

## นิพนธ์ต้นฉบับ

# การศึกษาหารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์การอบแห้งขิง The Study of Parameters for the Analysis of Ginger Drying

คำสำคัญ : การอบแห้งขิง, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, พารามิเตอร์

**Key word :** Ginger drying, Mathematical model, Parameter

มารีนา มะหนี่\* 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 Physics,

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.

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการทดลอง และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของความชื้นสมดุล สัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนจำเพาะและความหนาแน่นขึ้นค่าพารามิเตอร์เหล่านี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งขิงเพื่อหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสม

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

### บทนำ

ขิงเป็นผลผลิตทางการเกษตรชนิดหนึ่งของประเทศไทย ในบางปีจะมีการผลิตมากเกินความต้องการ ทำให้ขิงสมควรค่าถูก กสิกรอาจเก็บไว้ในรูปขิงแห้ง เมื่อราคาน้ำดื่มน้ำอ่อนน้ำเย็นก็อาจเป็นได้ ปัจจุบันในวงการอุตสาหกรรมขิงแห้งหรือขิงผง กำลังเพิ่มความต้องการของตลาด ซึ่งขิงแห้งหรือขิงผงนี้ จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากน้อยในทางอุตสาหกรรมการทำเครื่องสำอาง อุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร และในทางเภสัชกรรม ก็ยังนำไปใช้ทำสมุนไพรได้อีกด้วย ดังนั้นกระบวนการอบแห้งจึง เป็นกระบวนการแปรรูปที่สำคัญ การศึกษาหารามิเตอร์ที่ใช้ในการอบแห้ง เป็นข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นในการอบแห้ง ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์ของโครงการนี้

### บททวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง

ทักษิณ ลอยจิราฤต [ 3 ] ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ เช่น อุณหภูมิ และความเร็วลม ที่มีผลต่อ

อัตราการอบแห้งของพุทรา ละมุด อยุ่น และมะยม โดยใช้อุณหภูมิในการอบแห้งในช่วง 55-72 °C ความเร็วลม 0.6 และ 1.2 m/s พบร่วมอัตราการอบแห้งของผลิตภัณฑ์เกย์ตรที่ศึกษาทั้งหมด อยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งที่ลดลง อัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นตามที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ถ้าอุณหภูมิเพิ่มสูงเกินไปจะทำให้เกิดปัญหาการเสื่อมคุณภาพของผลิตภัณฑ์เกย์ตร ความเร็วลมจะมีอิทธิพลเล็กน้อยต่ออัตราการอบแห้งของพุตรา แต่จะมีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งของละมุดและอยุ่น

นารีนา นุ้ยหมี [ 4 ] ได้ศึกษาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมของสับปะรดแห้ง โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบตาอยู่กับที่ พบร่วมเมื่ออัตราการไอลำเพาะของยากาสลดลง ความสันเปลือกพลังงานจำเพาะในการอบแห้งสับปะรดจะอ่อนจะลดลงด้วย และเมื่ออัตราส่วนเวียนกลับของยากาสที่ใช้อบแห้งแล้วเพิ่มขึ้น จะทำให้ความสันเปลือกพลังงานจำเพาะลดลงเช่นกัน ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งก็จะทำให้ความสันเปลือกพลังงาน

จำเพาะลดลงเท่านั้น การเพิ่มของอุณหภูมินั้นจะทำให้สีของสันประดับแข็งเข้มขึ้น ซึ่งเมื่อเพิ่มอุณหภูมิดึงประมาณ  $65^{\circ}\text{C}$  สีและคุณภาพยังดีอยู่

ศิริ อัจฉริยวิริยะ และสมชาย ไสกอรณฤทธิ์ [5] ได้ทำการศึกษาพาณิชย์ที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์การอบแห้งมะละกอชิ้น โดยมีความชื้นเริ่มต้นของมะละกอแข็งอ่อนก่อนอบแห้งประมาณ 50 % db. จากการทดลองหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของมะละกอแข็งอ่อนที่อุณหภูมิ  $40 - 80^{\circ}\text{C}$  พบว่าไม่ปรากฏช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ทั้งมีเฉพาะช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะเพิ่มขึ้น ลักษณะเด็กซีปเปนเนเชียล เมื่ออุณหภูมิของการอบแห้งเพิ่มขึ้น และจาก การทดลองที่ความเร็วลมระหว่าง  $0.7 - 1.3\text{ m/s}$  พบว่า ความเร็วลมร้อนไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การแพร่ จากการทดลองหาความชื้นสมดุลโดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ  $35 - 65^{\circ}\text{C}$  และความชื้นสัมพัทธิ์ 10 - 90 % พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความชื้นสมดุลจะต่ำลงในช่วงความชื้นสัมพัทธิ์อากาศ  $0 - 25\%$  แต่สูงขึ้น เมื่อความชื้นสัมพัทธิ์อากาศมากกว่า  $45\%$  จากผลการทดลองหาความหนาแน่นของมะละกอแข็งอ่อน พบว่า ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นมะละกอแข็งอ่อนเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้nlักษณะเชิงเส้น และจากการทดลองหาความร้อนจำเพาะ พบว่าความร้อนจำเพาะมีค่าสูงขึ้นเมื่อ ความชื้นของมะละกอแข็งเพิ่มขึ้น แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมาได้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ได้ทุกๆ ค่า ของอุณหภูมิลมร้อนระหว่าง  $45 - 80^{\circ}\text{C}$  หากความชื้น สมดุลลดลงช่วงความชื้นสัมพัทธิ์ 10 - 90 % กับช่วง อุณหภูมิ  $35 - 65^{\circ}\text{C}$  และความร้อนจำเพาะ กับความหนาแน่น สามารถหาได้ทุกๆ ค่าความชื้นของมะละกอแข็งอ่อน

### วิธีการทดลอง การทดลองหาความชื้นสมดุลชิง นำตัวอย่างมาหันให้มีขนาดเล็กประมาณ $5 \times 5 \times 0.5\text{ mm}^3$ แบ่งเป็น 10 ส่วนๆ ละ 50 กรัม นำ

แต่ละส่วนมาใส่ในตะแกรงที่แขวนไว้ในวดโอลอัด ซึ่ง บรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัวของลิเธียมคลอไรด์ ( $\text{LiCl}$ ), แมกนีเซียมคลอไรด์ ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), แมกนีเซียม-ไนเตรท ( $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), โซเดียมคลอไรด์ ( $\text{NaCl}$ ) และไฮเดรตสัมเมียมไนเตรท ( $\text{KNO}_3$ ) อย่างละ 2 ชุด ในปริมาณมวล  $300\text{ cm}^3$  หลังจากนั้นนำวดทึบหมัดใส่ไว้ในตู้อบที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 5 วัน นำตะแกรงพร้อมตัวอย่างแต่ละชุดออกมาซึ่งแล้วจะเจ็บเป็นสากพ dein ทำซ้ำนี้ทุกวัน จนกว่าหนักที่ซึ่งได้ไม่เปลี่ยนแปลง หลังจากนั้นนำตัวอย่างของแต่ละตะแกรงไปบนหนักแห้งเพื่อคำนวณหาความชื้นสมดุล ทำการทดลองในทันเดียวกัน แต่เปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้อบเป็น  $57, 65$  และ  $72^{\circ}\text{C}$

### การทดลองหาความหนาแน่นของชิง

นำชิงที่เตรียมไว้มาใส่ตู้อบที่อุณหภูมิ  $60^{\circ}\text{C}$  เพื่อลดความชื้นให้มีค่าประมาณ 10, 20, 30, 40, 50 และ 70 % db. นำชิงที่มีความชื้นประมาณ 10 % db. มาตัดให้เป็นทรงสี่เหลี่ยมน้ำดี  $30 \times 25 \times 15\text{ mm}^3$  แล้วใช้เวอร์เนียร์วัดขนาดพร้อมทั้งซึ่งน้ำหนักชิงแต่ละชิ้น เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่น ทำการทดลองในทันเดียวกันแต่เปลี่ยนค่าความชื้นของชิงเป็น และทำการทดลองซ้ำประมาณ 5 ครั้ง

### การทดลองหาสัมประสิทธิ์การแพร่

นำตัวอย่างมาตัดให้เป็นรูปทรงกระบอกมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ  $14\text{ mm}$  ยาวประมาณ  $15\text{ mm}$  จำนวน 10 ชิ้น นำไปวางบนตะแกรงเพื่อนำไปอบในอุปกรณ์ทดสอบอัตราการอบแห้ง ปรับความเร็วลม  $1.3\text{ m/s}$  และอุณหภูมิในการอบประมาณ  $45^{\circ}\text{C}$  ทำการวัดน้ำหนักของตะแกรงพร้อมตัวอย่าง ทุกๆ 15 นาที ใน 1 ชั่วโมงแรก ทุก 30 นาที ใน 2 ชั่วโมงถัดมา และทุกๆ 1 ชั่วโมง ในช่วงเวลาต่อมา ในการทดลองจะต้องสังเกตลักษณะและการวัดสีด้วย R.H.S. Colour Chart พร้อมทั้งวัดอุณหภูมิลมร้อน อุณหภูมิอากาศแวดล้อม และ

อุณหภูมิระดับเสียง ทุกๆ 1 ชั่วโมง ทำการทดลอง  
จนกระทั่งตัวอย่างมีความชื้นประมาณ 20 % db. แล้ว  
จึงนำตัวอย่างไปหาหนักแห้ง ทำการทดลองในห้อง  
เดียวกัน 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 และส่วน  
ที่สองประมาณ 70 กรัม นำไปหาค่าความร้อนจำเพาะ  
โดยใช้แคลอรีเมเตอร์ ต่อไปทำการทดลองเดียวกันแต่  
เปลี่ยนความชื้นของขิง และทำการทดลองซ้ำประมาณ  
5 ครั้ง

หลังจากทำการทดลองที่กล่าวมาแล้วนำผลการ  
ทดลองที่ได้มารวบรวม และสร้างสมการทางคณิตศาสตร์  
ของความชื้นสมดุล ลัมพ์พัทธ์การแพร่ ความหนาแน่น  
และความร้อนจำเพาะของขิง โดยการวิเคราะห์สมการ  
โดยถอย

#### ผลการทดลองและวิจารณ์ ความชื้นสมดุล

จากการทดลองหาความชื้นสมดุลด้วยวิธี  
การคายความชื้น โดยเบรเยลเที่ยบค่าความชื้นสมดุลที่ได้  
จากการทดลองกับค่าที่ได้จากแบบจำลองความชื้นสมดุล  
ไฮโซเทอม จะได้ว่าแบบจำลองความชื้นสมดุลไฮโซเทอม  
ของขิงที่ติดต่อกันจะมีรูปแบบสมการของ Oswin, 1946 [20]  
ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

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

ซึ่งค่า A และ n มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ได้สมการ  
ดังนี้

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

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

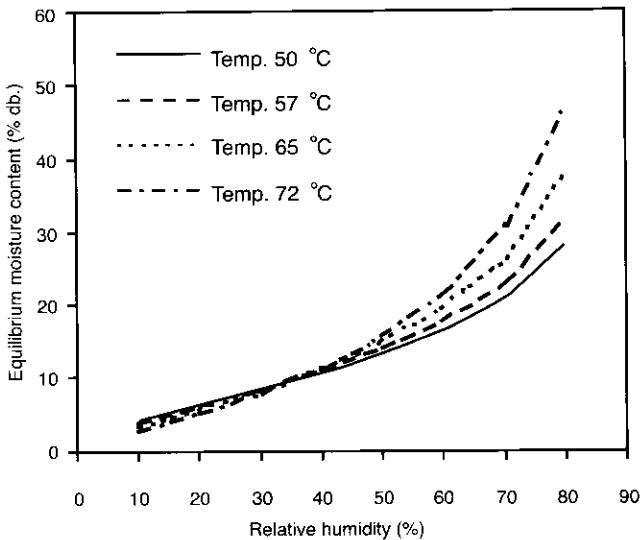
โดยมีค่า Coefficient of determination ( $r^2$ ) ระหว่าง  
A กับ T และ n กับ T เท่ากับ 0.74 และ 0.98  
ตามลำดับ

เมื่อ  $M_{eq}$  คือ ความชื้นสมดุล, % db.

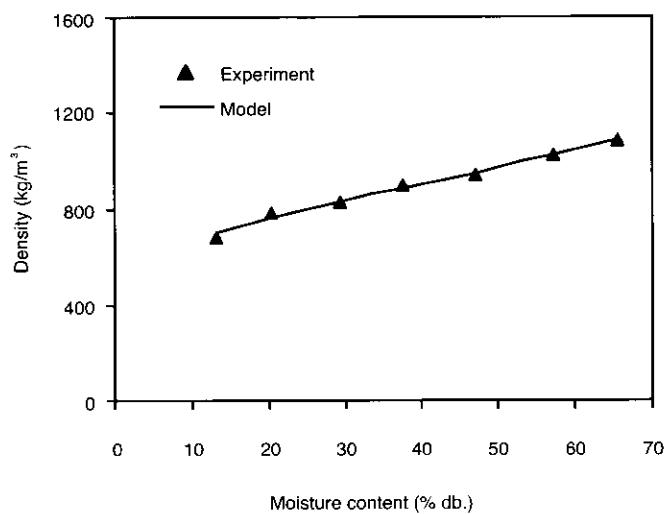
RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ,  
ทศนิยม

T คือ อุณหภูมิ, °C

จากสมการที่ (1) เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์  
ระหว่างความชื้นสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิต่างๆ  
ดังรูปที่ 1 จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความชื้นสมดุลจะ  
ต่ำลงในช่วงความชื้นสัมพัทธ์อากาศ 10-30 % แต่  
ความชื้นสมดุลจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์อากาศ  
มากกว่า 40 % ซึ่งเป็นผลมาจากการที่เมื่อความ  
ชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความดันไอน้ำ  
ของขิงจะมีค่าสูงขึ้นทำให้ความชื้นสมดุลนั้นมีค่าต่ำ ส่วนใน  
ช่วงหลังการที่ความชื้นสมดุลนั้นมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิและ  
ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้น เพราะน้ำที่อยู่ในจิงมี  
คุณสมบัติในการดึงไอน้ำในอากาศได้สูงขึ้น เมื่อความชื้น  
สัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้น [2] และแสดงว่าเมื่ออ  
อุณหภูมิสูงขึ้น อิทธิพลของความดันไอน้ำค่าน้อยกว่า  
อิทธิพลของน้ำในจิง จึงทำให้ความชื้นสมดุลนั้นมีค่าสูงขึ้น  
ซึ่งแตกต่างจากการณ์ความชื้นสมดุลของเมล็ดพืช คือ  
ลักษณะของเส้นความชื้นสมดุลไฮโซเทอมของเมล็ดพืช  
เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความชื้นสมดุลจะต่ำลงตลอดช่วง  
ของความชื้นสัมพัทธ์



รูปที่ 1 แสดงลักษณะเส้นความชื้นสมดุลไออกซ์เทอมของขิงด้วยรูปสมการของ Oswin , 1946 [20]



รูปที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและแบบจำลองความหนาแน่นของขิงที่ความชื้นต่างๆ

ความหนาแน่น  
จากการทดลองหาความหนาแน่นของขิง  
ในช่วงความชื้น 10 - 70 % db. และนำผลการทดลอง

มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับ  
ความหนาแน่นของขิง ดังรูปที่ 2

เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นความหนาแน่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้น ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

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

ซึ่งมีค่า Coefficient of determination ( $r^2$ ) เท่ากับ 0.98

เมื่อ  $\rho$  คือความหนาแน่นของขิง,  $\text{kg}/\text{m}^3$   
 $M$  คือความชื้นของขิง, % db.

#### ความร้อนนำไฟฟ้า

จากการทดลองหาความร้อนนำไฟฟ้าของขิงในช่วงความชื้น 10 - 70 %db. และนำผลการทดลองมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับความร้อนนำไฟฟ้าของขิง ดังรูปที่ 3 จะได้ความสัมพันธ์คือ

เมื่อความชื้นมีค่ามากขึ้นความร้อนนำไฟฟ้าจะมีค่าลดลงในลักษณะเชิงเส้นโดย ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

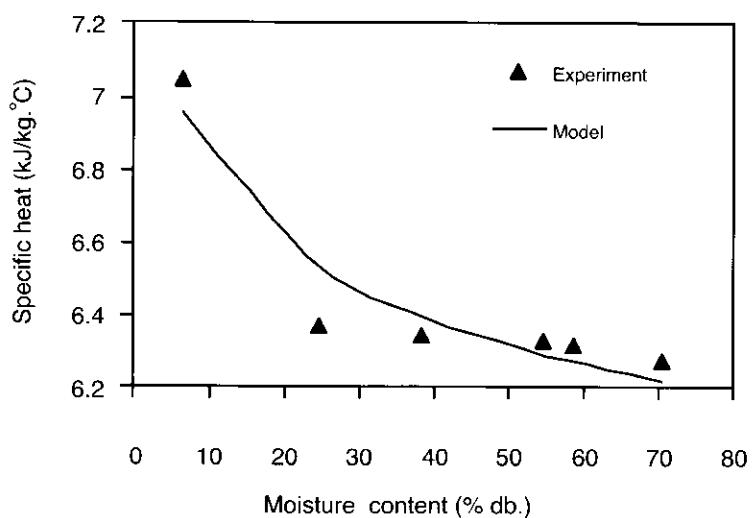
$$C_s = 7.5967M^{-0.0472} \quad (3)$$

โดยมีค่า Coefficient of determination ( $r^2$ ) เท่ากับ 0.89

เมื่อ  $C_s$  คือความร้อนนำไฟฟ้าของขิง ,  
 $\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$   
 $M$  คือความชื้นของขิง , % db.

#### สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

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



รูปที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและแบบจำลองความร้อนนำไฟฟ้าของขิงที่ความชื้นต่างๆ

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

|                      |           |  |
|----------------------|-----------|--|
| เมื่อ                | MR        | คืออัตราส่วนความชื้น   |
| D                    |           | คือสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น, $m^2/h$  |
| L                    |           | คือความหนาของวัสดุ, m  |
| t                    |           | คือเวลา, h   |
| r                    |           | คือรัศมีของทรงกระบอก, m  |
| $J_0(\lambda_n r_0)$ |           | คือฟังก์ชันของ Bessel อันดับที่ศูนย์   |
| $J_1(\lambda_n r_0)$ |           | คือฟังก์ชันของ Bessel อันดับที่หนึ่ง   |
| $\lambda_n r_0$      |           | คือค่าที่สอดคล้องกับ $J_0(\lambda_n r_0) = 0$ และมีค่าดังนี้ (ตัวอย่าง 5 ค่าแรก) |
| $\lambda_1 r_0$      | = 2.4048  | , $\lambda_2 r_0$ = 5.5201 , $\lambda_3 r_0$ = 8.6537                            |
| $\lambda_4 r_0$      | = 11.7915 | , $\lambda_5 r_0$ = 14.9309  |

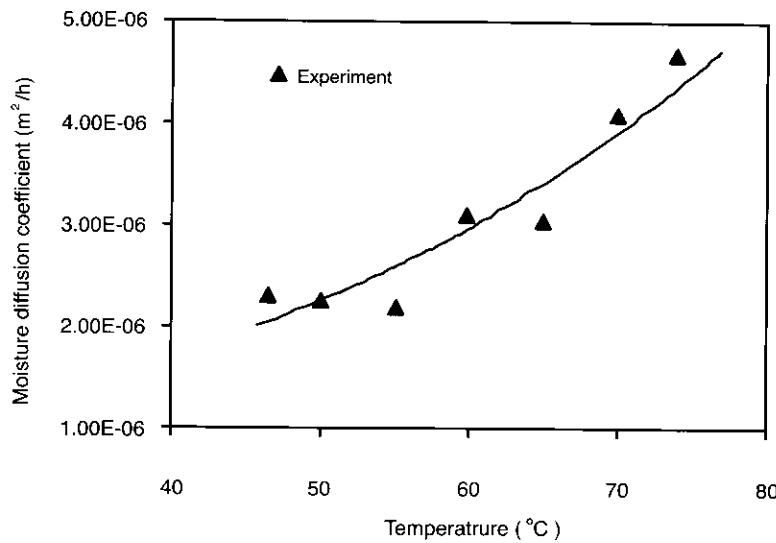
จากสมการที่ (4) ได้วิเคราะห์สมการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นกับอุณหภูมิลมร้อนได้ความสัมพันธ์ดังนี้

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

โดยมีค่า Coefficient of determination ( $r^2$ ) เท่ากับ 0.91

เมื่อ T คืออุณหภูมิลมร้อน,  $^{\circ}\text{C}$   
เมื่อนำผลจากการทดลองกับผลจากการคำนวณ

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (สมการที่ 5) มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น กับอุณหภูมิลมร้อนได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4 ซึ่งพบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นจะมี ค่าสูงขึ้นในลักษณะของเส้นเอ็กซ์เป็นเส้นเชิง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ความดันไอกายใน และภายนอกชั้นวัสดุแตกต่างกันมากขึ้นทำให้น้ำเกลือในผ่านรูพรุนได้มากขึ้น



รูปที่ 4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นที่อุณหภูมิต่างๆ จากผลการทดลองที่ความเร็วลม 1.3 m/s  
และจากสมการแบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของจิง

### สรุป

ในการหาความชื้นสมดุลของขิงรูปแบบสมการเด็นความชื้นสมดุลโดยเทอมของ Oswin (1946) สามารถอธิบายข้อมูลการทดลองได้ดีที่สุด ซึ่งสามารถหาความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิระหว่าง 45 - 72 °C และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 10 - 80 % ส่วนสมการที่สร้างขึ้นสำหรับหาค่าความหนาแน่นและความร้อนทำเพาะของขิงสามารถใช้ได้ทุกๆ ค่าความชื้นของขิง และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะมีค่าสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิของลมร้อนนีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะเพิ่มขึ้นในลักษณะเอียงไป-แนวเชิงลึก ส่วนอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบแห้งขิงนั้น คือ 55 - 60 °C เพราะใช้เวลาไม่นานเกินไปให้สีใกล้เคียงกับขิงสดมากที่สุด

### เอกสารอ้างอิง

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

- [2] ณรงค์ นิยมวิทย์ และอัญชันย์ อุทัยพัฒนาชีพ.  
2528. วิทยาศาสตร์การประกอบอาหาร .  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพ , 441 หน้า.  
[3] ทักษิณ โลจิราภุล. 2526. ลักษณะสมบัติของ  
การอบแห้งของผลิตภัณฑ์เกษตรบางชนิดใน  
ประเทศไทย . วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.  
[4] มารีนา บุญหมื่น. 2534. แนวทางการอบแห้ง  
สับปะรดแห้งอ่อนที่เหมาะสมที่สุด . วิทยานิพนธ์  
ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,  
กรุงเทพฯ.  
[5] ศิริ อัจฉริยวิริยะและสมชาติ ไสกณรงค์.  
2531. การศึกษาหาพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับ  
วิเคราะห์การอบแห้งมะละกอแห้งอ่อน . เอกสาร  
เสนอในที่ประชุมสัมมนาทางวิชาการเรื่อง อุปกรณ์  
และเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสม,  
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่, 6 - 7 ตุลาคม  
2531.

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

- [6] สมชาย ไสภรณ์ฤทธิ์. 2540. การอบแห้ง เมล็ดพืชและอาหาร. สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- [7] สมชาย ไสภรณ์ฤทธิ์ และวีໄලพร นพรัตน์ไกร- คลาศ. 2530. อุปกรณ์ศึกษาอัตราการอบแห้ง เมล็ดพืช และผลการทดสอบข้าวเปลือก, เอกสารเสนอในที่ประชุมสัมมนาทางวิชาการเรื่อง เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสม, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่. 28 - 30 ตุลาคม 2530. 16 หน้า.
- [8] อารีย์ เพียงไชย. 2532. การศึกษาทางพารามิเตอร์ ที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์การอบแห้งสับปะรด แซ่อม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์, 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 & Professional , 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. Clarendon Press, Oxford, 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.