

การให้ความร้อนแบบโอห์มมิกในการแปรรูปอาหาร Ohmic Heating in Food Processing

ฤทธิชัย อัครราชันย์*

บทนำ

การแปรรูปด้วยความร้อน (thermal processing) เป็นกระบวนการที่สำคัญในการแปรรูปอาหาร ซึ่งมีวัตถุประสงค์ในลักษณะต่างๆ เช่น การลวก (blanching) เพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ กระบวนการพาสเจอร์ไรส์ (pasteurization) และการสเตอริไลซ์ (sterilization) ซึ่งเป็นรูปแบบการให้ความร้อนเพื่อทำลายสารพิษ, จุลินทรีย์, เอนไซม์ และพยาธิในการแปรรูปอาหาร โดยวัตถุประสงค์ของการพาสเจอร์ไรส์เพื่อทำลายจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคและไม่สร้างสปอร์ คุณภาพของอาหารจะแตกต่างจากวัตถุดิบไม่มากนักแต่ไม่สามารถทำลายสปอร์ของเชื้อจุลินทรีย์ ส่วนวัตถุประสงค์ของสเตอริไลซ์เพื่อทำลายจุลินทรีย์รวมทั้งสปอร์ของจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเป็นอันตรายและที่ทำให้อาหารเน่าเสีย การแปรรูปอาหารด้วยความร้อนในปัจจุบันใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger) ชนิดต่างๆ ที่มีกลไกการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำและการพาความร้อนจากโครงสร้างพื้นฐานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งเป็นข้อจำกัดอย่างมาก เนื่องจากการให้ความร้อนด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนใช้ความร้อนที่สูงและเวลาที่ยาวนานในการแปรรูป ส่งผลเสียต่อคุณภาพ และคุณลักษณะด้านต่างๆ ของอาหาร [1] และเมื่อใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นเวลานานจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลงเนื่องจากการเกิดตะกอนเกาะที่ผิวเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง ข้อจำกัดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทำให้เกิดแนวคิดในการพัฒนาการให้ความร้อนเพื่อการแปรรูปอาหารที่มีประสิทธิภาพการเกิดความร้อนสูงและมีกลไก

การเกิดความร้อนจากภายในอาหารซึ่งจะช่วยลดปัญหาที่เกิดจากการถ่ายเทความร้อน ประหยัดพลังงานและลดต้นทุนการผลิต

การเกิดความร้อนแบบโอห์มมิก (ohmic heating) เป็นเทคโนโลยีการสร้างความร้อน ที่มีประสิทธิภาพสูง มีอัตราการเกิดความร้อนที่สูงมากกว่าวิธีการให้ความร้อนแบบอื่นๆ โดยมีอัตราการเกิดความร้อนประมาณ 0.005 -1.2 องศาเซลเซียสต่อวินาทีและมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนได้มากกว่าร้อยละ 95 [2] ซึ่งในขณะที่การสร้างความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟจะมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนได้เพียงร้อยละ 45-48 เท่านั้น [3] รวมทั้งการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิกมีกลไกการเกิดความร้อนจากภายในตัวอาหาร จึงไม่มีผลกระทบต่อด้านถ่ายเทความร้อนจากแหล่งพลังงาน [4] ปัจจุบันการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิกถูกนำไปใช้ในการแปรรูปแบบอาหารปลอดเชื้อ (aseptic processing) สำหรับอาหารเหลวเนื้อเดียว ตลอดจนการนำไปใช้ในการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแปรรูปในลักษณะต่างๆ เช่น การนำไปใช้ในการละลายอาหารทะเลแช่เยือกแข็งซึ่งสามารถช่วยลดพื้นที่และปริมาณน้ำที่ใช้ในกระบวนการละลายแบบดั้งเดิม การลวกเพื่อยับยั้งเอนไซม์ การนำไปใช้เพื่อเสริมประสิทธิภาพของการพาสเจอร์ไรส์และการสเตอริไลซ์ แต่การให้ความร้อนแบบโอห์มมิกจัดเป็นเทคโนโลยีที่มีองค์ความรู้ในกลุ่มนักวิชาการเฉพาะกลุ่มเท่านั้น และการเผยแพร่ข้อมูลทางเทคโนโลยีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกยังมีไม่แพร่หลาย ดังนั้นวัตถุประสงค์ของบทความวิชาการนี้จึงได้รวบรวมเอกสารวิชาการที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยที่ศึกษาการให้

rittichai@mju.ac.th

*อาจารย์ประจำ ดร., สาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

*Lecturer Dr, Food Engineering Program, Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University

ความร้อนแบบโอห์มมิกในการแปรรูปอาหารรูปแบบต่าง ๆ โดยมีเนื้อหาที่สำคัญ 3 ส่วน ได้แก่หลักการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิก ปัจจัยพื้นฐานที่มีอิทธิพลต่อการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิก และการประยุกต์การให้ความร้อนแบบโอห์มมิกในอุตสาหกรรม เพื่อให้เป็นแนวทางสำหรับ นักศึกษา นักวิชาการ และผู้ที่สนใจศึกษาและนำไปค้นคว้า ตลอดจนการนำไปต่อยอดทางความคิดเพื่อใช้ในการพัฒนาอุตสาหกรรมการแปรรูปอาหารด้วยความร้อนต่อไป

1. หลักการให้ความร้อนแบบวิธีโอห์มมิก

การให้ความร้อนแบบโอห์มมิก (ohmic heating) เป็นวิธีการสร้างความร้อนจากภายในตัวอาหาร ซึ่งเป็นผลจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าสู่อาหาร และเกิดการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าในอาหารจนเกิดเป็นความร้อนที่อัตราความร้อนสูง โดยชนิดของอาหารที่เหมาะสมกับการเกิดความร้อนแบบ

โอห์มมิกนั้น ควรเป็นอาหารที่มีค่าการนำไฟฟ้าที่สูง [5] และค่าการนำไฟฟ้าของอาหารมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของระบบมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเป็นผลจากปริมาณการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในอาหารได้มากขึ้น [6] นอกจากสมบัติการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) ของอาหารที่มีผลต่อการเร่งอัตราการเกิดความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกแล้วปริมาณเกลือและความเข้มข้นของอาหารก็เป็นปัจจัยที่สำคัญในการเกิดความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก เนื่องจากปริมาณเกลือจะเป็นตัวกระตุ้นทำให้เกิดการแตกประจุไอออนของอาหารซึ่งช่วยเสริมความสามารถในการนำไฟฟ้าในอาหารได้เป็นอย่างดี และผลของความเข้มข้นจะช่วยเพิ่มพื้นที่ในการไหลของกระแสไฟฟ้า โดยอาหารที่ความเข้มข้นของเกลือมากจะเกิดความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกในอัตราที่สูงกว่าอาหารที่ความเข้มข้นของเกลือต่ำ [7]

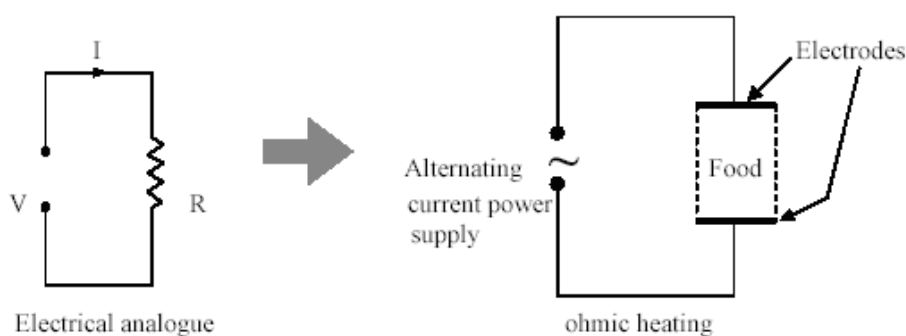


Figure 1 Ohmic heating circuit

Figure 1 แสดงวงจรการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิกเมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในตัวอาหารที่มีสมบัติการนำไฟฟ้าซึ่งผลของการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าในอาหารจะเกิดเป็นพลังงานความร้อนขึ้นภายในเนื้ออาหารนั้น เนื่องจากในขณะที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะเกิดการเคลื่อนที่ของไอออนและเสียดสีกันระหว่างชั้นโมเลกุลในอาหารเกิดเป็นพลังงานความร้อนหรืออาจจะกล่าวได้ว่าพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นผล

เนื่องจากการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน การเกิดความร้อนแบบโอห์มมิกจะเกิดขึ้นได้ดีและเหมาะสมกับอาหารเหลวที่เป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous liquid food) และมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูง (high electrical conductivity) เนื่องจากอาหารเหลวจะสามารถเปลี่ยนแปลงปริมาณตามลักษณะภาชนะที่บรรจุได้พอดี จึงทำให้สามารถสัมผัสขั้วอิเล็กโทรดได้สนิทพอดี ซึ่งมีส่วนช่วยให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลเข้า

สู่อาหารได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ ดังนั้นการประยุกต์ การเกิดความร้อนแบบโอห์มมิกในการแปรรูปอาหารจึง ช่วยลดการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการและทาง ประสาทสัมผัสของอาหารจากผลของการได้รับความร้อน เป็นเวลานาน [5] การศึกษาเพื่อพัฒนาการให้ความร้อน แบบโอห์มมิกใช้ในระดับอุตสาหกรรมนั้นจะต้อง พิจารณาถึงปัจจัยพื้นฐานที่มีผลต่ออัตราการเพิ่ม อุณหภูมิในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนแบบ โอห์มมิก เช่น ค่าการนำไฟฟ้า ความเข้มข้นของอาหาร และความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า

2. ปัจจัยพื้นฐานที่มีอิทธิพลต่อการเกิดความร้อน แบบโอห์มมิก

อัตราการเกิดความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกจะ ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอาหาร ซึ่ง ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านจะแปรผันตรงกับ คุณสมบัติค่าการนำไฟฟ้าของอาหาร ดังนั้นอาหารที่มี คุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่สูง เช่น อาหารที่มีความเป็น กรดสูง (acid food) และอาหารที่มีส่วนประกอบของ เกลือคลอไรด์ซึ่งอาหารที่มีความสามารถในการแตกตัว ของประจุไอออนได้ดีจึงสามารถเกิดความร้อนด้วยวิธี โอห์มมิกได้ดี แต่ในอาหารที่มีค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำ (low acid food) เช่น นม หรืออาหารที่มีไขมันเป็น องค์ประกอบหลัก อาหารประเภทดังกล่าวมีการแตกตัว ของไอออนต่ำจึงเกิดความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกได้ไม่ดี การนำไฟฟ้าของอาหารเป็นปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบ และควบคุมการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิก อาหารแต่ละชนิด มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกัน [8] ค่า การนำไฟฟ้าของอาหารเป็นปัจจัยหลัก (critical parameter) ต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหารด้วยการ ให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลาย กลุ่มได้พัฒนาอุปกรณ์และวิธีการวัดค่าการนำไฟฟ้าของ ทั้งอาหารเหลวและชิ้นอาหารอาศัยหลักการและ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านใน ตัวอาหารและความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้าตามกฎของ โอห์ม โดยใช้สมการพื้นฐานในการคำนวณค่าการนำ

ไฟฟ้าของอาหารในระหว่างการให้ความร้อนด้วยวิธี โอห์มมิก ซึ่งมีรูปแบบความสัมพันธ์ตามสมการที่ 1 [6]

$$\sigma = \frac{I L}{V A} \quad (1)$$

เมื่อ σ คือ ค่าการนำไฟฟ้าของอาหารเหลว (ซีเมนต่อเมตร, S/m), I คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหล ผ่าน (แอมแปร์, Amp.), V คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์, Volt), L คือ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (เมตร, m) และ A คือ พื้นที่หน้าตัดของขั้วอิเล็กโทรด (ตารางเมตร, m²)

ชุดอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าของอาหาร มี ส่วนประกอบพื้นฐานที่สำคัญอยู่ 3 ส่วน ได้แก่ โอห์มมิก เซลล์ ระบบการวัดสัญญาณไฟฟ้าและระบบจ่ายพลังงาน ไฟฟ้าแบบปรับแรงดันซึ่งมีวงจรการทำงานตาม Figure 2 ซึ่งแสดงแผนภาพอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าใน ระหว่างการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก โดยมี รายละเอียดดังนี้

โอห์มมิกเซลล์ : เป็นอุปกรณ์ที่ทำจากวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าที่มีความสามารถในการทนความร้อนสูง เช่น ท่ออะคริลิก (acrylic tube), ท่อเทฟลอน (teflon tube), ท่อไพเร็กซ์ (pyrex tube) หรือพลาสติกวิศวกรรม ชั้นสูงชนิดต่างๆ เพื่อใช้บรรจุตัวอย่างอาหารที่ใช้ในการ ทดลอง โดยที่ปลายทั้งสองด้านของโอห์มมิกเซลล์จะ ประกอบด้วยแผ่นอิเล็กโทรดซึ่งมีหน้าที่ปล่อย กระแสไฟฟ้าให้ไหลเข้าสู่อาหาร แผ่นอิเล็กโทรดส่วน ใหญ่ทำมาจากแผ่นโลหะ เช่น แผ่นเหล็กไร้สนิม (stainless steel) ซึ่งมีความทนทานต่อการกัดกร่อนของ กรดจากอาหารได้ดีและมีความแข็งแรงของโครงสร้าง เป็นอย่างดี

ระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าชนิดปรับแรงดัน : เป็น อุปกรณ์ที่ใช้ในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่ระบบ ซึ่ง เป็นหม้อไฟฟ้าชนิดปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ได้ตามที่ต้องการ โดยการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิกไม่

นิยมระบบการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรง (direct current) เนื่องจากการให้ไฟฟ้ากระแสตรงจะทำให้ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้ามีทิศทางเดียว ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส (electrolysis reaction) ส่งผลให้เกิดการเกิดกร่อนที่ผิวของอิเล็กโทรดอย่างรุนแรง และเกิดเป็นตะกอนของสนิมออกไซด์ของโลหะ ซึ่งเสี่ยงต่อการปนเปื้อนในอาหาร จึงนิยมใช้ระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับในการศึกษาการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิกมากกว่า [9] อย่างไรก็ตามระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับที่ระดับความเข้มข้นไฟฟ้าต่ำกว่า 5 โวลต์ต่อเซนติเมตรมีความเสี่ยงในการเกิดกร่อนที่ผิวของอิเล็กโทรด และเกิดเป็นตะกอนของสนิมออกไซด์ของโลหะได้เช่นกัน [10] ดังนั้นการเลือกระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าจะต้องคำนึงถึงรูปแบบ และความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าที่ใช้ให้เหมาะสม

ระบบการวัดและควบคุมสัญญาณทางไฟฟ้า : เป็นชุดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการบันทึกสัญญาณทางไฟฟ้า อาทิ ปริมาณกระแสไฟฟ้า, ความต่างศักย์ไฟฟ้า และอุณหภูมิในระหว่างการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิก โดยมีส่วนประกอบภายในชุดอุปกรณ์แบ่งออกเป็นเซ็นเซอร์วัดสัญญาณไฟฟ้า (ปริมาณกระแสไฟฟ้า, ความต่างศักย์ไฟฟ้า) และอุณหภูมิ โดยอุปกรณ์แปลงสัญญาณทางไฟฟ้าซึ่งรับข้อมูลมาจากเซ็นเซอร์เป็นสัญญาณไฟฟ้ามาตรฐานในรูปแบบข้อมูลอนาล็อกหรือข้อมูลดิจิทัล (analog or digital transmitter) และเครื่องบันทึกสัญญาณทางไฟฟ้าและอุณหภูมิ

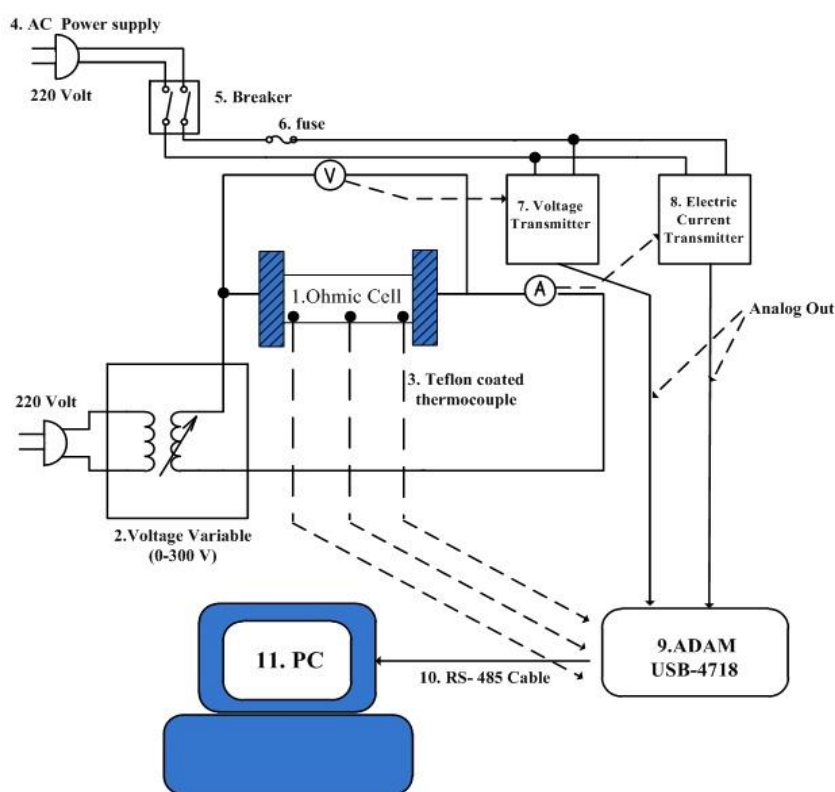


Figure 2 Schematic diagram of the ohmic heating system

1. Ohmic cell; 2. Voltage variable; 3. Thermocouple; 4 Power supply; 5.Breaker; 6. Fuse; 7.Voltage transmitter;
8. Electric current transmitter; 9.Data acquisition unit; 10. RS-485; 11.Personal computer

ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าของ Sarang และคณะ (2008) [6] พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของอาหารจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้น Figure 3 แสดงค่าการนำไฟฟ้าของน้ำผลไม้ชนิดต่างๆ (น้ำแอปเปิ้ล น้ำพีช น้ำสับปะรด น้ำลูกแพร์และน้ำสตรอเบอร์รี่) ที่ช่วงอุณหภูมิ

25-140 องศาเซลเซียส พบว่าค่าการนำไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยที่น้ำสับปะรด และน้ำสตรอเบอร์รี่ มีค่าความเป็นกรดที่สูงจะมีอัตราการเพิ่มของค่าการนำไฟฟ้าได้ดีกว่า น้ำแอปเปิ้ล น้ำพีช และน้ำลูกแพร์ที่มีค่าความเป็นกรดต่ำ

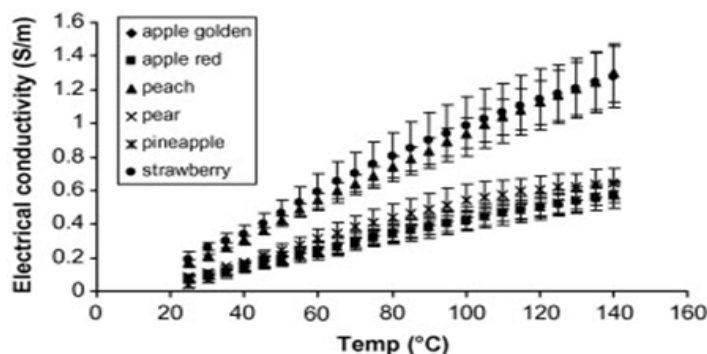


Figure 3 Electrical conductivity of fruits

(Remark: Sarang และคณะ, 2008) [6]

ทั้งนี้สามารถอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้โครงสร้างเซลล์เปลี่ยนแปลงโดยผนังเนื้อเยื่อที่มีโปรโตเพคตินเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างเกิดการเสถียรภาพ (protopectin breakdown) และอ่อนตัวลงจากการถูกทำลายด้วยความร้อน ทำให้น้ำในเนื้อเยื่อเซลล์ไหลผ่านออกมา โดยน้ำภายใต้เนื้อเยื่อเซลล์จะประกอบด้วยสารอาหาร เกลือแร่และไอออนจำนวนมาก ส่งผลทำให้มีการเคลื่อนที่ของไอออนมากขึ้นจึงช่วยกระตุ้นการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น จากปรากฏการณ์ดังกล่าวจึงทำให้อาหารมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่มากขึ้น โดยอัตราการเพิ่มของค่าการนำไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับอุณหภูมิ ซึ่งมีรูปแบบความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2 [11]

$$\sigma = B_1 T + C_1 \quad (2)$$

เมื่อ σ คือ ค่าการนำไฟฟ้าของอาหารเหลว (ซีเมนต่อเมตร, S/m), T คือ อุณหภูมิของอาหารเหลวในระหว่างการเกิดความร้อนแบบไอหุ้มมิด (องศา

เซลเซียส) และ B_1, C_1 คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าการนำไฟฟ้า

นอกจากค่าการนำไฟฟ้าของอาหารที่มีผลการเกิดความร้อนแบบไอหุ้มมิดแล้ว ยังมีผลของความชื้นสนามไฟฟ้าและความเข้มข้นของอาหาร ที่มีผลต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหารพบว่าเมื่อให้ความชื้นสนามไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นเช่นกัน สาเหตุอาจเป็นเพราะว่าการเพิ่มความชื้นของสนามไฟฟ้าเปรียบเสมือนการเพิ่มพลังงานให้กับระบบทำให้อาหารสามารถสร้างความร้อนได้อย่างรวดเร็ว ในขณะที่ความเข้มข้นของอาหารเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากกระแสไฟฟ้ามีความสามารถไหลผ่านอาหารที่มีความเข้มข้นสูงได้ดี Figure 4 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าของน้ำส้มเมื่อค่าความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปโดยอัตราการเพิ่มของค่าการนำไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า ซึ่งมีรูปแบบความสัมพันธ์ตามสมการที่ 3 [11,12]

$$\sigma (S/m) = D_1 (E)^{N_1} + B_2 T + C_2 \quad (3)$$

เมื่อ E คือ ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้า (โวลต์ต่อเซนติเมตร, V/cm), D_1 , N_1 , B_2 , C_2 คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าการนำไฟฟ้า

Assawarachan (2010) [7] ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ความเข้มข้น และความเข้มของสนามไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าในน้ำองุ่นแดง พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของน้ำองุ่นแดงจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและความเข้มข้นเพิ่มขึ้นโดยเมื่อมีความเข้มข้นหรือมีปริมาณของแข็งในอาหารมากขึ้นจะมีค่าการนำไฟฟ้าได้มากขึ้น เนื่องจากกระแสไฟฟ้าจะสามารถไหลผ่านในตัวกลางของแข็งได้ดีกว่าของเหลว ดังนั้นเมื่ออาหารมีค่าความเข้มข้นมากขึ้นจะทำให้กระแสไฟฟ้ามีพื้นที่ในการไหลผ่านในอาหารได้มากขึ้น ส่งผลให้มีคุณสมบัติค่าการนำไฟฟ้ามากขึ้น สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Drvishi และคณะ (2011) [13] ซึ่งศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ความเข้มข้น และความเข้มของสนามไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมะนาว ต่างจากผลการวิจัยของ Icier และ Ilcali (2005b) [12] ซึ่งศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า และปริมาณเนื้อสัมผัสที่ผสมในน้ำส้มที่ระดับ 0.2, 0.3, 0.4 0.5 และ 0.6 กรัมของเนื้อสัมผัสต่อน้ำหนักของน้ำส้มทั้งหมด พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของ

น้ำส้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและความเข้มของสนามไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแต่จะมีค่าการนำไฟฟ้าลดลงเมื่อน้ำส้มมีปริมาณเนื้อสัมผัสมากขึ้น (Figure 5) ทั้งนี้เนื่องจากส่วนประกอบของเนื้อสัมผัสและเกร็ดสัมผัสที่ผสมจะมีโครงสร้างเป็นเส้นใยเนื้อสัมผัส (Fiber) ซึ่งเป็นฉนวนไฟฟ้า ปริมาณเนื้อสัมผัสที่ผสมจะเป็นตัวขัดขวางการไหลของกระแสไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าจึงไหลผ่านได้ในส่วนที่เป็นเฟสของเหลว ดังนั้นในกรณีของน้ำส้มที่มีปริมาณเนื้อสัมผัสผสมในปริมาณที่มากและมีน้ำส้มที่เป็นเฟสของเหลวที่สามารถนำไฟฟ้ามีปริมาตรน้อยส่งผลให้ช่องทางการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าลดลง ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำส้มที่มีปริมาณเนื้อสัมผัสในปริมาณที่น้อยจะมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงกว่า ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำส้มที่มีปริมาณเนื้อสัมผัสในปริมาณที่มาก โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ความเข้มของสนามไฟฟ้า และสัดส่วนของแข็งที่แขวนลอยในน้ำผลไม้ ซึ่งมีรูปแบบความสัมพันธ์ตามสมการที่ 4 [13]

$$\sigma (S/m) = E_1(Mx100)^{N_3} + D_2(V/cm)^{N_2} + B_3T + C_3 \quad (4)$$

เมื่อ M คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของแข็งที่แขวนลอยในน้ำผลไม้ (กรัมของเนื้อผลไม้ต่อกรัมของน้ำผลไม้), E_1 , D_2 , N_2 , N_3 , B_3 , C_3 คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าการนำไฟฟ้า

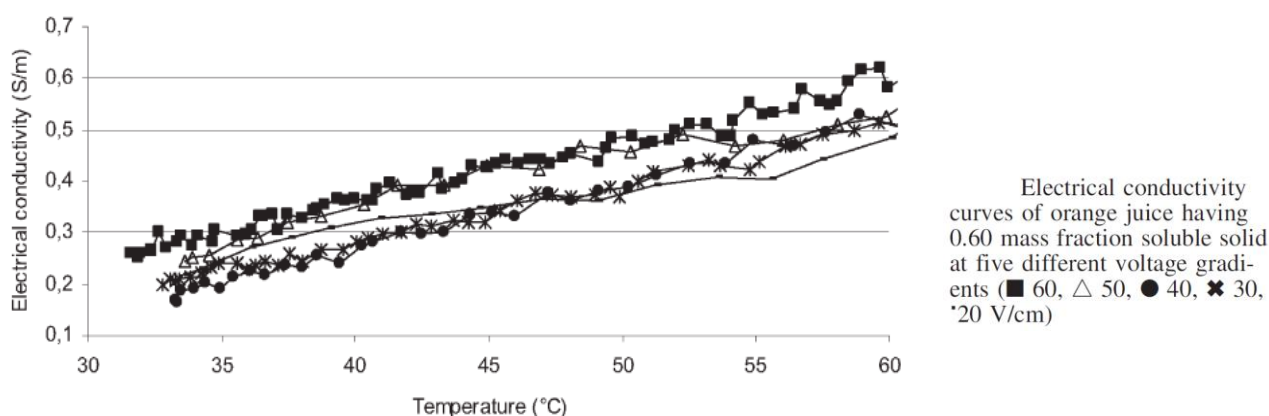


Figure 4 Electrical conductivity curves of orange juice having 0.60 mass fraction soluble solid at five different voltage gradients [12]

rittichai@mju.ac.th

*อาจารย์ประจำ ดร., สาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

*Lecturer Dr, Food Engineering Program, Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University

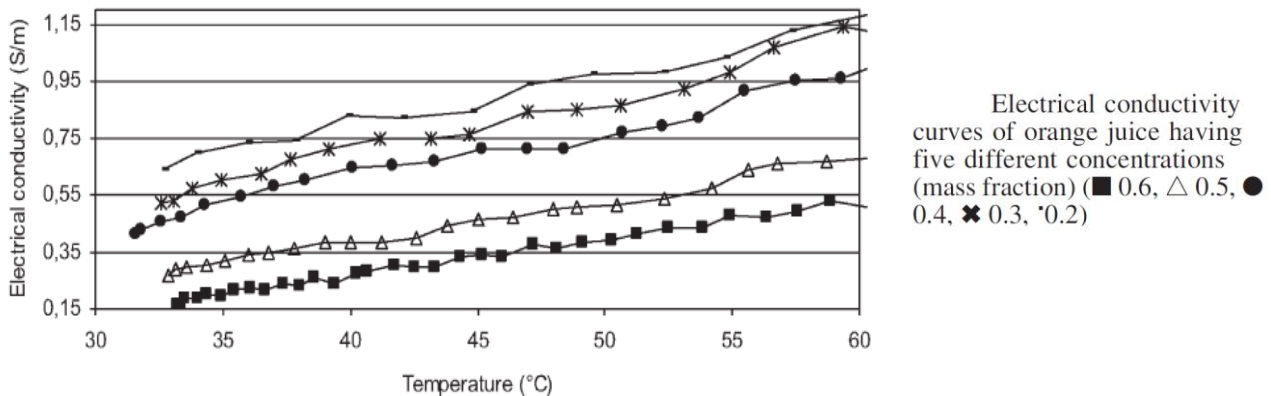


Figure 5 Electrical conductivity curves of orange juice having five different concentrations

(Remark: Icier และ Ilicali, 2005b) [12]

3. การประยุกต์วิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกในระดับอุตสาหกรรม

การเกิดความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกมีข้อได้เปรียบเชิงวิศวกรรมหลายประการทำให้กวีจัยในกลุ่มเทคโนโลยีและวิศวกรรมอาหารต่างให้ความสนใจศึกษาการให้ความร้อนเพื่อการแปรรูปอาหาร เช่น กระบวนการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิสูงแต่ใช้เวลาสั้น (High Temperature Short Time; HTST) และการแปรรูปแบบอาหารปลอดเชื้อ (aseptic processing) บริษัท APV Baker ประเทศอังกฤษได้ออกแบบและสร้าง

เครื่องต้นแบบของกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกสำหรับการแปรรูปอาหารแบบปลอดเชื้อระบบต่อเนื่อง (continuous aseptic processing) โดยออกแบบระบบสร้างความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกเป็นท่อทรงสี่เหลี่ยม [14] เมื่ออาหารเหลวไหลเข้าสู่ท่อทรงสี่เหลี่ยมระบบปล่อยกระแสไฟฟ้าลงสู่อาหารและเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน จนอาหารได้รับความร้อนตามกำหนดไว้ อาหารจะถูกส่งไปยังถังปลอดเชื้อเพื่อรอการบรรจุ (Figure 6)

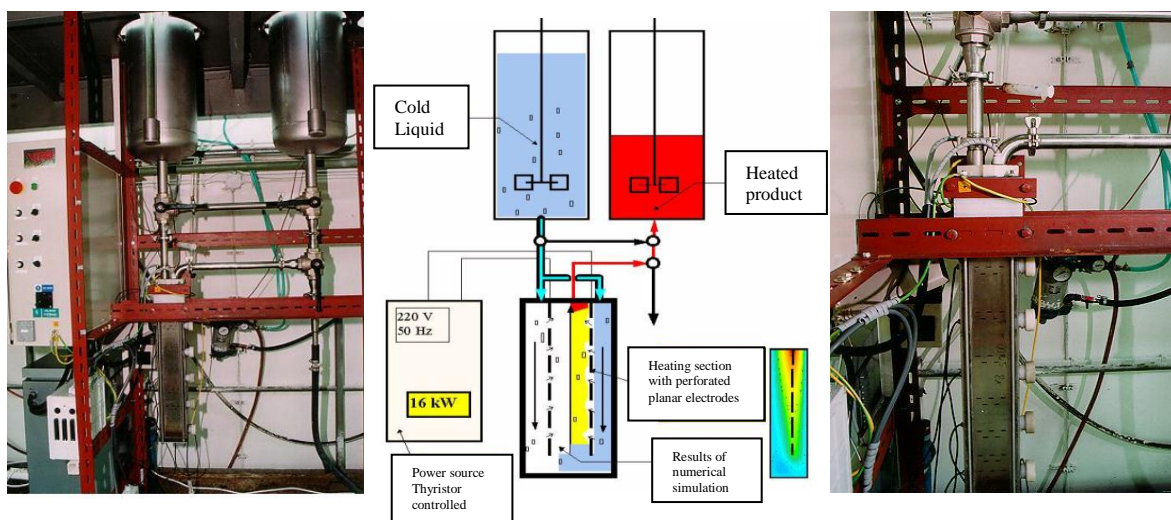


Figure 6 Ohmic sterilization of liquid food by means of a continuous pilot scale

(Remark: Zitny และคณะ, 2003) [14]



Figure 7 Aseptic continuous flow ohmic heating system

(Remark: Ramaswamy และคณะ, 2005) [15]

รายงานของ Ramaswamy และคณะ (2005) [15] มหาวิทยาลัย Ohio State ประเทศสหรัฐอเมริกาได้ระบุว่ามีการนำเครื่องแปรรูปแบบปลอดเชื้อด้วยกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกระบบต่อเนื่อง (Figure 7) ใช้ในอุตสาหกรรม และแปรรูปอาหารแบบปลอดเชื้อระบบต่อเนื่องในผลิตภัณฑ์แบบพวบน้ำผลไม้เข้มข้น น้ำซूप โดยส่งไปขายในประเทศอิตาลี กรีซ ฝรั่งเศส เม็กซิโก และ ญี่ปุ่น ในขณะที่ในประเทศอังกฤษใช้ในการพาสเจอร์ไรซ์ไข่ไก่ (liquid eggs) Pataro และคณะ (2011) [16] ศึกษากระบวนการแปรรูปน้ำเชื่อมจากแอฟริคอตแบบปลอดเชื้อด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกระบบต่อเนื่อง พบว่าน้ำเชื่อมจากแอฟริคอตมีอายุการเก็บมากกว่า 52 สัปดาห์ การพัฒนาวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกจึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้ในกระบวนการให้ความร้อนในการแปรรูปอาหาร และการแปรรูปอาหารแบบปลอดเชื้อระบบต่อเนื่องได้เป็นอย่างดี แต่ในขณะที่การแปรรูปด้วยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีข้อจำกัดหลายประการ

เช่น ประสิทธิภาพต่ำในการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งความร้อนไปสู่อาหาร จึงใช้เวลาในการให้ความร้อนที่ยาวนาน กว่าที่จุดร้อนซ้ำที่สุดในอาหารจะได้รับความร้อนตามสภาวะที่กำหนด ส่งผลเสียต่อคุณภาพของอาหาร ทั้งในด้านคุณลักษณะทางกายภาพ (สี กลิ่น เนื้อสัมผัส) คุณค่าทางโภชนาการและคุณภาพทางประสาทสัมผัสของอาหารจากการได้รับความร้อนเป็นเวลานาน จะส่งผลต่ออัตราการเสื่อมสลายของรงควัตถุในอาหาร รวมถึงการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลเนื่องจากความร้อนที่สูงและเป็นเวลานาน แต่การเกิดความร้อนแบบโอห์มมิกมีอัตราการเกิดความร้อนที่รวดเร็วและเกิดขึ้นภายในตัวอาหารเอง จึงสามารถช่วยลดสูญเสีย คุณลักษณะทางกายภาพ (สี กลิ่น เนื้อสัมผัส) คุณค่าทางโภชนาการและคุณภาพทางประสาทสัมผัสของอาหารได้ดี (Figure 8) โดยผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านการแปรรูปด้วยวิธีโอห์มมิกจะคุณภาพที่ดีกว่าการแปรรูปด้วยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน



Figure 8 Aseptic food from ohmic processing

(Remark: Ramaswamy และคณะ, 2005) [15]

Icier และคณะ (2006) [17] นำวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก (ความเข้มสนามไฟฟ้า 50 โวลต์ต่อเซนติเมตร) ไซ้บับยังเอนไซม์เพอร์ออกซิเดส (peroxidase inactivation) ถั่วพีตีป่น (pea puree) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาเพียง 54 วินาที เมื่อเปรียบเทียบการให้ความร้อนเพื่อการยับยั้งเอนไซม์ด้วยการแช่ในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้เวลาประมาณ 3-5 นาทีเพื่อให้ถั่วพีตีป่นมีอุณหภูมิถึง 100 องศาเซลเซียส และใช้เวลาคงอุณหภูมิในอ่างน้ำร้อนอีก 300 วินาที ดังนั้นการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก จึงช่วยลดเวลาและพลังงานในกระบวนการลวกเพื่อไซ้บับยังเอนไซม์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่นเดียวกับรายงานวิจัยของ Jakob และคณะ (2010) [18] พบว่าการลวกด้วยวิธีโอห์มมิกสามารถยับยั้งเอนไซม์อัลคาไลน์ฟอสฟาเตส (alkaline phosphatase) เอนไซม์เพคตินเมทิลเอสเทอเรส (Pectin Methyl Esterase, PME) และเอนไซม์เพอร์ออกซิเดส (peroxidase) ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในนม น้ำผัก และผลไม้ได้ดีกว่าการให้ความร้อนโดยการแช่ในน้ำร้อนหรือการพ่นละอองไอน้ำ การประยุกต์วิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกในกระบวนการละลายอาหารแช่เยือกแข็งนับเป็นจุดเด่นที่น่าสนใจ เนื่องจากมีความเหมาะสมในด้านต่างๆ สามารถลดเวลาที่ใช้ในกระบวนการ และลดการเสื่อมเสียคุณภาพ อีกทั้งช่วยลดต้นทุนในกระบวนการละลายวัตถุดิบทางอาหารได้เป็นอย่างดี Ohtsuki (1993) [19] พบว่าการละลายอาหารแช่เยือกแข็ง (ปลาทูน่า เนื้อวัว และ ไข่) ด้วยวิธีโอห์มมิกสามารถช่วยลดเวลาในการละลายได้มากถึงร้อยละ 67-75 เมื่อเปรียบเทียบกับการละลายด้วยการแช่น้ำอุ่นในช่วงอุณหภูมิเดียวกัน และ Fuchigami และคณะ (1994) [20] ยังพบว่าวิธีการละลายด้วยการให้ความร้อนวิธีโอห์มมิกช่วยลดอัตราการทำลายของโครงสร้างเซลล์และรักษาสภาพของเนื้อสัมผัสได้อย่างดี Yun และคณะ (1998) [21] ศึกษาการละลายเนื้อเป็ดแช่เยือกแข็งด้วยการแช่ในน้ำและการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก ซึ่งพบว่าสามารถช่วยลดเวลาและประหยัดพลังงานใน

กระบวนการละลายเนื้อเป็ดแช่เยือกแข็งได้มากกว่าการแช่น้ำ นอกจากนี้ยังช่วยลดอัตราการสูญเสียน้ำหนักของเนื้อเป็ดแช่เยือกแข็ง (drip loss) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการละลาย แนวความคิดดังกล่าวได้รับการสนใจและถูกนำไปออกแบบเพื่อสร้างระบบการละลายอาหารแช่เยือกแข็งด้วยการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก แต่อย่างไรก็ตามค่าการนำไฟฟ้าของน้ำแข็งมีค่าประมาณ $0.5 - 6.7 \times 10^{-10}$ ซีเมนต่อเมตร [22] ซึ่งมีค่าต่ำมากกระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลเข้าสู่ น้ำแข็งได้ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของอาหารแช่เยือกแข็งซึ่งน้ำในองค์ประกอบเป็นน้ำแข็งมีค่าการนำไฟฟ้าต่ำ และกระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่อาหารแช่เยือกแข็งได้เพียงเล็กน้อย แต่เมื่อเวลาผ่านไปเพียงเล็กน้อยน้ำแข็งที่ชั้นผิวของอาหารแช่เยือกแข็งเริ่มเกิดการละลายและเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว กระแสไฟฟ้าสามารถไหลเข้าสู่อาหารแช่เยือกแข็งได้มากขึ้น อัตราการเกิดร้อนและการละลายจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และน้ำแข็งที่ละลายเป็นของเหลวที่ชั้นผิวของจะเป็นตัวกลางในการนำความร้อนเข้าสู่ใจกลางและจุดที่ร้อนช้าที่สุดของของอาหารแช่เยือกแข็ง (cold spots) ดังนั้นเมื่อน้ำแข็งในองค์ประกอบของอาหารแช่เยือกแข็งเริ่มเกิดการละลายค่าการนำไฟฟ้าของอาหารแช่เยือกแข็งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วส่งผลให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลเข้าสู่อาหารได้มากขึ้นอัตราการเกิดความร้อนสูงขึ้นอย่างมาก และการละลายจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่าการเกิดความร้อนแบบรันอะเวย์ (runaway heating) การละลายอาหารแช่เยือกแข็งด้วยวิธีโอห์มมิกจึงสามารถใช้แทนระบบการละลายด้วยวิธีการแช่ในน้ำสามารถช่วยประหยัดเวลา และลดปริมาณน้ำที่ใช้ในการละลายของระบบเดิม ซึ่งการละลายด้วยวิธีโอห์มมิกสามารถช่วยลดปรากฏการณ์การรวมตัวผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดเล็กเป็นผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ (recrystallization) ซึ่งผลของการเกิดผลึกน้ำขนาดใหญ่จะไปทำลายโครงสร้างผนังของเนื้อเยื่อเซลล์ในอาหารเกิดการฉีกขาด ของเหลวต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยสารอาหารที่สำคัญภายในโครงสร้างเซลล์จะไหลซึม

rittichai@mju.ac.th

*อาจารย์ประจำ ดร., สาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

*Lecturer Dr, Food Engineering Program, Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University

ออกมาส่งผลกระทบต่อการสูญเสียน้ำหนักในระหว่างการละลายอาหารแช่เยือกแข็ง (drip loss) ซึ่งเป็นผลเสียต่อ สี รส และการสูญเสียสารอาหาร

Roberts (1998) [23] ออกแบบเครื่องการละลายด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกใช้ในการละลายปลาทะเลแช่เยือกแข็ง เพื่อใช้งานในระดับอุตสาหกรรม พบว่าสามารถใช้แทนวิธีการละลายโดยการแช่ในน้ำ วิธีดังกล่าวใช้พื้นที่และน้ำปริมาณมากและมีต้นทุนการดำเนินการที่สูงมากซึ่งประกอบด้วยต้นทุนของค่าน้ำที่ใช้ในการละลายและต้นทุนการบำบัดน้ำทิ้งหลังจากกระบวนการละลาย น้ำทิ้งหลังการละลายด้วยวิธีการแช่ในน้ำจะมีอัตราการเน่าเสียที่สูงมาก เนื่องจากน้ำที่แช่ในการละลายมีการปนเปื้อนของโปรตีนจากปลา เช่น เลือดหรือเมือกปลาจำนวนมาก โดยเครื่องละลายด้วยวิธีโอห์มมิกสามารถช่วยลดต้นทุนได้มากถึงร้อยละ 48 หรือคิดเป็น 95,000 เหรียญสหรัฐต่อปีและลด

ปริมาณน้ำที่ใช้ในกระบวนการละลายได้มากถึง 12.6 พันล้านลิตรต่อปี

Miao และคณะ (2007) [24] ศึกษาและเปรียบเทียบอัตราการละลายของซูริมิเนื้อปลาชาติขนาด 25 กิโลกรัม และถูกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -23 ± 1 องศาเซลเซียส ระหว่างวิธีการแช่ในอ่างน้ำอุ่นที่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำตลอดเวลากับวิธีโอห์มมิกซึ่งแช่ตัวอย่างในอ่างที่มีสารละลายเกลือพบว่าอัตราการละลายด้วยวิธีโอห์มมิกที่แช่ในสารละลายเกลือที่มีความเข้มข้น ร้อยละ 2 มีอัตราที่เร็วกว่าวิธีแช่ในน้ำอุ่นถึง 9.83 เท่า (Figure 9A) และหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการละลายกับปริมาณความเข้มข้นของสารละลายเกลือ (Figure 9B) พบว่าอัตราการละลายของซูริมิเนื้อปลาชาติที่แช่ในอ่างที่มีความเข้มข้นของสารละลายเกลือสูงจะมีอัตราการละลายที่รวดเร็วกว่าอ่างที่มีความเข้มข้นของสารละลายเกลือต่ำโดยมีความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการละลายและความเข้มข้นของสารละลายเกลือในรูปแบบสมการเส้นตรง

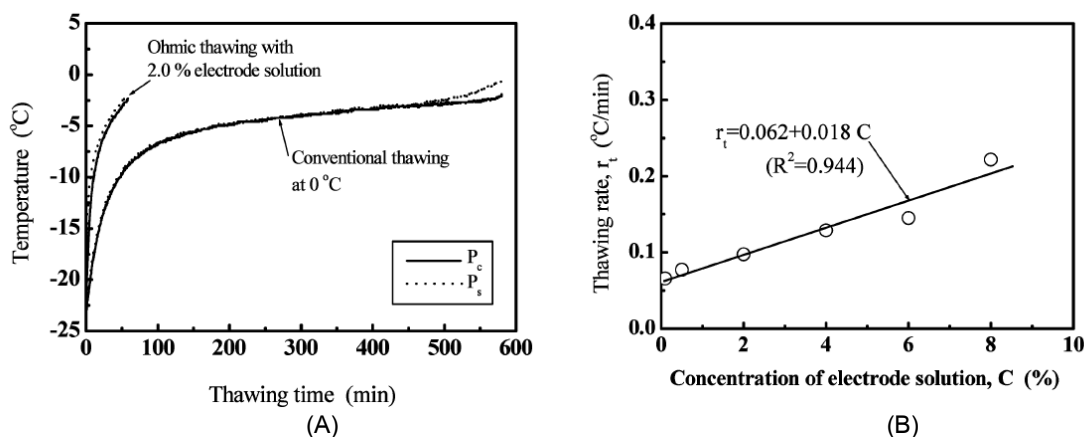


Figure 9 (A) Changes of surimi temperature during the ohmic and conventional thawing

(B) Effect of the concentration of electrode solution on thawing rate in ohmic thawing

(Remark: Miao และคณะ, 2007) [24]

สรุป

การให้ความร้อนแบบโอห์มมิกซึ่งเป็นหนึ่งในนวัตกรรมการให้ความร้อนในเทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร ด้วยวิธีการปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าสู่อาหาร อัตราการเกิดความร้อนขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในอาหาร ซึ่งจะแปรผันตรงกับคุณสมบัติค่าการนำ

ไฟฟ้าของอาหารชนิดนั้นๆ จุดเด่นที่สำคัญของวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก สามารถเกิดความร้อนได้ภายในตัวของมันเอง มีอัตราการเกิดความร้อนที่รวดเร็วและประสิทธิภาพในการกระจายของความร้อนที่ดี ซึ่งเป็นจุดเด่นที่ดีกว่ากระบวนการให้ความร้อนที่ใช้ในอุตสาหกรรมปัจจุบัน กระบวนการสร้างความร้อนแบบ

โอห์มมิกจึงเหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการให้ความร้อนในการแปรรูปอาหาร เช่น การลวก (blanching) กระบวนการพาสเจอร์ไรส์ (pasteurization) และ กระบวนการสเตอริไลซ์ (sterilization) มีการพัฒนาและสร้างระบบการแปรรูปอาหารแบบปลอดเชื้อ (aseptic processing) ด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก และนำมาประยุกต์ใช้เพื่อช่วยยับยั้งเอนไซม์ด้วยความร้อนในผักและผลไม้ที่มีประสิทธิภาพ นอกจากนี้วิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกยังถูกนำมาใช้ในการลดเวลาในการละลายอาหารแช่เยือกแข็งประเภทต่างๆ (thawing process) สามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการละลายจากการใช้น้ำและการบำบัดน้ำเสียได้อย่างดี กระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกจึงเป็นเทคโนโลยีการให้ความร้อนที่เหมาะสมและสามารถพัฒนาไปสู่การแปรรูปในระดับอุตสาหกรรม

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล นุ่มหอม รองศาสตราจารย์ ดร. สุวิทย์ เตีย และ รองศาสตราจารย์ ดร.ทิพาพร อยู่วิทยา ที่ให้การอบรมสั่งสอนและขัดเกลาความคิดสร้างสรรค์ในการทำงานวิจัย และการเขียนบทความวิชาการต่างๆ ตลอดจนการปลูกฝังจรรยาบรรณของการเป็นผู้ให้ความรู้

เอกสารอ้างอิง

- [1] อรรถพล นุ่มหอม และฤทธิชัย อัครราชันย์. (2550). คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า พลังงานความร้อนรูปแบบใหม่. Food Focus Thailand Magazine. 2(16): 28-33.
- [2] Meredith, R. (1998). Electrical Volumetric Heating: Ohmic Heating. Engineers' Handbook of Industrial Microwave Heating. London: The Institution of Electrical Engineers.

- [3] วิไล รังสาดทอง. (2547). เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. (พิมพ์ครั้งที่ 4). กรุงเทพมหานคร: บริษัท เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล พับลิเคชัน จำกัด.
- [4] Assawarachan, R. (2005). Innovative Process Heating by Electrotechnologies, Special Study Report. Bangkok: Asian Institute of Technology.
- [5] อรรถพล นุ่มหอม และฤทธิชัย อัครราชันย์. (2551). กระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก. Food Focus Thailand Magazine. 3(27): 48- 53.
- [6] Sarang, S., Sastry, S.K. and Knipe, L. (2008). Electrical conductivity of fruits and meats during ohmic heating. Journal of Food Engineering. 87: 351-356.
- [7] Assawarachan, R. (2010). Estimation model for electrical conductivity of red grape juice. International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 3(2): 52-57.
- [8] ฤทธิชัย อัครราชันย์, อุมพร อุประ และอรรถพล นุ่มหอม. (2554). คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของน้ำองุ่นแดงระหว่างกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก. ในประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยครั้งที่ 12. ประจำปี 2554. 1 เมษายน 2554. โรงแรมชมจันทร์ พัทยา รีสอร์ท, จังหวัดชลบุรี.
- [9] Assawarachan, R. and Noomhorm, A. (2008). Application electromagnetic radiation technologies in food processing: Paper presented at The 2nd R&DID* International Conference – 2008; University of the Thai Chamber of Commerce, Bangkok, Thailand; Theme: Global Competitiveness Through Research and Development, Innovation, Design.

- [10] Lamsal, B.P. (1994). Investigation of the factors affecting the electrical conductivity of selected fruit juice during ohmic heating. Master's Thesis of Asian Institute of Technology: AE 94-10.Thailand.
- [11] Icier, F and Ilicali, C. (2005a). Temperature dependent electrical conductivities of fruit purees during ohmic heating. *Food Research International*. 38: 1135-1142.
- [12] Icier, F and Ilicali, C. (2005b). The effects of concentration on electrical conductivity of orange juice concentrates during ohmic heating. *European Food Research and Technology*. 220: 406-414.
- [13] Darvishi, H., Nargesi, F., Hadi Khoshtaghaza, M and Torang, H. (2011). Ohmic processing: temperature electrical conductivities of lemon juice. *Modern Applied Science*. 5(1): 209-215.
- [14] Zitny, R. Sestak, J. Dostal, M and Zajicek, M. (2003). Continuous direct ohmic heating of liquids. Retrieved May 20, 2011 from <http://www.fsid.cvut.cz/~zitnyrud/zitny/ohmic.htm>.
- [15] Ramaswamy, R., Balasubramaiam, V.M. and Sastry, S.K. (2005). Ohmic Heating of Foods Fact Sheet for Food Processor, In Extension Factsheet. *Food Science and Technology*, The Ohio State University extension, USA. Retrieved May 20, 2011 from <http://ohioline.osu.edu/fse-fact/0004.html>.
- [16] Pataro, G., Donsi, G. and Ferrari, G. (2011). Aseptic processing of apricots in syrup by means of continuous pilot scale ohmic heating. *LWT-Food Science and Technology*. 44: 1546-1554.
- [17] Icier, F., Yildiz, H. and Baysal, T. (2006). Peroxidase inactivation and colour changes during ohmic blanching of pea puree. *Journal of Food Engineering*. 74: 424-429.
- [18] Jakób, A., Bryjak, J., Wójtowicz, H., ILLeová, V., Annus, J. and Polakovic, M. (2010). Inactivation kinetics of food enzymes during ohmic heating. *Food Chemistry*. 123: 369-376.
- [19] Ohtsuki, T. (1991). Process for thawing foodstuffs. European Patent 0409430.
- [20] Fuchigami, M., Hyakuimoto, N., Miyazaki, K., Nomura, T. and Sasaki, J. (1994). Texture and histological structure of carrots frozen at a programmed rate and thawed in an electrostatic field. *Journal of Food Science*. 59(6): 1162-1167.
- [21] Yun, C.G., Lee, D.H. and Park, J.Y. (1998). Ohmic thawing of a frozen meat chunk. *Journal of Food Science and Technology (Korean)*. 30(4): 842-847.
- [22] Gross, G.W., Hayslip, I.C. and Hoy, R.N. (1978). Electrical conductivity and relaxation in ice crystals with known impurity content. *Journal of Glaciology*. 21(85): 143-160.
- [23] Roberts, J.S., Murat, O. B., Rudy, Z. and Diego, L. (1998). Design and testing of prototype ohmic thawing unit. *Computers and Electronics in Agriculture*. 19(2): 211-222.
- [24] Miao, Y., Chen, J.Y. and Noguchi, A. (2007). Studies on ohmic thawing of frozen surimi. *Food Science and Technology Research*. 13(4): 296-300.