

แนวทางการพัฒนาข้าวโพดหวานงอกด้วยการอบแห้งไมโครเวฟ

Strategic development of germinated sweet corn using microwave drying

ขวัญตา ประชา¹

อรภรณ์ บัวหลวง²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความหนาแน่นปรากฏ สัดส่วนช่องว่าง และร้อยละการหดตัว และเพื่อทำนายจลนพลศาสตร์การถ่ายโอนความชื้นของข้าวโพดงอกที่อบแห้งด้วยไมโครเวฟที่ 300, 600, และ 800 วัตต์ (W) โดยแช่ข้าวโพดสดในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อให้เมล็ดอืดตัว จากนั้นล้างและปล่อยให้แห้งบนผ้าขึ้น 72 ชั่วโมง อบแห้งข้าวโพดงอก 40.00 กรัมที่มีความชื้นเริ่มต้น 136.07 ± 2.82 % มาตรฐานแห้ง จนมีความชื้นสุดท้าย 16.94 ± 1.27 % มาตรฐานแห้ง จากการศึกษาพบว่าความหนาแน่นปรากฏและสัดส่วนช่องว่างมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับความชื้น เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นความหนาแน่นปรากฏเพิ่มขึ้นจาก 157.2 เป็น 198.4 kg/m^3 ขณะที่สัดส่วนช่องว่างลดลงจาก 70.0 เป็น 20.0 % ร้อยละการหดตัวมีความสัมพันธ์กับความชื้นในรูปแบบการพหุนาม เมื่อยกกำลังสองและลดลงจาก 3.2 เป็น 1.2 % เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น จากทดลองสามารถทำนายพฤติกรรมการอบแห้งด้วยสมการอบแห้งอย่างง่าย 3 สมการ ผลการศึกษาพบว่า สมการของ Page สามารถทำนายข้อมูลการทดลองได้ดีที่สุด ($R^2 = 0.995$ และ $RSME = 0.030$) นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สามารถคำนวณด้วยกฎการแพร่ของฟิกส์ (Fick's law of diffusion) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่อยู่ในช่วง $1.82 \times 10^{-7} - 5.00 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{min}$ ขึ้นอยู่กับกำลังไมโครเวฟของการอบแห้งและมีค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 11.70 W/g

คำสำคัญ: ข้าวโพดหวานงอก การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ ร้อยละการหดตัว จลนศาสตร์การอบแห้ง สัมประสิทธิ์การแพร่

Abstract

The aims of this research were to investigate the apparent density, void fraction, and shrinkage percentage and to predict the moisture transfer kinetics of germinated sweet corn dried by using microwave power at 300, 600, and 800 W. Fresh corn was soaked in distilled water at room temperature for 48 hrs in order to obtain saturated grains. The seeds were then washed and germinated in flat plate with moist towel. 40.00 g of germinated corn with an initial moisture content of 136.07 ± 2.82 %dry-basis was dried until it reached a final moisture content of 16.94 ± 1.27 %dry-basis. The results showed that the apparent density and void fraction were related linearly to moisture content. The increase in moisture content, the apparent density also increased from 157.2 to 198.4 kg/m^3 while the void fraction decreased from 70.0 to 20.0 %. The shrinkage percentage showed second order polynomial trends and the decrease of shrinkage percentage ranged from 3.2 to 1.2 % as the moisture content increase. To study the drying behavior, the drying experimental data were predicted using 3 empirical drying models. The result revealed that the

¹ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

² สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

Page's model was the best fitting equation to the experimental data. Effective diffusivity was then evaluated using Fick's law of diffusion and the result demonstrated that the effective diffusivity, ranging from 1.82×10^{-7} to $5.00 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{min}$, highly depended on the drying microwave power and activation energy of drying was 11.70 W/g.

Keywords: germinated sweet corn, microwave drying, shrinkage percentage, drying kinetics, effective diffusivity

บทนำ

ปัจจุบันข้าวโพดหวาน (*Zea mays* L.) เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญรองจากข้าวและเป็นที่ต้องการอย่างมากทั้งในประเทศและต่างประเทศ ซึ่งประเทศไทยมีปริมาณการส่งออกข้าวโพดมากเป็นอันดับสามรองจากฮังการีและสหรัฐอเมริกา ทั้งในรูปของข้าวโพดสดและแช่แข็ง (Thai junior encyclopedia project by Royal Command of His Majesty the King, 2014) ทั้งนี้เนื่องจากข้าวโพดสามารถมาแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหารได้อย่างแพร่หลาย เช่น นมข้าวโพด ข้าวโพดหวานบรรจุกระป๋อง และครีมข้าวโพดหวาน เป็นต้น เพื่อที่จะส่งผลผลิตไปจำหน่ายในตลาดต่างประเทศ ประโยชน์ของข้าวโพดหวาน คือ ช่วยบำรุงสายตา ช่วยในการขับถ่าย และช่วยบำรุงผิวพรรณ เป็นต้น ความชื้นที่เหมาะสมในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรให้ปลอดภัยจากการเจริญเติบโตของเชื้อราและจุลินทรีย์ที่เป็นอันตรายต่อคนและสัตว์ที่บริโภคเข้าไปควรมีความชื้น 16% มาตรฐานแห้ง 9% dry-basis (พงศเทพ โชติจักรดิกุล, 2540) ภาคใต้มีฤดูฝนที่ยาวนานทำให้ผลผลิตทางการเกษตรที่ได้หลังจากการเก็บเกี่ยวมีความชื้นสูงทำให้เกิดการเน่าเสียได้ง่าย การทำเมล็ดพืชงอกเป็นแนวทางหนึ่งช่วยลดการสูญเสียจากจุลินทรีย์ได้ นอกจากนี้กระบวนการทำงานก็ยังเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการเช่น ปริมาณสารไลริก ฟลาโวนอยด์ และกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระสูงขึ้นเมื่อเทียบกับที่ไม่งอก (Modgil et al., 2009) การทำข้าวโพดงอกประกอบด้วยสามขั้นตอนหลักประกอบด้วยขั้นตอนการแช่เมล็ดพืชในน้ำ ขั้นตอนการปล่อยให้เมล็ดพืชงอกบนผ้าชื้น และขั้นตอนการอบแห้งเพื่อให้ความชื้นเหมาะสมต่อการจัดเก็บ การแช่เมล็ดพืชเพื่อให้เมล็ดคูดน้ำผ่านทางเปลือกหุ้มเข้าสู่ส่วนต่างๆ ภายในเมล็ด น้ำทำให้เซลล์เต่งและเมล็ดพองโตขึ้นและช่วยกระตุ้นให้เอ็นไซม์ทำงานทั้งในการย่อยสลายอาหาร หลังจากที่เอ็นไซม์ต่างๆ เริ่มทำงาน แกนต้นอ่อนก็เริ่มมีขนาดโตขึ้น เนื่องจากการแบ่งตัวหรือยึดตัวของเซลล์ ต้นอ่อนที่ขยายตัวโตขึ้นทำให้เปลือกหุ้มเมล็ดแตกออก ขณะที่เมล็ดกำลังเริ่มงอกนั้นต้นอ่อนจะค่อยๆ โตขึ้น (ประนอม ศรีสวัสดิ์, 2558) จากกระบวนการเตรียมข้าวโพดงอกดังกล่าวทำให้ข้าวโพดมีความชื้นสูง กระบวนการไล่ความชื้นจึงเป็นกระบวนการสำคัญเพื่อลดความชื้นให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษา อย่างไรก็ตามวิธีการและอุณหภูมิอบแห้งส่งผลอย่างมากต่อสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผลิตภัณฑ์

การอบแห้งเป็นกระบวนการไล่ความชื้นออกจากวัตถุดิบโดยการระเหย โดยทั่วไปจะอาศัยอากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนและความชื้น ดังนั้นอัตราการอบแห้งจะช้าหรือเร็วเพียงใดขึ้นอยู่กับกระบวนการถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิ การแผ่รังสีความร้อน ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง และกระบวนการถ่ายเทมวล (อนันต์ พงษ์ธรรกุลพานิช, 2539) เครื่องอบแห้งจึงมีบทบาทและความสำคัญต่อการลดความชื้นเมล็ดพืชในปัจจุบันเช่น การอบแห้งด้วยลมร้อนใช้เวลานานทำให้วัสดุเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล การอบด้วยไมโครเวฟเป็นการถ่ายโอนความร้อนแบบแผ่รังสีไม่ต้องอาศัยตัวกลางทำให้อุณหภูมิสูงเร็ว กำจัดน้ำออกจากวัสดุได้ดี และช่วยลดระดับความชื้นสุดท้ายได้ (Pickles et al., 2013)

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาแนวทางในการพัฒนาข้าวโพดหวานงอกด้วยการอบแห้งด้วยไมโครเวฟโดยศึกษาสมบัติทางกายภาพของเมล็ดข้าวโพดงอกที่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 300-800 W ประกอบด้วย ความหนาแน่น

ปรากฏ สัดส่วนช่องว่างและเปอร์เซ็นต์การหดตัว และศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งเมล็ดข้าวโพดหวานงอกโดยใช้สมการการอบแห้งอย่างง่ายเพื่อทำนายผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นของการอบแห้ง รวมทั้งหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ด้วยสมการการแพร่ของฟิกซ์ (Fick's law of diffusion)

เนื้อหาที่เกี่ยวข้อง

วิธีการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรส่งผลต่อคุณภาพหลังการอบแห้ง Thymi et al. (2005) พบว่า ความหนาแน่นปรากฏของแป้งข้าวโพดเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลให้ค่าอัตราส่วนการขยายตัวที่สูงขึ้นทำให้ความหนาแน่นลดลงนอกจากนี้ Bualuang and Thamphueak (2014) ศึกษาความหนาแน่นปรากฏ สัดส่วนช่องว่าง และการหดตัวของข้าวโพดหวานงอกที่ความชื้นอยู่ในช่วง 13-35%มาตรฐานแห้ง โดยใช้เทคนิคมาตรฐาน พบว่า ความหนาแน่นปรากฏและสัดส่วนช่องว่างมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความชื้นเริ่มต้น ซึ่งความหนาแน่นปรากฏเพิ่มขึ้น 44-50 kg/m³ สัดส่วนช่องว่างลดลง 78-58 % เมื่อค่าความชื้นเพิ่มขึ้น และการอบแห้งสามารถทำนายพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงความชื้นของผลผลิตทางการเกษตรด้วยสมการอบแห้งอย่างง่ายได้เป็นอย่างดี เช่น Doymaz and Pala (2003) ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งของเมล็ดข้าวโพดด้วยวิธีการอบแห้งชั้นบางด้วยสูญญากาศในช่วง 55-75 °C พบว่า สมการของ Page เป็นสมการอย่างง่ายที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายการถ่ายโอนความชื้นของเมล็ดข้าวโพด และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่อยู่ในช่วง 9.488×10^{-11} - 1.768×10^{-10} m²/s

วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมตัวอย่าง

ข้าวโพดหวานที่ใช้ในงานวิจัยซื้อจากตลาดสด อำเภอเมือง จังหวัดกระบี่ นำเมล็ดข้าวโพดหวานสดมาตากแห้งเป็นเวลา 1 สัปดาห์ ล้างให้สะอาดและแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นล้างและปล่อยให้แห้งอบบนผ้าขึ้นเป็นเวลา 72 ชั่วโมงคำนวณความชื้นของตัวอย่างหาตามวิธีมาตรฐาน AOAC (1990) ได้จากสมการที่ 1 พบว่า เมล็ดข้าวโพดงอกที่มีความชื้นเริ่มต้น 136.07 ± 2.82 % dry-basis

$$M_d = \frac{(w-d)}{d} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%dry-basis) w คือ มวลของเมล็ดพืชก่อนอบแห้ง (g) และ d คือ มวลแห้งปราศจากน้ำของเมล็ดพืช (g)

การทดลองอบแห้ง (Drying Experimental)

อบแห้งเมล็ดข้าวโพดหวานงอกน้ำหนัก 40.00 กรัม ด้วยเตาอบไมโครเวฟยี่ห้อ Sumsung รุ่น MS23F301E ขนาดกำลัง 800 W ที่กำลังไฟฟ้า 300, 600 และ 800 W ตามลำดับ จนมีความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 16.94 ± 1.27 %dry-basis โดยชั่งน้ำหนักเมล็ดข้าวโพดหวานงอกทุกๆ 2 นาที ด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น PL1502-S ความละเอียด 0.01 g

สมบัติทางกายภาพ

ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent Density, ρ)

ความหนาแน่นปรากฏทำโดยนำเมล็ดข้าวโพดที่มีความชื้นต่างกัน 5 ความชื้น บรรจุเมล็ดแต่ละความชื้นที่ละเมล็ดลงในกระบอกตวงขนาด 10 mL ทำให้ความหนาแน่นสม่ำเสมอโดยเคาะกระบอกตวงเบาๆ 10 ครั้งในแต่ละการทดลอง ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งในแต่ละความชื้น ค่าความหนาแน่นปรากฏ คำนวณได้จากสมการที่ 2

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นปรากฏ (kg/m^3), m คือ มวลของวัสดุ (kg), V คือ ปริมาตรทั้งหมดซึ่งรวมปริมาตรของเมล็ดวัสดุและอากาศที่แทรกตัวอยู่ตามช่องว่าง (m^3)

ร้อยละสัดส่วนช่องว่าง (Percentage of Void Fraction, %E)

บรรจุเมล็ดข้าวโพดแต่ละความชื้นในกระบอกตวงขนาด 10 mL ที่ละเมล็ด เติมน้ำมันพืชลงในกระบอกตวงที่ละลายโดยไม่ให้มีฟองอากาศจนเต็ม บันทึกปริมาตรน้ำมันพืชที่ใช้ ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง คำนวณร้อยละสัดส่วนช่องว่างคำนวณได้จากสมการที่ 3

$$\%E = \frac{V_{\text{oil}}}{V_{\text{cylinder}}} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ V_{oil} และ V_{cylinder} คือ ปริมาตรน้ำมันที่ใช้ (mL) และปริมาตรกระบอกตวง (mL) ตามลำดับ

ร้อยละการหดตัว (Shrinkage Percentage)

ร้อยละการหดตัวเป็นสัดส่วนระหว่างการลดลงของเส้นผ่านศูนย์กลางของเมล็ดข้าวโพดที่ผ่านการอบแห้งกับเมล็ดสด วัดขนาด (ความกว้าง (W) ความยาว (L) ความสูง (H)) เมล็ดข้าวโพดดอกแต่ละความชื้นจำนวน 100 เมล็ด คำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าทรงกลม (D) จากสมการที่ 4 และคำนวณร้อยละการหดตัวคำนวณจากสมการที่ 5

$$WLH = \frac{1}{6} \pi D^3 \quad (4)$$

$$\text{ร้อยละการหดตัว} = \frac{D_{\text{initial}} - D_{\text{final}}}{D_{\text{initial}}} \times 100 \quad (5)$$

เมื่อ W, H, และ L คือ ความกว้าง, ความยาว, และความสูงของเมล็ดข้าวโพด (cm) D_{initial} , และ D_{final} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าทรงกลมของเมล็ดข้าวโพดก่อนการอบแห้ง และเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าทรงกลมของเมล็ดข้าวโพดที่ความชื้นต่างๆ

อัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio, MR) (สุนทร สืบคำ และฤทธิชัย อัครราชันย์, 2554)

อัตราส่วนความชื้น คือ ปริมาณของน้ำที่เหลืออยู่ภายในวัสดุที่กำลังอบแห้งเทียบกับปริมาณน้ำทั้งหมดที่อยู่ภายในวัสดุซึ่งสามารถระเหยได้ภายใต้สภาวะการอบแห้งหนึ่งๆ คำนวณจากสมการที่ 6

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (6)$$

เมื่อ M_t , M_0 และ M_{eq} คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ, ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสมดุล (%dry-basis) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามค่า M_e มีค่าน้อยมากๆ เมื่อเทียบกับ M_t และ M_0 ดังนั้นสมการที่ 6 สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 7

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (7)$$

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (Effective Diffusivity, D_{eff})

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเป็นค่าแสดงถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุ สามารถหาได้จากสมการการแพร่ตามกฎข้อที่สองของ Fick (Fick's second law of diffusion) ดังสมการที่ 8 สมมติให้เมล็ดข้าวโพดงอกมีลักษณะเป็นทรงกลม (Spherical shape) โดยสมมติให้การแพร่ของความชื้นมีค่าคงที่และเกิดการกระจายความชื้นอย่างสม่ำเสมอ วัสดุไม่หดตัวขณะอบแห้งที่อุณหภูมิคงที่และไม่มีความต้านทานของการถ่ายเทมวลที่ผิววัสดุ สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมล็ดข้าวโพดหวานงอกได้จากสมการที่ 9 (Crank, 1975) เนื่องจากเมื่อ n มีค่ามากๆ MR จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพจน์แรก จึงประมาณค่าโดยพิจารณาจากพจน์แรกเพียง

พจน์เดียวดังสมการที่ 10

$$\frac{\partial(MR)}{\partial t} = D_{\text{eff}} \frac{\partial^2(MR)}{\partial x^2} \quad (8)$$

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(\frac{1}{n^2} \right) \exp \left(-\frac{n^2 \pi^2}{r^2} D_{\text{eff}} t \right) \right] \quad (9)$$

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp \left(-\frac{\pi^2}{r^2} D_{\text{eff}} t \right) \quad (10)$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (m^2/min) t คือเวลาอบแห้ง (min) และ x คือระยะทางการถ่ายโอนมวล (m) n คือ จำนวนเต็ม 1, 2, 3,..... r คือ รัศมีเทียบเท่าวงกลม (m) และ t คือ เวลาอบแห้ง (min)

สำหรับงานวิจัยนี้ไม่สามารถวัดอุณหภูมิในเตาไมโครเวฟที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งได้โดยตรง จึงประยุกต์ใช้สมการของ Arrhenius ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ในรูปสมการเอกซ์โพเนนเชียลของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นกับอัตราส่วนกำลังไมโครเวฟต่อน้ำหนักตัวอย่าง ดังแสดงสมการที่ 11 (Dadali et al., 2007a; Dadali et al., 2007b; Demirhan and Özbek, 2010) เพื่อคำนวณค่าพลังงานกระตุ้น

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp \left(\frac{-E_a \cdot m}{P} \right) \quad (11)$$

เมื่อ P คือกำลังไมโครเวฟ (W) m คือน้ำหนักของข้าวโพดเริ่มต้น (g) D_{eff} คือสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (m^2/s) D_0 คือ ค่าคงที่ของสมการ (m^2/s) และค่า E_a คือพลังงานกระตุ้น (W/g)

จลนศาสตร์ของการอบแห้ง (Drying Kinetics)

สมการการอบแห้งอย่างง่าย 3 สมการดังแสดงในตารางที่ 1 ใช้ทำนายอัตราการอบแห้งของข้าวโพดตากเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองโดยวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอยไม่เชิงเส้น (Non-linear Regression Analysis) ด้วยโปรแกรม statistica พิจารณาความเหมาะสมของสมการที่ใช้ในการทำนายข้อมูลจากการทดลองด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) (สมการที่ 12) ที่สูงที่สุด และค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Root Mean Square Error, RMSE) (สมการที่ 13) ที่ต่ำที่สุด

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \left(MR_{\text{pre},i} - \overline{MR_{\text{exp},i}} \right)^2}{\sum_{i=1}^N \left(MR_{\text{exp},i} - \overline{MR_{\text{exp},i}} \right)^2} \quad (12)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(MR_{\text{pre},i} - MR_{\text{exp},i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

เมื่อ R^2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ RMSE คือ ผลรวมความคลาดเคลื่อนทั้งหมด $MR_{\text{pre},i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ทำนายด้วยแบบจำลองอย่างง่าย $MR_{\text{exp},i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นจากข้อมูลการทดลอง $\overline{MR_{\text{exp},i}}$ คือ อัตราส่วนความชื้นจากข้อมูลการทดลองเฉลี่ย และ N คือ จำนวนของข้อมูล (สุเนตร สืบคำ และฤทธิชัย อัครราชันย์, 2554)

ตารางที่ 1 สมการการอบแห้งอย่างง่ายที่ประยุกต์ใช้กับการอบแห้งข้าวโพดงอก

ชื่อแบบจำลอง	สมการแบบจำลอง
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Newton	$MR = \exp(-kt)$
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$

ที่มา : อัจฉรา แซ่ไคว้ และคณะ, 2554

เมื่อ a, b, c, k_1, k_2, k และ n เป็นค่าคงที่ใดๆ และ t คือเวลาอบแห้ง (min)

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาสมบัติการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดหวานนอกจากความชื้นเริ่มต้น 136.07 ± 2.82 % dry-basis จนได้ความชื้นสุดท้าย 16.94 ± 1.27 % dry-basis ด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 300, 600, และ 800 W ดังนี้

1. สมบัติทางกายภาพของข้าวโพดหวานนอก พบว่า ความหนาแน่นปรากฏมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับความชื้นในรูปสมการเส้นตรงมีค่าอยู่ในช่วง 157.2 ถึง 198.4 kg/m^3 สัดส่วนช่องว่างมีความสัมพันธ์เชิงลบกับความชื้นในรูปสมการเส้นตรงมีค่าลดลงในช่วง 70.0 ถึง 20.0 % ขณะที่เปอร์เซ็นต์การหดตัวของเมล็ดข้าวโพดมีความสัมพันธ์เชิงลบกับความชื้นในรูปสมการโพลิโนเมียลกำลังสองและลดลงในช่วง 3.2 ถึง 1.2 % เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น

2. จากการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายโอนความร้อนระหว่างการอบแห้ง ด้วยการทำนายอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากทดลองด้วยสมการอบแห้งอย่างง่าย 3 สมการ พบว่า สมการของ Page สามารถทำนายข้อมูลการทดลองได้ดีที่สุด นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สามารถคำนวณด้วยกฎการแพร่ของฟิกส์พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 1.82×10^{-7} – 5.00×10^{-7} m^2/min ขึ้นอยู่กับกำลังไมโครเวฟของการอบแห้ง โดยการอบแห้งข้าวโพดงอกด้วยไมโครเวฟมีค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) เท่ากับ 11.70 W/g

อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดหวานนอกด้วยไมโครเวฟ โดยนำเมล็ดข้าวโพดหวานสดตากแห้งเป็นเวลา 1 อาทิตย์ จากนั้นแช่น้ำเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนนำขึ้นจากน้ำปล่อยให้กองบนผ้าขึ้นเป็นเวลา 72 ชั่วโมง หาความชื้นของข้าวโพดงอกตามมาตรฐาน AOAC (1990) พบว่า ค่าความชื้นเริ่มต้น คือ 136.07 ± 2.82 % dry-basis จากนั้นอบแห้งข้าวโพดหวานนอก 40.00 g ด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 300, 600, และ 800 W จนมีความชื้นสุดท้าย 16.94 ± 1.27 % dry-basis

ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent Density, ρ)

จากการหาความหนาแน่นปรากฏของเมล็ดข้าวโพดหวานนอกที่ผ่านการอบแห้งที่กำลังไฟฟ้า 300, 600, และ 800 W ในช่วงความชื้น 16.94-136.07 % dry-basis พบว่า ความหนาแน่นปรากฏมีความสัมพันธ์กับความชื้น (MC) ในรูปแบบสมการเส้นตรง (R^2 อยู่ในช่วง 0.7817 – 0.9371) ดังรูปที่ 1 สมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นปรากฏกับความชื้นของข้าวโพดงอกเมื่ออบที่ 300, 600 และ 800 W จากกราฟพบว่าเมื่อความชื้นมีปริมาณเพิ่มขึ้นความหนาแน่นปรากฏมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากน้ำจะเข้าไปแทนที่รูพรุนในเมล็ดได้มากขึ้น และผลการทดลองเป็นไปในทางเดียวกับผลผลิตทางการเกษตรอื่นๆ เช่น ลูกพลัม (Gabas et al., 2005)

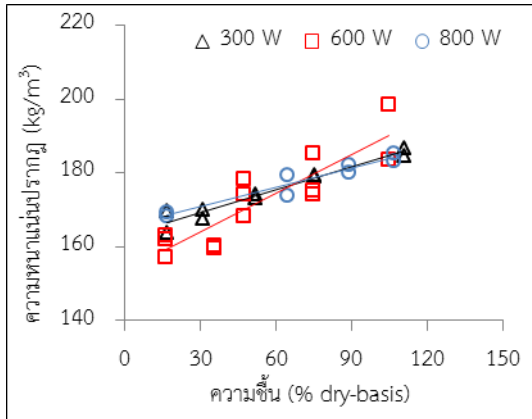
ร้อยละสัดส่วนช่องว่าง (Percentage of Void Fraction, % ϵ)

จากการศึกษาอัตราส่วนช่องว่างของเมล็ดข้าวโพดหวานนอกโดยการเติมน้ำมันลงในระหว่างช่องว่างของเมล็ดข้าวโพดหวานนอกในกระบอกตวง จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างกับความชื้นของข้าวโพดดังรูปที่ 2 พบว่าค่าอัตราส่วนช่องว่างเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นโดยความสัมพันธ์ระหว่าง

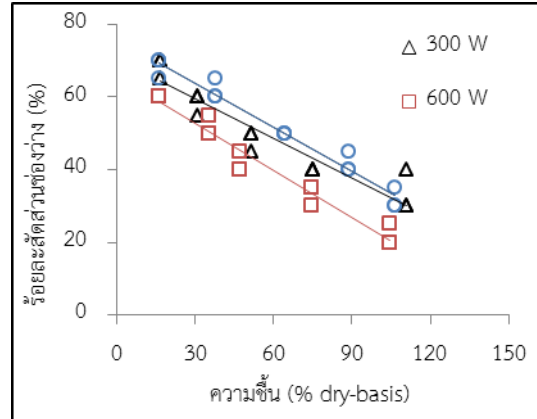
อัตราส่วนช่องว่างกับความชื้นของข้าวโพดในรูปแบบเส้นตรงและเมื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง

ร้อยละการหดตัว (Shrinkage Percentage, % Shrinkage)

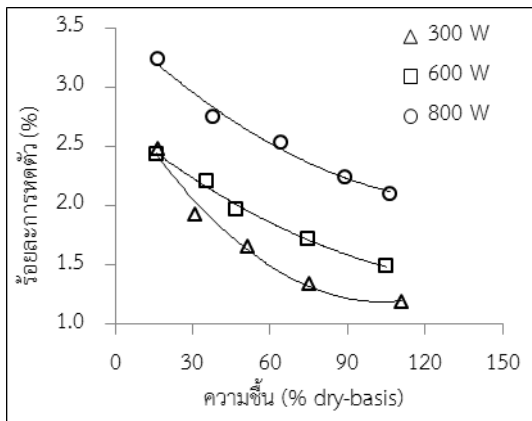
จากการศึกษาค่าร้อยละการหดตัวของเมล็ดข้าวโพดหวานงอก พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นของข้าวโพดหวานงอกลดลง เนื่องจากการหดตัวของข้าวโพดหวานงอกเป็นการสูญเสียองค์ประกอบหรือโครงสร้าง ทำให้องค์ประกอบอื่นเข้ามาใกล้ชิดกันเป็นผลให้ขนาดในภาพรวมลดลงหรือเล็กลง จึงทำให้ค่าร้อยละการหดตัวลดลงเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ในรูปแบบสมการโพลีโนเมียล ดังรูปที่ 3



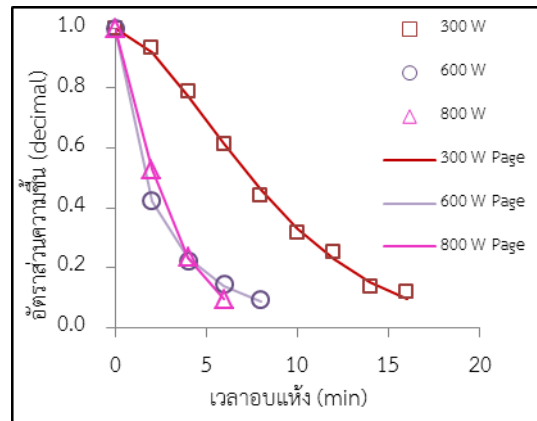
รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นปรากฏกับความชื้นของข้าวโพดหวานงอกเมื่ออบด้วยกำลังไมโครเวฟ 300, 600, และ 800 W



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละสัดส่วนช่องว่างกับความชื้นของข้าวโพดหวานงอกเมื่ออบด้วยกำลังไมโครเวฟ 300, 600, และ 800 W



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการหดตัวกับความชื้นของข้าวโพดหวานงอกเมื่ออบด้วยกำลังไมโครเวฟ 300, 600, และ 800 W



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้งของข้าวโพดหวานงอกเมื่ออบด้วยกำลังไมโครเวฟ 300, 600, และ 800 W

จลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง (Drying Kinetics)

จากการอบแห้งข้าวโพดงอกด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ กำลังไมโครเวฟ 300, 600, และ 800 W แสดงดังรูปที่ 4 พบว่า การอบแห้งข้าวโพดงอกมีอัตราการอบแห้งลดลง ในช่วงแรกของการอบแห้งความชื้นภายในเมล็ดข้าวโพดมีปริมาณสูงเมื่อได้รับความร้อนจากไมโครเวฟความชื้นภายในเมล็ดเคลื่อนที่มายังผิวเมล็ดได้ง่ายและรวดเร็วส่งผลให้เกิดการระเหยของความชื้นอย่างรวดเร็ว เมื่อการอบแห้งดำเนินต่อไปความชื้นภายในวัสดุลดลงอัตราการถ่ายโอนความร้อนจึงลดลงอย่างช้าๆ นอกจากนี้อัตราการถ่ายโอนความชื้นขึ้นอยู่กับกำลังไมโครเวฟกล่าวคือเมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้น

อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดข้าวโพดงอกสามารถทำนายด้วยสมการการอบแห้งอย่างง่าย วิเคราะห์ค่าคงที่ของสมการด้วยโปรแกรมทางสถิติแสดงดังตารางที่ 2 เปรียบเทียบความสามารถการทำนายข้อมูลสัดส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองโดยพิจารณาจากค่า R² และค่า RMSE พบว่าแบบจำลองของ Page สามารถอธิบายจลนพลศาสตร์การอบแห้งข้าวโพดงอกได้ดีที่สุด (R² อยู่ในช่วง 0.9987-1.0000 RMSE อยู่ในช่วง 0.0012 - 0.0160) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ k และ n ในสมการของ Page กับกำลังไมโครเวฟ (P) พบว่ามีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 14 และ 15 ตามลำดับ

$$k = -0.0954 + 0.0006 \times P + 0.0006 \times P^2 \quad (14) \quad R^2 = 0.6019$$

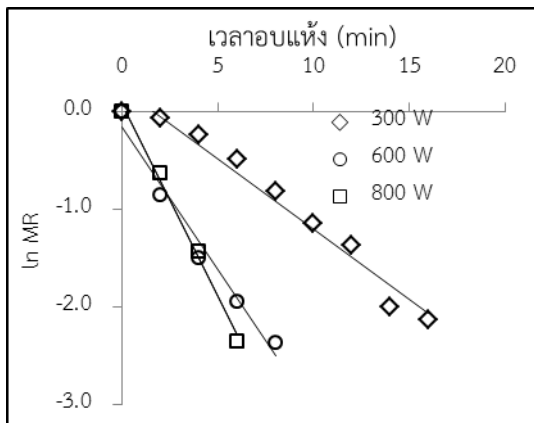
$$n = 1.687 + 0.0003 \times P - 0.000001 \times P^2 \quad (15) \quad R^2 = 0.4801$$

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้ง

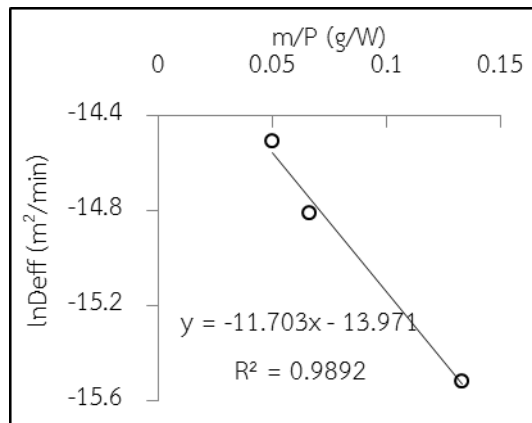
Model	Constant	R ²	RSME
Microwave Power 300 W			
Page	k = 0.0277; n = 1.5998	0.9987	0.0160
Newton	k = 0.1035	0.9697	0.0776
Henderson and Pabis	K = 0.1151; a = 1.0998	0.9789	0.0649
Microwave Power 600 W			
Page	k = 0.5160; n = 0.7464	0.9990	0.0012
Newton	k = 0.3767	0.9950	0.0332
Henderson and Pabis	k = 0.3715; a = 0.9855	0.9952	0.0325
Microwave Power 800 W			
Page	k = 0.2813; n = 1.1821	1.0000	0.0016
Newton	k = 0.3498	0.9981	0.0214
Henderson and Pabis	k = 0.3526; a = 1.0088	0.9982	0.0209

สัมประสิทธิ์การแพร่ (Effective Diffusivity, D_{eff})

จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นด้วยสมการที่ 12 โดยหาความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมธรรมชาติของอัตราส่วนความชื้น (ln (MR)) กับเวลาการอบแห้ง (t) แสดงดังรูปที่ 5 พบว่า ค่าลอการิทึมธรรมชาติของอัตราส่วนความชื้นลดลงเมื่อเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้น การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ด้วยวิธีการหาความชัน (Slope Method)



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมธรรมชาติของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้งที่กําลังไฟฟ้า 300, 600, และ 800 W



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของสัมประสิทธิ์การแพร่กับ m/P

ตารางที่ 3 สัมประสิทธิ์การแพร่ (D_{eff}) ของการอบแห้งข้าวโพดงอกด้วยไมโครเวฟที่ 300, 600, และ 800 W

กำลังไมโครเวฟ (W)	$D_{eff} (x10^{-7} m^2/min)$	R^2
300	1.82	0.9678
600	3.70	0.9757
800	5.00	0.9936

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นแสดงในตารางที่ 3 พบว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าอยู่ในช่วง $1.82 \times 10^{-7} - 5.00 \times 10^{-7} m^2/min$ เมื่ออบแห้งด้วยกำลังไมโครเวฟ 300, 600, และ 800 W ตามลำดับแสดงให้เห็นว่าการอบแห้งด้วยไมโครเวฟมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูง การอบแห้งด้วยไมโครเวฟเป็นการแผ่ความร้อนโดยไม่อาศัยตัวกลาง การอบแห้งส่งผลให้อุณหภูมิภายในเมล็ดข้าวโพดงอกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่ช่วงแรกของการอบแห้ง ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นจึงมีค่าสูง โดยผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับผลิตทางการเกษตรอื่นๆ เช่น Zarein et al. (2013) ได้ระบุว่า การอบแห้งตัวอย่างแอบเปิ้ลด้วยไมโครเวฟที่ กำลังไมโครเวฟ 200 - 600 W พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้จากสมการการแพร่ตามกฎข้อที่สองของ Fick อยู่ในช่วง $3.93 \times 10^{-7} - 2.27 \times 10^{-6} m^2/s$

สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของสัมประสิทธิ์การแพร่กับ m/P ดังรูปที่ 6 โดยใช้สมการที่ 11 ในการคำนวณค่าพลังงานกระตุ้นในการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดหวานงอก พบว่า ค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ $11.70 W/g$ โดยที่ค่า D_0 เท่ากับ $1319.6 m^2/min$

เอกสารอ้างอิง

- ประนอม ศรีสวัสดิ์. (2558). **องค์ประกอบที่ทำให้เมล็ดพันธุ์งอกได้ดี**. [ออนไลน์] สืบค้นจาก: <http://www.fsseeds.net> (20 เมษายน 2558).
- พงศ์เทพ โชติจักรดิกุล. (2540). **การจัดการข้าวโพดขึ้น โดยการอบแห้งแบบฟลูอิดไอเซชัน, การเทมเปอร์และการเป่าอากาศแวดล้อม**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, 1-131
- สุนทร สืบคำ และฤทธิชัย อัครราชันย์. (2554). **แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งสำหรับวัสดุพรุณ**. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 17, 59-68
- อัจฉรา แซ่คิ้ว, สุภวรรณภู ระวณิชย์กุล และยุทธนา ภูริระวณิชย์กุล. (2554). **ปัจจัยของการอบแห้งด้วยแหล่งพลังงานความร้อนแบบการพาและการแผ่รังสีความร้อนที่มีต่ออุณหภูมิและคุณภาพของพริกไทยดำ**. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 18, 166-180
- อนันต์ พงษ์ธรรุภพานิช. (2539) **การศึกษาการอบแห้งข้าวโพดโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไอเซชัน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, หน้า 1-115
- AOAC. (1990). **Official method of analysis**, 15th ed., The association of official analytical chemists. Inc. Arlington, Virginia, USA.
- Bualuang, O., and Thamphueak, K., (2014). **Effect of hot air convection drying temperatures on physical and chemical properties of germinated sweet corn**. Advanced Materials Research, 1033-1034, 663-668
- Crank, J. (1975). **The mathematics of diffusion**. Oxford University 1, 1-421

- Dadali, G., Apar, D.K., & Özbek, B. (2007a). Estimation of effective moisture diffusivity of okra for microwave drying. **Drying Technology: An International Journal** 25(9), 1445-1450.
- Dadali, G., Demirhan, E., & Özbek, B. (2007b). Microwave heat treatment of spinach: drying kinetics and effective moisture diffusivity. **Drying Technology: An International Journal** 25(10), 1703-1712.
- Demirhan, E., & Özbek, B. (2010). Drying kinetics and effective moisture diffusivity of purslane undergoing microwave heat treatment. **Korean Journal of Chemical Engineering** 27(5), 1377-1383.
- Doymaz, I., & Pala, M. (2003) The thin-layer drying characteristics of corn. **Journal of Food Engineering**, 60(2), 125–130
- Gabas, A.L., Marra-Junior, W.D., Telis-Romero, J., and Telis, V.R.N. (2005). Changes of density, thermal conductivity, thermal diffusivity, and specific heat of plum during drying. **International Journal of Food Properties**, 8, 233-242
- Modgil, R., Joshi, R., Gupta, R., Verma, R. and Anand, S. (2009). Effect of sprouting and roasting on antinutritional factors and the biological protein quality of fenugreek cultivars. **Journal of Food Science and Technology-Mysore** 46 (6), 591–594
- Pickles, C.A., Gao, F. and Kelebek, S. (2013). Microwave drying of a low-rank sub-bituminous coal. **Minerals engineering** 62, 31–42
- Thai junior encyclopedia project by Royal Command of His Majesty the King. (2014). **Corn**.
- Thymi, S., Krokida, M.K., Pappa, A. and Maroulis, Z.B. (2005). Structural properties of extruded corn starch. **Journal of Food Engineering** 68, 519–526
- Zarein, M., Seyed, H.S. and Barat, G. (2013) Investigation of microwave dryer effect on energy efficiency during drying of apple slices. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences** 14, 41–47