นิพนธ์ต้นฉบับ

การศึกษาหาพารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์การอบแห้งขิง

The Study of Parameters for the Analysis of Ginger Drying

คำสำคัญ : การอบแห้งขิง, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, พารามิเตอร์

Key word : Ginger drying, Mathematical model, Parameter

มารีนา มะหนิ* อภิญญา เอกพงษ์ และ ธนรัฐ ศรีวีระกุล*****

* วท.ม (เทคโนโลยีพลังงาน) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ

** วท.ม. (เทคโนโลยีอาหาร) โครงการจัดตั้งภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

*** M.Eng. (Mechanical) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

Marina Mani* Apinya Akepong and Thanarat Sriveerakul*****

* **M.Sc. (Energy Tech.), Asst. Prof., Department of Physies, Faculty of Science, Thaksin University, Songkhla, 90000**

** **M.Sc. (Food Tech.), Lecture, Project to Establish the Department of Agro-Industry, Faculty of Agricultural, Ubonratchathani University, Ubonratchathani, 34190**

*** **M.Eng. (Mechanical), Lecture, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubonratchathani University, Ubonratchathani, 34190**

Abstract

The objective of this study are to determine experimentally some properties of ginger. Such as equilibrium moisture content, moisture diffusion coefficient, density and specific heat. These parameters are useful and necessary for drying analysis. The equation describing these parameters were found out by curve fitting using least square technique. The equilibrium moisture content was determined by static method using saturated salt solution. It was founded equilibrium moisture content decreased with the temperature for relative humidity rang from 0 - 30 percent, but increased with the temperature for relative humidity higher than 40 percent. The equation of Oswin, 1946 was found to be accurate to describe the experimental results. The results of the drying of ginger showed that moisture diffusion coefficient increased exponentially with drying temperature at air velocity 1.3 m/s. The temperature rang from 55 - 60 °C was suitable for drying ginger to good quality. For other parameters such as density and specific heat, it was found that density increased linearly and specific heat decreased curved with moisture content in dry basis.

Thaksin. J., Vol.6 (1) January - June 2003

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการทดลอง และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของความชื้นสมดุล สัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนจำเพาะและความหนาแน่นซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งขิงเพื่อหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสม

จากการวิเคราะห์หาค่าความชื้นสมดุลของขิง โดยใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวเป็นตัวควบคุมความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 10 - 90 % อุณหภูมิในช่วง 50 - 72 °C แล้วนำผลค่าความชื้นสมดุลมาวิเคราะห์กับรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของเส้นความชื้นสมดุลไอโซเทอมในรูปแบบสมการต่างๆ ปรากฏว่ารูปแบบสมการที่ให้ความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับการทดลองมากที่สุด คือรูปแบบสมการของ Oswin , 1946 [20] ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ของความชื้นสมดุล คือในช่วงความชื้นสัมพัทธ์น้อยกว่า 30 % เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความชื้นสมดุลจะมีค่าลดลง แต่ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์อากาศมากกว่า 40 % เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความชื้นสมดุลจะมีค่าเพิ่มขึ้น จากการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของขิงในช่วงอุณหภูมิ 45 - 72 °C ที่ความเร็วลม 1.3 m/s แล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์หารูปแบบสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น จะได้ความสัมพันธ์ในลักษณะเอ็กซ์โปเนนเชียล คือเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิที่เหมาะสม ในการอบแห้งควรอยู่ในช่วง 55 - 60 °C สำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะกับความชื้น (มาตรฐานแห้ง) ของขิงจะได้ความสัมพันธ์ในลักษณะเส้นโค้ง โดยที่ค่าความร้อนจำเพาะจะมีค่าลดลง เมื่อความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับความชื้น (มาตรฐานแห้ง) ของขิงจะได้ความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้น โดยที่ค่าความหนาแน่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้น

บทนำ

ขิงเป็นผลผลิตทางการเกษตรชนิดหนึ่งของประเทศ ในบางปีจะมีการผลิตมากเกินความต้องการ ทำให้ขิงสดมีราคาถูก กสิกรอาจเก็บไว้ในรูปขิงแห้ง เมื่อราคาสูงก็นำออกมาจำหน่ายก็อาจเป็นได้ ปัจจุบันในวงการอุตสาหกรรมขิงแห้งหรือขิงผง กำลังเพิ่มความต้องการของตลาด ซึ่งขิงแห้งหรือขิงผงนี้ จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมายในทางอุตสาหกรรมการทำเครื่องสำอาง อุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร และในทางเภสัชกรรมก็ยังนำไปใช้ทำสมุนไพรได้อีกด้วย ดังนั้นกระบวนการอบแห้งขิง เป็นกระบวนการแปรรูปที่สำคัญ การศึกษาหาพารามิเตอร์ที่ใช้ในการอบแห้ง เป็นข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นในการอบแห้ง ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์ของโครงการนี้

ทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง

ทักษิณา ลอยจิรากุล [3] ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ เช่น อุณหภูมิ และความเร็วลม ที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งของพุทรา ละมุด องุ่น และมะยม โดยใช้อุณหภูมิในการอบแห้งในช่วง 55-72 °C ความเร็วลม 0.6 และ 1.2 m/s พบว่าอัตราการอบแห้งของผลิตภัณฑ์เกษตรที่ศึกษาทั้งหมด อยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งที่ลดลง อัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ถ้าอุณหภูมิเพิ่มสูงเกินไปจะทำให้เกิดปัญหาการเสื่อมคุณภาพของผลิตภัณฑ์เกษตร ความเร็วลมจะมีอิทธิพลเล็กน้อยต่ออัตราการอบแห้งของพุทรา แต่จะมีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งของละมุดและองุ่น

มารีนา นุ้ยหมีม [4] ได้ศึกษาหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมของสับปะรดแช่อิ่ม โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบถาดอยู่กับที่ พบว่าเมื่ออัตราการไหลจำเพาะของอากาศลดลง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งสับปะรดแช่อิ่มจะลดลงด้วย และเมื่ออัตราส่วนเวียนกลับของอากาศที่ใช้อบแห้งแล้วเพิ่มขึ้น จะทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงเช่นกัน ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งก็จะทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงาน

จำเพาะลดลงเช่นกัน การเพิ่มของอุณหภูมินั้นจะทำให้สีของสับปะรดแช่อิ่มเข้มขึ้น ซึ่งเมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึงประมาณ 65 °C สีและคุณภาพยังดีอยู่

ศิวะ อัจฉริยวิริยะ และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์ [5] ได้ทำการศึกษาหาพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์การอบแห้งมะละกอชิ่ม โดยมีความชื้นเริ่มต้นของมะละกอแช่อิ่มก่อนอบแห้งประมาณ 50 % db. จากการทดลองหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของมะละกอแช่อิ่มที่อุณหภูมิ 40 - 80 °C พบว่าไม่ปรากฏช่วงอัตราการอบแห้งคงที่คงมีเฉพาะช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะเพิ่มขึ้น ลักษณะเอ็กซ์โปเนนเชียล เมื่ออุณหภูมิของการอบแห้งเพิ่มขึ้น และจากการทดลองที่ความเร็วลมระหว่าง 0.7 - 1.3 m/s พบว่าความเร็วลมร้อนไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การแพร่ จากการทดลองหาความชื้นสมดุลโดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 35 - 65 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 10 - 90 % พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความชื้นสมดุลจะต่ำลงในช่วงความชื้นสัมพัทธ์อากาศ 0 - 25 % แต่สูงขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์อากาศมากกว่า 45 % จากผลการทดลองหาความหนาแน่นของมะละกอแช่อิ่ม พบว่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นมะละกอแช่อิ่มเพิ่มขึ้นโดยเพิ่มขึ้นลักษณะเชิงเส้น และจากการทดลองหาความร้อนจำเพาะ พบว่าความร้อนจำเพาะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความชื้นของมะละกอแช่อิ่มเพิ่มขึ้น แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมานี้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ได้ทุกๆ ค่าของอุณหภูมิลมร้อนระหว่าง 45 - 80 °C หาความชื้นสมดุลตลอดช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10 - 90 % กับช่วงอุณหภูมิ 35 - 65 °C และความร้อนจำเพาะ กับความหนาแน่น สามารถหาได้ทุกๆ ค่าความชื้นของมะละกอแช่อิ่ม

วิธีการทดลอง

การทดลองหาความชื้นสมดุลขิง

นำตัวอย่างมาหั่นให้มีขนาดเล็กประมาณ 5 x 5 x 0.5 mm^3 แบ่งเป็น 10 ส่วนๆ ละ 50 กรัม นำแต่ละส่วนมาใส่ในตะแกรงที่แขวนไว้ในขวดโหลอัด ซึ่งบรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัวของลิเธียมคลอไรด์ (LiC1), แมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgC1.\ 6H_2O$), แมกนีเซียมไนเตรท ($Mg(NO_3)_2.6H_2O$), โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และโปตัสเซียมไนเตรท (KNO_3) อย่างละ 2 ขวด ในปริมาณขวดละ 300 cm^3 หลังจากนั้นนำขวดทั้งหมดใส่ไว้ในตู้อบที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 5 วัน นำตะแกรงพร้อมตัวอย่างแต่ละขวดออกมาชั่งแล้วจึงเก็บไว้ในสภาพเดิม ทำเช่นนี้ทุกวัน จนกว่าน้ำหนักที่ชั่งได้ไม่เปลี่ยนแปลง หลังจากนั้นนำตัวอย่างของแต่ละตะแกรงไปหาน้ำหนักแห้งเพื่อคำนวณหาความชื้นสมดุล ทำการทดลองในทำนองเดียวกัน แต่เปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้อบเป็น 57, 65 และ 72 °C

การทดลองหาความหนาแน่นของขิง

นำขิงที่เตรียมไว้มาใส่ตู้อบที่อุณหภูมิ 60 °C เพื่อลดความชื้นให้มีค่าประมาณ 10, 20, 30, 40, 50 และ 70 % db. นำขิงที่ที่มีความชื้นประมาณ 10 % db. มาตัดให้เป็นทรงสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 30 x 25 x 15 mm^3 แล้วใช้เวอร์เนียร์วัดขนาดพร้อมทั้งชั่งน้ำหนักขิงแต่ละชิ้นเพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่น ทำการทดลองในทำนองเดียวกันแต่เปลี่ยนค่าความชื้นของขิงเป็น และทำการทดลองซ้ำประมาณ 5 ครั้ง

การทดลองหาสัมประสิทธิ์การแพร่

นำตัวอย่างขิงมาตัดให้เป็นรูปทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 14 mm ยาวประมาณ 15 mm จำนวน 10 ชิ้น นำไปวางบนตะแกรงเพื่อนำไปอบในอุปกรณ์ทดสอบอัตราการอบแห้ง ปรับความเร็วลม 1.3 m/s และอุณหภูมิในการอบประมาณ 45 °C ทำการวัดน้ำหนักของตะแกรงพร้อมตัวอย่าง ทุกๆ 15 นาที ใน 1 ชั่วโมงแรก ทุก 30 นาที ใน 2 ชั่วโมงถัดมา และทุกๆ 1 ชั่วโมง ในช่วงเวลาต่อมา ในการทดลองจะต้องสังเกตลักษณะและทำการวัดสีด้วย R.H.S. Colour Chart พร้อมทั้งวัดอุณหภูมิลมร้อน อุณหภูมิอากาศแวดล้อม และ

อุณหภูมิกระเปาะเปียก ทุกๆ 1 ชั่วโมง ทำการทดลองจนกระทั่งตัวอย่างมีความชื้นประมาณ 20 % db. แล้วจึงนำตัวอย่างไปหาน้ำหนักแห้ง ทำการทดลองในทำนองเดียวกัน แต่เปลี่ยนค่าอุณหภูมิเป็น 50, 55, 60, 70 และ 75 °C

การทดลองหาค่าความร้อนจำเพาะ

นำขิงมาหั่นให้มีขนาดเล็กที่สุด ใส่ตู้อบที่อุณหภูมิ 60 °C เพื่อลดความชื้นของขิง ให้มีค่าประมาณ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 % db. นำขิงที่มีค่าความชื้นประมาณ 10 % db. มาแบ่งเป็น 2 ส่วน คือส่วนแรกประมาณ 30 กรัม นำไปหาค่าความชื้นที่แน่นอนของขิง และส่วนที่สองประมาณ 70 กรัม นำไปหาค่าความร้อนจำเพาะโดยใช้แคลอรีมิเตอร์ ต่อไปทำการทดลองเดียวกันแต่เปลี่ยนความชื้นของขิง และทำการทดลองซ้ำประมาณ 5 ครั้ง

หลังจากทำการทดลองที่กล่าวมาแล้วนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ และสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ของความชื้นสมดุล สัมประสิทธิ์การแพร่ ความหนาแน่น และความร้อนจำเพาะของขิง โดยการวิเคราะห์สมการถดถอย

ผลการทดลองและวิจารณ์

ความชื้นสมดุล

จากการทดลองหาความชื้นสมดุลด้วยวิธีการคายความชื้น โดยเปรียบเทียบค่าความชื้นสมดุลที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากแบบจำลองความชื้นสมดุลไอโซเทอม จะได้ว่าแบบจำลองความชื้นสมดุลไอโซเทอมของขิงที่ดีที่สุดคือรูปแบบสมการของ Oswin, 1946 [20] ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$M_{eq} = A\left[\frac{RH}{1-RH}\right]^{n} \qquad (1)$$

ซึ่งค่า A และ n มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ได้สมการดังนี้

$$A = 2.3539T^{0.4411}$$

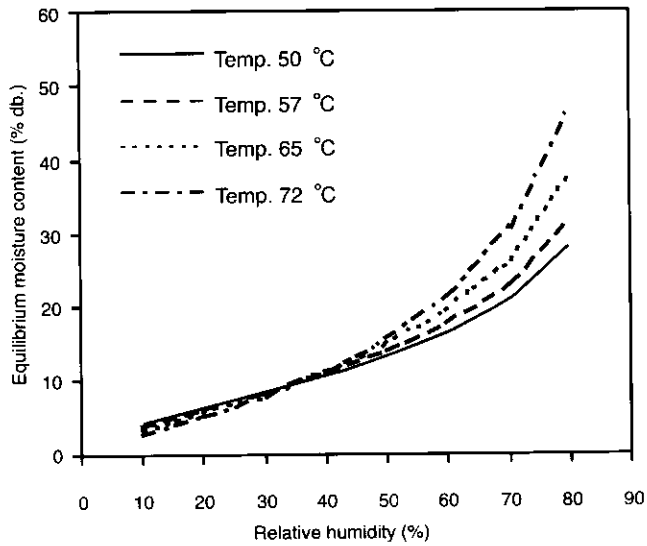
$$n = 0.0004T^{2} - 0.0374T + 1.4185$$

โดยมีค่า Coefficient of determination (r^2) ระหว่าง A กับ T และ n กับ T เท่ากับ 0.74 และ 0.98 ตามลำดับ

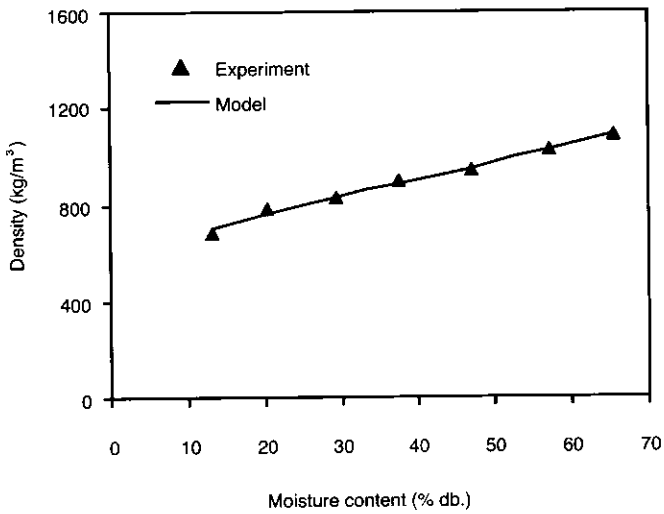
เมื่อ M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล , % db.
RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ , ทศนิยม
T คือ อุณหภูมิ , °C

จากสมการที่ (1) เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิต่างๆ ดังรูปที่ 1 จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความชื้นสมดุลจะต่ำลงในช่วงความชื้นสัมพัทธ์อากาศ 10-30 % แต่ความชื้นสมดุลจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์อากาศมากกว่า 40 % ซึ่งเป็นผลมาจากในช่วงแรกที่มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความดันไอของขิงจะมีค่าสูงขึ้นทำให้ความชื้นสมดุลมีค่าต่ำ ส่วนในช่วงหลังการที่ความชื้นสมดุลมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้น เพราะน้ำที่อยู่ในขิงมีคุณสมบัติในการดึงไอน้ำในอากาศได้สูงขึ้น เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้น [2] และแสดงว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อิทธิพลของความดันไอมีค่าน้อยว่าอิทธิพลของน้ำในขิง จึงทำให้ความชื้นสมดุลมีค่าสูงขึ้น ซึ่งแตกต่างจากกรณีความชื้นสมดุลของเมล็ดพืช คือลักษณะของเส้นความชื้นสมดุลไอโซเทอมของเมล็ดพืชเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความชื้นสมดุลจะต่ำลงตลอดช่วงของความชื้นสัมพัทธ์

Thaksin. J., Vol.6 (1) January - June 2003



รูปที่ 1 แสดงลักษณะเส้นความชื้นสมดุลไอโซเทอมของขิงด้วยรูปสมการของ Oswin , 1946 [20]



รูปที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและแบบจำลองความหนาแน่นของขิงที่ความชื้นต่าง ๆ

ความหนาแน่น

จากการทดลองหาความหนาแน่นของขิงในช่วงความชื้น 10 - 70 % db. และนำผลการทดลองมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับความหนาแน่นของขิง ดังรูปที่ 2

เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นความหนาแน่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้น ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\rho = 609.638 + 7.387M \qquad (2)$$

ซึ่งมีค่า Coefficient of determination (r^2) เท่ากับ 0.98

เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของขิง, kg/m^3
M คือความชื้นของขิง, % db.

ความร้อนจำเพาะ

จากการทดลองหาความร้อนจำเพาะของขิงในช่วงความชื้น 10 - 70 %db. และนำผลการทดลองมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับความร้อนจำเพาะของขิง ดังรูปที่ 3 จะได้ความสัมพันธ์คือ

เมื่อความชื้นมีค่ามากขึ้นความร้อนจำเพาะจะมีค่าลดลงในลักษณะเส้นโค้ง ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

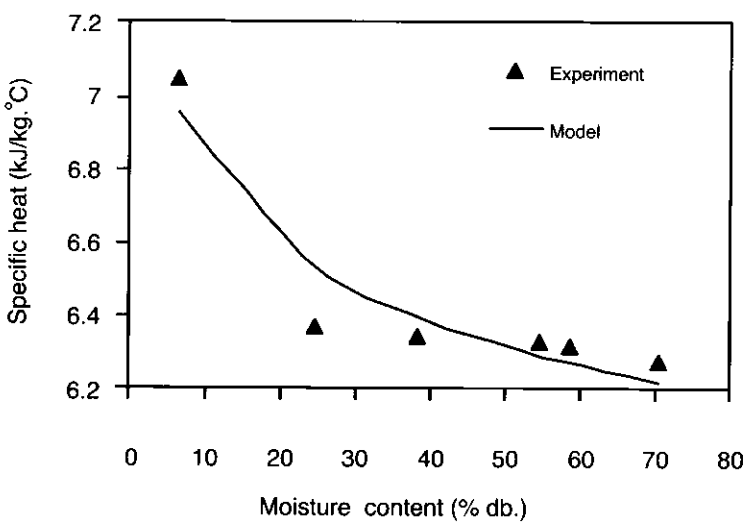
$$C_s = 7.5967M^{-0.0472} \qquad (3)$$

โดยมีค่า Coefficient of determination (r^2) เท่ากับ 0.89

เมื่อ C_s คือความร้อนจำเพาะของขิง , kJ/kg-°C
M คือความชื้นของขิง , % db.

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

จากการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของขิงที่อุณหภูมิ 45 - 75 °C และความเร็วลมร้อนเฉลี่ย 1.3 m/s ซึ่งใช้สมการมีรูปแบบดังนี้ [18]



รูปที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและแบบจำลองความร้อนจำเพาะของขิงที่ความชื้นต่าง ๆ

Thaksin. J., Vol.6 (1) January - June 2003

$$MR(t) = \frac{32}{\pi^2}\left[\exp\left(\frac{-\pi^2 Dt}{L^2}\right)+\frac{1}{9}\exp\left(\frac{-9\pi^2 Dt}{L^2}\right)+\frac{1}{25}\exp\left(\frac{-25\pi^2 Dt}{L^2}\right)+\frac{1}{49}\exp\left(\frac{-49\pi^2 Dt}{L^2}\right)+\frac{1}{81}\exp\left(\frac{-81\pi^2 Dt}{L^2}\right)\right]\times \left[\frac{1}{(\lambda_1 r_0)^2}\exp\left\{-(\lambda_1 r_0)^2\left(\frac{Dt}{r_0^2}\right)\right\}+\frac{1}{(\lambda_2 r_0)^2}\exp\left\{-(\lambda_2 r_0)^2\left(\frac{Dt}{r_0^2}\right)\right\}+\frac{1}{(\lambda_3 r_0)^2}\exp\left\{-(\lambda_3 r_0)^2\left(\frac{Dt}{r_0^2}\right)\right\}+\frac{1}{(\lambda_4 r_0)^2}\exp\left\{-(\lambda_4 r_0)^2\left(\frac{Dt}{r_0^2}\right)\right\}+\frac{1}{(\lambda_5 r_0)^2}\exp\left\{-(\lambda_5 r_0)^2\left(\frac{Dt}{r_0^2}\right)\right\}\right] \quad (4)$$

เมื่อ MR คืออัตราส่วนความชื้น
D คือสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น, m^2/h
L คือความหนาของวัสดุ, m
t คือเวลา, h
r คือรัศมีของทรงกระบอก , m
$J_0(\lambda_{n0} r)$ คือฟังก์ชั่นของ Bessel อันดับที่ศูนย์
$J_1(\lambda_{n0} r)$ คือฟังก์ชั่นของ Bessel อันดับที่หนึ่ง
$\lambda_{n0} r$ คือค่าที่สอดคล้องกับ $J_0(\lambda_{n0} r) = 0$ และมีค่าดังนี้ (ตัวอย่าง 5 ค่าแรก)
$\lambda_{10} r = 2.4048$, $\lambda_{20} r = 5.5201$, $\lambda_{30} r = 8.6537$
$\lambda_{40} r = 11.7915$, $\lambda_{50} r = 14.9309$

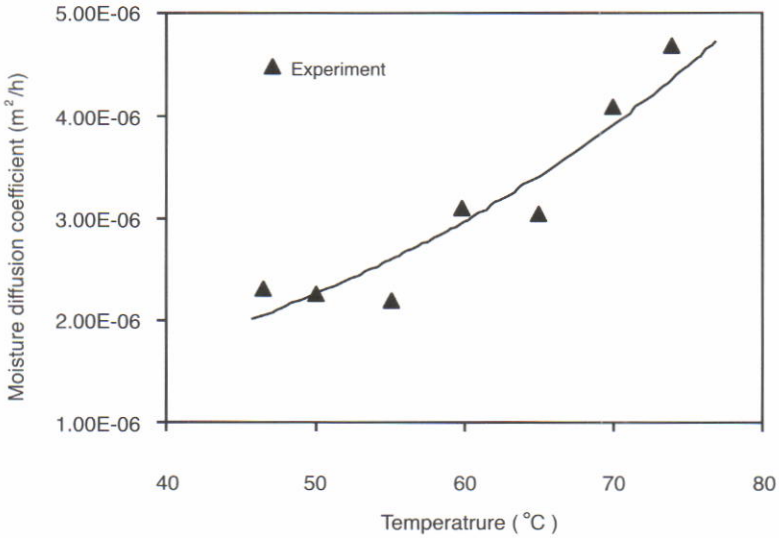
จากสมการที่ (4) ได้วิเคราะห์สมการถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นกับอุณหภูมิลมร้อนได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$D = 6 \times 10^{-7} \exp(0.0281T) \quad (5)$$

โดยมีค่า Coefficient of determination (r^2) เท่ากับ 0.91

เมื่อ T คืออุณหภูมิลมร้อน, °C

เมื่อนำผลจากการทดลองกับผลจากการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (สมการที่ 5) มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นกับอุณหภูมิลมร้อนได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4 ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นจะมีค่าสูงขึ้นในลักษณะของเอ็กซ์โปเนนเชียล ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ความดันไอภายในและภายนอกชิ้นวัสดุแตกต่างกันมากขึ้นทำให้น้ำเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนได้มากขึ้น



รูปที่ 4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นที่อุณหภูมิต่างๆ จากผลการทดลองที่ความเร็วลม 1.3 m/s และจากสมการแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของขิง

สรุป

ในการหาความชื้นสมดุลของขิงรูปแบบสมการเส้นความชื้นสมดุลไอโซเทอมของ Oswin (1946) สามารถอธิบายข้อมูลการทดลองได้ดีที่สุด ซึ่งสามารถหาความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิระหว่าง 45 - 72 °C และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 10 - 80 % ส่วนสมการที่สร้างขึ้นสำหรับหาค่าความหนาแน่นและความร้อนจำเพาะของขิงสามารถใช้ได้ทุกๆ ค่าความชื้นของขิงและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะมีค่าสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิของลมร้อนมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะเพิ่มขึ้นในลักษณะเอ็กซ์โปเนนเชียล ส่วนอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบแห้งขิงนั้นคือ 55 - 60 °C เพราะใช้เวลาไม่นานเกินไปให้สีใกล้เคียงกับขิงสดมากที่สุด

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมวิชาการเกษตร. 2525. ขิง. กองแผนงาน กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ. 41.

[2] ณรงค์ นิยมวิทย์ และอัญชนีย์ อุทัยพัฒนาชีพ. 2528. วิทยาศาสตร์การประกอบอาหาร . มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพ, 441 หน้า.

[3] ทักษิณา ลอยจิรากุล. 2526. ลักษณะสมบัติของการอบแห้งของผลิตภัณฑ์เกษตรบางชนิดในประเทศไทย . วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

[4] มารีนา นุ้ยหมีม. 2534. แนวทางการอบแห้งสับปะรดแช่อิ่มที่เหมาะสมที่สุด . วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.

[5] ศิวะ อัจฉริยวิริยะและสมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2531. การศึกษาหาพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับวิเคราะห์การอบแห้งมะละกอแช่อิ่ม . เอกสารเสนอในที่ประชุมสัมมนาทางวิชาการเรื่อง อุปกรณ์และเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสม, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่, 6 - 7 ตุลาคม 2531.

[6] สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2540. **การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหาร.** สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.

[7] สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และวิไลพร นพรัตน์ไกรลาศ. 2530. **อุปกรณ์ศึกษาอัตราการอบแห้งเมล็ดพืช และผลการทดสอบข้าวเปลือก,** เอกสารเสนอในที่ประชุมสัมมนาทางวิชาการเรื่องเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสม, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่. 28 - 30 ตุลาคม 2530. 16 หน้า.

[8] อารีย์ เทียนไชย. 2532. **การศึกษาหาพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์การอบแห้งสับปะรดแช่อิ่ม.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

[9] Aden , B. Meinel and Marjorie P. Meinel. 1977. **Applied Solar Energy an Introduction** . Addison-Wesley Publishing company, Inc.

[10] Brunaruers, S. , P.H. Emmett and E. Teller. 1938. **Adsorption of Gases in Multimolecular Layers.** J. Amer. Chem. Soc. , 6 : 309 - 1319

[11] Christopher G.J. Baker. 1997. **Industrial Drying of Foods.** Blackie Academic & Profressional , UK.

[12] Chung , D.S. and H.B. Pfost. 1967. **Adsorption and Desorption of Water Vapor by Cereal Grain and their Products,** Tran. ASAE 10 : 549 - 557.

[13] Crank , J., 1975. **The Mathematics of Diffusion, 2d ed.** Claredon Press, Oxfor, 414 p.

[14] Garcia , R., Leal, F. and Rolz, C., 1988. **"Drying of Bananas using Microwave and Air Ovens".** International Journal of food Science Science and Technology, 23 (6), 73-80.

[15] Halsey , G, 1948. **Physical Adsorption on Non - Uniform Surfaces,** J. Chem, Phy. , 16 : 83 - 92.

[16] Henderson, S.M., 1952. **A Basic Concept of Equilibrium.** Agr. Eng. 33 : 29-31.

[17] Henderson, S.M., 1974. **Agricultural Process Engineering,** 3d ed., pr. Wesport, Connecticut, 441 p.

[18] Iglesias, H.A. and J. Chirife, 1928. **Handbook of Food Isotherms : Water Sorption Parameters For Food and Food Component.** Academic Press, Inc., New York. 347 p.

[19] Iglesias, H.A, 1978. **An Empirical Equation for Fitting Water Sorption Isotherms of Fruits and Related Products,** Can. Inst. Food Sci. Technol. , J. 11 : 83 - 92.

[20] Oswin, C.R., 1946. **The Kinetics of Package Life III.** The Isotherm. J. Chem. Ind. (London) 64 : 419 - 421.

[21] Taylor, A.A. , 1961. **Determination of Moisture Equilibrium Dehydrated Foods.** Food Technol., 15 :536.