

## อิทธิพลของค่าคุณสมบัติความร้อนและค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกต่อการถ่ายเทความร้อนระหว่าง การทำความร้อนแก่อาหารด้วยพลังงานไมโครเวฟ

### The Effect of Thermal and Dielectric Properties on Heat Transfer During Foods Heating by Microwave Energy

พรทิพย์ แก่งอินทร์<sup>1\*</sup> และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

25/25 ถนนพุทธมณฑลสาย 4 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170

<sup>2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

99 หมู่ 18 ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

\*ติดต่อ: pornthip.kea@mahidol.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 0-2889-2138 ต่อ 6401-3, เบอร์โทรสาร 0-2889-2138 ต่อ 6429

#### บทคัดย่อ

การทำความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ (Microwave heating) เป็นแหล่งพลังงานความร้อนหนึ่งที่เป็นทางเลือกที่น่าสนใจกว่าวิธีการทำความร้อนแบบเดิม ข้อได้เปรียบที่สำคัญของการทำความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟคือสามารถทำความร้อนได้อย่างรวดเร็วและคลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุทะลวงผ่านพื้นผิวและทำให้เกิดความร้อนภายในวัสดุได้ จึงนำไปสู่ประสิทธิภาพด้านพลังงานที่สูง มีระยะเวลากระบวนการทำความร้อนที่สั้น และผลิตภัณฑ์มีคุณภาพสูง ดังนั้นเทคโนโลยีนี้จึงถูกใช้งานในภาคครัวเรือนและในภาคอุตสาหกรรมจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทำความร้อนแก่อาหารด้วยเตาไมโครเวฟ งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนระหว่างกระบวนการทำความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟโดยใช้วิธีการจำลองเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ การศึกษาด้วยวิธีการจำลองเชิงตัวเลขจะถูกเปรียบเทียบความถูกต้องด้วยวิธีการทดลอง ในการศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ซึ่งประกอบด้วยค่าคุณสมบัติความร้อน ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก และตำแหน่งภายในอาหารที่ส่งผลต่อการกระจายตัวอุณหภูมิและระยะเวลาการให้ความร้อนแก่อาหารจะถูกศึกษา แบบจำลองสามมิติของอาหารและเตาไมโครเวฟจะถูกพิจารณา สมการแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ขึ้นกับเวลาควบคู่กับสมการถ่ายเทความร้อนที่ขึ้นกับเวลาจะถูกแก้ปัญหโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method (FEM)) ผลการศึกษาพบว่าผลจากวิธีการจำลองเชิงตัวเลขจะสอดคล้องกันกับข้อมูลการทดลอง นอกจากนี้ยังพบว่าค่าคุณสมบัติความร้อนจะส่งผลต่อการกระจายตัวอุณหภูมิและระยะเวลาการให้ความร้อนแก่อาหารมากกว่าค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก

**คำหลัก:** การให้ความร้อนแก่อาหาร, ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก, พลังงานไมโครเวฟ, ค่าคุณสมบัติทางความร้อน

#### Abstract

Microwave heating is a one heat source that is an attractive alternative over conventional heating methods. The major advantages of microwave heating are rapid and can penetrate the surface and produce heat generation within materials, thus leading to high energy efficiency, short process time and high product quality. Therefore, this technology is used in many household and industrial applications, especially foods heating by microwave oven. This research studies the effect of parameters on heat transfer during microwave heating process by numerical simulation with computer programs. The numerical simulation study is validated with an experimental study. In this study, the effect of various parameters which consists of the thermal properties, the dielectric properties and the positions in the foods on temperature distribution and heating time of foods are investigated. Three-dimensional models of food and microwave oven are considered. The transient electromagnetic wave

propagation equation coupled with the transient heat transfer equation is solved by using the finite element method (FEM). The results show that the simulation results are in agreement with the experimental data. Moreover, the thermal properties will affect the temperature distribution and heating time of foods more than the dielectric properties.

**Keywords:** Foods heating, Dielectric properties, Microwave energy, Thermal properties

## 1. บทนำ

คลื่นไมโครเวฟจัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีค่าความยาวคลื่น (Wavelengths) อยู่ในช่วง 1 mm ถึง 1 m และมีค่าความถี่ (Frequencies) อยู่ในช่วง 0.3 GHz ถึง 300 GHz [1] การทำความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟเป็นวิธีการทำความร้อนวิธีหนึ่งที่น่าสนใจที่มีข้อได้เปรียบมากกว่าวิธีการให้ความร้อนแบบเดิมที่ให้ความร้อนเฉพาะที่ผิวภายนอกของวัสดุเท่านั้น เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟมีคุณสมบัติในการทะลุทะลวงสูง ทำให้เกิดความร้อนภายในวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยในการทำความร้อนให้แก่วัสดุ คลื่นไมโครเวฟจะทะลุทะลวงผ่านผิวของวัสดุเข้าไปสู่เนื้อโมเลกุลอนุภาคของวัสดุ ทำให้เกิดการเสียดสีและเกิดความร้อนขึ้น ซึ่งลักษณะการทำความร้อนแบบนี้จะเรียกว่า “การทำความร้อนเชิงปริมาตร (Volumetric heating)” จึงทำให้เกิดประสิทธิภาพในการทำความร้อนที่สูง และใช้เวลาในการทำความร้อนที่สั้น นอกจากนั้นพลังงานความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟยังถือเป็นพลังงานสะอาดที่ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะอีกด้วย [2] ดังนั้นการทำความร้อนจากไมโครเวฟจึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ในหลายๆ ด้านทั้งในภาคครัวเรือนและในภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำไปใช้ในการทำความร้อนแก่อาหารด้วยเตาไมโครเวฟ ปัจจุบันเตาไมโครเวฟเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยใช้ในการทำอาหาร อุ่นอาหาร หรือใช้ในการละลายน้ำแข็ง ฯลฯ โดยเตาไมโครเวฟจะทำการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานไมโครเวฟ แล้วพลังงานไมโครเวฟจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนเพื่อให้แก่อาหาร

แม้ว่ามีการวิจัยบางส่วนที่ทำการศึกษานำเทคโนโลยีจากพลังงานไมโครเวฟมาใช้ในกระบวนการอบแห้งอาหาร (Food drying) ประเภทต่างๆ มากมาย อาทิเช่น Maskan [3] ทำการศึกษาการอบแห้งกล้วยโดยใช้การอบแห้งด้วยลมร้อนผ่านการพาความร้อนเปรียบเทียบกับอบแห้งด้วยไมโครเวฟและการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ Skulinova และคณะ [4] ทำการศึกษากระบวนการอบแห้งถั่วงอก (Germinated

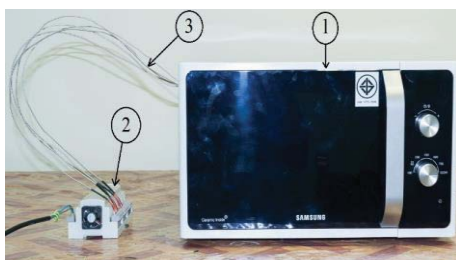
pea) ด้วยพลังงานไมโครเวฟ ผลจากการศึกษาพบว่าการใช้ไมโครเวฟในการอบแห้งจะให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าและลดเวลาในการอบแห้งลงน้อยกว่าการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน Sumnu และคณะ [5] ทำการศึกษาการอบแห้งแครอท โดยศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ กับการอบแห้งด้วยหลอดฮาโลเจนร่วมกับไมโครเวฟ (Halogen lamp-microwave combination) และการอบแห้งด้วยลมร้อน จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มระดับกำลังไมโครเวฟภายในเตาอบจะช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้ง และพบว่า การอบแห้งด้วยหลอดฮาโลเจนร่วมกับไมโครเวฟจะช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้งถึง 98 % และผลิตภัณฑ์มีคุณภาพมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอบแห้งโดยใช้ลมร้อน Jindarat และคณะ [6] ได้ทำการวิเคราะห์การใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้งใบชาโดยใช้ระบบไมโครเวฟที่มีการป้อนสองตำแหน่งแบบไม่สมมาตรร่วมกับระบบสุญญากาศ (Combined unsymmetrical double-feed microwave and vacuum system (CUMV)) โดยทำการศึกษาอิทธิพลของค่ากำลังไมโครเวฟ ความดันสุญญากาศ และโหมดการทำงานไมโครเวฟต่อการใช้พลังงาน งานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นแม้จะเป็นการศึกษาระบบการอบแห้งอาหารประเภทต่างๆ โดยการใช้พลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ แต่งานวิจัยที่ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในระหว่างการทำความร้อนแก่อาหารด้วยเตาไมโครเวฟ ตลอดจนหาระยะเวลาในการให้ความร้อนที่เหมาะสมสำหรับอาหารประเภทต่างๆ ยังมีอยู่จำนวนน้อยมาก เนื่องจากความซับซ้อนของปัญหาที่จะต้องวิเคราะห์ควบคุมทั้งการแพร่กระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟ และการถ่ายเทความร้อนร่วมกัน ตลอดจนความซับซ้อนของโครงสร้างภายในของอาหารประเภทต่างๆ และโครงสร้างของเตาไมโครเวฟ

ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงทำการศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยค่าคุณสมบัติความร้อน (Thermal properties) ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric properties) และตำแหน่งภายในอาหารที่

ส่งผลต่อการกระจายตัวอุณหภูมิ และระยะเวลาการสุกของอาหารประเภทต่างๆ โดยใช้วิธีการจำลองเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ผ่านแบบจำลองสามมิติของอาหารและเตาไมโครเวฟ สมการแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ขึ้นกับเวลาควบคู่กับสมการถ่ายเทความร้อนที่ขึ้นกับเวลาจะถูกแก้ปัญหโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method (FEM)) และทำการเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นด้วยวิธีการทดลอง ผลจากการศึกษาจะสามารถใช้เป็นพื้นฐานในการศึกษาการทำความร้อนแก่อาหารประเภทต่างๆ ด้วยเตาไมโครเวฟทั้งในภาควิชาวิศวกรรมและภาคอุตสาหกรรมได้

## 2. การทดลอง

ในการทดลองจะใช้เตาไมโครเวฟบ้านที่มีควิตี้ (Cavity) ภายในเตาไมโครเวฟขนาด  $310 \times 280 \times 190 \text{ mm}^3$  (แกน x y และ z) มีขนาดพื้นที่ของท่อนำคลื่น (Wave guide) ภายในเตาไมโครเวฟขนาด  $79 \times 43 \text{ mm}^2$  ทำงานที่ความถี่ 2,450 MHz ซึ่งเป็นความถี่ที่นิยมใช้สำหรับเตาไมโครเวฟในครัวเรือนโดยทั่วไป และใช้ค่ากำลังไมโครเวฟที่ป้อน 100 W และระยะเวลาที่ใช้ในการทำความร้อน 180 s ในการทดลองเพื่อวัดค่าอุณหภูมิเพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องกับการศึกษาด้วยวิธีการจำลองเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยในการทดลองจะใช้ข้าวซึ่งบรรจุภายในภาชนะบรรจุข้าวเป็นตัวอย่างอาหารในการทดสอบ ใช้เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ชนิด K ในการวัดอุณหภูมิของข้าวภายในเตาไมโครเวฟ และใช้ Data logger เป็นอุปกรณ์ในการเก็บบันทึกค่าอุณหภูมิ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองจะแสดงดังรูปที่ 1



- ① Microwave oven
- ② Data logger
- ③ Thermocouple

รูปที่ 1 อุปกรณ์ในการทดลอง

ก่อนการทดลองจะมีการวัดอุณหภูมิเริ่มต้นของข้าวด้วยเทอร์โมมิเตอร์ก่อนเข้าเตาไมโครเวฟดังแสดงในรูปที่ 2 โดยพบว่าข้าวมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่  $37^\circ\text{C}$  และในการทดลองจะทำการวัดค่าอุณหภูมิของข้าวบริเวณกึ่งกลางของข้าว



รูปที่ 2 การวัดอุณหภูมิเริ่มต้นของข้าวด้วยเทอร์โมมิเตอร์ก่อนเข้าเตาไมโครเวฟ

การหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าว (ตัวอย่างอาหาร) จะได้จากการใช้เครื่องวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ โดยจะทำการวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกทั้งหมด 3 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย เพื่อให้ได้ค่าคุณสมบัติไปใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ค่าของอุณหภูมิของข้าว (ตัวอย่างอาหาร) โดยรูปที่ 3 จะแสดงการวัดและเก็บค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าว และเครื่องวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก โดยจากการทดลองวัดจะได้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ( $\epsilon'$ ) เท่ากับ 12.380 F/m และค่าไดอิเล็กตริกอสแฟคเตอร์ ( $\epsilon''$ ) เท่ากับ 3.418 F/m โดยค่าคุณสมบัติทางความร้อนของข้าวมีดังนี้ ค่าความหนาแน่น ( $\rho$ ) เท่ากับ  $769 \text{ kg/m}^3$  [7] ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ( $c$ ) เท่ากับ  $1.202 \text{ J/kg.K}$  [8] และค่าการนำความร้อนหรือสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $k$ ) เท่ากับ  $0.0466 \text{ W/m.K}$  [9]



รูปที่ 3 การวัดและเก็บค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของข้าวและเครื่องมือวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

### 3. การจำลองเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

#### 3.1 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในการจำลองเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะใช้แบบจำลองสามมิติตามแนวแกน  $x$   $y$  และ  $z$  ของอาหารและเตาไมโครเวฟในการวิเคราะห์ โดยจะจำลองให้อาหารมีรูปทรงสี่เหลี่ยมบรรจุภายในภาชนะบรรจุอาหาร และเตาไมโครเวฟมีขนาดเช่นเดียวกันกับขนาดของเตาไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลองและไม่พิจารณาอุณหภูมิ โดยพิจารณาให้อาหารมีคุณสมบัติเป็นสารเนื้อเดียว และอาหารจะได้รับพลังงานไมโครเวฟในการทำความร้อนที่สม่ำเสมอผ่านทางท่อนำคลื่น เมื่ออาหารได้รับอิทธิพลจากคลื่นไมโครเวฟอาหารจะดูดซับคลื่นไมโครเวฟและแปลงเป็นความร้อนภายใน ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้อุณหภูมิของอาหารเพิ่มขึ้น โดยแบบจำลองของอาหารและเตาไมโครเวฟจะแสดงในรูปที่ 4

#### 3.2 สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์

##### 1) การวิเคราะห์การแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การวิเคราะห์การแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในอาหารตัวอย่างชนิดต่างๆ จะถูกคำนวณโดยใช้สมการการแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations) [10] คือ

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu_r} \nabla \times \vec{E} \right) - k_0^2 \left( \epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0} \right) \vec{E} = 0 \quad (1)$$

เมื่อ  $\vec{E}$  คือความเข้มของสนามไฟฟ้า (Electric field intensity (V/m))  $\mu_r$  คือค่าการซึมผ่านสัมพัทธ์ (Relative Permeability (-))  $\epsilon_r'$  คือค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ (Relative Permittivity (-))  $\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12}$  F/m คือค่าเปอร์มิตติวิตีในที่ว่างหรือฟรีสเปซ (Permittivity of free space (F/m))  $\sigma$  คือค่าการนำไฟฟ้า (Electric conductivity (S/m))  $\omega = 2\pi f$  คือความถี่เชิงมุม (Angular frequency (rad/s))  $k_0$  คือเลขคลื่นในที่ว่างหรือฟรีสเปซ (Wave number of free space ( $m^{-1}$ )) และ  $j = \sqrt{-1}$  โดยค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของอาหารชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์จะกำหนดให้มีค่าคงที่ โดยเงื่อนไขขอบเขตสำหรับการวิเคราะห์การแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีดังนี้

อาหารจะได้รับอิทธิพลจากคลื่นไมโครเวฟที่สม่ำเสมอจากด้านข้างของตำแหน่งจากท่อนำคลื่น ดังนั้นเงื่อนไขขอบเขตของการแพร่กระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทางด้านช่องออกคลื่นของท่อนำคลื่นจะเป็นแบบพอร์ต (Port boundary condition) ที่มีการระบุค่ากำลังไมโครเวฟที่ป้อนที่มีค่าคงที่ [11-12] คือ

$$S = \int (\vec{E} - \vec{E}_1) \cdot \vec{E}_1 / \int \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_1 \quad (2)$$

และผนังของเตาไมโครเวฟจะพิจารณาให้มีเงื่อนไขขอบเขตแบบตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ (Perfect electric conductor boundary condition) คือ

$$\hat{n} \times \vec{E} = 0 \quad (3)$$

##### 2) การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน

ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอาหารชนิดต่างๆ จะได้จากการวิเคราะห์สมการถ่ายเทความร้อน และเพื่อให้สอดคล้องกับการวิเคราะห์การแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนจะถูกวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองสามมิติเช่นเดียวกัน สมการที่ใช้ในการอธิบายการถ่ายเทความร้อนภายในอาหารคือ:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - k \nabla^2 T = Q \quad (4)$$

เมื่อ  $T$  คือค่าอุณหภูมิ (Temperature ( $^{\circ}C$ ))  $\rho$  คือค่าความหนาแน่น (Density ( $kg/m^3$ ))  $c$  คือค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity ( $J/kg \cdot ^{\circ}C$ ))  $k$  คือค่าการนำความร้อนหรือสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity ( $W/m \cdot ^{\circ}C$ )) และ  $Q$  คือแหล่งความร้อนจากภายนอก (External heat source term (W)) ซึ่งในที่นี้จะได้จากแหล่งพลังงานความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟในสมการที่ (5) [13]

$$Q = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r' (\tan \delta) \vec{E}^2 \quad (5)$$

เมื่อ  $\tan \delta$  คือค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียแทนเจนต์ (Loss tangent coefficient) สำหรับเงื่อนไขขอบเขตสำหรับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนคือ ภายนอก

ของอาหารจะมีเงื่อนไขขอบเขตเนื่องจากการได้รับแหล่งความร้อนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic heat source boundary condition) อันเนื่องมาจากได้รับอิทธิพลจากคลื่นไมโครเวฟ ดังแสดงในสมการที่ (6)

$$-\hat{n} \cdot (-k \nabla T) = Q \quad (6)$$

และบริเวณรอบนอกของภาชนะบรรจุอาหารจะพิจารณาให้มีคุณสมบัติเป็นฉนวนหรือไม่มีการถ่ายเทความร้อน (Thermal insulation boundary condition) คือ

$$-\hat{n} \cdot (-k \nabla T) = 0 \quad (7)$$

โดยเงื่อนไขขอบเขตในการวิเคราะห์จะแสดงในรูปที่ 5

### 3.3 การจำลองเชิงตัวเลข

สมการหลักในการวิเคราะห์จะถูกแก้ปัญหด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method (FEM)) ผ่านโปรแกรม COMSOL<sup>TM</sup> Multiphysics ซึ่งเป็นระเบียบวิธีที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาที่มีขอบเขตของโดเมนในปัญหาที่มีรูปทรงซับซ้อน หรือมีรูปทรงไม่สมมาตร เพื่อศึกษาการกระจายตัวอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในอาหารชนิดต่างๆ เมื่อได้รับการทำความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ โดยสมการการแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสมการถ่ายเทความร้อนจะควบคู่กันด้วยเทอมแหล่งความร้อนจากภายนอก ( $Q_{ext}$ ) ในสมการที่ (5) ซึ่งแบบจำลองจะถูกคำนวณโดยใช้เอลิเมนต์ (Element) รูปสามเหลี่ยม และใช้ฟังก์ชันการประมาณค่าในช่วงแบบลากรองจังก์ชันที่สอง (Lagrange quadratic interpolation function) ในการประมาณค่าอุณหภูมิในแต่ละเอลิเมนต์ โดยจำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ 142,982 เอลิเมนต์ และจำนวนของ Degrees of freedom คือ 954,807 โหนด

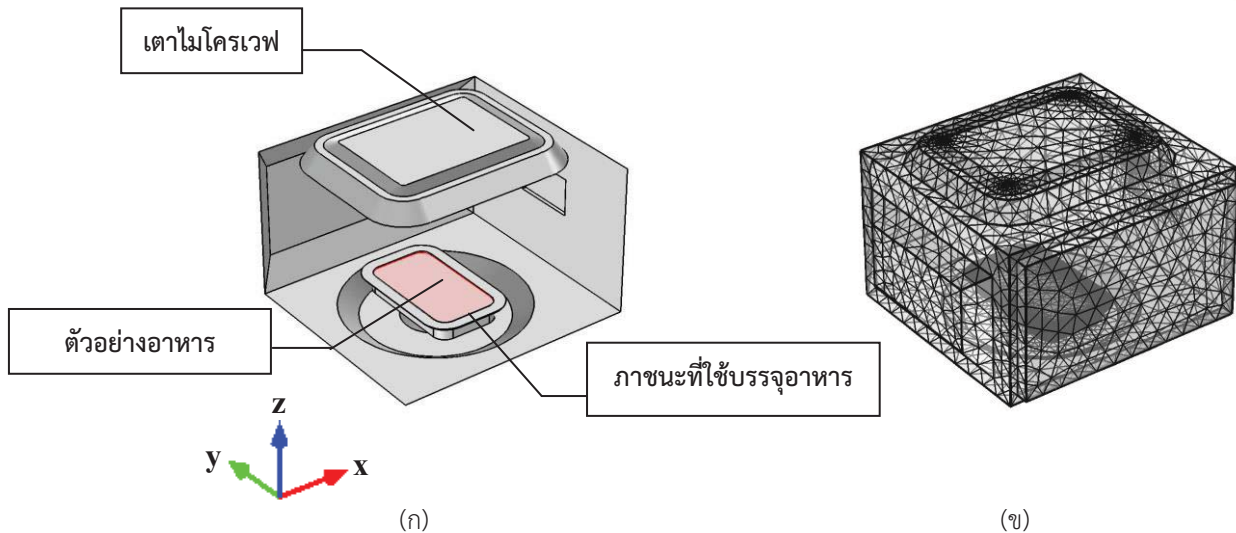
### 4. ผลและการวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้จะการศึกษาความสัมพันธ์ของค่าคุณสมบัติทางความร้อน ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก และตำแหน่งภายในอาหารที่ส่งผลต่อการกระจายตัวอุณหภูมิและระยะเวลาการสุกของอาหาร โดยค่าคุณสมบัติทางความร้อนที่ศึกษาประกอบด้วยค่าความหนาแน่น (Density ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\rho$ ) ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity ( $\text{J/kg.K}$ ),  $c$ ) ค่าการนำความร้อนหรือค่า

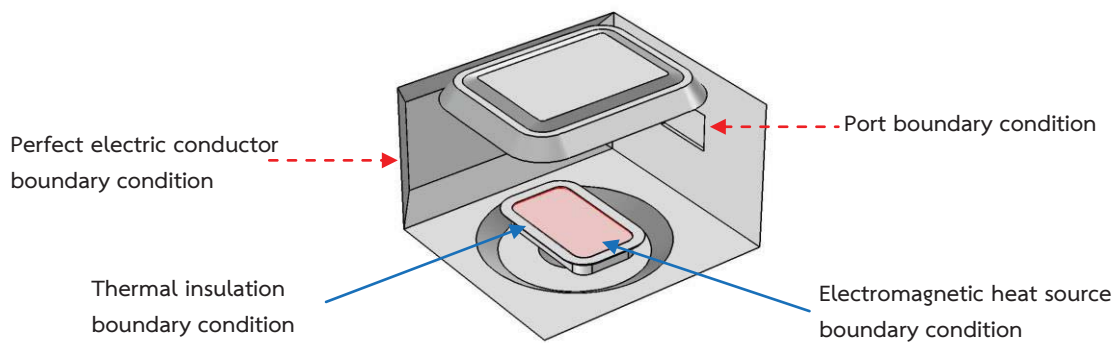
สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity ( $\text{W/m.K}$ ),  $k$ ) และค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ศึกษาจะประกอบด้วยค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant ( $\text{F/m}$ ),  $\epsilon'$ ) และค่าไดอิเล็กตริกโลสแฟคเตอร์ (Dielectric loss factor ( $\text{F/m}$ ),  $\epsilon''$ ) โดยค่าคุณสมบัติทางความร้อนและค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ใช้ในการศึกษาจะได้อาหารประเภทต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยในการจำลองเชิงตัวเลขจะใช้ค่ากำลังและค่าความถี่ไมโครเวฟที่ป้อนที่คงที่เท่ากับ 800 W และ 2,450 MHz ตามลำดับ และทำการเก็บข้อมูลของอุณหภูมิ 3 ตำแหน่งในรูปที่ 6 จะแสดงขนาดของอาหารและตำแหน่งการเก็บข้อมูลของอุณหภูมิ 3 ตำแหน่งที่มีค่าอุณหภูมิอย่างน้อย  $60 \pm 1$  องศาเซลเซียสในทุกตำแหน่ง (ค่าอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นค่าอุณหภูมิที่อาหารแช่แข็งเมื่อนำมาให้ความร้อนแล้วสามารถนำมารับประทานได้หรืออาหารสุก [17]) จากนั้นทำการบันทึกระยะเวลาที่อาหารสุกเพื่อจะได้ทราบถึงระยะเวลาที่เหมาะสมในการให้ความร้อนแก่อาหารด้วยเตาไมโครเวฟ

#### 4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

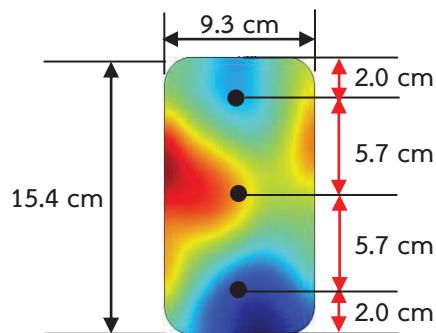
เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ จึงทำการทดลองเก็บข้อมูลของค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองจริงด้วยเตาไมโครเวฟ โดยใช้อาหารตัวอย่างคือข้าวในการทดลอง โดยใช้กำลังไมโครเวฟที่ป้อน 100 W และระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่อาหารที่ 180 s และทำการวัดค่าอุณหภูมิที่บริเวณตำแหน่งกึ่งกลางของอาหารตัวอย่างข้าว นำค่าอุณหภูมิที่แปรเปลี่ยนตามเวลาไปทำการพล็อตเพื่อเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ได้จากการใช้การจำลองเชิงตัวเลข โดยค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองและจากการใช้การจำลองเชิงตัวเลขจะแสดงดังตารางที่ 2 และกราฟเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองและจากการใช้การจำลองเชิงตัวเลขจะแสดงในรูปที่ 7 โดยจากรูปจะพบว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่อาหารเพิ่มขึ้น ค่าอุณหภูมิก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และพบว่าผลที่ได้จากการทดลอง และผลที่ได้จากการใช้การจำลองเชิงตัวเลขจะมีความสอดคล้องกัน ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์และวิธีการจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้จึงมีความน่าเชื่อถือสามารถนำไปใช้ในการศึกษาในส่วนอื่นๆ ต่อไป โดยค่าความผิดพลาดจากการทดลองด้วยวิธีการหา Root mean square (RMS) จะมีค่า 1.855 และ Mean Absolute Percent Error (MAPE) จะมีค่า 2.022%



รูปที่ 4 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา (ก) แบบจำลองของอาหารและเตาไมโครเวฟ และ (ข) จำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลอง



รูปที่ 5 เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลอง



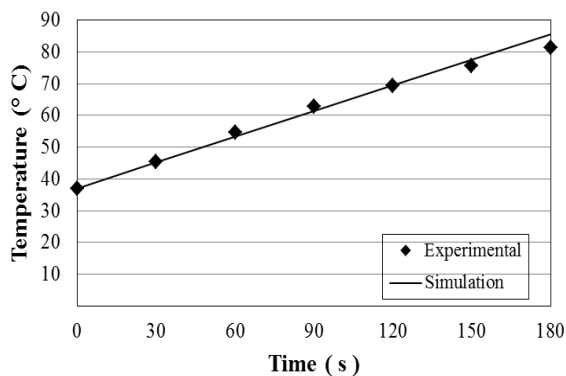
รูปที่ 6 ขนาดของอาหารและตำแหน่งการวัดค่าอุณหภูมิ 3 ตำแหน่งภายในอาหาร

ตารางที่ 1 ค่าคุณสมบัติทางความร้อนและค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของอาหารประเภทต่างๆ ที่เลือกใช้ในการศึกษา [7, 14-16]

| $\rho$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |             | $c$<br>(J/kg.K) |              | $k$<br>(W/m.K) |                | $\epsilon'$<br>(F/m) |            | $\epsilon''$<br>(F/m) |                |
|--------------------------------|-------------|-----------------|--------------|----------------|----------------|----------------------|------------|-----------------------|----------------|
| Chicken breast                 | 1121<br>[7] | Chicken         | 4.34<br>[14] | Chicken breast | 0.412<br>[14]  | Chicken breast       | 56<br>[15] | Chicken breast        | 18.2<br>[15]   |
| Meat                           | 881<br>[7]  | Fish            | 3.17<br>[14] | Pork fat       | 0.215<br>[14]  | Turkey               | 40<br>[16] | Turkey                | 15.625<br>[16] |
| Fish                           | 769<br>[7]  | Pork            | 2.17<br>[14] | Beef           | 0.0382<br>[14] | Beef                 | 30<br>[16] | Beef                  | 9.4<br>[16]    |

ตารางที่ 2 ค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองและจากการใช้  
การจำลองเชิงตัวเลขที่ค่ากำลังไมโครเวฟที่ป้อน 100 W  
และระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่อาหาร 180 s

| Time (s) | Temperature (°C) |            |
|----------|------------------|------------|
|          | Experiment       | Simulation |
| 0        | 37.0             | 37.0       |
| 30       | 45.44            | 45.24      |
| 60       | 54.66            | 53.33      |
| 90       | 62.74            | 61.39      |
| 120      | 69.34            | 69.48      |
| 150      | 75.72            | 77.52      |
| 180      | 81.82            | 85.53      |

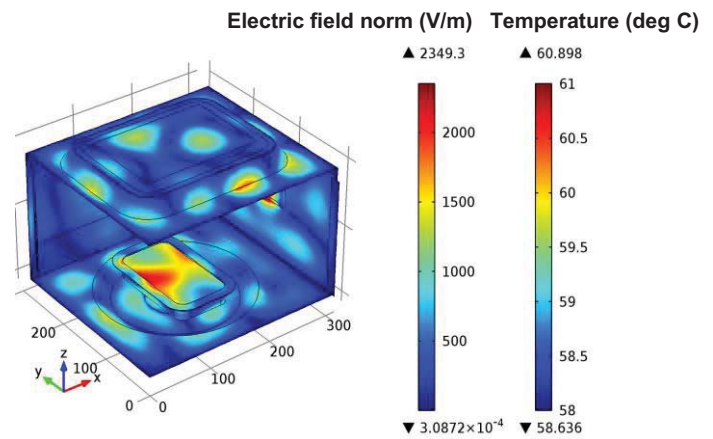


รูปที่ 7 กราฟเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดลอง  
และจากการใช้การจำลองเชิงตัวเลข

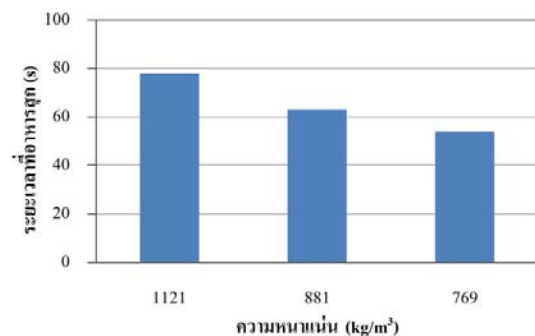
#### 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ $\rho$ , $c$ , $k$ , $\varepsilon'$ และ $\varepsilon''$ กับค่าอุณหภูมิและระยะเวลาที่อาหารสุก

ชุดข้อมูลที่เลือก ค่าอุณหภูมิที่วัดได้ทั้ง 3 ตำแหน่ง  
และระยะเวลาที่อาหารสุกจะแสดงในตารางที่ 3 ตัวอย่าง  
การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิภายใน  
อาหารและเตาไมโครเวฟจากการใช้โปรแกรม  
คอมพิวเตอร์ ในกรณี  $\rho = 881 \text{ kg/m}^3$ ,  $c = 4.31$   
 $\text{J/kg.K}$ ,  $k = 0.412 \text{ W/m.K}$ ,  $\varepsilon' = 56 \text{ F/m}$  และ  
 $\varepsilon'' = 18.2 \text{ F/m}$  จะแสดงในรูปที่ 8 จากตารางที่ 3 จะ  
พบว่าเมื่อค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้  
ระยะเวลาที่อาหารสุกเพิ่มสูงขึ้นไปด้วย เนื่องจากค่าความ  
หนาแน่นเป็นตัวแปรที่เป็นการวัดมวลต่อหนึ่งหน่วย  
ปริมาตร เมื่อพิจารณาปริมาตรอาหารเท่ากันอาหารที่มีค่า  
ความหนาแน่นสูงจะมีมวลมากกว่าอาหารที่มีค่าความ

หนาแน่นต่ำ ดังนั้นหากอาหารที่มีความหนาแน่นมากแล้ว  
ก็ย่อมที่จะต้องการพลังงานความร้อนที่มากในการทำให้  
อาหารมีอุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้ต้องใช้ระยะเวลาที่อาหาร  
สุกมากตามไปด้วย โดยแผนภูมิแท่งแสดงความสัมพันธ์  
ระหว่างค่าความหนาแน่นกับระยะเวลาที่อาหารสุกจะ  
แสดงในรูปที่ 9

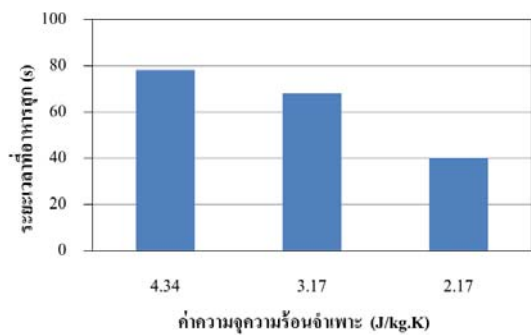


รูปที่ 8 ตัวอย่างการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและ  
อุณหภูมิภายในอาหารและเตาไมโครเวฟจากการใช้  
โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในกรณี  $\rho = 881 \text{ kg/m}^3$ ,  
 $c = 4.31 \text{ J/kg.K}$ ,  $k = 0.412 \text{ W/m.K}$ ,  
 $\varepsilon' = 56 \text{ F/m}$  และ  $\varepsilon'' = 18.2 \text{ F/m}$



รูปที่ 9 แผนภูมิแท่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความ  
หนาแน่นกับระยะเวลาที่อาหารสุก

ในส่วนถัดมาจะพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่า  
ความจุความร้อนจำเพาะกับระยะเวลาที่อาหารสุก โดย  
จะพบว่าเมื่อค่าความจุความร้อนจำเพาะเพิ่มขึ้นก็จะส่งผล  
ระยะเวลาที่อาหารสุกมากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน โดย  
แผนภูมิแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุความร้อนจำเพาะกับระยะเวลาที่อาหารสุกจะแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุความร้อนจำเพาะกับระยะเวลาที่อาหารสุก

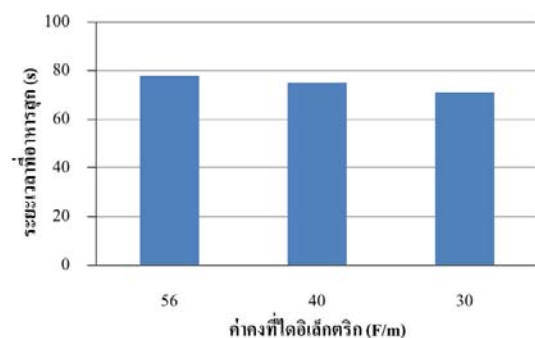
ซึ่งผลที่ได้มีความตรงข้ามกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนหรือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนกับระยะเวลาที่อาหารสุก โดยพบว่าเมื่อค่าการนำความร้อนหรือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ระยะเวลาที่อาหารสุกลดลง เนื่องจากค่าการนำความร้อนหรือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจะเป็นตัวแปรที่บ่งบอกถึงอัตราเร็วของการส่งผ่านพลังงานความร้อนโดยการนำความร้อนของวัสดุต่างๆ ซึ่งเป็นการส่งผ่านความร้อนภายในโมเลกุลของวัสดุจากโมเลกุลที่มีระดับพลังงานสูงกว่าไปยังระดับพลังงานที่ต่ำกว่า ดังนั้นหากอาหารมีค่าการนำความร้อนหรือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงก็จะสามารถส่งผ่านความร้อนภายในอาหารไปได้มาก จึงส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นได้อย่างรวดเร็ว และส่งผลให้ระยะเวลาที่อาหารสุกลดลงโดยแผนภูมิแห่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนหรือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนกับระยะเวลาที่อาหารสุกแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนหรือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนกับระยะเวลาที่อาหารสุก

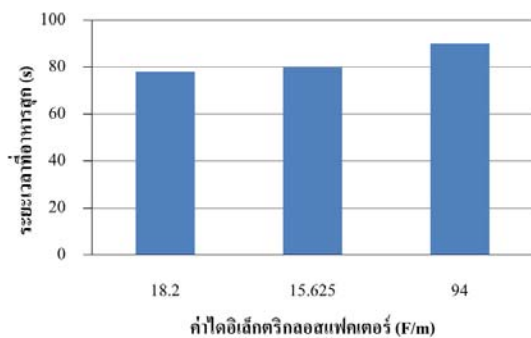
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับระยะเวลาที่อาหารสุกจะพบว่าเมื่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

เพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้มีระยะเวลาที่อาหารสุกเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเป็นค่าตัวแปรที่อธิบายความสามารถในการสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟจากผิวของวัสดุไดอิเล็กตริกหรืออาหาร หรือบ่งบอกถึงอัตราที่คลื่นไมโครเวฟส่งผ่านวัสดุ ดังนั้นหากอาหารมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่สูงก็จะแสดงว่าคลื่นไมโครเวฟที่ส่งผ่านอาหารมีมาก (อาหารดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้น้อย) จึงต้องใช้พลังงานจำนวนมากในการเพิ่มอุณหภูมิ ส่งผลให้ต้องใช้ระยะเวลาที่อาหารสุกที่สูงขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตามจะพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะส่งผลต่อระยะเวลาที่อาหารสุกไม่มากนัก กล่าวคือในแต่ละกรณีจะได้ระยะเวลาที่อาหารสุกที่ใกล้เคียงกัน โดยแผนภูมิแห่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับระยะเวลาที่อาหารสุกจะแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับระยะเวลาที่อาหารสุก

และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าไดอิเล็กตริก ลอสแฟคเตอร์กับระยะเวลาที่อาหารสุกจะพบว่าเมื่อค่าไดอิเล็กตริก ลอสแฟคเตอร์เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ระยะเวลาที่อาหารสุกลดลง เนื่องจากค่าไดอิเล็กตริก ลอสแฟคเตอร์จะเป็นตัวแปรที่บ่งบอกถึงความสูญเสียพลังงานภายในวัสดุ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือเป็นตัวแปรที่บ่งบอกว่าวัสดุจะสามารถดูดซับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟที่ผ่านเข้ามาแล้วสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้เท่าไร ดังนั้นหากอาหารมีค่าไดอิเล็กตริก ลอสแฟคเตอร์สูงก็จะสามารถดูดซับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟที่ผ่านเข้ามาได้มากและสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้มากเช่นเดียวกัน จึงส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้มีระยะเวลาที่อาหารสุกลดลง โดยแผนภูมิแห่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าไดอิเล็กตริก ลอสแฟคเตอร์กับระยะเวลาที่อาหารสุกจะแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  
ค่าไดอิเล็กทริกลอสมแฟคเตอร์กับระยะเวลาที่อาหารสุก

## 5. สรุปผล

บทความวิจัยนี้นำเสนออิทธิพลของค่าคุณสมบัติทางความร้อนและค่าคุณสมบัติไดอิเล็กทริกต่อการถ่ายเทความร้อน และระยะเวลาที่อาหารสุกระหว่างการให้ความร้อนแก่อาหารด้วยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ โดยผลการศึกษาพบว่าผลจากวิธีการจำลองเชิงตัวเลขจะสอดคล้องกันกับข้อมูลการทดลอง และพบว่าอาหารที่มีค่าความหนาแน่น ค่าความจุความร้อนจำเพาะ และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงขึ้น จะส่งผลให้การกระจายตัวอุณหภูมิและระยะเวลาที่อาหารสุกเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่อาหารที่มีค่าการนำความร้อนและค่าไดอิเล็กทริกลอสมแฟคเตอร์ที่สูงขึ้น จะส่งผลให้การกระจายตัวอุณหภูมิและระยะเวลาที่อาหารสุกลดลง และพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าคุณสมบัติทางความร้อนจะส่งผลต่อระยะเวลาที่อาหารสุกมากกว่าการเปลี่ยนแปลงค่าคุณสมบัติไดอิเล็กทริก

## 6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือวัดค่าคุณสมบัติไดอิเล็กทริก

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ศ.ดร. ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช (2551). หนังสือพื้นฐานการทำ ความร้อนด้วยไมโครเวฟ, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- [2] Klinbun W. and Rattanadecho P. (2012). Numerical model of microwave driven convection in multi-layer porous pack bed using

a rectangular waveguide (effects of layers configuration, layered thickness and frequency), *ASME Journal of Heat Transfer*, vol. 134, April 2012, pp. 042605-1-042605-10.

[3] Maskan, M. (2000). Microwave/air and microwave finish drying of banana, *Journal of Food Engineering*, vol. 44(2), May 2000, pp. 71 – 78.

[4] Skulinova, M., Kadlec, P., Kaasova, J., Dosta'lova, J., Za'topkova, M., Hosnedl, V. and Hrachovinova, J. (2002). Microwave treatment and drying of germinated pea, *Czech Journal of Food Sciences*, vol. 20(1), December 2001, pp. 23 – 30.

[5] Sumnu, G., Turabi, E. and Oztop, M. (2005). Drying of carrots in microwave and halogen lamp-microwave combination ovens, *LWT -food science and technology*, vol. 38(5), November 2014, pp. 549 – 553.

[6] Jindarat., W., Sungsoontorn., S. and Rattanadecho., P. (2013). Analysis of energy consumption in drying process of biomaterials using a combined unsymmetrical double-feed microwave and vacuum system (CUMV) (Case study: tea leaves), *Drying Technology: An International Journal*, vol. 31(10), June 2013, pp. 1138 – 1147.

[7] Bulk Density Averages, Key Technology, <http://go.key.net/>

[8] Lee, C.H. and Do Sup Chung, D.S., Grain Physical and Thermal Properties Related to Drying and Aeration, *Principles of Grain Drying and Aeration*, pp. 83 – 122.

[9] Yarbrough, D.W., Kenneth E. Wilkes, K.E., Olivier, P.A., Graves, R.S., Vohra, A. (2003). Apparent thermal conductivity data and related information for rice hulls and crushed pecan shells, *International Thermal Conductivity Conference*, October 2003, pp. 222 – 230.

[10] Wessapan, T., Srisawatdhisukul, S. and Rattanadecho, P. (2011). The effects of dielectric

shield on specific absorption rate and heat transfer in the human body exposed to leakage microwave energy, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol.38, December 2010, pp. 255 – 262.

[11] Wessapan, T. and Rattanadecho, P. (2013). Specific absorption rate and temperature increase in the human eye due to electromagnetic fields exposure at different frequencies, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 64, September 2013, pp. 426 – 435.

[12] Wessapan, T. and Rattanadecho, P. (2014) Influence of ambient temperature on heat transfer in the human eye during exposure to electromagnetic fields at 900 MHz, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol.70, March 2014, pp. 378 – 388.

[13] Makul, N. and Rattanadecho, P. (2010) Microwave pre-curing of natural rubber-compounding using a rectangular wave guide, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 37(7), August 2010, pp. 914 – 923.

[14] ASHRAE Handbook—Refrigeration (SI) (2006). Refrigeration Application for Foods and Beverages, Thermal Properties of Foods, CHAPTER 9, pp. 9.1 – 9.31.

[15] Sipahioglu, O., Barringer, S.A, Bircan, C. J. (2003). The dielectric properties of meats as a function of temperature and composition, *International Microwave Power Institute*, vol. 38(3), pp. 161 – 169.

[16] To, E.C., Mudgett, R.E., Wang, D.I.C., Goldblith, S.A., Decareau, R.V. (1974). Dielectric properties of food materials, *Journal of Microwave Power*, vol. 9(4), pp. 303 – 315.

[17] บริษัท Sang Chai Meter (2015). อุณหภูมิกับความปลอดภัยในอาหาร, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <https://sangchaimeter.bentoweb.com/en/blog/671/blog-671>.

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคุณสมบัติทางความร้อน และค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและค่าอุณหภูมิและระยะเวลาที่อาหารสุก

| $\rho$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | $c$<br>(J/kg.K) | $k$<br>(W/m.K) | $\varepsilon'$<br>(F/m) | $\varepsilon''$<br>(F/m) | $T_1$<br>(°C) | $T_2$<br>(°C) | $T_3$<br>(°C) | $T_{avg}$<br>(°C) | $t$<br>(s) |
|--------------------------------|-----------------|----------------|-------------------------|--------------------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|------------|
| 1121                           | 4.31            | 0.412          | 56                      | 18.2                     | 59.30         | 60.75         | 59.82         | 59.96             | 78         |
| 881                            | 4.31            | 0.412          | 56                      | 18.2                     | 59.54         | 61.32         | 60.47         | 60.44             | 63         |
| 769                            | 4.31            | 0.412          | 56                      | 18.2                     | 59.56         | 61.38         | 60.58         | 60.51             | 54         |
| 1121                           | 4.34            | 0.412          | 56                      | 18.2                     | 59.30         | 60.75         | 59.82         | 59.96             | 78         |
| 1121                           | 3.17            | 0.412          | 56                      | 18.2                     | 59.82         | 61.27         | 60.35         | 60.48             | 68         |
| 1121                           | 2.17            | 0.412          | 56                      | 18.2                     | 59.82         | 61.35         | 60.42         | 60.53             | 40         |
| 1121                           | 4.34            | 0.412          | 56                      | 18.2                     | 59.30         | 60.75         | 59.82         | 59.96             | 78         |
| 1121                           | 4.34            | 0.215          | 56                      | 18.2                     | 59.38         | 62.08         | 60.24         | 60.67             | 81         |
| 1121                           | 4.34            | 0.0382         | 56                      | 18.2                     | 59.33         | 65.03         | 59.87         | 61.41             | 110        |
| 1121                           | 4.34            | 0.412          | 56                      | 18.2                     | 59.3          | 60.75         | 59.82         | 59.96             | 78         |
| 1121                           | 4.34            | 0.412          | 40                      | 18.2                     | 59.60         | 61.03         | 59.90         | 60.17             | 75         |
| 1121                           | 4.34            | 0.412          | 30                      | 18.2                     | 59.71         | 61.52         | 60.26         | 60.50             | 71         |
| 1121                           | 4.34            | 0.412          | 56                      | 18.2                     | 59.3          | 60.75         | 59.82         | 59.96             | 78         |
| 1121                           | 4.34            | 0.412          | 56                      | 15.625                   | 59.31         | 60.78         | 59.89         | 59.99             | 80         |
| 1121                           | 4.34            | 0.412          | 56                      | 9.4                      | 59.87         | 61.35         | 59.91         | 60.37             | 90         |