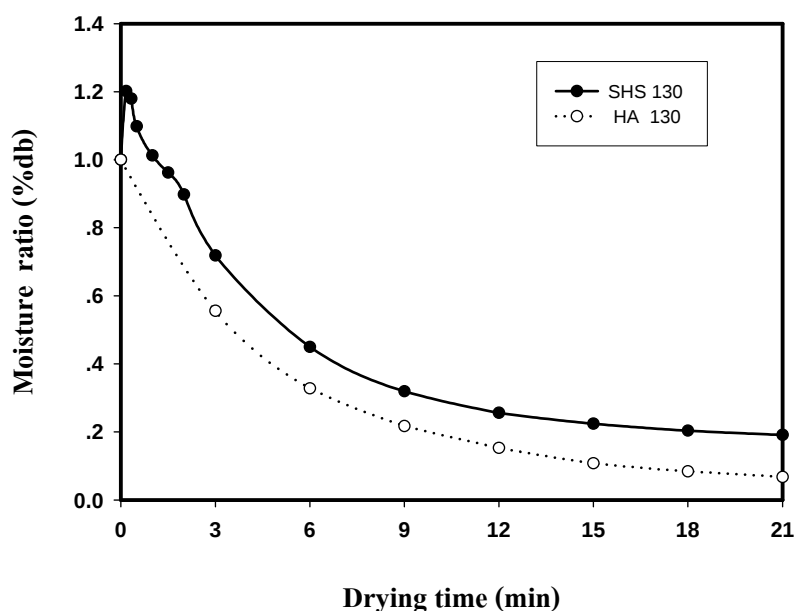


ภาพประกอบ 4 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 130 150 และ 170°C

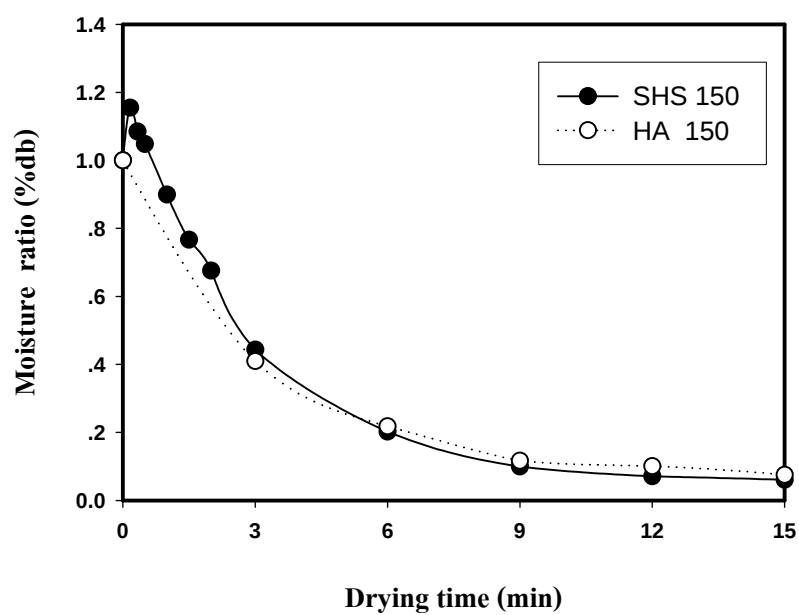
จากผลการทดลองอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสัปดาห์ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งพบว่าในช่วงแรกของการอบแห้ง อัตราส่วนความชื้นอบแห้งสูงเนื่องจากเกิดการควบแน่นของไอน้ำ ที่อุณหภูมิสูงสามารถลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ดังแสดงในภาพประกอบ 4 เนื่องจากสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิสูงมีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ความร้อนถ่ายเทจากไอน้ำร้อนยวดยิ่งไปยังผลิตภัณฑ์เพื่อใช้ในการระเหยน้ำได้มากกว่า ดังนั้นการระเหยของน้ำจึงเกิดได้เร็วกว่า

ผลของตัวกลางการถ่ายเทความร้อนต่ออัตราการอบแห้ง

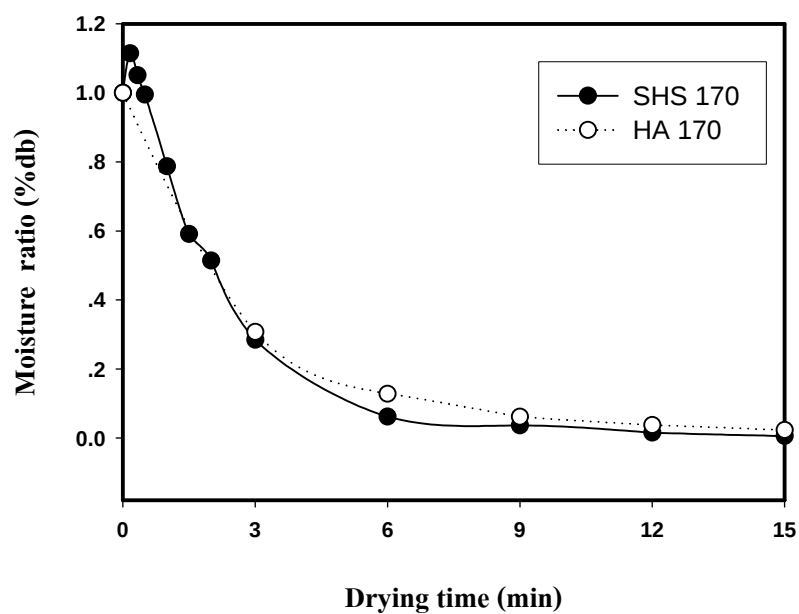
เมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งด้วย อากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิเดียวกัน ที่อุณหภูมิ 130°C การอบแห้งด้วยอากาศร้อนสามารถความชื้นได้เร็วกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ดังแสดงในภาพประกอบ 5 ที่อุณหภูมิ 150°C อัตราการอบแห้งเริ่มมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งอุณหภูมิที่ทำให้อัตราการอบแห้งเท่ากันเรียกว่า อุณหภูมิผกผัน(inversion temperature) ดังแสดงในภาพประกอบ 6 และอุณหภูมิ 170°C อัตราการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเริ่มสูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเล็กน้อยดังแสดงในภาพประกอบที่ 7



ภาพประกอบ 5 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่ 130°C



ภาพประกอบ 6 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่ 150°C



ภาพประกอบ 7 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่ 170°C

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบางข้าวเหนียวหนึ่งสีก

จากข้อมูลผลการทดลองการอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสีกด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนได้ทำการเปรียบเทียบสมการรูปแบบทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ (3.1) ถึง (3.5) ในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสมการการอบแห้งได้โดยใช้เทคนิคของการวิเคราะห์ถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น(nonlinear regression)ของอัตราการอบแห้ง(MR)ต่อเวลา(t) ผลการวิเคราะห์การถดถอย นำมาหาความสัมพันธ์แบบแม่นยำ(The exact fitting)ระหว่างอุณหภูมิการอบแห้งกับค่าพารามิเตอร์การอบแห้งด้วยสมการQuadratic

นอกจากนี้ยังใช้ค่า The sum square error (SSE)เป็นดัชนีบ่งชี้ที่แสดงความสามารถในการทำนายของสมการที่นำมาอธิบายผลการทดลองและชี้วัดว่าสมการใดเหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้ต่อไป ดังแสดงในตาราง 8

ตาราง 6 ค่าคงที่สมการการอบแห้งชั้นบางข้าวเหนียวหนึ่งสีกด้วยอากาศร้อน

Media	Equation	T (°C)	Drying Constant				R ²
Hot air drying	The Henderson's equation	130	A ₀		k ₀		0.991
		150	0.97643		0.16752		0.987
		170	0.98384		0.25486		0.996
	The Page 's equation	130	k ₀		n ₀		0.998
		150	0.25385		0.80367		0.998
		170	0.41351		0.71692		0.999
	The logarithmic equation	130	A ₀	k ₀	C		0.999
		150	0.93147	0.20815	0.06507		0.999
		170	0.92598	0.32645	0.07218		0.999
	The two term equation	130	0.96771	0.40759	0.03099		0.999
		150	A ₀	k ₀	A ₁	k ₁	0.999
		170	0.72932	0.26046	0.27095	0.06927	0.999

ตาราง 7 ค่าคงที่สมการการอบแห้งชั้นบางข้าวเหนียวหนึ่งสีกด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

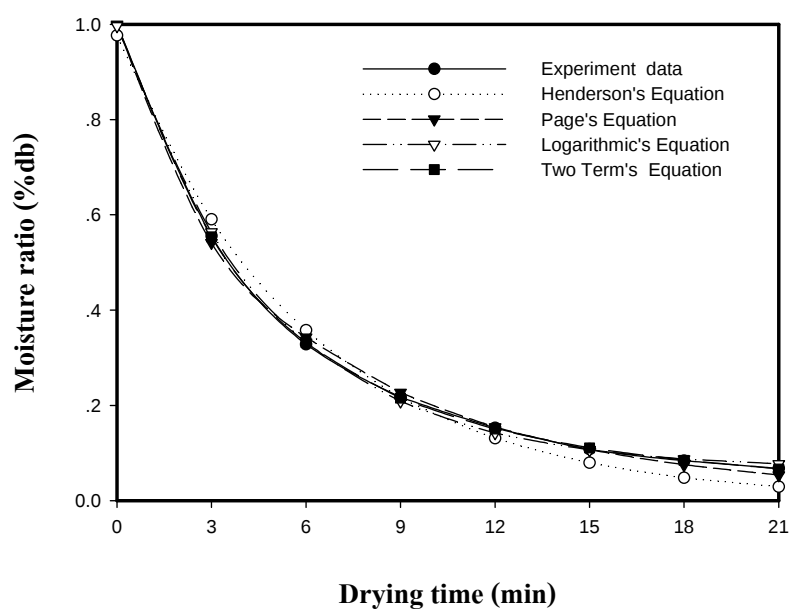
Media	Equation	T (°C)	Drying Constant				R ²
Superheated steam drying	The Henderson's equation		A ₀	k ₀			
		130	1.14000	.12491			0.966
		150	1.14272	.27156			0.982
		170	1.14087	.40970			0.984
	The modified Page's equation		A ₀	k ₀	n ₀		
		130	1.16627	.15851	.89481		0.968
		150	1.11646	.22644	1.14769		0.984
		170	1.08535	.30230	1.37050		0.991
	The logarithmic equation		A ₀	k ₀	C ₀		
		130	1.01811	.18585	.15495		0.978
		150	1.12250	.28660	.02511		0.982
		170	1.14775	.40353	-.00812		0.984
	The two term equation		A ₀	k ₀	A ₁	k ₁	
		130	1.13710	.15856	.03049	-.07949	0.979
		150	.57866	.26699	.56394	.27577	0.982
		170	.57516	.40999	.56575	.40953	0.984

ตาราง 8 ค่าคงที่สมการการอบแห้งชั้นบางข้าวเหนียวหนึ่งสีกด้วยอากาศร้อน

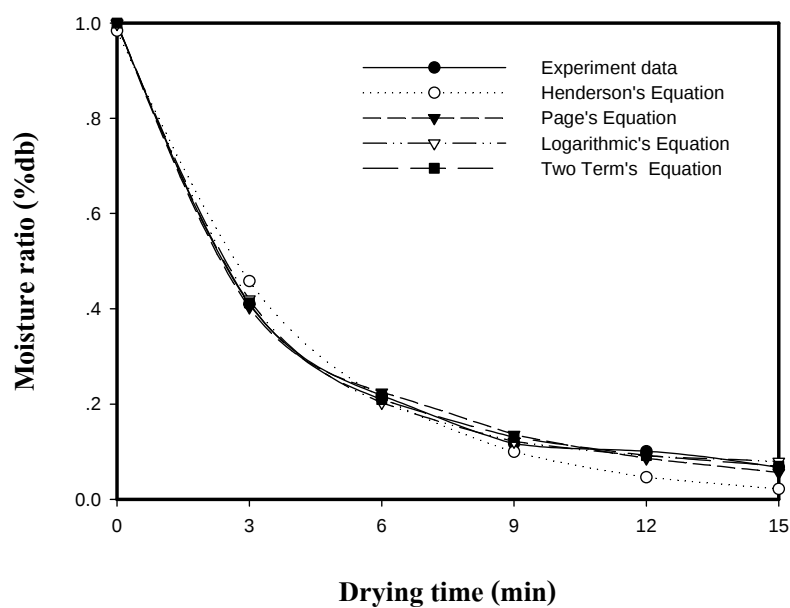
Media	Equation	Parameter in Quadratic Relationship			SSE
		a ₀	a ₁	a ₂	
Hot air drying	The Handerson's equation				
	A ₀	1.020651	-0.00096	0.000005	0.011136
	k ₀	0.18169	-0.00399	0.000030	
	The Page 's equation				
	k ₀	-2.25878	0.02916	-0.00008	0.009787
	n ₀	4.647532	-0.05144	0.000168	
	The logarithmic equation				
	A ₀	2.11836	-0.01680	0.00006	0.00980
	k ₀	-1.46669	0.01892	-0.00005	
	C ₀	-1.15878	0.01726	-0.00006	
	The two term equation				
	A ₀	-2.17649	0.03928	-0.00013	0.00971
	k ₀	-0.34215	0.00296	0.00001	
	A ₁	3.19766	-0.03955	0.00013	
	k ₁	2.00177	-0.02810	0.00010	

ตาราง 9 ค่าคงที่สมการการอบแห้งชั้นบางข้าวเหนียวหนึ่งสุกด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

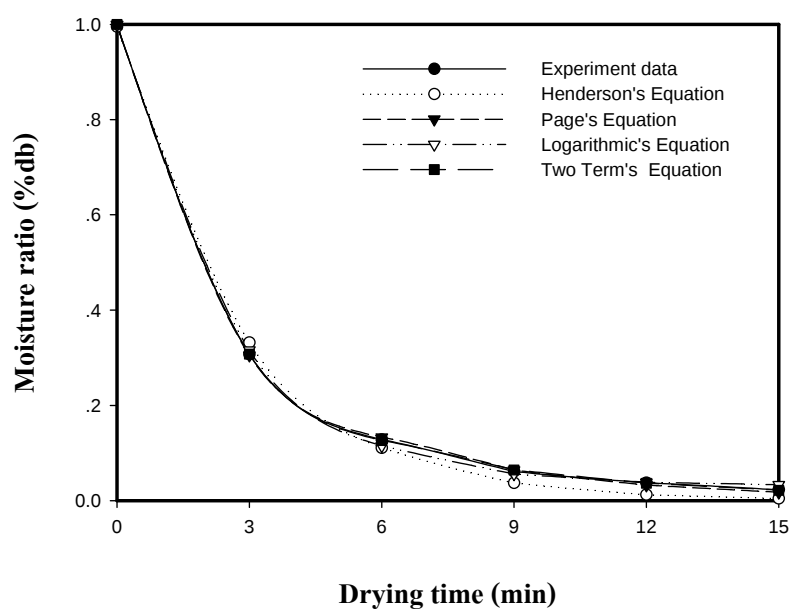
Media	Equation	Parameter in Quadratic Relationship			SSE
		a ₀	a ₁	a ₂	
Superheated steam drying	The Handerson Equation				
	A ₀	1.01098	0.00173	-0.00001	0.00375
	k ₀	-1.03565	0.01031	-0.00001	
	The modified Page's equation				
	A ₀	1.94600	-0.00904	0.00002	0.00305
	k ₀	-0.09008	0.00063	0.00001	
	n ₀	-0.09008	0.00063	0.00001	
	The logarithmic equation				
	A ₀	-1.58917	0.03291	-0.00010	0.00302
	k ₀	-0.07450	-0.00063	0.00002	
	C ₀	3.35406	-0.04031	0.00012	
	The two term equation				
	A ₀	18.29338	-0.22215	0.00069	0.00299
	k ₀	0.29660	-0.00668	0.00004	
	A ₁	-16.39555	0.21274	-0.00066	
	k ₁	-7.78745	0.09528	-0.00028	



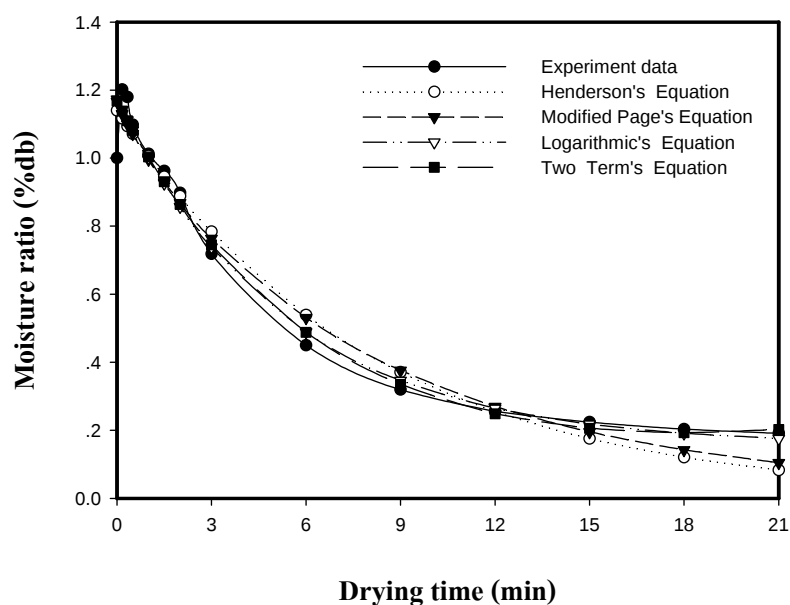
ภาพประกอบ 8 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่ได้จากการทดลอง และสมการทางคณิตศาสตร์ที่อุณหภูมิ 130 °C



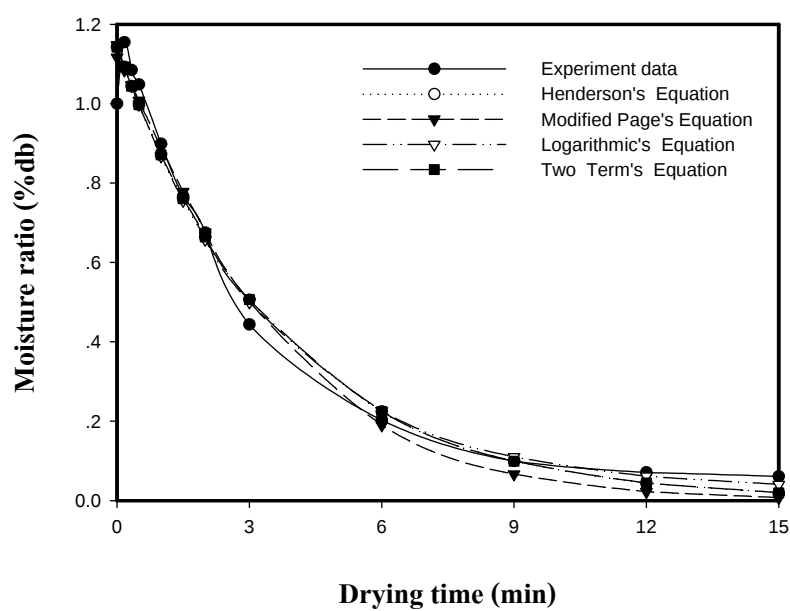
ภาพประกอบ 9 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่ได้จากการทดลอง และสมการทางคณิตศาสตร์ที่อุณหภูมิ 150 °C



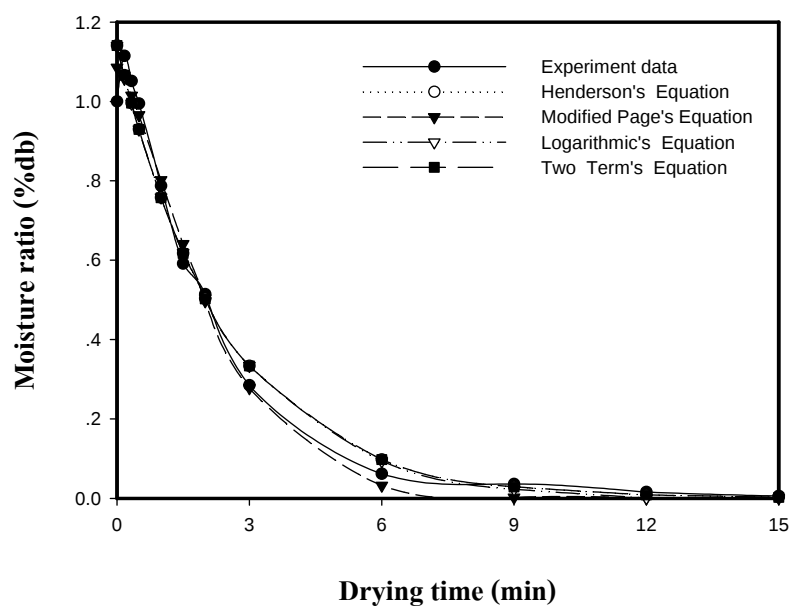
ภาพประกอบ 10 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่ได้จากการทดลอง และสมการทางคณิตศาสตร์ที่อุณหภูมิ 170 °C



ภาพประกอบ 11 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ได้จากการทดลอง และสมการทางคณิตศาสตร์ที่อุณหภูมิ 130 °C



ภาพประกอบ 12 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ได้จากการทดลอง และสมการทางคณิตศาสตร์ที่อุณหภูมิ 150 °C



ภาพประกอบ 13 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ได้จากการทดลอง และสมการทางคณิตศาสตร์ที่อุณหภูมิ 170 °C

คุณภาพของผลิตภัณฑ์

คุณภาพทางด้านสีของข้างเหนียวหนึ่งสูกหลังการอบแห้ง

คุณภาพของข้าวเหนียวหนึ่งสูกหลังการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวดและอากาศร้อนพิจารณาที่ความชื้นที่ ประมาณ 12% d.b. 14% d.b. และ 16 % d.b. ตามลำดับ โดยผลการวัดสีของข้าวเหนียวหนึ่งสูกหลังการอบแห้งแสดงดังตาราง ที่ 10,11 และ12

จากการทดลองพบว่า ตัวกลางในการอบแห้งมีอิทธิพลต่อค่าความสว่าง (L^*) การอบแห้งด้วยอากาศร้อนให้ค่าความสว่างสูง แตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวด ยิ่ง เช่นที่ 16 % d.b. การอบแห้งด้วยอากาศร้อนให้ ค่าความสว่างอยู่ระหว่าง 56.59 ถึง 57.42 สำหรับอากาศร้อน และ 51.91 ถึง 54.85 สำหรับไอน้ำร้อนยิ่งยวด และเมื่ออุณหภูมิเพิ่ม ค่าความสว่างมีแนวโน้มลดลง

ตาราง 10 แสดงค่าความสว่าง(L^* Lightness)ของข้าวเหนียวหนึ่งสูกหลังการอบแห้ง

Media	T($^{\circ}$ C)	L* value		
		12% dry basis	14% dry basis	16% dry basis
HA	130	54.93 $\pm$ 0.74 a	55.51 $\pm$ 0.22 a	57.42 $\pm$ 0.64 a
	150	53.90 $\pm$ 0.39 ab	54.46 $\pm$ 0.40 a	57.63 $\pm$ 0.49 a
	170	52.98 $\pm$ 0.85 b	54.98 $\pm$ 0.18 a	56.59 $\pm$ 0.58 a
S	130	49.75 $\pm$ 0.51 c	51.02 $\pm$ 0.20 b	54.85 $\pm$ 0.58 b
	150	49.70 $\pm$ 0.74 c	51.05 $\pm$ 1.49 b	53.70 $\pm$ 1.28 b
	170	47.35 $\pm$ 0.45 d	49.72 $\pm$ 0.91 b	51.91 $\pm$ 0.29 b

อักษรที่แตกต่างในหลักเดียวกัน หมายถึง แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.5$)

จากการทดลองพบค่าความแดง (a^* ; Redness) อุณหภูมิมีอิทธิพลต่อค่าความแดงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความแดงจะสูงขึ้นตาม การอบด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีแนวโน้มที่มีค่าความแดงสูงกว่าเนื่องจากเกิดการควบแน่นที่บริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ขณะเดียวกันก็เกิด ปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Browning reaction) สอดคล้องกับ Iyato and others (2002)

ตาราง 11 แสดงค่าความแดง(a^* Redness)ของข้าวเหนียวหนึ่งสุกหลังการอบแห้ง

Media	T($^{\circ}$ C)	a^* value		
		12% dry basis	14% dry basis	16% dry basis
HA	130	-1.08 $\pm$ 0.05 a	-1.68 $\pm$ 0.09 a	-1.78 $\pm$ 0.12 a
	150	0.32 $\pm$ 0.52 b	-1.43 $\pm$ 0.36 ab	-1.62 $\pm$ 0.08 a
	170	2.88 $\pm$ 0.08 d	2.39 $\pm$ 0.20 c	-0.52 $\pm$ 0.79 b
SS	130	-1.13 $\pm$ 0.02a	-1.2 $\pm$ 0.09 b	-1.70 $\pm$ 0.08 a
	150	0.86 $\pm$ 0.09 c	-1.23 $\pm$ 0.15 b	-1.61 $\pm$ 0.17 a
	170	3.03 $\pm$ 0.27 d	2.72 $\pm$ 0.11 c	0.77 $\pm$ 0.04 c

อักษรที่แตกต่างในหลักเดียวกัน หมายถึง แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.5$)

จากการทดลองพบค่าความเหลือง (b^* Yellowness) อุณหภูมิมีอิทธิพลต่อค่าความเหลืองเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความเหลืองจะเพิ่มตามขึ้นตาม การอบด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีแนวโน้มที่มีค่าความแดงสูงกว่าเนื่องจากเกิดการควบแน่นที่บริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ ขณะเดียวกันก็เกิด ปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Browning reaction) สอดคล้องกับ Iyato and others (2002)

ตาราง 12 แสดงค่าความเหลือง(b^* Yellowness)ของข้าวเหนียวหนึ่งสุกหลังการอบแห้ง

Media	T($^{\circ}$ C)	b^* value		
		12% dry basis	14% dry basis	16% dry basis
HA	130	14.47 $\pm$ 0.17 a	13.44 $\pm$ 0.59 a	13.48 $\pm$ 0.27 a
	150	16.70 $\pm$ 1.23 b	15.65 $\pm$ 0.33 b	15.43 $\pm$ 0.15 b
	170	18.49 $\pm$ 0.47 cd	17.74 $\pm$ 0.54 c	16.34 $\pm$ 0.57 d
SS	130	15.23 $\pm$ 0.24 a	14.13 $\pm$ 0.37 a	13.15 $\pm$ 0.36 a
	150	17.41 $\pm$ 0.83b c	15.59 $\pm$ 0.32 b	14.36 $\pm$ 0.38 c
	170	19.24 $\pm$ 0.25 d	17.20 $\pm$ 0.28 c	16.07 $\pm$ 0.15 d

คุณภาพทางด้านสีของข้าวเหนียวหนึ่งสุกหลังการทอด

สีหลังการทอดเป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทอดและสียังบอกถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้

จากการทดลอง หลังการทอดค่าความสว่าง(L^* ; Lightness)ของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนสูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่อบด้วยไอน้ำร้อน เช่นที่ 12 % d.b. ค่าความสว่างอยู่ระหว่าง 61.18 ถึง 63.06 สำหรับอากาศร้อน และ 55.72 ถึง 57.88 สำหรับไอน้ำร้อนยวดยิ่ง และอุณหภูมิในการอบจะไม่มีผลต่อค่าความสว่างแต่ การอบแห้งด้วยอากาศร้อนให้ค่าความสว่างสูงกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง และความชื้นลดลงค่าความสว่างลดลง

ตาราง 13 แสดงค่าความสว่าง(L^* Lightness)ของข้าวเหนียวหนึ่งสุกหลังการทอด

$T(^{\circ}\text{C})$		L^* value		
Media		12% dry basis	14% dry basis	16% dry basis
HA	130	63.06 $\pm$ 1.30 a	65.37 $\pm$ 1.95 a	67.06 $\pm$ 0.58 ab
	150	62.53 $\pm$ 1.14 a	63.85 $\pm$ 0.83 ab	65.72 $\pm$ 0.37 abc
	170	61.18 $\pm$ 0.56 a	63.18 $\pm$ 0.68 ab	63.26 $\pm$ 2.36 c
SS	130	57.88 $\pm$ 1.10 b	63.81 $\pm$ 5.18 ab	67.54 $\pm$ 0.64 a
	150	56.65 $\pm$ 1.35 bc	60.23 $\pm$ 1.78 b	65.53 $\pm$ 2.14 abc
	170	55.72 $\pm$ 0.59 c	59.54 $\pm$ 2.15 b	64.42 $\pm$ 1.45 bc

อักษรที่แตกต่างในหลักเดียวกัน หมายถึง แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.5$)

จากการทดลองค่าความแดง (a^* ; Redness) พบว่าความชื้นมีผลต่อค่าความแดงเมื่ออัตราส่วนความชื้นเพิ่มค่าความแดงจะลดลงและอุณหภูมิในการอบแห้งมีอิทธิพลต่อค่าความแดง ค่าอุณหภูมิสูงจะให้ค่าความแดงสูง กว่าอุณหภูมิต่ำ แต่ค่าเฉลี่ยที่อุณหภูมิเดียวกันค่าความแดงของการอบด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าสูงกว่าการอบแห้งอากาศร้อน

ตาราง 14 แสดงค่าความแดง(a^* Redness)ของข้าวเหนียวหนึ่งสัปดาห์หลังการทอด

Media	T($^{\circ}$ C)	a^* value		
		12% dry basis	14% dry basis	16% dry basis
HA	130	1.00 $\pm$ 1.00 a	0.72 $\pm$ 0.14 a	0.43 $\pm$ 0.20 a
	150	1.48 $\pm$ 1.48 ab	0.94 $\pm$ 0.07 bc	0.70 $\pm$ 0.13 b
	170	2.46 $\pm$ 2.46 c	1.37 $\pm$ 0.15 d	1.08 $\pm$ 0.11 c
SS	130	1.21 $\pm$ 1.21 ab	0.85 $\pm$ 0.10 ab	0.66 $\pm$ 0.16 ab
	150	1.61 $\pm$ 1.61 b	1.07 $\pm$ 0.05 c	0.97 $\pm$ 0.16 c
	170	2.97 $\pm$ 2.97 c	1.99 $\pm$ 0.11 f	1.78 $\pm$ 0.05 d

อักษรที่แตกต่างในหลักเดียวกัน หมายถึง แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.5$)

จากการทดลองค่าความเหลือง(b^* ; Yellowness) พบว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเมื่อนำมาทอดแล้วให้ค่าความเหลืองสูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งด้วยอากาศร้อน และเมื่อความชื้นเพิ่มค่าความเหลืองจะลดลง เช่นเดียวกับอุณหภูมิเพิ่มจะทำให้ค่าความเหลืองเพิ่มตาม เมื่อค่าความเหลืองเพิ่ม เป็นคุณลักษณะที่ดีของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทอด (นุช ผลนาค:2545)

ตาราง 15 แสดงค่าความเหลือง(b* Yellowness)ของข้าวเหนียวหนึ่งสัปดาห์หลังการอบแห้ง

T(°C)		b* value		
Media		12% dry basis	14% dry basis	16% dry basis
HA	130	18.30 ± 0.29 a	16.14 ± 0.53 a	14.66 ± 0.74 a
	150	20.10 ± 0.21 b	17.21 ± 0.67 ab	15.48 ± 0.61 a
	170	24.00 ± 0.88 c	20.58 ± 0.64 c	16.17 ± 0.53 b
SS	130	20.53 ± 0.82 b	17.62 ± 0.65 ab	15.84 ± 0.10 b
	150	23.46 ± 0.81 c	21.20 ± 1.00 c	20.03 ± 0.39c
	170	26.66 ± 0.36 d	23.59 ± 1.11 d	20.75 ± 0.49 c

อักษรที่แตกต่างในหลักเดียวกัน หมายถึง แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.5$)

ผลการทดลองหาค่าความหนาแน่นปรากฏ ความหนาแน่นจริง และสัดส่วนช่องว่างอากาศ

จากการทดลองหาค่าคุณภาพด้านความหนาแน่นปรากฏ ความหนาแน่นจริง และสัดส่วนช่องว่างอากาศของข้าวเหนียวหนึ่งสัปดาห์หลังการอบแห้งและหลังการทอด ได้ผลดังตาราง 16 ถึง 18

ตาราง 16 แสดงความหนาแน่นปรากฏของข้าวเหนียวหนึ่งสัปดาห์หลังการอบแห้ง

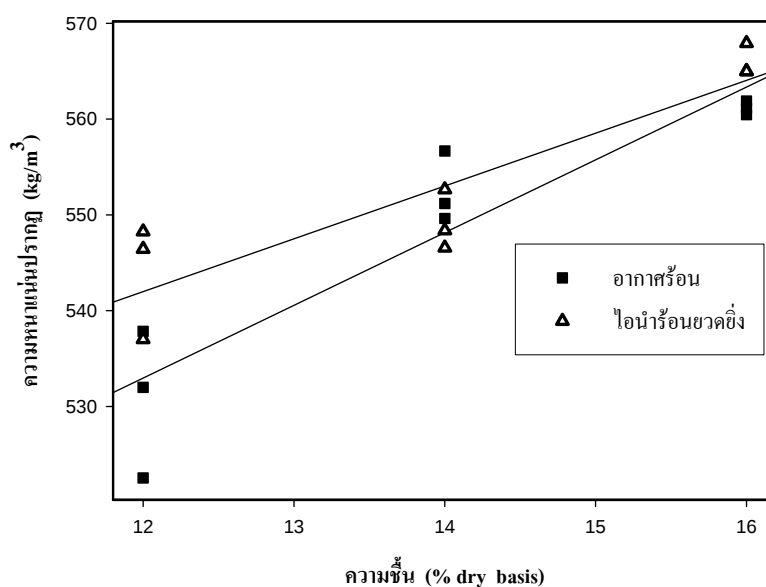
Media	Bulk density	R ²
HA	441.84+7.894M	0.855
SS	475.80+5.517M	0.817

ตาราง 17 แสดงความหนาแน่นจริงของข้าวเหนียวหนึ่งสัปดาห์หลังการอบแห้ง

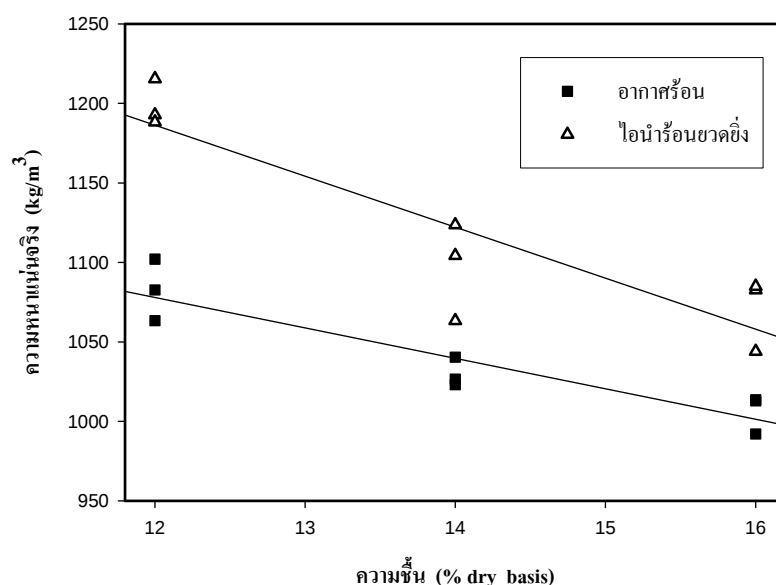
Media	True density	R ²
HA	1307.3-19.123M	0.843
SS	1571.2-32.076M	0.799

ผลการทดลองหาค่าความหนาแน่นปรากฏ ความหนาแน่นจริงและสัดส่วนช่องว่างอากาศ ในช่วงความชื้น 12-16 % dry basis สำหรับข้าวเหนียวหนึ่งสัปดาห์หลังการอบแห้ง โดยพิจารณาความสัมพันธ์กับค่าความชื้นของข้าวเหนียวหนึ่งในรูปแบบสมการเส้นตรง เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาทำสร้างสมการถดถอย โดยพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (r^2) พบว่า ค่าความหนาแน่นปรากฏเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มเนื่องจากการเพิ่มของปริมาตรน้อยกว่าการเพิ่มของน้ำหนักค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (r^2) ของความหนาแน่นปรากฏมีค่า 0.855 และ 0.817 ของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งตามลำดับ

ความหนาแน่นจริงลดลงเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นมีค่า เนื่องจากปริมาตรจะเพิ่มขึ้นตามความชื้นที่เพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (r^2) ของความหนาแน่นจริงมีค่า 0.843 และ 0.799 ของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งตามลำดับ ผลการทดลองและทำนายผลโดยสมการถดถอยแสดงในภาพประกอบ 14 และภาพประกอบ 15



ภาพประกอบ 14 ความหนาแน่นปรากฏด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับอากาศร้อนหลังการอบแห้ง



ภาพประกอบ 15 ความหนาแน่นจริงด้วยไอน้ำร้อนขวดยั้งกับอากาศร้อนหลังการอบแห้ง

ผลการทดลองหาค่าความหนาแน่นปรากฏ ในช่วงความชื้น 12-16 % dry basis สำหรับข้าวเหนียวหนึ่งสัปดาห์หลังการทอด พบว่าหลังทำการหาค่าความหนาแน่นปรากฏของผลิตภัณฑ์จะลดลงเนื่องจากเกิดการการระเหยของน้ำในผลิตภัณฑ์และน้ำมันเข้าแทนที่

และจากการทดลองยังพบว่าความชื้นในผลิตภัณฑ์มีผลต่อความหนาแน่นปรากฏคือความชื้นลดลงผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทอดจะมีความหนาแน่นปรากฏลดลง โดย พิจารณาความสัมพันธ์กับค่าความชื้นของข้าวเหนียวหนึ่งในรูปแบบสมการเส้นตรง เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาทำสร้างสมการถดถอย โดยพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (r^2) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (r^2) ของความหนาแน่นปรากฏมีค่า 0.860 และ 0.815ของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนขวดยั้งตามลำดับ

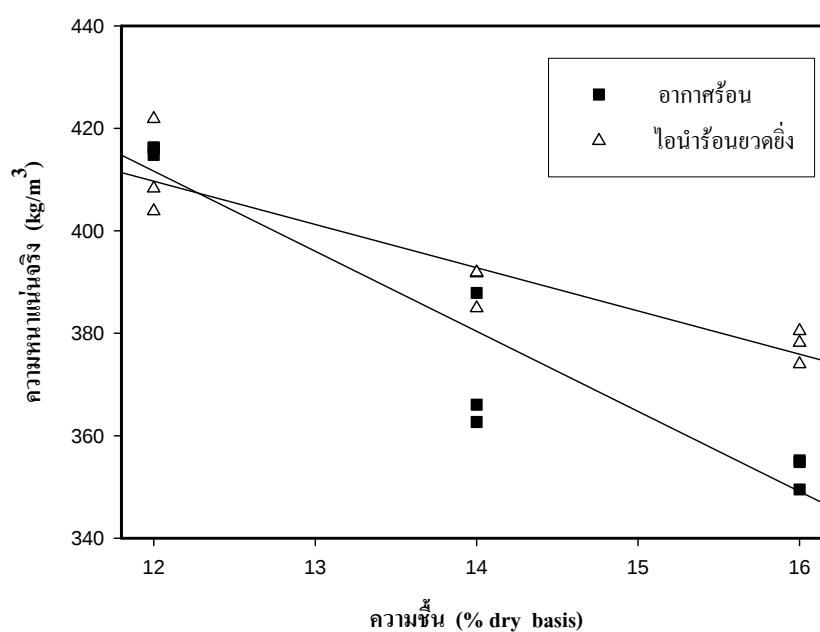
ผลการทดลองหาค่าความหนาแน่นจริง ในช่วงความชื้น 12-16 % dry basis สำหรับข้าวเหนียวหนึ่งสัปดาห์หลังการทอด พบว่าความหนาแน่นจริงเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นหลังการอบแห้งลดลง เนื่องจากเกิดการหดตัวของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง และสัดส่วนของรูที่ผิวผลิตภัณฑ์ลดลงเป็นผลให้น้ำมันเข้าไปในผลิตภัณฑ์น้อยลง เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาทำสร้างสมการถดถอย โดยพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (r^2) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (r^2) ของความหนาแน่นจริงมีค่า 0.894 และ 0.860 ตามลำดับ ผลการทดลองและทำนายผลโดยสมการถดถอยแสดงในภาพประกอบ 16 และภาพประกอบ 17

ตาราง 18 แสดงความหนาแน่นปรากฏของข้าวเหนียวหนึ่งสูกหลังการทอด

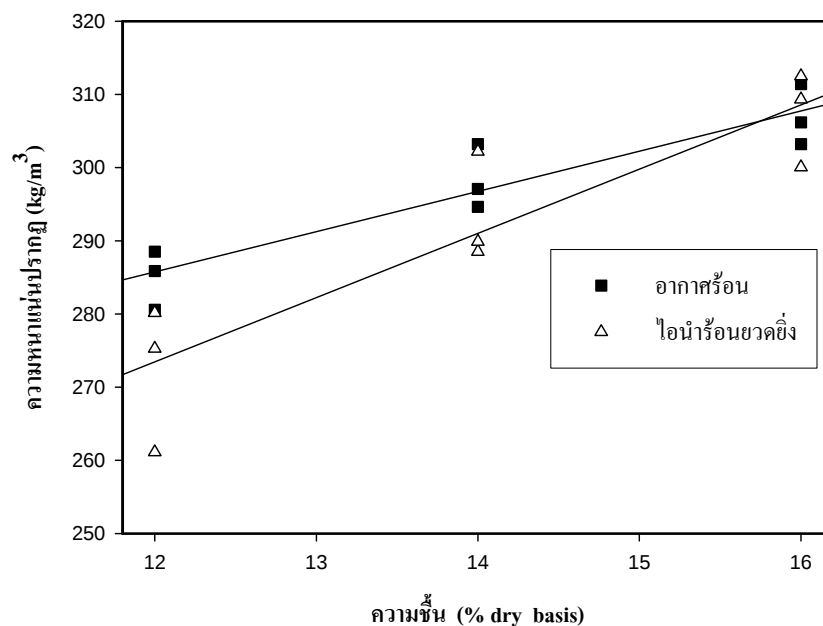
Media	Bulk density	R^2
HA	219.9+5.489M	0.860
SS	168.12+8.777M	0.815

ตาราง 19 แสดงความหนาแน่นจริงของข้าวเหนียวหนึ่งสูกหลังการทอด

Media	True density	R^2
HA	599.31-15.637M	0.894
SS	511.04-8.446M	0.860



ภาพประกอบ 16 เปรียบเทียบความหนาแน่นจริงหลังการทอดด้วยไอน้ำร้อนขดอึ่งกับอากาศร้อน

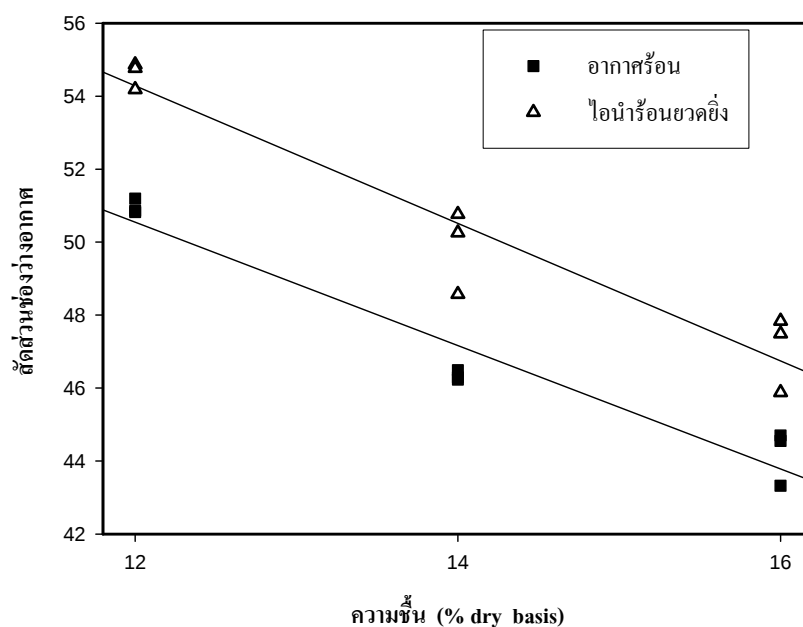


ภาพประกอบ 17 เปรียบเทียบความหนาแน่นปรากฏหลังการทอดด้วยไอน้ำร้อนขวดอึ้งกับอากาศร้อน

ผลการทดลองหาค่าสัดส่วนช่องว่างอากาศ ในช่วงความชื้น 12-16 % dry basis สำหรับข้าวเหนียวหนึ่งสุกหลังการอบแห้ง โดยพิจารณาความสัมพันธ์กับค่าความชื้นของข้าวเหนียวหนึ่งในรูปแบบสมการเส้นตรง เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาทำสร้างสมการถดถอย โดยพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (r^2) พบว่า สัดส่วนช่องว่างอากาศเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นลดลงเนื่องจากการเกิดการหดตัวของผลิตภัณฑ์ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (r^2) ของสัดส่วนช่องว่างอากาศมีค่า 0.941 และ 0.924 ของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนขวดอึ้งตามลำดับ

ตาราง 20 แสดงสัดส่วนช่องว่างอากาศของข้าวเหนียวหนึ่งสุกหลังการอบแห้ง

Media	Porosity	R^2
HA	70.832-1.691M	0.941
SS	76.885-1.884M	0.924

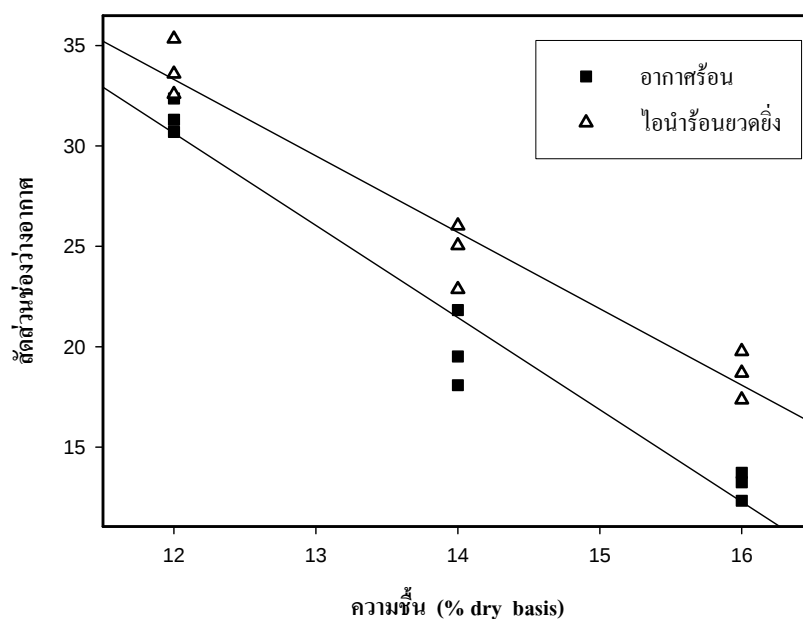


ภาพประกอบ 18 เปรียบเทียบสัดส่วนช่องว่างอากาศหลังการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดย้งกับอากาศร้อน

ผลการทดลองหาค่าสัดส่วนช่องว่างอากาศ ในช่วงความชื้น 12-16 % dry basis สำหรับข้าวเหนียวหนึ่งสุกหลังการทอด โดยพิจารณาความสัมพันธ์กับค่าความชื้นของข้าวเหนียวหนึ่งในรูปแบบสมการเส้นตรง เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาทำสร้างสมการถดถอย โดยพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (r^2) พบว่า สัดส่วนช่องว่างอากาศเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นลดลงหลังการอบแห้งก่อนการทอดเนื่องจากการเกิดการหดตัวของผลิตภัณฑ์ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (r^2) ของสัดส่วนช่องว่างอากาศมีค่า 0.941 และ 0.924 ของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนขวดย้งตามลำดับ

ตาราง 21 แสดงสัดส่วนช่องว่างอากาศของข้าวเหนียวหนึ่งสุกหลังการทอด

Media	Porosity	R^2
HA	85.697-4.589M	0.959
SS	78.982-3.806M	0.953



ภาพประกอบ 19 เปรียบเทียบสัดส่วนช่องว่างอากาศหลังการทอดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับอากาศร้อน

คุณภาพด้านอัตราการพองตัว

อัตราการส่วนการพองตัวของข้าวเหนียวหนึ่งสูกในกระบวนการทอดนั้นเกิดจากการที่ความชื้นภายในผลิตภัณฑ์สลายกลายเป็นไอน้ำทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของ amorphous starch matrix

จากการทดลองพบว่าอัตราการพองตัวหลังการทอดของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งด้วยตัวกลางต่างชนิดกันและอุณหภูมิมีอัตราการพองตัวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.5$)

Media	T(°C)	Expansion ratio		
		12% dry basis ^{ns}	14% dry basis ^{ns}	16% dry basis ^{ns}
HA	130	45.80 ±4.84	43.10±6.19	48.83 ±3.42
	150	41.25 ±10.10	41.90±6.92	45.54 ±18.67
	170	43.57 ±4.24	45.71±7.94	46.83 ±7.53
SS	130	40.02 ±2.47	45.70±1.43	53.14 ±2.84
	150	44.02 ±7.52	45.79±5.09	55.84 ±0.55
	170	43.08 ±8.77	40.64±3.48	52.30 ±1.80

ผลการทดลองด้วยวิธี Scanning electron microscope (SEM) ของข้าวเหนียวหนึ่งสูกที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ

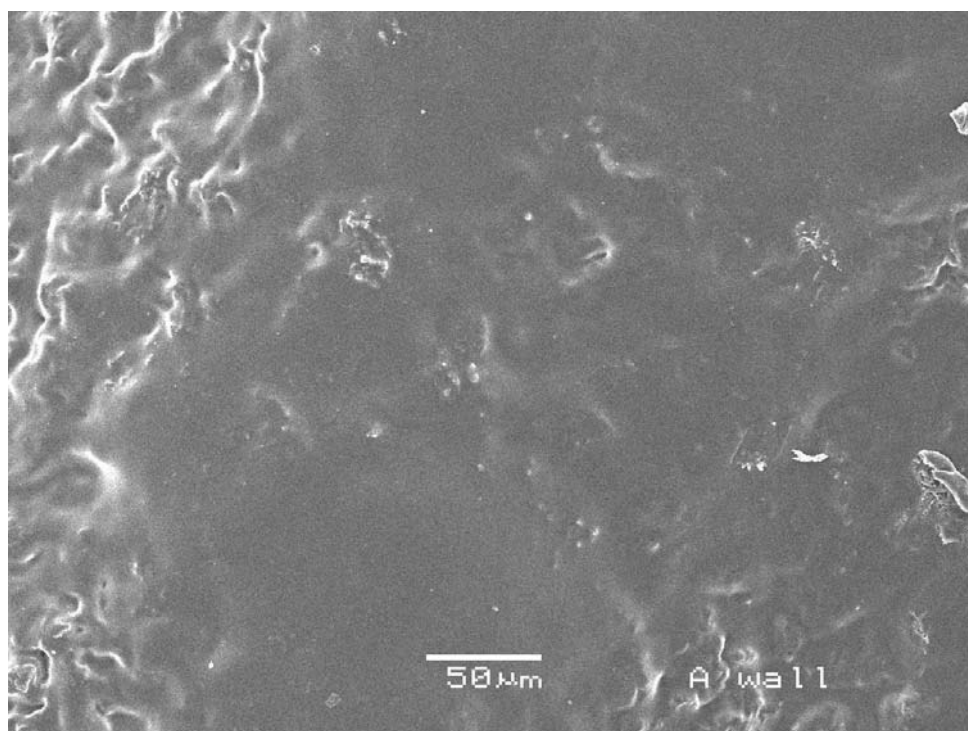
จากการนำตัวอย่างไปทดลองส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยใช้ตัวอย่างข้าวเหนียวหนึ่งสูกก่อนอบแห้ง และข้าวเหนียวหนึ่งสูกที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ เนื่องจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดไม่สามารถส่องตัวอย่างที่มีความชื้นได้ ดังนั้นจึงต้องมีการเอาความชื้นออกจากตัวอย่างข้าวเหนียวหนึ่งสูกก่อนการอบแห้ง โดยใช้เครื่องดูดความชื้น (Electronic Dry Carbinet) รักษาความชื้นสัมพัทธ์ 16 %RH หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างทั้งหมดไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อดูลักษณะทางกายภาพ พิจารณาที่ผิวของข้าวเหนียวที่กำลังขยาย 3,000X แสดงดังภาพประกอบ 20 – 24 พบว่าผิวของเม็ดข้าวเหนียวหนึ่งสูกก่อนการอบแห้งจะค่อนข้างเรียบ ผิวของเม็ดข้าวเหนียวที่ผ่านการอบแห้งโดยวิธีใช้ลมเป่าและวิธีการตากแดดซึ่งเป็นวิธีการอบแห้งแบบช้า ๆ ใช้เวลานาน จะมีผิวขรุขระเนื่องจากการอบแห้งที่ทำให้ผิวของเม็ดข้าวเหนียวแห้งไปติดกับเซลล์ของเม็ดข้าวเหนียวในชั้นใน ผิวของเม็ดข้าวเหนียวที่ผ่านการอบแห้งโดยวิธีใช้ลมร้อนและวิธีใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีลักษณะแห้งมากและมีรูที่ผิวซึ่งเป็นรูที่เป็นทางออกของน้ำภายในตัวอย่างระเหยออกหลังจากได้รับความร้อนอย่างรวดเร็ว ซึ่งนับจำนวนรูต่อพื้นที่เฉลี่ยได้ดังตาราง 22 จะเห็นว่าจำนวนรูต่อพื้นที่เฉลี่ยของตัวอย่างที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีมากกว่าตัวอย่างที่อบแห้งโดยวิธีใช้ลมร้อน และทั้งสองตัวอย่างจะมีรูที่มีขนาดเล็ก ซึ่งอยู่ในช่วง 2 – 9 μm อยู่เป็นจำนวนมากกว่ารูขนาดใหญ่ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการอบแห้งโดยวิธีใช้ลมร้อนและวิธีใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะทำให้เกิดรูขนาดเล็ก (ช่วง 2 – 9 μm) ที่ผิวของเม็ดข้าวเหนียว และรูที่มีขนาด 10 - 25 μm เกิดขึ้นน้อยและไม่สม่ำเสมอสังเกตได้จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานซึ่งมีเท่ากับหรือมากกว่าค่าเฉลี่ย ดังนั้นบางบริเวณของผิวข้าวเหนียวอาจไม่พบรูขนาด 10 - 25 μm เลยก็ได้

ตาราง 22 จำนวนรูต่อพื้นที่เฉลี่ย

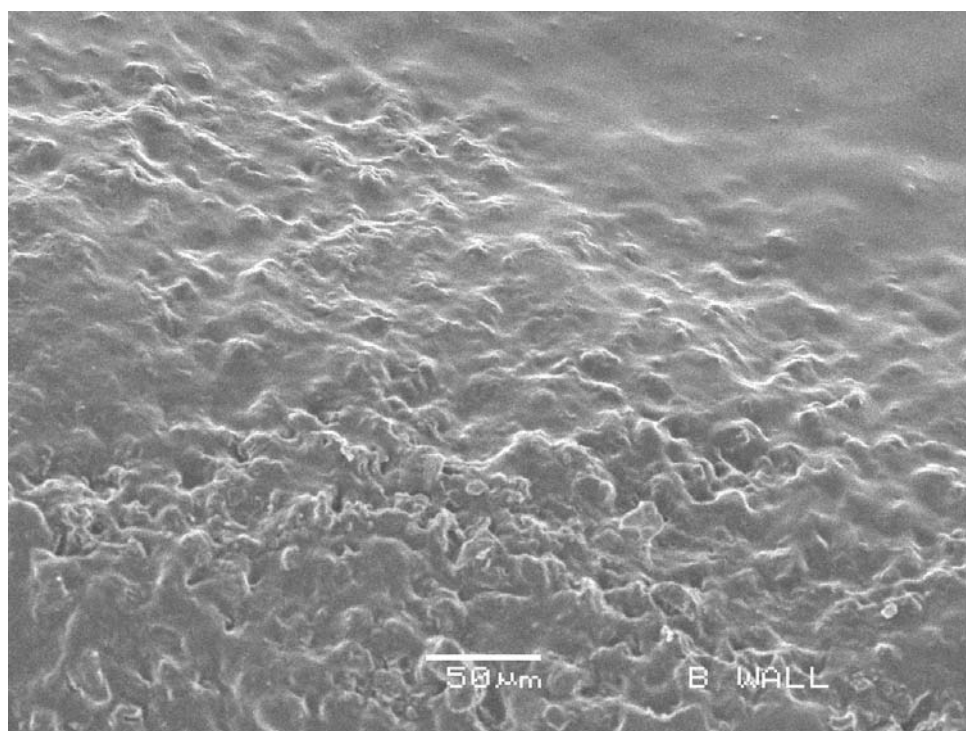
ขนาดของรู (μm)	จำนวนรูต่อพื้นที่เฉลี่ย ($\bar{x} \pm \text{SD}$) (รู / mm^2)	
	ตัวอย่างลมร้อน	ตัวอย่างไอน้ำร้อนยวดยิ่ง
2 - 9	317 $\pm$ 153	958 $\pm$ 231
10 - 17	92 $\pm$ 99	250 $\pm$ 144
18 - 25	25 $\pm$ 45	75 $\pm$ 75
รวมรูทุกขนาด	442 $\pm$ 239	1283 $\pm$ 216

พิจารณาภายในเม็ดข้าวเหนียวที่กำลังขยาย 1,000X แสดงดังภาพประกอบ 25 – 29 พบว่าเนื้อของข้าวเหนียวมีลักษณะคล้ายกันในทุกกรณี คือมีรอยของผนังเซลล์ให้เห็นอย่างชัดเจน มีขนาดตั้งแต่ 13 – 65 μm ซึ่งไม่สามารถบอกถึงความแตกต่างได้

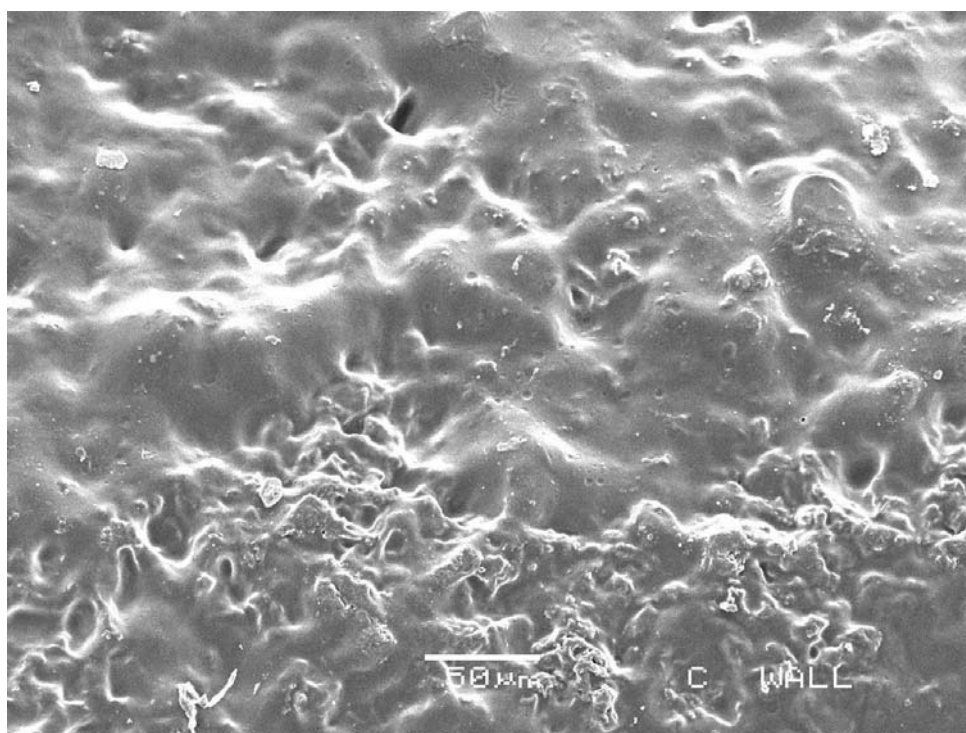
พิจารณาภายในเม็ดข้าวเหนียวที่กำลังขยาย 50X แสดงดังภาพประกอบ 30 – 34 พบว่าภายในเม็ดข้าวเหนียวก่อนอบแห้ง ข้าวเหนียวที่อบแห้งโดยวิธีใช้ลมเป่าและวิธีการตากแดดมีลักษณะคล้ายกันคือเป็นเม็ดตัน แต่ภายในเม็ดข้าวเหนียวที่อบแห้งโดยวิธีใช้ลมร้อนและวิธีใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีลักษณะเป็นโพรงขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นภายใน เนื่องจากการอบแห้งด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เป็นการอบแห้งโดยการให้ความร้อนสูงแก่ข้าวเหนียวอย่างรวดเร็ว ดังนั้นอากาศภายในมีการขยายตัวอย่างรวดเร็วและไอน้ำที่อยู่ภายในตัวอย่างพยายามดันออกไปข้างนอกเพื่อรักษาสมดุลของเม็ดข้าวเหนียว ทำให้เนื้อของเม็ดข้าวเหนียวด้านในจึงถูกอัดตัวกันแน่นอยู่บริเวณขอบของเม็ดข้าวเหนียว



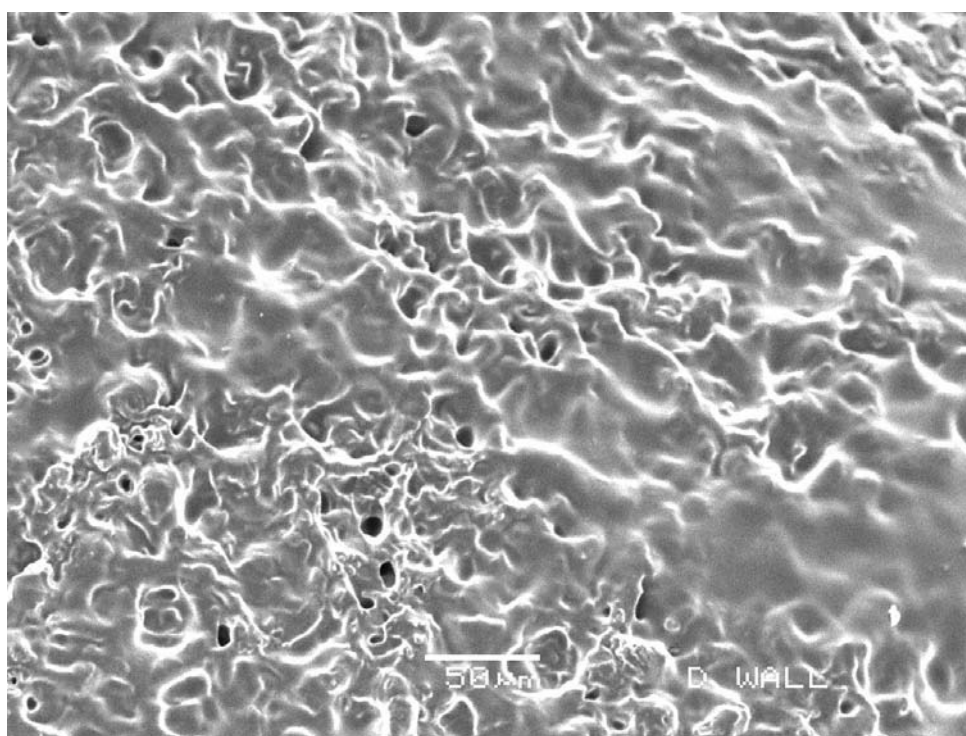
ภาพประกอบ 20 ผิวของเมล็ดข้าวเหนียวก่อนการอบแห้งที่กำลังขยาย 3,000X



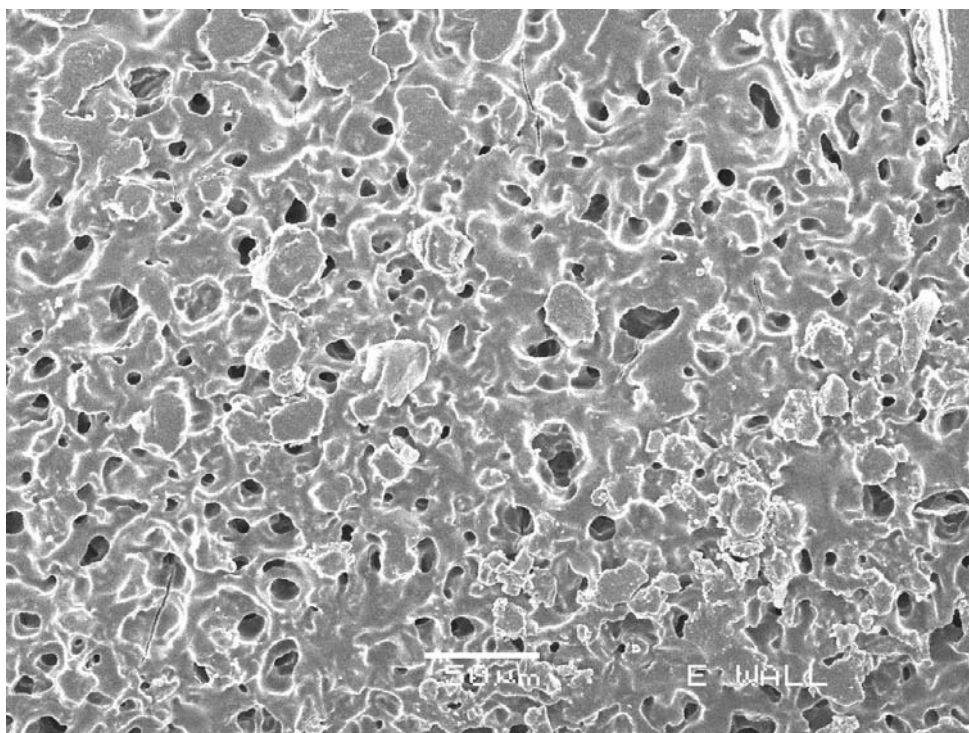
ภาพประกอบ 21 ผิวของเมล็ดข้าวเหนียวหลังการทำแห้งโดยใช้ลมเป่าที่กำลังขยาย 3,000X



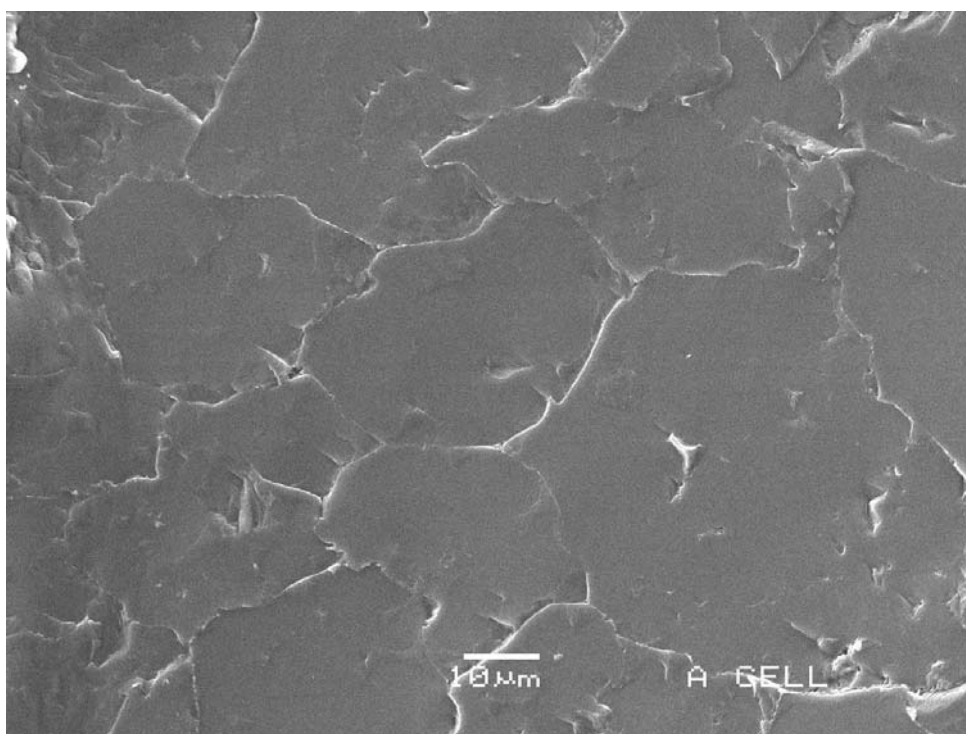
ภาพประกอบ 22 ผิวของเมล็ดข้าวเหนียวหลังการทำแห้งโดยการตากแดดที่กำลังขยาย 3,000X



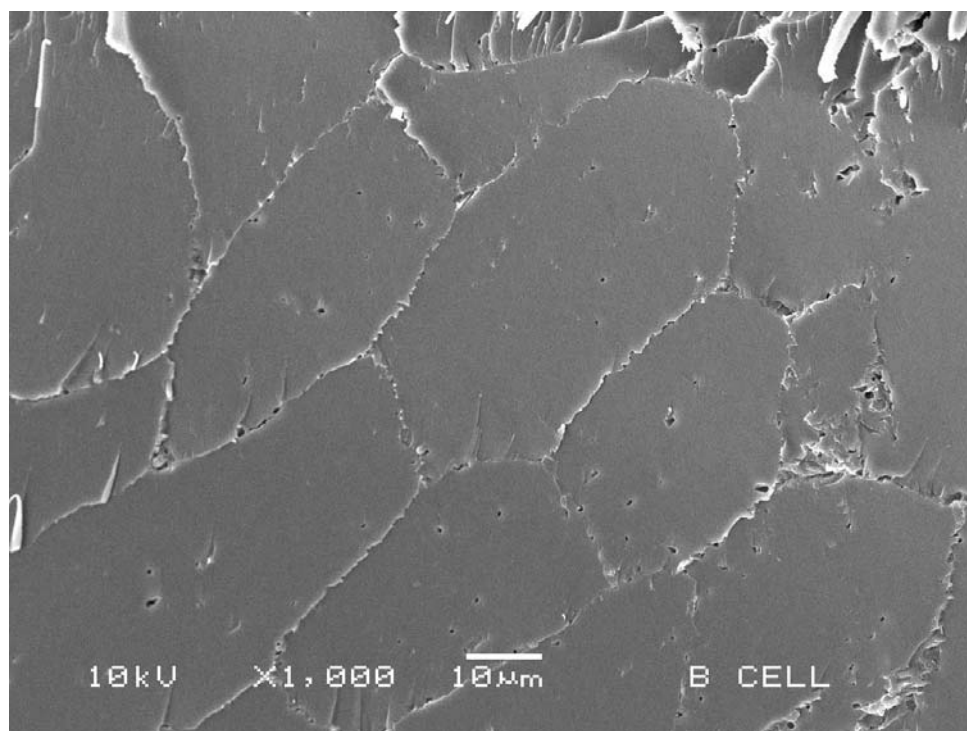
ภาพประกอบ 23 ผิวของเมล็ดข้าวเหนียวหลังการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนที่กำลังขยาย 3,000X



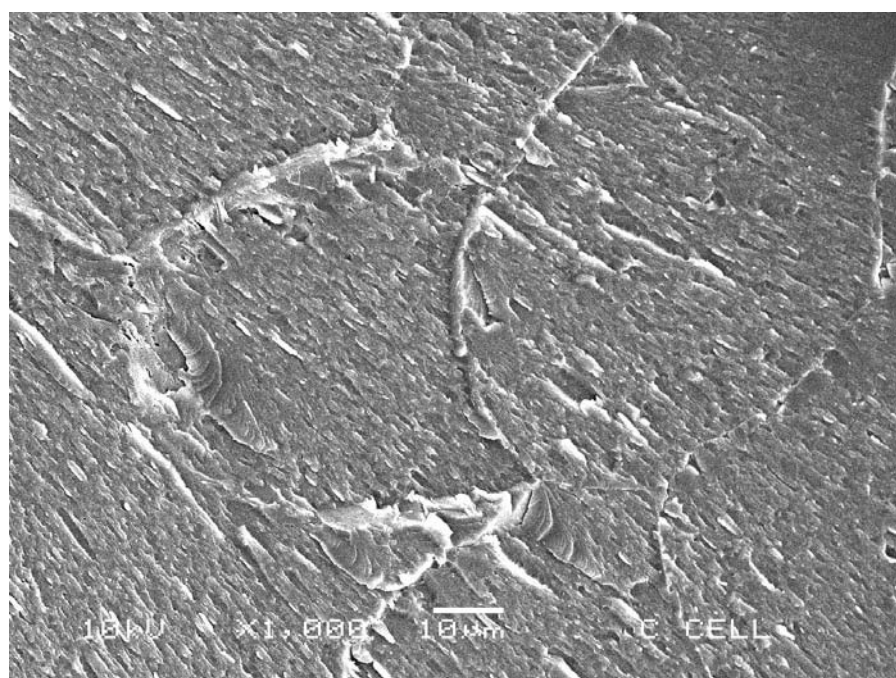
ภาพประกอบ 24 ผิวของเม็ดข้าวเหนียวหลังการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่กำลังขยาย
3,000X



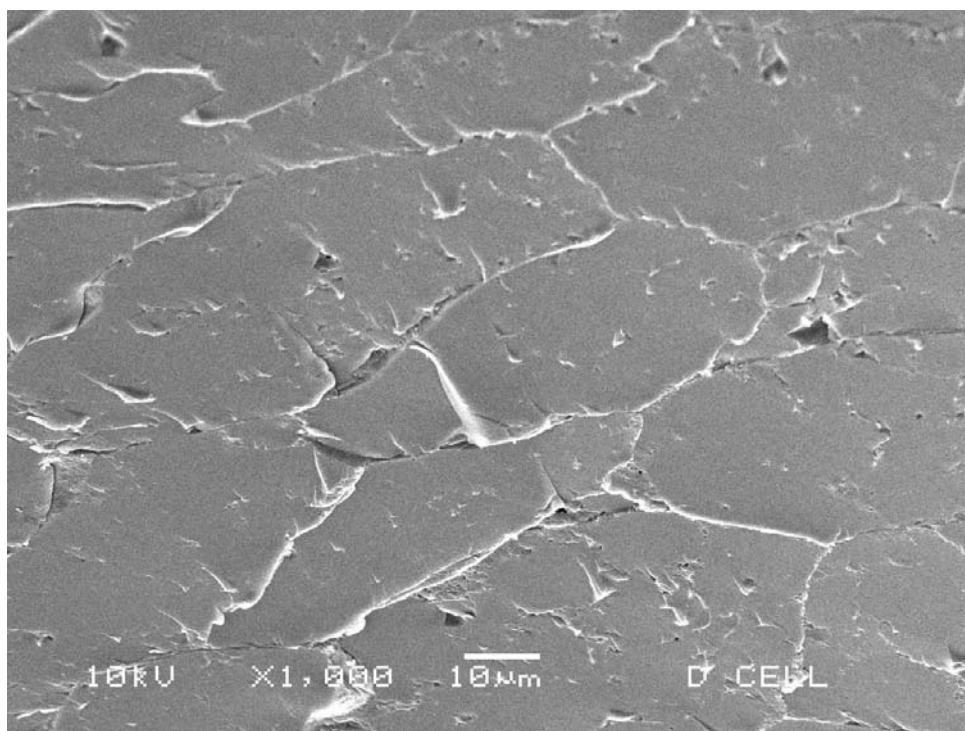
ภาพประกอบ 25 ภายในเม็ดข้าวเหนียวก่อนการอบแห้งที่กำลังขยาย 1,000X



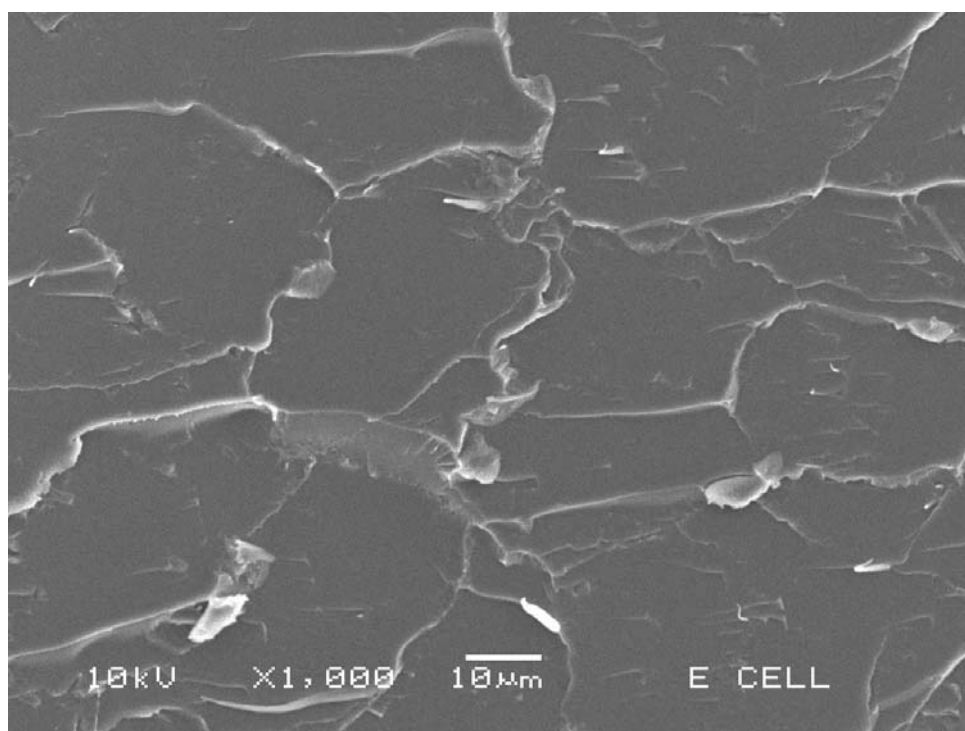
ภาพประกอบ 26 ภายในเม็ดข้าวเหนียวหลังการทำแห้งโดยใช้ลมเป่าที่กำลังขยาย 1,000X



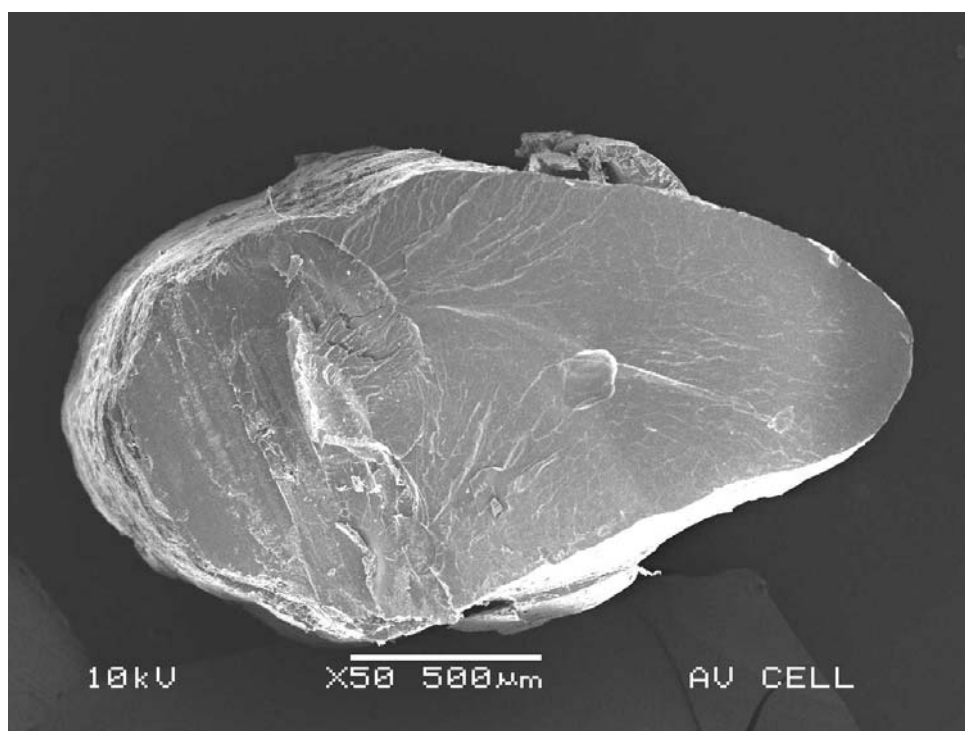
ภาพประกอบ 27 ภายในเม็ดข้าวเหนียวหลังการทำแห้งโดยการตากแดดที่กำลังขยาย 1,000X



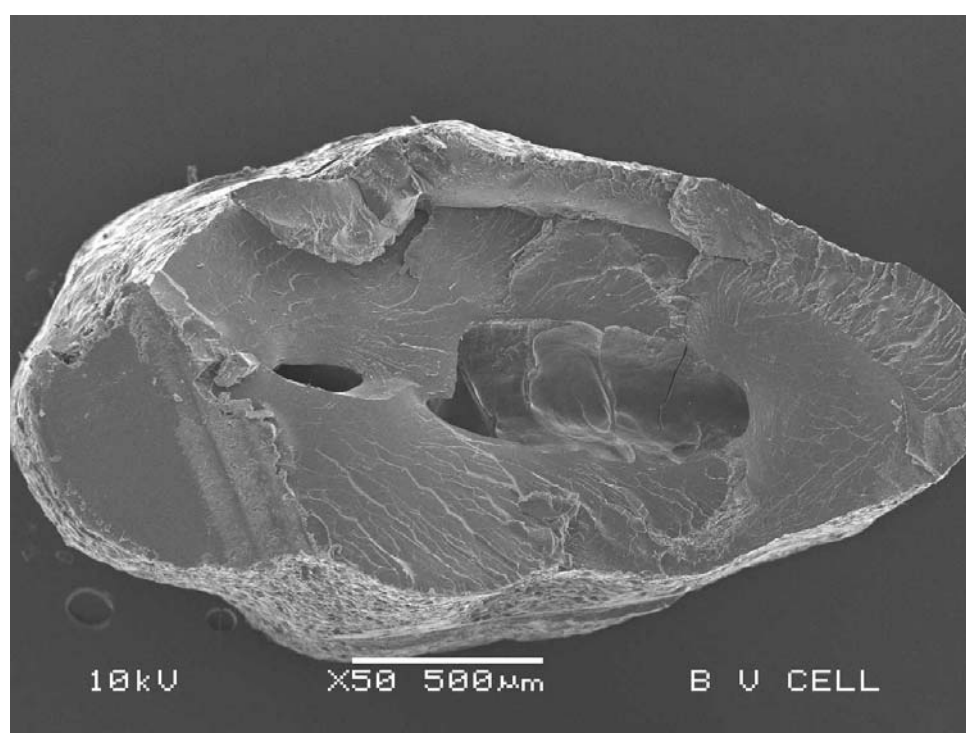
ภาพประกอบ 28 ภายในเม็ดข้าวเหนียวหลังการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนที่กำลังขยาย 1,000X



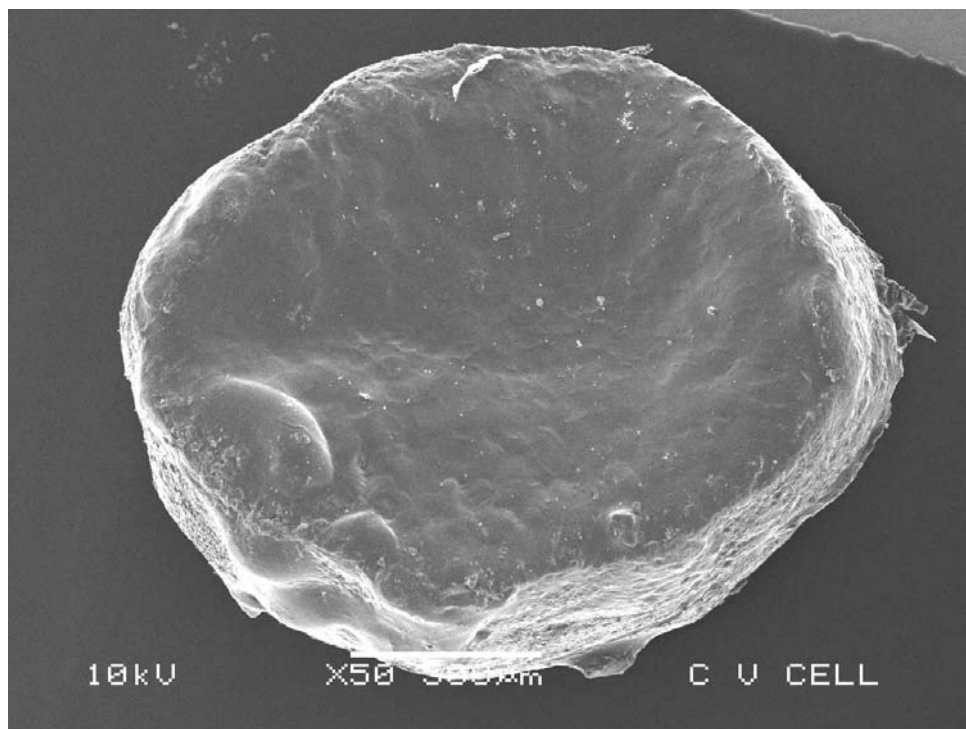
ภาพประกอบ 29 ภายในเม็ดข้าวเหนียวหลังการอบแห้งโดยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่กำลังขยาย 1,000X



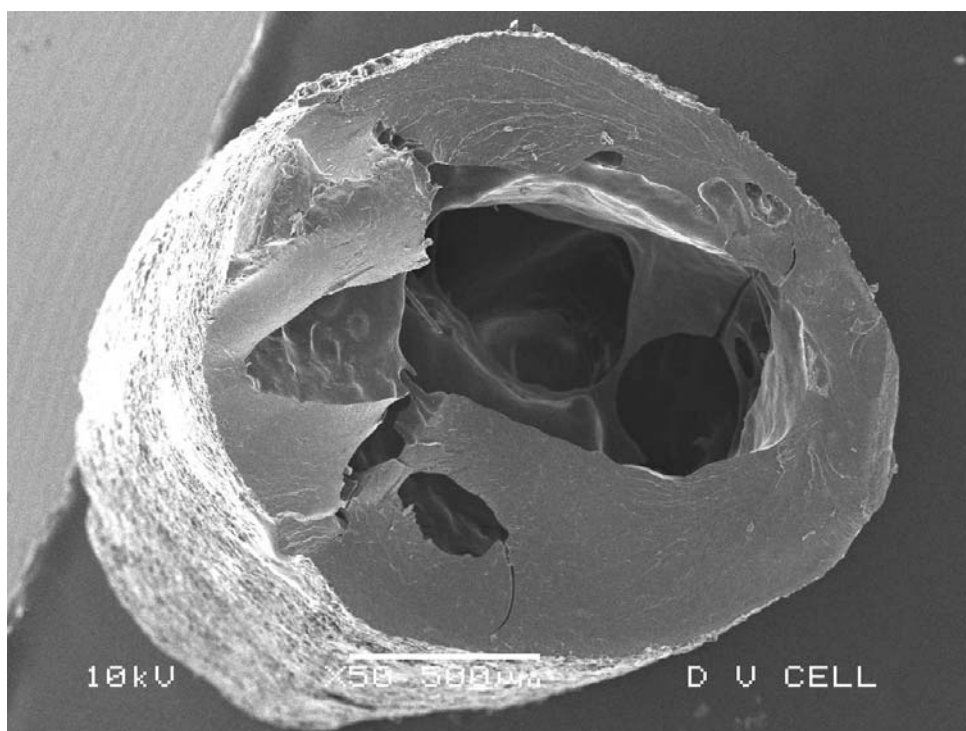
ภาพประกอบ 30 ภายในเม็ดข้าวเหนียวก่อนการอบแห้งที่กำลังขยาย 50X



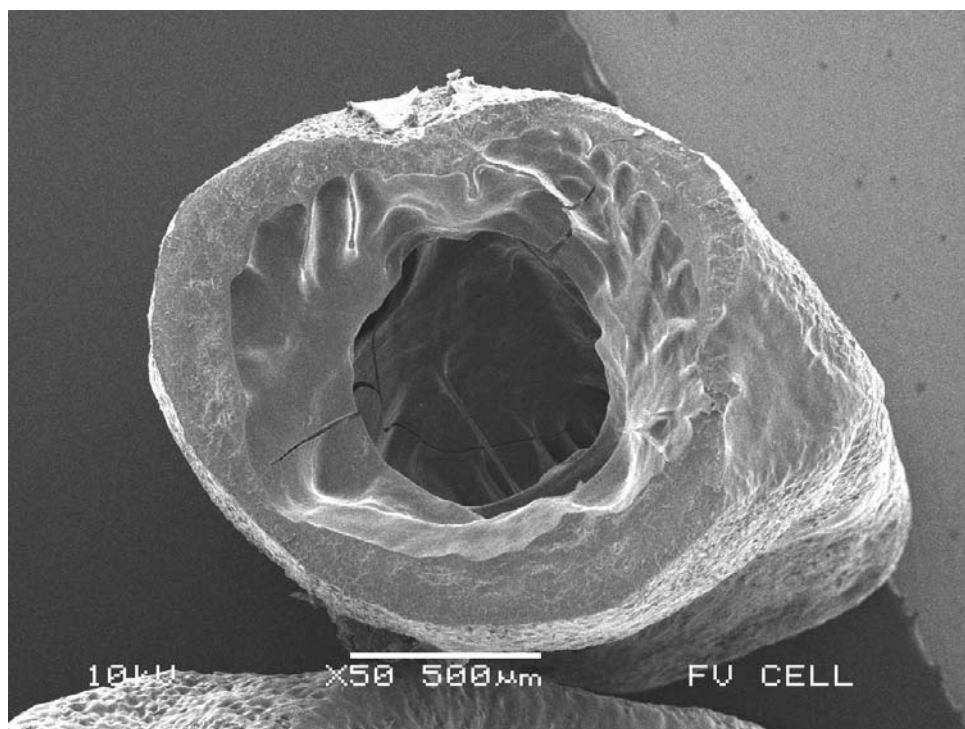
ภาพประกอบ 31 ภายในเม็ดข้าวเหนียวหลังการทำแห้งโดยใช้ลมเป่าที่กำลังขยาย 50X



ภาพประกอบ 32 ภายในเมล็ดข้าวเหนียวหลังการทำแห้งโดยการตากแดดที่กำลังขยาย 50X



ภาพประกอบ 33 ภายในเมล็ดข้าวเหนียวหลังการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนที่กำลังขยาย 50X



ภาพประกอบ 34 ภายในเมล็ดข้าวเหนียวหลังการอบแห้งโดยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่กำลังขยาย 50X

ผลการทดลองหาค่าความหนาแน่นของข้าวเหนียวหลังการอบแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ

จากการทดลองวัดค่าความหนาแน่นของข้าวเหนียวหลังการอบแห้ง ผลการทดลองแสดงดังตาราง 23 และ 24 แสดงค่าความหนาแน่นปรากฏและค่าความหนาแน่นจริง ซึ่งจะเห็นว่าค่าความหนาแน่นปรากฏของทุกตัวอย่างหลังการอบแห้งไม่แตกต่างกัน

พิจารณาค่าความหนาแน่นจริงจะเห็นว่าค่าความหนาแน่นจริงของตัวอย่างที่ใช้ลมเป่าและตากแดดไม่แตกต่างกัน และตัวอย่างที่อบแห้งโดยวิธีใช้ลมร้อนและใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะไม่แตกต่างกัน แต่ตัวอย่างที่อบแห้งโดยวิธีใช้ลมเป่าและวิธีการตากแดดจะมีค่าความหนาแน่นจริงที่แตกต่างจากตัวอย่างที่อบแห้งโดยวิธีใช้ลมร้อนและใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง สาเหตุเนื่องจากโดยวิธีใช้ลมร้อนและใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งทั้ง 2 วิธี ข้าวเหนียวซึ่งได้รับความร้อนสูงอย่างรวดเร็วทำให้อากาศภายในเกิดการขยายตัวอย่างรวดเร็วดันเนื้อข้าวเหนียวออกให้มาอัดแน่นอยู่ใกล้กันกับผิวนอก ดังจะเห็นได้จากรูปที่ได้จากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เนื่องจากเมล็ดข้าวเหนียวหลังจากการอบแห้งทั้ง 2 วิธีนี้เกิดการขยายตัวเล็กน้อย ทำให้ค่าความหนาแน่นจริงที่ได้มีค่าน้อยกว่าตัวอย่างที่ใช้ลมเป่าและตากแดด

ตาราง 23 ความหนาแน่นปรากฏ

ตัวอย่าง	ความหนาแน่นปรากฏ ($\bar{x} \pm SD$) (kg / m ³)
ใช้ลมเป่า (8 ชั่วโมง)	559.87 ^a $\pm$ 36.29
ตากแดด (8 ชั่วโมง)	573.06 ^a $\pm$ 14.61
ลมร้อน (150 °C 15 นาที)	543.96 ^a $\pm$ 17.86
ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (150 °C 15 นาที)	557.04 ^a $\pm$ 10.67

หมายเหตุ ^a ทุกตัวอย่างไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (p $\geq$ 0.05)

ตาราง 24 ความหนาแน่นจริง

ตัวอย่าง	ความหนาแน่นจริง ($\bar{x} \pm SD$) (kg / m ³)
ใช้ลมเป่า (8 ชั่วโมง)	1367.07 ^a $\pm$ 58.12
ตากแดด (8 ชั่วโมง)	1436.66 ^a $\pm$ 125.11
ลมร้อน (150 °C 15 นาที)	1035.09 ^b $\pm$ 30.39
ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (150 °C 15 นาที)	1191.29 ^b $\pm$ 103.69

หมายเหตุ ^{a, b} ตัวเลขที่มีอักษรกำกับแตกต่างกันในแนวตั้งมีความแตกต่างกันทางสถิติ (p $\leq$ 0.05)

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

จากการทดลองเพื่อศึกษาเปรียบเทียบจลศาสตร์การอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสีกด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับลมร้อน และศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพของเหนียวหนึ่งสีกหลังการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ลมร้อนอุณหภูมิสูง สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

สรุปและอภิปรายผล

1. การอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสีกด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนที่อุณหภูมิ 130°C พบว่า อัตราการอบแห้งด้วยลมร้อนสูงกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ขณะที่การอบแห้งที่อุณหภูมิ 150 และ 170°C อัตราการอบแห้งของทั้งสองตัวกลางใกล้เคียงกัน

2. การอบแห้งชั้นบาง ได้ทำการทดลองระหว่างอุณหภูมิ $130-170^{\circ}\text{C}$ สรุปได้ดังนี้

2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่ออัตราการอบแห้ง เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ออบสูงขึ้นอัตราการอบแห้งสูงขึ้นเช่นกัน

2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ได้จากการทดลองภายใต้สภาวะอากาศคงที่ พบว่ามีลักษณะลดลงแบบ Exponential

2.3 สมการของ two term equation ใช้อธิบายข้อมูลจากการทดลองได้ดีที่สุดสำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน

3. คุณภาพด้านสี หลังการอบแห้งด้วยอากาศร้อนให้ค่าความสว่างสูงกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งให้ค่าความแดงและค่าความเหลืองสูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน

4. คุณภาพสีด้านการทอด ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งให้ค่าความเหลืองหลังการทอดสูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนซึ่งเป็นคุณสมบัติที่พึงประสงค์ของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการทอด

5. การทดลองหาค่าความหนาแน่นจริง ความหนาแน่นปรากฏ และสัดส่วนช่องว่างอากาศหลังการอบแห้ง และการทอด

จากการทดลองหาค่าความหนาแน่น ช่วงความชื้น $12-16\%$ dry basis โดยใช้สมการแสดงความสัมพันธ์กับความชื้นมาตรฐานแห้งแบบเส้นตรง พบว่าสมการของความหนาแน่นของข้าวเหนียวหนึ่งสีกทั้ง 2 ตัวกลางในการอบแห้งให้ค่า r^2 ที่ต่ำกว่า 0.90 และค่า r^2 ในการทอดต่ำกว่า 0.90 เช่นเดียวกันกับส่วนสัดส่วนช่องว่างอากาศค่า r^2 มากกว่า 0.90

6. การทดลองอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสีกด้วยวิธีต่าง ๆ

ผิวของเม็ดข้าวเหนียวที่ผ่านการทำแห้งโดยการใช้ลมเป่าและการตากแดดจะมีผิวที่ขรุขระเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวเหนียวก่อนอบแห้ง เนื่องจากการสูญเสียน้ำและผิวที่แห้งติดกับเซลล์ภายใน ส่วนผิวของข้าวเหนียวที่อบแห้งโดยใช้ลมร้อนและใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะแห้งและมีรูที่ผิว โดยที่รูที่ผิวของข้าวเหนียวที่อบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีจำนวนมากกว่า และการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนและใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะเกิดโพรงขนาดใหญ่ภายในเม็ดข้าวเหนียว

ค่าความหนาแน่นปรากฏของข้าวเหนียวที่ผ่านการอบแห้งทุกวิธีไม่แตกต่างกัน แต่ความหนาแน่นจริงของตัวอย่างที่อบแห้งโดยใช้ลมร้อนและใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่เกิดการขยายตัวเล็กน้อยทำให้ได้ค่าความหนาแน่นจริงน้อยกว่า

ข้อเสนอแนะ

1. ควรออกแบบการซังน้ำหนักผลิตภัณฑ์หลังการอบโดยไม่ต้องเอาผลิตภัณฑ์ออกจากห้องอบเพื่อป้องกันการควบแน่นของไอน้ำร้อนยวดยิ่งขณะนำผลิตภัณฑ์เข้าและออกจากห้องอบ
2. ควรพัฒนาให้เป็นเครื่องอเนกประสงค์ คือสามารถผลิตและอบแห้งได้ เช่น สามารถนึ่งข้าวเหนียวแล้วทำการอบแห้งได้อย่างต่อเนื่อง
3. ควรศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณภาพด้านอื่น เช่น เคมีกายภาพของข้าวเหนียวนึ่งสุก
4. ควรมีการวิเคราะห์ด้วยประสาทสัมผัส เพื่อประเมินความชอบของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์

เอกสารอ้างอิง

Doymaz, I., 2004, "Drying Kinetics of White Mulberry", Journal of Food Engineering, Vol. 61, No. 3, pp. 341-346.

Doymaz, I. and Pala, M., 2002, "Hot-Air Drying Characteristics of Red Pepper", Journal of Food Engineering, Vol. 55, No. 4, pp. 331-335.

Doymaz, I. and Pala, M., 2003, "The Thin-layer Drying Characteristics of Corn", Journal of Food Engineering, Vol. 60, No. 2, pp. 125-130.

Lahsasni S., Kouhila M. , Mahrouz M. and Jaouhari J.T., 2004, "Drying Kinetics of Prickly Pear Fruit (*Opuntia ficus indica*)", Journal of Food Engineering, Vol. 61, No. 4, pp. 173-176.

Madamba, P. S., Driscoll, H. and Buckle, Ken A., 1996. "The Thin-layer Drying Characteristics of Garlic Slices", Journal of Food Engineering, Vol. 29, No. 1, pp. 75-97.

Panchariya, P.C., Popovic, D. and Sharma, A.L., 2002, "Thin-layer Modelling of Black Tea Drying Process", Journal of Food Engineering, Vol. 52, No. 2, O, pp. 349-357.

Poomsa-ad, N., Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S., and Terdyothin, A., 2002, "Effect of Tempering on Subsequent Drying of Paddy using Fluidisation Technique", Drying Technology, Vol. 20, No. 1, pp. 195-210.

Ramesh M. N., 2003, "Moisture transfer properties of cooked rice during drying", Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie, Vol 36, No. 2, pp. 245-255.

Schwartz, P. J. and Bröcker S., 2002, "A Theoretical Explanation for the Inversion Temperature", Chemical Engineering Journal, Vol 86, No. 1, pp 61–67.

Taechapairoj, C., Dhuchakallaya, I., Soponronnarit, S., Wetchacama, S., and Prachayawarakorn, S., 2003, "Superheated Steam Fluidised Bed Paddy Drying", Journal of Food Engineering, Vol. 58, No. 1, pp. 67-73.

Tang, Z.; Cenkowski, S. and Muir, W.E., 2004, "Modelling the Superheated-steam Drying of a Fixed Bed of Brewers' Spent Grain", Biosystems Engineering, Vol. 87, No. 4, pp. 66-77.

Tang, Z.; Cenkowski, S. and Izydorczyk, M., 2004, "Thin-Layer Drying of Spent Grains in Superheated Steam", Journal of Food Engineering (*ARTICLE IN PRESS*)

Tirawanichakul, S., Prachayawarakorn, S., Varanyanond, W., and Soponronnarit, S., 2004, "Simulation and Grain Quality for In-store Drying of Paddy", Journal of Food Engineering, Vol. 64, No. 4, pp. 405-415.

Yaldiz, O., Ertekin, C., and Uzun, H.I., 2001, "Mathematical Modeling of Thin Layer Solar Drying of Sultana Grapes", Energy, Vol 26, No 5, pp. 457-465.

ภาคผนวก

ผลงานที่คาดว่าจะตีพิมพ์ใน Journal of Food Engineering

Thin-Layer Drying Characteristics and Color of Cooked Glutinous Rice by Hot Air and Superheated Steam

**¹Nattapol Poomsa-ad, ¹Lamul Wiset, ²Sirithon Siriamornpun
and ¹Somchart Soponronnarit**

¹Faculty of Engineering, Maharakham University, Maharakham, Thailand 44150

²Faculty of Technology, Maharakham University, Maharakham, Thailand 44150

Abstract

Thin-layer drying characteristics of cooked glutinous rice with hot air and superheated steam were investigated at temperatures ranged 150°C to 170°C. Color of product was determined as an indication of product appearance. The drying data were then fitted to the different semi-theoretical and empirical equation such as Henderson, Page, modified Page, logarithm and two-term equation, based on the ratio of the final to initial moisture content versus drying time. It was found that the two term equation gave better predictions than other models, and satisfactorily described the thin-layer drying characteristics of cooked glutinous rice in both drying media. The drying curve showed that the moisture reduction rate during superheated steam drying was higher than hot air under drying temperature above 150°C. The color of cooked glutinous rice was lighter after drying by hot air than those by superheated steam and the redness value was increased with increasing drying temperature.

Keyword: Airless drying; Dehydration; Drying equation; Grain; Sticky rice

1. Introduction

Glutinous Rice or Kao Niow (in Thai) is commonly referred to sweet or sticky rice. Its name is derived entirely from its sticky texture, as rice does not contain any gluten. It is a staple diet in northern and north-eastern regions of the country.

One of Thai traditional snacks made of cooked glutinous rice with topping of caramel is called as “Kao Taan” which is dried and crispy rice cakes. Recently, “Kao Taan” has become popular to promote as local Thai product in several sub-districts for trading under government project, namely, One Tambon One Product (OTOP). Drying is the main process of making this product before frying. In the past, the conventional sun drying was used to dry the product down to the moisture content about 14 % dry basis. This method causes many problems such as very slow drying rate and can not be done in the rainy season. Therefore, suitable drying tools (equipment) need to be developed to solve those problems. However, the drying characteristics of cooked glutinous rice and the effect of drying conditions on the product quality must be previously known.

To design and control a dryer and to define optimum drying condition, it is necessary to clarify the model of the actual process of drying in terms of mathematical relations. In the actual operation, many products are dried in various types of deep-bed dryers. It is difficult and complicated to investigate the drying characteristics of an actual industrial drying bed directly. Previous studies (Tang *et al.*, 2004; Tirawanichakul *et al.*, 2004) have introduced simulation by using a thin-layer drying approach.

The objectives of this study were to develop the equations for describing the thin layer drying of cooked glutinous rice by superheated steam and hot air, as well as to quantify the change in colour of the dried samples.

2. The Thin-layer Drying Equation

The thin-layer drying equation can be divided into three groups, namely theoretical, semi-theoretical and empirical. The first takes into account only internal resistance to moisture transfer while the other two consider only external resistance to moisture transfer resistance between product and drying media (Panchariya *et al.*, 2002).

The theoretical equation expressed from the analytical solution of diffusion equation where the diffusion coefficient was determined as a function of drying temperature (Poomsa-ad *et al.*, 2002; Ramesh, 2003). However, this equation is very complicated to use due to the term of infinite series and is based on the geometry of the product. The semi-theoretical equations are generally derived by simplifying general series of the theoretical equation and do not need assumptions of geometry of a typical food.

The Henderson's equation is the first term of a general series solution. It can be expressed as follow:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} = A_0 \exp(k_0 t) \quad (1)$$

where A_0 and k_0 are the drying parameter. M_e , M_i and M_t are the equilibrium moisture content, the initial moisture content and the moisture content at any times, respectively.

The two-term exponential equation model is the first two terms of general series solution to the analytical solution of diffusion equation.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} = A_0 \exp(k_0 t) + A_1 \exp(k_1 t) \quad (2)$$

The two-term model was found to satisfactorily describe the solar drying curves of prickly pear fruit (Lahsasni *et al.*, 2004), the superheated steam fluidized bed drying of paddy (Taechapairoj *et al.*, 2003) and parboiled wheat (Mohapatra and Rao, 2004)

The empirical equations may describe the drying curve for the conditions of the experiment and derive a direct relationship between average moisture content and drying time. For example, Doymaz (2004) and Yaldiz *et al.* (2001) introduced the logarithm equation to apply for white mulberry and sultana grapes. This equation is a modification of the Henderson equation by adding another parameter.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} = A_0 \exp(k_0 t) + C \quad (3)$$

The one of most popular empirical equation is the Page's equation. It was expressed as follow:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} = \exp(k_0 t^n) \quad (4)$$

This model has produced good fits for predicting drying of red paper (Doymaz and Pala, 2002), corn (Doymaz and Pala, 2003) and garlic slices (Madamba *et al.*, 1996). Equations 1 – 4 were reasonable to predict the characteristic of drying by hot air.

However, Page's equation is different from the other equations where the intercept is unity at the starting time. At the beginning of superheated steam drying, however, a small amount of moisture is formed on the sample surface from the steam condensation while the sample is brought up from the room temperature to 100°C. The steam condensation takes place in such a short time (several seconds) that it is not feasible to describe mathematically that short initial period of drying (Tang *et al.*, 2004; Taechapairoj *et al.*, 2003). In consequence, the initial moisture ratio for superheated steam drying becomes greater than unity. Therefore, Tang *et al.* (2004) introduced the third parameter into the Page's equation to accommodate the condensation in the superheated steam drying and called as the modified Page's equation:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} = A_0 \exp(k_0 t^n) \quad (5)$$

The drying parameters in equations 1 – 5 depends on both material and drying air properties. The effects of air temperature, relative humidity, air velocity and material size on drying constant have been studied extensively by several researchers. Many formulation relationships of drying parameters with their effect were presented such as linear, quadratic or Arrhenius type function.

3. Materials and Methods

Materials

Glutinous rice samples were purchased, as milled rice from a local market in Mahasarakham province, Thailand. The sample was soaked in water at room temperature for 6 hr, then steamed at the atmospheric pressure for 20 minutes, then left at ambient

conditions for 2 hr and finally kept in an isolated sealed container before the experiment. The initial moisture content of glutinous rice was about 60% dry basis. A sample approximately 150 g was prepared for each drying experiment. The moisture content was determined by the oven method at temperature of 103°C for 72 hr.

Equipment

A drying system was developed by the Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Thailand. The system consists of a boiler, a pressure regulator, a steam conveying pipeline, a drying chamber, a backward curve fan, an auxiliary heaters, a fresh-air supply valve, a steam-flow valve, and control system as shown in Fig. 1. This system can be run in the hot air mode or the superheated steam mode by control a fresh-air supply valve and a steam-flow valve.

During the superheated steam drying, saturated steam was produced by the boiler. The steam generator generated the saturated-steam at about 200 kPa (absolute pressure) with the corresponding temperature of 120°C. Its pressure was reduced nearly to atmospheric pressure when the steam passed through the pressure regulator, a backward curve fan was conveying the drying media through the system and was driven by a 2 kW, 3 phase electric motor with the media flow rate controlled by a frequency inverter. The media flow rate was measured using pitot static tube together with multifunction meter (Testo 454). The media was adjusted to the preselected temperature by the auxiliary heaters with a maximum heating capacity of 15 kW that was automatically controlled by proportional-integral detector controller with an accuracy of $\pm 1^{\circ}\text{C}$ before passing through the drying chamber.

Experiment and Data Analysis Procedure

Three drying runs were conducted at the drying media flow rate of 1.0 m/s with a temperature of 130, 150 and 170°C. As the samples were cooked at different times, it was obvious that the initial moisture contents of all runs were not the same which was ranged between 54-55 % dry basic. In order to normalise the drying curves, the experimental data in percentage dry basis moisture content versus time were transformed to a dimensionless parameter called the moisture ratio (MR) versus time as previously mention in equations 1-5. However, the drying temperatures used in the present work were higher than those used for moisture content determination method (103°C), so that it might be reasonable to assume that the equilibrium moisture contents were zero.

Non-linear regression, considering moisture ratio and drying time were used as the regression variables. The parameters in the selected drying equation (Eq. 1-6) were initially determined for each set of drying conditions.

From the regression results, the quadratic function was formulated to provide the exact fitting relationship between the drying temperatures and the parameters in the drying equation as follow:

$$\chi = a_0T^2 + a_1T + a_2 \quad (6)$$

where χ is observed values of the parameters in the selected drying equation and T is drying temperature.

The sum square error (SSE) was the criteria to select the best equation to account for variation in the drying curves of dried samples. It was used to determine the suitable of the fit. The lower value of SSE was chosen as the criteria for goodness of fit between

the experimental results and the predicted results. These parameters can be calculated as follows

$$SSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp}} - MR_{\text{pred}})^2 \quad (7)$$

Color of Cooked Glutinous Rice

The color of initial and dried cooked glutinous rice samples was measured by a Minolta CR300 chromameter. The Hunter L*, a*, b* scale gave measurement of colors in units of approximate visual uniformity throughout the solid. The L* value measures lightness and varies from 100 for a perfect white and 0 for black, a* and b* when positive measure redness and yellowness, respectively. All measurements were conducted in five replicates and the averages of the colour values were presented as the mean and the standard deviation. Analysis of variance was used to compare the result obtained in a factorial design. Duncan's multiple range test at the 5% significance level was applied to experimental results to indicate the significant difference among the mean.

4. Results and Discussion

Drying Curve

The data involving percentage dry basis moisture content versus time were transformed and represented in the typical characteristic drying curve (moisture ratio versus time) of cooked glutinous rice during thin-layer drying by hot air and superheated steam, respectively.

Fig. 2 shows the moisture ratio of cooked glutinous at different drying temperature during drying by hot air. It found that the moisture ratio decreased exponentially continuous with drying time. It can be assumed that there is no constant-rate period but the falling-rate period is presented. Fig. 3 presents the moisture ratio of cooked glutinous at different drying temperature during drying by superheated steam. In the first half a minute, the moisture content of rice rapidly increased. These phenomena were due to a small amount of the condensed water adsorbed by the grain. The moisture ratios of the samples are in the range of 1.1 - 1.2. However, it decreases with an increase of steam temperature. Such results were similar to the previous work reported by Tang et al. (2000) and Taechapairoj *et al.* (2003). After passing through the condensation stage, the moisture content reduced exponentially with drying time, indicating that the main resistance to moisture movement was in the interior. In this moisture reduction step, the drying curve was very similar to that found in the hot air drying.

The effect of drying temperature on the drying rate as shown in Figs. 2 and 3 are sharply found that the main factor influencing drying kinetics is drying temperature. Thus, a higher drying temperature produced higher drying rate and consequently decreased moisture ratio. This was due to an increase of the air heat supply rate to the product and the acceleration of water migration inside the sample.

Drying Equation for Cooked Glutinous Rice by Hot Air and Superheated Steam

The drying data were then fitted to the different drying equations based on the moisture ratio versus drying time curve. The non linear regression analysis were

evaluated the drying parameters of those equation based on correlation coefficient (R^2). The results of the statistical analysis were presented in Table 1. Acceptable R^2 of greater than 0.9 were obtained for all four equations fitted to all the experimental data. The hot air drying resulted in consistently higher values than the superheated steam drying.

The coefficients in quadratic function as a relationship between drying equation parameters (A, k, n or C) with drying temperature were obtained by further regression in which parameters were considered as the regression variables. The regression results are shown in Table 2.

The SSE of MR as shown in Table 2 indicates that the regression equations have an acceptable accuracy for fitting the experimental data. The experimental data at drying temperature of 130°C and predicted drying curve by the selected equations were plotted in Figs. 4 and 5 under hot air and superheated steam, respectively. These figures also show that the predicted equation with the obtained regression coefficients fits the experimental data well and the same results were found in other drying temperatures. However, the Page's equation and Modified Page's equation were recommended to describe the drying cooked glutinous rice by hot air and superheated steam, respectively. This is due to low value of SSE and a less number of parameters in the equation.

Comparison between Hot Air and Super heated Steam Drying

Fig. 6 presents the comparative drying characteristics of cooked glutinous rice by the best prediction equation in superheated-steam and hot air. All curves showed that the moisture content reduced exponentially with drying time. The drying started at unity under hot air and above unity under superheated steam due to the condensation effect. The

total drying time for steam was shorter than hot air during drying temperatures of 150°C-170°C. Similar observations were obtained and reported in fluidised bed paddy drying which studied by Taechapairoj *et al* (2003).

When comparing superheated steam to hot air drying in a moisture reduction rate from this study, it could be seen that the inversion temperature which the drying rates compared are equal in the range of 130-150°C. This range was significantly lower than previous studies as reported by Schwartz and Bröcker (2002). This may be due to the differences in drying conditions and the product properties.

Color of Cooked Glutinous Rice after Drying

One of the most important criteria for acceptability of food is colour. Undesirable changes in colour of a food may lead to a decrease in its physical and sensory qualities as well as marketing value. The results for color parameters in term of L*, a* and b* obtained from the different drying processes are presented in Table 3-5, respectively. Statistical analysis showed the effect of drying temperature and drying media on those colour parameter at the three levels of final moisture content.

The statistical analysis of L* value in Table 3 indicated that the drying temperatures had no effect on L* value but the drying media affected on the lightness of the final dried cooked glutinous rice. The L* values (lightness) of drying by hot air were higher than the values of drying by superheated steam. The effect of drying media and drying temperatures on redness (a* value) could not be clearly explained. It might change significantly in both drying factors as shown in Table 4. However, the a* values were varied in middle range between -1.78 to 3.03.

The yellowness indicated by the b^* value could be divided into three levels depending on the drying temperature and was not affected by drying media as shown in Table 5. The b^* values increased with increasing drying temperature. It may be explained that browning reaction occurred when higher temperatures were applied.

5. Conclusions

Based on the experimental and statistical analysis results reported here, the following conclusions were made:

- The thin-layer drying characteristics of the cooked glutinous rice was satisfactorily described by the two term equation for both hot air drying and superheated steam where the relationships between the drying temperature and the drying parameters were in quadratic function.
- The moisture reduction rate by superheated steam drying was higher than hot air under drying temperature above 150°C.
- The colour of cooked glutinous rice was lighter after drying by hot air than those by superheated steam and the redness value was increased with increasing drying temperature.

Acknowledgments

The authors would like to express their sincere thanks to the Thailand Research Fund and Faculty of Engineering, Mahasarakham University for financial support and The Department of Food Technology and Nutrition, Mahasarakham University for color tests.

References

Doymaz, I., 2004, "Drying Kinetics of White Mulberry", Journal of Food Engineering, Vol. 61, No. 3, pp. 341-346.

Doymaz, I. and Pala, M., 2002, "Hot-Air Drying Characteristics of Red Pepper", Journal of Food Engineering, Vol. 55, No. 4, pp. 331-335.

Doymaz, I. and Pala, M., 2003, "The Thin-layer Drying Characteristics of Corn", Journal of Food Engineering, Vol. 60, No. 2, pp. 125-130.

Lahsasni S., Kouhila M. , Mahrouz M. and Jaouhari J.T., 2004, "Drying Kinetics of Prickly Pear Fruit (*Opuntia ficus indica*)", Journal of Food Engineering, Vol. 61, No. 4, pp. 173-176.

Madamba, P. S., Driscoll, H. and Buckle, Ken A., 1996. "The Thin-layer Drying Characteristics of Garlic Slices", Journal of Food Engineering, Vol. 29, No. 1, pp. 75-97.

Mohapatra, D. and Rao, P.S., 2005, "A Thin Layer Drying Model of Parboiled Wheat", Journal of Food Engineering, Vol. 66, pp. 513-518.

Panchariya, P.C., Popovic, D. and Sharma, A.L., 2002, "Thin-layer Modelling of Black Tea Drying Process", *Journal of Food Engineering*, Vol. 52, pp. 349-357.

Poomsa-ad, N., Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S., and Terdyothin, A., 2002, "Effect of Tempering on Subsequent Drying of Paddy using Fluidisation Technique", *Drying Technology*, Vol. 20, No. 1, pp. 195-210.

Ramesh M. N., 2003, "Moisture transfer properties of cooked rice during drying", *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, Vol 36, No. 2, pp. 245-255.

Schwartz, P. J. and Bröcker S., 2002, "A Theoretical Explanation for the Inversion Temperature", *Chemical Engineering Journal*, Vol 86, No. 1, pp 61–67.

Taechapairoj, C., Dhuchakallaya, I., Soponronnarit, S., Wetchacama, S., and Prachayawarakorn, S., 2003, "Superheated Steam Fluidised Bed Paddy Drying", *Journal of Food Engineering*, Vol. 58, No. 1, pp. 67-73.

Tang, Z.; Cenkowski, S. and Muir, W.E., 2004, "Modelling the Superheated-steam Drying of a Fixed Bed of Brewers' Spent Grain", *Biosystems Engineering*, Vol. 87, No. 4, pp. 66-77.

Tang, Z.; Cenkowski, S. and Izydorczyk, M., 2005, "Thin-Layer Drying of Spent Grains in Superheated Steam", *Journal of Food Engineering*, Vol. 67, pp. 457-465.

Tirawanichakul, S., Prachyawarakorn, S., Varayanond, W., and Soponronnarit, S., 2004, "Simulation and Grain Quality for In-store Drying of Paddy", Journal of Food Engineering, Vol. 64, No. 4, pp. 405-415.

Yaldiz, O., Ertekin, C., and Uzun, H.I., 2001, "Mathematical Modeling of Thin Layer Solar Drying of Sultana Grapes", Energy, Vol 26, No 5, pp. 457-465.

Table 1

Results of regression analysis for the drying parameters of the selected equations

Media	Equation	T (°C)	Drying Constant	R ²
-------	----------	--------	-----------------	----------------

Hot air drying	Henderson's equation	130	A ₀		k ₀		0.991
		150	0.97643		0.16752		0.987
		170	0.98384		0.25486		0.996
	Page 's equation	130	k ₀		n ₀		0.998
		150	0.25385		0.80367		0.998
		170	0.41351		0.71692		0.999
	The logarithmic equation	130	A ₀	k ₀	C		0.999
		150	0.93147	0.20815	0.06507		0.999
		170	0.92598	0.32645	0.07218		0.999
	The two term equation	130	0.96771	0.40759	0.03099		0.999
		150	A ₀	k ₀	A ₁	k ₁	0.999
		170	0.72932	0.26046	0.27095	0.06927	0.999
Superheated steam drying	Henderson's equation	130	0.78583	0.39186	0.21394	0.07740	0.999
		150	0.73820	0.53358	0.26179	0.16698	0.999
		170	0.73820	0.53358	0.26179	0.16698	0.999
	Henderson's equation	130	A ₀		k ₀		0.966
		150	1.14000		0.12491		0.982
		170	1.14272		0.27156		0.984
	The modified Page equation	130	A ₀	k ₀	n ₀		0.968
		150	1.16627	0.15851	0.89481		0.984
		170	1.11646	0.22644	1.14769		0.991
	The logarithmic equation	130	1.08535	0.30230	1.37050		0.978
		150	A ₀	k ₀	C ₀		0.982
		170	1.01811	0.18585	0.15495		0.984
The two term equation	130	1.12250	0.28660	0.02511		0.979	
	150	1.14775	0.40353	-0.00812		0.982	
	170	1.14775	0.40353	-0.00812		0.984	
The two term equation	130	A ₀	k ₀	A ₁	k ₁	0.979	
	150	1.13710	0.15856	0.03049	-0.07949	0.982	
	170	.57866	0.26699	0.56394	0.27577	0.984	
		170	.57516	0.40999	0.56575	0.40953	0.984

Table 2

Regression coefficients in quadratic function for drying parameter and sum square error (SSE) of the selected equations

Media	Equation	Parameter in Quadratic Relationship			SSE
		a_0	a_1	a_2	
Hot air drying	The Handerson's equation				0.011136
	A_0	1.020651	-0.00096	0.000005	
	k_0	0.18169	-0.00399	0.000030	0.009787
	The Page's equation				
	k_0	-2.25878	0.02916	-0.00008	
	n_0	4.647532	-0.05144	0.000168	0.00980
	The logarithmic equation				
	A_0	2.11836	-0.01680	0.00006	
	k_0	-1.46669	0.01892	-0.00005	
	C_0	-1.15878	0.01726	-0.00006	0.00971
	The two term equation				
	A_0	-2.17649	0.03928	-0.00013	
	k_0	-0.34215	0.00296	0.00001	
	A_1	3.19766	-0.03955	0.00013	
	k_1	2.00177	-0.02810	0.00010	
Superheated steam drying	The Handerson Equation				0.00375
	A_0	1.01098	0.00173	-0.00001	
	k_0	-1.03565	0.01031	-0.00001	0.00305
	The modified Page's equation				
	A_0	1.94600	-0.00904	0.00002	
	k_0	-0.09008	0.00063	0.00001	0.00302
	n_0	-0.09008	0.00063	0.00001	
	The logarithmic equation				
	A_0	-1.58917	0.03291	-0.00010	
	k_0	-0.07450	-0.00063	0.00002	0.00299
	C_0	3.35406	-0.04031	0.00012	
	The two term equation				
	A_0	18.29338	-0.22215	0.00069	
	k_0	0.29660	-0.00668	0.00004	
	A_1	-16.39555	0.21274	-0.00066	
	k_1	-7.78745	0.09528	-0.00028	

Table 3

The L^* value of sample obtained from three levels of final moisture content.

Media	T (°C)	L^* value					
		12% dry basis		14% dry basis		16% dry basis	
		Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.

HA	130	54.93 a	0.74	55.51 a	0.22	57.42 a	0.64
	150	53.90 ab	0.39	54.46 a	0.40	57.63 a	0.49
	170	52.98 b	0.85	54.98 a	0.18	56.59 a	0.58
SS	130	49.75 c	0.51	51.02 b	0.20	54.85 b	0.58
	150	49.70 c	0.74	51.05 b	1.49	53.70 b	1.28
	170	47.35 d	0.45	49.72 b	0.91	51.91 b	0.29

Means with the same letter within a column are not significantly different ($P < 0.05$) by DMRT.

Table 4

The a^* value of sample obtained from three levels of final moisture content.

Media	T (°C)	a^* value					
		12% dry basis		14% dry basis		16% dry basis	
		Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
HA	130	-1.08 a	0.05	-1.68 a	0.09	-1.78 a	0.12
	150	0.32 b	0.52	-1.43 ab	0.36	-1.62 a	0.08
	170	2.88 c	0.08	2.39 c	0.20	-0.52 b	0.79
SS	130	-1.13 a	0.02	0.86 b	0.09	3.03 a	0.27
	150	-1.20 d	0.06	-1.23 b	0.15	2.72 a	0.11
	170	-1.70 c	0.08	-1.61 c	0.16	0.77 c	0.04

Means with the same letter within a column are not significantly different ($P < 0.05$) by DMRT.

Table 5

The b^* value of sample obtained from three levels of final moisture content.

Media	T (°C)	b^* value					
		12% dry basis		14% dry basis		16% dry basis	
		Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
HA	130	14.47 a	0.17	13.44 a	0.59	13.48 a	0.27
	150	16.70 b	1.23	15.65 b	0.33	15.43 b	0.15
	170	18.49 cd	0.47	17.74 d	0.54	16.34 c	0.57
SS	130	15.23 a	0.24	14.13 a	0.37	13.15 a	0.36
	150	17.41 b	0.83	15.59 b	0.32	14.36 d	0.38
	170	19.24 d	0.25	17.20 c	0.28	16.07 c	0.15

Means with the same letter within a column are not significantly different ($P < 0.05$) by DMRT.

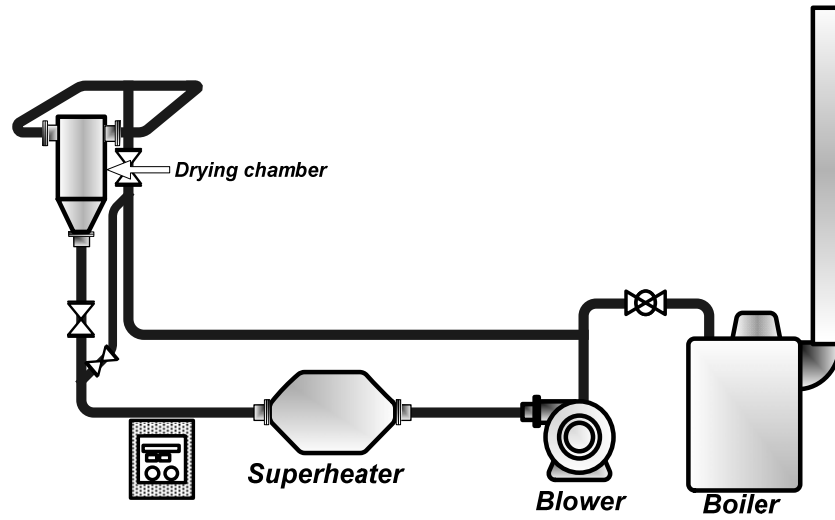


Fig. 1 A schematic diagram of the experimental dryer.

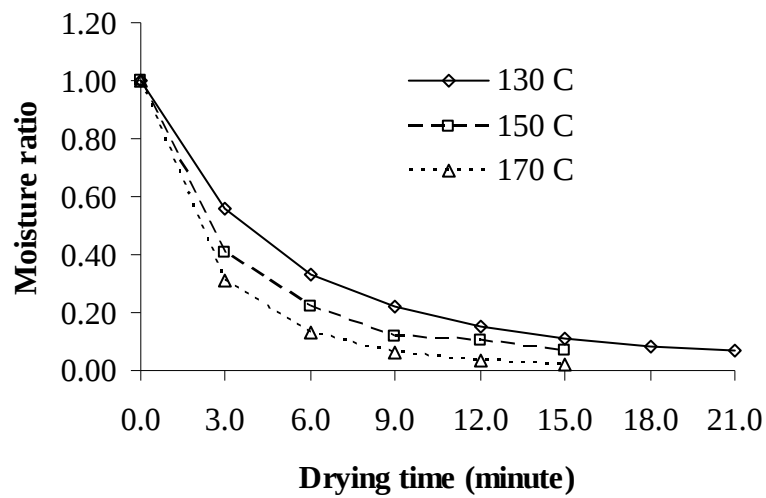


Fig. 2 Variation in moisture ration of cooked glutinous rice at different drying temperatures during drying by hot air.

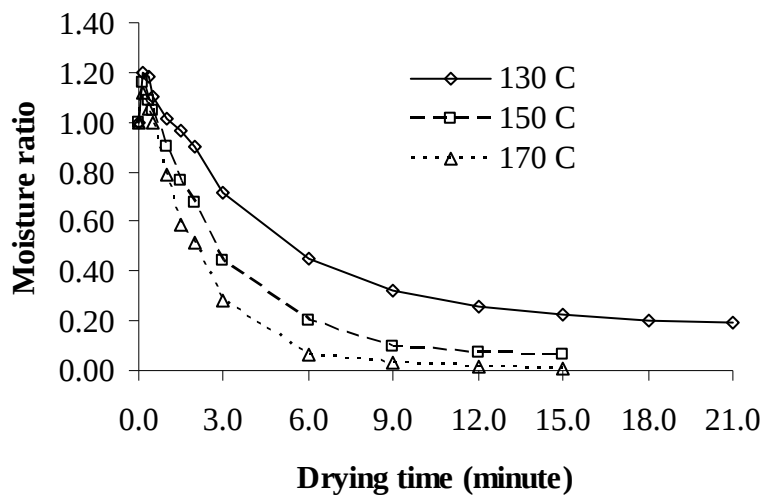


Fig. 3 Variations in moisture ratios of cooked glutinous rice at different drying temperatures during drying by superheated steam.

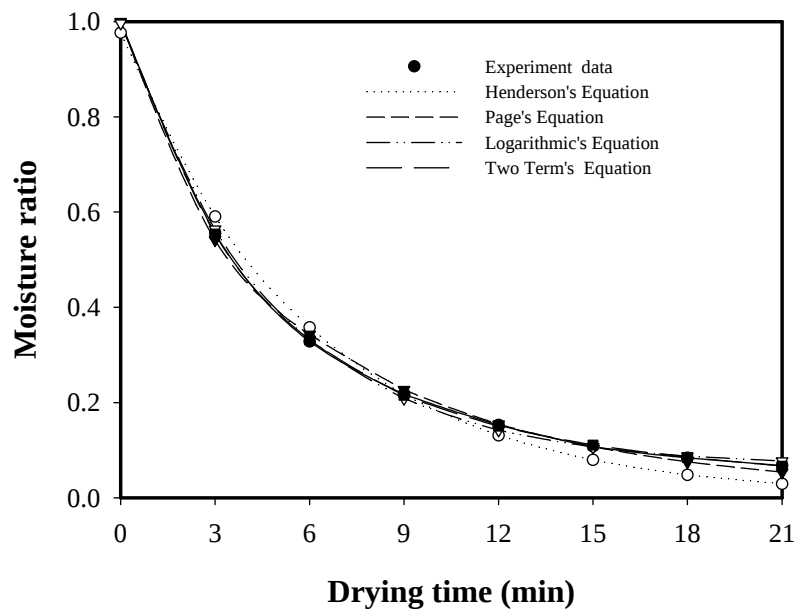


Fig. 4 Experimental data and the predicted drying curve under hot air at drying temperature of 130°C.

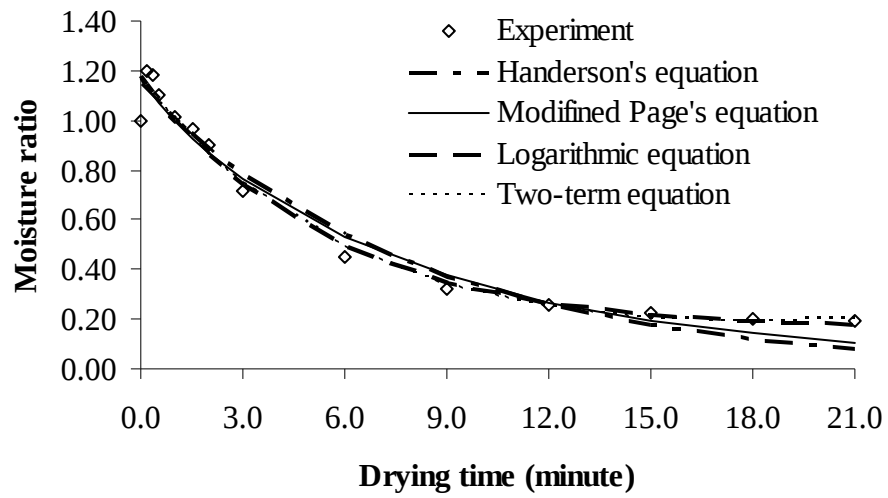


Fig. 5 Experimental data and the predicted drying curve under superheated steam at drying temperature of 130°C.

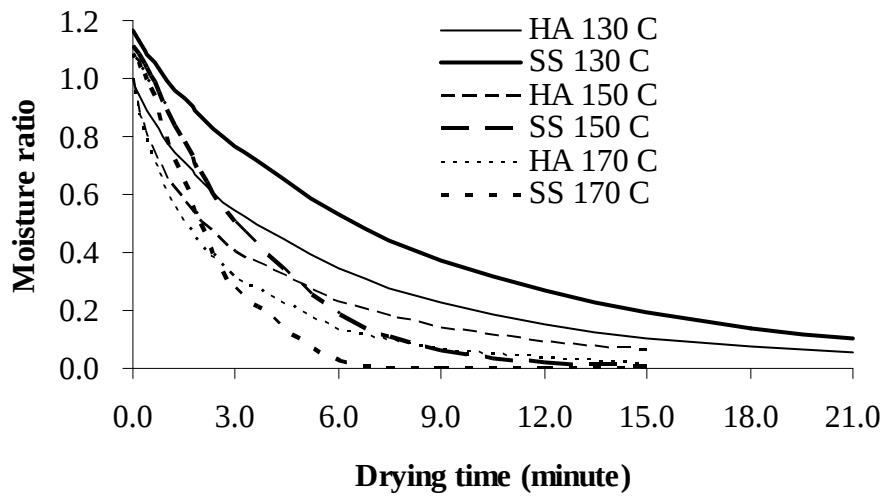


Fig. 6 Comparison of drying rates of cooked glutinous rice obtained from prediction equation under superheated steam (SS) and hot air (HA) at different drying temperatures.

ผลงานจากโครงการ

มนตรี มন্ত্রীพิลา, สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ และ ณัฐพล ภูมิสะอาด, 2547, สมการจลศาสตร์การ
อบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสัปดาห์ด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง, การประชุมวิชาการเครือข่าย
วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18, 18-20 ตุลาคม 2547, จ. ขอนแก่น

สมการจลศาสตร์การอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสีกด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน Drying Kinetics of Cooked Glutinous Rice Using Superheated Steam and Hot Air

มนตรี มนต์รีพิลา¹ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์² ณัฐพล ภูมิสะอาด³

¹นิสิตปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

²คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

³คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

โทรศัพท์ 043-754364 ต่อ 3028 โทรสาร 043-754316 E-mail: nattapol.p@msu.ac.th¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบจลศาสตร์ของการอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสีกด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน โดยใช้อุณหภูมิของตัวกลางในการอบแห้งคือ 130, 150 และ 170 องศาเซลเซียส ความเร็วของตัวกลางในห้องอบแห้ง 1 เมตร/วินาที สมการการอบแห้งในรูปแบบต่าง ๆ 5 รูปแบบนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบทางสถิติเพื่อหาสมการที่ทำนายผลการอบแห้งได้ดีที่สุด จากการทดลองพบว่าอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่อุณหภูมิสูงกว่า 150 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเริ่มสูงกว่าอากาศร้อน สมการของ Page สามารถทำนายผลของอัตราการอบแห้งด้วยลมร้อนได้ดีที่สุด ส่วนการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง สมการ Modified Page สามารถทำนายได้ดีที่สุด

Abstract

The main objective of this work is to study the comparative drying kinetics of cooked glutinous rice using superheated steam and hot air. The experimental were investigated for a temperature range 130°C-170°C and at constant media velocity of 1m/s. The drying data were then fitted to the five different drying equations. The experimental results found that the drying rate was increase with the temperature and The moisture reduction rate during superheated steam drying is higher than hot air under drying temperature above 150°C. The Page's equation were suitable used to predict the drying rate of glutinous rice using hot air and Modified Page's equation were suitable used to predict the drying rate of glutinous rice using superheated steam

1. บทนำ

ข้าวจัดว่าเป็นพืชชนิดหนึ่งซึ่งอยู่ในวงศ์ แกรมมีนี(Graminae) เช่นเดียวกับหญ้าใบเลี้ยงเดี่ยว(Monocotyledon) อื่นๆ รวมทั้งไม้ไผ่

ด้วย ข้าวที่ปลูกกันทั่วโลกมี 2 specie คือ *Oryza sativa* และ *Oryza glaberrima* *Oryza sativa* ข้าวที่ปลูกเพื่อการบริโภคและเป็นการค้ามากที่สุด จำแนกได้หลายชนิด เช่น จำแนกตามลักษณะ Phynotype และจำแนกตามความแตกต่างของแป้งในเมล็ด แป้งในเมล็ดข้าวจะประกอบไปด้วยแป้ง 2 ชนิด คือ amylase และ amylopectin

ข้าวเหนียว (Glutinous rice) พันธุ์ข้าวนี้มีลักษณะของ endosperm เป็นสีขาวขุ่นแต่มีความเลื่อมมัน เมื่อนำไปหุงต้มจะเหนียว เมล็ดเกาะตัวกันดี หากหุงต้มในน้ำมากเกินไป เมล็ดจะบานออกและยังคงเกาะตัวดีเหมือนเดิม แป้งในเมล็ดส่วนใหญ่เป็น Amylopectine ตั้งแต่ 92 – 100 เปอร์เซนต์ ข้าวเหนียวนิยมบริโภคและเพราะปลูกมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ปัจจุบันได้มีการส่งออกข้าวเหนียวแห้งไปยังต่างประเทศ แต่วิธีการทำแห้งข้าวเหนียวยังใช้วิธีดั้งเดิมคือการตากแดดซึ่งต้องใช้เวลาและพื้นที่ในการตากแห้งมากและมีสิ่งปนเปื้อนเข้าผสมมากมาย

การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งได้มีการพัฒนาเป็นเวลานานแล้ว แต่งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่เป็นการอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช่อาหาร เช่น ไม้, กากน้ำตาล และ ถ่านหิน เป็นต้น เมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับอากาศร้อนในแง่ของอุณหภูมิในการอบแห้ง ที่อุณหภูมิการอบแห้งต่ำ อัตราการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งต่ำจะมีค่าต่ำกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน และอัตราการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยจุดที่อัตราการอบแห้งของทั้งสองตัวกลางมีค่าเท่ากันเรียกจุดนี้ว่า อุณหภูมิผกผัน (Inversion temperature) [4] ได้ทำการศึกษาและรวบรวมงานวิจัยเกี่ยวกับ อุณหภูมิผกผัน พบว่า อุณหภูมิผกผัน มีค่าไม่แน่นอนขึ้นกับรูปแบบของกระบวนการอบแห้งและลักษณะทางกายภาพของวัสดุ และเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งสูงกว่า อุณหภูมิผกผัน อัตราการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะสูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน

ข้อแตกต่างอื่น ๆ ระหว่างการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งไม่มีปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือเกิดการเผาไหม้ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีขึ้น การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งสามารถฆ่าเชื้อโรค หรือกำจัด

กลิ่นของอาหารได้ แต่ข้อเสียการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีระบบที่มีความซับซ้อน เมื่อมีผลิตภัณฑ์เข้ามาในระบบ ไม่สามารถหลีกเลี่ยงการกลั่นตัวของไอน้ำได้ ทำให้เวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น 10-15% ที่ความดันบรรยากาศ

จุดประสงค์งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาแนวทางการอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสีกด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในเครื่องอบแห้งแบบตู้ และ เปรียบเทียบคุณภาพของข้าวเหนียวหนึ่งสีกที่ได้จากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งการอบแห้งด้วยลมร้อนในเครื่องอบแห้งแบบตู้

2. สมการอบแห้งชั้นบาง

สมการอบแห้งชั้นบางสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ สมการทางทฤษฎี, สมการกึ่งทฤษฎีและสมการเอมไพริคัล โดยที่สมการอบแห้งทางทฤษฎีพิจารณาการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุที่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุน การเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุส่วนใหญ่อยู่ในรูปของของเหลวที่เป็นผลเนื่องจากความเข้มข้นของความชื้นสมการทางทฤษฎีจะแสดงการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของน้ำในลักษณะการแพร่เมื่อสัมประสิทธิ์การแพร่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการอบแห้ง แต่อย่างไรก็ตามสมการทางทฤษฎีมีจำนวนเทอมในการวิเคราะห์จำนวนมากขึ้นอยู่กับรูปร่างของผลิตภัณฑ์

สมการอบแห้งกึ่งทฤษฎีเป็นสมการจำลองการอบแห้งแบบง่าย ๆ โดยการนำสมการทางทฤษฎีมาวิเคราะห์ให้ง่ายขึ้น และไม่ต้องนำรูปทรงของผลิตภัณฑ์มาพิจารณา ซึ่งทำให้สมการไม่มีความซับซ้อน

สมการ Henderson เป็นสมการกึ่งทฤษฎีแบบแรกที่น่าสนใจในการคำนวณอัตราส่วนความชื้น โดยพิจารณาเฉพาะเทอมแรกในสมการทางทฤษฎี มีรูปแบบสมการดังนี้

$$MR = \left(\frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \right) = A_0 \exp(-k_0 t) \quad (1)$$

สมการ Two term เป็นสมการที่อธิบายการอบแห้งการอบแห้งผลไม้อย่างมีประสิทธิภาพ [5] และการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคฟลูอิดเบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง [8] ได้อย่างน่าพอใจ โดยมีรูปแบบสมการมาจาก การพิจารณาสองเทอมแรกในสมการทางทฤษฎีดังนี้

$$MR = \left(\frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \right) = A_0 \exp(-k_0 t) + B_0 \exp(-k_1 t) \quad (2)$$

สมการอบแห้งเอมไพริคัลเป็นสมการที่ใช้ในการทำนายอัตราการอบแห้งได้ดี แต่มีข้อจำกัดคือเงื่อนไขการอบแห้งต้องตรงกับสภาวะการทดลอง สมการ Logarithmic equation เป็นสมการเอมไพริคัลที่ใช้ในการทำนายอัตราการอบแห้งใบหม่อนขาว [3] ได้ดี โดยรูปสมการจะเป็นการเพิ่มพารามิเตอร์เข้าไปในสมการอบแห้งของ Henderson รูปแบบของสมการ Logarithmic มีดังนี้

$$MR = \left(\frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \right) = A_0 \exp(-k_0 t) + c \quad (3)$$

สมการอบแห้งเอมไพริคัลอีกแบบหนึ่งที่เป็นที่นิยมทั่วไปคือสมการ Page มีรูปแบบสมการดังนี้

$$MR = \left(\frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \right) = \exp(-k_0 t^n) \quad (4)$$

สมการนี้เป็นสมการที่ใช้ในการทำนายอัตราการอบแห้งพริกไทยแดง[1] การอบแห้งข้าวโพด[2]ด้วยอากาศร้อนได้ดี

จากทั้งสี่สมการที่กล่าวมาข้างต้นใช้ในการทำนายลักษณะเฉพาะของการอบแห้งของอากาศร้อนได้ดี

สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในระยะเริ่มต้นการอบแห้งจะเกิดการควบแน่นที่ผิวของผลิตภัณฑ์ เป็นช่วงสั้นๆ และช่วงเริ่มต้นการอบแห้งสั้นๆนี้ไม่มีแบบจำลองอบแห้งทางคณิตศาสตร์ ทำนายช่วงเวลาดังกล่าวได้ [8][9] จากผลดังกล่าวจะทำให้อัตราส่วนความชื้นสูงกว่าอัตราส่วนความชื้นเริ่มต้นเล็กน้อย ดังนั้น Tang et al.[9] จึงนำสมการอบแห้ง Page's equation มาดัดแปลงเพิ่มค่าคงที่ลงในสมการเพื่อให้เหมาะสมกับการทำนายการเกิดการควบแน่นของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและเรียกสมการนี้ว่า สมการดัดแปลง ของ Page

$$MR = \left(\frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \right) = A_0 \exp(-k_0 t^n) \quad (5)$$

เมื่อ	MR	คือ อัตราส่วนความชื้น
	M_t	คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ, % dry basis
	M_e	คือ ความชื้นสมดุล, % dry basis
	M_i	คือ ความชื้นเริ่มต้น, % dry basis
	t	คือ เวลา, นาที

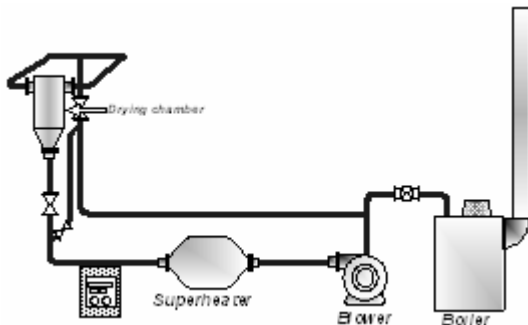
A_0, B_0, k_0, k_1, n คือ พารามิเตอร์ของสมการ

3. วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง

วัตถุประสงค์ในการทดลองครั้งนี้คือข้าวเหนียวพันธุ์ กข.6 นำข้าวเหนียวมาแช่ก่อนทำการนึ่ง 6 ชม. ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปนึ่งเมื่อผลิตภัณฑ์สุกแล้วนำไปเก็บในภาชนะปิด แล้วปล่อยให้เย็นก่อนนำมาทำการทดลอง โดยที่ความชื้นเริ่มต้น 64.68 % db นำผลิตภัณฑ์ใส่ภาชนะทำการชั่งน้ำหนักประมาณ 150 กรัมเข้าห้องอบ โดยอบแห้งที่อุณหภูมิ 130, 150 และ 170 °C

รูปที่ 1 แสดงระบบการอบแห้งของไอน้ำร้อนยวดยิ่งประกอบ ด้วยถังความดันผลิตไอน้ำที่ความดันบรรยากาศ พัดลมความดันสูงใบพัดโค้งหลัง ชุดให้ความร้อนเพื่อทำให้อไอน้ำร้อนอ้อมตัวเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่งห้องอบแห้ง อัตราการไหลของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งควบคุมโดยการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ และระบบท่อไอน้ำ การทำงานของระบบเริ่มต้นจากการอุ่นระบบโดยให้ความร้อนแก่อากาศร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ เพื่อเป็นการป้องกันการกลั่นตัวของไอน้ำภายในระบบอบแห้งขณะทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เมื่อระบบคงที่ปิดวาล์วลปล่อยไอน้ำอ้อมตัวจาก ถังความดันเข้าสู่หน่วยให้ความร้อนโดยพัดลมความดันสูงเพื่อเปลี่ยนสถานะจากไอน้ำอ้อมตัวเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

จากนั้นจะส่งไอน้ำร้อนยวดยิ่งเข้าสู่ห้องอบแห้ง และในการการอบด้วยอากาศร้อนก็ปฏิบัติเช่นเดียวกันแต่จะไม่ต้องเปิดไอน้ำร้อนตัวเข้าสู่ระบบ



รูปที่ 1. ระบบเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

4.การทดลองและการวิเคราะห์ผล

เมื่อสภาวะการอบแห้งคงที่แล้วนำข้าวเหนียวหนึ่งสีกเข้าในห้องอบ แล้วขณะบรรจุประมาณ 150 กรัม ความเร็วของตัวกลางเข้าสู่ห้องอบ 1 เมตร/วินาที โดยบันทึกน้ำหนักผลิตภัณฑ์ 3 6 9 12 และ 15 นาที สำหรับลมร้อน แต่ในส่วนของไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพิ่มในช่วงแรกของการอบแห้งคือ 0.33 0.66 1 1.5 และ 2 นาที เพื่อศึกษาผลของการควบแน่นของน้ำ แต่ละอุณหภูมิทำการทดลอง 3 ครั้ง นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ห้อัตราส่วนความชื้นต่อเวลาการอบแห้ง และเปรียบเทียบผลการทดลองกับการทำนายผลของสมการอบแห้งชั้นบาง (1)-(5)

ในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสมการการอบแห้งได้โดยใช้เทคนิคของการวิเคราะห์ถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear regression) ของอัตราการอบแห้ง(MR)ต่อเวลา(t) ผลการวิเคราะห์การถดถอย นำมาหาความสัมพันธ์แบบแม่นยำตรง(The exact fitting)ระหว่างอุณหภูมิการอบแห้งกับค่าพารามิเตอร์การอบแห้งด้วยสมการ Quadratic

$$\chi = a_0 T^2 + a_1 T + a_2 \quad (6)$$

เมื่อ χ ค่าพารามิเตอร์จากการทดลองจากสมการอบแห้งที่เลือกที่อุณหภูมิต่างๆ

และนอกจากนี้ยังใช้ค่า The sum square error (SSE) ดังสมการ

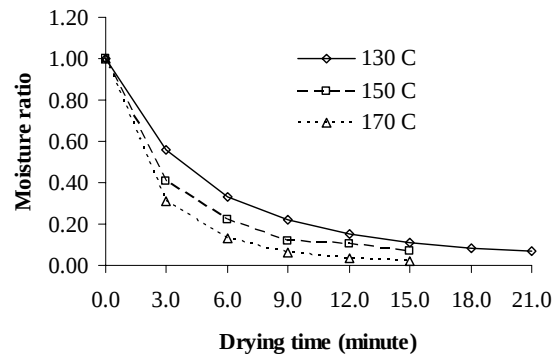
$$SSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{obs} - MR_{pre})^2 \quad (7)$$

เป็นดัชนีบ่งชี้ที่แสดงความสามารถในการทำนายของสมการที่นำมาอธิบายผลการทดลองและชี้วัดว่าสมการใดเหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้ต่อไป

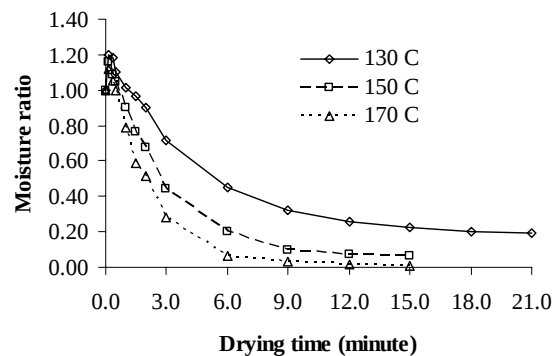
5.ผลการทดลองและวิจารณ์

ในการทดลองศึกษาจากศาสตร์การอบแห้ง เป็นการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิและตัวกลางในการอบแห้ง(อากาศร้อนและไอน้ำ)ต่ออัตราการอบแห้ง โดยความชื้นมาตรฐานแห้งที่เวลาใดๆในการอบแห้งจะถูก

แปลงเป็นพารามิเตอร์ไร้หน่วยคือ อัตราส่วนความชื้นต่อเวลาดังรูปที่ 2 และรูปที่3



รูปที่ 2. เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสีกด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่3. เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสีกด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 2. พบว่า อัตราส่วนความชื้นลดลงตามเวลาในรูปแบบของเอ็กซ์โพเนนเชียล ในส่วนของไอน้ำร้อนยวดยิ่งในรูปที่ 3. พบว่าในช่วงเริ่มต้น(30 วินาทีแรก)ของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง อัตราส่วนความชื้นเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 1 ถึง1.2 เนื่องจากในช่วงแรกของการอบแห้ง อุณหภูมิผิวของผลิตภัณฑ์ต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำ ทำให้เกิดการควบแน่นของไอน้ำที่ใช้ในการอบแห้งที่บริเวณผิวของผลิตภัณฑ์ ผลการทดลองที่ได้คล้ายกับที่พบโดย Tang,Z[9] และ Taechapairoj,C[10] หลังจากให้อัตราส่วนความชื้นเพิ่มขึ้นถึงจุดสูงสุดแล้ว อัตราส่วนความชื้นลดลงตามเวลาในลักษณะเดียวกันกับการอบแห้งด้วยลมร้อน ซึ่งเมื่อพิจารณาอัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่า ทั้งการอบแห้งด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง อัตราการอบแห้งที่

อุณหภูมิสูง มากกว่าที่อุณหภูมิต่ำอย่างชัดเจน เนื่องจากอัตราการถ่ายความร้อนให้กับผลิตภัณฑ์เพื่อใช้ในการระเหยน้ำมีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อนำผลการทดลองการอบแห้งมาวิเคราะห์เพื่อหาพารามิเตอร์ในสมการอบแห้งแบบต่าง ๆ ด้วยการวิเคราะห์แบบไม่เป็นเชิงเส้นโดย

พิจารณาสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ดังแสดงที่ตารางที่ 1.ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มากกว่า 0.9 แต่อย่างไรก็ตามในส่วนของ

การอบแห้งด้วยลมร้อนมีค่า R^2 มากกว่า การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งทั้งนี้อาจเนื่องจากจำนวนข้อมูลของไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีจำนวนมากกว่าและผลของการเกิดการควบแน่น

เมื่อนำสมการอบแห้งมาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์(A_0, b_0, k_0, k_1, n) ด้วยสมการโพลีโนเมียลอันดับ 2 ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยโดยการพิจารณาจากค่า SSE ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความแม่นยำของสมการอบแห้งที่นำมาทำนายผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่า ใน

ส่วนของลมร้อน สมการของ Page และสมการ logarithmic มีค่า SSE . ใกล้เคียงกันและต่ำกว่า ผลที่ได้จากสมการอื่น ๆ แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากจำนวนพารามิเตอร์ในสมการของ Page น้อยกว่า จึงมีความเหมาะสมในการใช้ทำนายอัตราการอบแห้งด้วยลมร้อน ในส่วนของของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง สมการดัดแปลงของ Page มีค่า SSE น้อยที่สุด จึงมีความเหมาะสมในการใช้ทำนายอัตราการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ถดถอยค่าคงที่พารามิเตอร์ของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

Media	Equation	T (°C)	Drying Constant				R^2
Hot air drying	The Henderson's equation		A_0	k_0			
		130	0.97761	0.16684			0.991
		150	0.98252	0.25213			0.985
	The Page 's equation	170	0.99499	0.036335			0.996
			k_0	n_0			
		130	0.24845	0.81192			0.998
	The logarithmic equation	150	0.42381	0.69753			0.998
		170	0.50449	0.77155			0.999
	The two term equation		A_0	k_0	C		
		130	0.93337	0.02058	0.06360		0.999
		150	0.91925	0.33166	0.07920		0.999
		170	0.96849	0.40322	0.03012		0.999
	The two term equation		A_0	k_0	A_1	k_1	
		130	0.48880	0.16684	0.48880	0.16684	0.991
		150	0.15746	0.04916	0.84205	0.36933	0.999
		170	0.28108	0.17372	0.71888	0.53702	0.999
Superheated steam drying	The Henderson's equation		A_0	k_0			
		130	1.13992	0.12494			0.966
		150	1.14175	0.27106			0.982
	The modified Page 's equation	170	1.13933	0.41118			0.983
			A_0	k_0	n_0		
		130	1.16511	0.15715	0.89858		0.968
	The logarithmic equation	150	1.11359	0.22254	1.16050		0.984
		170	1.08261	0.30111	0.138267		0.991
	The two term equation		A_0	k_0	C_0		
		130	1.019578	0.18454	0.15268		0.978
		150	1.123065	0.28484	0.02316		0.982
		170	1.142914	0.40796	0.00421		0.983
	The two term equation		A_0	k_0	A_1	k_1	
		130	0.02944	-0.08023	1.13734	0.15763	0.979
		150	0.57087	0.271157	0.57087	0.27095	0.982
		170	0.56967	0.41146	0.56967	0.41096	0.983

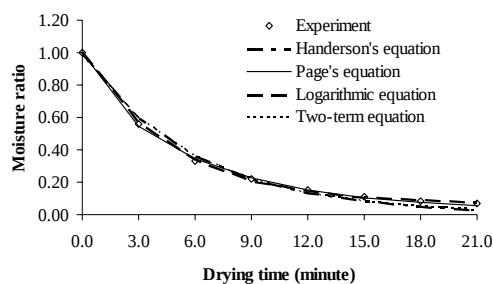
ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ถดถอยค่าคงที่พารามิเตอร์ของการอบแห้งด้วยสมการโพลีโนเมียลอันดับ 2 และค่า SSE ของการอบแห้ง

Media	Equation	Parameter in Quadratic Relationship			SSE
		a ₀	a ₁	a ₂	
Hot air drying	The Handerson's equation				
	A ₀	0.00001	-0.00240	1.12997	0.00099
	k ₀	0.00038	0.01964	7.72649	
	The Page 's equation				
	k ₀	-0.00012	0.04191	3.19921	0.00029
	n ₀	0.00024	-0.07166	6.14795	
	The logarithmic equation				
	A ₀	0.00008	-0.2288	2.56955	0.00024
	k ₀	-0.00030	0.09939	7.83974	
	C ₀	-0.00008	0.02342	1.16437	
	The two term equation				
	A ₀	0.00057	0.17580	13.73216	0.00092
	k ₀	0.00030	0.09067	6.83636	
	A ₁	-0.00060	0.18441	-13.42006	
	k ₁	-0.00004	0.02230	-1.99760	
The Handerson Equation					
A ₀	-0.00001	0.00158	1.02443	0.00650	
k ₀	-0.00001	0.00941	-0.97109		
The modified Page's equation					
A ₀	0.00003	-0.00976	2.00065	0.00554	
k ₀	0.00002	-0.00134	0.05338		
n ₀	-0.00161	0.46255	-32.10513		
The logarithmic equation					
A ₀	-0.00010	0.03445	-1.69176	0.00794	
k ₀	0.00003	-0.00297	0.08883		
C ₀	0.00014	-0.04518	3.68970		
The two term equation					
A ₀	-0.00068	0.21699	-16.71646	0.00792	
k ₀	-0.00026	0.09145	-7.50942		
A ₁	0.00071	-0.22617	18.59785		
k ₁	0.00003	-0.00368	0.07162		

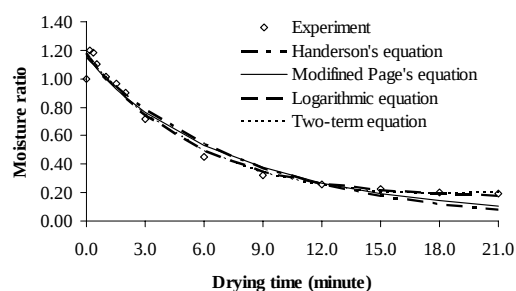
เมื่อนำผลการวิเคราะห์ทางสถิติมาสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่อุณหภูมิที่ 130°C ดังรูปที่ 4. และรูปที่ 5

รูปที่ 4. เป็นการอบแห้งด้วยอากาศร้อนสมการของ Page และสมการ Logarithmic สามารถสร้างกราฟได้ใกล้เคียงผลการทดลอง สมการดังกล่าวจึงเหมาะสำหรับ ทำนายการอบแห้งด้วยอากาศร้อน

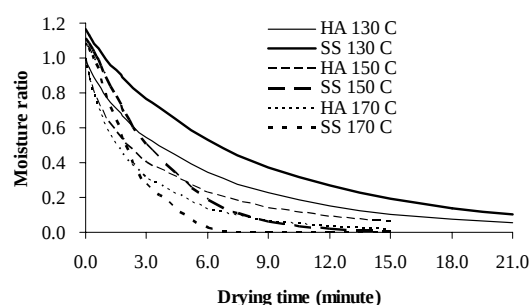
สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง จากรูปที่ 5 เป็นการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 130°C เช่นกัน พบว่าเส้นกราฟของสมการดัดแปลงของ Page ใกล้เคียงกับผลการทดลอง สมการดัดแปลงของ Page จึงทำนายการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งได้ดีที่สุด



รูปที่4. อัตราการอบแห้งของข้าวเหนียวด้วยลมร้อนที่ อุณหภูมิ 130 °C



รูปที่5. อัตราการอบแห้งของข้าวเหนียวด้วยไอน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 150 °C



รูปที่ 6. เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งที่ได้จากสมการของ Page สำหรับลมร้อน และสมการดัดแปลงของ Page สำหรับไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากรูปที่ 6. พบว่า อัตราการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ที่ 130°C สูงกว่าไอน้ำร้อนยวดยิ่ง แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่า 150 °C พบว่าอัตราการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเริ่มสูงกว่าอากาศร้อน ดังนั้นกล่าวได้ว่า Inversion temperature ของการอบแห้งข้าวเหนียวนี้สูงอยู่ระหว่าง 130-150°C ซึ่งต่ำกว่าผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ดังรายงานไว้ใน [4]

5.สรุป

จากการทดลองเพื่อศึกษาการเปรียบเทียบจลนศาสตร์การอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสีกด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับอากาศร้อน

1. อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่ออัตราการลดความชื้น เนื่องจากอุณหภูมิสูงให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูง
2. อัตราการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ที่ 130°C สูงกว่าไอน้ำร้อนยวดยิ่ง แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่า 150 °C พบว่าอัตราการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเริ่มสูงกว่าอากาศร้อน

3.จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าสมการ Page's equation สามารถทำนายผลการทดลองการอบแห้งด้วยอากาศร้อนได้ดีที่สุด สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งสมการ Modified Page's equation สามารถทำนายผลอัตราการลดความชื้นได้ดีที่สุด

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัยที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Doymaz, I. and Pala, M., "Hot air characteristics of red paper", Journal of Food Engineering, 2003, Vol. 55, No. 2, pp. 331-335.
- [2] Doymaz, I. and Pala, M., "The Thin-layer Drying Characteristics of Corn", Journal of Food Engineering, 2003, Vol. 60, No. 2, pp. 125-130.
- [3] Doymaz, I., "Drying kinetic of white mulberry", Journal of Food Engineering, 2004, Vol. 61, pp.341-346
- [4] Jorg P. and Schwartze, S. B. "A theoretical for the inversion temperature", Chemical Engineering Journal Vol.86 ,2002, pp.61-67
- [5] Lahsasni S., Kouhila M. , Mahrouz M. and Jaouhari J.T., "Drying Kinetics of Prickly Pear Fruit", Journal of Food Engineering, 2004, Vol. 61, No. 4, pp. 173-176.
- [6] Madamba, P. S., Driscoll, R. H. and Buckle, K. A., 1996. "The Thin-layer Drying Characteristics of Garlic Slices", Journal of Food Engineering, Vol. 29, No. 1, pp. 75-97.
- [7] Poomsa-ad, N., Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S., and Terdyothin, A., 2002, "Effect of Tempering on Subsequent Drying of Paddy using Fluidisation Technique", Drying Technology, Vol. 20, No. 1, pp. 195-210.
- [8] Taechapairoj, C., Dhuchakallaya, I., Soponronnarit, S., Wetchacama, S., and Prachayawarakorn, S., "Superheated Steam Fluidised Bed Paddy Drying", Journal of Food Engineering, 2003, Vol. 58, No. 1, pp. 67-73.
- [9] Tang, Z.; Cenkowski, and Muir, W.E., "Modelling the Superheated-steam Drying of a Fixed Bed of Brewers' Spent Grain", Biosystems Engineering,2004., Vol. 87, No. 4, pp. 66-77.
- [10] Tirawanichakul, S., Prachayawarakorn, S., Varayanond, W., and Soponronnarit, S., "Simulation and Grain Quality for In-store Drying of Paddy", Journal of Food Engineering, 2004, Vol. 64, No. 4, pp. 405-415.

ผลงานจากโครงการ

วัชรานนท์ จุฑาจันทร์ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ ศิริธร ศิริอมรพรรณ และ ณัฐพล ภูมิสะอาด, 2548, สมบัติทางกายภาพของข้าวเหนียวหนึ่งสุกหลังการอบแห้งด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง, การประชุมวิชาการครั้งที่ 6 ประจำปี 2548 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย จำนวน 8 หน้า

สมบัติทางกายภาพของข้าวเหนียวหนึ่งสุกหลังการอบแห้ง

วัชรานนท์ จุฑาจันทร์^{1*} สมชาติ ไสภณธนฤทธิ์² ศิริธร ศิริอมรพรรณ³ และ ณัฐพล ภูมิสะอาด⁴

บทคัดย่อ

การศึกษาสมบัติทางกายภาพของข้าวเหนียวหนึ่งสุกหลังการอบแห้ง วิธีการศึกษาเปรียบเทียบคือการอบแห้ง โดยวิธีการตากแดด วิธีการใช้ลมร้อน และวิธีการใช้อุณหภูมิต่ำร้อนชนิดอื่น โดยใช้อุณหภูมิของตัวกลางในการอบแห้งโดยวิธีการใช้ลมร้อน และวิธีการใช้อุณหภูมิต่ำร้อนชนิดอื่นคือ 130, 150 และ 170 องศาเซลเซียส ทำการทดลองโดยการวัดสี การดูโครงสร้างภายในด้วย Scanning electron microscope (SEM) และความหนาแน่น นำมาใช้ในการเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของข้าวเหนียวที่เปลี่ยนแปลงหลังจากการอบแห้ง จากการศึกษาพบว่าสีของตัวอย่างที่อบแห้งด้วยลมร้อนมีสีคล้ำเล็กน้อย และการอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำร้อนชนิดอื่นมีสีคล้ำมากที่สุด ผิวของตัวอย่างที่อบแห้งด้วยลมร้อนและอุณหภูมิต่ำร้อนชนิดอื่นจะมีรูที่ผิวเป็นจำนวนมาก และภายในตัวอย่างที่อบแห้งด้วยลมร้อนและอุณหภูมิต่ำร้อนชนิดอื่นจะมีโพรงเกิดขึ้น การอบแห้งด้วยวิธีการใช้อุณหภูมิต่ำร้อนชนิดอื่นให้ค่าความหนาแน่นจริงมากกว่าการอบแห้งด้วยวิธีการใช้ลมร้อน แต่ความหนาแน่นปรากฏของการอบแห้งทั้ง 2 วิธีจะไม่แตกต่างกัน

¹นิสิตปริญญาโท ⁴อาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150

²อาจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

³อาจารย์ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลตลาด อ.เมือง จ.มหาสารคาม 44000

*ผู้รับผิดชอบบทความ โทร: 09-1863132; อีเมล: watcharanon_j@hotmail.com

PHYSICAL PROPERTIES OF COOKING GLUTINOUS RICE AFTER DRYING

Watcharanon jutajan^{1*}, Somchart Soponronnarit², Sirithon Siriamornpun³ and Nattapol Poomsa-ad⁴

ABSTRACT

The objective of this research aims to study the physical properties of cooking glutinous rice after drying by sun drying, hot air and superheated steam. Hot air and superheated steam were investigated for a temperature range 130°C-170°C. Colour test, scanning electron microscope (SEM) and density were used to determine the physical properties during drying. The experimental result indicated that the colour of cooking glutinous rice after drying by superheated steam was the most darkness as compared with the other drying method. The result from SEM show that the cooking glutinous rice after drying by hot air and superheated steam had many hole on the kernel surface and a hollow inside the kernel. True density of samples by superheated steam drying were higher than hot air samples, but bulk density were not difference.

KEYWORD: Drying, Superheated steam, Physical properties

¹Graduated Student, ⁴Lecture, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Mahasarakham 44150

²Lecture, School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140

³Lecture, Faculty of Technology, Mahasarakham University, Mahasarakham, 44150

*Corresponding author. Tel.: 09-1863132; E-mail address: watcharanon_j@hotmail.com

บทนำ

ข้าวจัดเป็นพืชเศรษฐกิจชนิดหนึ่งของเมืองไทย ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยเป็นบริเวณที่มีการเพาะปลูกข้าวเหนียวเพื่อการบริโภคภายในท้องถิ่นจำนวนมาก ปัจจุบันนี้ได้มีการส่งออกข้าวเหนียวหนึ่งตากแห้งทั้งในแบบสำเร็จรูปเพื่อนำไปแปรรูปสินค้าเพื่อการบริโภค เช่น การทำข้าวพองสไตล์ญี่ปุ่น (Japaneses puffed rice) ปัญหาที่พบในการส่งออกข้าวเหนียวหนึ่งตากแห้ง คือ เชื้อราในผลิตภัณฑ์ ระยะเวลาในการตากแห้งนานจนไม่สามารถวางแผนในการผลิตได้เนื่องจากปริมาณแสงแดด การอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งจึงเป็นทางเลือกในการแก้ปัญหาดังกล่าวได้

ข้าวเหนียว มีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Oryza sativa* L. กรมวิชาการเกษตรให้ข้าวเหนียวพันธุ์ กข.6 เป็นพันธุ์รับรอง และแนะนำให้เกษตรกรปลูกเมื่อวันที่ 4 พฤษภาคม 2520 ข้าวพันธุ์ กข. 6 เป็นพันธุ์ข้าวเหนียวหอม ไวต่อช่วงแสง เป็นพันธุ์ข้าวเหนียวที่ได้รับการปรับปรุงพันธุ์ข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 โดยใช้รังสีแกมมาที่ 20 กิโลเรด ที่สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติแห่งประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2508 เป็นสายพันธุ์ข้าวเหนียว นุ่ม มีกลิ่นหอม ทนแล้ง และมีคุณภาพการหุงต้มรับประทานดี ให้ผลผลิตเฉลี่ยสูงสุดเป็นอันดับหนึ่งและให้ผลผลิตสูงกว่าพันธุ์เหนียวสันป่าตอง ซึ่งเป็นพันธุ์ข้าวเหนียวที่นิยมปลูกกันแพร่หลายในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (เอกสงวน ชูวิสิฐกุล, 2542)

การอบแห้งมีหลายวิธี แต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน เช่นการอบแห้งโดยวิธีการตากแดดเป็นวิธีที่ง่ายและประหยัดพลังงาน แต่ใช้เวลานานในการอบแห้งนานมาก การควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทำได้ยาก เนื่องจากกรรมวิธีการตากแดดขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมทางธรรมชาติ สำหรับการอบแห้งโดยการเป่าอากาศร้อนผ่านผลิตภัณฑ์ ที่มีความชื้นซึ่งในกรณีนี้จะมีพื้นที่ในการอบแห้งอยู่ในขอบเขตที่จำกัด การควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่นความชื้น สามารถทำได้ง่ายและให้คุณภาพด้านความสะอาดที่ดีกว่า อย่างไรก็ตามการอบแห้งโดยวิธีนี้มีความสิ้นเปลืองพลังงานในเกณฑ์ที่สูง ถ้ากระบวนการจัดการในการอบแห้งกระทำอย่างไม่มีประสิทธิภาพ โดยทั่วไปโดยวิธีเป่าอากาศร้อนมีความสิ้นเปลืองพลังงานสูงกว่าวิธีการตากแห้งแต่สามารถลดระยะเวลาการอบแห้ง โดยการอบแห้งแบบมีการเป่าอากาศร้อนจะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นมากกว่าและความสามารถในการอบแห้งสูง จากงานวิจัยต่างๆ การอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยังคงมีข้อดีคือ มีอากาศอยู่ในระบบน้อยมากจึงไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์บางชนิดดีขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถฆ่าเชื้อโรคหรือกำจัดกลิ่นอาหารได้อีกด้วย (Iyota, H, 2001) การใช้ไอน้ำร้อนยังคงในการอบแห้งเป็นการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพสำหรับในกรณีที่มีระบบผลิตไอน้ำในกระบวนการและยังมีไอน้ำเหลือใช้หรือจำเป็นต้องปล่อยไอน้ำบางส่วนทิ้งไป ไอน้ำทั้งนี้ยังมีความร้อนจำเพาะที่สูงสามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้อีก ดังนั้นการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยังคงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับกรรมวิธีการอบแห้ง

ในงานวิจัยครั้งนี้จึงได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสุกด้วยวิธีต่างๆ เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวเหนียวหลังจากการอบแห้งด้วยด้วยวิธีการตากแดด เปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยวิธีการใช้ลมร้อนและไอน้ำร้อนยังคง

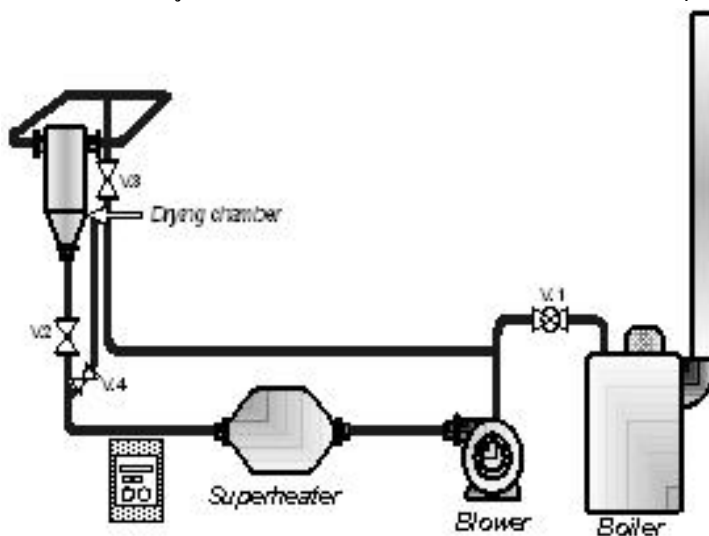
อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวอย่าง

วัตถุดิบในการทดลองครั้งนี้คือข้าวเหนียวพันธุ์ กข.6 นำข้าวเหนียวมาแช่น้ำ 4 ชม. ที่อุณหภูมิห้องก่อนทำการนึ่ง หลังจากนั้นนำมานึ่ง (steam) ด้วยเครื่องนึ่งข้าวเหนียวด้วยไอน้ำ ประมาณ 10 นาที แล้วนำไปใส่ภาชนะปิดเป็นเวลา 12 ชม. เพื่อให้ข้าวเหนียวร่วนไม่เกาะตัวกันมากนัก ก่อนนำไปอบแห้งโดยวิธีต่างๆ ที่ความชื้นเริ่มต้น 66.07 % db

วิธีการตากแดดทดลองในพื้นที่ที่มีแดดส่องถึงตลอดทั้งวัน และให้มีวิธีการคล้ายกับที่ชาวบ้านใช้ตากข้าวเหนียว โดยทั่วไป โดยนำข้าวเหนียวนี้ใส่ในกระจาดพายามเกลี่ยให้เป็นชั้นบางให้เท่าๆ กัน และใช้เวลาในการตากแดด 8 ชั่วโมง

สำหรับระบบการอบแห้งด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนขวดยิ่งแสดงในภาพที่ 1 ระบบการอบแห้งของไอน้ำร้อนขวดยิ่งประกอบด้วย ถึงความดันผลิตไอน้ำที่ความดันบรรยากาศ พัฒนความดันสูงใบพัดโค้งหลัง ชุดให้ความร้อนเพื่อให้ไอน้ำร้อนอัดตัวเป็นไอน้ำร้อนขวดยิ่ง ห้องอบแห้ง อัตราการไหลของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งควบคุมโดยการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์และระบบท่อไอน้ำ การทำงานของระบบเริ่มต้นจากการอุ่นระบบโดยให้ความร้อนแก่อากาศร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ เพื่อเป็นการป้องกันการกลั่นตัวของไอน้ำภายในระบบอบแห้งขณะทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนขวดยิ่ง เมื่อระบบคงที่ปิดวาล์วปล่อยไอน้ำอัดตัวจากถังความดันเข้าสู่หน่วยให้ความร้อน โดยพัฒนความดันสูงเพื่อเปลี่ยนสภาวะจากไอน้ำอัดตัวเป็นไอน้ำร้อนขวดยิ่งจากนั้นจะส่งไอน้ำร้อนขวดยิ่งเข้าสู่ห้องอบแห้ง และในการการอบด้วยอากาศร้อนก็ปฏิบัติเช่นเดียวกันแต่จะไม่ต้องเปิดไอน้ำอัดตัวเข้าสู่ระบบโดยอบแห้งด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนขวดยิ่งที่อุณหภูมิ 130, 150 และ 170°C



ภาพที่ 1 ระบบเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนขวดยิ่ง

การทดสอบค่าสี

ทดสอบคุณภาพด้านสีของข้าวเหนียวอบแห้งนี้ด้วยเครื่อง Choma meter (Minolta:Model-CR 300) :ซึ่งวัดในเทอมตัวแปรของค่า L a และ b โดย L แสดงค่าความสว่าง (lightness parameter) a แสดงค่าสีแดง (redness parameter) และ b แสดงค่าสีเหลือง(yellowness parameter)

การทดสอบด้วยวิธี Scanning electron microscope (SEM)

การทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscope (SEM) โดยศึกษาตัวอย่าง 2 ลักษณะคือ ที่ผิวของเม็ดข้าวเหนียว ใช้กำลังขยาย 3,000 X และภายในของเม็ดข้าวเหนียว โดยการหักเม็ดข้าวเหนียวที่ทดสอบบริเวณกึ่งกลาง ใช้กำลังขยาย 1,000 X และ 50 X

การหาความหนาแน่น

ทดลองโดยนำตัวอย่างชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.01 g 50 กรัม วัดปริมาตรโดยกระบอกตวง ขนาด 500 ml แล้วนำมาคำนวณหาความหนาแน่น สำหรับค่าความหนาแน่นจริงวัดโดยการแทนที่โดยใช้ปริมาตรของทรายออกตาว่า (มนตรี มนต์พิลา, 2547)

ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการทดลองอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสุกโดยวิธีต่างๆ ข้าวเหนียวหนึ่งสุกมีความชื้นเริ่มต้นที่ 66.07 % db เมื่อนำมาตากแดดได้ความชื้นหลังการอบแห้ง 12.44 % db และนำมาเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่อบแห้งโดยวิธีการใช้ลมร้อนและวิธีการใช้น้ำร้อนขยี้ก โดยความชื้นหลังการอบแห้งโดยวิธีการใช้ลมร้อนและวิธีการใช้น้ำร้อนขยี้กที่ 12 % db

สีของผลิตภัณฑ์

สมบัติทางด้านสีของข้าวเหนียวหนึ่งสุกหลังการอบแห้งด้วยวิธีการตากแดด วิธีการใช้ลมร้อนและวิธีการใช้น้ำร้อนขยี้กแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งแสดงในเทอมตัวแปร L a และ b พบว่า การตากแดดให้ค่าพารามิเตอร์ของสีแตกต่างจากวิธีอื่น ตัวกลางในการอบแห้งมีอิทธิพลต่อค่าความสว่าง (L) การอบแห้งด้วยอากาศร้อนให้ค่าความสว่างสูงกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขยี้ก ในขณะที่ค่าความแดง (a) และค่าความเหลือง (b) มีความแตกต่างกันอย่างไม่ชัดเจน อุณหภูมิของการอบแห้งมีอิทธิพลต่อค่าความสว่าง โดยอุณหภูมิสูงขึ้นค่าความสว่างจะลดลง สำหรับค่าความแดง และค่าความเหลือง อุณหภูมิมีอิทธิพลต่อค่าความแดงและความเหลืองเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความแดงและความเหลืองมีแนวโน้มสูงขึ้นตาม และเนื่องจากปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Browning reaction) ที่เกิดขึ้น โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้น เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ตัวอย่างมีสีคล้ำขึ้น ซึ่งพิจารณาจากค่าความสว่างที่ลดลง และค่าความแดงและความเหลืองที่เพิ่มขึ้น ($\bar{X} \pm SD$)

ตารางที่ 1 แสดงค่าสีของข้าวเหนียวหนึ่งสุกหลังการอบแห้งโดยวิธีการตากแดด ใช้ลมร้อนและวิธีการใช้น้ำร้อนขยี้ก

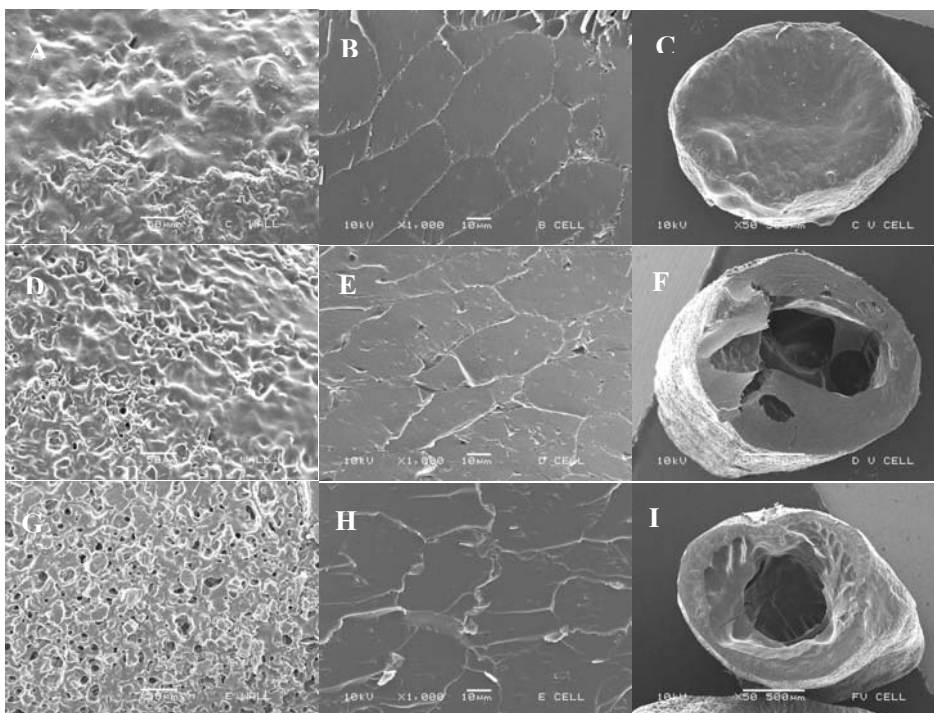
Media	T(°C)	L ($\bar{X} \pm SD$)	a ($\bar{X} \pm SD$)	b ($\bar{X} \pm SD$)
Sundry		51.09 ±0.43 a ¹	-0.46 ±0.05 a	8.93 ±0.75 a
	130	60.29 ±1.48 b	-0.44 ±0.01 a	11.77 ±0.56 b
Hot Air	150	59.28 ±0.96 bc	1.71 ±0.13 cd	13.20 ±0.22 bc
	170	58.17 ±0.55 c	3.17 ±0.05 b	16.23 ±1.63 d
	130	56.49 ±0.49 d	1.31 ±0.24 c	12.21 ±0.36 b
Superheated steam	150	54.02 ±0.83 d	1.86 ±0.43 d	14.47 ±0.67 c
	170	53.68 ±0.98 e	4.16 ±0.48 e	18.26 ±1.12 e

¹ อักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ผลการทดลองด้วยวิธี Scanning electron microscope (SEM)

จากการนำตัวอย่างไปทดลองส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยใช้ตัวอย่างข้าวเหนียว นึ่งสุกที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีต่างๆ เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ พิจารณาที่ผิวของข้าวเหนียวที่กำลังขยาย 3,000X แสดง ในภาพที่ 2A, 2D, 2G พบว่าผิวของเมล็ดข้าวเหนียวนึ่งสุกที่ผ่านการอบแห้งโดยวิธีการตากแดด ซึ่งเป็นวิธีการอบแห้งแบบช้าๆ ใช้เวลานาน จะมีผิวขรุขระเล็กน้อย เนื่องจากการอบแห้งที่ทำให้ผิวของเมล็ดข้าวเหนียวแห้งไปติดกับเซลล์ของเมล็ดข้าวเหนียว ในชั้นใน ผิวของเมล็ดข้าวเหนียวที่ผ่านการอบแห้งโดยวิธีใช้ลมร้อนมีลักษณะแห้งมากและมีรูที่ผิวซึ่งเป็นรูที่เป็นทางออกของ น้ำภายในตัวอย่างระเหยออกหลังจากได้รับความร้อนอย่างรวดเร็ว ผิวของเมล็ดข้าวเหนียวที่ผ่านการอบแห้งโดยวิธีใช้ไอน้ำร้อน ขุดยังมีรูที่ผิวมากกว่าข้าวเหนียวที่ผ่านการอบแห้งโดยวิธีใช้ลมร้อน

ภายในเมล็ดข้าวเหนียวที่กำลังขยาย 1,000X แสดงในภาพที่ 2B, 2E, 2H พบว่าเนื้อของข้าวเหนียวมีลักษณะคล้ายกัน ในทุกกรณี คือมีรอยของผนังเซลล์ให้เห็นอย่างชัดเจน มีขนาดตั้งแต่ 13-65 μm ซึ่งไม่สามารถบอกถึงความแตกต่างได้ ภายใน เม็ดข้าวเหนียวที่กำลังขยาย 50X แสดงในภาพที่ 2C, 2F, 2I พบว่าภายในเมล็ดข้าวเหนียวที่อบแห้งโดยวิธีการตากแดดมีลักษณะ เป็นเม็ดตัน แต่ภายในเมล็ดข้าวเหนียวที่อบแห้งโดยวิธีใช้ลมร้อนและวิธีใช้ไอน้ำร้อนขุดยังมีลักษณะเป็นโพรงขนาดใหญ่ ที่เกิดขึ้นภายใน เนื่องจากการอบแห้งด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนขุดยัง เป็นการอบแห้งโดยการให้ความร้อนสูงแก่ข้าวเหนียว อย่างรวดเร็ว ดังนั้นอากาศภายในมีการขยายตัวอย่างรวดเร็วและไอน้ำที่อยู่ภายในตัวอย่างพยายามดันออกไปข้างนอกเพื่อรักษา สมดุลของเมล็ดข้าวเหนียว ทำให้เนื้อของเมล็ดข้าวเหนียวด้านในจึงถูกอัดตัวกันแน่นอยู่บริเวณขอบของเมล็ดข้าวเหนียว



ภาพที่ 2 แสดงภาพจากการทดลองโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภาพ A-C คือตัวอย่าง ที่ได้จากรีการตากแดด ภาพ D – F คือตัวอย่างที่ได้จากรีการใช้ลมร้อน ภาพ G-I คือตัวอย่างที่ได้ จาการรีการใช้ไอน้ำร้อนขุดยั้ง ภาพ A, D, G กำลังขยาย 3,000X ภาพ B, E, H กำลังขยาย 1,000X และภาพ C, F, I กำลังขยาย 50X

ความหนาแน่น

จากการทดลองหาค่าคุณภาพด้านความหนาแน่นปรากฏและความหนาแน่นจริง ของข้าวเหนียวหนึ่งสุกหลังการอบแห้งด้วยวิธีการตากแดด วิธีการใช้ลมร้อนและวิธีการใช้ไอน้ำร้อนขุดย้งแสดงในตารางที่ 2 พบว่าอุณหภูมิไม่มีอิทธิพลต่อค่าความหนาแน่นปรากฏและความหนาแน่นจริงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ตัวกลางในการอบแห้งมีอิทธิพลต่อค่าความหนาแน่นปรากฏอย่างมีนัยสำคัญ โดยการอบแห้งโดยวิธีการใช้ลมร้อนและวิธีการใช้ไอน้ำร้อนขุดย้งจะมีความหนาแน่นปรากฏไม่แตกต่างกัน แต่การอบแห้งโดยวิธีการใช้ลมร้อนและไอน้ำร้อนขุดย้งที่ 170°C จะแตกต่างกับวิธีการตากแดด และตัวกลางในการอบแห้งมีอิทธิพลต่อค่าความหนาแน่นจริง โดยการอบแห้งด้วยวิธีการใช้ไอน้ำร้อนขุดย้งให้ค่าความหนาแน่นจริงมากกว่าการอบแห้งด้วยวิธีใช้ลมร้อน และการอบแห้งด้วยวิธีการตากแดดจะให้ค่าความหนาแน่นปรากฏและความหนาแน่นจริงมากที่สุด

ตารางที่ 2 แสดงค่าความหนาแน่นของข้าวเหนียวหนึ่งสุกหลังการอบแห้งโดยวิธีการตากแดด ใช้ลมร้อนและวิธีการใช้ไอน้ำร้อนขุดย้ง

Media	T($^{\circ}\text{C}$)	Bulk density ($\bar{X} \pm SD$)	True density ($\bar{X} \pm SD$)
		(kg/m^3)	(kg/m^3)
Sundry		573.84 $\pm$ 12.56 a ¹	1,436.66 $\pm$ 125.11 a
Hot Air	130	537.85 $\pm$ 14.30 b	1,102.02 $\pm$ 0.00 bc
	150	532.00 $\pm$ 15.50 b	1,082.68 $\pm$ 33.49 b
	170	522.53 $\pm$ 8.68 b	1,063.35 $\pm$ 33.49 b
Superheated steam	130	548.27 $\pm$ 5.51 ab	1,216.59 $\pm$ 41.67 d
	150	546.45 $\pm$ 21.67 ab	1,215.46 $\pm$ 42.11 d
	170	537.01 $\pm$ 24.17 b	1,192.82 $\pm$ 42.16 cd

¹ อักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

สรุป

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของข้าวเหนียวหนึ่งสุกหลังการอบแห้งโดยวิธีการตากแดด วิธีการใช้ลมร้อนและวิธีการใช้ไอน้ำร้อนขุดย้ง

1. สีของตัวอย่างที่อบแห้งด้วยลมร้อนมีสีคล้ำเล็กน้อย และการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขุดย้งมีสีคล้ำมากที่สุด โดยสังเกตจากค่า b ของตัวอย่าง
2. ผิวของเมล็ดข้าวเหนียวที่ผ่านการอบแห้งโดยวิธีใช้ไอน้ำร้อนขุดย้งจะมีรูที่ผิวจำนวนมาก และมากกว่าข้าวเหนียวที่ผ่านการอบแห้งโดยวิธีใช้ลมร้อน ผิวของเมล็ดข้าวเหนียวหนึ่งสุกที่ผ่านการอบแห้งโดยวิธีการตากแดดจะค่อนข้างเรียบกว่าการอบแห้งโดยวิธีอื่นๆ
3. การอบแห้งโดยวิธีการใช้ลมร้อนและวิธีการใช้ไอน้ำร้อนขุดย้ง จะทำให้ลักษณะภายในเมล็ดข้าวมีลักษณะเป็นโพรงขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้น แต่การอบแห้งโดยวิธีการตากแดดจะไม่ปรากฏลักษณะดังกล่าว

4. ความหนาแน่นหลังการอบแห้ง โดยวิธีการใช้ลมร้อนและวิธีการใช้ไอน้ำร้อนขุดยั้งจะมีค่าน้อยกว่าการอบแห้งโดยวิธีการตากแดด การอบแห้งด้วยวิธีใช้ไอน้ำร้อนขุดยั้งให้ค่าความหนาแน่นจริงมากกว่าการอบแห้งด้วยวิธีใช้ลมร้อน แต่ความหนาแน่นปรากฏของการอบแห้งทั้ง 2 วิธีจะไม่แตกต่างกัน

เอกสารอ้างอิง

- เอกสงวน ชูวิสิฐกุล. 2542. พันธุ์ข้าวต้านทานโรค แมลง ไล่เดือนฝอย ทนดินเปรี้ยว ดินเค็มและทนแล้ง. กรมวิชาการเกษตร
สมชาติ โสภณธฤทธิ์. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. พิมพ์ครั้งที่ 7. คณะพลังงานและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ. 338 น
- อรอนงค์ นัยวิกุล. 2538. เภมัญญอาหาร. ภาควิชาเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- มนตรี มนตรีพิลา. 2547. การทดลองเปรียบเทียบการอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสูกโดยใช้ไอน้ำร้อนขุดยั้งและอากาศร้อน.
วิทยานิพนธ์ วศ.ม. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, มหาสารคาม.
- นุช ผลนาค. 2545. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพอาหารขบเคี้ยวจากระบวนการทอด. วิทยานิพนธ์ วท.ม.
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- Zhongkai Zhu, Kevin Robards, Stuart Helliwell & Chris Blanchard. 2002. Composition and function
properties of rice. International Journal of food Science and Technology. Vol. 37. pp.849-868
- Yukiharu Ogawa, Gregory M Glenn, William J. Orts, Delilah F. Wood. 2003. Histological Structures of Cooked Rice
Grain. Journal of Agricultural and Chemistry. Vol. 51. pp.7019-7023
- B.S. Reddy, A. Chakraverty, 2004. Physical Properties of Raw and Parboiled Paddy. Biosystems Engineering. Vol. 88.
No.4, pp.461-466
- Rungnaphar Pongsawatmanit, Nuch Pholnak, 2001. Effects of initial moisture content, frying time and temperature on the
qualities of fried rice crackers. Bio Thailand 2001. pp.145-152
- Iyota, H., Nishimura, N., Onuma and Nomura, T. 2001. Drying of Sliced Raw Potatoes in Superheated Steam and Hot Air.
Drying Technology. Vol. 19, No.7. pp. 1411-1424