

ผลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล ของน้ำในเมล็ดถั่วเหลืองและค่าดัชนีการกระจายตัวของ โปรตีนของแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม

เผด็จศักดิ์ จำปา¹ และ สุวิษ ศิริวัฒนโยธิน²
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของน้ำในเมล็ดถั่วเหลืองและค่าดัชนีการกระจายตัวของโปรตีนของแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม

อบแห้งถั่วเหลืองสายพันธุ์ เชียงใหม่ 60 และ สจ. 4 ที่ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 0.097 และ 0.099 มาตรฐานแห้งตามลำดับ ด้วยเครื่องอบแห้งแบบตู้ ในช่วงอุณหภูมิ 100-150 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.84 เมตรต่อวินาที หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของน้ำด้วยการวิเคราะห์การถดถอยและหาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของน้ำกับอุณหภูมิตามสมการแบบอาร์เนียส ได้ค่าพลังงานกระตุ้นเป็น 48.50 และ 45.60 กิโลจูลต่อโมลตามลำดับ

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงดัชนีการกระจายตัวของโปรตีนแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็มตามหลักจลนพลศาสตร์ พบว่ามีค่าพลังงานกระตุ้น 2 ช่วง โดยช่วงแรกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 120 °C ค่าพลังงานกระตุ้นของแป้งถั่วเหลืองสายพันธุ์ เชียงใหม่ 60 และ สจ. 4 เป็น 29.66 และ 23.14 กิโลจูลต่อโมลตามลำดับ และช่วงสองที่อุณหภูมิสูงกว่า 120 °C ค่าพลังงานกระตุ้นเป็น 169.62 และ 171.94 กิโลจูลต่อโมลตามลำดับ

เมื่อนำผลการทดลองข้างต้นไปใช้ทำนายค่าความชื้นและดัชนีการกระจายตัวของโปรตีนของกระบวนการอบแห้งจริง ซึ่งใช้เครื่องอบแห้งแบบไวโปรฟลูอิดเบด พบว่าค่าความชื้นที่ทำนายได้ใกล้เคียงกับค่าจริง ขณะที่ค่าดัชนีการกระจายตัวของโปรตีนที่ทำนายได้สูงกว่าค่าจริง

¹ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

² อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

Effect of Drying Temperature on Effective Diffusivities and Protein Dispersibility Indexes of Full Fat Soy Flour

Phadetsak Champa¹ and Suwit Siriwattanayotin²
King Mongkut's University of Technology Thonburi

Abstract

The objective of this research is to study the effect of processing temperature on diffusivities of water and protein dispersibility index of full fat soy flour.

Soybean varieties Chiangmai 60 and SJ.4 with initial moisture content of 0.097 and 0.099 (dry basis) respectively were dried in a cabinet dryer at 100-150 °C with air velocity of 1.84 m/s. The effective diffusivities which determined by curve fitting were correlated with temperature according to Arrhenius law. The activation energy of Chiangmai 60 and SJ.4 soybean varieties were 48.50 kJ/mol and 45.60 kJ/mol, respectively.

Kinetic analysis on temperature dependent of protein dispersibility index showed that full fat soy flour had two ranges of activation energy. At temperature below 120 °C the activation energy of Chiangmai 60 and SJ.4 soybean varieties were 29.66 kJ/mol and 23.14 kJ/mol and at temperature over 120 °C were 169.62 kJ/mol and 171.94 kJ/mol, respectively.

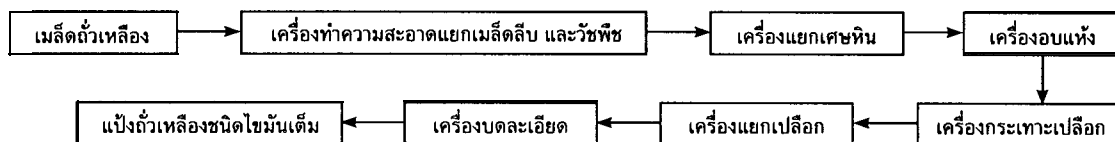
By using these results to predict the moisture content and protein dispersibility index of real processing which used vibro-fluid bed dryer for drying, it is found that the moisture content of the samples was in good agreement with the predicted one, where as the protein dispersibility index of product was found to be lower than predicted value.

¹ Graduate Student, Department of Food Engineering

² Lecturer, Department of Food Engineering

บทนำ

ถั่วเหลืองมีปริมาณโปรตีนประมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนักมาตรฐานแห้ง และมีปริมาณโปรตีนสูงกว่าธัญพืชอื่นประมาณร้อยละ 8.15 ถั่วเหลืองมีกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกายครบทุกชนิด โดยเฉพาะฮิสติดีนซึ่งเป็นกรดอะมิโนที่จำเป็นสำหรับเด็กทารก [1] ซึ่งหากสามารถนำแบ่งถั่วเหลืองไปผสมกับแป้งชนิดอื่นๆ ในการผลิตอาหารจะสามารถใช้ประโยชน์จากโปรตีนได้อย่างสูงสุด เนื่องจากกรดอะมิโนจากถั่วเหลืองจะช่วยทดแทนกรดอะมิโนที่ขาดแคลนในแป้งชนิดอื่นๆ โปรตีนในถั่วเหลืองประกอบไปด้วยกรดอะมิโนเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเอมีนและมีรูปร่างคล้ายทรงกลม (globular protein) โปรตีนในถั่วเหลืองไม่มีคุณสมบัติในการละลายน้ำ แต่สามารถกระจายตัวอยู่ในน้ำในรูปของคอลลอยด์ และเปลี่ยนแปลงสภาพได้ง่ายเมื่อถูกความร้อนหรือระดับ pH เปลี่ยนไป การผลิตแบ่งถั่วเหลืองชนิดไขมันเต็มแบบแห้ง มีขั้นตอนที่สำคัญแสดงไว้ในรูปที่ 1 ซึ่งมีข้อเสียจากการกระบวนการผลิตน้อยและมีคุณค่าทางโภชนาการเกือบเทียบเท่าถั่วเหลือง โดยจะต้องอบแห้งเมล็ดถั่วเหลืองให้ได้ความชื้นประมาณร้อยละ 5 ก่อนที่จะกระเทาะเปลือกและบดละเอียดเพราะจะทำให้กระเทาะและแยกเปลือกออกได้ดีขึ้น



รูปที่ 1 ขั้นตอนการผลิตแบ่งถั่วเหลืองชนิดไขมันเต็ม

การนำเอาแบ่งถั่วเหลืองชนิดไขมันเต็มไปใช้บริโภคโดยตรง หรือใช้ในอุตสาหกรรมอาหารเสริมของเด็กอ่อน อุตสาหกรรมขนมอบ และอุตสาหกรรมนํ้านมถั่วเหลืองนั้น แบ่งถั่วเหลืองชนิดไขมันเต็ม ควรมีความสามารถในการแขวนลอยในนํ้าได้ดี มีสีขาว และมีความชื้นต่ำ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิอบแห้ง ต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดถั่วเหลือง และผลกระทบต่อดัชนีการกระจายตัวของโปรตีน (Protein Dispersibility Index, PDI) ของแบ่งถั่วเหลืองชนิดไขมันเต็ม ในการอบแห้งด้วยตู้อบแห้ง และใช้ผลดังกล่าวทำนายและหาสภาวะในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบไวบ्रोฟลูอิดเบด (Vibro-Fluid Bed) แบบต่อเนื่อง

วัสดุและวิธีการทดลอง

ทำการอบแห้งเมล็ดถั่วเหลืองสายพันธุ์เชียงใหม่ 60 ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (Geometric mean) เท่ากับ 0.629 ซม. กับสายพันธุ์สจ. 4 ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 0.629 ซม. และมีความชื้นเริ่มต้นเป็น 0.097 และ 0.099 มาตรฐานแห้งตามลำดับ ด้วยเครื่องอบแห้งแบบตู้ ที่อุณหภูมิอากาศร้อนเป็น 100, 110, 120, 130, 140 และ 150 °C ความชื้นสัมพัทธ์อากาศร้อยละ 57.94 ความเร็วลม 1.84 m/s เป็นเวลา 15, 20, 30, 40, 50, 60 นาทีตามลำดับ เก็บตัวอย่างทุกๆ 5 นาที นำตัวอย่างมาเก็บในเดสิคเคเตอร์ (Desiccator) จนกระทั่งเมล็ดถั่วเหลืองมีอุณหภูมิปกติ นำเมล็ดถั่วเหลืองส่วนหนึ่งจากเดสิคเคเตอร์ไปวิเคราะห์ความชื้นของเมล็ดถั่วเหลืองด้วยการอบที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

นำเมล็ดถั่วเหลืองส่วนหนึ่งจากเคสิคเคเตอร์มาบดหยาบ ผ่าซีก แยกเปลือกออก แล้วบดละเอียดด้วยเครื่องบด Cyclotech mill ซ้ำ 4 ครั้ง ขนาดของเม็ดแบ่งที่ได้จะมีส่วนของเม็ดแบ่งที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 100 เมช ร้อยละ 97.39 นำแบ่งถั่วเหลืองบรรจุในถุงพลาสติกปิดผนึกปากถุงเก็บในเคสิคเคเตอร์

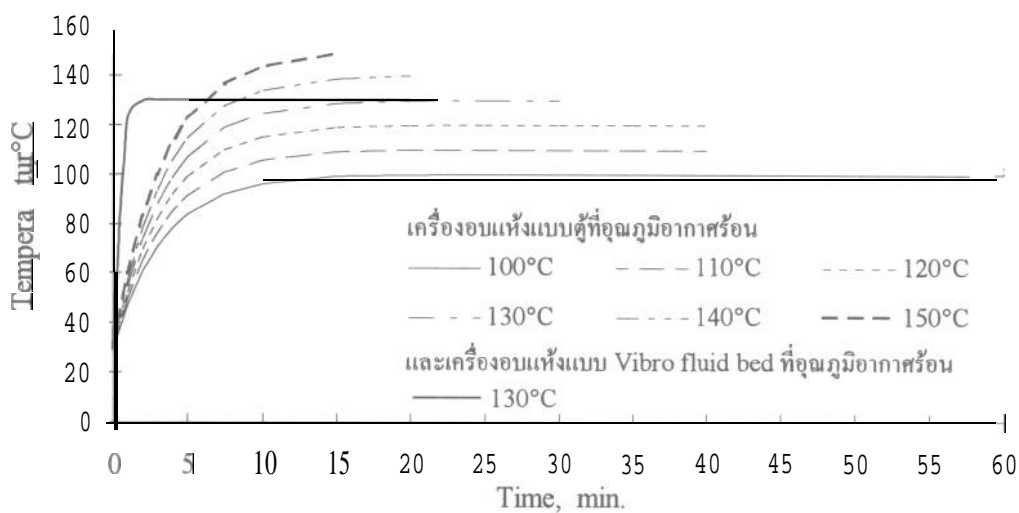
วิเคราะห์ความชื้นของแบ่งถั่วเหลืองชนิดไขมันเต็ม ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ในตู้อบ วิเคราะห์ดัชนีการกระจายตัวของโปรตีน ด้วยการนำแบ่งถั่วเหลืองที่ได้มาจัดเตรียมระบบแขวนลอยของโปรตีนในน้ำที่ pH 7.0 และวิเคราะห์หาโปรตีนในสารละลายโดยวิธีเจลดาล์ (Kjeldhal method) [8]

ทำนายผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณภาพของเมล็ดถั่วเหลือง และแบ่งถั่วเหลืองที่ผลิตได้ใช้ผลดังกล่าวมาเทียบกับการทดลองอบแห้งเมล็ดถั่วเหลืองในระดับโรงงานด้วยเครื่องอบแห้งแบบไวโบรฟลูอิดเบด (Vibro-Fluid Bed) แบบต่อเนื่อง

ผลการทดลองและวิจารณ์

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเมล็ดถั่วเหลืองระหว่างการอบแห้ง

เนื่องจากขีดจำกัดในการวัดอุณหภูมิภายในเมล็ดถั่วเหลือง จึงทำนายอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเมล็ดถั่วเหลือง โดยมีข้อสมมติฐานว่าเมล็ดถั่วเหลืองทรงกลม และปริมาณความร้อนในอากาศอบแห้งมีมากพอ ใช้สมการนำความร้อนแบบมิติเดียวของวัตถุทรงกลมในสภาวะที่ไม่สม่ำเสมอ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย (\bar{h}) บริเวณผิวของเมล็ดถั่วเหลือง เมื่ออบแห้งเมล็ดถั่วเหลืองด้วยเครื่องอบแห้งแบบตู้ (Cabinet dryer) ประมาณจากทฤษฎีชั้นขอบเขต (Boundary Layer Theory) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 12.41-12.51 W/m² °C [4] และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย (\bar{h}) ในเครื่องอบแห้งแบบไวโบรฟลูอิดเบด (Vibro Fluid Bed) ประมาณจากสหสัมพันธ์การพาความร้อนแบบบังคับ ซึ่งมีค่าประมาณ 177.39 W/m² °C ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 130 °C ความเร็วลม 14.05 m/s [4] และใช้คุณสมบัติเชิงความร้อนของเมล็ดถั่วเหลืองตามแบบจำลองของ Choi และ Okos [3] ทำนายอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเมล็ดถั่วเหลืองดังในรูปที่ 2 ในกรณีอบแห้งเมล็ดถั่วเหลืองด้วยเครื่องอบแห้งแบบตู้ (Biot Number = 0.0067) อุณหภูมิของเมล็ดถั่วเหลืองน่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเร็วกว่าที่แสดงในรูปที่ 2 เนื่องจากการนำความร้อนจากอากาศอุณหภูมิที่บรรจุถั่วเหลือง ดังนั้นจึงจะใช้ข้อมูลตั้งแต่วันที่ 5 นาที เป็นต้นไปว่าเป็นข้อมูลแสดงคุณสมบัติ ณ อุณหภูมิเฉลี่ยที่เท่ากับที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งนั้น



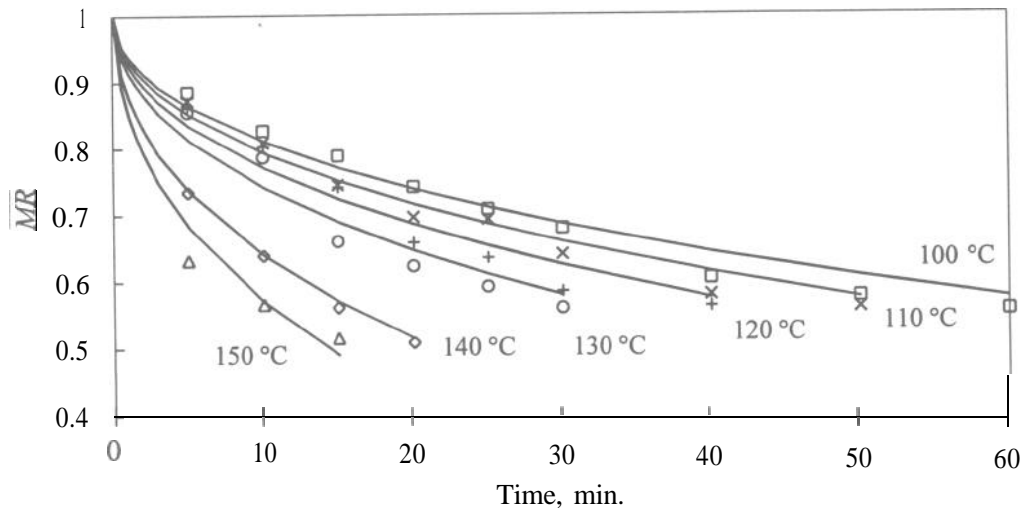
รูปที่ 2 อุณหภูมิเฉลี่ยของเมล็ดถั่วเหลืองที่เพิ่มขึ้นเมื่ออบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบตู้ และเครื่องอบแห้งแบบไวโบรฟลูอิดเบด

ผลของอุณหภูมิอบแห้งต่อความชื้นของเมล็ดถั่วเหลือง

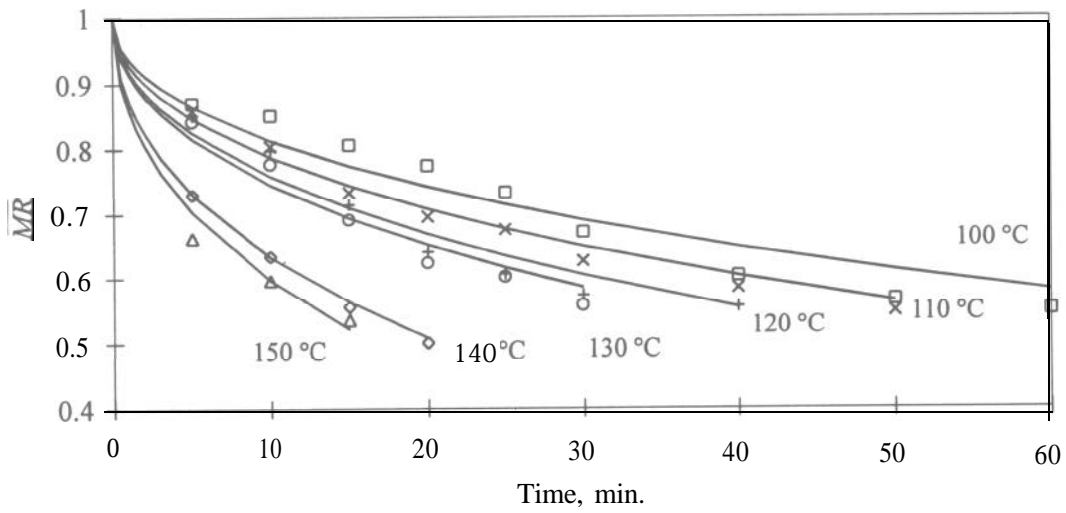
เนื่องจากการอบแห้งถั่วเหลืองสายพันธุ์เชียงใหม่ 60 และ สจ. 4 ความชื้นเริ่มต้น 0.097 และ 0.099 มาตรฐานแห้งตามลำดับ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 100-150 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1.84 m/s ด้วยเครื่องอบแห้งแบบตู้เป็นกระบวนการอบแห้งในอัตราลดลง [2] ค่าความต้านทานการพามวล ด้านนอกผิวเมล็ดถั่วเหลืองน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความต้านทานการแพร่มวลภายในเมล็ดถั่วเหลือง จึงใช้แบบจำลองการแพร่มวลออกจากทรงกลมตามกฎข้อที่สองของ Fick สมการ (1) เปรียบเทียบกับผลการทดลอง

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

โดย \bar{M} เป็น ค่าความชื้นเฉลี่ยของเมล็ดถั่วเหลือง ณ เวลาใด (มาตรฐานแห้ง) M_{in} เป็น ค่าความชื้นของเมล็ดถั่วเหลืองก่อนอบแห้ง M_{eq} เป็นค่าความชื้นสมดุล ณ อุณหภูมิอากาศร้อนนั้น ซึ่งคำนวณจากแบบจำลองของ Henderson [2] r เป็นรัศมีของเมล็ดถั่วเหลือง (คำนวณจาก Geometric mean diameter) t เป็นเวลา และ D_{eff} เป็นสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของน้ำ ใช้การวิเคราะห์การถดถอยระหว่างผลการทดลองกับคำตอบสามเทอมแรกของสมการ (1) และหาค่า D_{eff} โดยวิธีการของนิวตัน [6] ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของน้ำดังในตารางที่ 1 ซึ่งไม่ว่าจะใช้ข้อมูลตั้งแต่เวลาเริ่มต้นหรือเมื่อเวลา 5 นาทีเป็นต้นไป ค่า D_{eff} ที่คำนวณได้ไม่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงใช้ข้อมูลทั้งหมดเพื่อหาค่าที่อุณหภูมิ 150 °C ด้วย



รูปที่ 3 อัตราส่วนความชื้นของเมล็ดข้าวเหลืองสายพันธุ์เชียงใหม่ 60 เมื่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบตู้ที่อุณหภูมิต่างๆ เทียบกับผลการทำนาย □, ×, +, O, ◇, Δ ข้อมูล; — ทำนาย



รูปที่ 4 อัตราส่วนความชื้นของเมล็ดข้าวเหลืองสายพันธุ์สจ.4 เมื่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบตู้ที่อุณหภูมิต่างๆ เทียบกับผลการทำนาย □, ×, +, O, ◇, Δ ข้อมูล; — ทำนาย

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของน้ำ (D_{eff}) ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ °C	100	110	120	130	140	150
$D_{eff} * 10^{10}$, m ² /s ชม.60l	0.5711	0.6858	0.8576	1.1174	2.3384	3.5263
$D_{eff} * 10^{10}$, m ² /s สจ.4	0.5428	0.7141	0.9429	1.0578	2.3871	2.9665

เมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับอุณหภูมิตามสมการแบบ Arrhenius โดย

$$D_{eff} = D_o \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2)$$

เมื่อ D_o เป็นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ E_a เป็นพลังงานกระตุ้น R เป็นค่าคงที่ของก๊าซ และ T เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4 ได้ค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D_o) ของถั่วเหลืองสายพันธุ์ ชม.60 เป็น 48.50 kJ/mol และ $14.8682 \cdot 10^{-10}$ m²/s กับ ของถั่วเหลืองสายพันธุ์ สจ.4 เป็น 45.60 kJ/mol และ $13.9687 \cdot 10^{-10}$ m²/s ตามลำดับ เมื่อเทียบกับงานของ Kitic และ Viollaz [7] ที่ศึกษาการอบแห้งเมล็ดถั่วเหลืองสายพันธุ์ Williams แบบชั้นบาง ใช้อุณหภูมิอบแห้งช่วง 50-80 °C ที่ความชื้นเริ่มต้น 0.62 และ 0.42 มาตรฐานแห้ง ได้ค่าพลังงานกระตุ้นเป็น 28.9 และ 30.1 kJ/mol ตามลำดับ และ Suarez กับคณะ [9] อบแห้งเมล็ดถั่วเหลืองที่ความชื้นเริ่มต้น 0.29 มาตรฐานแห้ง ได้ค่าพลังงานกระตุ้นเป็น 36.4 kJ/mol เห็นได้ว่าค่าพลังงานกระตุ้นในงานนี้มีค่าสูงกว่า เนื่องจากความชื้นเริ่มต้นต่ำกว่ามาก ซึ่งอาจทำให้ความเข้มข้นของสารละลายในน้ำที่อยู่ในเมล็ดถั่วเหลืองมีค่าสูง ค่าพลังงานกระตุ้นจึงสูงขึ้น และเมื่อเทียบกับค่าความร้อนแฝงในการเป็นไอของน้ำที่อุณหภูมิ 100 °C มีค่าประมาณ 40.62 kJ/mol ขณะที่ระดับความชื้นต่ำๆ ซึ่งพอจะประมาณได้ว่าเป็นค่าความชื้นสมดุล เป็นเส้นตรงแล้ว ค่าความแตกต่างของความเข้มข้นของน้ำในสมการ (1) พอเทียบเคียงได้ว่าเป็นค่าความแตกต่างของความเข้มข้นของไอน้ำ และการแพร่โดยส่วนใหญ่น่าจะเป็นการแพร่ของไอน้ำ

เมื่อทำการอบแห้งเมล็ดถั่วเหลืองด้วยเครื่องอบแห้งแบบไวโรฟลูอิดเบดจากสภาวะการผลิตในปัจจุบันของโรงงาน ทำนายระยะเวลาเฉลี่ย (mean residence time) ที่เมล็ดถั่วเหลืองอยู่ในเครื่องอบแห้งโดย

$$\tau = \frac{\text{hold up}}{\text{feed rate}} \quad (3)$$

เมื่อ τ เป็นเวลาระยะเวลาเฉลี่ย (นาท) hold up เป็นน้ำหนักของเมล็ดของแข็งที่ค้างในเครื่องอบแห้ง เมื่อหยุดเครื่อง และ feed rate เป็นอัตราการป้อนถั่วเหลืองได้เท่ากับ 18.15 นาท วัดความชื้นมาตรฐานแห้งของถั่วเหลืองหลังจากการอบแห้งได้เป็น 0.061 ขณะที่คำนวณความชื้นจากสมการ (1) ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มวลประสิทธิผลจากค่าในตารางที่ 1 ที่อุณหภูมิ 130 °C มีค่าเท่ากับ 0.063 ซึ่งค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยแตกต่างกันอยู่ร้อยละ 2.5 ความแตกต่างนี้อาจเป็นเพราะผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่แตกต่างกันในเครื่องอบแห้งทั้งสองแบบดังในรูปที่ 2 และการใช้สมมติฐานการไหลของเมล็ดถั่วเหลืองในเครื่องอบแห้งแบบไวโรฟลูอิดเบดว่าเป็นการเคลื่อนที่แบบปลั๊ก (plug flow)

ผลของอุณหภูมิต่อดัชนีการกระจายตัวของโปรตีน

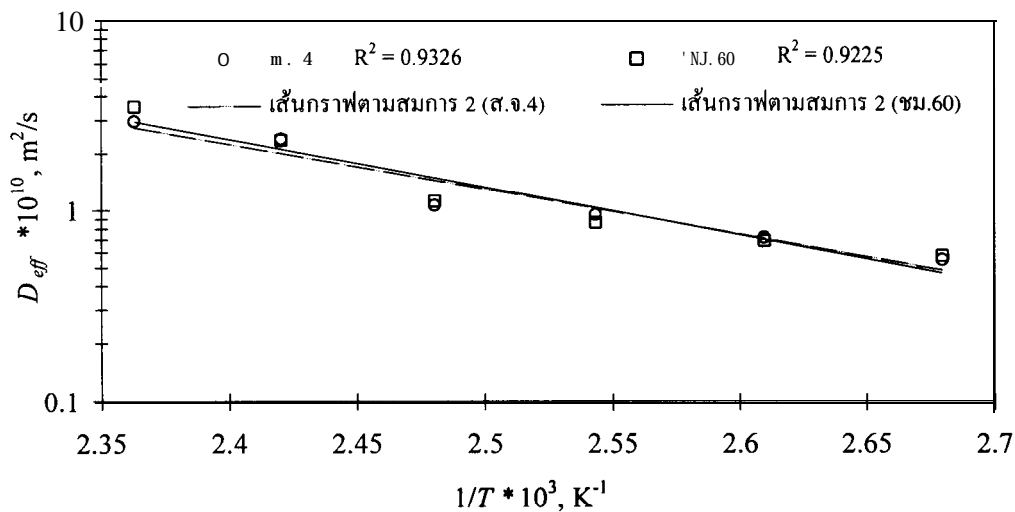
ดัชนีการกระจายตัวของโปรตีนจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของเมล็ดถั่วเหลือง และเวลาในการอบแห้งเพิ่มมากขึ้นโดยที่อุณหภูมิ 150 °C ดัชนีการกระจายตัวของโปรตีนมีค่าลดลงประมาณ 4 เท่า เมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้น ขณะที่ ณ อุณหภูมิ 100 °C ดัชนีการกระจายตัวของโปรตีนมีค่าลดลงประมาณ 1.3 เท่า เมื่อวิเคราะห์กลไกการเปลี่ยนแปลงโดยสมมติฐานว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงดัชนีการกระจายตัวของโปรตีนเป็นแบบเดียวกันกับการเสียดสภาพของโปรตีน โดยเป็นปฏิกิริยาของโมเลกุลเดี่ยวแบบผันกลับไม่ได้อันดับ 2 [5] โดย

$$-\frac{dPDI}{dt} = k PDI^2 \quad (4)$$

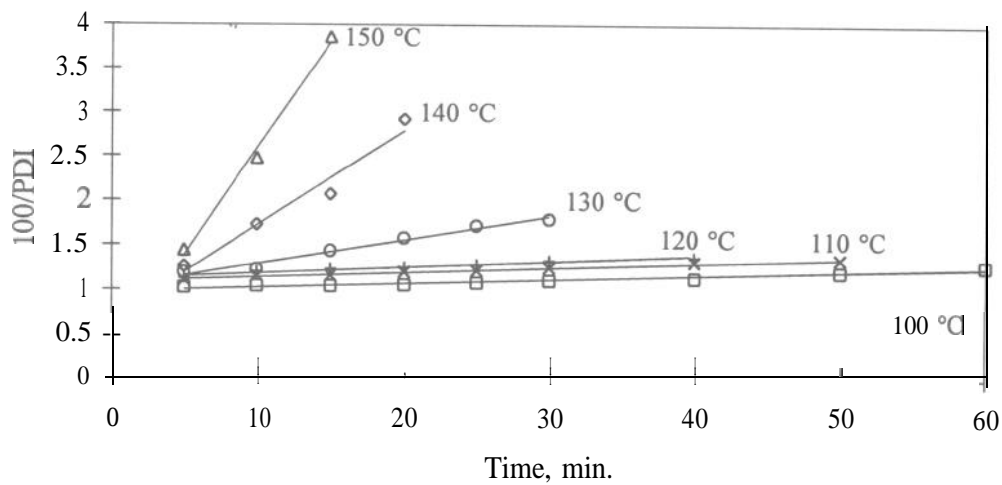
เมื่อ PDI เป็นดัชนีการกระจายตัวของโปรตีน (ร้อยละ) k เป็นอัตราเร็วของปฏิกิริยา (min^{-1}) และ t เป็นเวลา (min) และมีคำตอบเป็น

$$\frac{100}{PDI} - \frac{100}{PDI_0} = k t \quad (5)$$

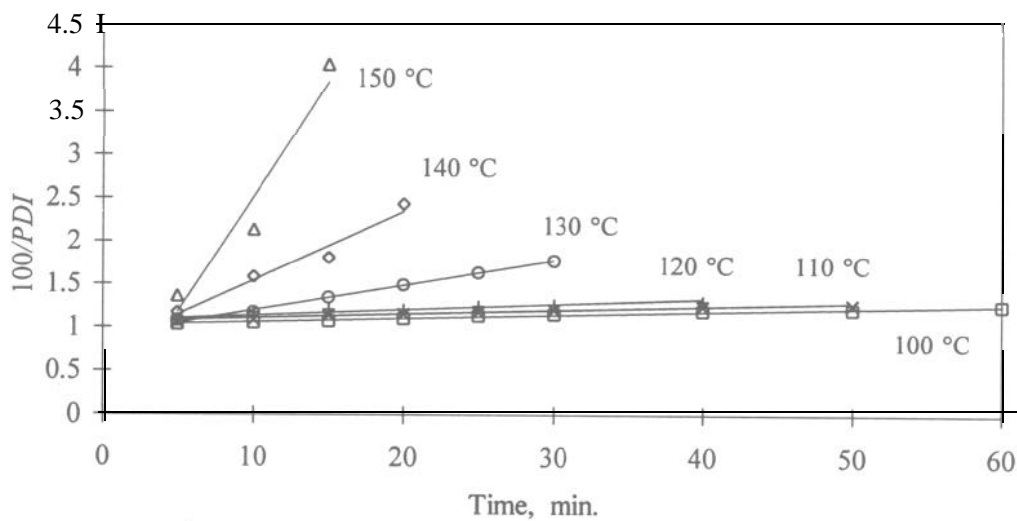
เมื่อใช้ PDI_0 เป็นดัชนีการกระจายตัวของโปรตีน (ร้อยละ) ณ เวลาเริ่มต้นที่ 5 นาที หาค่าอัตราเร็วของปฏิกิริยา (k) โดยเขียนกราฟระหว่าง $100/PDI$ กับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6 ได้ค่าอัตราเร็วของปฏิกิริยา ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 5 ผลของอุณหภูมิต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของมวลของเมล็ดถั่วเหลืองสองสายพันธุ์



รูปที่ 6 ส่วนกลับของดัชนีการกระจายตัวของโปรตีนของแก้วเหลืองสายพันธุ์ ชม.60 เมื่ออบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบตู้ ที่อุณหภูมิต่างๆ เทียบกับผลการทำนาย □, ×, +, O, ◇, Δ ข้อมูล (ค่าเฉลี่ยจาก 2 ซ้ำ) — ทำนาย

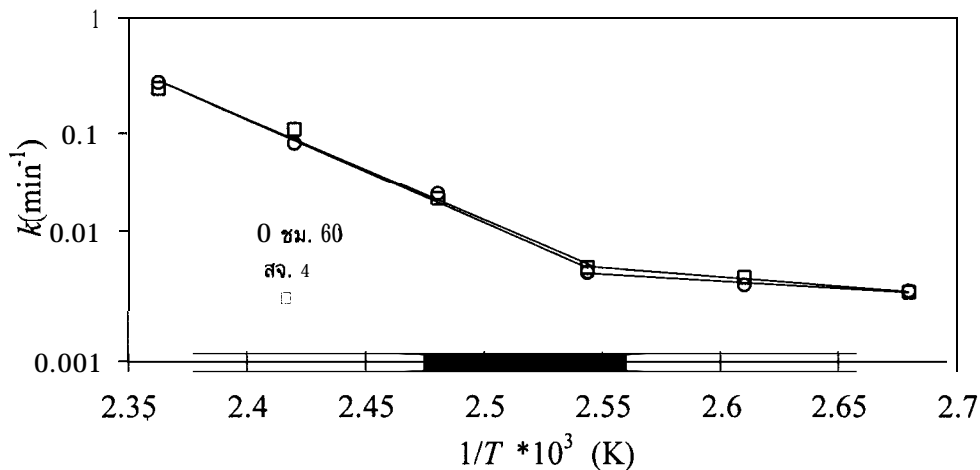


รูปที่ 7 ส่วนกลับของดัชนีการกระจายตัวของโปรตีนของแก้วเหลืองสายพันธุ์ สจ.4 เมื่ออบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบตู้ ที่อุณหภูมิต่างๆ เทียบกับผลการทำนาย □, ×, +, O, ◇, Δ ข้อมูล — ทำนาย

ตารางที่ 2 ค่าอัตราเร็วของปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลง PDI ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ °C	100	110	120	130	140	150
k (min ⁻¹) ชม.60	0.0045	0.0054	0.0065	0.0263	0.1066	0.2411
k (min ⁻¹) สจ.4	0.0041	0.0046	0.0059	0.0289	0.0805	0.2679

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของปฏิกิริยากับส่วนกลับของอุณหภูมิตามสมการแบบ Arrhenius ดังในรูปที่ 8 อาจกล่าวได้ว่าอัตราเร็วของปฏิกิริยามี 2 ช่วง โดยช่วงที่เมล็ดถั่วเหลืองมีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำ อัตราเร็วของปฏิกิริยาต่ำ ซึ่งอาจสันนิษฐานว่าในขณะที่น้ำเคลื่อนที่ออกจากโมเลกุลของโปรตีน H^+ จะฟอร์มตัวกับพันธะไดซัลไฟด์ (S-S) เกิดเป็นพันธะซัลไฮดิล (-SH) ทำให้โครงสร้างของโปรตีนเกิดการคลายตัว ในช่วงดังกล่าวนี้อาจมีบางส่วนของโมเลกุลเกิดการแตกหัก และพันธะซัลไฮดิลจะสูญเสีย H^+ เนื่องจากความไม่เสถียรทำให้เกิดการแตกหักของโมเลกุลของโปรตีน และมีการฟอร์มพันธะไดซัลไฟด์ใหม่ระหว่างโมเลกุลที่แตกหักได้เป็นโปรตีนโครงสร้างใหม่ที่มีคุณสมบัติแตกต่างไปจากเดิม และช่วงที่เมล็ดถั่วเหลืองมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูง มีอัตราเร็วของปฏิกิริยาสูง อาจสันนิษฐานว่าความร้อนทำลายพันธะต่างๆ ทั้งที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวสูงและต่ำ ภายในโมเลกุลของโปรตีนโดยตรง และเกิดการฟอร์มพันธะไดซัลไฟด์ระหว่างโมเลกุลที่แตกหักเกิดเป็นโปรตีนโครงสร้างใหม่ [8]



รูปที่ 8 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลง PDI □, ○ ข้อมูล; — ทำนาย

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของอัตราเร็วของปฏิกิริยากับอุณหภูมิตามสมการแบบ Arrhenius ดังในรูปที่ 8 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า $120^{\circ}C$ อัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงดัชนีการกระจายตัวของโปรตีนเปลี่ยนไปอย่างรวดเร็วมาก โดยมีค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) และแฟกเตอร์ความถี่ (k_0) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3 ถึงแม้ว่าการอบแห้งถั่วเหลืองที่อุณหภูมิสูงกว่า $120^{\circ}C$ แล้วอัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงดัชนีการกระจายตัวของโปรตีนจะสูงขึ้นมากก็ตาม ก็ยังคงเลือกอุณหภูมิมอบแห้งที่สูงกว่า $120^{\circ}C$ เพราะปริมาณความร้อนในการทำให้ Trypsin inhibitor เสียสภาพมีค่าเท่ากับ 110 kJ/mol [5] และอัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงดัชนีการกระจายตัวของโปรตีนทั้งสองสายพันธุ์ไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์เคมีของปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลง
ดัชนีการกระจายตัวของโปรตีนของแป้งถั่วเหลืองไขมันเต็ม ระหว่างสายพันธุ์เชียงใหม่ 60 และสจ.4

พารามิเตอร์	ช่วงอุณหภูมิ	สายพันธุ์เชียงใหม่ 60	สายพันธุ์สจ.4
k^o (min^{-1})	ต่ำกว่า 120 °C	57.77	6.92
	สูงกว่า 120 °C	2.43E+20	5.76E+20
E_a (kJ/mol)	ต่ำกว่า 120 °C	29.66	23.14
	สูงกว่า 120 °C	169.62	171.94

เมื่ออบแห้งเมล็ดถั่วเหลืองสายพันธุ์เชียงใหม่ 60 ความชื้นเริ่มต้น 0.099 มาตรฐานแห้ง
ที่อุณหภูมิอบแห้ง 130 องศาเซลเซียส ความเร็วลมผ่านออริฟิส 14.05 m/s ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ
ร้อยละ 56.11 ด้วยเครื่องอบแห้งแบบไวโบริฟลูอิดเบด ระยะเวลาในการอบแห้ง 18.15 นาที นำแป้ง
ถั่วเหลืองที่ผลิตได้ไปวิเคราะห์ดัชนีการกระจายตัวของโปรตีน ได้ค่าเป็นร้อยละ 54.46 ขณะที่ใช้สมการที่
(5) ทำนายค่าดัชนีการกระจายตัวของโปรตีนได้เท่ากับร้อยละ 67.23 ซึ่งเหตุที่ค่าแตกต่างกันมากนี้
อาจเป็นผลเนื่องจากการไหลของถั่วเหลืองในไวโบริฟลูอิดเบดแตกต่างไปจากข้อสมมติฐานที่ว่า
การไหลเป็นแบบปลັก

บทสรุป

การอบแห้งเมล็ดถั่วเหลืองในเครื่องอบแห้งแบบไวโบริฟลูอิดเบดเป็นขั้นตอนหนึ่งในการผลิต
แป้งถั่วเหลืองชนิดไขมันเต็ม ซึ่งเมื่อใช้อุณหภูมิการอบแห้งต่ำจะต้องใช้เวลาในการอบแห้งนานขึ้น ทำให้
อัตราการผลิตลดลง ในขณะที่เดียวกันเมื่อใช้อุณหภูมิสูงขึ้นคุณภาพของแป้งถั่วเหลืองจะลดลงมากกว่า
การใช้อุณหภูมิต่ำ การวัดอัตราการอบแห้งในตู้อบแห้งแบบตู้และนำไปใช้ทำนายการอบแห้งในการ
อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบไวโบริฟลูอิดเบดให้ผลได้ค่อนข้างใกล้เคียง ในขณะที่นำผลการเปลี่ยนแปลง
ดัชนีการกระจายตัวของโปรตีนจากการอบแห้งในตู้อบแห้งแบบตู้ไปใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงดัชนี
การกระจายตัวของโปรตีนในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบไวโบริฟลูอิดเบด ได้ผลไม่ใกล้เคียงเลย
อย่างไรก็ดีเมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิแล้วควรใช้อุณหภูมิต่ำที่ต่ำกว่า 120 °C

เอกสารอ้างอิง

1. ประเสริฐ สายสิทธิ์, สมชาย ประภาวัตร, อุดม กาญจนปกรณชัย, กุลวดี ทองพาณิชย์, ประชา บุญญศิริกุล, อนุกุล พูลศิริ, มัณฑนา ร่วมรักษ์ และวันชัย สมชิต, 2537, ถั่วเหลืองและการใช้ประโยชน์ในประเทศไทย, บริษัทสยามออฟเซต จำกัด, หน้า 75-77.
2. สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2537, การอบแห้งเมล็ดพืช, คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี, หน้า 79-126
3. Choi, Y. and Okos, M.R., 1986, "Effect of Temperature and Composition on the Thermal Properties of Foods", **Food Engineering and Process Applications**, Elsevier, New York, Vol. 1, pp. 93-101.
4. Myers, E.M., 1971, Analytical Methods in Conduction *Heat* Transfer, McGraw-Hill, New York, pp. 126-127.
5. Heldman, D.R. and Lund, D.B., 1992, Handbook **of Food Engineering**, Marcel Dekker, New York, pp. 180-181
6. Jenson, V.G. and Jeffereys, G.V., 1977, Mathematical Methods in **Chemical** Engineering, 2nd ed., Academic Press, New York, pp. 401-405
7. Kitic, D. and Viollaz, P.E. 1984. "Comparison of Drying Kinetics of Soybeans in Thin Layer and Fluidized Beds", *J. Food Technol.*, 19, pp. 399-408.
8. Volkert, M.A. and Klein, B.P., 1979, "Protein Dispersibility and Emulsion Characteristics of Flour Soy Products", *Journal of Food Science*, Vol. 44, NO. 1, pp. 93-96.
9. Suarez, C., Viollaz, P.E. and Chirife, J. 1980. "Kinetics of Soybean Drying", *Journal of Drying Technology*, 2, pp. 227-232.