



การพัฒนาและปัจจัยที่มีผลต่อการละลายเนื้อไก่แช่แข็งด้วยวิธีเทอร์โมอะคูสติก

Improvement and Effecting Factors of Thawing of Frozen Chicken by Thermoacoustic Method

ฤทธิชัย อัสวราชันย์^{1*}, น้ำฝน ไชยลังกา¹, ปองพล สุริยะกันธร¹

Rittichai Assawarachan^{1*}, Namphon Chailungka¹, Pongpon Suriyakunthorn¹

¹สาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ สันทราย เชียงใหม่ 50290

¹Department of Food Engineering, Faculty of Engineering and Agro-Industry; Maejo University, Sansai, Chiang Mai, Thailand 50290

*Corresponding author: Tel: +66-8-5704-9146, Fax: +66-34-351-896, E-mail: rittichai@mju.ac.th, rittichai.assawarachan@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาวิธีการละลายเนื้อไก่แช่แข็งที่แตกต่างกันจำนวน 3 วิธี ได้แก่ การละลายแบบการพาโดยธรรมชาติ การละลายโดยการแช่น้ำ และการละลายโดยการแช่น้ำร่วมกับคลื่นอะคูสติกหรือวิธีเทอร์โมอะคูสติก ผลการศึกษาพบว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยในระหว่างการแช่แข็งเนื้อไก่ ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 10°C ลดลงจนเหลือ -22°C ใช้เวลาประมาณ 492 minutes หรือคิดเป็นอัตราการแช่แข็งที่ประมาณ 0.0650°C minute⁻¹ และเนื้อไก่มีจุดเยือกแข็งประมาณ -0.18°C เวลาที่โมเลกุลของน้ำในโครงสร้างเปลี่ยนเป็นผลึกน้ำแข็งทั้งหมด ใช้เวลาประมาณ 250 minutes อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างการละลายและเวลาในการละลายที่อุณหภูมิเริ่มต้น -22°C จนอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10°C โดยวิธีเทอร์โมอะคูสติกเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการละลายที่ดีที่สุด มีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างการละลายที่เร็วกว่าวิธีการละลายแบบอื่น และปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดที่อยู่รอดในระหว่างการละลายน้อยที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.1772°C minute⁻¹, 7.05 minutes และ 0.02 × 10⁵ cfu g⁻¹ ตามลำดับ การหารูปแบบสมการความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเนื้อไก่แช่แข็งด้วยวิธีเทอร์โมอะคูสติกด้วยเทคนิคการหาพื้นผิวผลตอบสนองแบบสามมิติเพื่อหารูปแบบความสัมพันธ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ อัตราการสูญเสียน้ำหนักในระหว่างการละลาย ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดที่อยู่รอดในระหว่างการละลาย ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการละลาย ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ (°C) และระดับความถี่ (Hz) ซึ่งจะเป็นรูปแบบสมการที่เหมาะสมและสามารถทำนายได้แม่นยำ

คำสำคัญ: เนื้อไก่, วิธีการละลาย, เทอร์โมอะคูสติก

Abstract

This study was aim to investigate three different thawing processes of frozen chicken which were thawing in air at ambient temperature, in water and in water with acoustic wave assisted or thermoacoustic. The results showed that it took 492 minutes for decreasing the chicken temperature from 10°C to -22°C during freezing. The freezing rate was 0.0650°C minute⁻¹, the freezing point was -0.18°C and the freezing time were 250 minutes. The thermoacoustic assisted thawing process at 50°C and 1,500 Hz resulted in the highest thawing rate of 2.1772°C minute⁻¹, the shortest thawing time of 7.05 minutes and the lowest total aerobic microorganism growth (Total Plate Count) of 0.02 × 10⁵ cfu g⁻¹. The 3-D response surface plot and the contour plot derived from the mathematical models were applied to determine the thawing quality prediction equations. The Response surface analysis (3-D) showing the effect of thawing temperature (°C) and ultrasonic frequency (Hz) on the response the change in temperature profile of thawing process drip loss total plate count or aerobic plate count and thawing energy during ultrasonic thawing, which is well in close agreement with the value predicted by the model.

Keywords: Frozen Chicken, Thawing Processes, Thermoacoustic

1 บทนำ

การละลายอาหารแช่แข็งเป็นขั้นตอนในการเตรียมที่สำคัญอย่างยิ่งในการแปรรูปอาหาร ปัจจุบันวิธีการละลายที่ใช้ในระดับอุตสาหกรรม ได้แก่ การปล่อยให้เกิดการละลายที่อุณหภูมิห้อง และการแช่ในน้ำเพื่อให้เป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน ซึ่งทั้งสองวิธีมีหลักการที่ง่ายและไม่ซับซ้อน แต่ใช้เวลาในการละลายที่ยาวนาน และส่งผลกระทบต่อการใช้สูญเสียคุณภาพของอาหารอย่างมาก เกิดการสูญเสียน้ำหนักในระหว่างการละลาย การเสื่อมเสียของคุณภาพสีและเนื้อสัมผัส รวมทั้งการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ นอกจากนี้ยังเสี่ยงต่อการปนเปื้อนสารพิษจากการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ในระหว่างการละลายที่ยาวนาน (Shirai and Yoshikawa, 1999)

การละลายอาหารแช่แข็ง สามารถแบ่งออกได้ 2 วิธีการตามลักษณะของกลไกการถ่ายเทความร้อนในระหว่างการละลาย ได้แก่ การใช้ตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนสู่ผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นวิธีการแบบดั้งเดิม และการสร้างความร้อนให้เกิดขึ้นภายในผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ (ฤทธิชัย, 2546) แต่ในปัจจุบันวิธีการละลายอาหารแช่แข็งในอุตสาหกรรมแปรรูปในประเทศไทยนั้น ยังใช้การละลายด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม เนื่องจากมีการควบคุมการทำงานที่ง่าย และค่าใช้จ่ายต่ำ เช่น การละลายปลาแช่แข็งด้วยวิธีการแช่ในบ่อน้ำ โดยใช้เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน หรือที่เรียกว่าการละลายโดยใช้อากาศเป็นตัวกลาง เช่น การวางซูริมิแช่แข็งทิ้งไว้ให้เกิดการละลายตามธรรมชาติ วิธีการละลายแบบดั้งเดิมนี้มีอัตราการละลายช้าและใช้เวลานาน และใช้พื้นที่เป็นจำนวนมาก ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักของอาหารระหว่างการละลาย เนื่องจากในระหว่างการละลายผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กที่อยู่รอบๆ โครงสร้างเซลล์ในอาหารจะรวมตัวกันเป็นผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ซึ่งแทรกอยู่ระหว่างโครงสร้างเซลล์และคมของผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจะทำให้ลายผนังโครงสร้างเซลล์ในอาหาร ส่งผลทำให้ของเหลวภายในเซลล์เกิดการสูญเสีย หรือการสูญเสียน้ำหนักในระหว่างการละลาย (Drip Loss) ดังนั้นการละลายอาหารแช่แข็งที่มีอัตราการละลายแบบช้าๆ จึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้อาหารเกิดการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางกายภาพ และเคมีของอาหารแช่แข็งอย่างมาก นอกจากนี้ยังมีโอกาสเกิดความเสี่ยงของการปนเปื้อนสารพิษเนื่องจากการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ (Miao et al., 2007)

การละลายด้วยเทคโนโลยีเทอร์โมอะคูสติก (Thermoacoustic Thawing) เป็นแนวทางที่สำคัญในการพัฒนากระบวนการละลายด้วยวิธีการแช่ในน้ำเนื่องจากคลื่นความถี่จะเป็นแหล่งพลังงานกลชนิดที่ช่วยเร่งอัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำแข็ง โดยคลื่นเสียงสามารถช่วยเร่งอัตราการเปลี่ยนแปลงของผลึกน้ำแข็งและการถ่ายเทความร้อนจากภายในเนื้ออาหารแช่แข็ง ส่งผลให้ร้อยละของการเกิด Drip loss ลดลง กลไกการละลายของวัสดุอาหารแช่แข็ง เทียบกับการละลายโดยกลไกการถ่ายเทความร้อนแบบธรรมชาติ พบว่าการประยุกต์คลื่นเสียงมาใช้ในการละลายอาหารแช่แข็งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการละลาย (Mason et al., 1996) เนื่องจากคลื่นเสียงจะช่วยกระตุ้นการเปลี่ยนสถานะของผลึกน้ำแข็งภายในวัสดุอาหารแช่แข็งได้ดีกว่าการละลายโดยกลไกการถ่ายเทความร้อนแบบทั่วไป คลื่นเสียงจะเร่งการสั่นสะเทือนของผลึกน้ำแข็งให้เกิดการเสียดสีกันและเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวทันที (Figure 1) สามารถลดปรากฏการณ์การรวมตัวของผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กเป็นผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่หรือการตกผลึกใหม่ (Recrystallization) ซึ่งการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวจะส่งผลเสียต่อโครงสร้างเซลล์อาหารหรือการสูญเสียน้ำหนักของอาหารระหว่างการแช่แข็ง (Li and Sun, 2002) Kissam et al. (1981) พัฒนาการละลายด้วยคลื่นอะคูสติก (ความถี่ 1,500 Hz และระดับพลังงาน 60 W) ในการละลายปลาแช่แข็งรูปทรงสี่เหลี่ยม (ความหนา 91 mm และมีน้ำหนักประมาณ 12.7 kg) ร่วมกับการแช่ในน้ำ การละลายด้วยคลื่นอะคูสติกใช้เวลาในการละลายน้อยกว่าวิธีการแช่ด้วยน้ำเพียงอย่างเดียว 71%

สอดคล้องกับงานวิจัยของ Miles et al. (1999) ซึ่งศึกษาการละลายเนื้อวัวและเนื้อปลาแช่แข็งด้วยคลื่นอะคูสติก ที่ระดับความถี่ 500 kHz ซึ่งแม้ว่าการละลายด้วยเทคโนโลยีคลื่นความถี่จะช่วยลดเวลาในการละลาย และลดอัตราการสูญเสียคุณภาพของวัสดุอาหารแช่แข็งได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการละลายด้วยเทคโนโลยีคลื่นความถี่ยังมีอยู่น้อย ดังนั้นจุดประสงค์ของโครงการวิจัยนี้ ทำการเปรียบเทียบและศึกษาผลกระทบของวิธีการละลายเนื้อไก่แช่แข็ง ด้วยวิธีการละลายแบบต่างๆ ได้แก่ การละลายโดยใช้อากาศและน้ำเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน และการละลายโดยใช้เป็นตัวกลางร่วมกับคลื่นอะคูสติกหรือวิธีเทอร์โมอะคูสติก (Thermoacoustic Thawing) และศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเนื้อไก่ในระหว่างการละลายด้วยวิธีเทอร์โมอะคูสติก ได้แก่ อัตราการละลาย ร้อยละของ

การสูญเสียน้ำหนักในระหว่างการละลาย (Drip Loss) การอยู่รอดของจุลินทรีย์ในระหว่างการละลาย และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน

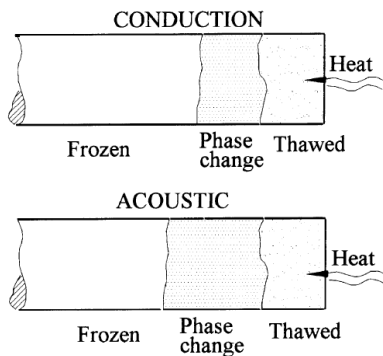


Figure 1 Effect of ice relaxation frequency acoustic waves on the phase change region as compared to passive conduction heating. (Li and Sun, 2002)

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 วัตถุดิบ

เนื้อไก่ที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดเป็นผลิตภัณฑ์เนื้อไก่อนามัย (Fresh Hygienic Chicken) ซึ่งผ่านการฆ่าและขึ้นส่วนตามมาตรฐานความปลอดภัยในการผลิตอาหาร ผ่านการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพจากบริษัท เอก-ชัย ดิสทริบิวชั่นซิสเต็ม จำกัด ในเครือเจริญโภคภัณฑ์ (Tesco Lotus) เนื้อไก่ที่ใช้ในการศึกษาในงานวิจัยนี้ เลือกใช้เนื้อไก่ส่วนเนื้ออกที่ลอกไขมันต่างๆ ออกจนหมด โดยเนื้ออกไก่มีพื้นที่หน้าตัดเฉลี่ย $72.22 \pm 1.62 \text{ cm}^2$ ความหนาเฉลี่ย $3.13 \pm 0.73 \text{ cm}$ และมีน้ำหนักเฉลี่ยเท่ากับ $190 \pm 5.86 \text{ g}$ ตามลำดับ และทดลองหาจุดที่ร้อนน้อยที่สุด (Cold Spot) พบว่าจุดที่ร้อนน้อยที่สุดอยู่ที่ตำแหน่งพิกัด (3.7 cm, 12 cm) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีความหนามากที่สุด ตาม Figure 2 นำตัวอย่างเนื้ออกไก่สอดเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิชนิด RT ชนิด pt 100 โอห์ม (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm) ที่ตำแหน่งที่ร้อนน้อยที่สุดในเนื้ออกไก่ และต่อเข้าเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Testo Model: 177-T3) จากนั้นนำไปแช่แข็งด้วยตู้แช่แข็ง (Sanyo Model: SF-C997 (GYN), ผลิตที่ประเทศไทย) ที่อุณหภูมิอากาศเย็นประมาณ $-30 \pm 2.8^\circ\text{C}$ บันทึกค่าอุณหภูมิของเนื้ออกไก่จนอุณหภูมิของเนื้ออกไก่มีค่าเท่ากับ $-22 \pm 0.5^\circ\text{C}$ จึงนำมาละลายด้วยวิธีการละลายโดยใช้อากาศและน้ำเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนและการละลายโดยใช้น้ำเป็นตัวกลางร่วมกับคลื่นอะคูสติกหรือวิธีเทอร์โมอะคูสติก

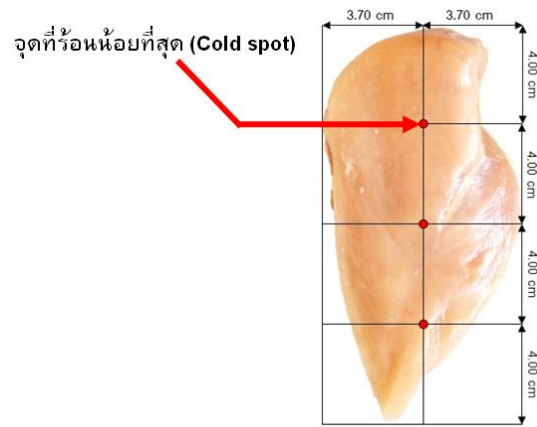


Figure 2 Frozen chicken of this experiment.

2.2 วิธีการละลาย

2.2.1 การละลายโดยใช้อากาศ

นำเนื้ออกไก่ที่แช่แข็งมาวางบนชั้นตะแกรงที่มีการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติแบบสม่ำเสมอจนอุณหภูมิของเนื้อไก่เพิ่มขึ้นถึง 10°C

2.2.2 การละลายโดยแช่ในอ่างน้ำอุ่น

นำเนื้ออกไก่ที่แช่แข็งจุ่มในอ่างน้ำอุ่นที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 50°C จนอุณหภูมิของเนื้อไก่เพิ่มขึ้นถึง 10°C

2.2.3 การละลายโดยแช่ในอ่างน้ำอุ่นร่วมกับคลื่นอะคูสติก

นำเนื้ออกไก่ที่แช่แข็งจุ่มในอ่างน้ำอุ่นที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 50°C และเปิดระบบสร้างคลื่นความถี่ ที่ระดับ 1,500 Hz จนอุณหภูมิของเนื้อไก่เพิ่มขึ้นถึง 10°C โดยทั้ง 3 วิธีทำการบันทึกค่าอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ เพื่อหาจุดหลอมเหลวและอัตราการแช่แข็งของเนื้ออกไก่

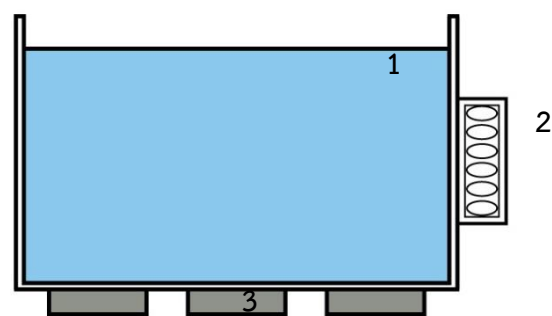


Figure 3 Schematic of thermoacoustic thawing.

(1) Water bath (2) Immersion heater (3) Frequency generator

2.3 ร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียในระหว่างการละลาย (Drip Loss)

การวัดปริมาณน้ำหนักของเนื้อไก่แช่เยือกแข็ง ซึ่งอยู่ในรูปร้อยละของอัตราส่วนของน้ำหนักเนื้อไก่ที่สูญเสียต่อน้ำหนักของ

เนื้อไก่เริ่มต้น ดังที่แสดงใน Eq. (1) (Miao et al., 2007; Bozkurt and İcier, 2009)

$$\text{Drip Loss} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ Drip Loss คือ ร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียในระหว่างการละลาย W_1 และ W_2 คือ น้ำหนักของเนื้อไก่ก่อนแช่แข็ง และหลังการละลาย (g) ตามลำดับ

2.4 การอยู่รอดของเชื้อจุลินทรีย์

การเปรียบเทียบคุณภาพทางชีวภาพของเนื้อไก่แช่แข็งในระหว่างการละลายด้วยวิธีต่างๆ โดยวิธีการตรวจหาปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดที่มีในอาหาร (Total Plate Count, TPC) การทดสอบ Total Plate Count หรือ Aerobic Plate Count เป็นการตรวจสอบเชื้อจุลินทรีย์ทั่วไป ที่เป็นเชื้อแบคทีเรียทุกชนิดที่ปนเปื้อนอยู่ในตัวอย่าง ซึ่งเจริญได้ทั้งบนผิวหน้าอาหาร ในอาหาร และใต้อาหาร เลี้ยงเชื้อที่ใช้ทดสอบ สามารถตรวจได้โดยการนับจำนวนโคโลนีของเชื้อที่เจริญในอาหารที่ใช้ทดสอบ ซึ่งจำนวนเชื้อแบคทีเรียทั่วไปนั้นใช้เป็นตัวชี้วัดอายุการเก็บรักษาสัตว์เลี้ยง ถ้ามีจำนวนเชื้อจุลินทรีย์สูง ผลิตภัณฑ์ก็จะมีอายุการเก็บรักษาสั้นลง แต่จำนวนเชื้อจุลินทรีย์ต่ำ ผลิตภัณฑ์ก็จะมีอายุการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ในการหาจำนวนจุลินทรีย์ในอาหารนั้น ไม่ได้กำหนดวิธีการมาตรฐานที่เฉพาะเอาไว้ แต่วิธีการมาตรฐานที่นิยมใช้ในหลายๆ ห้องปฏิบัติการ ได้แก่ วิธีการมาตรฐาน Bacteriological Analytical Manual (BAM) ขององค์การอาหารและยา ประเทศสหรัฐอเมริกา และวิธีมาตรฐาน AOAC Official Method of Analysis ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายขึ้นอยู่กับการปฏิบัติของแต่ละแห่งจะเลือกใช้ให้เหมาะสม โดยในงานทดลองนี้เลือกใช้วิธีการตามมาตรฐาน AOAC Official Method of Analysis 18th ed. (2010) ตัดชิ้นเนื้อไก่ที่ผ่านการละลายด้วยวิธีต่างๆ จำนวน 25 g ไปตรวจหาปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดด้วยการเพาะเชื้อแบบ Pour Plate โดยใช้อาหารเลี้ยงเชื้อชนิด Plate Count Agar (PCA) ยี่ห้อ Difco, BBL ผลิตที่ประเทศสหรัฐอเมริกา จำนวน 23.5 g ต่อน้ำกลั่น จำนวน 1 Liter และสารละลายที่ใช้เจือจาง คือ Peptone water และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 48 h จากนั้นนับจุลินทรีย์ที่ปรากฏบนจานเพาะเชื้อเพื่อวิเคราะห์ปริมาณการอยู่รอดของเชื้อจุลินทรีย์ของเนื้อไก่ในระหว่างการละลายด้วยวิธีต่างๆ

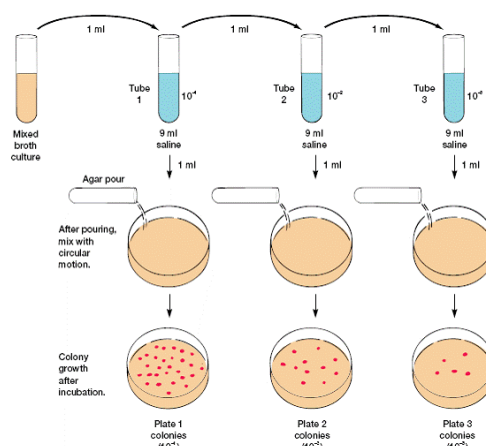


Figure 4 Determination of total plate count using bacteriological analytical manual.

2.5 การวิเคราะห์พลังงานในการละลาย

การวิเคราะห์ปริมาณความร้อนเป็นการวัดอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานสำหรับการสร้างความร้อนและคลื่นอะคูสติกที่ใช้ในการละลายเนื้อไก่แช่แข็ง โดยการใช้พาวเวอร์มิเตอร์แบบตัวเลข (Digital Power Meter) ยี่ห้อ PRIMUS Model: KM-16 เพื่อวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายไฟของอ่างอะคูสติกที่สร้างความร้อนและคลื่นความถี่ที่ระดับต่างๆ

2.6 การออกแบบการทดลอง

การศึกษาผลกระทบของวิธีการละลาย และผลกระทบของอุณหภูมิ และค่าความถี่ เพื่อหารูปแบบสมการความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงคุณภาพเนื้อไก่แช่แข็งในระหว่างการละลายด้วยวิธีเทอร์โมอะคูสติก จะถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) ซึ่งเป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ปัญหาโดยที่ผลตอบสนองที่สนใจขึ้นอยู่กับการทดลอง และมีการวัดผลกระทบที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบสนองนี้ แสดงใน Eq. (2)

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (2)$$

ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเนื้อไก่แช่แข็ง (y) เช่น อัตราการละลายเนื้อไก่แช่แข็ง (y_1) ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักในระหว่างการละลาย (y_2) ปริมาณจุลินทรีย์ที่อยู่รอดในระหว่างการละลาย (y_3) และปริมาณความร้อนที่ใช้ในการละลาย (y_4) ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับการทดลองของระดับความถี่ (x_1) และระดับอุณหภูมิ (x_2) โดยที่ ε คือ ค่าความผิดพลาดของผลตอบสนอง y ที่เป็นผลมาจากการทดลอง ถ้ากำหนดว่า $E(y) = f$

(x_1, x_2) ดังนั้นสามารถคำนวณพื้นผิวผลตอบสนอง (Response surface) ตาม Eq. (3) โดยมีรายละเอียดดังนี้

$$\eta = f(x_1, x_2) \quad (3)$$

การแสดงผลพื้นผิวผลตอบสนองในรูปแบบของกราฟฟิก โดยที่จะถูกพล็อตระหว่างระดับของ x_1 และ x_2 เพื่อที่จะช่วยให้มองเห็นรูปร่างของพื้นผิวผลตอบสนองได้ดียิ่งขึ้น โดยมากแล้วจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวผลตอบสนองในการสร้างเส้นโครงร่าง เช่นนี้ เส้นที่มีค่าของผลตอบสนองคงที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบ x_1 และ x_2 เส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวผลตอบสนองที่เท่ากันค่าหนึ่ง ในปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบสนองส่วนมาก ไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ ดังนั้น ขั้นตอนแรกก็คือต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และเซตของตัวแปรอิสระ ซึ่งตามปกติแล้วใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำๆ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบสนองมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่ใช้ในการประมาณความสัมพันธ์นี้ก็คือแบบจำลองกำลังหนึ่ง

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \varepsilon \quad (4)$$

เมื่อ $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_x$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ x_i คือ ตัวแปรอิสระ ส่วนค่า ε คือ ค่าความผิดพลาดของแบบจำลอง

3 ผลและวิจารณ์

3.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยในระหว่างการแช่แข็งและการละลาย

อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยของการแช่แข็งเนื้อไก่ด้วยเครื่องแช่แข็งแบบใช้ลมเย็น (Cooled Air Freezer) โดยใช้อุณหภูมิอากาศเย็นเท่ากับ -30°C อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเนื้อไก่จากอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 10°C ลดลงจนเหลือ -22°C ใช้เวลาประมาณ 492 ± 5.74 minutes หรือคิดเป็นอัตราการแช่แข็งที่ประมาณ $0.065 \pm 0.004^\circ\text{C minute}^{-1}$ ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิระหว่างการแช่แข็ง พบว่าเนื้อไรมีจุดเยือกแข็งประมาณ -0.18°C ซึ่งใกล้เคียงกับจุดเยือกแข็งของน้ำ การแช่แข็งที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างของงานวิจัยนี้ จัดเป็นระบบการแช่แข็งแบบเร็ว (Quick Freezing System) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอาหาร

ผ่านช่วงวิกฤตหรือช่วงที่โมเลกุลของน้ำในโครงสร้างเปลี่ยนเป็นผลึกน้ำแข็งทั้งหมด ใช้เวลาประมาณ 250 ± 3.68 minutes ดังแสดงใน Figure 5(a) โมเลกุลของน้ำในเนื้อไก่เริ่มเกิดนิวเคลียส (Nucleation) ซึ่งเป็นการเกิดนิวเคลียสรอบๆ อนุภาคที่แขวนลอยหรือผนังเซลล์ของโมเลกุลของน้ำ และโมเลกุลของน้ำในส่วนอื่นๆ จะเคลื่อนที่ไปยังนิวเคลียสที่มีอยู่เพื่อสร้างนิวเคลียสขึ้นมาใหม่และเปลี่ยนเป็นผลึกน้ำแข็ง (วิไล, 2547) จาก Figure 5(b), 5(c) และ 5(d) แสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเนื้อไก่แช่แข็งที่อุณหภูมิ -22°C จนมีอุณหภูมิประมาณ 10°C พบว่าวิธีการละลายแบบการพาโดยธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง การแช่น้ำที่อุณหภูมิ 50°C และวิธีเทอร์โมอะคูสติก มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิของเนื้อไก่แช่แข็งเท่ากับ 0.2095 ± 0.0071 , 1.6984 ± 0.0236 และ $2.1772 \pm 0.0752^\circ\text{C minute}^{-1}$ ตามลำดับ ในขณะที่เวลาในการละลายของวิธีการพาโดยธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง การแช่น้ำอุ่น และการแช่น้ำอุ่นร่วมกับคลื่นอะคูสติก มีค่าเท่ากับ 90.19 ± 2.62 , 9.07 ± 0.85 และ 7.05 ± 0.52 minutes ตามลำดับ จากปรากฏการณ์ดังกล่าว พบว่าการละลายด้วยวิธีเทอร์โมอะคูสติกจะช่วยเร่งอัตราการถ่ายเทความร้อนจากน้ำอุ่นเข้าสู่โครงสร้างเนื้อไ่มากขึ้น โดยคลื่นอะคูสติกจะทำให้โครงสร้างของผลึกน้ำแข็งเกิดการสั่นและแตกตัวออกจากกัน ช่วยลดการเรียงตัวของผลึกน้ำแข็งหรือการตกผลึกใหม่ (Recrystallization) ในระหว่างการละลาย เนื่องจากปรากฏการณ์แควิเทชัน (Cavitation) ซึ่งหมายถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นในตัวกลางที่ได้รับคลื่นอะคูสติกทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ (แรงกล) จากฟองอากาศ (Bubbles) เนื่องจากโครงสร้างของของเหลวที่ได้รับคลื่นอะคูสติก จะถูกบีบอัดและคลายตัวซ้ำไปมาเป็นจำนวนหลายพันรอบ (Athley and Crum, 1998) ส่วนการละลายด้วยวิธีการพาโดยธรรมชาติที่อุณหภูมิห้องใช้เวลาในการละลายที่นานกว่าวิธีอื่นจึงส่งผลทำให้เกิดการเรียงตัวของผลึกน้ำแข็งเกิดเป็นผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ ทำให้ใช้เวลาในการเปลี่ยนสถานะยาวนาน อย่างไรก็ตามวิธีการละลายโดยการแช่น้ำอุ่นร่วมกับคลื่นอะคูสติกก็มีอัตราการใช้พลังงานสำหรับการสร้างความร้อนและคลื่นอัลตราโซนิคมากกว่าวิธีการละลายวิธีอื่น โดยสามารถวัดอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดในระหว่างการละลายได้เท่ากับ 241.41 ± 0.64 kJ ในขณะที่วิธีการละลายโดยใช้การแช่น้ำอุ่น ใช้พลังงาน 222.06 ± 0.92 kJ

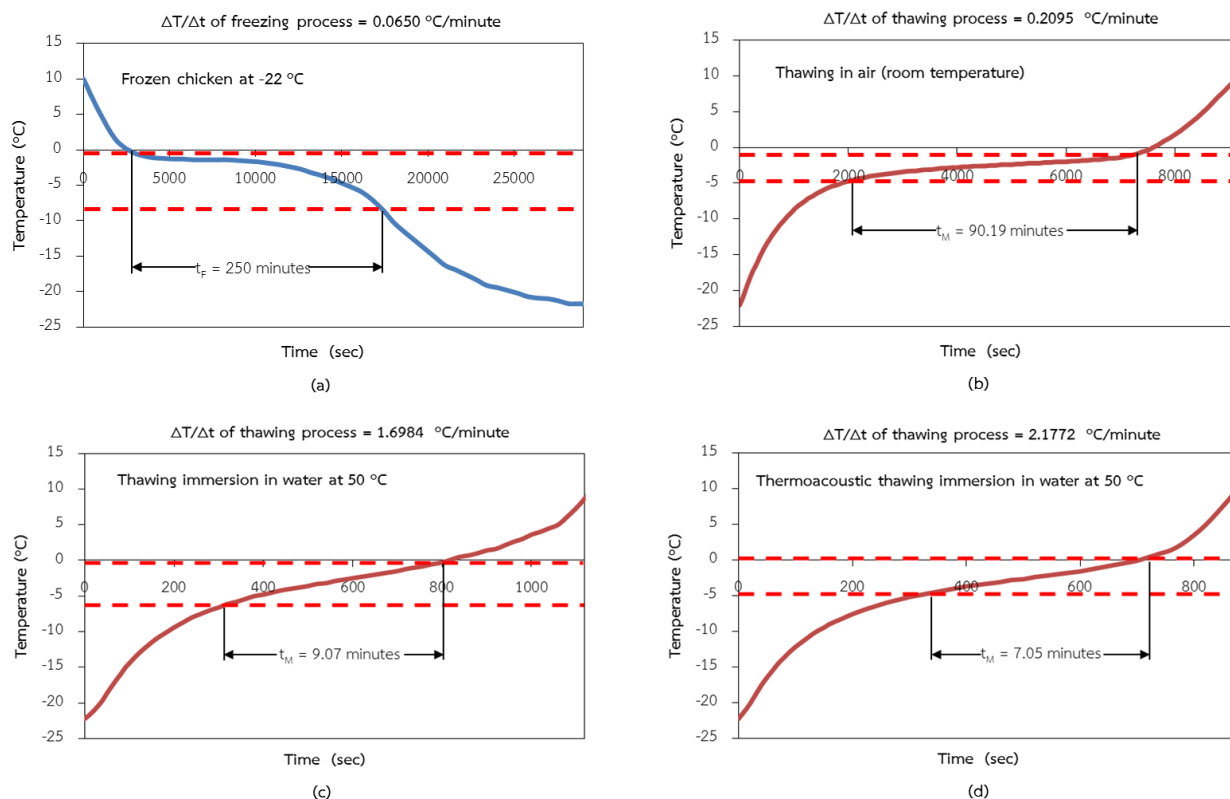


Figure 5 The change in temperature profile of freezing and three different thawing processes of freezing of chicken. (a) Temperature profile of freezing of chicken, (b) Temperature profile of air thawing, (c) Temperature profile of water thawing at 50°C, and (d) Temperature profile of thermoacoustic thawing at 50°C.

3.2 ผลกระทบของวิธีการละลายต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหาร

การศึกษาผลกระทบของวิธีการละลายต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเนื้อไก่แช่แข็ง โดยการศึกษาอัตราการสูญเสียน้ำหนักในระหว่างการละลาย (Drip Loss) และการอยู่รอดของจุลินทรีย์ในระหว่างการละลายของวิธีการละลายแบบการพาโดยธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง การแช่น้ำที่อุณหภูมิ 50°C และวิธีเทอร์โมอะคูสติก เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงคุณภาพที่เกิดขึ้น โดยข้อมูลต่างๆ แสดงใน Table 1 พบว่า วิธีการละลายแบบการพาโดยธรรมชาติที่อุณหภูมิห้องมีร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักในระหว่างการละลายมากที่สุด ในขณะที่วิธีเทอร์โมอะคูสติกมีร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักในระหว่างการละลายน้อยที่สุด โดยร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักในระหว่างการละลายของวิธีการละลายแบบการพาโดยธรรมชาติที่อุณหภูมิบรรยากาศ การละลายด้วยวิธีการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 50°C และวิธีเทอร์โมอะคูสติก มีค่าเท่ากับ $8.62 \pm 0.43\%$, $2.45 \pm 0.05\%$ และ $1.99 \pm 0.12\%$ ตามลำดับ โดยร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักในระหว่างการละลายของวิธีการละลายแบบการพา

โดยธรรมชาติที่อุณหภูมิห้องมากกว่าการละลายด้วยวิธีอื่น เนื่องจากใช้เวลาในการละลายที่นานที่สุด ส่งผลให้เกิดการเรียงตัวของผลึกน้ำแข็งหรือการตกผลึกใหม่ จากผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กรวมเป็นผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ ผลของการเกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่จะไปทำลายผนังโครงสร้างเซลล์ของเนื้อไก่ ผนังเนื้อเยื่อเซลล์จะเกิดการฉีกขาดและของเหลวภายในเซลล์ซึ่งเป็นสารอาหารจะไหลออกจากเซลล์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เนื้อเยื่อในโครงสร้างเซลล์ไม่สามารถดูดซึมน้ำกลับได้ เนื้อไก่แช่แข็งที่ละลายด้วยวิธีดังกล่าวจะมีลักษณะของเหลวไหลซึมออกมาสอดคล้องกับผลการตรวจวัดการอยู่รอดของจุลินทรีย์ในระหว่างการละลาย พบว่าวิธีการละลายด้วยการแช่น้ำอุ่นร่วมกับคลื่นอะคูสติก จะมีปริมาณจุลินทรีย์ที่เหลือรอดเพียง 0.02×10^5 cfu g^{-1} น้อยกว่าปริมาณจุลินทรีย์ที่เหลือรอดของวิธีการละลายแบบการพาโดยธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง และการแช่น้ำอุ่นถึง 248.5 และ 16.0 เท่า ตามลำดับ ทั้งนี้สามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ เนื่องจากวิธีการละลายด้วยการแช่น้ำอุ่นร่วมกับคลื่นอะคูสติก จะทำให้จุลินทรีย์ถูกทำลายจากการเปลี่ยนแปลงของความดันสูงในการแตกตัว (Implosions) ของฟองอากาศ อันเป็น

ปรากฏการณ์ต่อเนื่องจากการเกิดแคปิวเตชัน ซึ่งเรียกกระบวนการดังกล่าวว่าเทอร์โมอะคูสติกเคชัน (Thermoacoustication) สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Garcia et al. (1989) ซึ่งพบว่ากระบวนการเทอร์โมอะคูสติกเคชันสามารถลดจำนวนสปอร์ของ *Bacillus subtilis* ได้ดีกว่าการใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียว เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Claudia et al. (2011) กระบวนการเทอร์โมอะคูสติกเคชัน สามารถลดจำนวนจุลินทรีย์ *Aspergillus flavus* ดังนั้นวิธีการละลายด้วยการแช่น้ำอุ่นร่วมกับคลื่นอะคูสติกหรือการละลายด้วยกระบวนการเทอร์โมอะคูสติกเคชัน จึงมีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเนื้อไก่แช่แข็งน้อยที่สุด ดังนั้น วิธีการละลายด้วยการแช่น้ำอุ่นร่วมกับคลื่นอะคูสติกจึงเป็นวิธีการละลายที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ในขณะที่รายงานวิจัย Bozkurt and İçier (2009) และ Robert et al. (1998) ศึกษาการประยุกต์ใช้การเกิดความร้อนแบบโอห์มมิกร่วมกับการละลายด้วยวิธีการแช่น้ำของเนื้อวัวและกึ่งแช่แข็งสามารถลดเวลาและปริมาณที่ใช้ในการละลายได้มากกว่า 30-35 เท่า อย่างไรก็ตามการเกิดความร้อนแบบโอห์มมิกร่วมกับการละลายด้วยวิธีการแช่น้ำจะเหมาะสมเฉพาะเนื้อสัตว์แช่แข็งในเบื้องต้นที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดีเท่านั้น การแช่น้ำอุ่นร่วมกับคลื่นอะคูสติกสามารถทำได้กับการละลายเนื้อสัตว์แช่แข็งทุกประเภทโดยไม่ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของตัวกลางที่ใช้ในการละลาย

Table 1 Comparision of thawing in air at ambient temperature, in water and in water with ultrasonic assisted.

Thawing Process	Drip Loss (%)	TCP (cfu g ⁻¹)
Air thawing (ambient temperature)	8.62±0.43a	4.97 x 10 ⁵
Water thawing (temperature at 50°C)	2.45±0.05b	0.32 x 10 ⁵
Thermoacoustic thawing (temperature at 50°C)	1.99±0.12c	0.02 x 10 ⁵

Mean±standard deviation, ^{a, b, c} Mean values followed by the different letter in the same column are significantly different (P≤0.05).

3.3 การหารูปแบบสมการความสัมพันธ์ของการละลายเนื้อไก่แช่แข็งด้วยวิธีเทอร์โมอะคูสติก

การศึกษามลกระทบของอุณหภูมิและความถี่ต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเนื้อไก่แช่แข็ง อัตราการสูญเสียน้ำหนักใน

ระหว่างการละลาย ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดที่อยู่รอดในระหว่างการละลาย และปริมาณความร้อนที่ใช้ในการละลายในระหว่างการละลายเนื้อไก่แช่แข็งที่ระดับอุณหภูมิ 10, 30 และ 50°C และที่ระดับความถี่ 900, 1,200 และ 1,500 Hz การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเนื้อไก่แช่แข็งในระหว่างการละลายด้วยวิธีเทอร์โมอะคูสติก ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ (X_1) และความถี่ (X_2) วิเคราะห์ผลที่ได้จากกราฟพื้นผิวผลตอบสนองแบบสามมิติ เพื่อหารูปแบบความสัมพันธ์โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1 อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ที่ระดับอุณหภูมิและความถี่ต่ำจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างการละลายเนื้อไก่แช่แข็งในระดับที่ต่ำด้วย เนื่องจากใช้เวลาในการละลายที่นานกว่าระดับอุณหภูมิและความถี่ที่ระดับสูง จึงส่งผลทำให้เกิดการเรียงตัวของผลึกน้ำแข็งเกิดเป็นผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ ทำให้ใช้เวลาในการเปลี่ยนสถานะยาวนาน แต่ถ้าระดับอุณหภูมิและความถี่สูง จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างการละลายเนื้อไก่แช่แข็งในระดับที่สูงด้วย คลื่นอะคูสติกจะช่วยเร่งอัตราการถ่ายเทความร้อนจากน้ำเข้าสู่โครงสร้างเนื้อไก่มากขึ้น รวมทั้งทำให้โครงสร้างของผลึกน้ำแข็งเกิดการสั่นและแตกตัวออกจากกัน ช่วยลดการเรียงตัวของผลึกน้ำแข็งหรือการตกผลึกใหม่ (Recrystallization) ในระหว่างการละลายเนื่องจากปรากฏการณ์แคปิวเตชัน (Cavitation) ซึ่งหมายถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นในตัวกลางที่ได้รับคลื่นอะคูสติกทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ (แรงกล) จากฟองอากาศ (Bubbles) เนื่องจากโครงสร้างของของเหลวที่ได้รับคลื่นอะคูสติก จะถูกบีบอัดและคลายตัวซ้ำไปมาเป็นจำนวนหลายพันรอบ ผลการวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ย (y_1) ของเนื้อไก่แช่แข็งซึ่ง เป็นฟังก์ชันของความถี่ (x_1) และอุณหภูมิ (x_2) ในระหว่างการละลายด้วยวิธีเทอร์โมอะคูสติก ซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง มีรูปแบบความสัมพันธ์ตาม Eq. (5)

$$y_1 = 0.6399 - 5.61 \times 10^{-4} x_1 + 0.0362 x_2 \quad (5)$$

3.3.2 อัตราการสูญเสียน้ำหนักในระหว่างการละลาย

ที่ระดับอุณหภูมิสูงจะส่งผลทำให้เนื้อไก่สุก เนื้อไก่จึงเกิดการสูญเสีย น้ำบริเวณผิวหน้าจึงส่งผลต่อร้อยละการสูญเสีย น้ำหนักในระหว่างการละลายเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการสูญเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีน (Protein Denaturation) จากการได้รับความร้อน และที่ระดับความถี่สูงจะมีร้อยละการสูญเสีย น้ำหนักในระหว่างการละลายลดลง เนื่องจากคลื่นอะคูสติกจะทำให้โครงสร้างของผลึกน้ำแข็งเกิด

การสั่นและแตกตัวออกจากกัน จึงช่วยลดการเกิดผลึกน้ำแข็งหรือการตกผลึกใหม่ ทั้งนี้การตกผลึกใหม่จากผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กกรรมเป็นผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ ผลของการเกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่จะไปทำลายผนังโครงสร้างเซลล์ของเนื้อไก่ ผนังเนื้อเยื่อเซลล์เกิดการฉีกขาดและของเหลวภายในเซลล์ซึ่งเป็นสารอาหารจะไหลออกจากเซลล์ เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เนื้อเยื่อในโครงสร้างเซลล์ไม่สามารถดูดซึมน้ำกลับได้ จึงมีลักษณะของเหลวไหลซึมออกมา ผลการวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ของร้อยละการสูญเสียน้ำหนักในระหว่างการละลาย (y_2) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความถี่ (x_1) และอุณหภูมิ (x_2) ในระหว่างการละลายด้วยวิธีเทอร์โมอะคูสติก ซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนองมีรูปแบบความสัมพันธ์ตาม Eq. (6)

$$y_2 = 3.8795 - 2.28 \times 10^{-3} x_1 - 0.1082 x_2 \quad (6)$$

3.3.3 ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดที่อยู่รอดในระหว่างการละลาย

ที่ระดับอุณหภูมิและความถี่สูงจะมีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดที่อยู่รอดในระหว่างการละลายน้อยกว่าที่ระดับอุณหภูมิและความถี่ต่ำ เนื่องจากวิธีการละลายโดยการแช่น้ำร่วมกับคลื่นอะคูสติกจะทำให้จุลินทรีย์ถูกทำลายจากการเปลี่ยนแปลงของความดันสูงในการแตกตัว (Implosions) ของฟองอากาศ อันเป็นปรากฏการณ์ต่อเนื่องจากการเกิดแควิเทชัน ซึ่งเรียกกระบวนการดังกล่าวว่าเทอร์โมอะคูสติกเคชัน จากการวิเคราะห์ผลที่ได้จากรูปพื้นผิวผลตอบสนองแบบสามมิติ พบว่าการละลายด้วยวิธีเทอร์โมอะคูสติกที่มีผลต่อปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดที่อยู่รอดในระหว่างการละลายได้ดีที่สุด ผลการวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ของปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดที่อยู่รอดในระหว่างการละลาย (y_3) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความถี่ (x_1) และอุณหภูมิ (x_2) ในระหว่างการละลายด้วยวิธีเทอร์โมอะคูสติกซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนองมีรูปแบบความสัมพันธ์ตาม Eq. (7)

$$y_3 = -0.3388 + 2.31 \times 10^{-3} x_1 - 2.50 \times 10^{-2} x_2 \quad (7)$$

3.3.4 ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการละลาย

ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการสร้างอุณหภูมิให้สูงขึ้นเพื่อถ่ายเทความร้อนเข้าสู่โครงสร้างเนื้อไก่มีผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าการใช้พลังงานเพื่อสร้างคลื่นอะคูสติก เพราะสมบัติการนำความร้อนของน้ำแข็งสูงกว่าน้ำถึง 4 เท่า ดังนั้นเมื่อมีการส่งถ่ายความร้อนที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ (บริเวณแรกที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน) น้ำแข็งที่ชั้นผิวหน้าของอาหารจะละลายกลายเป็นชั้นน้ำ

ในการละลายน้ำแข็งโดยใช้น้ำเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน อัตราการนำความร้อนของผิวหน้าสู่น้ำแข็งด้านในของอาหารลดลง ผลการเป็นฉนวนนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อชั้นของน้ำแข็งที่ละลายหนาขึ้นมีผลทำให้ใช้เวลาในการละลายเพิ่มมากขึ้น ผลการวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ของปริมาณพลังงานความร้อน (y_4) ในระหว่างการละลายซึ่งเป็นฟังก์ชันของความถี่ (x_1) และอุณหภูมิ (x_2) ในระหว่างการละลายด้วยวิธีเทอร์โมอะคูสติกซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนองมีรูปแบบความสัมพันธ์ตาม Eq. (8)

$$y_4 = 3.8795 - 2.28 \times 10^{-3} x_1 - 0.11 x_2 \quad (8)$$

4 สรุป

อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการละลายเนื้อไก่แช่แข็งด้วยวิธีการละลายแบบการพาโดยธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง การละลายโดยการแช่ในน้ำ (50°C) และการละลายด้วยวิธีเทอร์โมอะคูสติก มีค่าเท่ากับ 0.2095 ± 0.0071 , 1.6984 ± 0.0236 และ $2.1772 \pm 0.0752^\circ\text{C minute}^{-1}$ ตามลำดับ และเวลาในการละลายเท่ากับ 90.19 ± 2.62 , 9.07 ± 0.85 และ 7.05 ± 0.52 minutes ตามลำดับ โดยวิธีการละลายด้วยวิธีเทอร์โมอะคูสติก มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเนื้อไก่แช่แข็งน้อยที่สุด และมีประสิทธิภาพในการรักษาคุณภาพได้ดีที่สุด โดยมีร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักในระหว่างการละลาย (Drip Loss) เพียง $1.99 \pm 0.12\%$ และปริมาณการอยู่รอดของจุลินทรีย์ เท่ากับ 0.02×10^5 cfu g⁻¹ การหาผลกระทบของอุณหภูมิ และระดับความถี่เพื่อหารูปแบบสมการความสัมพันธ์ของการละลายเนื้อไก่แช่แข็งด้วยวิธีเทอร์โมอะคูสติก ของอัตราการละลายเนื้อไก่แช่แข็ง (y_1) ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักในระหว่างการละลาย (y_2) ปริมาณจุลินทรีย์ที่อยู่รอดในระหว่างการละลาย (y_3) และปริมาณความร้อนที่ใช้ในการละลาย (y_4) ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรของระดับความถี่ (x_1) และระดับอุณหภูมิ (x_2) ซึ่งมีรูปแบบความสัมพันธ์ดังนี้

$$y_1 = 0.6399 - (5.61 \times 10^{-4}) x_1 + 0.0362 x_2$$

$$y_2 = 3.8795 - (2.28 \times 10^{-3}) x_1 - 0.1082 x_2$$

$$y_3 = -0.3388 - (2.31 \times 10^{-3}) x_1 - (2.50 \times 10^{-2}) x_2$$

$$y_4 = 3.8195 - (2.28 \times 10^{-3}) x_1 - 0.11 x_2$$

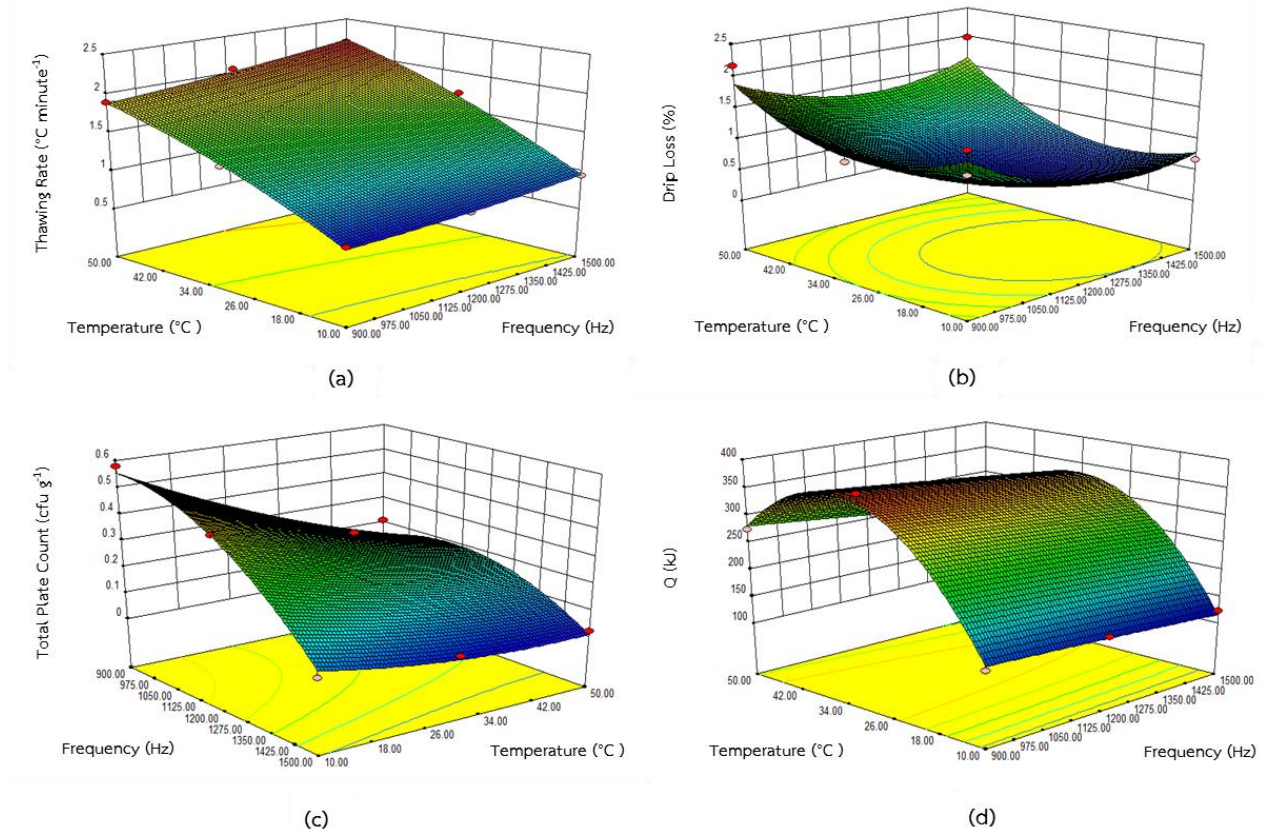


Figure 6 Response surface (3-D) showing the effect of thawing temperature (°C) and acoustic frequency (Hz) on the response (a) the change in temperature profile of thawing process (b) drip loss (c) total plate count or aerobic plate count (d) thawing energy.

5 กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของรายงานการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร เรื่องการพัฒนาวิธีการละลายเนื้อไก่แช่แข็งด้วยคลื่นอะคูสติก ของนางสาวน้ำฝน ไชยลังกา และนายปองพล สุริยะกันทร และได้รับเงินทุนสนับสนุนในการทำวิจัยจากหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการลดความชื้นและการอบแห้ง และสาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ อดุสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

6 เอกสารอ้างอิง

ฤทธิ์ชัย อัครวราชันย์. 2546. การศึกษาค่าการนำไฟฟ้าและวิธีการละลายด้วยวิธี Ohmic ของซูริมิแช่แข็ง. โครงการวิทยานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี (วพ 149231).

วิไล รังสาดทอง. 2547. เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: บริษัท เท็กซ์แอนด์เจอร์นัล พับลิเคชัน จำกัด.

A.O.A.C. 2010. Official Methods of Analysis. 18th ed. The Association of Official Analytical Chemists, Arlington, Virginia.

Athley, A.A., Crum, L.A. 1998. Acoustic cavitation and bubbles dynamics. In "Ultrasounds, its chemical, physical and biological effect" K.S. Suslick (ed). VCH Publishers, Inc. New York.

Bacteriological Analytical Manual. USA Food and Drug Administration center for safety & Applied nutrition 21-24 p. (online version on 25 April 2011)

Bozkurt, H., İçier, F. 2009. Ohmic Thawing of Frozen Beef cuts. Journal of food Process Engineering. (online version on 25 April 2011)

Claudia, P.C., Maria, T.J., Aurelio L.M., Enrique, P. 2011. Modelling thermosonication inactivation of *Aspergillus flavus* combining natural antimicrobial at different pH. Procedia Food Science 1, 1007-1014.

- Garcia, M.L., Burgos, J., Sanz, B., Ordonez, J.A. 1989. Effect of heat and ultrasonic waves on the survival of two strains of *Bacillus subtilis*. *Journal of Applied Bacteriol* 67, 619-628.
- Kissam, A.D., Neison, R.W., Ngao, J., Hunter, P. 1981. Water-thawing of fish using low frequency acoustics. *Journal of Food Science* 47, 71-75.
- Li, B., Sun, D.W. 2002. Novel methods for rapid freezing and thawing of Food – a review. *Journal of food engineering* 54, 175-182
- Mason, T.J., Paniwnyk, L., Lorimer, J.P. 1996. The uses of ultrasound in food technology. *Ultrasonics Sonochemistry* 3, 253-260.
- Miao, Y., Chen, J.Y., Noguchi, A. 2007. Studies on ohmic Thawing of frozen surimi. *Food Science and Technology. Res* 13(4), 296-300.
- Miles, C.A., Morley, M.J., Rendell, M. 1999. High power ultrasonic thawing of frozen food. *Journal of Food Engineering* 39, 151-159.
- Roberts, J.S., Balaban, O., Zimmerman, R., Luzuriaga, D. 1998. Design and testing of a prototype ohmic thawing unit. *Journal Computers and Electronics in Agriculture* 19, 211-222
- Shirai, T., Yoshikawa, T. 1999. Changes in components during freezing and thawing for food storage. *Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi* 50, 151-156. (in Japanese).