



## การศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของอาหารพร้อมรับประทานแบบแช่เย็นและ ลักษณะของการเสื่อมเสียของอาหารหลังผ่านกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ

### Study of Heat Transfer behavior of Chilled Ready to Eat Foods and Food Spoilage

#### Characteristic after Microwave Heating Process

วราภรณ์ กลิ่นบุญ<sup>1\*</sup> และ รวมพร เลี่ยมแก้ว<sup>2</sup>

Waraporn Klinbun<sup>1\*</sup> and Ruamporn Liamkaew<sup>2</sup>

<sup>1</sup> คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

<sup>2</sup> คณะการจัดการธุรกิจอาหาร สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

<sup>1</sup> Faculty of Engineering and Technology, Panyapiwat Institute of Management

<sup>2</sup> Faculty of Food Business Management, Panyapiwat Institute of Management

Received : 19 October 2020

Revised : 18 December 2020

Accepted : 21 December 2020

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของอาหารพร้อมรับประทานแช่เย็นและลักษณะของการเสื่อมเสียของอาหารหลังผ่านกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ โดยผลิตภัณท์อาหารแช่เย็นพร้อมรับประทานที่สนใจศึกษาจำนวน 2 เมนูคือ เต้าส่วนทรงเครื่องและไข่ตุ๋น จากร้าน 7-Eleven การทดลองทำความร้อนอาหารพร้อมรับประทานแช่เย็นด้วยเตาไมโครเวฟความถี่ 2,450 เมกะเฮิร์ต กำลัง 1,300 วัตต์ บันทึกอุณหภูมิของตัวอย่างที่อ่านได้จากไฟเบอร์ออปติกและกล้องอินฟราเรด ส่วนการศึกษาการเสื่อมเสียของอาหารหลังจากการทำความร้อนโดยการวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์และการประเมินทางประสาทสัมผัสในด้านลักษณะปรากฏ กลิ่น และเนื้อสัมผัส ผลการศึกษาพบว่าทั้งสองเมนูมีลักษณะการกระจายตัวของความร้อนแบบเดียวกัน คือ อุณหภูมิที่ขอบจะสูงกว่าที่อุณหภูมิที่กลางของอาหาร ในด้านของการเสื่อมเสียของอาหารนั้นพบว่า ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดตรวจพบในอาหารจะเพิ่มจำนวนขึ้น และมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่อวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลานานขึ้น ในส่วนของเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคในอาหาร *Salmonella* spp. พบว่าตรวจไม่พบ (ND) ในช่วงระยะเวลาดังกล่าว (48 ชั่วโมง) อีกทั้งอาหารมีลักษณะเป็นเมือก ยืด มีกลิ่นหมัก ซึ่งจัดเป็นกลิ่นรสที่ผิดปกติ (off-flavor) หลังจากชั่วโมงที่ 8 ที่วางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) ผลจากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนารูปแบบของผลิตภัณฑ์และข้อแนะนำในการเก็บรักษาบนฉลากต่อไป

**คำสำคัญ :** อาหารแช่เย็น ; พลังงานไมโครเวฟ, การเสื่อมเสียของอาหาร, จุลินทรีย์



### Abstract

This research aims to study heat transfer phenomena and food spoilage in chilled food heating process subjected to microwave energy. Two chilled food products from 7-Eleven shop as: sweet mung bean porridge with taro coconut cream and steamed egg custard were chosen as experimental samples. The experiment of ready to eat food heating using a microwave oven with 2,450 MHz and 1,300 watts was performed. During the experiment, the temperatures of the sample have been recorded by reading from fiber-optic probes and infrared camera. The study of food spoilage after heating considered in terms of microbial analysis and sensory characteristics as perceived by sight, smell and touch. From the results, the temperature profile of both samples is same distribution. The temperature at the edge is higher than that of the center temperature of the food. In part of food spoilage, it was found that the total amount of microorganisms detected in food will increase in number and increases in quantity when left over at room temperature for a longer period. For foodborne pathogen, *Samonella* spp. was not detectable (ND) during this period (48 hours). In addition, the food was stretchy slime with a fermented odor, which was classified as an off-flavor after 8 hours left at room temperature (25 °C). The results of this study can be used as a guideline for the development of product pattern and label indications.

**Keywords :** chilled food ; microwave energy ; food spoilage ; microbial



## บทนำ

จากวิถีชีวิตของคนยุคใหม่ที่เปลี่ยนแปลงไป คนในสังคมต่างเร่งรีบทำงานแข่งขันกับเวลา ส่งผลให้พฤติกรรมต่าง ๆ เปลี่ยนแปลงไป รวมถึงพฤติกรรมในการบริโภคอาหารโดยมีแนวโน้มของการบริโภคอาหารสำเร็จรูปหรืออาหารปรุงสำเร็จมากขึ้น โดยเฉพาะอาหารปรุงสำเร็จพร้อมรับประทาน (Ready to eat (RTE) food) ในรูปของอาหารแช่เย็นหรืออาหารแช่แข็ง เพราะสะดวก รวดเร็ว สะอาด เมนูหลากหลาย และรสชาติดี สามารถตอบโจทย์วิถีชีวิตได้อย่างลงตัว อาหารแช่เย็นและอาหารแช่แข็งนั้น เหมือนกันที่วิธีการเก็บรักษาสภาพของอาหารโดยการทำให้อาหารมีอุณหภูมิต่ำ เพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย แต่วิธีการเก็บรักษาที่อุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษาสภาพของอาหาร และหากจะรับประทานก็สามารถนำมาอุ่นร้อน รับประทานได้ทันที กล่าวคืออาหารแช่แข็ง (Frozen food) เก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $-18^{\circ}\text{C}$  เก็บรักษาได้ 18 เดือน ใช้เวลาอุ่น 4-7 นาที และ อาหารแช่เย็น (Chilled food) เก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $4-7^{\circ}\text{C}$  เก็บรักษาไม่เกิน 7 วัน ใช้เวลาอุ่น 1-2 นาที (Berk, 2009) โดยบนฝากล่องของอาหารแช่แข็งและอาหารแช่เย็น จะแนะนำวิธีในการเก็บรักษาและวิธีในการรับประทาน ซึ่งส่วนใหญ่จะแนะนำให้อุ่นในเตาไมโครเวฟ เพราะสะดวกและรวดเร็ว ซึ่งเวลาและกำลังวัตต์ที่ใช้ในการอุ่นขึ้นกับชนิดของอาหาร จากนั้นจะได้อาหารที่พร้อมรับประทาน

อย่างไรก็ตาม ในกระบวนการการลดอุณหภูมิของอาหารให้ต่ำกว่า  $10^{\circ}\text{C}$  เป็นการทำให้กระบวนการเมตาบอลิซึม (Metabolism) และกิจกรรมของเอนไซม์เกิดขึ้นช้าลง จึงเป็นการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์เท่านั้น แต่ไม่สามารถทำลายเชื้อจุลินทรีย์ได้ (Gill, 2006) ดังนั้นอาหารแช่เย็นหรืออาหารแช่แข็งที่ผ่านการอุ่นให้พร้อมรับประทานแล้ว จุลินทรีย์ทั้งแบคทีเรีย ยีสต์ และรา ที่ปะปนอยู่ในจำนวนต่างกันซึ่งอาจมาจาก (1) ก่อนกระบวนการอุ่น ได้แก่ จากวัตถุดิบ จากแหล่งผลิต ระหว่างการจัดจำหน่าย (2) ระหว่างกระบวนการอุ่น ได้แก่ จากเครื่องมือ จากส่วนประกอบของอาหาร และ (3) สภาพแวดล้อมหลังกระบวนการอุ่น ได้แก่ จากบรรจุภัณฑ์ ระหว่างการเก็บ ระหว่างการรอบริโภค จะสามารถเติบโตขึ้น ตามเวลา และมีปริมาณของจุลินทรีย์ในอาหารนั้นเป็นจำนวนมาก อาจถึงล้านเซลล์ขึ้นไป ที่เป็นสาเหตุของการเน่าเสีย (Spoilage) ทำให้เกิดเป็นพิษ ซึ่งพิษที่สร้างขึ้นอาจเป็นอันตราย ทำให้ผู้บริโภคเกิดอาการเจ็บป่วยหรือถึงแก่ชีวิตเมื่อบริโภค ทั้งนี้เนื่องจากตามปกติของอาหารที่เป็นกลาง เมื่อต้องการทำลายสปอร์ของแบคทีเรียลงเป็นจำนวนร้อยละ 90 ของจำนวนทั้งหมด จะต้องใช้เวลาในการทำความร้อนประมาณ 4-5 นาที ที่อุณหภูมิ  $121^{\circ}\text{C}$  ส่วนเซลล์ของแบคทีเรียส่วนใหญ่จะทำลายที่อุณหภูมิ  $60^{\circ}\text{C}$  ขึ้นไป แต่พวกที่ทนความร้อนได้จะต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่านี้จึงจะฆ่าได้ ดังนั้น จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนแก่อาหารเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อความต้านทานความร้อนของจุลินทรีย์

ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเสื่อมเสียคุณภาพทางเคมีและคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ เช่น Boubaker และคณะ (2014) : Ferreira และคณะ (2016) : Szczawinski และคณะ (2017) โดยงานวิจัย Ferreira และคณะ (2016) ศึกษาผลของวิธีการ Pre-cooking ที่มีต่อการเสื่อมเสียคุณภาพทางเคมีและคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์แพตตี้ไก่ (Chicken patties) พร้อมทานระหว่างการเก็บรักษาและการอุ่นซ้ำด้วยไมโครเวฟ โดยใช้วิธีการ Pre-cooking 3 วิธี ได้แก่ การต้ม (Boiling) การปิ้งย่าง (Roasting) และการปิ้งย่าง (Grilling) ส่วนวิธีการเก็บรักษาจะทำการเก็บรักษาแบบแช่เย็นที่อุณหภูมิ  $4^{\circ}\text{C}$  เป็นระยะเวลา 14 วัน จากนั้นนำมาอุ่นซ้ำด้วยไมโครเวฟ จากนั้นจึงทำการประเมินคุณภาพทางเคมี ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี สารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด สาร Thiobarbituric acid- reactive (TBARS) และสารกลุ่ม Volatiles การเสื่อมเสียทางประสาทสัมผัส (Sensory deterioration) จะประเมินโดยใช้การทดสอบการยอมรับด้วยการให้คะแนนความชอบด้านกลิ่น (Odor liking) เพื่อบ่งชี้ถึงการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์ ผลการศึกษาพบว่าวิธีการ Pre-cooking และระยะเวลาในการเก็บรักษามีผลต่อการเสื่อมเสียทางเคมีเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน (Lipid oxidation) ในขณะที่การอุ่นซ้ำด้วยไมโครเวฟไม่มีผลต่อการเสื่อมเสียทางเคมี ในส่วนของการเสื่อมเสียทางประสาทสัมผัสพบว่า ทุกทรีทเมนต์ได้คะแนนความชอบด้านกลิ่นต่ำทั้งหมดและไม่มี ความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้น การเลือกวิธีการ Pre-cooking และการควบคุมสภาวะการเก็บรักษาจึงมีบทบาทสำคัญในการชะลอการเกิดการเสื่อมเสียทางเคมี (Oxidative changes) ของผลิตภัณฑ์แพตตี้ไก่



(Chicken patties) งานวิจัยของ Szczawiński และคณะ (2017) ได้ศึกษาอัตราการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ (Growth rate) *Listeria monocytogenes* ในแฮมสุก (Cooked cured ham) ที่ทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยการทดลองใส่เชื้อ *L. monocytogenes* จำนวน 3 สายพันธุ์รวมกัน และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 3, 6, 9, 12 และ 15 °C เป็นระยะเวลา 16 วัน จากนั้น จะทำการตรวจวิเคราะห์หาจำนวนจุลินทรีย์ *L. monocytogenes* ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิและเวลาในการเก็บรักษา มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่ออัตราการเจริญของ *L. monocytogenes* ( $P < 0.01$ )



แม้ว่างานวิจัยต่าง ๆ จะพยายามเติมเต็มข้อมูลทั้งการทดลองและการจำลองเชิงตัวเลขของกระบวนการทำความร้อน ด้วยพลังงานไมโครเวฟ และการศึกษาเกี่ยวกับการเสื่อมเสียของอาหาร แต่ยังคงขาดองค์ความรู้อีกมากที่ต้องศึกษาเกี่ยวกับอาหารพร้อมรับประทานภายในเตาไมโครเวฟ เพราะเป็นสิ่งสำคัญมากและมีผลต่อความต้องการและความคาดหวังของผู้บริโภค งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนอาหารพร้อมรับประทานแช่เย็น ด้วยพลังงานไมโครเวฟ และลักษณะการเสื่อมเสียของอาหารพร้อมรับประทานแช่เย็นหลังผ่านการอุ่นด้วยเตาไมโครเวฟ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนารูปแบบและข้อบ่งชี้ของผลิตภัณฑ์ต่อไป

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 1. การเตรียมตัวอย่างอาหารแช่เย็นพร้อมรับประทาน

ตัวอย่างของอาหารแช่เย็นกรณีศึกษา คือ เต้าส่วนทรงเครื่องและไข่ตุ๋น ชื้อจากร้านสะดวกซื้อ 7-Eleven แล้วนำมาเก็บรักษาอุณหภูมิระหว่าง 3-5 °C ก่อนนำมาตรวจวัดคุณสมบัติไดโอดีเลกทริก และศึกษาพฤติกรรมทางความร้อน เมื่อได้รับคลื่นไมโครเวฟต่อไป โดยตารางที่ 1 แสดงข้อมูลต่าง ๆ ของอาหารแช่เย็นพร้อมรับประทาน

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบสำคัญโดยประมาณของอาหารพร้อมรับประทานแช่เย็น

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์	เต้าส่วนทรงเครื่อง	ไข่ตุ๋น
รูปภาพ		
ปริมาตรสุทธิ (กรัม)	140	150
ส่วนประกอบโดยประมาณ	ถั่วเขียว 18% น้ำตาลทราย 13.8% กะทิ 11.3% ฝัอก 4.3% เนื้อมะพร้าว 2.9% แป้ง 2.7% เกลือ 0.4%	น้ำ 61% ไข่ไก่ 30% ปูเทียมอัด 3% ลูกชิ้นปลา 2% เครื่องปรุงรส 3.9% หี็ดหอม 0.1%
ข้อมูลทางโภชนาการ		
Calories (Cal)	246	120
Fat (g)	7.1	5
Carbohydrate (g)	34.0	9
Protein (g)	15.7	9

## 2. การศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric properties)

งานวิจัยนี้ทำการวัดสมบัติไดอิเล็กตริกของอาหารแช่เย็นพร้อมรับประทานในรูปของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Relative dielectric constant,  $\epsilon_r'$ ) และไดอิเล็กตริกอสแฟกเตอร์สัมพัทธ์ (Relative dielectric loss factor,  $\epsilon_r''$ ) โดยใช้เทคนิคโคแอกเซียลโพรบ ② (Coaxial probe) และประมวลผลผ่านเครื่องเน็ตเวิร์กแอนาไลเซอร์ ยี่ห้อ Agilent Technologies E5071C 9 kHz – 8.5 GHz ENA Series Network Analyzer ① (Network analyzer) ดังภาพที่ 1 ที่อุณหภูมิเริ่มต้น (4 – 5 °C) แล้วนำอาหารแช่เย็นไปอุ่นในอ่างน้ำร้อนจนกว่าอุณหภูมิคงที่ จากนั้นนำมาวัดค่าไดอิเล็กตริกอีกครั้ง โดยทำการวัดไปอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิต่าง ๆ จนกระทั่งอาหารแช่เย็นมีอุณหภูมิ 30 °C เมื่อวัด  $\epsilon_r'$  และ  $\epsilon_r''$  ที่อุณหภูมิต่าง ๆ แล้ว จึงทำการคำนวณหา  $\tan\delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}$  โดยในการวัดค่าสมบัติไดอิเล็กตริกแต่ละเมนู และแต่ละช่วงอุณหภูมิจะดำเนินการซ้ำ 3 ครั้ง



ภาพที่ 1 ชุดตรวจวัดสมบัติไดอิเล็กตริก

## 3. การศึกษาคุณสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

คุณสมบัติทางความร้อนของอาหาร ได้แก่ ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ค่าความจุความร้อน (Specific heat) ค่าความหนาแน่น (Density) และค่าการแพร่กระจายความร้อน (Thermal diffusivity) มีความสำคัญเป็นอย่างมากในการออกแบบ การเก็บรักษาอาหารและอุปกรณ์ทำความเย็น รวมถึงการประมาณเวลาในกระบวนการสำหรับการทำความเย็น การแช่แข็ง การทำให้ร้อนหรือการทำให้แห้งของอาหาร เนื่องจากคุณสมบัติทางความร้อนของอาหารขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีและอุณหภูมิ ตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุดคือการทำนายคุณสมบัติทางความร้อนเหล่านี้ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายถึงผลกระทบขององค์ประกอบทางเคมีและอุณหภูมิ ข้อมูลองค์ประกอบของอาหารมีอยู่ในเอกสารงานวิจัยต่าง ๆ ข้อมูลเหล่านี้ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักของอาหาร ได้แก่ น้ำ โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต ไฟเบอร์ และเถ้า คุณสมบัติทางความร้อนของอาหารสามารถทำนายได้โดยใช้ข้อมูลองค์ประกอบเหล่านี้ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิของคุณสมบัติทางความร้อนของส่วนประกอบอาหารแต่ละชนิด ซึ่งโดยทั่วไปคุณสมบัติทางความร้อนของอาหารนั้นมีพฤติกรรมที่ดีหรือราบเรียบ เมื่ออุณหภูมิของอาหารสูงกว่าจุดเยือกแข็งเริ่มต้น อย่างไรก็ตาม หากอุณหภูมิของอาหารต่ำกว่าจุดเยือกแข็งเริ่มต้น คุณสมบัติทางความร้อนของอาหารนั้นจะแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิค่อนข้างมาก

ในงานวิจัยนี้ตัวอย่างอาหารเป็นอาหารพร้อมรับประทานแช่เย็นมีอุณหภูมิเริ่มต้นระหว่าง 3–5 °C โดยตัวอย่างอาหารจะถูกเก็บไว้ในตู้เย็นก่อนนำมาทำการทดสอบ ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิจุดเยือกแข็งเริ่มต้น ดังนั้น สมบัติทางความร้อนต่าง ๆ จึงใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมีเป็นหลัก ดังนี้



### 3.1 ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity)

ค่าการนำความร้อน สัญลักษณ์ที่ใช้ “ $k$ ” คือ ค่าที่แสดงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนของวัสดุ มีหน่วยเป็น W/(m.K)

ในงานวิจัยนี้ใช้สมการทำนายค่าการนำความร้อนของอาหาร (Becker and Fricke, 2003) ที่อุณหภูมิระหว่าง 20 - 100 °C มีรูปแบบ ดังนี้

$$k = \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{k_i} \quad (\text{Perpendicular model}) \quad (1)$$

โดย  $V$  คือ Volume fraction ของสารอาหารแต่ละชนิด และ  $i$  คือ สารอาหารแต่ละชนิด  
กำหนดให้  $k$  ในหน่วย W/(m.K) ของสารอาหารแต่ละชนิด มีค่าเท่ากับ  
 $k_f(\text{fat}) = 0.18$  ;  $k_p(\text{protein}) = 0.20$  ;  $k_c(\text{carbohydrate}) = 0.245$  ;  $k_a(\text{air}) = 0.025$  ;  $k_w(\text{water}) = 0.60$  ;  $k_i(\text{ice}) = 2.24$  ;  $k_s(\text{solid}) = 0.26$

### 3.2 ค่าความจุความร้อน (Specific heat)

ความจุความร้อน สัญลักษณ์ที่ใช้ คือ “ $c_p$ ” คือปริมาณความร้อน  $\Delta Q$  จูล ที่ทำให้มวลสารมวล  $m$  กิโลกรัม มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป 1 เคลวิน มีหน่วยเป็น J/(kg.K) สมการทำนายค่าความจุความร้อนของอาหาร (Fricke and Becker, 2001)

$$c_p = 4.180X_w + 1.711X_p + 1.928X_f + 1.547X_c + 0.908X_a \quad (2)$$

เมื่อ  $X_i$  คือ Mass (or weight) fraction ของสารอาหารแต่ละชนิด และตัวห้อย  $w, p, f, c, a$  คือ water, protein, fat, carbohydrate, ash ตามลำดับ

### 3.3 ค่าการแพร่กระจายความร้อน (Thermal diffusivity)

ค่าการแพร่กระจายความร้อน สัญลักษณ์ที่ใช้ คือ “ $\alpha$ ” หาได้จากอัตราส่วนของค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของวัสดุต่อผลคูณของค่าความหนาแน่น (Density) กับค่าความร้อนจำเพาะ (Specific heat) ของวัสดุนั้น

สมการที่ถูกพัฒนาเพื่อให้ประมาณค่าการแพร่กระจายความร้อนมีมากมาย โดยขึ้นกับองค์ประกอบพื้นฐานของอาหาร (Fellows, 2009) ดังนี้

$$\alpha = 0.146 \times 10^{-6} X_w + 0.075 \times 10^{-6} X_p + 0.100 \times 10^{-6} X_f + 0.082 \times 10^{-6} X_c \quad (3)$$

เมื่อ  $\alpha$  มีหน่วยเป็น  $\text{m}^2/\text{s}$  และ  $X_i$  คือ Mass (or weight) fraction ของสารอาหารแต่ละชนิด และตัวห้อย  $w, p, f, c$  คือ water, protein, fat, carbohydrate ตามลำดับ

### 3.4 การทดลองอุ่นอาหารแช่เย็นด้วยเตาไมโครเวฟ

ชุดอุปกรณ์การทดลองดังภาพที่ 2(ก) ประกอบไปด้วย ① เตาไมโครเวฟ ยี่ห้อ Panasonic รุ่น NE 1356 กำลังไฟฟ้าสูงสุด 1300 W ความถี่ 2,450 MHz มีขนาดภายนอก (กว้าง × ยาว × สูง) เท่ากับ 422 × 508 × 337 มม. ขนาดภายใน (กว้าง × ยาว × สูง) เท่ากับ 330 × 310 × 175 มม. ② Data logger สำหรับอ่านค่าอุณหภูมิที่วัดได้จาก ③ สายไฟเบอร์ออฟติก ④ ตัวอย่างอาหาร มีขั้นตอนในการทดลอง ดังนี้

1. นำตัวอย่างอาหารออกจากตู้แช่ มาเจาะรูที่พลาสติกปิดด้านบน (Top shield)
2. เปิดคอมพิวเตอร์ และเปิด Data logger
3. เปิดประตู นำตัวอย่างอาหารมาวางในเตาไมโครเวฟที่ตำแหน่งกึ่งกลาง และสอดสายไฟเบอร์ออฟติก
4. ปิดประตูเตาไมโครเวฟ กดหมายเลขตามที่ระบุบนฉลากของอาหาร และกดปุ่ม Start เริ่มการทำงาน
5. เก็บค่าอุณหภูมิจากคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อกับ Data logger และถ่ายภาพความร้อนด้วยกล้องอินฟราเรด ทำการทดลองซ้ำขั้นตอนที่ 1-5 ทั้งหมด 3 ครั้งต่อ 1 เมนูอาหาร

โดยกล้องอินฟราเรดที่ใช้ในภาพที่ 2(ข) เป็นกล้องอินฟราเรด FLIR TG165 ช่วงการวัด -25 to 380°C, Resolution 0.1 °C, Accuracy +/- 1.5% or 1.5°C, Emissivity 4 Pre-Set Levels with Custom Adjustment, 0.1 to 0.99 และ Distance: Spot (D:S) 24:1



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2 (ก) ชุดการทดลองอุ่นอาหารด้วยเตาไมโครเวฟ (ข) การถ่ายภาพความร้อนด้วยกล้องอินฟราเรด

### 3.5 การวิเคราะห์การเสื่อมเสียของอาหารแช่เย็น

การวิเคราะห์การเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็นโดยใช้ตัวอย่างอาหารแช่เย็นกรณีศึกษา จำนวน 2 ผลิตภัณฑ์ เช่นเดียวกัน ได้แก่ เต้าส่วนทรงเครื่องและไข่ตุ๋นพร้อมรับประทาน หลังจากนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟตามที่ระบุบนบรรจุภัณฑ์ ได้นำตัวอย่างมาประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสและตรวจวิเคราะห์หาปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของการเสื่อมเสียของอาหารได้แก่ จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด (Total plate count) และจุลินทรีย์ก่อโรคในอาหารที่สำคัญและมักพบบ่อยในกลุ่มอาหารแช่เย็นอีก 2 ชนิด ได้แก่ *Escherichia coli* และ *Salmonella* spp. ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์การควบคุมปริมาณจุลินทรีย์ในอาหารพร้อมทานตามประกาศกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ เรื่อง เกณฑ์คุณภาพทางจุลชีววิทยาของอาหารและภาชนะสัมผัสอาหาร ฉบับที่ 3 พ.ศ. 2560

#### 3.5.1 การเตรียมตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็น

นำผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็นทั้ง 2 ผลิตภัณฑ์ มาอุ่นด้วยไมโครเวฟตามที่ระบุบนบรรจุภัณฑ์ จากนั้นเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (35-37 °C) เป็นระยะเวลา 24-48 ชั่วโมง ทำการเก็บตัวอย่างทุก 4 ชั่วโมง ในปริมาณครั้งละ 25 กรัม โดยแบ่งใส่ถุงปลอดเชื้อ เจือจางด้วยน้ำเกลือที่ผ่านการฆ่าเชื้อปริมาณ 225 กรัม ผสมให้เข้ากัน จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด



### 3.5.2 การวิเคราะห์จุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์อาหารแช่เย็น

นำตัวอย่างอาหารที่เก็บในระยะเวลาต่าง ๆ มาทำการเจือจางเป็นลำดับ (Serial Dilution) ที่เหมาะสม และตรวจวิเคราะห์จุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ จำนวนจุลินทรีย์ (Total plate count) *Escherichia coli* และ *Salmonella* spp. โดยใช้อาหารเลี้ยงเชื้อจำเพาะ (Selective agar media) สำเร็จรูปยี่ห้อ Compact dry และใช้วิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน AOAC (Association of Official Analytical Communities) โดยการวิเคราะห์ *Salmonella* spp. ตัวอย่างจะถูกนำมาบ่มเพื่อ Enrichment ใน Peptone water ที่อุณหภูมิ 35-37 °C ก่อนจะนำมาเพาะบนอาหารเลี้ยงเชื้อจำเพาะ และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 35-37 °C เป็นระยะเวลา 24-48 ชั่วโมง เพื่อนับจำนวนแบคทีเรียและรายงานผลเป็น CFU/g (Colony forming unit) โดยดำเนินการวิเคราะห์จุลินทรีย์ในอาหารแช่เย็น ซ้ำ 3 ครั้งต่อ 1 เมนูอาหาร

### 3.5.3 การประเมินลักษณะทางประสาทสัมผัสของอาหารแช่เย็น

นำตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารที่วางทิ้งให้ที่อุณหภูมิห้อง มาตรวจสอบโดยการสังเกตการเสื่อมเสียจากลักษณะของผลิตภัณฑ์ เช่น การเกิดเมือก การจับตัวเป็นก้อน และกลิ่นเหม็น โดยทำการตรวจสอบและบันทึกผลการสังเกตตัวอย่างทุก 4 ชั่วโมง

## ผลการวิจัย

### 1. คุณสมบัติไดอิเล็กตริก

สมบัติไดอิเล็กตริกของอาหาร ได้แก่ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ( $\epsilon_r'$ ) และค่าลอสแทนเจนต์  $\tan\delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}$  ตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป โดยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ( $\epsilon_r'$ ) คือค่าที่แสดงถึงความสามารถของวัสดุในการเก็บพลังงานไฟฟ้า ค่าลอสแฟกเตอร์สัมพัทธ์ ( $\epsilon_r''$ ) คือความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อน และค่าลอสแทนเจนต์ (Loss tangent) คือลักษณะของการสูญเสียพลังงานของสารนั้นซึ่งคิดออกมาในรูปของมุมที่ต่างไปจาก 90° ถ้าค่าเหล่านี้ยิ่งสูงขึ้น วัสดุก็จะร้อนได้ดีขึ้น จากการตรวจวัดด้วยเครื่อง Network Analyzer ได้ผลแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของตัวอย่างอาหารแช่เย็นพร้อมรับประทาน

ตัวอย่างอาหาร	$\epsilon_r' - j\epsilon_r''$	$\tan\delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}$
เต้าส่วนทรงเครื่อง	74.47 - j14.45	0.19
ไข่ตุ๋น	54.06 - j26.99	0.50

### 2. คุณสมบัติทางความร้อน

จากปริมาณและองค์ประกอบหลักต่าง ๆ ของอาหาร ที่ได้จากฉลากอาหารและสืบค้นจากกองโภชนาการ กรมอนามัย ได้แก่ น้ำ โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และเถ้า สามารถนำมาคำนวณเพื่อหาคุณสมบัติทางความร้อนโดยประมาณได้ ตารางที่ 3 แสดงคุณสมบัติทางความร้อนโดยประมาณของตัวอย่างอาหารพร้อมรับประทานแช่เย็น ได้แก่ เต้าส่วนทรงเครื่อง และไข่ตุ๋น

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางความร้อนซึ่งคำนวณจากองค์ประกอบต่าง ๆ ของอาหารพร้อมรับประทานแช่เย็น

Components	Density at 20°C [kg/m <sup>3</sup> ]*	เต้าส่วนทรงเครื่อง			ไข่ตุ๋น		
		Mass [g]	Mass Fraction, X	Volume Fraction, V	Mass [g]	Mass Fraction, X	Volume Fraction, V
Water, w	1000	83.2	0.59	0.67	127	0.85	0.87
Protein, p	1320	15.7	0.12	0.10	9	0.06	0.05



Components	Density at 20°C [kg/m <sup>3</sup> ]*	เต้าส่วนทรงเครื่อง			ไข่ตุ๋น		
		Mass [g]	Mass Fraction, $X$	Volume Fraction, $V$	Mass [g]	Mass Fraction, $X$	Volume Fraction, $V$
Fat, $f$	920	7.1	0.05	0.06	5	0.03	0.04
Carbohydrate, $c$	1600	34	0.24	0.17	9	0.06	0.04
Ash, $a$	2420	-	-	-	-	-	-
Total		140	1.00	1.00	150	1.00	1.00
Thermal Properties							
$c_p = 4.180X_w + 1.711X_p + 1.928X_f + 1.547X_c + 0.908X_a$ [kJ/kgK]				3.149	3.799		
$k = \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{k_i}$ [W/mK]				2.642	2.063		
$\alpha = 0.146 \times 10^{-6}X_w + 0.075 \times 10^{-6}X_p + 0.100 \times 10^{-6}X_f$ $+ 0.082 \times 10^{-6}X_c$ [m <sup>2</sup> /s]				$1.202 \times 10^{-7}$	$1.36 \times 10^{-7}$		

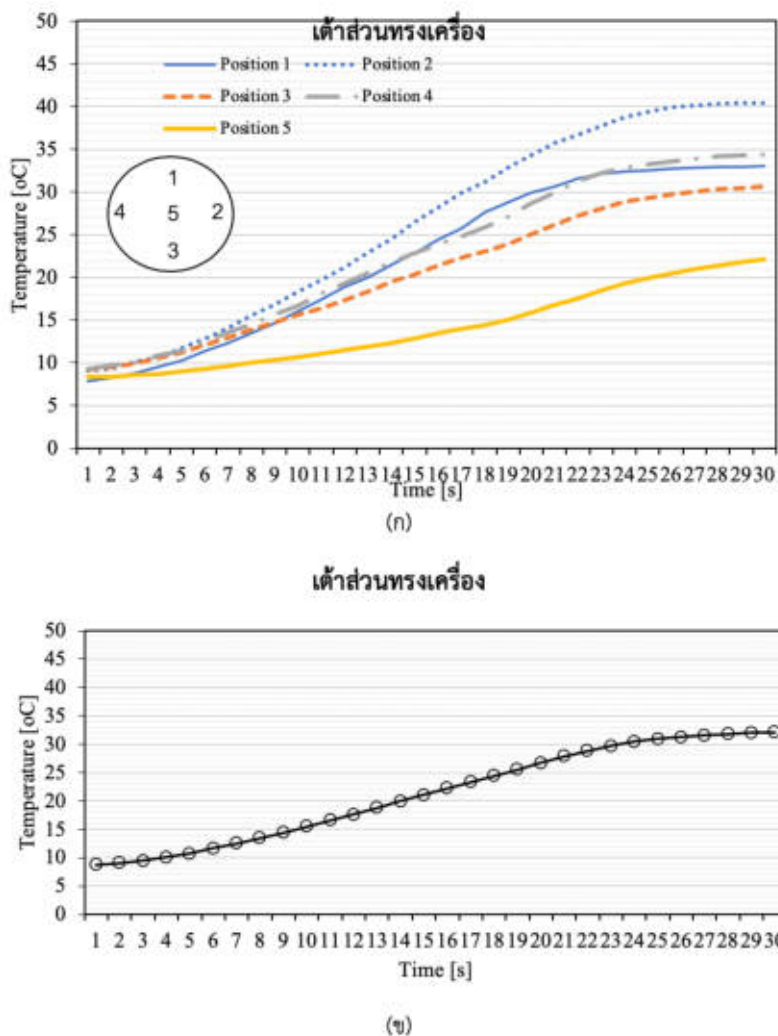
หมายเหตุ. \*Food Process Engineering An introduction โดย Alan Friis, Jørgen Risum

### 3. พฤติกรรมทางความร้อน

เมื่อนำตัวอย่างอาหารเข้าไประงอกในเตาไมโครเวฟและเปิดให้เครื่องทำงานนั้น จะเกิดความร้อนภายในอาหารที่สัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟมาจากกลไก 2 ประการคือ 1) การเคลื่อนที่ของไอออน เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า (Ionic polarization) และ 2) การหมุนของสารประกอบที่มีขั้ว (Dipole rotation) การเกิดความร้อนในอาหารบริเวณจุดที่สัมผัสกับไมโครเวฟ เนื่องจากกลไกทั้งสองแบบดังที่กล่าวมาแล้วนั้น ความร้อนจะกระจายไปยังส่วนอื่น ๆ เนื่องจากผลการเดือดของน้ำโดยการนำความร้อนและเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับวิธีการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม (Conventional heating) ดังผลการทดลองที่แสดงในภาพที่ 3 ถึงภาพที่ 6

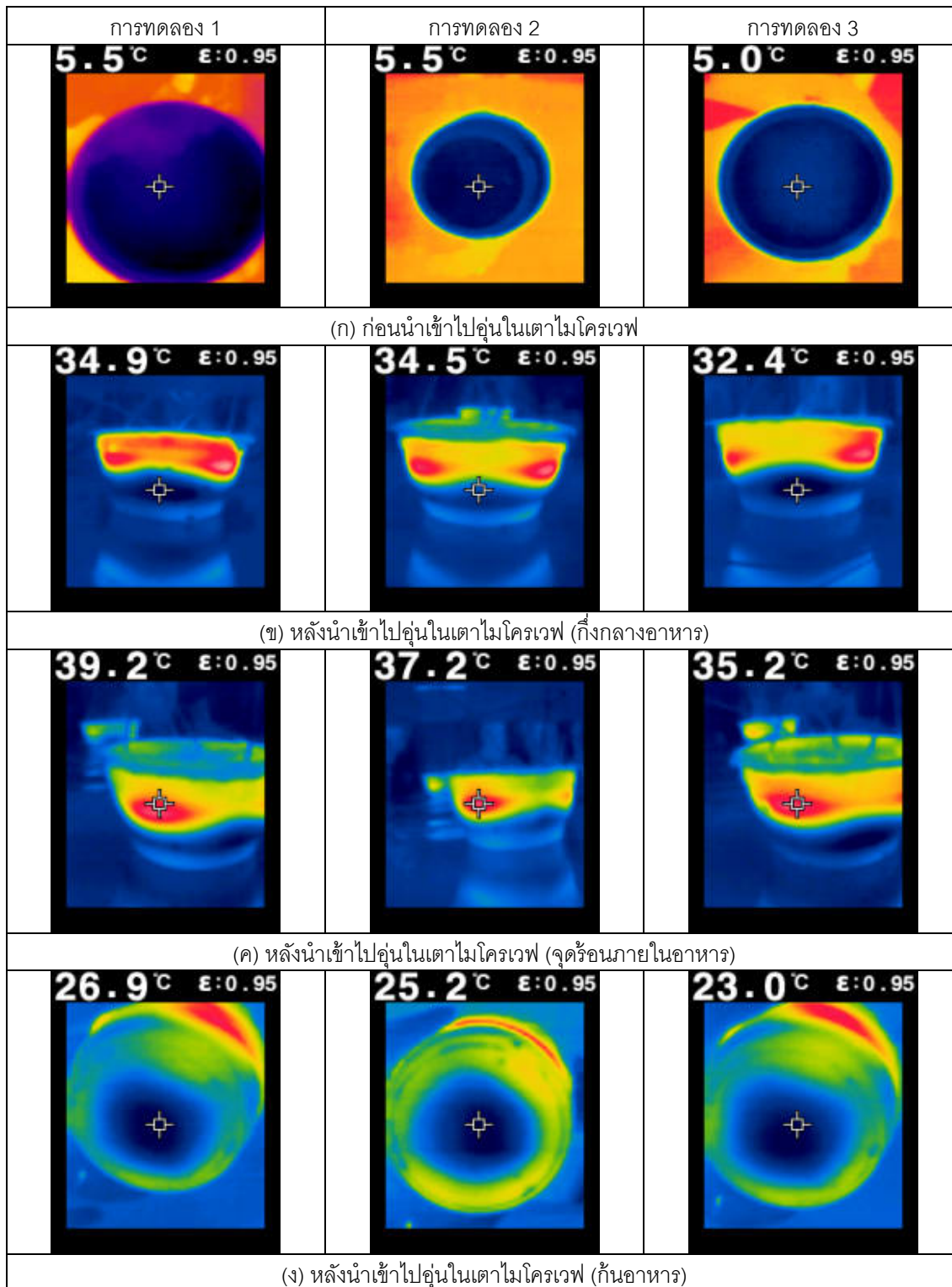
#### 3.1 เต้าส่วนทรงเครื่อง

ภาพที่ 3 เป็นค่าของอุณหภูมิที่วัดได้จากสายไฟเบอร์ออฟติกในระหว่างที่ทำความร้อน เป็นค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ จำนวน 3 ครั้ง เป็นอุณหภูมิภายในเนื้อของเต้าส่วนทรงเครื่องที่อุณหภูมิต่าง ๆ จำนวน 5 จุดในช่วงเวลา 1-30 วินาที พบว่า ที่ 1 วินาที (เวลาเริ่มต้น) เต้าส่วนมีอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 6.5 °C (5-7 °C) โดยอุณหภูมิของเต้าส่วนเพิ่มขึ้นตามเวลาในการให้ความร้อน โดยเฉพาะที่หลังจาก 15 วินาทีผ่านไป พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างเห็นได้ชัด ส่วนภาพที่ 4 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเต้าส่วนทรงเครื่องที่ได้รับความร้อนจากเตาไมโครเวฟ ยี่ห้อ Panasonic รุ่น NE 1356 กำลัง 1,300 วัตต์ ความถี่ 2,450 MHz เป็นเวลา 30 วินาที โดยกล้องอินฟราเรด ทั้งนี้เพราะเต้าส่วนทรงเครื่องมีส่วนประกอบหลักคือ แป้ง และกะทิ ในช่วงแรกของการทำความร้อนแป้งและกะทิในเต้าส่วนยังคงจับตัวเป็นก้อนของแข็ง ดูดซับพลังงานไมโครเวฟเข้าไปแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนถ่ายเทในรูปแบบของการนำความร้อนเป็นส่วนใหญ่ แต่หลังจากผ่านไป 15 วินาที แป้งและกะทิในเต้าส่วนเริ่มละลาย ความหนืดลดลง พลังงานไมโครเวฟที่ดูดซับไปแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนสามารถถ่ายเทในรูปแบบของทั้งการนำและการพาความร้อน อีกทั้งแป้งและกะทิที่อยู่ในเต้าส่วน แม้จะมีค่าไดอิเล็กตริกต่ำ แต่ต้องการพลังงานแค่เพียงเล็กน้อยในการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ จึงทำให้ภายใน 30 วินาที เต้าส่วนมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 25-30 °C นอกจากนี้ในภาพที่ 4 ยังพบว่าตำแหน่งที่มีอุณหภูมิต่ำสุด คือ ตำแหน่งที่ 5 ซึ่งคือบริเวณกึ่งกลางของอาหาร ส่วนที่ขอบของอาหารมีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน ที่ 30 วินาที เต้าส่วนมีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 30 °C (24 - 33 °C) ทั้งนี้เพราะเต้าส่วนทรงเครื่องที่บริเวณกึ่งกลางมีความหนาของ Topping ต่าง ๆ ได้แก่ มะพร้าว ผีอก มากกว่าที่บริเวณขอบนั่นเอง



**ภาพที่ 3** การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาส่วนทรงเครื่องที่วัดได้จากสายไฟเบอร์ออฟติกในระหว่างการทำความร้อน  
(ก) การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่ง (ข) การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ย

จากภาพที่ 4 (ก) แสดงอุณหภูมิที่ผิวของเตาส่วนทรงเครื่องก่อนนำเข้าไประงันในเตาไมโครเวฟ พบว่ามีอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 5 °C ภาพที่ 4 (ข) – (ง) แสดงอุณหภูมิที่ผิวของเตาส่วนทรงเครื่อง หลังจากผ่านการอุ่นในเตาไมโครเวฟเป็นเวลา 30 วินาที พบว่า บริเวณกึ่งกลาง (ภาพที่ 4 (ข)) มีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 33 °C โดยมีบริเวณที่ร้อนที่สุด (ภาพที่ 4 (ค)) มีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 37 °C และบริเวณก้นของเตาส่วน (ภาพที่ 4 (ง)) มีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 25 °C จะเห็นว่าภาพถ่ายทางความร้อนที่เกิดขึ้นมีความสอดคล้องกับค่าที่วัดได้จากสายไฟเบอร์ออฟติก (ในภาพที่ 3) บริเวณที่ร้อนมากคือผิวด้านข้างและด้านบน เพราะในช่วงแรกเตาส่วนยังคงจับตัวเป็นก้อนและที่กึ่งกลางมีความหนาแน่นมากกว่าที่ขอบ จึงทำให้เกิดลักษณะของการกระจายตัวของความร้อนดังแสดงในภาพที่ 4

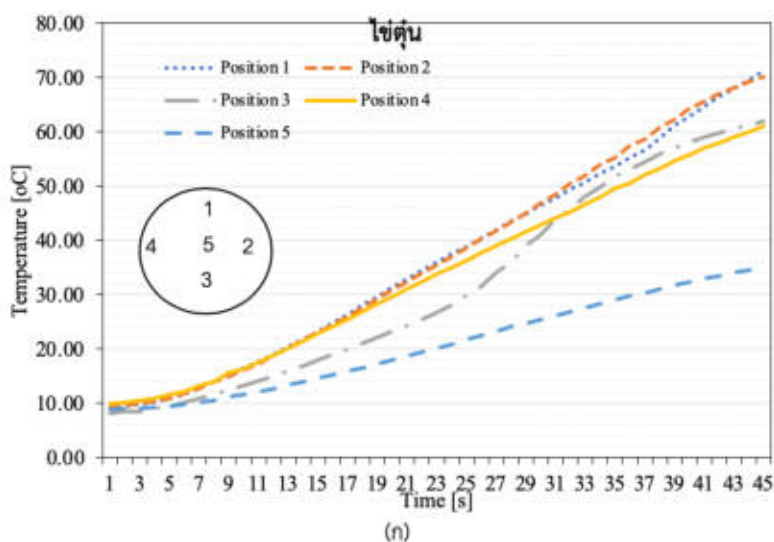


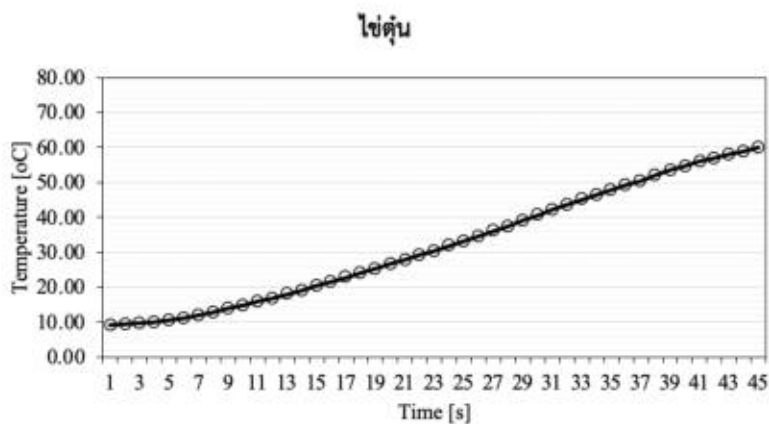
ภาพที่ 4 การกระจายตัวของอุณหภูมิผิวของเตาส่วนทรงเครื่องที่วัดได้จากกล้องอินฟราเรด

### 3.2 ไข่ตุ๋น

ภาพที่ 5 - 6 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในไข่ตุ๋นที่ได้รับความร้อนจากเตาไมโครเวฟ ยี่ห้อ Panasonic รุ่น NE 1356 กำลัง 1,300 วัตต์ ความถี่ 2,450 MHz เป็นเวลา 45 วินาที โดยภาพที่ 5 เป็นค่าของอุณหภูมิที่วัดได้จากสายไฟเบอร์ออปติกในระหว่างที่ทำความร้อน เป็นอุณหภูมิภายในเนื้อของไข่ตุ๋นที่อุณหภูมิต่าง ๆ จำนวน 5 จุดในช่วงเวลา 1-45 วินาที พบว่า ที่ 1 วินาที (เวลาเริ่มต้น) ไข่ตุ๋นมีอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 9.1 °C (6-10 °C) โดยอุณหภูมิของไข่ตุ๋นเพิ่มขึ้นตามเวลาในการให้ความร้อน ตำแหน่งที่มีอุณหภูมิต่ำสุดคือตำแหน่งที่ 5 ซึ่งคือบริเวณกึ่งกลางของอาหาร ส่วนที่ขอบของอาหารมีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน ที่ 45 วินาที ไข่ตุ๋นมีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 61 °C (36 - 73 °C) นอกจากนี้จากภาพที่ 5 พบว่า เส้นของอุณหภูมิหลังจากผ่านไป 5 s มีความชันสูง เพราะไข่ตุ๋นมีน้ำเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ เมื่อได้พลังงานไมโครเวฟเป็นเวลานาน น้ำจะเก็บพลังงานและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้ดีมากขึ้น อุณหภูมิจึงเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนที่กึ่งกลางมีอุณหภูมิต่ำกว่าที่บริเวณด้านข้าง เพราะอิทธิพลของ Topping ต่าง ๆ ที่วางอยู่ด้านบนบริเวณกึ่งกลางนั่นเอง

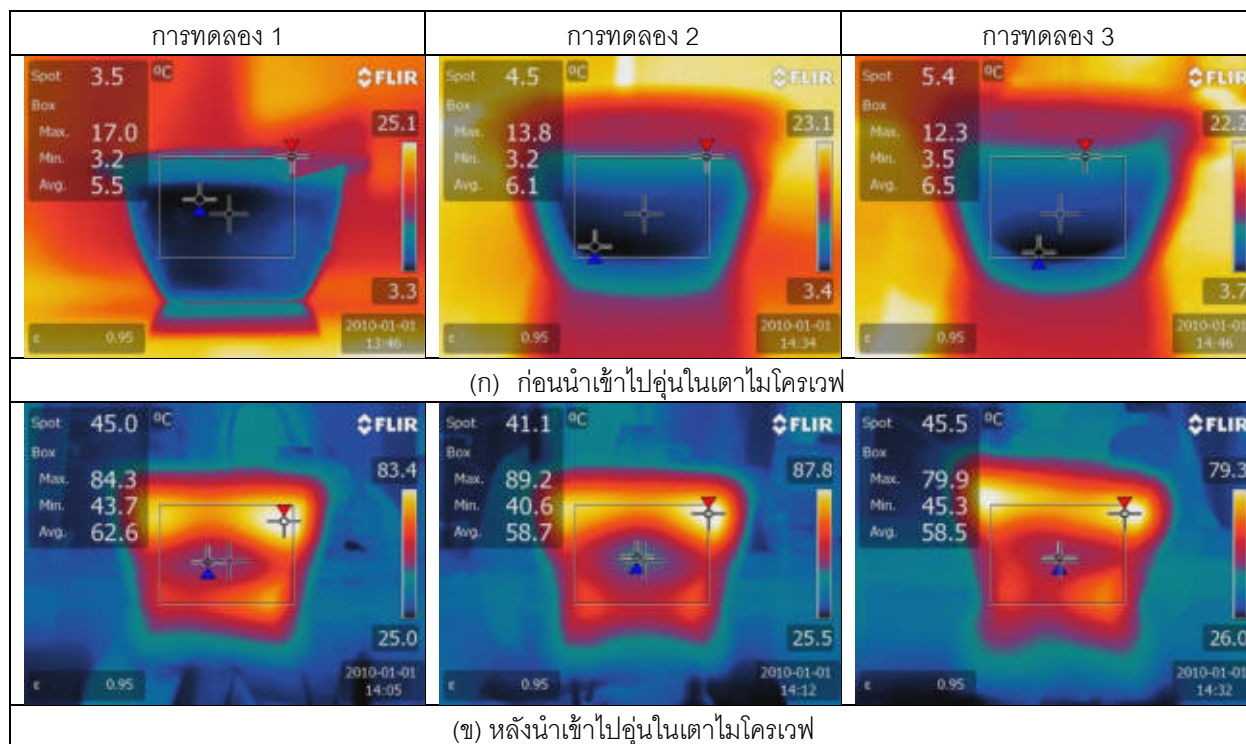
ภาพที่ 6 แสดงอุณหภูมิที่ผิวของไข่ตุ๋นจากการถ่ายภาพด้วยกล้องอินฟราเรด พบว่า ก่อนนำไข่ตุ๋นเข้าเตาไมโครเวฟมีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 5-6 °C บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำสุดเท่ากับ 3 °C อยู่บริเวณก้นถ้วย และเมื่อนำไปอุ่นในเตาไมโครเวฟ 1,300 วัตต์ ความถี่ 2,450 MHz เป็นเวลา 45 วินาที แล้วพบว่า ที่ด้านบน บริเวณขอบมีอุณหภูมิสูงที่สุดเท่ากับ 80 - 90 °C สูงกว่าในภาพที่ 4.12 เป็นเพราะบริเวณนั้นเป็นอากาศร้อนที่ผิวไข่ตุ๋น ส่วนกึ่งกลางของไข่ตุ๋นกลายเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำสุด มีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 40-45 °C เพราะอิทธิพลค่าการทะลุทะลวงของคลื่นไมโครเวฟ





(ข)

**ภาพที่ 5** การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในไช่ต๋นที่วัดได้จากสายไฟเบอร์ออฟติกในระหว่างการทำความร้อน  
(ก) การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่ง (ข) การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ย



**ภาพที่ 6** การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ผิวของไช่ต๋นที่วัดได้จากกล้องอินฟราเรด



#### 4. การเสื่อมเสียของอาหารพร้อมรับประทานแช่เย็นหลังจากอุ่นด้วยเตาไมโครเวฟ

##### 4.1 เต้าส่วนทรงเครื่อง

จากตารางที่ 4 แสดงปริมาณจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์อาหารภายหลังจากอุ่นเต้าส่วนด้วยเตาไมโครเวฟและนำตัวอย่างมาตรวจวิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์ทันที (ชั่วโมงที่ 0) พบว่าในตัวอย่างเต้าส่วน 25 กรัม มีจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด  $<30$  CFU/g เมื่อวางเต้าส่วนทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้อง ( $25^{\circ}\text{C}$ ) เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดตรวจพบในเต้าส่วน เพิ่มขึ้นเป็น  $4.16 \times 10^2$  CFU/g และมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่อวางทิ้งไว้เป็นเวลานานขึ้น ในขณะที่ ตรวจไม่พบ *E. coli* และ Coliforms ภายใน 12 ชั่วโมงที่วางตัวอย่างทิ้งไว้ แต่ตรวจพบในปริมาณ  $<10$  CFU/g ที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมงเป็นต้นไป ในส่วนของเชื้อจุลินทรีย์ *Samonella* spp. พบว่าตรวจไม่พบ (ND) ในช่วงระยะเวลาดังกล่าว (48 ชั่วโมง)

ลักษณะของเต้าส่วนทรงเครื่องหลังจากที่อุ่นในเตาไมโครเวฟ และทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้อง ในช่วงเวลาต่าง ๆ พบว่าเต้าส่วนทรงเครื่องเริ่มมีลักษณะเหม็น ยืด และมีกลิ่นไม่พึงประสงค์ซึ่งจัดเป็นกลิ่นรสที่ผิดปกติ (off-flavor) ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 12 เมื่อวางทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้อง

**ตารางที่ 4** แสดงผลการวิเคราะห์จุลินทรีย์ที่พบในเต้าส่วนหลังจากอุ่นด้วยเตาไมโครเวฟ และวางทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง

ระยะเวลา (ชั่วโมง)	เชื้อจุลินทรีย์		
	ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (CFU/g)	<i>E. coli</i> และ Coliforms (CFU/g)	<i>Samonella</i> spp. (CFU/g)
0	$<30$	ND	ND
4	$4.16 \times 10^2$	ND	ND
8	$> 300 \times 10^2$	ND	ND
12	$> 300 \times 10^2$	ND	ND
24	$> 300 \times 10^3$	$<10$	ND
48	$> 300 \times 10^3$	$<10$	ND

หมายเหตุ ND คือ Not detect ตรวจไม่พบเชื้อจุลินทรีย์

##### 4.2 ไข่ตุ๋น

จากตารางที่ 5 แสดงปริมาณจุลินทรีย์ภายหลังจากอุ่นไข่ตุ๋น ด้วยเตาไมโครเวฟและนำตัวอย่างมาตรวจวิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์ทันที (ชั่วโมงที่ 0) พบว่าในตัวอย่างไข่ตุ๋น 25 กรัม ตรวจไม่พบจุลินทรีย์ เมื่อวางไข่ตุ๋นทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้อง ( $25^{\circ}\text{C}$ ) เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดที่ตรวจพบในไข่ตุ๋น เพิ่มขึ้นเป็น  $3.24 \times 10$  CFU/g และมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่อวางทิ้งไว้เป็นเวลานานขึ้น ในขณะที่ตรวจพบจุลินทรีย์ *E. coli* และ Coliforms ที่ชั่วโมงที่ 8 แต่ตรวจพบในปริมาณ ต่ำกว่า 10 CFU/g ในส่วนของเชื้อจุลินทรีย์ *Samonella* spp. ตรวจไม่พบ (ND) ในช่วงระยะเวลาที่วางทิ้งไว้ (48 ชั่วโมง)

ลักษณะของไข่ตุ๋นหลังจากที่อุ่นในเตาไมโครเวฟ และทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้อง ในช่วงเวลาต่าง ๆ พบว่า ไข่ตุ๋นเริ่มมีลักษณะเหม็น ยืด และมีกลิ่นไม่พึงประสงค์ซึ่งจัดเป็นกลิ่นรสที่ผิดปกติ (off-flavor) ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 8 ที่วางทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้อง



**ตารางที่ 5** แสดงผลการวิเคราะห์จุลินทรีย์ที่พบในไส้ตันหลังจากอุ่นด้วยเตาไมโครเวฟ และวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง

ระยะเวลา (ชั่วโมง)	เชื้อจุลินทรีย์		
	ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (CFU/g)	<i>E. coli</i> และ Coliforms (CFU/g)	<i>Samonella</i> spp. (CFU/g)
0	ND	ND	ND
4	3.24x10	ND	ND
8	> 300x10	<10	ND
12	> 300x10	<10	ND
24	> 300x10 <sup>2</sup>	<10	ND
48	> 300x10 <sup>2</sup>	<10	ND

หมายเหตุ ND คือ Not detect ตรวจไม่พบเชื้อจุลินทรีย์

### วิจารณ์ผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยในด้านชนิดของอาหาร (เต้าส่วนและไส้ตัน) ที่มีผลต่อพฤติกรรมการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟและลักษณะการเสื่อมเสียของอาหาร โดยสามารถสรุปผลการวิจัยเป็นประเด็นต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

สมบัติไดอิเล็กตริกประกอบไปด้วย Dielectric constant (บ่งบอกความสามารถในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้า) Dielectric loss (บ่งบอกความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน) และ Tangent loss (อัตราส่วนของ Dielectric loss และ Dielectric constant) จากการศึกษาทั้ง 2 เมนู สรุปได้ว่า ไส้ตันมีค่า Dielectric loss และ Tangent loss สูง เพราะมีค่าความชื้นสูงสุด เนื่องจากในกระบวนการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟเป็นกระบวนการควบคู่ (Coupling) ระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและความร้อน ดังนั้นสมบัติทางความร้อนของอาหารก็ส่งผลที่สำคัญในกระบวนการทำความร้อน พลังงานไมโครเวฟเช่นเดียวกัน โดยสมบัติทางความร้อนที่สำคัญได้แก่ ความร้อนจำเพาะ (Specific heat) เช่น การปรุงอาหารด้วยน้ำมันในเตาไมโครเวฟ แม้มีค่า Dielectric loss ต่ำแต่ต้องการพลังงานเพียงเล็กน้อยในการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ จึงสามารถนำมาปรุงในเตาไมโครเวฟได้ดี ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) เกี่ยวข้องกับความสม่ำเสมอของการกระจายอุณหภูมิ หากอาหารสามารถนำความร้อนได้ดี จะทำให้ Temperature gradient ลดลง อัตราในการทำความร้อนก็จะสูงขึ้นนั่นเอง จากการศึกษา สรุปได้ว่าไส้ตันมีค่าความร้อนจำเพาะสูงสุดแต่ค่าการนำความร้อนต่ำสุด เพราะมีปริมาณความชื้น (Moisture content) สูงสุด ในการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของอาหารแช่เย็น ได้แก่ เต้าส่วนทรงเครื่องและไส้ตัน ซึ่งมีอุณหภูมิเริ่มต้นระหว่าง 3-5 °C แล้วนำไปวางที่ตำแหน่งกึ่งกลางของเตาไมโครเวฟ ความถี่ 2,450 MHz พบว่าทั้งสองเมนูมีลักษณะการกระจายตัวของความร้อนแบบเดียวกัน คือ อุณหภูมิที่ขอบจะสูงกว่าที่อุณหภูมิกึ่งกลางของอาหาร ทั้งนี้เพราะที่บริเวณกึ่งกลางของอาหารมีความหนาจาก Topping ต่าง ๆ มากกว่าที่ขอบ อีกทั้งที่บริเวณขอบยังได้รับอิทธิพลของคลื่นไมโครเวฟที่สะท้อนจากผนังเตาไมโครเวฟด้วย นอกจากสมบัติไดอิเล็กตริกของสมบัติทางความร้อนของอาหารจะมีอิทธิพลต่อการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแล้ว ปัจจัยอื่น ๆ เช่น 1) อุณหภูมิเริ่มต้นของอาหาร เป็นสิ่งสำคัญที่กำหนดอัตราและเวลาให้ความร้อน 2) ขนาดของชิ้นอาหาร โดยขนาดที่เหมือนกันจะร้อนขึ้นอย่างสม่ำเสมอและขนาดของชิ้นที่เล็กก็ต้องการพลังงานน้อยกว่าขนาดที่ใหญ่กว่า 3) รูปร่าง ซึ่งอาหารที่มีรูปร่างกลมมนมีแนวโน้มที่ค่อนข้างจะเกิดความร้อนสม่ำเสมอมากกว่าชิ้นอาหารที่มีมุมแหลมหรือมีทั้งส่วนที่หนาและบาง 4) องค์ประกอบทางเคมีของอาหาร ปัจจัยนี้จะมีผลโดยตรงกับสมบัติของอาหารทั้งสมบัติไดอิเล็กตริกและสมบัติทางความร้อน เป็นต้น

ในการศึกษาการเสื่อมเสียของอาหารภายหลังจากอุ่นด้วยเตาไมโครเวฟ สามารถสรุปได้ว่า ปริมาณจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์อาหาร ที่นำมาตรวจวิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์ทันที (ชั่วโมงที่ 0) พบว่าในตัวอย่างอาหารจำนวน 25 กรัม มีจำนวน



จุลินทรีย์ทั้งหมด <30 CFU/g เมื่อวางอาหารทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดตรวจพบในอาหารจะเพิ่มจำนวนขึ้น และมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่อวางทิ้งไว้เป็นเวลานานขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิเป็นหนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุณหภูมิในช่วง Temperature danger zone (5-60 °C) ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่จุลินทรีย์สามารถเพิ่มจำนวนได้อย่างรวดเร็ว ในขณะที่เชื้อจุลินทรีย์ *E. coli* และ Coliforms นั้นตรวจไม่พบ ภายใน 12 ชั่วโมง ที่วางตัวอย่างทิ้งไว้ แต่ตรวจพบในปริมาณ <10 CFU/g ที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมงเป็นต้นไป ในส่วนของเชื้อจุลินทรีย์ *Samonella* spp. พบว่าตรวจไม่พบ (ND) ในช่วงระยะเวลาดังกล่าว (48 ชั่วโมง) ในส่วนของผลการประเมินทางประสาทสัมผัสโดยการสังเกต พบว่า อาหารมีลักษณะเป็นเมือก ยืด มีกลิ่นหมัก ซึ่งจัดเป็นกลิ่นรสที่ผิดปกติ (off-flavor) หลังจากชั่วโมงที่ 8 ที่วางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าอาหารพร้อมรับประทานที่อุ่นด้วยวิธีการปกติ (ตามคำแนะนำบนฉลาก) จะเริ่มเกิดการเสื่อมเสียหลังจากชั่วโมงที่ 8 เมื่อวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้การเพิ่มกำลังวัตถุดิบหรือระยะเวลาในการอุ่นให้นานขึ้น จึงไม่มีความสำคัญต่อความรู้สึกของผู้บริโภค

### สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยในด้านชนิดของอาหาร (เต้าส่วนทรงเครื่องและไข่ตุ๋น) ที่มีผลต่อพฤติกรรมการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟและลักษณะการเสื่อมเสียของอาหาร ไข่ตุ๋นเป็นผลิตภัณฑ์อาหารที่มีค่าปริมาณความชื้นสูงทำให้ค่า Dielectric loss และ Tangent loss สูงกว่าเต้าส่วนทรงเครื่อง ในส่วนความจุความร้อน การแพร่กระจายความร้อน ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนภายในอาหารเมื่อได้รับพลังงานจากไมโครเวฟ หลังการใช้ไมโครเวฟ ผลิตภัณฑ์อาหารตรวจไม่พบปนเปื้อนเชื้อ *Samonella* spp. และ *E. coli* และ Coliforms ภายใน 4 ชั่วโมง เมื่อทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง ผลการศึกษาจากงานวิจัยนี้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญในการนำไปปรับปรุงรูปแบบของบรรจุภัณฑ์ เพื่อให้เกิดการกระจายความร้อนในผลิตภัณฑ์อย่างสม่ำเสมอและรวดเร็ว และในส่วนของ การเสื่อมเสียของอาหารจะเป็นข้อมูลสำคัญ เพื่อนำไปพิจารณาชี้แจงแก่ผู้บริโภค ถึงข้อควรปฏิบัติหลังจากอุ่นอาหารแล้ว

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

### เอกสารอ้างอิง

Becker, B R, and B A Fricke. (2003). Freezing | Principles. In , edited by Benjamin B T - Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition (Second Edition) Caballero, 2706–11. Oxford: Academic Press.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B0-12-227055-X/00521-6>.

Berk, Zeki. (2009). Refrigeration, Chilling and Freezing. In , 391–411. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373660-4.00019-3>.

Boubaker, Krifi, Amine Mosbah, and Makram Jaafar. (2014). Microbiological Comparison of Microwave and Traditional Thawing Processes for Poultry Meat. *African Journal of Microbiology Research* 8: 109–17. <https://doi.org/10.5897/AJMR2013.5734>.

Fellows, P J. (2009). 10 - Heat Processing. In *Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and*



*Nutrition*, edited by P J B T - Food Processing Technology (Third Edition) Fellows, 339–66. Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9781845696344.3.339>.

Ferreira, Valquíria C S, David Morcuende, Marta S Madruga, Silvia H Hernández-López, Fábio A P Silva, Sonia Ventanas, and Mario Estévez. (2016). Effect of Pre-Cooking Methods on the Chemical and Sensory Deterioration of Ready-to-Eat Chicken Patties during Chilled Storage and Microwave Reheating. *Journal of Food Science and Technology* 53 (6): 2760–69. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2248-2>.

Fricke, Brian, and Bryan Becker. (2001). Evaluation of Thermophysical Property Models for Foods. *HVAC&R Research* 7 (October): 311–30. <https://doi.org/10.1080/10789669.2001.10391278>.

Gill, C O. (2006). Microbiology of Frozen Foods. *Handbook of Frozen Food Processing and Packaging*, 85–100.

Szczawiński, Jacek, M E Szczawińska, Adriana Łobacz, Michał Tracz, and Agnieszka Jackowska-Tracz. (2017). Modelling the Growth Rate of *Listeria Monocytogenes* in Cooked Ham Stored at Different Temperatures. *Journal of Veterinary Research* 61. <https://doi.org/10.1515/jvetres-2017-0006>.