

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

จุดประสงค์งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาแนวทางการอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสัปดาห์ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในเครื่องอบแห้งแบบตู้ และ เปรียบเทียบคุณภาพของข้าวเหนียวหนึ่งสัปดาห์ที่ได้จากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งการอบแห้งด้วยลมร้อนในเครื่องอบแห้งแบบตู้

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

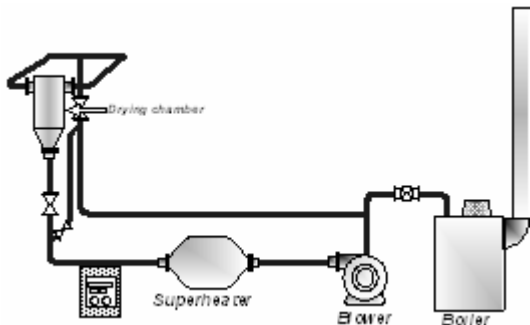
A_0, B_0, k_0, k_1, n คือ พารามิเตอร์ของสมการ

3. วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง

วัตถุดิบในการทดลองครั้งนี้คือข้าวเหนียวพันธุ์ 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

เมื่อสภาวะการอบแห้งคงที่แล้วนำข้าวเหนียวหนึ่งสูกเข้าในห้องอบ 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

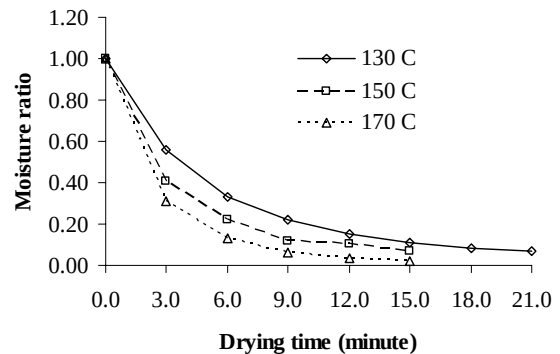
$$SSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{obs} - MR_{pre})^2 \quad (7)$$

เป็นดัชนีบ่งชี้ที่แสดงความสามารถในการทำนายของสมการที่นำมาอธิบายผลการทดลองและชี้วัดว่าสมการใดเหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้ต่อไป

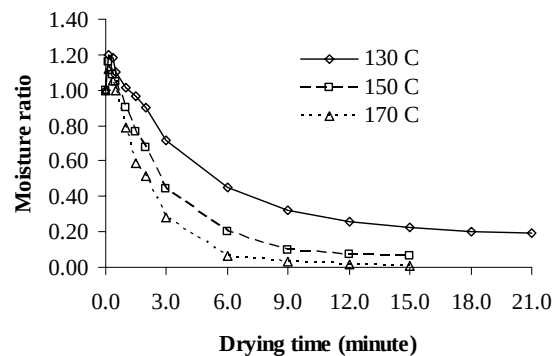
5.ผลการทดลองและวิจารณ์

ในการทดลองศึกษาจากศาสตร์การอบแห้ง เป็นการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิและตัวกลางในการอบแห้ง(อากาศร้อนและไอน้ำ)ต่ออัตราการอบแห้ง โดยความชื้นมาตรฐานแห้งที่เวลาใดๆในการอบแห้งจะถูก

แปลงเป็นพารามิเตอร์ไร้หน่วยคือ อัตราส่วนความชื้นต่อเวลาดังรูปที่ 2 และรูปที่3



รูปที่ 2. เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสูกด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่3. เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งข้าวเหนียวหนึ่งสูกด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่างๆ

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 สมการดัดแปลงของPage มีค่า SSE น้อยที่สุด จึงมีความเหมาะสมในการใช้ทำนายอัตราการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ถดถอยค่าคงที่พารามิเตอร์ของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

Media	Equation	T (°C)	Drying Constant				R ²	
Hot air drying	The Henderson's equation	130	A ₀		k ₀		0.991	
		150	0.97761		0.16684		0.985	
		170	0.98252		0.25213		0.996	
	The Page 's equation	130	k ₀		n ₀		0.998	
		150	0.99499		0.036335		0.998	
		170	0.24845		0.81192		0.999	
	The logarithmic equation	130	0.42381		0.69753		0.999	
		150	0.50449		0.77155		0.999	
		170	0.93337		0.02058		0.999	
	The two term equation	130	A ₀		k ₀		0.999	
		150	0.91925		0.33166		0.999	
		170	0.96849		0.40322		0.999	
	Superheated steam drying	The Henderson's equation	130	A ₀		k ₀		0.991
			150	0.48880		0.16684		0.999
			170	0.15746		0.04916		0.999
The modified Page 's equation		130	A ₀		k ₀		0.991	
		150	1.13992		0.12494		0.982	
		170	1.14175		0.27106		0.983	
The logarithmic equation		130	k ₀		n ₀		0.966	
		150	1.16511		0.89858		0.984	
		170	1.11359		1.16050		0.991	
The two term equation		130	A ₀		k ₀		0.978	
		150	1.08261		0.30111		0.982	
		170	1.019578		0.15268		0.983	
The two term equation		130	A ₀		k ₀		0.979	
		150	0.02944		-0.08023		0.982	
		170	0.57087		0.27095		0.983	

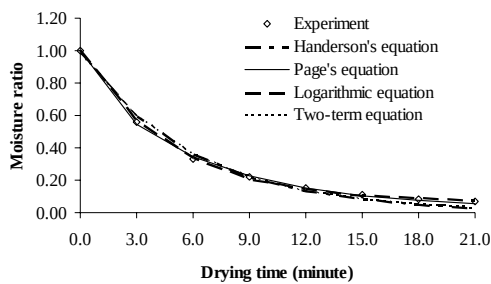
ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ถดถอยค่าคงที่พารามิเตอร์ของการอบแห้งด้วยสมการโพลีโนเมียลอันดับ 2 และค่า SSE ของการอบแห้ง

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	
Superheated steam drying	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		

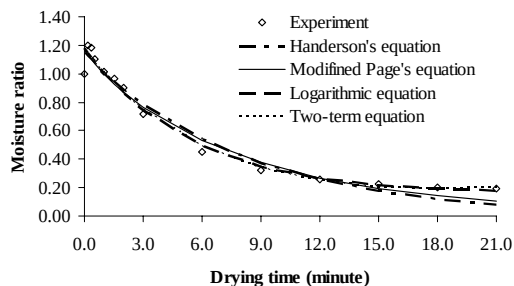
เมื่อนำผลการวิเคราะห์ทางสถิติมาสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่อุณหภูมิที่ 130°C ดังรูปที่ 4. และรูปที่ 5

รูปที่ 4. เป็นการอบแห้งด้วยอากาศร้อนสมการของ Page และสมการ Logarithmic สามารถสร้างกราฟได้ใกล้เคียงผลการทดลอง สมการดังกล่าวจึงเหมาะสำหรับ ทำนายการอบแห้งด้วยอากาศร้อน

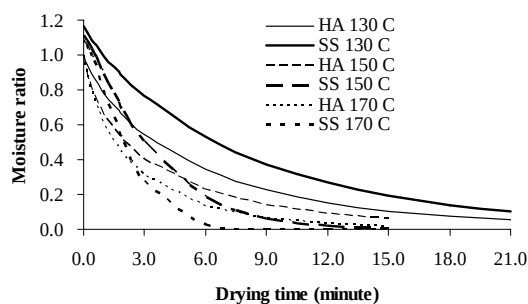
สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง จากรูปที่ 5 เป็นการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 130°C เช่นกัน พบว่าเส้นกราฟของสมการดัดแปลงของ Page ใกล้เคียงกับผลการทดลอง สมการดัดแปลงของ Page จึงทำนายการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งได้ดีที่สุด



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.