

การประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟในการทำความร้อนยาง Application of Microwave Energy for Rubber Heating

รัชดา โสภาคะยัง

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี 34190

โทร 0-4535-3380 โทรสาร 0-4528-8378 E-mail: aero0077@yahoo.com

Ratchada Sopakayang

Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, UbonRatchathani University, UbonRatchathani 34190, Thailand

Tel: 0-4535-3380 Fax: 0-4528-8378 E-mail: aero0077@yahoo.com

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟถูกใช้อย่างแพร่หลายในการประกอบอาหารในครัวเรือน และได้เริ่มมีการนำมาประยุกต์เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมบ้างแล้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมเกี่ยวกับการผลิตอาหาร สำหรับในอุตสาหกรรมยางซึ่งถือเป็นอุตสาหกรรมหลักอย่างหนึ่งของประเทศไทยนั้นยังไม่พบว่ามีการศึกษาหรือนำคลื่นไมโครเวฟมาใช้กับอุตสาหกรรมยางเลย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาถึงการประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟในยาง เพื่อที่จะนำองค์ความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ยางต่อไป

โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองให้ความร้อนแก่ยางโดยใช้วิธีแบบธรรมดา (Conventional Heating) กับวิธีการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave Heating) เพื่อเปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานและเวลาในการให้ความร้อนรวม สำหรับการใช้กระบวนการให้ความร้อนในแต่ละแบบ ซึ่งพบว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟในการทำความร้อนซึ่งเป็นการให้ความร้อนเชิงปริมาตร (Volumetric Heating) จะทำให้ยางมีความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และอุณหภูมิภายในเนื้อยางกระจายตัวอย่างทั่วถึงภายในเวลาอันรวดเร็วอันเนื่องมาจากความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งจะเป็นการลดเวลาในการให้ความร้อนแก่ยางได้ดีและจะส่งผลต่อการลดต้นทุนในกระบวนการผลิตด้วย

Abstract

Microwave heating has widely been used for food preparation in houses and is applied in some industries, especially food industry. In rubber industry, the main industry of Thailand, the application of microwave heating has not been studied or used. Therefore, this research aimed at studying the application of microwave energy in rubber, so that the knowledge gained can be used as a guideline in the rubber industry.

This research compared two types of heating modes, conventional heating and microwave heating, in terms of the consumed energy and time needed for heating. Microwave heating, volumetric heating, led to a rapid temperature rise within the rubber. Because of the penetration ability of microwave, the temperature distribution was the rapid uniform temperature. The use of microwave heating could be used in manufacturing processes.

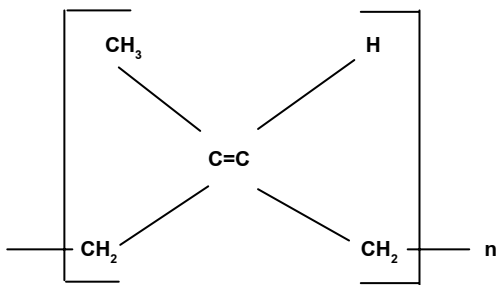
1. บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยเป็นผู้ผลิตยางดิบรายใหญ่ของโลก ซึ่งส่วนมากจะผลิตเพื่อจำหน่ายให้กับต่างประเทศ เนื่องจากความต้องการใช้ยางภายในประเทศยังไม่มากนักเมื่อเทียบกับปริมาณยางดิบที่ผลิตได้ ทำให้รัฐบาลมีนโยบายที่จะพัฒนาอุตสาหกรรมแปรรูปผลิตภัณฑ์ยางมากขึ้น สำหรับกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางในปัจจุบันพบปัญหาหลักๆ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้หลายประเด็น อาทิ ส่วนผสมของยางกับสารเคมี, กระบวนการขึ้นรูปยางก่อนอบ, ลักษณะกระบวนการอบและอบยาง เป็นต้น โดยแต่ละประเด็นต้องการวิธีแก้ไขที่แตกต่างกันออกไป อย่างไรก็ตามกระบวนการอบและอบยางเป็นกระบวนการหนึ่งที่ประสบปัญหาอย่างมาก เนื่องจากปัจจุบันใช้ระบบการให้ความร้อนแบบขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน ซึ่งถือเป็นวิธีการให้ความร้อนแบบธรรมดา (Conventional Heating) โดยเป็นการให้ความร้อนจากผิวทางด้านนอกเข้าสู่ภายในเนื้อยาง สำหรับการให้ความร้อนแก่ยางด้วยวิธีนี้จะทำให้อุณหภูมิบริเวณเนื้อในของยางเพิ่มขึ้นค่อนข้างช้า ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติความเป็นฉนวนของยาง เนื่องจากเมื่อผิวทางด้านนอกมีอุณหภูมิสูงก็จะเปลี่ยนยางให้มีสมบัติความเป็นฉนวนมากขึ้น ซึ่งจะทำการส่งผ่านความร้อนเข้าสู่เนื้อในของยางดำเนินไปอย่างล่าช้า ทำให้เนื้อยางมีอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีคุณภาพไม่ดีเนื่องจากการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิ อีกทั้งยังส่งผลให้เนื้อยางภายในไม่สุกหรือสุกแต่ไม่สม่ำเสมออีกด้วย

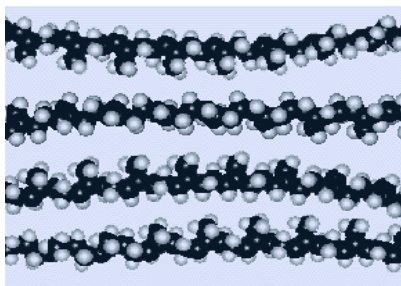
ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาถึงวิธีการให้ความร้อนแก่ยาง โดยใช้คลื่นไมโครเวฟ เพื่อเป็นแนวทางใหม่ในการให้ความร้อนแก่ยางเพื่อให้ยางมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากภายในเนื้อยางด้วยเวลาอันรวดเร็ว ซึ่งคลื่นไมโครเวฟ มีลักษณะในการทำให้เกิดความร้อนเป็นแบบเชิงปริมาตร (Volumetric Heating) และมีความสามารถในการทะลุทะลวงจึงจะทำให้เกิดความร้อนภายในเนื้อยางได้ดี อันเป็นการเพิ่มคุณภาพให้กับผลิตภัณฑ์ และลดเวลาในการผลิตส่งผลให้สามารถเพิ่มปริมาณการผลิตและลดต้นทุนการผลิตได้อีกด้วย

2.1 หลักการเกิดความร้อนในยาง

ยางเป็นวัสดุพอลิเมอร์ชนิดหนึ่ง ซึ่งมีสมบัติความเป็นฉนวนค่อนข้างสูงและมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอน (คาร์บอนและไฮโดรเจน) ต่อกันเป็นโซ่โมเลกุลยาว ชื่อทางเคมีของยางธรรมชาติคือโพลีไอโซพรีน (cis-1,4-polyisoprene) กล่าวคือมีไอโซพรีน (C₅H₈) มาต่อกันเป็นโมเลกุลยาวหรือ (C₅H₈)_n ดังแสดงในรูปที่ 1 และรูปที่ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 1 สูตรโครงสร้างของยางธรรมชาติ



รูปที่ 2 การจัดเรียงตัวแบบโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ

สำหรับค่าสมบัติทางจนวนไฟฟ้า (Dielectric Properties) และทางความร้อน (Thermal Properties) ของยางผสมที่ใช้ในการทดลองซึ่งได้จากการทดสอบได้แสดงไว้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าสมบัติทางกายภาพทางความร้อนและทางไฟฟ้าของยาง

Rubber	Dielectric Properties		Thermal Properties		
	Dielectric Constant	Dielectric Loss	Thermal Conductivity (W/m.°C)	Specific heat (kJ/kg°C)	Density (kg/m ³)
	4.0	0.14	0.25	1756	1093.3

2.1 พฤติกรรมการเกิดความร้อนในยาง

โดยวิธีแบบธรรมดา (Conventional Heating)

สำหรับการนำความร้อนในยางแบบธรรมดา จะนำความร้อนผ่านโฟนอน (Phonon) ซึ่งเป็นกลุ่มของพลังงานที่สามารถพิจารณาได้ว่ามีสมบัติเหมือนอนุภาคใด ๆ ซึ่งจัดเรียงตัวไปตามโซ่โมเลกุลของยาง ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยเมื่อยางได้รับความร้อนแล้วความร้อนจะถูกส่งผ่านอนุภาคของโฟนอน ซึ่งโฟนอนจะเก็บสะสมพลังงานและโมเมนตัมไว้ในอนุภาค จากนั้นจะเคลื่อนที่ไปชนโฟนอนอนุภาคอื่นตามทิศทางของโซ่โมเลกุล โดยพลังงานและโมเมนตัมที่สะสมอยู่ในอนุภาคนั้นจะถ่ายเทสู่อนุภาคที่ถูกชนและเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนสุดท้ายโซ่โมเลกุล แต่พลังงานและโมเมนตัมที่บรรจุในอนุภาคโฟนอนอาจถูกทำให้กระเจิงเนื่องจากการสิ้นสุดพันธะลูกโซ่ การเชื่อมโยง (Crosslink) หรือการเชื่อมต่อกับโมเลกุลอื่น อย่างไรก็ตามอนุภาคโฟนอนก็ยังบรรจุความร้อนไว้ได้ในระดับหนึ่งแต่ไม่มากนัก จึงเป็นผลให้ความสามารถในการนำความร้อนของยางมีค่าต่ำ ซึ่งแสดงถึงสมบัติของการเป็นฉนวนทางความร้อนที่ดีด้วย

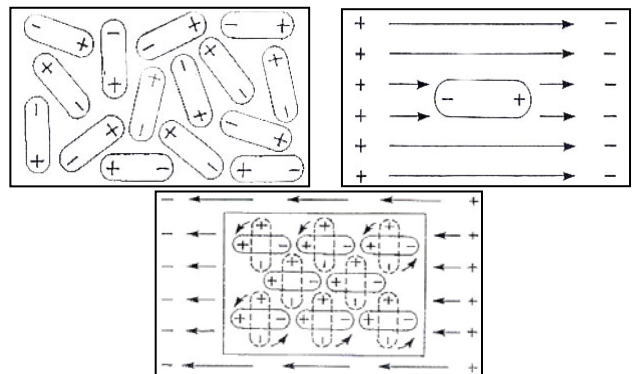


รูปที่ 3 อนุภาคของโฟนอนที่เรียงตัวไปตามโซ่โมเลกุลของยาง

2.2 พฤติกรรมการเกิดความร้อนในยาง

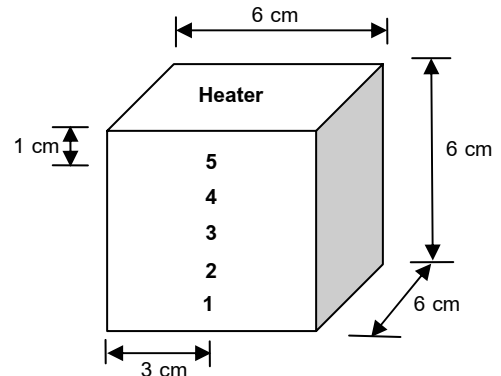
โดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave Heating)

สสารโดยทั่วไป เช่น น้ำ เป็นต้น จะประกอบด้วยโมเลกุลซึ่งเป็นการเกาะตัวกันของอะตอมของธาตุต่างๆ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วโมเลกุลของสสารต่างๆจะเป็นโมเลกุลแบบมีขั้ว ดังนั้นเมื่อมีสนามไฟฟ้าตกกระทบขั้วขั้วของโมเลกุลเหล่านี้ซึ่งมีขั้วบวกลบที่เรียกว่าไดโพล เกิดการจัดเรียงตัว เพื่อให้ขั้วบวกของไดโพลอยู่ใกล้ขั้วลบของสนามไฟฟ้า และขั้วลบของไดโพลอยู่ใกล้ขั้วบวกของสนามไฟฟ้า แต่เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟที่ตกกระทบนั้นมีความถี่ 2.45 GHz ดังนั้นไดโพลจะกลับตัวไปมาในช่วงคลื่นไมโครเวฟ เมื่อสนามไฟฟ้าสลับขั้วไปมาดังแสดงในรูปที่ 4 จึงทำให้ไดโพลชนกันและเสียดสีกันจนเกิดความฝืดในที่สุดจึงเกิดความร้อนขึ้นเนื่องจากโมเลกุลภายในของสสาร



รูปที่ 4 การกลับขั้วของไดโพลซึ่งทำให้เกิดความร้อน

สำหรับการเกิดความร้อนขึ้นในยางโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ พบว่าโดยปกติ ถึงแม้ว่าไซโมเลกุลของยางจะเกาะตัวกันเป็นไซโมเลกุลแบบไม่มีขั้ว แต่ภายในแต่ละอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจนก็ยังคงประกอบไปด้วยอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุเป็นลบและโปรตอนซึ่งมีประจุบวกอยู่นั่นเอง ฉะนั้นเมื่อมีสนามไฟฟ้าตกกระทบก็จะส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวของประจุเพื่อให้ประจุที่มีขั้วต่างกันอยู่ใกล้กันและประจุที่มีขั้วเหมือนกันอยู่ห่างกัน และเนื่องจากคลื่นไมโครเวฟที่ส่งออกไปมีความถี่เป็น 2.45 GHz จึงทำให้สนามไฟฟ้าเกิดการสลับขั้วไปมาด้วยความถี่ดังกล่าวซึ่งส่งผลให้ไซโมเลกุลของยางเกิดการบิดตัวไปมา เพื่อจัดเรียงประจุตามไปด้วย เป็นผลให้เกิดการเสียดสีกันระหว่างไซโมเลกุลจนทำให้เกิดเป็นความร้อนขึ้นนั่นเอง

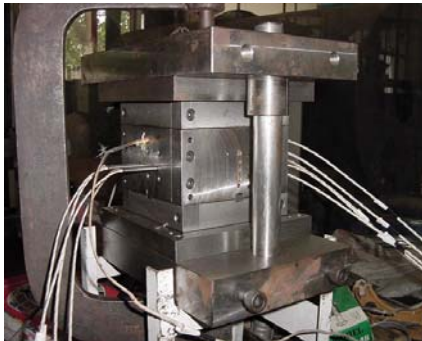


รูปที่ 6 แสดงตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิของชิ้นงาน

3. การเกิดความร้อนในยางเมื่อให้ความร้อนแบบธรรมดา

3.1 การทดลองให้ความร้อนแก่ยางโดยใช้แผ่นความร้อน

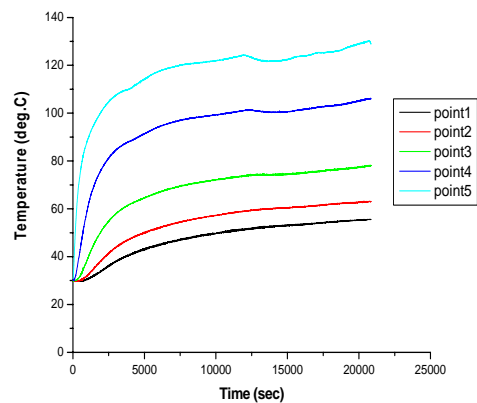
ทำการทดลองให้ความร้อนแก่ชิ้นยางขนาด 6 * 6 * 6 เซนติเมตร ในแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้น โดยจะใช้แผ่นให้ความร้อน (Heater) เป็นแหล่งความร้อนซึ่งจะสัมผัสกับผิวด้านบนของชิ้นยาง ส่วนแม่พิมพ์ด้านอื่นที่สัมผัสกับผิวยางจะถูกหุ้มด้วยฉนวน ดังนั้นชิ้นยางจึงรับความร้อนจากผิวด้านบนเพียงด้านเดียวและไม่ได้ถ่ายเทไปยังส่วนอื่น โดยทำการเจาะแม่พิมพ์เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การวัดอุณหภูมิของชิ้นงานขณะทดลอง

3.2 ผลการทดลอง

ทำการทดลอง โดยให้ความร้อนจากแผ่นเหล็กความร้อนเป็นเวลาประมาณ 5 ชั่วโมง โดยวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ภายในชิ้นยางดังแสดงในรูปที่ 6 โดยเจาะเข้าไปที่ตำแหน่งดังกล่าวลึก 3 เซนติเมตร ซึ่งจะได้ผลของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 7 ตามลำดับ



รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ
ขณะทดลอง

สำหรับชิ้นงานหลังนำออกจากแม่พิมพ์มีลักษณะแสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ชิ้นงานหลังนำออกจากแม่พิมพ์เมื่อให้ความร้อนแก่ชิ้นยางโดยใช้แผ่นเหล็กร้อน

จากการทดลองให้ความร้อนแก่ชิ้นยางโดยใช้แผ่นเหล็กความร้อนดังที่กล่าวมา สามารถสรุปเป็นค่าตัวแปรต่างๆที่ศึกษาได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าตัวแปรต่างๆที่ศึกษาสำหรับการให้ความร้อนโดยใช้แผ่นเหล็กกร้อน

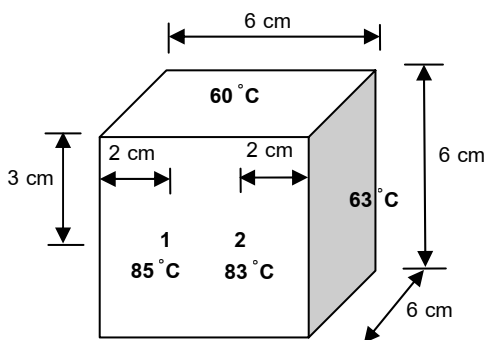
ตัวแปรที่ศึกษา	ค่าที่ได้
อุณหภูมิเริ่มต้นเฉลี่ย (°C)	32
อุณหภูมิสุดท้ายเฉลี่ย (°C)	80
กำลังไฟฟ้าในการทำความร้อน (W)	300 - 800
เวลาในการให้ความร้อน (hrs)	5

สำหรับการทดลองนี้เป็นการให้ความร้อนแก่ชิ้นยาง โดยใช้แผ่นเหล็กความร้อนซึ่งใช้กำลังไฟฟ้าขนาด 300 - 800 W ในการให้ความร้อนโดยทำการปรับขนาดกำลังในช่วงดังกล่าว เพื่อควบคุมอุณหภูมิบริเวณผิวของแผ่นเหล็กความร้อนให้มีอุณหภูมิประมาณ 200 °C โดยเริ่มต้นชิ้นยางมีอุณหภูมิเฉลี่ยทั้งชิ้นเป็น 32 °C และต้องใช้เวลาประมาณ 5 ชั่วโมงในการให้ความร้อนจึงจะทำให้ยางมีอุณหภูมิเฉลี่ยทั้งชิ้นเป็น 80 °C และสำหรับลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อยางพบว่า บริเวณที่ผิวยางอยู่ติดกับแผ่นความร้อนจะมีอุณหภูมิสูงและลดหลั่นลงไปเรื่อยๆเมื่ออยู่ห่างจากแผ่นความร้อนมากขึ้น

4. การเกิดความร้อนในยางเมื่อใช้พลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ

4.1 การทดลองให้ความร้อนแก่ยางโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

การทดลองให้ความร้อนแก่ยางโดยใช้คลื่นไมโครเวฟนี้ทดลองโดยนำชิ้นยางไปอยู่ในเตาไมโครเวฟสำหรับประกอบอาหาร ซึ่งมีขายตามท้องตลาดซึ่งใช้หลอดแมกนีตรอนความถี่ 2.45 GHz ขนาดกำลัง 1200 W และจานหมุนหมุนด้วยความเร็วรอบประมาณ 3 รอบต่อนาที โดยทำการจ่ายคลื่นไมโครเวฟให้แก่ชิ้นยางเป็นเวลา 6 นาที จากนั้นทำการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ โดยยางที่นำมาทดลองมีขนาดและตำแหน่งที่ทำการวัดอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 แสดงตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิของชิ้นงาน

4.2 ผลการทดลอง

หลังจากทดลองให้ความร้อนแก่ชิ้นยางด้วยคลื่นไมโครเวฟ เป็นเวลาประมาณ 6 นาที แล้วจึงทำการวัดอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในชิ้นยาง โดยวัดอุณหภูมิในตำแหน่งที่ 1 และ 2 โดยเจาะเข้าไป

ลึก 3 cm และวัดอุณหภูมิที่ผิวด้านข้างของชิ้นยางในตำแหน่งกึ่งกลางของผิวด้านนั้นๆ ซึ่งได้แสดงค่าอุณหภูมิที่วัดได้ไว้ดังรูปที่ 9 และเมื่อนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์จะมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ชิ้นงานหลังนำออกจากแม่พิมพ์เมื่อให้ความร้อนแก่ชิ้นยางด้วยคลื่นไมโครเวฟ

จากการทดลองให้ความร้อนแก่ชิ้นยางโดยใช้คลื่นไมโครเวฟดังกล่าวมาสามารถสรุปเป็นค่าตัวแปรต่างๆที่ศึกษาได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าตัวแปรต่างๆที่ศึกษาสำหรับการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

ตัวแปรที่ศึกษา	ค่าที่ได้
อุณหภูมิเริ่มต้นเฉลี่ย (°C)	32
อุณหภูมิสุดท้ายเฉลี่ย (°C)	80
กำลังไฟฟ้าในการทำความร้อน (W)	800
เวลาในการให้ความร้อน (min)	6

สำหรับการทดลองนี้เป็นการให้ความร้อนแก่ชิ้นยาง โดยใช้พลังงานจากคลื่นไมโครเวฟซึ่งใช้กำลังไฟฟ้าขนาด 800 W ในการให้กำเนิดคลื่นเพื่อส่งไปยังชิ้นยาง โดยเริ่มต้นชิ้นยางมีอุณหภูมิเฉลี่ยทั้งชิ้นเป็น 32 °C และใช้เวลาเพียงประมาณ 6 นาทีในการทำให้ยางมีอุณหภูมิเฉลี่ยทั้งชิ้นเป็น 80 °C และจากผลการทดลองพบว่าเนื้อยางบริเวณกึ่งกลางของชิ้นยาง และบริเวณใกล้เคียงจะมีอุณหภูมิสูงที่สุดในขณะที่บริเวณผิวของชิ้นยางจะมีอุณหภูมิต่ำกว่า

5. เปรียบเทียบและวิเคราะห์

จากการทดลองให้ความร้อนแก่ชิ้นยางขนาด 6 * 6 * 6 เซนติเมตร ด้วยวิธีการทำความร้อนแบบธรรมดา เปรียบเทียบกับวิธีการทำความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟนั้น พบว่าการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟในยาง จะสามารถลดเวลาในการให้ความร้อนแก่ยางลงเป็น

อย่างมากเมื่อใช้กำลังทางไฟฟ้าในการทำความร้อนเท่ากัน อีกทั้งการทำความร้อนด้วยวิธีนี้จะทำให้บริเวณกึ่งกลางยาง เป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงสุด และค่อนข้างมีอุณหภูมิใกล้เคียงกันเกือบทั้งชิ้นยาง ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่น และความร้อนที่เกิดขึ้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากลักษณะการให้ความร้อนเชิงปริมาตร (Volumetric Heating) ของคลื่นไมโครเวฟนั่นเอง ในขณะที่วิธีการทำความร้อนแบบธรรมดา จะทำให้ยางมีอุณหภูมิสูงสุดที่บริเวณผิวยางที่อยู่ติดกับแผ่นเหล็ก และจะมีอุณหภูมิลดลงไปเรื่อยๆเมื่ออยู่ในตำแหน่งที่ห่างจากแผ่นเหล็กมากขึ้น ซึ่งพบว่าอุณหภูมิของยางบริเวณที่อยู่ใกล้ และอยู่ห่างแผ่นเหล็กความร้อนที่สุดจะมีอุณหภูมิแตกต่างกันมาก แสดงให้เห็นถึงความไม่สม่ำเสมอของการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในชิ้นยาง ซึ่งเป็นเหตุเนื่องจากการเป็นฉนวนทางความร้อนของยางนั่นเอง

6. สรุป

การทำให้เกิดความร้อนในยางด้วยคลื่นไมโครเวฟ จะทำให้ยางมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายในเนื้อยาง และหากนำมาประยุกต์ใช้แทนการให้ความร้อนในแบบธรรมดาที่ใช้ในปัจจุบัน จะสามารถลดเวลาและต้นทุนในการผลิตมาก ดังนั้นจึงควรเป็นอย่างยิ่งในการนำคลื่นไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยาง สำหรับการที่ยางจะร้อนมากที่สุด ในตำแหน่งไหนนั้นขึ้นอยู่กับ การตกกระทบของสนามไฟฟ้า และผลจากการแทรกสอดและสะท้อนของคลื่น ซึ่งส่งผลให้เกิดการเสริมกันและหักล้างกันของคลื่น ดังนั้นหากมีการนำคลื่นไมโครเวฟไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยาง จะต้องมีการออกแบบลักษณะของห้องอุ่นและตำแหน่งในการวางหลอดแมกนีตรอนให้เหมาะสม เพื่อให้ชิ้นงานเกิดความร้อนในบริเวณที่ต้องการมากที่สุดอีกด้วย

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัทโมลด์เมท จำกัด และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) ที่ให้ทุนอุดหนุนในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] D.A.Hills , "Heat Transfer and Vulcanisation of Rubber," Elsevier Publishing Co. Ltd., New York, 1971.
- [2] National Research Council, "Microwave Processing of Materials," Publication NMAB-473, National Academy Press, Washington, D.C., 1994.
- [3] Roger Meredith, "Engineers' Handbook of Industrial Microwave Heating," The Institution of Electrical Engineers, London, 1998.
- [4] Yu V Bykov, K I Rybakov and V E Semenov, "High-temperature microwave processing of materials," Institute of สาขาการประยุกต์ใช้พลังงาน

Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Russia, 2000.

[5] Wladyslaw Adamski and Marek Kittlinski, "On Measurements Applied in Scientific Researches of Microwave Heating Processes," Technical University of Gdansk, Poland, 2001.

[6] Industrial Microwave Systems, Inc., "Frequently Asked Questions," www.industrialmicrowave.com, 2002.

[7] Suri Ryyanen, "Microwave Heating Uniformity of Multicomponent Prepared Foods," Academic Dissertation, Department of Food Thecnology, University of Helsinki, 2002.

[8] Xiaofeng Wu,M.S., "Experimental and Theoretical Study of Microwave Heating of Thermal Runaway Materials," Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, December 2002.

[9] M. Vollmer, "Physics of Microwave Oven," U. Appl. Sci. Brandenburg, Germany, 2004.

[10] Tangram Technology Ltd., "Energy efficiency in Rubber Processing," www.tangram.co.uk