

**ผลของอุณหภูมิและความสุกต่อค่าการนำไฟฟ้า ความชื้น และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของ
กล้วยน้ำว้าระหว่างกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก**

**Effects of Temperature and Degree of Maturity on Electrical Conductivity,
Moisture Content and Total Soluble Solid of Banana (*Musa sapientum* Linn or
“Nam wa”) during Ohmic Heating**

ธารรัตน์ จินดาไทย, วรณภา ชูเสียง และ กอบศักดิ์ กาญจนพงศ์กุล*
Tarat Jindathai, Wannapa Chooseang and Kobsak Kanjanapongkul*

บทคัดย่อ

การให้ความร้อนแบบโอห์มมิกเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถช่วยลดเวลาในการผลิตกล้วยตากซึ่งใช้เวลานานได้ เนื่องจากข้อมูลเกี่ยวกับค่าการนำไฟฟ้าของอาหารมีความจำเป็นต่อการออกแบบระบบการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ผลของอุณหภูมิและความสุกต่อค่าการนำไฟฟ้า ความชื้นและปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของกล้วยน้ำว้าดิบและสุกจึงถูกศึกษา เพื่อให้สามารถใช้ในการออกแบบระบบในการผลิตกล้วยตากด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกที่เหมาะสมต่อไป ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า อัตราการเพิ่มของค่าการนำไฟฟ้าของกล้วยเพิ่มอย่างรวดเร็วในช่วง 40 – 60°C เมื่อวัดความชื้นของกล้วยที่บริเวณต่างๆ พบว่า การให้ความร้อนแบบโอห์มมิกช่วยลดค่าความชื้นของตัวอย่างในช่วงเริ่มต้นด้วยอัตราสูงสุดถึง 3.3 %/°C ในขณะที่ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำในกล้วยสุกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยกล้วยสุกมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้มากกว่ากล้วยดิบประมาณ 10 เท่า จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิและความสุกของกล้วยมีผลต่อสมบัติของกล้วย โดยกล้วยสุกเหมาะที่จะนำมาผลิตกล้วยตากด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก และอุณหภูมิที่คาดว่าจะเหมาะสมต่อการผลิตอยู่ในช่วง 60-65°C

คำสำคัญ: การให้ความร้อนแบบโอห์มมิก กล้วยตาก ค่าการนำไฟฟ้า กล้วยน้ำว้า

ABSTRACT

Ohmic heating is an alternative heating method that may help shorten sun-dried banana production time which is generally long. As information on electrical conductivity of food material is necessary for a design of an ohmic heating system, effects of temperatures and degree of maturity on electrical conductivity, moisture content and total soluble solid of ripe and unripe bananas (*Musa sapientum* Linn or “Nam wa”) were investigated in order to design a proper ohmic heating system for sun-dried banana production. Results showed that increasing rate of electrical conductivity was high when the temperature of banana increased from 40 to 60°C. Total soluble solid of all samples increased rapidly during heating while total soluble solid in ripe banana was 10 times higher than that of unripe sample. It was also found that in the beginning period ohmic heating helped decrease moisture contents in the samples at a maximum rate of 3.3%/°C. In conclusion, temperature and degree of maturity affected banana’s properties. Ripe banana was suitable to be used as raw material in the production of sun-dried banana using ohmic heating and suggested heating temperature was between 60 and 65°C.

Keywords: Ohmic heating, Sun-dried banana, Electrical conductivity, *Musa sapientum* Linn

*fengkska@ku.ac.th

อาจารย์ประจำ ดร. ,ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม

Lecturer Dr, Department of Food Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Nakhon Pathom.

บทนำ

กล้วยตากเป็นผลิตภัณฑ์แปรรูปจากกล้วยน้ำว้าที่นิยมมากที่สุดอย่างหนึ่ง [1] เพราะเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรสชาติถูกปากของผู้บริโภคและสามารถเก็บรักษาได้นาน กระบวนการผลิตมีวิธีการตากที่มีวิวัฒนาการมาเป็นลำดับจากการอาศัยธรรมชาติโดยการตากแดดธรรมดาซึ่งมักมีการปนเปื้อนของสิ่งสกปรกระหว่างการตากและต้องใช้เวลาประมาณ 6 - 7 วัน [2] ต่อมามีการพัฒนามาใช้ตู้อบแห้งแบบใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ทำให้สามารถลดเวลาตากเหลือประมาณ 4 - 5 วัน [3] อย่างไรก็ตาม การทำแห้งด้วยวิธีนี้อุณหภูมิหรือความร้อนที่ใช้ทำแห้งไม่คงที่ จึงได้มีการทำแห้งกล้วยตากโดยการอบในตู้ไฟฟ้าหรือตู้อบ ซึ่งแม้จะสามารถควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ได้แต่ก็ต้องเสียค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเพิ่มขึ้น [4] และการอบยังอาจทำให้ผิวของผลิตภัณฑ์มีลักษณะแห้งและแข็งอีกด้วย [5]

กระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกเป็นการทำให้เกิดความร้อนในวัสดุโดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปจนเกิดเป็นความร้อน ปัจจุบันมีการนำกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกมาใช้ในกระบวนการแปรรูป

อาหารเพราะเป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนสูงและสม่ำเสมอ ส่งผลให้สามารถประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่าย [6, 7] กระบวนการนี้จึงอาจเป็นแนวทางในการพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตกล้วยตากได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาค่าการนำไฟฟ้าของกล้วยน้ำว้า รวมถึงศึกษาผลของอุณหภูมิต่อความชื้นและปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ เพื่อให้เกิดความเข้าใจ และออกแบบระบบสำหรับผลิตกล้วยตากต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. วัสดุ อุปกรณ์และการเตรียม

กล้วยน้ำว้าที่ใช้ในการวิจัยซื้อมาจากตลาดกำแพงแสนโดยใช้กล้วยในระยะที่ 1 (กล้วยดิบ) ระยะที่ 4 (กล้วยห่าม) และ ระยะที่ 6 (กล้วยสุก) ตามดัชนีสีเปลือกของ Mitra [8] โดยก่อนทำการทดลองตัวอย่างเปลือกกล้วยในระยะต่างๆ จะถูกนำมาวัดสีด้วยเครื่องวัดสี (HunterLab, Miniscan EZ MSEZ0279, Germany) ในระบบ $L^* a^* b^*$ (10 ซ้ำ) และได้ผลการวัดตามที่แสดงไว้ใน Table 1

Table 1 Color of banana peel

Color	Degree of Maturity	Value*
L*	1	50.47±4.36
	4	56.20±4.27
	6	64.09±3.15
a*	1	-8.09±1.32
	4	-2.12±1.72
	6	6.72±1.94
b*	1	27.62±1.36
	4	40.12±3.72
	6	44.81±2.84

Remark: *Data shown is average value ± standard deviation

ตัวอย่างกล้วยทั้งหมด (ที่ระดับความสุก 1, 4 และ 6) จะถูกเก็บที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 25°C) และถูกใช้ภายใน 24 ชั่วโมง การเตรียมตัวอย่างกล้วย

เพื่อหาค่าการนำไฟฟ้าทำได้โดยนำกล้วยมาปอกเปลือกแล้วตัดตัวอย่างเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม (เพื่อให้สะดวกในการคำนวณค่าการนำไฟฟ้า) ขนาดประมาณ 40x20x20

*fengkska@ku.ac.th

อาจารย์ประจำ ดร. ,ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม

Lecturer Dr, Department of Food Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Nakhon Pathom

mm ในการวิจัยเพื่อหาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ และความชื้นของกล้วยสามารถทำได้โดยนำตัวอย่างกล้วยมาปอกเปลือกแล้วตัดออกเป็นรูปทรงกระบอกผ่าครึ่ง

2. การให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

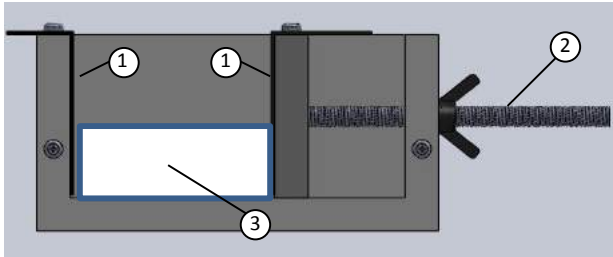


Figure 1 Schematic diagram of an ohmic cell used in the experiment: 1) electrodes; 2) adjustable stand; 3) food sample.

Figure 1 แสดงภาพตัดและส่วนประกอบของโอห์มมิกเซลล์ที่ใช้ในการวิจัย ตัวเซลล์ทำจากโพลีพรอพิลีน (Food grade) มีขนาดประมาณ 5x5x15 cm คู่อิเล็กโทรดทำจากสแตนเลส 304 ขนาดพื้นที่หน้าตัด 5x5 cm (หมายเลข 1) จะถูกติดตั้งบนฐานที่ปรับระยะได้ (2) ตัวอย่าง (3) จะถูกวางไว้ระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง ทำการปรับอิเล็กโทรดให้แนบกับตัวอย่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้คือ หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดปรับแรงดันได้ (VARIAC) โดยแรงดันที่ใช้ในการให้ความร้อนมีค่าคงที่เท่ากับ 100 V กระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิของตัวอย่างขณะที่ถูกให้ความร้อนจะถูกบันทึกด้วยเครื่องบันทึกค่าพารามิเตอร์ไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ส่งผลิตจากบริษัทแสงชัยมิเตอร์ (ประเทศไทย) ตัวอย่างจะถูกให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ ในการวัดและควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่าง จะทำโดยใช้ตัวตรวจรู้อุณหภูมิแบบอาร์ทีดีชนิดแพลาทินัม (Platinum RTD) แบบ 3 สายที่มีความละเอียด $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ทำการให้ความร้อนจนตัวอย่างมีอุณหภูมิ 33, 40, 60 และ 80°C โดยทำการทดลองทั้งสิ้นอย่างน้อย 3 ซ้ำ พักตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนจนเย็นที่อุณหภูมิห้อง ก่อนจะ

นำไปวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้และความชื้นต่อไป

3. การคำนวณค่าการนำไฟฟ้า

ค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 1 [9]

$$\sigma = \frac{IL}{VA} \quad (1)$$

เมื่อ σ คือ ค่าการนำไฟฟ้าของอาหาร (S/m)

I และ V คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้า (A) และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)

L และ A คือ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (m) และพื้นที่หน้าตัดของขั้วอิเล็กโทรด (m^2)

4. การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

นำตัวอย่างกล้วยมาผสมน้ำกลั่นแล้วปั่นด้วยเครื่องปั่นอาหาร (Sharp, EM-44A, ประเทศไทย) จนเข้ากันดีที่อัตราส่วนผสมระหว่างกล้วยต่อน้ำเท่ากับ 1:2 โดยน้ำหนัก ตั้งน้ำกล้วยปั่นทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง ใช้กระบอกฉีดยา (Syringe) แยกน้ำส่วนบนใส่หลอดพลาสติกแล้วนำเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยง (LABQUIP, Centurion 1000, England) ปั่นด้วยความเร็ว 3,500 rpm เป็นเวลา 20 นาที นำน้ำส่วนใสด้านบนมาวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ด้วยมาตรดัชนีหักเห (Hand refractometer) (ATAGO, PR-32, Japan) ทำการทดลองทั้งสิ้นอย่างน้อย 3 ซ้ำ

คำนวณค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ก่อนการเจือจางด้วยสมการที่ 2

$$^{\circ}\text{Brix}_{\text{true}} = ^{\circ}\text{Brix}_{\text{measure}} \times DR \quad (2a)$$

$$DR = \frac{w_b + w_{\text{add}}}{w_b} \quad (2b)$$

เมื่อ $^{\circ}\text{Brix}_{\text{true}}$ และ $^{\circ}\text{Brix}_{\text{measure}}$ คือค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ก่อนและหลังการเจือจาง

DR คือ อัตราส่วนการเจือจาง (Dilution ratio)

w_b และ w_{add} คือ ปริมาณน้ำที่อยู่ในกล้วย (mL) และที่เติมลงไป (mL) ตามลำดับ

*fengkska@ku.ac.th

อาจารย์ประจำ ดร. ,ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม

Lecturer Dr, Department of Food Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Nakhon Pathom

5. การวัดความชื้น

นำตัวอย่างกล้วยสุก (ระดับที่ 6) ที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบโอทมมิกมาไว้จนอุณหภูมิลดลงเท่าอุณหภูมิห้อง ตัดแบ่งตัวอย่างออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนผิว (ส่วนที่มีความหนาจากผิวนอกเข้ามาประมาณ 3 mm), เนื้อ (ส่วนที่อยู่ระหว่างส่วนผิวกับแกนกลางซึ่งเป็นส่วนที่มีเมล็ดจำนวนมากและมีลักษณะแข็งกว่าส่วนเนื้อ) และไส้ (ส่วนแกนกลาง) แล้วนำไปวัดความชื้นด้วย เครื่องวัดความชื้น (Sartorius, MA40-000V2, Germany) ทำการทดลองทั้งสิ้น 3 ซ้ำ

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. ค่าการนำไฟฟ้า

จาก Figure 2 จะเห็นได้ว่าค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างกล้วยสุก (Figure 2c) จะมีค่าสูงกว่าตัวอย่างกล้วยดิบ (Figure 2a) ที่ทุกอุณหภูมิ (โดยได้ทำการเก็บข้อมูลของกล้วยห่ามในระยะที่ 4 ตามดัชนีสีเปลือกของ Mitra [8] เพิ่มเติมด้วยเพื่อเปรียบเทียบให้เห็นแนวโน้ม- Figure 2b) เนื่องจากกล้วยเป็นพืชที่มีการสูกแบบ Non-Climacteric ในระหว่างที่กล้วยสุกองค์ประกอบภายในจะเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของกล้วยสุกมีค่าสูงกว่ากล้วยดิบ และส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าซึ่งเป็นปัจจัยหลักต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในขณะให้ความร้อน [10, 11]

เมื่อพิจารณาจากอัตราการเพิ่มของค่าการนำไฟฟ้าของกล้วย เราอาจแบ่งกราฟออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงที่ I ซึ่งมีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าการนำไฟฟ้าอย่างช้าๆ จนถึงช่วงที่ II ค่าการนำไฟฟ้าในช่วงนี้จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อาจเกิดจากเมื่อให้ความร้อนแก่กล้วยส่งผลทำให้ของเหลวในเซลล์เกิดแรงดันผนังเซลล์จนถึงความดันสูงสุดที่ทนได้ ผนังเซลล์จึงถูกทำลายทำให้ของเหลวที่อยู่ภายในเซลล์แพร่ออกมาสู่ข้างนอก เนื่องจากความดันภายในเซลล์กล้วยมีมากกว่าความดันอากาศ โดยในขณะที่ทำการทดสอบจะได้ยินเสียงของเหลวที่ซึมออกมาตามตัวอย่างอย่างต่อเนื่อง ด้วย

เหตุที่ของเหลวในเซลล์เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีกว่าแป้ง จึงทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงในช่วงที่ II

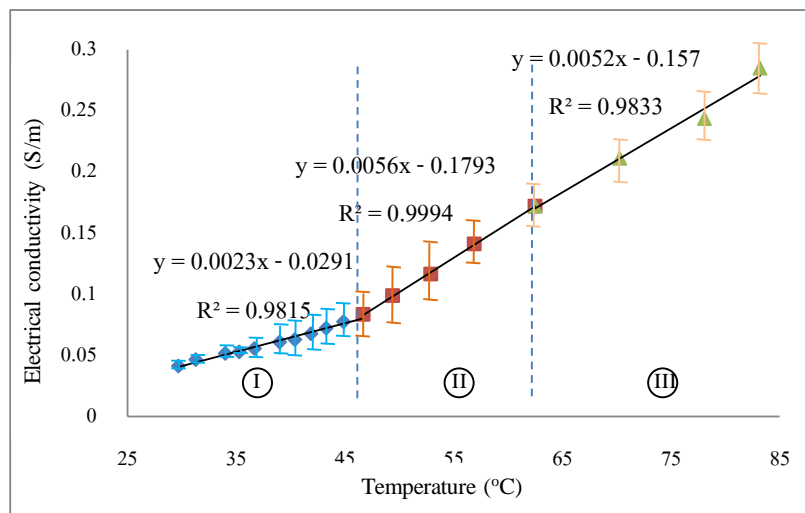
เมื่อยังคงให้ความร้อนต่อไปจนเข้าสู่ช่วงที่ III (ตั้งแต่ 58-63°C ขึ้นกับระดับความสุกของตัวอย่าง) อัตราการเพิ่มของค่าการนำไฟฟ้าในช่วงที่ III จะมีค่าลดลงอีกครั้ง Waliszewski และคณะ [12] รายงานว่า แป้งกล้วยจะเกิดการ Gelatinization ที่อุณหภูมิประมาณ 62°C ขึ้นไป มีผู้วิจัยเรื่องผลของการเกิด Gelatinization ของแป้งชนิดต่างๆ ระหว่างการให้ความร้อนแบบโอทมมิกและแสดงให้เห็นว่า ค่าการนำไฟฟ้าของแป้งจะลดลงขณะเกิด Gelatinization และกลับมาเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น [13, 14] การลดลงของอัตราการเพิ่มของค่าการนำไฟฟ้าในช่วงที่ III เทียบกับช่วงที่ II จึงน่าจะเกิดจากการที่แป้งกล้วยเริ่มเกิดการ Gelatinization นั้นเอง

จากการเปรียบเทียบ Figure 2 (a), 2 (b) และ 2 (c) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า อุณหภูมิเริ่มต้นในแต่ละช่วงจะมีค่าต่างกันสำหรับกล้วยในระยะความสุกที่ต่างกัน Table 2 แสดงอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้าย รวมถึงอัตราการเพิ่มของค่าการนำไฟฟ้าในแต่ละช่วง จากตารางจะพบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายในช่วงที่ II ของกล้วยสุกจะมีค่า 40-60°C ในขณะที่สำหรับกล้วยดิบจะอยู่ในช่วง 45-65°C ทั้งนี้ อาจจะเป็นเพราะว่า กล้วยดิบมีองค์ประกอบภายในส่วนใหญ่เป็นแป้งและเพกตินที่ไม่ละลายน้ำ ทำให้เซลล์ภายในมีการยึดเกาะกันอย่างหนาแน่น [15] ผนังเซลล์จึงสามารถทนต่อแรงดันไอน้ำที่เกิดขึ้นในขณะที่ให้ความร้อนได้ดี แต่ในระหว่างที่กล้วยเปลี่ยนสภาพจากดิบเป็นสุก แป้งจะเปลี่ยนเป็นน้ำตาล และเพกตินเปลี่ยนเป็นรูปที่ละลายน้ำได้ ทำให้การยึดเกาะกันระหว่างเซลล์มีความหนาแน่นน้อยลง [15] ผนังเซลล์ของกล้วยสุกจึงทนต่อแรงดันไอน้ำได้น้อยกว่ากล้วยดิบ จึงทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นและสุดท้ายในช่วงที่ II ของกล้วยดิบจะมีค่ามากกว่ากล้วยสุก

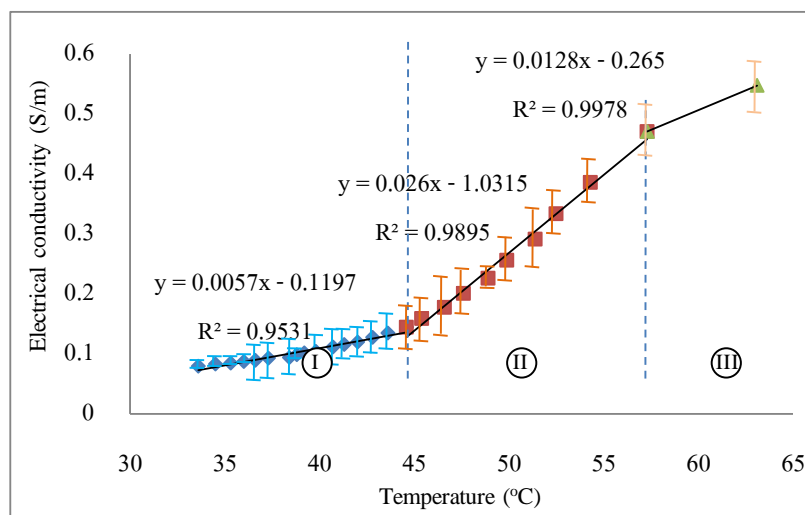
*fengkska@ku.ac.th

อาจารย์ประจำ ดร. ,ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม

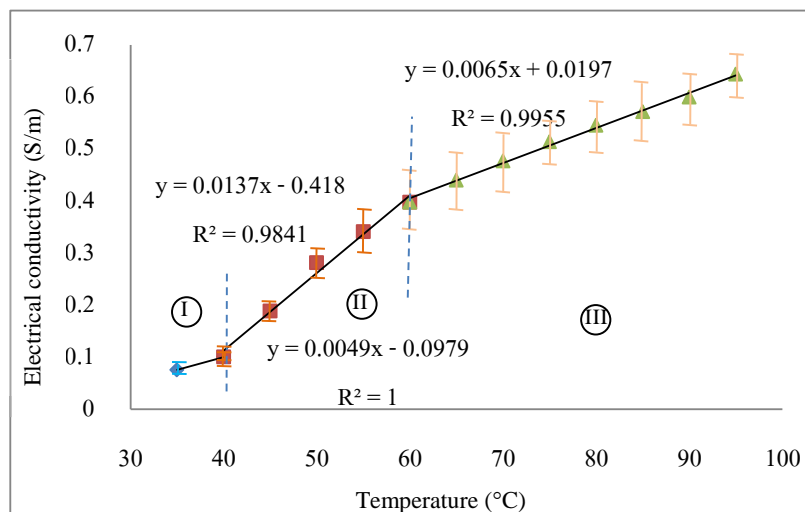
Lecturer Dr, Department of Food Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Nakhon Pathom



(a)



(b)



(c)

Figure 2 Relationship between temperature and electrical conductivity of samples having different degree of maturity: (a) 1, (b) 4 and (c) 6.

*fengkska@ku.ac.th

อาจารย์ประจำ ดร. ,ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม

Lecturer Dr, Department of Food Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Nakhon Pathom

Table 2 Increasing rates of electrical conductivity of samples at different heating temperatures

Zone	Degree of maturity	Temperature (°C)		Increasing Rate (S/m. °C)
		Begin	End	
I	1	30	45	0.0023
	4	30	45	0.0057
	6	30	40	0.0049
II	1	45	65	0.0056
	4	45	60	0.0260
	6	40	60	0.0137
III	1	65	-	0.0052
	4	60	-	0.0128
	6	60	-	0.0065

2. ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของกล้วยที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงได้ดัง Figure 3 จากรูปจะเห็นได้ว่า ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ที่อุณหภูมิห้องของกล้วยสุกมีค่าสูงกว่ากล้วยดิบ ถึง 10 เท่า (11.7 และ 1.0 °Brix) กล้วยเป็นผลไม้ที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบ

ค่อนข้างมาก ในขณะที่สุกจะเกิดปฏิกิริยาชีวเคมีทำให้รสและกลิ่นเปลี่ยนไป [16] เกิดการเปลี่ยนแปลงจากแป้งเป็นน้ำตาล [1, 17] และเพกตินเปลี่ยนรูปละลายน้ำได้เมื่อกล้วยสุกนั่นเอง [18] จึงทำให้ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ในกล้วยสุกมีปริมาณมากกว่าในกล้วยดิบ

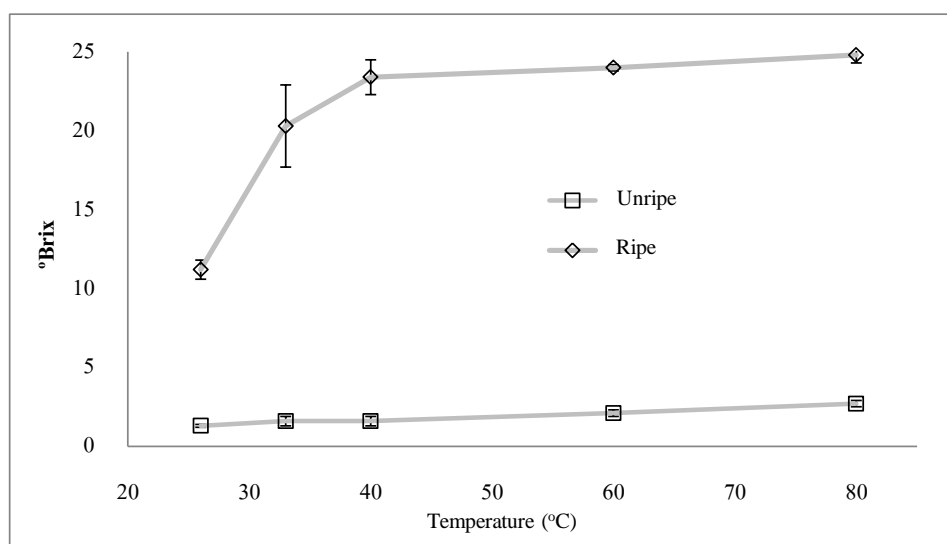


Figure 3 Total soluble solid of ripe (degree of maturity= 6) and unripe (degree of maturity= 1) bananas at different temperatures

*fengska@ku.ac.th

อาจารย์ประจำ ดร. ,ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม

Lecturer Dr, Department of Food Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Nakhon Pathom

เมื่อให้ความร้อนถึงอุณหภูมิ 40°C ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของกล้วยสุก มีอัตราการเพิ่มอย่างรวดเร็ว เป็น 23 °Brix หรือคิดเป็นอัตราการเพิ่ม = $(23-11 \text{ °Brix})/(40-25 \text{ °C}) = 0.80 \text{ °C}$ ซึ่งน่าจะเกิดจากการสูญเสียน้ำเนื่องจากผนังเซลล์ถูกทำลาย ทำให้ความเข้มข้นของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำเพิ่มสูงขึ้น อัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ในกล้วยสุกจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 40°C (จาก 0.80 เหลือเพียง 0.03 °Brix/°C) สอดคล้องกับการลดลงของความชื้นอย่างช้าๆ (ผลการวิจัยที่ 3.3) ส่วนการเพิ่มขึ้นของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ ได้ของกล้วยในระยะที่ 1 จะเป็นไปอย่างช้าๆ ด้วยอัตราคงที่จาก 1 °Brix ที่อุณหภูมิห้องไปจนถึง 1.8 °Brix ที่อุณหภูมิ 80°C (0.03 °Brix/°C) ซึ่งน่าจะเป็นเพราะกล้วยดิบมีปริมาณน้ำตาลต่ำและมีอัตราการสูญเสียน้ำที่ต่ำนั่นเอง

ในขณะที่ให้ความร้อนแก่กล้วยระยะต่างๆ ได้มีการบันทึกเวลาในการให้ความร้อนไว้ด้วย (ไม่ได้แสดงผลการทดลองในที่นี้) พบว่าเวลาในการให้ความร้อนกล้วยดิบนานกว่ากล้วยสุกมาก ซึ่งเป็นผลมาจาก

การที่กล้วยดิบมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้และค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำกว่ากล้วยสุก ทำให้อัตราการให้ความร้อนที่เกิดขึ้นช้ากว่านั่นเอง นอกจากนี้ เมื่อให้ความร้อนกล้วยดิบนานขึ้นทำให้ผิวกล้วยมีลักษณะแห้งแข็งคล้ายกล้วยปิ้ง และเกิดรอยไหม้ ทำให้มีสภาพเป็นฉนวนไฟฟ้า ไม่สามารถให้ความร้อนด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิคต่อไปได้ กล้วยสุกจึงมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการผลิตกล้วยตากด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิคมากกว่า

3. การลดลงของความชื้นที่บริเวณต่างๆ ของกล้วยสุกขณะให้ความร้อน

Figure 4 แสดงให้เห็นว่าความชื้นในส่วนต่างๆ ของกล้วยสุกจะมีค่าลดลงในขณะที่ให้ความร้อน โดยบริเวณผิวจะมีความชื้นมากที่สุดและค่าความชื้นในส่วนต่างๆ สามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ ส่วนผิว (skin) > เนื้อ (middle) > ไส้ (core) ในระหว่างการให้ความร้อน ความชื้นจะมีลดลงอย่างต่อเนื่อง

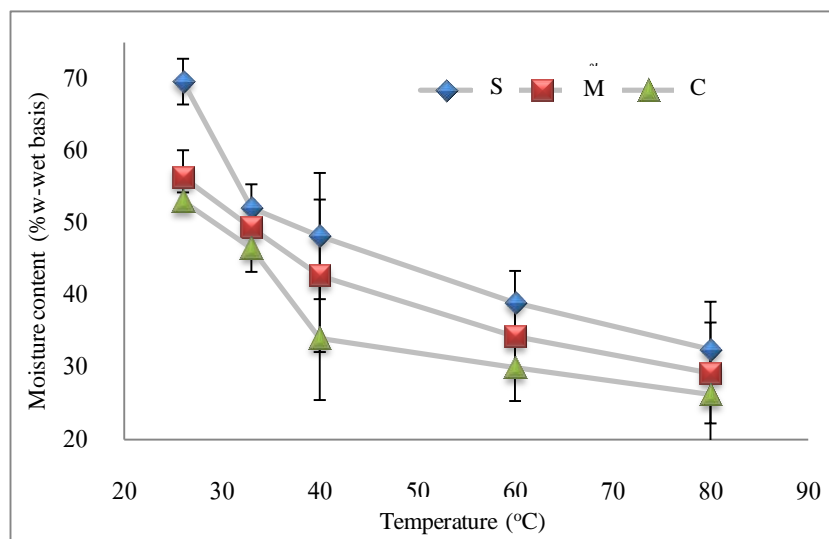


Figure 4 Moisture contents of ripe banana (degree of maturity = 6) at different positions (S=skin; M=middle; C=core) during ohmic heating

*fengkska@ku.ac.th

อาจารย์ประจำ ดร. ,ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม

Lecturer Dr, Department of Food Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Nakhon Pathom

ในช่วงเริ่มต้นผิวตัวอย่างจะมีความชื้นประมาณ 70% เมื่อให้ความร้อนจนถึง 33°C ความชื้นในส่วนผิวจะลดลงอย่างรวดเร็วเหลือเพียง 53% หรือคิดเป็นอัตราการลดเท่ากับ 3.3%/°C แสดงให้เห็นถึงผลของการให้ความร้อนต่อการรั่วไหลของน้ำในเซลล์เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว หลังจากนั้นความชื้นจะลดลงในอัตราที่ช้าลง ในทำนองเดียวกัน

ที่อุณหภูมิ 33 – 40°C ความชื้นในส่วนไส้จะลดลงจาก 42% เหลือเพียง 31% (1.6%/°C) ในขณะที่ความชื้นในส่วนเนื้อยังคงมีอัตราการลดลงที่คงที่จนถึงอุณหภูมิ 40°C (1.0%/°C) ซึ่งสาเหตุที่อัตราการลดของความชื้นที่ผิว ตรงกลาง และที่ไส้ของตัวอย่างมีค่าแตกต่างกันนั้น อาจเกิดจากการที่กล้วยเป็นผลไม้ที่มีการพัฒนาการเกิดเนื้อจากดอกเป็นผลโดยการพองตัวจากข้างในสู่ข้างนอกจึงทำให้ส่วนข้างในมีความแข็งแรงมากที่สุด [1] หรือเรียงลำดับความแข็งแรงดังนี้คือ ส่วนผิว < เนื้อ < ไส้ ในขณะที่ให้ความร้อนผนังเซลล์ที่ส่วนผิวจึงถูกทำลายจากแรงดันไอน้ำได้ง่ายกว่า ทำให้น้ำในเซลล์เกิดการรั่วไหลที่อุณหภูมิต่ำกว่านั่นเอง

ที่อุณหภูมิ 40 – 80°C อัตราการลดลงของความชื้นในส่วนต่างๆ เริ่มช้าลง (ผิว: 0.4%/°C; เนื้อ: 0.3%/°C ; ไส้: 0.2%/°C) ที่อุณหภูมิ 60-70°C กล้วยมีการหดตัวลงและเริ่มมีกลิ่นหอม แต่หากให้ความร้อนจนตัวอย่างมีอุณหภูมิถึง 80°C ความชื้นของตัวอย่างทั้ง 3 ส่วนจะลดลงเหลือเพียงประมาณ 30% โดยผิวของตัวอย่างจะมีลักษณะแห้งแข็งซึ่งผิดลักษณะที่ต้องการของกล้วยตาก

เมื่อพิจารณาจากลักษณะปรากฏของตัวอย่างที่ถูกให้ความร้อน อุณหภูมิที่น่าจะเหมาะสมสำหรับการทำกล้วยตาก จึงควรมีค่าต่ำกว่า 80°C ทางผู้วิจัยจึงทำการทดสอบเพิ่มเติมโดยให้ความร้อนแบบโอห์มมิกแก่ตัวอย่างกล้วยสุกภายในโอห์มมิกเซลล์ที่สร้างขึ้นจนมีอุณหภูมิถึง 60, 65 และ 70°C และคงไว้ที่อุณหภูมิดังกล่าวเป็นเวลาสูงสุดประมาณ 8 ชั่วโมง

ที่อุณหภูมิ 60°C ผิวของตัวอย่างจะมีของเหลวลักษณะคล้ายน้ำเชื่อมและมีการเปลี่ยนสีเป็นสีเหลือง

ปนน้ำตาลเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 7 และเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลในชั่วโมงที่ 8 ซึ่งตัวอย่างที่เวลานี้เริ่มมีสีคล้ายกล้วยตากแต่ยังคงมีสีอ่อนกว่ากล้วยตากที่พบเห็นตามท้องตลาดเล็กน้อย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 65°C ตัวอย่างจะมีลักษณะคล้ายกับตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกที่ 60°C แต่จะเปลี่ยนสีเร็วขึ้น ถึง 3 ชั่วโมง ส่วนที่ 70°C ตัวอย่างจะมีลักษณะแข็งและเกิดการไหม้ที่เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง

สรุปผล

จากผลการวิจัยพบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของกล้วยสุกจะมีค่าสูงกว่ากล้วยห่ามและดิบที่ทุกอุณหภูมิ โดยอัตราการเพิ่มของค่าการนำไฟฟ้าจะมีค่าสูงในช่วงอุณหภูมิ 40-60°C ซึ่งเป็นช่วงที่น้ำในเซลล์กล้วยแพร่ออกมาภายนอกเซลล์ ทำให้ความชื้นในกล้วยลดลงพร้อมๆ กับการเพิ่มของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้นั่นเอง นอกจากนี้ยังพบว่า หากให้ความร้อนแก่ตัวอย่างกล้วยมากเกินไป อาจทำให้เกิดการแห้งและไหม้ได้ เมื่อพิจารณาจากสมบัติทางไฟฟ้า ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ และความชื้น กล้วยสุกที่ระดับดัชนีความสุก 6 มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกล้วยตาก ด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก จากการทดลองผลิตรจริงที่เวลานานสูงสุด 8 ชั่วโมง พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตน่าจะอยู่ในช่วง 60-65°C

เอกสารอ้างอิง

- [1] เบญจมาศ ศิลาชัย. (2545). กล้วย. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [2] พรพนีย์ วิชชาชู. (2537). กล้วยตากกระทุ่ม...วันนี้ไม่ต้องมีแดดก็ได้. วารสารส่งเสริมการเกษตร. 24(83): 10-14.
- [3] พานิชย์ ยศปัญญา. (2534). กล้วยกับสุขภาพ. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์อักษรสยามการพิมพ์.
- [4] รชฎ เชื้อวิโรจน์ และ เขียรชัย สันดุขฎิ. (2532). ศึกษาทดลองและเปรียบเทียบการทำกล้วยตากด้วยเครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์กับการทำกล้วย

*fengkska@ku.ac.th

อาจารย์ประจำ ดร. ,ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม

Lecturer Dr, Department of Food Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Nakhon Pathom

- ตากด้วยตู้อบไฟฟ้า. วารสารวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร. 6(3): 144-148.
- [5] Lin, T.M., Durance, T.D. and Scaman, C.H. (1998). Characterization of vacuum microwave, air and freeze dried carrot slices. *Food Research International*. 31(2): 111-117.
- [6] อรรถพล นุ่มหอม และฤทธิชัย อัครวราชันย์. (2551). กระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก. *Food Focus Thailand Magazine*. 3(27): 48-53.
- [7] Kanjanapongkul, K., Rodtaid, P. and Boonfeung, K. (2013). Cooking of Jasmine Rice by Ohmic Heating. *The Journal of Interdisciplinary Networks*. 2(Special Issue): 171-175.
- [8] Mitra, S.K. (1997). *Postharvest Physiology & Storage of Tropical & Subtropical Fruits*. UK: CAB International.
- [9] กอบศักดิ์ กาญจนางศ์กุล. (2556). เอกสารประกอบการสอนวิชาปัญหาพิเศษ. ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม.
- [10] ฤทธิชัย อัครวราชันย์. (2554). การให้ความร้อนแบบโอห์มมิกในการแปรรูปอาหาร. *วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม*. 7(1): 11-23.
- [11] Sarang, S., Sastry, S.K., and Knipe, L. (2008). Electrical conductivity of fruits and meats during ohmic heating. *Journal of Food Engineering*. 87(3): 351-356.
- [12] Waliszewski, K.N., Aparicio, M.A., Bello, L.s.A., and Monroy, J.A. (2003). Changes of banana starch by chemical and physical modification. *Changes of banana starch by chemical and physical modification*. 52(3): 237-242.
- [13] Li, F.-D., Li, L.-T., Li, Z., and Tatsumi, E. (2004). Determination of starch gelatinization temperature by ohmic heating. *Determination of starch gelatinization temperature by ohmic heating*. 62(2): 113-120.
- [14] Wang, W.-C. and Sastry, S.K. (1997). Starch gelatinization in ohmic heating. *Starch gelatinization in ohmic heating*. 34(3): 225-242.
- [15] กาญจนา กุลวิฑิต. (2538). เอกสารประกอบการสอนวิชาสรีรวิทยาหลังการเก็บเกี่ยวผลไม้และผัก. สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตกาฬสินธุ์, กาฬสินธุ์.
- [16] Mayr, D., Märk, T., Lindinger, W., Brevard, H., and Yeretzian, C. (2003). Breath-by-breath analysis of banana aroma by proton transfer reaction mass spectrometry. *International Journal of Mass Spectrometry*. 223-224(0): 743-756.
- [17] สายชล เกตุษา. (2528). สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. นครปฐม: โรงพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมและฝึกอบรมการเกษตรแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.
- [18] จริ่งแท้ ศิริพานิช. (2544). สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. นครปฐม: โรงพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมและฝึกอบรมการเกษตรแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.