

## การจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเหนื่ออย่างโดยใช้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ The Simulation of Temperature Distribution in Rubber from Microwave Heating

รัชดา โสภาคะยัง<sup>1</sup> ณัทเดชชาธร พวงเงินมาก<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

85 ถ.สถลมารค์ อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190

โทร 045-288400-3 ต่อ 3815 โทรสาร 045-288378 E-mail: aero0077@yahoo.com

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถ.พิบูลสงคราม เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 E-mail: mr\_yokee@yahoo.com

Ratchada Sopakayang<sup>1</sup> and Nuttachathon Pounngengmak<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, UbonRatchathani University

85 Sathollmark Rd, Warinchamrap UbonRatchathani 34190 Thailand Tel: 045-288400-3 Ext. 3815 Fax: 045-288378

<sup>2</sup>Department of Electrical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok

1518 Pibulsongkram Rd, Bangsue Bangkok 10800 Thailand E-mail: mr\_yokee@yahoo.com

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีผู้พยายามนำคลื่นไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมหลากหลายอย่าง อุตสาหกรรมยางเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการเริ่มนำไมโครเวฟมาใช้ในการอุ่นยาง เพื่อให้ยางมีความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากเนื้อในของยางอันเนื่องมาจากความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นไมโครเวฟ ฉะนั้นความรู้เชิงลึกและความสามารถในการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อวัสดุเมื่อวัสดุได้รับคลื่นไมโครเวฟจึงมีความสำคัญยิ่งเพราะมีผลโดยตรงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเหนื่ออย่างโดยใช้คลื่นไมโครเวฟแบ่งการคำนวณเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นแรกคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่กระจายภายในชั้นยางซึ่งคำนวณโดยวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ด้วยโปรแกรม MatLab® จากนั้นแปลงเป็นค่าความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเหนื่ออย่าง เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณขั้นที่ 2 ซึ่งเป็นการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเหนื่ออย่างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม Abaqus® แล้วจึงตรวจสอบผลการคำนวณที่ได้กับผลการทดลอง โดยทำการทดลองวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในชั้นยางลักษณะคล้ายล้อยางตันขนาดเล็กขณะอบล้อยางภายในเตาไมโครเวฟซึ่งมีขายตามท้องตลาดโดยใช้หลอดแมกนีตรอนขนาด 2.45 GHz กำลัง 1200 W จากการศึกษาพบว่าเกิดการกระจายตัวของความร้อนขึ้นภายในเหนื่ออย่างอย่างรวดเร็วขณะยางรับคลื่นไมโครเวฟอันเนื่องมาจากความสามารถในการดูดซับคลื่นและเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนของยางผสม สำหรับงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะนำวิธีการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมินี้ไปประยุกต์ใช้สำหรับออกแบบขนาดกำลังที่ควรใช้ในการออกแบบเครื่องอุ่นล้อยางตัน ซึ่งพบว่าสามารถนำวิธีการ

คำนวณดังกล่าวไปใช้ได้ และจากการเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้กับผลการทดลอง ณ ตำแหน่งต่างๆของชั้นยางพบว่ารูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเหนื่ออย่างที่ได้จากการคำนวณให้ผลสอดคล้องกับการทดลอง

### Abstract

Recently, many industrials have tried to apply microwave heating to their fields. One of those is rubber industry who uses microwave heating to warm the rubber compound. This is because of the better penetration capability, when heat is generated and transferred within the rubber compound. Therefore, both fundamental and detailed study about microwave heating are important and would directly affect to the quality of the rubber compound.

The calculation of temperature distribution in rubber heated in microwave oven consists of 2 steps. Firstly, the distribution of electric field within rubber compound is calculated by using finite – difference method and MatLab program. Then, the results are transferred to be the heat generation which is used in the second step. The second step calculates the temperature distribution within rubber compound using finite – element method and Abaqus program. For comparisons, the microwave oven having the frequency of magnetron of 2.45 GHz and the maximum power of 1200 W is used with the rubber compound. It is found

that the distribution of heat in rubber compound is increasing rapidly because the rubber compound has good absorption capability. Both calculation and experimental results show good agreement at most of the positions in the rubber compound. This research provides the method to simulate the temperature distribution in order to determine the power required to warm the tire (i.e. rubber compound) when microwave heating is used.

## 1. บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยเป็นผู้ผลิตยางดิบรายใหญ่ของโลก ซึ่งส่วนมากจะผลิตเพื่อจำหน่ายให้กับต่างประเทศ เนื่องจากความต้องการใช้ยางภายในประเทศยังไม่มากนักเมื่อเทียบกับปริมาณยางดิบที่ผลิตได้ ทำให้รัฐมีนโยบายที่จะพัฒนาอุตสาหกรรมแปรรูปผลิตภัณฑ์ยางมากขึ้น ซึ่งอุตสาหกรรมการผลิตยางดิบเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่แปรรูปจากยางแผ่นดิบ และสามารถส่งออกทำรายได้กลับเข้าสู่ประเทศได้ ดังนั้นคุณภาพของสินค้า และราคาจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการแข่งขันกับผู้ค้ารายใหญ่ของโลก

กระบวนการผลิตยางดิบในปัจจุบันพบปัญหาหลักๆ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้หลายประเด็น อาทิ ส่วนผสมของยางกับสารเคมี, กระบวนการขึ้นรูปยางก่อนอบ, ลักษณะกระบวนการอบและอบยางดิบ เป็นต้น โดยแต่ละประเด็นต้องการวิธีแก้ไขที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งทางบริษัทฯ ผู้ผลิตตระหนักดีในปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้น และพยายามแก้ไขในทุกประเด็นอยู่ตลอดเวลา อย่างไรก็ตามกระบวนการอบยางดิบเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีปัญหาอย่างมาก เนื่องจากปัจจุบันใช้ระบบขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน (Induction Heat) ซึ่งเป็นการนำความร้อนผ่านผิวยางด้านนอก เมื่อเวลาผ่านไปเนื้อยางด้านในจึงค่อยๆมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นและเนื่องจากสมบัติการเป็นฉนวนของยางจึงทำให้เส้นยางทั่วทั้งเส้นมีอุณหภูมิไม่เท่ากัน โดยทั้งนี้เมื่อผิวยางด้านนอกมีอุณหภูมิสูงก็จะเปลี่ยนยางให้มีสมบัติเป็นยางสุกซึ่งจะมีความเป็นฉนวนมาก ทำให้การส่งผ่านความร้อนเข้าสู่เนื้อในของยางดำเนินไปอย่างล่าช้า และอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นเมื่อนำไปสู่กระบวนการต่อไปคือการอบยางในแม่พิมพ์แล้ว ล้อยางดิบที่ได้ออกมาจะมีคุณภาพต่ำเนื้อยางไม่สม่ำเสมอ ซึ่งหากกระบวนการอบยางมีประสิทธิภาพสูงขึ้นแล้ว จะได้ยางดิบขึ้นรูปที่มีอุณหภูมิสม่ำเสมอประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิในการสุกตัวของยางประมาณ 130-150 องศาเซลเซียส ทำให้จะใช้เวลาในการอบยางสั้นลง (ปัจจุบันใช้เวลาอบยางประมาณ 8-9 ชั่วโมงต่อล้อยาง 1 เส้น)

ทางนักวิจัย ได้ศึกษาวิธีการอบยางดิบที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นด้วยการใช้ระบบคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งมีใช้กันในโรงงานผลิตล้อยางดิบขึ้นนำในต่างประเทศ ซึ่งเทคนิคการใช้ระบบคลื่นไมโครเวฟสำหรับการอบยางนี้ต้องการองค์ความรู้เกี่ยวกับคลื่นไมโครเวฟ ประกอบเข้ากับองค์ความรู้ทางด้านการนำความร้อนในเส้นยาง จึงสามารถทำให้อุณหภูมิของยางเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอโดยทั่วทั้งเส้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเครื่องดังกล่าวจากต่างประเทศมีราคาสูงมาก ดังนั้นนักวิจัยจึงมีแนวความคิดที่จะออกแบบและจัดสร้างเครื่องอบล้อยางขึ้นมาเอง โดยเครื่องอบล้อยางนี้มีเงื่อนไขคือ ต้องการอบให้ล้อยางมีอุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วเนื้อยาง

ประมาณ 90-100 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 10-15 นาที สำหรับการออกแบบเครื่องอบล้อยางนั้นส่วนสำคัญที่ต้องทราบคือ ขนาดของกำลังที่ใช้เพื่อให้ล้อยางมีอุณหภูมิที่กำหนดภายในเวลาที่ต้องการ ฉะนั้นหากคำนวณกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเนื้อยาง ขณะยางคลื่นไมโครเวฟได้ ก็จะสามารถนำองค์ความรู้ที่มีมาประยุกต์ใช้เพื่อออกแบบขนาดของกำลังที่ควรใช้ในเตาไมโครเวฟอบล้อยางดิบได้ เพื่อทดแทนการนำเข้าเครื่องจักร อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มคุณภาพให้กับผลิตภัณฑ์ของบริษัท ซึ่งเป็นการลดเวลาในการผลิต สามารถเพิ่มปริมาณการผลิตและลดต้นทุนการผลิต อีกทั้งยังเป็นการส่งเสริมให้นักความรู้ทางวิชาการในหลายสาขา มาร่วมแก้ปัญหาในอุตสาหกรรมจริง

## 2. กระบวนการถ่ายโอนความร้อนในเนื้อยาง

การใช้วิธีเชิงตัวเลขเพื่อ ประมาณค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเนื้อยาง ขณะให้ความร้อนแก่ยางด้วยคลื่นไมโครเวฟนั้น ประกอบด้วยองค์ความรู้ที่สำคัญ 2 ส่วนคือ ส่วนการคำนวณการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบภายในเนื้อยาง และส่วนของการเปลี่ยนสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบภายในเนื้อยางให้อยู่ในรูปของความร้อน เพื่อนำไปใช้สำหรับคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิของยางผสม ขณะได้รับคลื่นไมโครเวฟ

### 2.1 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าภายในเนื้อยาง

การคำนวณการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบเนื้อยางได้คำนวณด้วยวิธี Finite difference time-domain (FDTD) โดยใช้ Yee's Finite Difference Algorithm ในการแก้ปัญหา ซึ่งได้เขียนโปรแกรมสำหรับคำนวณการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าขึ้นมา โดยใช้โปรแกรม MatLab® โดยกำหนดให้ยางมีคุณสมบัติแบบไอโซทรอปิก สามารถเขียนสมการของ Maxwell's ได้ดังนี้คือ

$$\nabla \times \bar{E} = -\mu \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \bar{H} = \sigma \bar{E} + \epsilon \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \quad (2)$$

ใช้ explicit finite difference approximation จะได้สมการสำหรับคำนวณค่าสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในทิศทางต่างๆดังนี้

$$H_x^{n+\frac{1}{2}} \left( i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) = H_x^{n-\frac{1}{2}} \left( i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) + \frac{\delta t}{\mu \left( i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) \delta} \cdot \left[ E_y^n \left( i, j + \frac{1}{2}, k + 1 \right) - E_y^n \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right) + E_z^n \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right) - E_z^n \left( i, j + 1, k + \frac{1}{2} \right) \right] \quad (3)$$

$$H_y^{n+1/2}\left(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}\right) = H_y^{n-1/2}\left(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}\right) + \frac{\delta t}{\mu\left(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}\right)\delta} \cdot \left[ E_z^n\left(i+1, j, k+\frac{1}{2}\right) - E_z^n\left(i, j, k+\frac{1}{2}\right) + E_x^n\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) - E_x^n\left(i+\frac{1}{2}, j, k+1\right) \right] \quad (4)$$

$$H_z^{n+1/2}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right) = H_z^{n-1/2}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right) + \frac{\delta t}{\mu\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right)\delta} \cdot \left[ E_x^n\left(i+\frac{1}{2}, j+1, k\right) - E_x^n\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) + E_y^n\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right) - E_y^n\left(i+1, j+\frac{1}{2}, k\right) \right] \quad (5)$$

$$E_x^{n+1}\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) = \left[ 1 - \frac{\sigma\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right)\delta t}{\varepsilon\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right)} \right] E_x^n\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) +$$

$$\frac{\delta t}{\varepsilon\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right)\delta} \cdot \left[ H_z^{n+1/2}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right) - H_z^{n+1/2}\left(i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}, k\right) + H_y^{n+1/2}\left(i+\frac{1}{2}, j, k-\frac{1}{2}\right) - H_y^{n+1/2}\left(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}\right) \right] \quad (6)$$

$$E_y^{n+1}\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right) = \left[ 1 - \frac{\sigma\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right)\delta t}{\varepsilon\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right)} \right] E_x^n\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right) +$$

$$\frac{\delta t}{\varepsilon\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right)\delta} \cdot \left[ H_x^{n+1/2}\left(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}\right) - H_x^{n+1/2}\left(i, j+\frac{1}{2}, k-\frac{1}{2}\right) + H_z^{n+1/2}\left(i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right) - H_z^{n+1/2}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right) \right] \quad (7)$$

$$E_z^{n+1}\left(i, j, k+\frac{1}{2}\right) = \left[ 1 - \frac{\sigma\left(i, j, k+\frac{1}{2}\right)\delta t}{\varepsilon\left(i, j, k+\frac{1}{2}\right)} \right] E_x^n\left(i, j, k+\frac{1}{2}\right) + \frac{\delta t}{\varepsilon\left(i, j, k+\frac{1}{2}\right)\delta} \cdot \left[ H_y^{n+1/2}\left(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}\right) - H_y^{n+1/2}\left(i-\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}\right) + H_x^{n+1/2}\left(i, j-\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}\right) - H_x^{n+1/2}\left(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}\right) \right] \quad (8)$$

กำหนดค่าเริ่มต้นโดยใช้สมการ

$$E_z^n\left(i, j_s, k+\frac{1}{2}\right) \longleftarrow 1000\sin(2\pi f \delta t) + E_z^n\left(i, j_s, k+\frac{1}{2}\right) \quad (9)$$

เมื่อ  $E$  คือพจน์สนามไฟฟ้า  
 $H$  คือพจน์สนามแม่เหล็ก  
 $\mu$  คือค่าซึมซาบแม่เหล็ก  
 $\varepsilon$  คือค่าซึมซาบสนามไฟฟ้า  
 $\sigma$  คือค่าความสามารถในการนำไฟฟ้า  
 $f$  คือความถี่ (Hz)  
 $t$  คือเวลา

$i, j, k$  คือตำแหน่งในพิกัดฉาก  $x, y, z$

## 2.2 การเปลี่ยนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟเป็นพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุ

สำหรับวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวน เช่น ยาง วัสดุโพลีเมอร์ เป็นต้น ส่วนมากไม่เลกุลจะเกาะตัวแบบโซโมเลกุลต่อเป็นสายยาว ซึ่งจากการวิเคราะห์การเกิดความร้อนในยางพบว่าโดยปกติโซโมเลกุลของยางจะประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจน เกาะตัวกันเป็นโซโมเลกุลแบบไม่มีขั้ว โดยภายในแต่ละอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจนก็ยังคงประกอบไปด้วยอิเล็กตรอน ซึ่งมีประจุเป็นลบและโปรตอนซึ่งมีประจุบวก ฉะนั้นเมื่อได้รับสนามไฟฟ้าก็จะมีผลให้เกิดการจัดเรียงตัวของประจุ ซึ่งพลังงานบางส่วนที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกลุ่มอิเล็กตรอนจะสูญเสียไป เนื่องจากแรงเสียดทานของอะตอมต่างๆ ซึ่งการจัดเรียงกลับไปมาของกลุ่มอิเล็กตรอน เนื่องจากสนามไฟฟ้านี้จะเป็นการเพิ่มการสูญเสียให้มากขึ้นซึ่งเรียกว่า เป็นการสูญเสียของสนามไฟฟ้าและนำไปสู่การเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานความร้อน ดังนั้นวัสดุฉนวนที่ถูกกระทำด้วยสนามไฟฟ้าจะประกอบด้วยเทอม 2 เทอมซึ่งเรียกว่า reactive term และ dissipative term ซึ่งอธิบายได้ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนซึ่งแสดงถึงค่าความสามารถในการดูดซับ (Permittivity) ของวัสดุคือ

$$\varepsilon = \varepsilon' - \varepsilon''j \quad (10)$$

เมื่อ

$\varepsilon$  คือ complex permittivity

- $\epsilon'$  คือ real permittivity (dielectric constant)
- $\epsilon''$  คือ ค่าการสูญเสียของฉนวน (dielectric loss)
- $j$  คือ ส่วนประกอบที่สมมุติขึ้น

ส่วนประกอบที่เป็นจริงของ permittivity คือค่า dielectric constant ( $\epsilon'$ ) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการจุกระแสไฟฟ้าของสสารและความสามารถในการเก็บพลังงานไฟฟ้า ส่วนประกอบที่สมมุติขึ้น (imaginary component) และค่าการสูญเสียของฉนวน ( $\epsilon''$ ) อธิบายถึงความสามารถในการทำให้พลังงานไฟฟ้าที่เก็บสะสมได้ เปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนซึ่งจะมีค่าเป็นบวกเสมอและมีขนาดเล็กกว่า  $\epsilon'$

ซึ่งพลังงานจากสนามไฟฟ้าที่สูญเสียให้กับวัสดุ และเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานความร้อนสามารถแสดงได้ในรูปของค่า dielectric loss ของวัสดุดังนี้

$$P_{ave} = \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' |E|^2 V \quad (11)$$

เมื่อ

$$\epsilon_r'' = \frac{\epsilon''}{\epsilon_0} \quad (12)$$

โดย  $\epsilon_0$  คือความสามารถในการดูดซับในสุญญากาศ (absolute permittivity) มีค่าเท่ากับ  $8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

$\epsilon_r$  คือ relative permittivity ของวัสดุ

$P_{ave}$  คือกำลังเฉลี่ยที่ถูกแผ่อยู่ในวัสดุ (W)

$V$  คือปริมาตรของวัสดุ ( $\text{m}^3$ )

$\omega$  คือความถี่เชิงมุม

ดังนั้นอัตราความร้อนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุ ต่อปริมาตรหนึ่งหน่วยได้คือ

$$\dot{Q} = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r'' |E|^2 \quad (13)$$

เมื่อ  $\dot{Q}$  คืออัตราความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุ ( $\text{W/m}^3$ )

จากการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่กระจายตัวอยู่ในเนื้ออย่างด้วยโปรแกรม MatLab® ที่เขียนขึ้นทำให้สามารถนำมาคำนวณหาค่าอัตราของความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุ (Heat generation) ได้โดยการประมาณ ค่าอัตราของความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุให้ผันแปรกับเวลา ซึ่งได้เป็นสมการเส้นตรงดังนี้

$$\dot{Q} = 1507T - 5605.35 \quad (14)$$

เมื่อ  $T$  คืออุณหภูมิ

แล้วจึงใช้ฟังก์ชันนี้ในการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิ ด้วยโปรแกรม Abaqus®

### 2.3 สมการการนำความร้อนภายในเนื้ออย่าง

พิจารณาระบบที่มีขนาดจำกัด ไม่มีมวลผ่านเข้าออกจากระบบซึ่งภายในระบบบรรจุสารตัวกลางอยู่ และเมื่อระบบได้รับความร้อนจากภายนอก จากกฎอนุรักษ์ของพลังงานสามารถเขียนสมการพลังงานของระบบได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho U dV = \iint_S (\bar{q}_c + \bar{q}_v + \bar{q}_r) \cdot \bar{n} ds + \iiint_V \dot{Q} dV \quad (15)$$

เมื่อ  $\dot{U}$  คืออัตราของพลังงานภายในต่อเวลา

$\nabla$  คือโดเมนวัสดุ

$S$  คือผิวห่อหุ้มโดเมนวัสดุ

$\rho$  คือความหนาแน่นของวัสดุ สมมุติให้มีค่าคงที่

$q_c$  คืออัตราการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อน

$q_v$  คืออัตราการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อน

$q_r$  คืออัตราการถ่ายเทความร้อนแบบการแผ่รังสีความร้อน

$\dot{Q}$  คืออัตราปริมาณความร้อนที่ผลิตขึ้นได้เอง

$n$  คือเวกเตอร์ตั้งฉากของพื้นที่ผิวโดเมน

เมื่อพิจารณาเฉพาะการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อน โดยพิจารณาจากกฎการนำความร้อนของฟูรีเยร์ (Fourier's law) ซึ่งกล่าวว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและความชันของการกระจายของอุณหภูมิ (Temperature gradient) จากสมมติฐานกำหนดให้วัสดุอย่างมีคุณสมบัติแบบไอโซทรอปิก (Isotropic Material) และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าคงที่ จะได้สมการพลังงานที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์หาการกระจายตัวของอุณหภูมิของยางระหว่างกระบวนการอุ่นยางคือ

$$\iiint_V \rho \dot{U} dV = \iiint_V \nabla \cdot (-[k] \nabla \theta) dV + \iiint_V \dot{Q} dV \quad (16)$$

ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขขอบและเงื่อนไขเริ่มต้นดังนี้

1. กำหนดให้ที่ผิวขอบนอกของล้อยางต้นมีการพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection) เกิดขึ้นตลอดการอุ่นล้อยาง

$$-[k] \nabla \theta = h(\theta - \theta_\infty) \quad (17)$$

2. กำหนดให้ที่ภาวะเริ่มต้นล้อยางต้นมีอุณหภูมิเท่ากับสม่ำเสมอทั่วทั้งเนื้อยาง ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $32^\circ\text{C}$  คือ

$$\theta(x, y, z, 0) = \theta_0(x, y, z) = 32^\circ\text{C} \quad (18)$$

เมื่อ  $\theta$  คืออุณหภูมิของยาง

$\theta_\infty$  คืออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

$\theta_0$  คืออุณหภูมิเริ่มต้นที่ตำแหน่งต่างๆทั่วทั้งเนื้อยาง

$t$  คือเวลาในการอบยาง

$x, y, z$  คือตำแหน่งที่พิจารณาในระบบพิกัดฉาก  $x, y, z$

$h$  คือค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

$k$  คือค่าการนำความร้อนของยาง

สำหรับการคำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะใช้สมการเอมไพริคัลคือ[1]

$$\frac{\bar{h}x}{k} = 0.21(Gr_x Pr)^{0.25} \quad (19)$$

เมื่อ  $\bar{h}$  คือค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

$x$  คือความหนาของล้อยาง

$k$  คือค่าการนำความร้อนของยาง

$Gr_x$  คือ Grashof Number

Pr คือ Prandtl Number

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่คำนวณได้มีค่า  $0.922 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

## 2.4 การจำลองการถ่ายโอนความร้อน

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในยาง ขณะอุ่นอย่างตันจะใช้วิธีการเชิงตัวเลขซึ่งเป็นการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิ ที่ตำแหน่งต่างๆภายในเนื้อยาง สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้การคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม Abaqus® ในการแก้ปัญหาใช้วิธีกัลเลอร์คินแปลงสมการ(15) เป็นสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ดังนี้

$$\iiint_V \rho \dot{U} dV = \iiint_V \nabla \cdot (-[k] \nabla \theta) dV + \iiint_V \dot{Q} dV \quad (20)$$

เลือกใช้เอลิเมนต์ 2 มิติสี่เหลี่ยมด้านเท่า และจัดสมการพีชคณิตให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ ดังนั้นสามารถนำสมการ (20) จัดให้อยู่ในรูปแบบเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$[C] \{\dot{\theta}\} + [K] \{\theta\} = \{Q\} + \{Q\}_c \quad (21)$$

$$\text{โดย } [C] = \iiint_V \rho c [N]^T [N] dV \quad (22)$$

$$[K] = \iiint_V [B]^T [k] [B] dV \quad (23)$$

$$\{Q\} = \iiint_V \dot{Q} [N] dV \quad (24)$$

$$\{Q\}_c = -\iint_S [N]^T [q] ds \quad (25)$$

## 2.5 การทดสอบหาค่าสมบัติทางจนวนไฟฟ้าและทาง

### ความร้อนของยาง

ใช้ค่าสมบัติทางจนวนไฟฟ้า และทางความร้อนของยางผสมที่ได้จากการทดสอบดังนี้

Rubber	Dielectric Properties		Thermal Properties		
	Dielectric Constant	Dielectric Loss	Thermal Conductivity (W/m.°C)	Specific heat (kJ/kg°C)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
C-559	4.0	0.14	0.3334	1707	1120
M-049	4.0	0.14	0.2500	1756	1120
M-059	4.0	0.14	0.2877	1780	1120

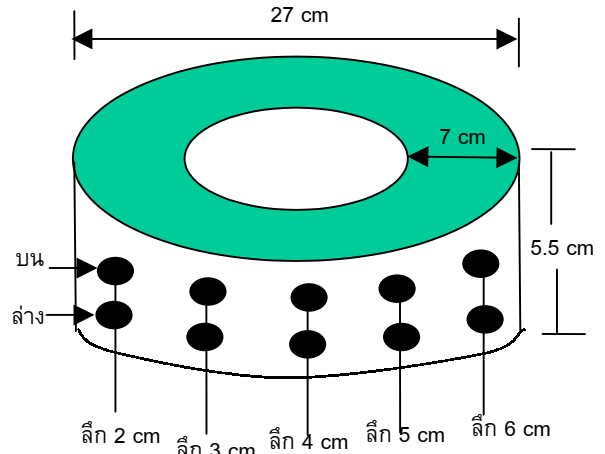
ตารางที่ 1 ค่าสมบัติทางกายภาพทางความร้อนและทางไฟฟ้าของยาง

โดยการทดสอบและเอกสารอ้างอิง[4]

## 2.6 เปรียบเทียบผลการทดลองและผลการคำนวณ

### การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในล้ออย่างตัน

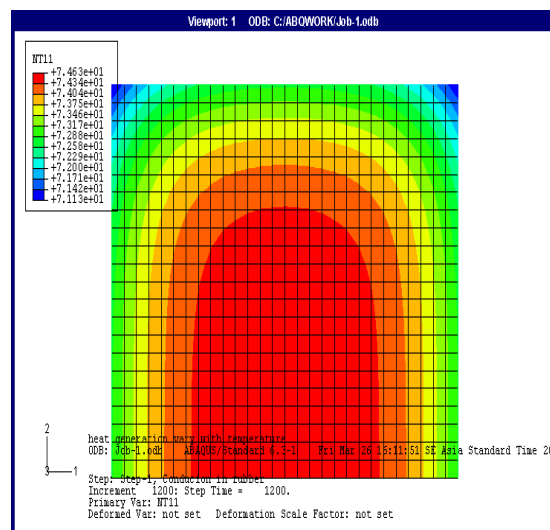
ยางตันที่นำมาทดลองมีขนาดและตำแหน่ง ในการวัดอุณหภูมิตามที่แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิของชิ้นงานจริง

ซึ่งทดลองโดยการนำไปอุ่นในเตาไมโครเวฟ ซึ่งมีขายตามห้องตลาดซึ่งใช้หลอดแมกนีตรอน 1 หลอด ความถี่ 2.45 GHz กำลัง 1200 W โดยนำมาตัดแปลงใหม่ให้เตาไมโครเวฟส่งคลื่นแบบต่อเนื่อง

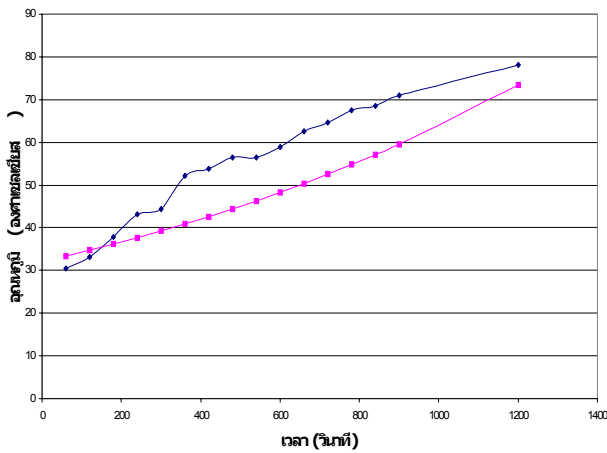
การทดลองจะให้ล้ออย่างหมุนไปด้วย ขณะได้รับพลังงานไมโครเวฟเป็นเวลา 20 นาที ดังนั้นจึงสมมติให้ทุกๆหน้าตัดของชิ้นยางสมมาตรกันตลอด แล้วทำการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ โดยแบ่งเอลิเมนต์เป็น 616 เอลิเมนต์ กว้างยาวด้านละ 2.5 มิลลิเมตร โดยพิจารณาถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในล้ออย่างตันของแต่ละหน้าตัดเมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที ซึ่งจะได้ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในหน้าตัดล้ออย่างตัน เมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที

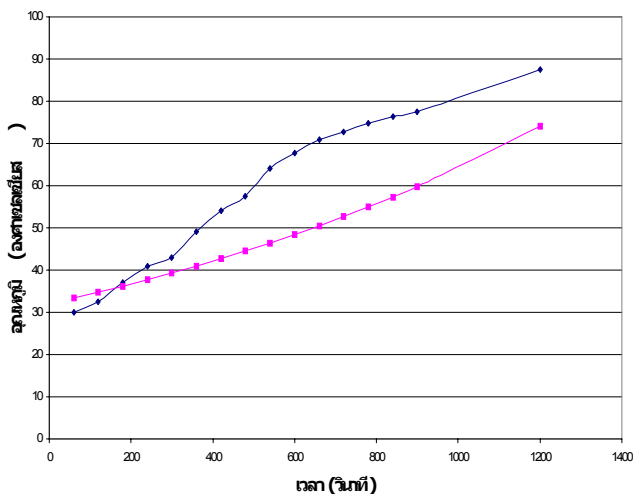
นำผลการทดลองและผลการคำนวณที่ตำแหน่งเดียวกันบางตำแหน่งมาเปรียบเทียบกันโดยอ้างอิงตามตำแหน่งในรูปที่ 1 ได้ผลดังนี้

การเปรียบเทียบผลการทดลองและการคำนวณในตำแหน่งลึกจากขอบยาง 6 cm (ล่าง)



รูปที่ 3 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อยาง ที่ความลึก 6 cm แลวล่าง

การเปรียบเทียบผลการทดลองและการคำนวณในตำแหน่งลึกจากขอบยาง 3 cm (ล่าง)



รูปที่ 4 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อยาง ที่ความลึก 3 cm แลวล่าง

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบ ผลการคำนวณการกระจายตัวของ อุณหภูมิที่ได้กับผลการทดลอง ณ ตำแหน่งต่างๆของชิ้นยางดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4 พบว่ารูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อยางที่ ได้จากการคำนวณให้ผลสอดคล้องไปในแนวทางเดียวกันกับการทดลอง

### 3. สรุป

จากลักษณะของผลการคำนวณและการทดลองพบว่า ความร้อนจะ เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายในเนื้อยางที่ความลึกต่างๆ อย่างค่อนข้าง

สม่ำเสมอใกล้เคียงกัน อันเนื่องมาจากความสามารถในการแทรกสอด ของคลื่นและคุณสมบัติในการเป็นตัวดูดซับที่ดีของยาง จึงทำให้ยาง สามารถดูดซับพลังงานจากสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบ แล้วแปลงไปเป็น พลังงานความร้อนได้ดี สำหรับสาเหตุที่อุณหภูมิภายในเนื้อยางกระจาย ตัวค่อนข้างสม่ำเสมอนั้น เนื่องมาจากการหมุนตัวอย่างขณะทดลองซึ่งจะ ทำให้คลื่นที่ตกกระทบเนื้อยางกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอจึงทำให้ยางไม่ เกิดรอยไหม้ที่ตำแหน่งใดๆ ซึ่งในอุตสาหกรรมยางจะต้องหลีกเลี่ยงสิ่งนี้ มาก และสามารถนำองค์ความรู้นี้มาประยุกต์สำหรับออกแบบขนาดของ

### 4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัทโมลด์เมท จำกัด และสำนักงานกองทุนสนับสนุน การวิจัย (สกว) ที่ให้ทุนอุดหนุนในการทำวิจัยครั้งนี้

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Suri Ryyanen, "Microwave Heating Uniformity of Multicomponent Prepared Foods", Academic Dissertation, Department of Food Thecnology, University of Helsinki, 2002.
- [2] Xiaofeng Wu,M.S., "Experimental and Theoretical Study of Microwave Heating of Thermal Runaway Materials",Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, December 2002.
- [3] Hibbitt , Karlsson & Sorensen , Inc. "Abaqus Theory Manual Version 6.2 Hibbitt", Karlsson & Sorensen , Inc. , 2001
- [4] Juthorn Sae-oui and Uthai Thepsuwan, "Cure Simulation of Rubber Components Using Finite Element Analysis (FEA)",The National Metal and Materials Technology Center (MTEC), Bangkok, 2001.
- [5]M.Heidemann, H.Garbe and R.Kebel , "Calculation of Electromagnetically and Thermally Coupled Fields in Real Soil Decontamination", University of Hanover, Germany, 2000.
- [6] Nathaniel D.Terril, "Field Simulation for the Microwave Heating of Thin Ceramic Fibers ", Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, July 1998.
- [7] D.A.Hills , "Heat Transfer and Vulcanisation of Rubber", Elsevier Publishing Co. Ltd., New York, 1971
- [8] David Jenn, "Electromagnetic Wave Propogation", Department of Electrical & Computer Engineering, Noval Postgraduate School, Monterey,California.
- [9] David W. Ward and Keith A. Nelson, "Finite Difference Time Domain (FDTD) Simulation of Electromagnetic Wave Propagation Using a Spreadsheel", Department of Chemistry, Massachusetts Institute of Technology.

