รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การพัฒนาการอุ่นยางธรรมชาติด้วยพลังงานไมโครเวฟ

(Development of Pre-heating of Natural Rubber with Microwave Energy)

โดย ดร.วารุณี อริยวิริยะนันท์ และคณะ

30 กันยายน 2551

สัญญาเลขที่ RDG5050111

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การพัฒนาการอุ่นยางธรรมชาติด้วยพลังงานไมโครเวฟ

(Development of Pre-heating of Natural Rubber with Microwave Energy)

คณะผู้วิจัย	สังกัด
1. ดร.วารุณี อริยวิริยะนันท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
2. นายวิญสัญ วุ่นซิ้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
3. นายนิพนธ์ ไชยนุ้ย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
4. นายอรุณ จันทร์ฤทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ชุดโครงการ โครงการวิจัยยางพาราขนาดเล็ก (Small Project Rubber)

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

แบบสรุปรายงานสำหรับผู้บริหาร (Executive Summary)

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การพัฒนาการอุ่นยางธรรมชาติด้วยพลังงานไมโครเวฟ
(ภาษาอังกฤษ) (Development of Pre-heating of Natural Rubber with Microwave Energy)

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด และที่อยู่

ชื่อ-สกุล ดร. วารุณี อริยวิริยะนันท์
หน่วยงาน ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ที่อยู่ 39 หมู่ 1 ต.คลอง 6 อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110
โทรศัพท์/โทรสาร 025493484-5/025493483
E-mail address: k_warunee@yahoo.com, warunee.a@en.rmutt.ac.th

นักวิจัย / ผู้ร่วมวิจัย

1. นายวิญสัญ วุ่นซิ้ว
2. นายนิพนธ์ ไชยนุ้ย
3. นายอรุณ จันทร์ฤทธิ์

ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญ

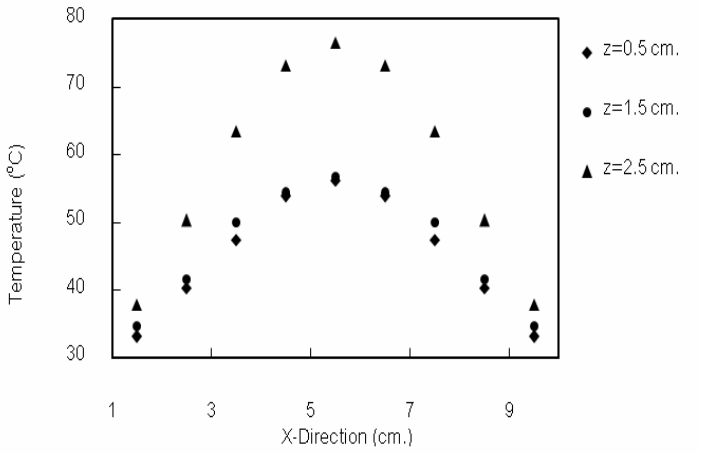
การอุ่นยางหนาที่มีปัญหาต้องใช้เวลาในการวัลคาไนซ์นาน รวมถึงกระบวนการไล่ความชื้นโดยใช้เตาอบด้วยความร้อนแบบธรรมดา (conventional heating method) จะใช้เวลานานและสิ้นเปลืองพลังงาน ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาการอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ด้วยพลังงานไมโครเวฟเพื่อช่วยลดระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีความหนาสูง เช่น ยางล้อตัน รวมไปถึงสามารถนำไปประยุกต์ ออกแบบ และสร้างอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นแก่อุตสาหกรรมยางพาราต่อไปในอนาคต

วัตถุประสงค์

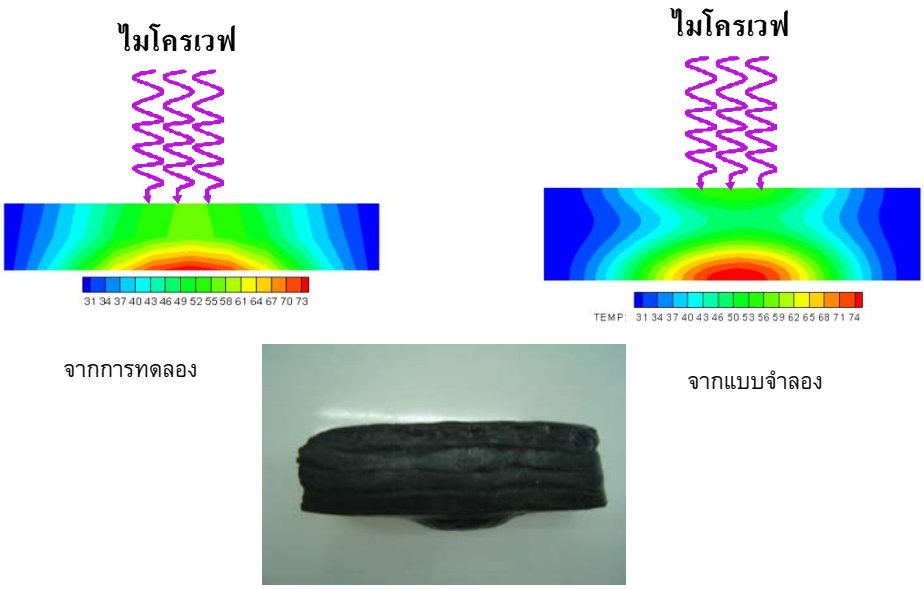
1. เพื่อศึกษาวิธีการประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟในการอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ด้วยเครื่องไมโครเวฟแบบท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม
2. เพื่อศึกษาความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของคลื่นไมโครเวฟไปสู่ยาง
3. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเวลา และพลังงานไมโครเวฟเมื่อมีการประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่ออุ่นยางหนาก่อนเข้าอัดเบ้าด้วยเครื่องไมโครเวฟแบบท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม

ผลการดำเนินงาน

ยางคอมเพาด์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ยางธรรมชาติ สารวัลคาไนซ์ สารกระตุ้น สารตัวเติม และสารตัวเร่ง ในการทดลองนี้ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์ 2.5 phr และเขม่าดำ 10 phr. โดยเริ่มนำยางธรรมชาติและส่วนผสมมาทำการบดผสมด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง นำมาวางในแม่พิมพ์โลหะที่มีความหนาขนาด 3 ซม. แล้วอัดด้วยเครื่อง Compression molding จากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่องไมโครเวฟชนิดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (Mode: TE10) ที่ระดับความถี่ 2.54 GHz ที่สามารถแปรเปลี่ยนกำลังได้ตั้งแต่ 0 ถึง 1500 Watts หลังจากนั้นก็ให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยการปรับอุณหภูมิ เวลา และความเข้มข้นของคลื่นไมโครเวฟอย่างเหมาะสม และทำการวิเคราะห์ค่าไดอิเล็กตริก ความเชื่อมโยงพันธะ โครงสร้างทางเคมีและผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและเวลาเมื่อให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยนำผลจากการทดลองมาเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่อไป



รูปที่ 1 แสดงการกระจายอุณหภูมิของยางธรรมชาติคอมพาวด์ (NR-CB10) กำลังไมโครเวฟ 1,000 วัตต์ หนา 3 ซม. ที่บริเวณต่าง ๆ กัน (วัดจากผิวด้านบน) เมื่อทำการอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ด้วยพลังงานไมโครเวฟ ลักษณะการกระจายอุณหภูมิทั้งในแนวแกน x และแกน z แสดงดังรูป จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นการกระจายอุณหภูมิในแนวแกน x ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องมาจากบริเวณตรงกลางของชิ้นยางธรรมชาติคอมพาวด์ได้รับพลังงานมากที่สุด (บริเวณตรงกลางมีความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากที่สุด) ดังนั้นความร้อนจึงเกิดบริเวณตรงกลางมากที่สุดด้วยและเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นตรงกลางจึงร้อนมากที่สุด และ พบว่าในแนวแกน z บริเวณที่ร้อนมากที่สุดคือบริเวณที่ห่างจากผิวด้านบน 2.5 ซม.เนื่องจากยางธรรมชาติคอมพาวด์มีค่าความลึกทะลุทะลวง (penetration depth; Dp) มากดังนั้นเมื่อชิ้นงานยางธรรมชาติคอมพาวด์ซึ่งมีความหนาน้อยกว่าค่า Dp ได้รับคลื่นไมโครเวฟ ทำให้คลื่นสามารถทะลุผ่านชิ้นงานยางธรรมชาติคอมพาวด์ได้แต่ที่บริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานยางธรรมชาติคอมพาวด์กับอากาศ คลื่นไมโครเวฟจะเกิดการสะท้อนกลับเข้ามาในชิ้นงานยางธรรมชาติคอมพาวด์บางส่วน ทำให้บริเวณด้านล่างของชิ้นงานยางธรรมชาติคอมพาวด์ได้รับคลื่นมากกว่าบริเวณด้านบน บริเวณนี้จึงมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณอื่น



รูปที่ 2 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิ ($^{\circ}$C) ภายในชิ้นยางธรรมชาติคอมพาวด์ระหว่างการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ณ ช่วงเวลา 5 นาที ความถี่ 2.45 GHz หนา 3 ซม. กำลังไมโครเวฟ 1,000 วัตต์

สรุปผลการวิจัย

1. พลังงานไมโครเวฟสามารถนำไปประยุกต์ใช้อุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ให้เริ่มร้อนก่อนเข้าสู่กระบวนการวัลคาไนซ์ได้ โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (E) ซึ่งค่าดังกล่าวแปรผันตรงกับการเปลี่ยนแปลงกำลังไมโครเวฟที่ป้อนเข้าไป

2. พลังงานไมโครเวฟสามารถให้ความร้อนในยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่มีความหนามาก ๆ ได้และสามารถให้ความร้อนสม่ำเสมอทุก ๆ ความหนา

3. พลังงานไมโครเวฟสามารถทำให้การอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์มีปริมาณการเชื่อมโยงพันธะเกิดขึ้นด้วยโดยที่อุณหภูมิดังกล่าวยังไม่ถึงอุณหภูมิการคงรูป (cure) เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีธรรมดา ซึ่งแสดงให้เห็นว่านอกจากใช้อุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ได้แล้วยังสามารถใช้ในการทำให้ยางคงรูปได้อีกด้วย

4. ปริมาณเขม่าดำที่เติมลงไปไม่ส่งผลต่อการเกิดการเชื่อมโยงพันธะภายในโครงสร้างของยางธรรมชาติคอมพาวด์

5. การเติมเขม่าดำทำให้ยางธรรมชาติคอมพาวด์มีค่า $\tan\delta$ สูงขึ้น มีผลทำให้การเกิดความร้อนภายในหรืออุณหภูมิเพิ่มขึ้นกว่ากรณีไม่เติมเขม่าดำ

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าควรวิจัยเพิ่มเติม และวิธีการที่ควรพัฒนาต่อยอดสู่ภาคปฏิบัติจริง

จากการศึกษาการใช้ความร้อนแก่ยางธรรมชาติด้วยเครื่องไมโครเวฟชนิดทรงสี่เหลี่ยม (Rectangular Wave Guide, Mode TE_{10}) ไม่เหมือนระบบไมโครเวฟแบบทั่วไป โดยระบบจะใช้คลื่นแบบเดี่ยว มีข้อดีคือเราสามารถควบคุมความร้อนและเวลาได้เป็นอย่างดี สามารถคำนวณเป็นสมการทางความร้อนของยางธรรมชาติได้ ดังนั้นถ้าทำการศึกษาอย่างต่อเนื่องเสริมข้อมูลให้ละเอียดครบถ้วน เสนอแนะว่าสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในอุตสาหกรรมยางที่ต้องการใช้พลังงานไมโครเวฟมาทำการอุ่นยางที่มีความหนามากกว่า 5 ซม. ขึ้นไป โดยให้ความร้อนที่สม่ำเสมอตลอดชิ้นงาน พบว่าตัวอย่างยางธรรมชาติที่ผ่านให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟมีโครงสร้างภายในที่ไม่เปลี่ยนแปลงและไม่ผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาย และอื่นๆ ของยางคอมเปาวด์ อีกทั้งการอุ่นยางด้วยพลังงานไมโครเวฟสามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงพันธะได้ $1.85x10^{-4}$ mol/cm^3 ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้นในระยะเวลาสั้น แม้ยังไม่ได้นำมาให้ความร้อนโดย compression ทางคณะทำงานวิจัยจึงมีข้อเสนอแนะถึงความเป็นไปได้ในการนำความรู้และเทคโนโลยี ด้านพลังงงานไมโครเวฟไปใช้ในการออกแบบเครื่องไมโครเวฟที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ตัวอย่างยางได้อย่างเหมาะสม น่าจะนำเทคโนโลยีดังกล่าวนี้มาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยางที่ทำการผลิตผลิตภัณฑ์ยางตันหรือชิ้นงานที่มีความหนามากๆ และต้องการลดระยะเวลาในการให้ความร้อนหรือทำให้ปริมาณน้ำลดลงได้เป็นอย่างดี

ผลงานทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

1. คาดว่าจะตีพิมพ์ในหนังสือวารสารของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีธัญบุรี
2. คาดว่าจะตีพิมพ์ในวารสารของ สกว. เผื่อเผยแพร่การนำเทคโนโลยีไมโครเวฟมาใช้กับการอุ่นยางธรรมชาติ รวมทั้งผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติแก่อุตสาหกรรมยางเป็นการต่อยอดงานวิจัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ นำพลังงานไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการทำความร้อนด้วยระบบไมโครเวฟในการอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ก่อนเข้าสู่กระบวนการวัลคาไนซ์ โดยยางธรรมชาติคอมพาวด์มีการเติมด้วยสารเติมแต่งและผสมด้วยเขม่าดำ เพื่อจำลองสูตรคล้ายกับผลิตภัณฑ์ยางตัน โดยใช้กำมะถัน 2.5 phr และเขม่าดำ 10 phr ยางธรรมชาติคอมพาวด์ถูกนำมาอุ่นให้ร้อนด้วยระบบไมโครเวฟชนิดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (MODE: TE_{10}) ทำงานที่ระดับถี่ 2.45 GHz สามารถแปรเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 1,500 วัตต์ โดยจะทำการศึกษาทั้งการทดลอง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการทดลองจะศึกษาเกี่ยวกับ กำลังไมโครเวฟที่ป้อนเข้าไป ที่ความหนาชิ้นงาน 3 ซม, โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติคอมพาวด์ การเกิดโครงสร้างตาข่ายสามมิติภายในชิ้นงานทดสอบที่มีสมบัติไดอิเล็กตริก (dielectric properties) ต่างกัน ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าพลังงานไมโครเวฟสามารถใช้อุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ให้เริ่มร้อนก่อนเข้าสู่กระบวน การวัลคาไนซ์ที่มีความหนามากกว่า 5 ซม.ได้ โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ คือ กำลังไมโครเวฟ และค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของยางธรรมชาติคอมพาวด์ (ซึ่งมีการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบของส่วนผสม) นอกจากนี้พบว่าการอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์โดยใช้พลังงานไมโครเวฟสามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงพันธะ (cross-linked) ขึ้นด้วย ยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่เติมเขม่าดำจะมีค่าความสามารถในการแปรเปลี่ยนพลังงานที่วัสดุดูดซับเป็นพลังงานความร้อนมากกว่าที่ไม่เติม ส่งผลให้พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นมีมากกว่าแต่ไม่มีผลต่อการเชื่อมโยงพันธะ คือ % Crosslinking เพิ่มขึ้นจาก 0 mol/cm^3 เป็น 1.85×10^{-4} mol/cm^3 เมื่อผสมด้วยเขม่าดำ 10, 30 และ 50 phr ในส่วนของการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีเป็นการศึกษาเพื่อดูลักษณะการกระจายอุณหภูมิได้เปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง โดยทำการศึกษาผลของกำลังไมโครเวฟที่ป้อนไป และความหนาของชิ้นงาน ที่มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิภายในชิ้นงานทดสอบยางธรรมชาติคอมพาวด์ โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมาช่วยในการวิเคราห์ ผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในชิ้นทดสอบยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่ได้สอดคล้องกับการทดลอง ประโยชน์ขององค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับกระบวนการคงรูปยางธรรมชาติในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

Abstract

This research study on an application of microwave radiation for pre-heating of natural rubber compound for the purpose of pre-heating before vulanisation process. The natural rubber which was compounded with various additive, sulfur 2.5 phr and carbon black 10 phr similar to solid tire product, was pre-heated by microwave radiation using a rectangular wave guide system (MODE: TE_{10}) operating at frequency of 2.45 GHz in which the power can vary from 0 to 1,500 W. The experimental and numerical were studied in the present work.In the experimental, the influence of power input were examined. Results were discussed in views of the thermal properties, 3-D network, dielectric properties and chemical structures. It was found that microwave radiation can be applied to pre-heating natural rubber compound before vulcanisation process. Microwave radiation was very useful to be able to pre-heating natural rubber compound that has thickness greater than 5mm. Cross-linking in natural rubber compound may occur after pre-heating by microwave radiation though FTIR measurement. There were a few effects of carbon black content on crosslinking after applying microwave radiation that is % Crosslinking increased from 0 mol/cm^3 to 1.85 $x10^{-4}$ mol/cm^3 after adding with carbon black 10, 30 and 50 phr, respectively. Moreover, natural rubber-compound without carbon black showed a lower heat absorption compared with natural rubber-compounding filled with carbon black. This is due to the difference in dielectric loss factor. In numerical work purposes to study temperature propagation of natural rubber compound under microwave pre-heating. The influence of power input and sample thickness were examined after applying microwave radiation to the natural rubber compound samples. The numerical results from this study are able to explain behavior of temperature propagation as well as the experimental results. This preliminary result along with the fundamental study of microwave radiation to pre-heating natural rubber compound is considered to be useful information that can be applied to rubber processing in industries.

เนื้อหา

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ยางธรรมชาติมีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศเพราะในปัจจุบันประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกยางธรรมชาติ (Natural Rubber) ได้เป็นอันดับหนึ่งของโลก ส่วนใหญ่จะผลิตเป็นยางแท่ง , ยางแผ่นรมควัน ส่งขายต่างประเทศ ส่วนการนำยางธรรมชาติไปแปรรูปให้เป็นผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มมูลค่าเพียงแค่ประมาณร้อยละ 10 เท่านั้น ดังนั้น จึงเป็นที่ชัดเจนว่าอุตสาหกรรมการแปรรูปยางดิบให้เป็นผลิตภัณฑ์นั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ปัญหาหลักของอุตสาหกรรมยางและผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เกิดจากการขาดแคลนบุคลากรที่มีความรู้พื้นฐานทางด้านเทคโนโลยียาง ทำให้ไม่มีการปรับปรุงกระบวนการผลิต รวมทั้งขาดการทำวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ เพื่อตอบสนองความต้องการของตลาดในกลุ่มเป้าหมาย เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ โดยมีการนำยางธรรมชาติไปใช้เป็นชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมยานยนต์หลายชนิด เช่น ล้อรถยนต์ ประเก็น วงแหวนต่าง ๆ เป็นต้น เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติเด่นคือความยืดหยุ่น แต่มีจุดอ่อนเรื่องการเปลี่ยนแปลงลักษณะไปตามอุณหภูมิ ทำให้ไม่สามารถใช้งานได้นานจำเป็นต้องมีการผสมกับสารเคมีต่างๆ และนำยางคอมพาวด์ที่ผสมได้ไปผ่านกระบวนการคงรูป (vulcanization) เพื่อปรับสมบัติให้ได้ตามความเหมาะสมกับความต้องการของผลิตภัณฑ์นั้นๆ โดยยางคอมพาวด์จะเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ (3D network) หรือที่เรียกว่าเกิด crosslink ทำให้ยางคงรูปมีความยืดหยุ่นดีและแข็งแรง มีสมบัติเชิงกลที่เสถียรและทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนและแสงแดดได้ดียิ่งขึ้น [1-5] กระบวนการคงรูปต้องอาศัยสารเคมีกลุ่มที่ทำให้ยางคงรูป (vulcanizing or curing agents) และความร้อนเพื่อทำให้สารดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ อย่างไรก็ตามวิธีการที่ใช้อยู่ทั่วไปส่วนใหญ่เป็นการให้ความร้อนโดยวิธีธรรมดา (conventional heating method) ซึ่งมีการป้อนความร้อนที่ผิวหน้าชิ้นงาน บางครั้งอาจเกิดปัญหากับชิ้นงานที่มีความหนามากๆ เช่น ยางล้อตัน เนื่องจากชิ้นงานได้รับความร้อนไม่ทั่วถึงหรือไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้กระบวนการผลิตใช้เวลานาน สิ้นเปลืองพลังงาน อีกทั้งยังทำให้สมบัติเชิงโครงสร้างและสมบัติเชิงคุณภาพของยางเปลี่ยนไป จึงเป็นที่มาของการแสวงหาวิธีใหม่ในการขจัดปัญหาที่เกิดขึ้นในวิธีดั้งเดิม การประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟมาก็เป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูงและเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการให้ความร้อนแก่ยางธรรมชาติรวมทั้งช่วยปรับปรุงคุณภาพยางธรรมชาติ เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟมีข้อได้เปรียบหลายประการ กล่าวคือ มีประสิทธิภาพทางความร้อนและคุณภาพของผลิตภัณฑ์สูงเพราะเป็นการให้ความร้อนเชิงปริมาตร ใช้ระยะเวลาในการทำความร้อนสั้น พลังงานที่ใช้เป็นพลังงานสะอาดไม่มีเขม่าไอเสีย เครื่องจักรมีขนาดเล็กและค่าการบำรุงรักษาต่ำ เนื่องจากมีองค์ประกอบน้อยชิ้น

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาวิธีการประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟในการอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ด้วยเครื่องไมโครเวฟแบบท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม

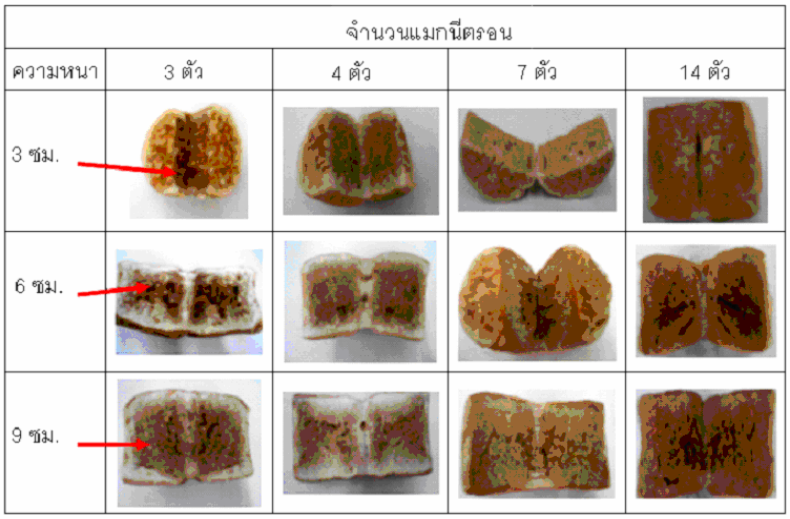
2.2 เพื่อศึกษาความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของคลื่นไมโครเวฟไปสู่ยาง

2.3 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเวลา และพลังงานไมโครเวฟเมื่อมีการประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่ออุ่นยางหนาก่อนเข้าอัดเบ้าด้วยเครื่องไมโครเวฟแบบท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม

3. ทฤษฎี แนวคิดในการวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง

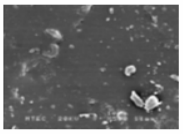
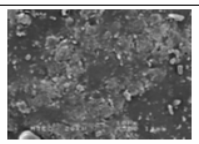
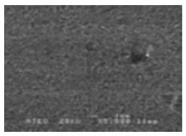
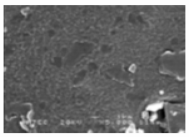
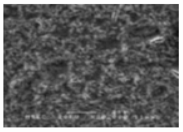
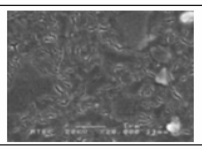
การอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ด้วยไมโครเวฟเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่มีผู้ศึกษาวิจัยในประเทศไทยค่อนข้างน้อย ทั้งที่ประเทศไทยสามารถผลิตยางธรรมชาติและส่งออกได้มากเป็นอันดับหนึ่งของโลก เนื่องจากผู้ที่มีความรู้เกี่ยวกับยางธรรมชาติมีอยู่น้อย นอกจากนี้ ไมโครเวฟก็ยังเป็นเรื่องใหม่สำหรับประเทศไทยในการนำไปใช้งานกับวัสดุต่าง ๆ อีกทั้งยังต้องอาศัยองค์ความรู้หลาย ๆ ด้านในการวิเคราะห์พฤติกรรม เช่น ความรู้ทางด้านการถ่ายเทมวลสารและความร้อน ความรู้ทางด้านไมโครเวฟ รวมไปถึงความรู้เกี่ยวกับยางธรรมชาติ

ที่ผ่านมากลุ่มนักวิจัยที่ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ไมโครเวฟในการให้ความร้อนกับยางธรรมชาติ ได้แก่ ผดุงศักดิ์ และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาการนำพลังงานไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้กับยางพาราและอุตสาหกรรมทางด้านเซรามิกส์ โดยที่การวิจัยดังกล่าวใช้อุปกรณ์คือ เตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง จากการทดลองในส่วนของยางพาราก็พบว่าสามารถช่วยลดขั้นตอนในการรีดแผ่นยาง โดยสามารถนำยางพาราทั้งก้อนไปทำการอบได้เลยซึ่งสังเกตได้จากผลการทดลองดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงรูปยางพาราหลังได้รับการอบด้วยเตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง

และยางพาราที่ได้ก็มีคุณภาพที่ดีกว่าเดิม สังเกตได้จากจัดเรียงโครงสร้างภายในของยางพารา ดังรูปที่ 2

	ยางอบด้วยไมโครเวฟ	ยางแผ่นรมควัน
กำลังขยาย 500		
กำลังขยาย 5000		
กำลังขยาย 20000		

รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างภายในของยางพาราระหว่างวิธีการอบด้วยเตาไมโครเวฟกับวิธีรมควันธรรมดา

รัชดา [7] ได้ทำการศึกษาขั้นเริ่มต้นถึงการนำพลังงานไมโครเวฟมาใช้ในการให้ความร้อนยางเปรียบเทียบกับการให้ความร้อนแบบธรรมดา พบว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟแบบคลื่นผสมในการให้ความร้อน ซึ่งเป็นการให้ความร้อนเชิงปริมาตรจะทำให้ยางมีความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและอุณหภูมิภายในเนื้อยางกระจายตัวอย่างทั่วถึงภายในเวลาอันรวดเร็วเนื่องจากความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นไมโครเวฟ

ณัฐพงศ์ นิธิอุทัยและคณะ [8] ศึกษาการอุ่นยางด้วยคลื่นไมโครเวฟสำหรับงานอัดเบ้ายางหนาพบว่า การใช้คลื่นไมโครเวฟแบบคลื่นผสมในการอุ่นยางก่อนการอัดเบ้ายางหนานั้นสามารถลดเวลาในการอบสุกยางลง 31.2 % และพลังงานที่ใช้จะลดลง 41.11 % มีอัตราการทะลุทะลวงที่ดีกับยางขนาด 3.5 กิโลกรัม ลักษณะทรงกระบอกสูง 7 นิ้วและมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 นิ้ว ในการทดสอบดังกล่าว

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าส่วนใหญ่จะเน้นการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ไมโครเวฟกับยางคอมพาวด์ โดยในยางคอมพาวด์จะมีส่วนผสมของยางสังเคราะห์ที่มีสมบัติความเป็นขั้วรวมอยู่ด้วย นอกจากนี้ ลักษณะของไมโครเวฟที่ใช้มักจะใช้ในรูปของเครื่องสายพาน (Continuous Microwave) หรือไมโครเวฟที่ใช้ในครัวเรือน ซึ่งเป็นไมโครเวฟแบบคลื่นผสม (Multi Mode) ยังมีอยู่ค่อนข้างน้อยมากที่ทำการศึกษาถึงพฤติกรรมทางความร้อน การกระจายความร้อนของไมโครเวฟแบบคลื่นเดี่ยว (Single Mode)

การประยุกต์ใช้ไมโครเวฟในการทำความร้อนแก่วัสดุนอกจากจะศึกษาในรูปแบบการทดลองแล้ว ยังได้มีการศึกษาในเชิงทฤษฎีอีกด้วย ดังเช่น Ratanadecho et al [10] ได้ทำการทดลองและ

สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาการทำความร้อนของชั้นของเหลวโดยใช้ไมโครเวฟแบบท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม โดยใช้ชั้นของเหลว 2 ชั้น คือ ชั้นของน้ำและชั้นของสารละลายเกลือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมทางความร้อนที่ครอบคลุมใน 2 มิติ ในส่วนของสมการโมเมนตัม อุณหภูมิถูกพิจารณาว่าเป็นแบบไม่อิ่มตัว และมีของเหลวไหลวนอยู่ ทำให้สามารถเชื่อมโยงกับปัญหาที่ไม่อิ่มตัวของสมการแมกเวลส์ที่ใช้ FDTD การแก้ปัญหา สามารถศึกษากระบวนการทำความร้อนได้หลายลักษณะ ในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์ผลของการนำไฟฟ้า (ซึ่งขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเกลือในชั้นของของเหลว) และระดับกำลังของไมโครเวฟในกระบวนการทำความร้อน แบบจำลองตั้งอยู่บนพื้นฐานของสมการแมกเวลส์ สมการการทำความร้อนและสมการการไหลของของไหล ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่ากลไกการเกิดความร้อนขึ้นอยู่กับสมบัติไดอิเล็กตริก

สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้ จะทำการทดลองและศึกษาถึงการกระจายความร้อนเพื่อพัฒนาการอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่ใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีความหนามาก เช่น ยางล้อตัน และมีการเติมเขม่าลงไปด้วย โดยใช้ไมโครเวฟแบบท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมเนื่องจากสามารถคำนวณการไหลผ่านของคลื่นไมโครเวฟในทิศทางเดียวได้ซึ่งแตกต่างจากระบบที่ทำการทดสอบโดยใช้คลื่นผสม

4. วิธีการ

4 1.วัตถุดิบและสารเคมี

4.1.1 ยางแท่ง (Standard Thailand Rubber, STR20)

4.1.2 กำมะถัน (Sulfur) ซื้อจากบริษัท เคมิเคิล เอ็กซ์เพลส จำกัด

4.1.3 กรดสเตียริก (Stearic acid) ซื้อจากบริษัท เคมิเคิล เอ็กซ์เพลส จำกัด

4.1.4 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide) ซื้อจากบริษัท เคมิเคิล เอ็กซ์เพลส จำกัด

4.1.5 DPG (Diphenyl guanidine)

4.1.6 MBTS (Dibenzothiazyl disulphide)

4.1.7 ผงดำ (Carbon Black, grade N330)

4.1.8 โทลูอีน (Toluene) ซื้อจากบริษัท Bang Trading (Thailand) Co., Ltd

4 2.อุปกรณ์ ในการทดลอง

4.2.1 เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (Two roll mill, Lab Tech Co., Ltd)

4.2.2 เครื่องอัดขึ้นรูป (compression molding machine, Lab Tech Co., Ltd)

4.2.3 เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด 4 ตำแหน่ง (Electronic balance)

4.2.4 เกรียงทองเหลือง

4.2.5 ถุงมือป้องกันความร้อน

4.2.6 แปรงทองเหลือง

4.2.7 มีดคัตเตอร์และไม้บรรทัดเหล็ก

4.2.8 แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นงาน

4.2.9 เครื่องไมโครเวฟ (Microwave Machine), ยี่ห้อ Micro Denshi, Japan และอุปกรณ์ประกอบดังแสดงในรูปที่ 1

4.2.10 เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟาเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR 470) ยี่ห้อ Nicolet ประเทศสหรัฐอเมริกาดังแสดงในรูปที่ 3

4 3.การเตรียมตัวอย่างยาง

4.3.1 การเตรียมตัวอย่างยางคอมเปาว์

ยางคอมเพาด์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ยางธรรมชาติ สารวัลคาไนซ์ สารกระตุ้น สารตัวเติม และสารตัวเร่ง ดังแสดงอัตราส่วนการผสมของยางคอมเพาด์ในตารางที่ 1 การเตรียมยางคอมเพาด์ โดยเริ่มนำยางธรรมชาติมาทำการบดผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิประมาณ 70°C ใช้เวลาประมาณ 5 นาที จนยางเริ่มพันลูกกลิ้งมองเห็นเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นใส่ ZnO ลงไปบดผสมใช้มีดกรีดและบดผสมไปเรื่อยๆใช้เวลาประมาณ 3 นาที ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ใส่ Stearic acid ลงไปบดผสมใช้มีดกรีดและบดผสมไปเรื่อยๆ ใช้เวลาประมาณ 3 นาที ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ใส่ MBTS ลงไปบดผสมใช้มีดกรีดและบดผสมไปเรื่อยๆใช้เวลาประมาณ 3 นาที อุ่นผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ต่อมาใส่ DPG ลงไปบดผสมใช้มีดกรีดและบดผสมไปเรื่อยๆ ใช้เวลาอีกประมาณ 3 นาที และ ใส่ Sulphur ลงไปบดผสมใช้มีดกรีดและบดผสมไปเรื่อยๆ ใช้เวลาประมาณ 3 นาที และใส่เขม่าดำลงไปบดให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันอีก 3 นาที

ตารางที่ 1 แสดงอัตราส่วนยางคอมเพาด์ที่ใช้ในการทดลอง

Ingredients	Quantities (phr)			
	NR-CB0	NR-CB10	NR-CB30	NR-CB50
NR	100	100	100	100
ZnO (Zinc Oxide)	5	5	5	5
Stearic acid	1	1	1	1
MBTS(Dibenzothiazyl disulphide)	0.8	0.8	0.8	0.8
DPG (Diphenyl guanidine)	0.2	0.2	0.2	0.2
Sulphur	2.5	2.5	2.5	2.5
Carbon Black (N-330)	0	10	30	50

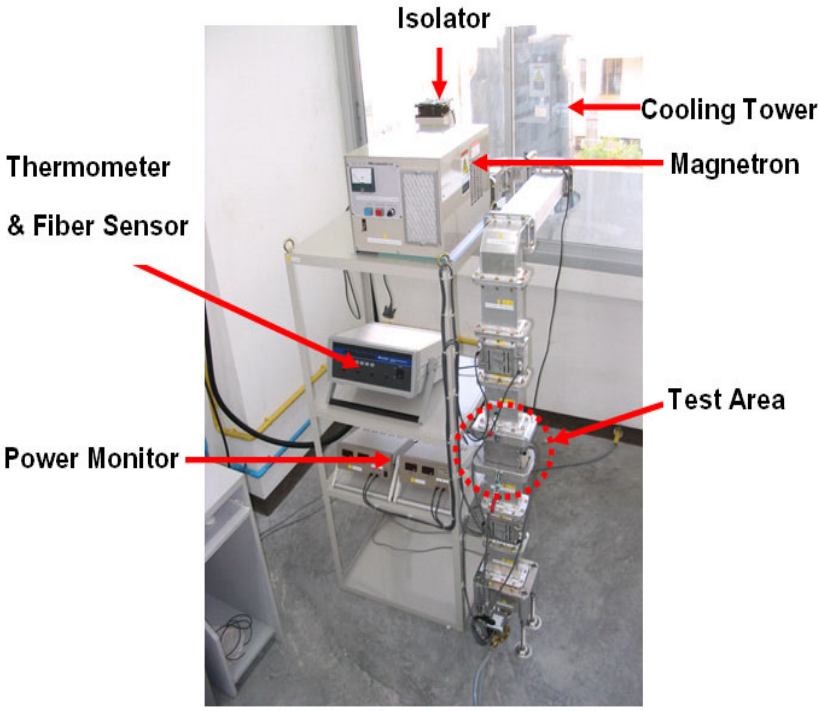
4.3.2 การเตรียมพิมพ์ของตัวอย่างชิ้นยาง

นำยางคอมเปาว์ที่ผ่านเครื่องบดผสมแล้วในข้อที่ 4.3.1 มาวางในแม่พิมพ์โลหะที่มีความหนาขนาด 3 ซม. แล้วอัดด้วยเครื่อง Compression molding ให้เป็นชิ้นงานตามขนาดที่ต้องการ จากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่องไมโครเวฟ

4.4 การทดสอบ

4.4.1 การให้ความร้อนกับยางด้วยพลังงานไมโครเวฟ

นำตัวอย่างยางธรรมชาติแบบต่าง ๆ ใส่ในแม่พิมพ์ แล้วนำไปใส่ในช่องในตัวอย่างในเครื่องไมโครเวฟชนิดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (Mode: TE10) ประกอบด้วยแมกนีตรอนซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความถี่ 2.54 GHz ที่สามารถแปรเปลี่ยนกำลังได้ตั้งแต่ 0 ถึง 1500 Watts ดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2 หลังจากนั้นก็ให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยการปรับอุณหภูมิ เวลา และความเข้มข้นของคลื่นไมโครเวฟอย่างเหมาะสม

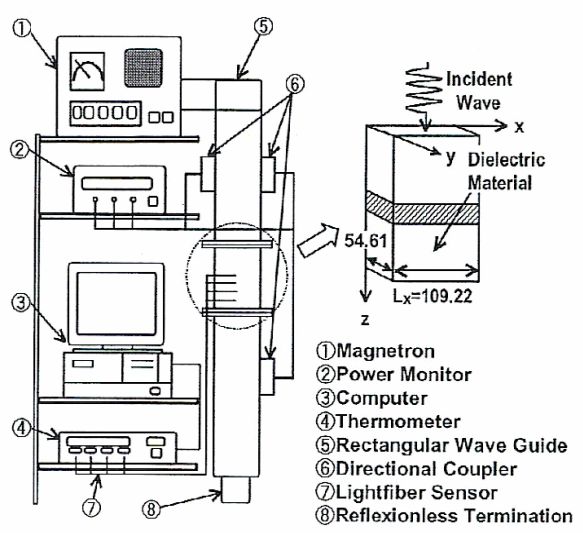


รูปที่ 1 แสดงเตาอบไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลอง

เตาอบไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย

- เครื่องกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ ช่วงคลื่นที่ 2,450MHz เป็นเครื่องของไมโครเดนชิ โมเดล UN 1500

- ตัวดักคลื่นไมโครเวฟ ป้องกันการย้อนกลับของคลื่น เป็นเครื่องของไมโครเดนชิ โมเดล D 25 M-TM
- ท่อนำคลื่น สำหรับใส่ชิ้นงานทดสอบ ขนาดกว้าง 54.16 มิลลิเมตร ยาว 109.22 มิลลิเมตร สูง 50.00 มิลลิเมตร

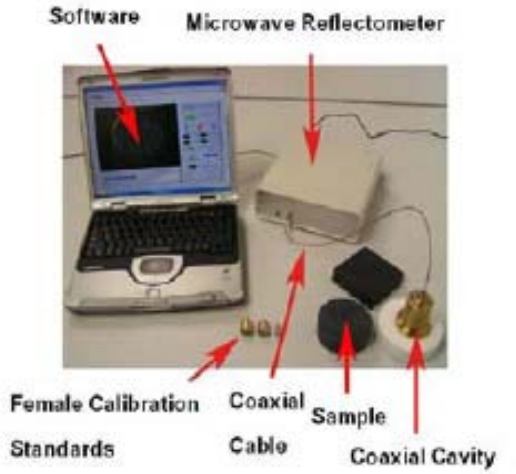


รูปที่ 2 แบบจำลองแสดงรายละเอียดเครื่องไมโครเวฟท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม

4.4.2 วิธีการหา Dielectric properties

การวัดค่าไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) ของตัวอย่างยางทำได้โดยใช้เครื่องมือ Network Analyzer ดังแสดงในรูปที่ 3

ขั้นตอนการวัดค่าสมบัติไดอิเล็คตริคเริ่มจากนำตัวอย่างชิ้นงาน มาเตรียมให้มีความหนาประมาณ 1 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 เซนติเมตร หลังจากนั้นทำการวัด 5 จุดต่อหนึ่งชิ้นงาน บันทึกค่าที่ได้แล้วนำมาหาค่า tan δ



รูปที่ 3 แสดงเครื่อง Network Analyzer

4.4.3 ศึกษาโครงสร้างด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy

การศึกษาโครงสร้างของยางธรรมชาติก่อนและหลังให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟสามารถทำได้โดยให้เทคนิคอินฟราเรด (FTIR-470, Nicolet, USA) ดังแสดงในรูป 4 นำสารตัวอย่างยางละลายด้วยคลอโรฟอร์ม และหยดเป็นฟิล์มบางๆ บนแผ่น KBr จากนั้นรอให้สารเคมีระเหย ก็ทำไปการทดสอบโดยให้คลื่นอินฟราเรดผ่านและประมวลผล

รูปที่ 4 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

4.4.4 วิธีการหาค่า % Crosslinking

การศึกษาการทนต่อความร้อนของยางธรรมชาติก่อนและหลังให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟสามารถทำได้โดยให้การหาค่า % crosslinking เนื่องจากเมื่อยางเกิดจุดเชื่อมโยงในโครงสร้างจะทำให้การทนต่อความร้อนเพิ่มมากขึ้น โดยวิธีการหาค่า เปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยง (% crosslinking) ได้จากการนำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟแล้วมาตัดให้เป็นทรงสี่เหลี่ยมนำไปชั่งและบันทึกน้ำหนัก จากนั้นแช่ในโทลูอีนปริมาตร 30 มล.ทิ้งไว้ประมาณ 1 สัปดาห์ นำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้งและคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยงตามสูตรในสมการที่ 1 [10-12]

$$-\ln(1-V_r)-V_r-\chi V_r^2 = 2V_s\eta_{swell}\left(V_r^{1} \quad (2) \quad \frac{r}{r}\right) \qquad (1)$$

เมื่อ V_r คือvolume fraction of rubber in swollen gel

χ คือ rubber-solvent interaction parameter (0.3795)

V_s คือ molar volume of toluene (106.8cm^3/mol^{-1})

η_{swell} คือ % การบวมตัวของยางคอมพาวด์ (mol cm^{-3})

f คือ functionality of the cross-links (4 for sulfur curing system)

5. ผลการวิจัย

5.1 สมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric Properties)

ตารางที่ 1 แสดงค่า Dielectric Constant (ε_r'), Dielectric Loss Factor (ε_r'') และค่า Loss Tangent Coefficient (tan δ) และ Penetration Depth (Dp) ของยางธรรมชาติคอมเปาวด์

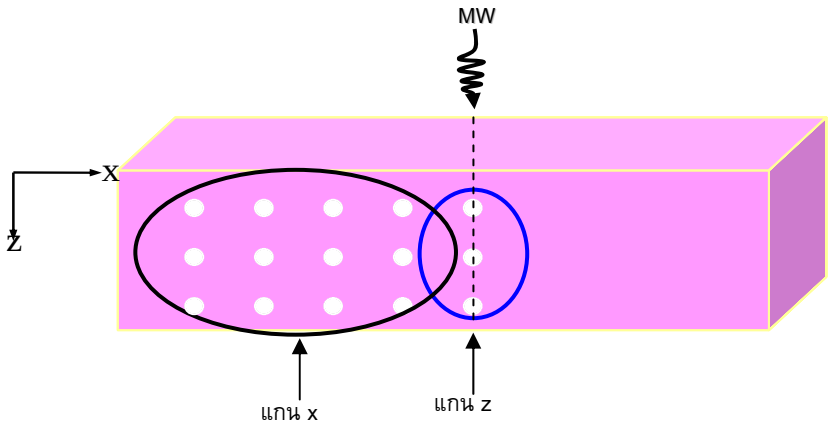
Specimens	Dielectric Constant (ε_r')	Dielectric Loss Factor (ε_r'')	Loss Tangent Coefficient (tan δ)	Penetration depth (m.)
NR-CB0	2.017	0.000009	0.000004	15.70
NR-CB10	3.533	0.0338	0.0095	0.29

หมายเหตุ

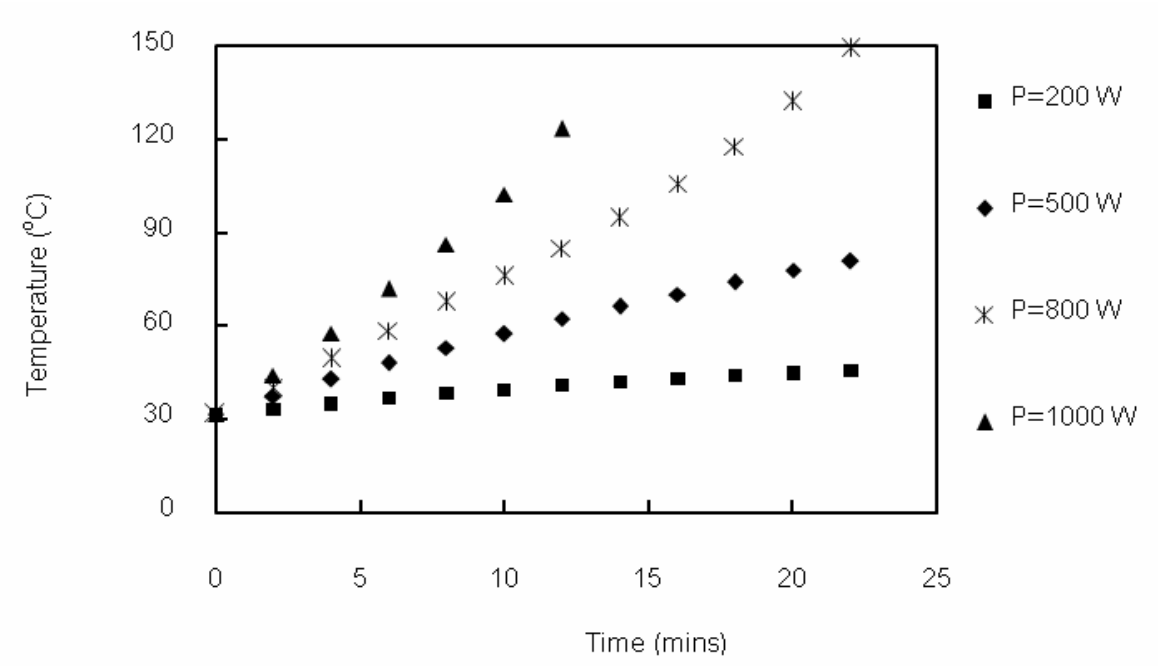
NR-CB หมายถึง สูตรยางธรรมชาติที่ผสมเขม่าดำ (CB) 0 และ 10 phr โดยใช้ปริมาณกำมะถัน (S) คงที่ 2.5 phr ชิ้นงานหนา 3 ซม.

ในกรณีที่ผสมเขม่าดำลงไปมากกว่า 30 และ 50 phr มีการนำความร้อนรวดเร็วมาก หลังจากนำไปให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟจะเกิดการไหม้อย่างรวดเร็วทำให้ตัววัดอุณหภูมิเกิดการเสียหาย ดังนั้นในงานวิจัยนี้ทำการทดลองโดยใช้สูตรของยางธรรมชาติผสมเขม่าดำที่ 10 phr

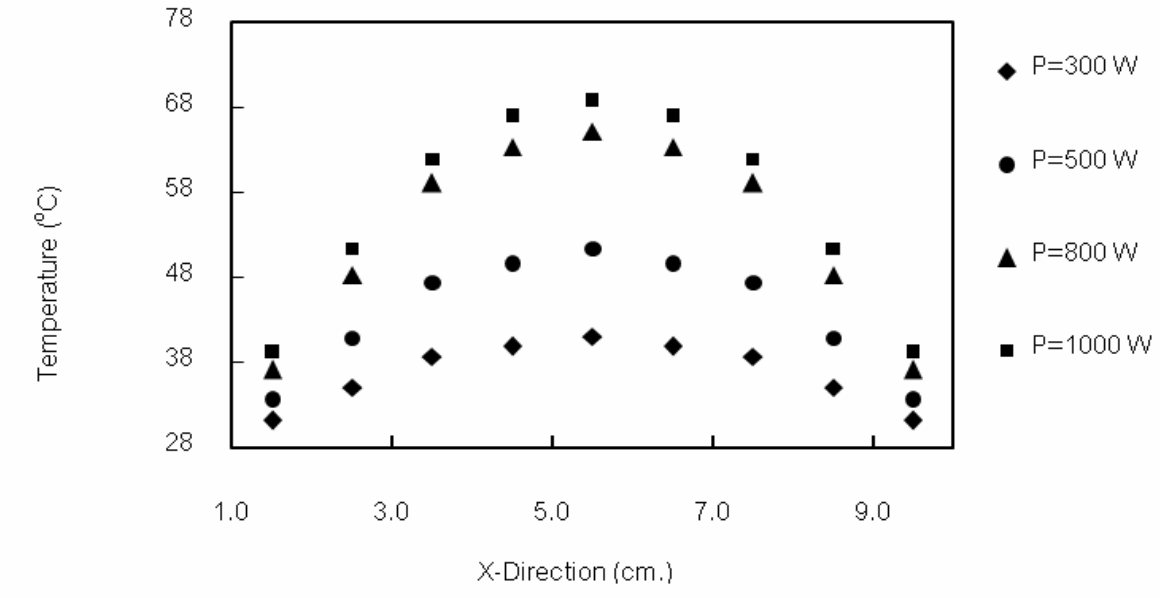
5.2 อิทธิพลกำลังไมโครเวฟต่ออุณหภูมิภายใต้ระบบการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ



รูปที่ 1 แสดงตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ความหนาตามแกน Z ต่างๆ กัน

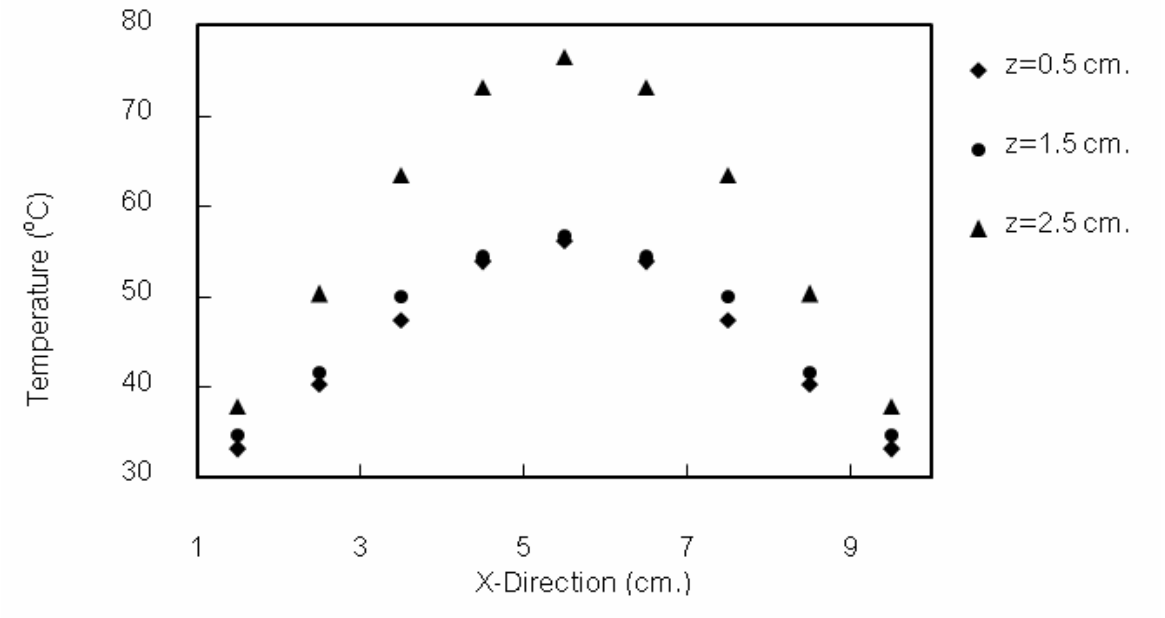


รูปที่ 2 อัตราการเพิ่มอุณหภูมิของยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่ผสมเขม่าดำ (NR-CB10) เทียบกับเวลา หลังให้ความร้อนด้วยระบบไมโครเวฟที่กำลังไมโครเวฟต่างกัน หนา 3 ซม.



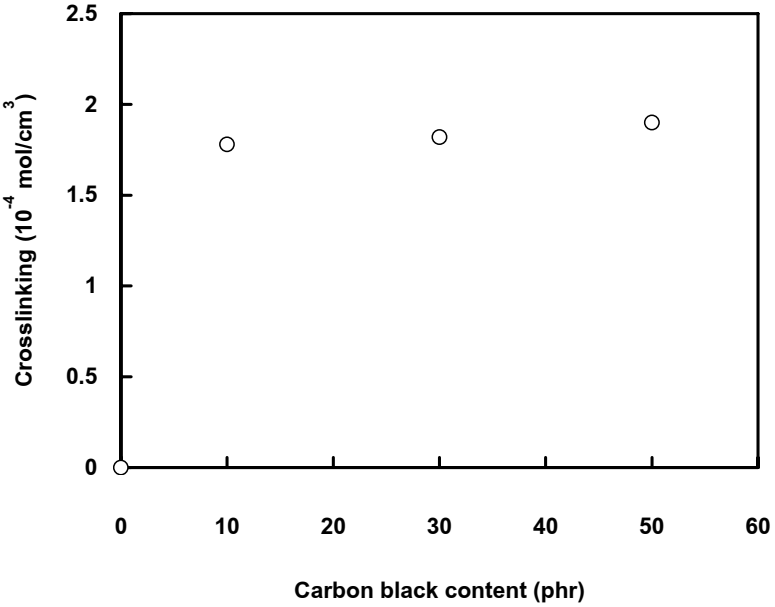
รูปที่ 3 อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิในแนวแกน x ของยางธรรมชาติคอมพาวด์ (NR-CB10) หนา 3 ซม.

5.3 การกระจายอุณหภูมิของยางธรรมชาติคอมพาวด์



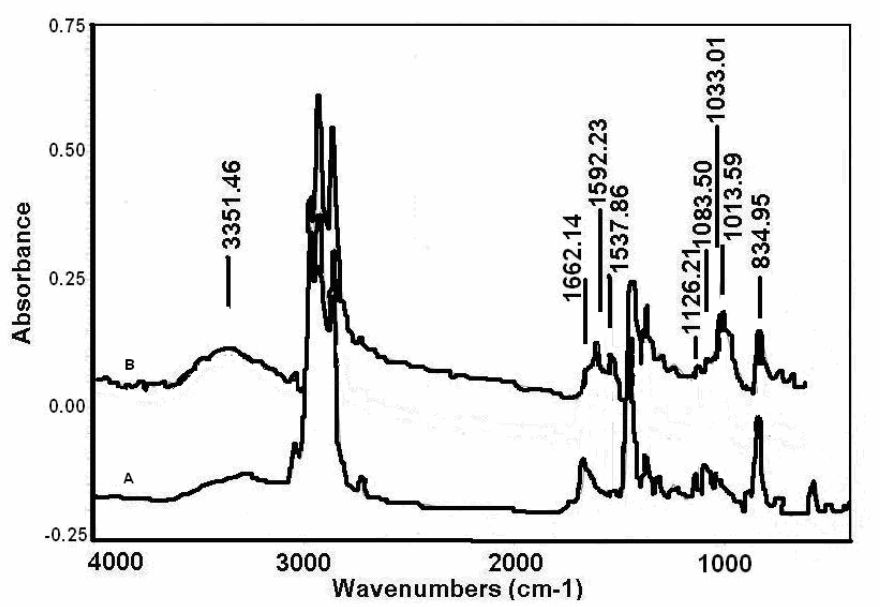
รูปที่ 4 แสดงการกระจายอุณหภูมิของยางธรรมชาติคอมพาวด์ (NR-CB10) กำลังไมโครเวฟ 1,000 วัตต์ หนา 3 ซม. ที่บริเวณต่าง ๆ กัน (วัดจากผิวด้านบน)

5.4 ค่าเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยงพันธะ (%Crosslinking)



รูปที่ 5 แสดงเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยงพันธะของยางธรรมชาติคอมเปาวด์ที่เติมเขม่าดำลงไป 0,10, 30 และ 50 phr ตามลำดับ

5.5 ลักษณะโครงสร้างทางเคมี



รูปที่ 6 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (A) NR, (B) NR-CB10 หลังให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ 1000 วัตต์

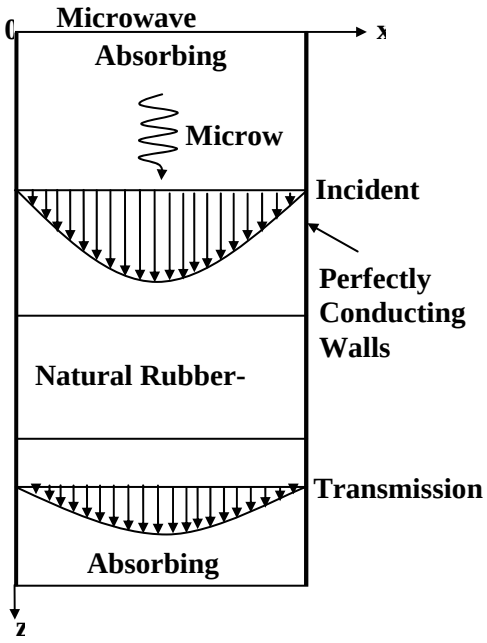
5.6 การกระจายอุณหภูมิภายในชิ้นทดสอบยางธรรมชาติคอมพาวด์

การศึกษาการอุ่น (pre-heating) ยางธรรมชาติคอมพาวด์ด้วยไมโครเวฟเชิงทฤษฎีจะเกี่ยวข้องกับผลลัพธ์ของสมการทางแม่เหล็กไฟฟ้าหรือสมการของแมกเวลล์และสมการทางการถ่ายเทความร้อน เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมไมโครเวฟควรเป็นแบบคลื่นโหมดเดียวที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ TE_{10} mode รูปที่ 7 แสดงแบบจำลอง 2 มิติซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างไมโครเวฟและวัสดุไดอิเล็กตริกสำหรับระบบการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟท่อนำคลื่นภาพทรงสี่เหลี่ยมซึ่งมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ TE_{10} mode บนระนาบ x-z

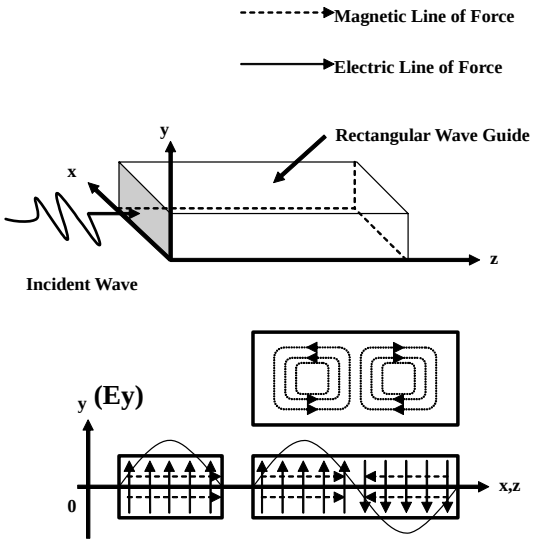
เพื่อให้สอดคล้องกับแบบจำลองโครงสร้างของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและความสัมพันธ์ระหว่างไมโครเวฟและวัสดุไดอิเล็กตริกดังรูปที่ 7 และ 8 สมมติฐานในทางทฤษฎีสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 2 มิติของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมแบบ TE_{10} mode มีดังนี้ (อ้างอิง Ratanadecho et al. [13-15])

1. ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าในทิศทางแกน y ดังนั้นสามารถวิเคราะห์แบบจำลองของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ 2 มิติภายในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมได้
2. ไม่มีการดูดซับพลังงานของไมโครเวฟโดยช่องว่างหรืออากาศภายในท่อนำคลื่น
3. ผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำยิ่งยวด

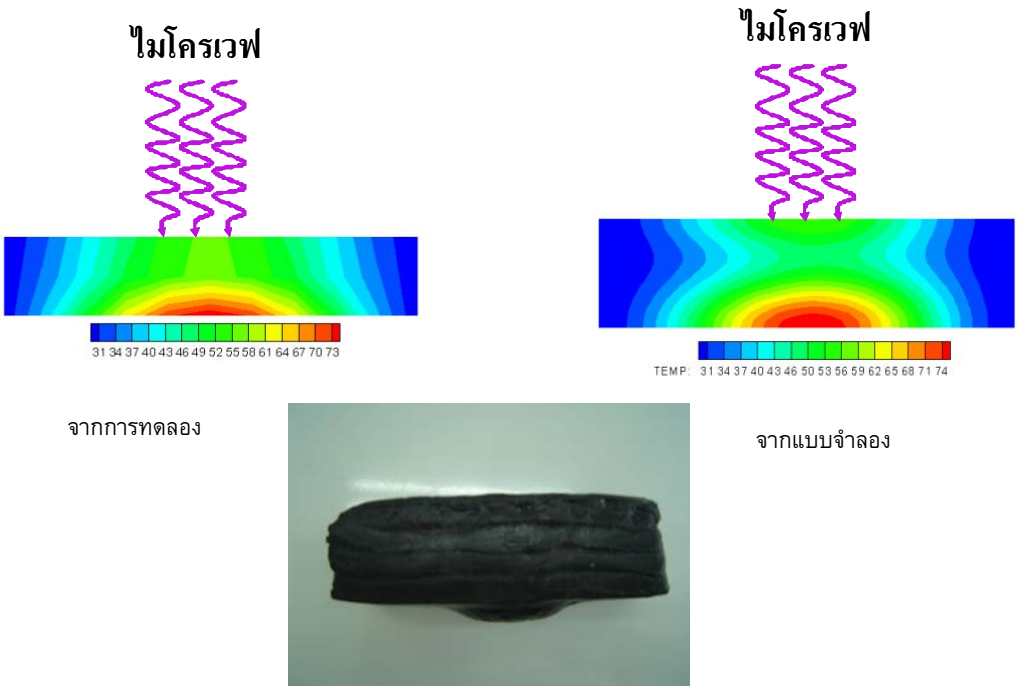
4. ไมโครเวฟไม่มีผลต่อภาชนะบรรจุชิ้นงานทดลองเนื่องจากภาชนะบรรจุทำจากโพลีโพรพิลีน (polypropylene) ซึ่งไม่ดูดซับพลังงานไมโครเวฟ



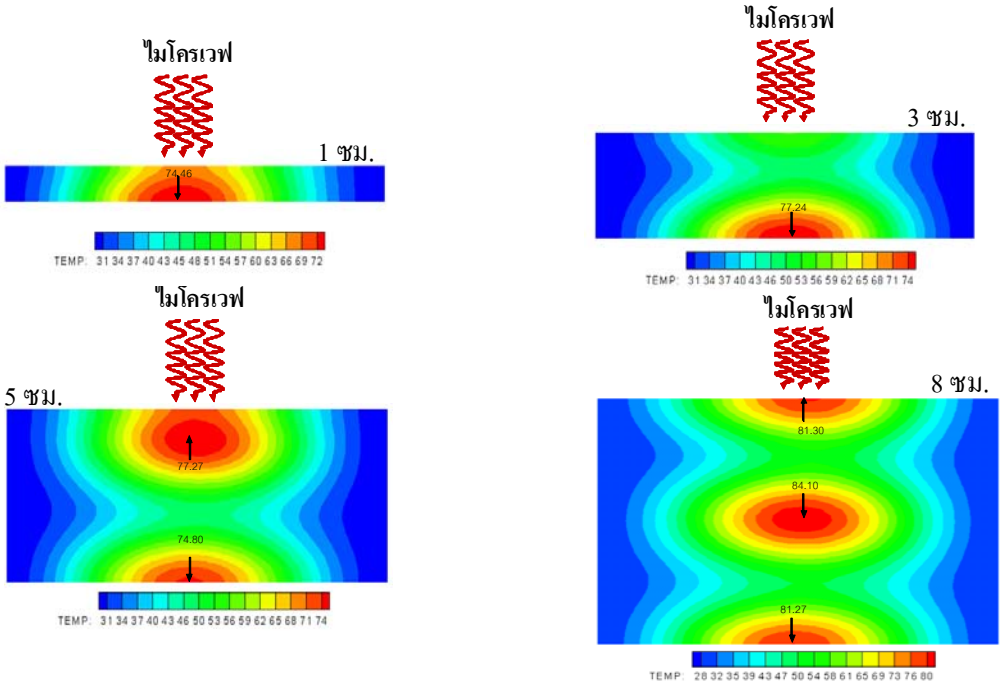
รูปที่ 7 แบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างไมโครเวฟและวัสดุไดอิเล็กตริกภายในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม



รูปที่ 8 แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม



รูปที่ 9 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิ (°C) ภายในชิ้นยางธรรมชาติคอมพาวด์ระหว่างการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ณ ช่วงเวลา 5 นาที ความถี่ 2.45 GHz หนา 3 ซม. กำลังไมโครเวฟ 1,000 วัตต์



รูปที่ 10 ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงการกระจายอุณหภูมิ (°C) ที่ความหนา 1ซม., 3 ซม., 5 ซม. และ 8 ซม. ณ ช่วงเวลา 5 นาที ความถี่ 2.45 GHz กำลังไมโครเวฟ 1,000 วัตต์

6. วิจารณ์ผล

6.1 สมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric Properties)

การศึกษาการอุ่นยางด้วยพลังงานไมโครเวฟซึ่งมีการให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง สมบัติไดอิเล็กตริคในวัสดุเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในกระบวนการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟพราะสมบัติไดอิเล็กตริคเป็นสมบัติที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟและการผลิตพลังงานความร้อนที่เกิดจากการดูดซับพลังงานไมโครเวฟ ดังนั้นการวัดค่าสัมบัติไดอิเล็กตริคในวัสดุที่ต้องการให้ความร้อนด้วยกระบวนการไมโครเวฟจึงจำเป็นอย่างยิ่ง ตารางที่ 1 แสดงค่า Dielectric constant (ε_r'), Dielectric loss factor (ε_r'') และค่า Loss tangent coefficient (tan δ) และค่า Penetration depth (m) ของตัวอย่างยางธรรมชาติคอมเปาวด์ที่ไม่ใส่เขม่าดำและยางธรรมชาติคอมเปาวด์ที่ใส่เขม่าดำ 10 phr โดยในสูตรที่มีการเปลี่ยนปริมาณเขม่าดำมากขึ้นเป็น 30 และ 50 phr นั้นไม่สามาถนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องไมโครเวฟแบบรูปทรงท่อสี่เหลี่ยมเนื่องจากมีการนำความร้อนรวดเร็วมาก ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องทดสอบ ดังนั้นการวิจัยนี้จะจำเป็นต้องให้เฉพาะยางธรรมชาติคอมเปาวด์ที่เติมด้วยเขม่าดำ 10 phr มีปริมาณกำมะถันคงที่ที่ 2.5 phr จากการทดลองพบว่าค่า ε_r' ε_r'' tan δ % และค่า Penetration depth ของยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมเขม่าดำ คือ 2.017, 9×10^{-6}, 4×10^{-6} และ 15.7 m. ตามลำดับ หลังจากเติมเขม่าดำลงไป 10 phr ส่งผลทำให้ค่า ε_r' ε_r'' และค่า tan δ % ของยางธรรมชาติเปลี่ยนไปเป็น 3.533, 3.38×10^{-2}, 9.5×10^{-3} และ 0.29 m. ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าปริมาณเขม่าดำที่เติมลงไปส่งผลทำให้เนื้อยางธรรมชาติโดยปกติจะจัดว่าเป็นวัสดุไม่มีขั้ว (non-polar materials) กลายมาเป็นวัสดุที่มีขั้วได้ (polar materials) หลังจากที่มีการเติมเขม่าดำลงไป ทำให้เกิดความร้อนขึ้นได้ ดังรายงานอื่นๆ [12-13] ทั้งนี้เนื่องจากว่าวัสดุยางดังกล่าวจะดูดซับพลังงานไมโครเวฟและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้มากขึ้น ทำให้ความลึกในการทะลุทะลวงน้อยลง สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อคลื่นไมโครเวฟทะลุผ่านวัสดุไดอิเล็กตริคจะถูกดูดซับและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน เรียกว่า การกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (Q) ซึ่งจะสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในวัสดุไดอิเล็กตริค[12] โดยค่าของการกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร เมื่อสมมุติให้ไม่มีการสูญเสียสนามแม่เหล็ก แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$Q = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r'' E^2$$

$$Q = 2\pi \cdot f \cdot \varepsilon_0 \varepsilon_r' (\tan \delta) E^2$$

ซึ่ง Q = Density of Microwave Power Absorbed (W/m^3)

E = สนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง f

f = ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ (Hz)

ω = ความเร็วเชิงมุมของคลื่นไมโครเวฟ (rad/s)

ε_0 = ความสามารถของช่องว่างที่ไม่มีการดูดซับ ส่งผ่าน และสะท้อนพลังงานจากส่วนที่เป็นสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ (Dielectric Constant)

tan δ = ε_r'' / ε_r' คือความสามารถในการแปรเปลี่ยนพลังงานที่วัสดุดูดซับเป็นพลังงานความร้อน (Dielectric Loss Tangent Coefficient)

6.2 อิทธิพลกำลังไมโครเวฟต่ออุณหภูมิภายใต้ระบบการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ

การวัดค่าความร้อนในเครื่องไมโครเวฟจะกำหนดตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 1 ตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ความหนาตามแกน Z ต่างๆ กัน จากการทดลองพบความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไมโครเวฟที่มีผลต่ออัตราการเพิ่มของอุณหภูมิแสดงในรูปที่ 2 พบว่าเมื่อเพิ่มกำลังไมโครเวฟให้กับยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่มีขนาดเท่ากัน อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิของยางธรรมชาติคอมพาวด์ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากเมื่อกำลังไมโครเวฟมากขึ้นทำให้ความเข้มของสนามไฟฟ้ามากขึ้นส่งผลทำให้การดูดซับพลังไมโครเวฟมีมากขึ้นด้วยทำให้เกิดความร้อนภายใน (Q) มากขึ้น เมื่อความร้อนมากก็จะส่งผลทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ที่กำลังไมโครเวฟ 200 วัตต์อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากสภาวะปกติเพียงเล็กน้อยเนื่องจากความร้อนที่ชิ้นงานได้รับมีน้อยและมีการถ่ายเทความร้อนภายในชิ้นงานด้วย ที่กำลังไมโครเวฟ 500, 800 และ 1,000 วัตต์ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิมีมากขึ้นตามลำดับเนื่องจากความ เข้มของสนามไฟฟ้า (E) ที่เพิ่มขึ้นทำให้ยางธรรมชาติคอมพาวด์ดูดซับพลังงานไมโครเวฟและแปลงเป็นความร้อนได้มากขึ้นตามลำดับ ในขณะที่การถ่ายเทความร้อนภายในชิ้นยางธรรมชาติคอมพาวด์ยังมีค่าเท่าเดิม (เนื่องจากปริมาตรเท่าเดิม) เช่นเดียวกับในรูปที่ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากำลังไมโครเวฟของไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิในแนวแกน x ของยางธรรมชาติคอมพาวด์เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยอุณหภูมิที่สูงที่สุดจะอยู่บริเวณตรงกลางเนื่องจากคลื่นไมโครเวฟมีความเข้มของสนามไฟฟ้ามากที่สุดบริเวณตรงกลาง นอกจากนี้คลื่นไมโครเวฟที่ใช้ก็เป็นคลื่นโหมด

6.3 การกระจายอุณหภูมิของยางธรรมชาติคอมพาวด์

เมื่อทำการอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ด้วยพลังงานไมโครเวฟ ลักษณะการกระจายอุณหภูมิทั้งในแนวแกน x และแกน z แสดงดังรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นการกระจายอุณหภูมิในแนวแกน x ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องมาจากบริเวณตรงกลางของชิ้นยางธรรมชาติคอมพาวด์ได้รับพลังงานมากที่สุด (บริเวณตรงกลางมีความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากที่สุด) ดังนั้นความร้อนจึงเกิดบริเวณตรงกลางมากที่สุดด้วยและเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นตรงกลางจึงร้อนมากที่สุด และพบว่าในแนวแกน z บริเวณที่ร้อนมากที่สุดคือบริเวณที่ห่างจากผิวด้านบน 2.5 ซม.เนื่องจากยางธรรมชาติคอมพาวด์มีค่าความลึกทะลุทะลวง (penetration depth; Dp) มากดังนั้นเมื่อชิ้นงานยางธรรมชาติคอมพาวด์ซึ่งมีความหนาน้อยกว่าค่า Dp ได้รับคลื่นไมโครเวฟ ทำให้คลื่นสามารถทะลุผ่านชิ้นงานยางธรรมชาติคอมพาวด์ได้แต่ที่บริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานยางธรรมชาติคอมพาวด์กับ

อากาศ คลื่นไมโครเวฟจะเกิดการสะท้อนกลับเข้ามาในชิ้นงานยางธรรมชาติคอมพาวด์บางส่วน ทำให้บริเวณด้านล่างของชิ้นงานยางธรรมชาติคอมพาวด์ได้รับคลื่นมากกว่าบริเวณด้านบน บริเวณนี้จึงมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณอื่น

6.4 ค่าเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยงพันธะ (%Crosslinking)

การหาเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยงพันธะในยาง กระทำได้โดยนำยางคอมเปาวด์ที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟมาละลายในสารละลายโทลูอีน จากการทดสอบยางธรรมชาติพบว่าผลการเชื่อมโยงพันธะมีค่าใกล้เคียงกันมาก ในกรณีที่เติมกำมะถัน 2.5 phr ที่ความหนา 3 cm ใช้ผ่านไมโครเวฟกำลังวัตต์ 1000 วัตต์ และเปลี่ยนปริมาณเขม่าดำจาก 0, 10, 30 และ 50 phr ดังแสดงในรูปที่ 5 จากรูปพบว่าการเปลี่ยนแปลง %Crosslinking ที่ได้จะเพิ่มจาก 0 เป็น 1.85×10^{-4} mol/cm^3 ตามลำดับ เมื่อเติมเขม่าดำลงไป 10, 30 และ 50 phr แต่ค่า %Crosslinking ที่ได้เปลี่ยนแปลงน้อยมาก ทั้งนี้มีข้อเสนอแนะจากการทดลองว่าการเพิ่มปริมาณเขม่าดำไม่มีผลต่อการเชื่อมโยงพันธะในยางธรรมชาติคอมเปาวด์

6.5 ลักษณะโครงสร้างทางเคมี

การยืนยันการเกิดการเชื่อมโยงพันธะทางเคมีเราสามารถตรวจสอบได้โดยการวัดด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy รูปที่ 6 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนความยาวคลื่นของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติคอมเปาวด์ที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ปกติโครงสร้างของยางธรรมชาติที่ยังไม่เติมสารเคมีจะมีพันธะคู่อยู่ซึ่งมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา เมื่อเติมกำมะถันเข้าไปร่วมกับการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟจึงเกิดการแตกพันธะคู่ออกกลายเป็นพันธะเดี่ยวซึ่งมีความอิ่มตัวมากกว่า เราสามารถตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีได้โดยเทคนิคอินฟราเรด ของยางธรรมชาติก่อนและหลังอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ผ่านมาข้างต้น จากสเปคตรัมพบว่าพีคที่ความยาวคลื่น 1662 และ 834 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงพันธะ C=C ของหมู่ไอโซพรีนลดลง และพบพีคใหม่เกิดขึ้นที่ 1596 และ 1033 cm^{-1} ในอินฟราเรดสเปกตราของยางคอมพาวด์ที่ผ่านพลังงานไมโครเวฟดังรายละเอียดที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แสดงว่าการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟสามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงทางพันธะได้

6.6 การกระจายอุณหภูมิภายในชิ้นทดสอบยางธรรมชาติคอมพาวด์

ในการศึกษาการอุ่น (pre-heating) ยางธรรมชาติคอมพาวด์ด้วยไมโครเวฟเชิงทฤษฎี (ให้พลังงานสูงในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ และสมมติให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะในยางธรรมชาตคอมพาวด์) โดยอ้างอิงจากระบบการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟที่เกิดคลื่นลักษณะโหมดเดียว (single mode)) ชนิดของคลื่นโหมดเดียวเป็นแบบ TE_{10} mode (transverse electric wave) และนำผลการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ตัวอย่างยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่ทำการวิเคราะห์คือยางธรรมชาติคอมพาวด์คือ NR-CB10 โดยกำหนดอุณหภูมิสภาวะแวดล้อมและอุณหภูมิ

ยางธรรมชาติคอมพาวด์ ณ เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 28 °C กำลังไมโครเวฟของไมโครเวฟที่ป้อนเข้ามีค่าเท่ากับ 1,000 วัตต์ ขนาดของยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่ใช้มีค่าความยาวเท่ากับ 11 ซม. ความสูงที่ค่าเท่ากับ 1 ซม., 3 ซม., 5 ซม. และ 8 ซม. (มีการแบ่งกริดของยางธรรมชาติคอมพาวด์บนระนาบสองมิติเป็น 111 × 11, 111 × 31, 111 × 51 และ 111 × 81 กริด) (ศึกษาอิทธิพลความหนาของวัสดุ) ความถี่ที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ 2.45 GHz

ข้อมูลป้อนเข้าบางค่าสำหรับสมบัติของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสมบัติทางกายภาพของความร้อนเพื่อใช้ในการวิเคราะห์การอุ่น (pre-heating) ยางธรรมชาติคอมพาวด์ด้วยไมโครเวฟแสดงในตารางที่ 2 โดยค่า C_p และค่า k ของยางธรรมชาติคอมพาวด์อ้างอิงมาจาก Ghoshdastidar [16]

ตารางที่ 2 ข้อมูลป้อนเข้าบางค่าสำหรับสมบัติทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสมบัติทางความร้อน

ข้อมูลป้อนเข้า	ค่า
ρ	1100 Kg/m^3
k	0.13 W/mK
C_p	2010 J/kgK
ε_r''	0.0338
ε_r'	3.533
$tan\delta$	0.0095

เมื่อ

ε_r' คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์

ε_r'' คือค่าไดอิเล็กตริกลอสเฟคเตอร์

$\tan\delta$ คือประสิทธิภาพลอสแทนเจนท์

ρ คือความหนาแน่น

C_p คือความจุความร้อน

เมื่อให้คลื่นไมโครเวฟทางด้านบนของชิ้นยางธรรมชาติคอมพาวด์ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 9 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิภายในยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่ผ่านกระบวนการอุ่นด้วยระบบไมโครเวฟ เป็นการเปรียบเทียบผลจากการทดลองกับผลจากการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแนวแกน x และ z ณ ช่วงเวลา 5 นาที ความถี่ 2.45 GHz หนา 3 ซม. กำลังไมโครเวฟ 1,000 วัตต์ พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิที่บริเวณตรงกลาง (x=5.5cm.) จะมีค่ามากที่สุด ทั้งนี้เพราะสนามไฟฟ้าภายในยางธรรมชาติคอมพาวด์บริเวณตรงกลางมีค่ามากที่สุด (เป็นผลมาจากระบบไมโครเวฟที่ใช้เป็นคลื่นแบบโหมดเดียว) ถูกดูดซับพลังงานและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนโดยยางธรรมชาติคอมพาวด์ส่งผลให้ยางธรรมชาติคอมพาวด์มีอุณหภูมิสูงที่สุดบริเวณตรงกลาง นอกจากนี้กำลังไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าการดูดซับพลังงาน

ไมโครเวฟ กล่าวคือกำลังไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าการดูดซับพลังงานไมโครเวฟ เมื่อค่าการดูดซับพลังงานไมโครเวฟเพิ่มขึ้นยางธรรมชาติคอมพาวด์ก็สามารถเปลี่ยนให้เป็นพลังงานความร้อนได้มากขึ้นเช่นกัน ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกันทั้งในการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากภาพเห็นได้ว่าลักษณะกระจายตัวของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองจะไม่มีค่าการกระจายอุณหภูมิบริเวณผิวด้านบน เนื่องจากกรรมวิธีในการวัดนั้นไม่สามารถทำได้ ต้องอาศัยผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เข้ามาช่วยแสดงให้เห็นถึงลักษณะการกระจายอุณหภูมิทั่วทั้งชิ้นงาน จะเห็นได้ว่าผลที่ได้ทั้งจากการทดลองและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีแนวโน้มใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นจึงสามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายลักษณะกระจายตัวของอุณหภูมิภายในชิ้นงานยางธรรมชาติคอมพาวด์ได้ ในส่วนของการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ไม่ดีเท่าที่ควรเนื่องจากค่าความลึกทะลุทะลวงของคลื่น (D_p) มีค่าสูงกว่าความหนาของยางธรรมชาติคอมพาวด์ คลื่นไมโครเวฟทั้งหมดจึงสามารถทะลุผ่านชิ้นงานยางธรรมชาติคอมพาวด์ไปได้ ทำให้บริเวณที่ร้อนมากที่สุดเมื่อเทียบในแนวแกน z คือบริเวณด้านล่าง เนื่องจากผลของการเกิดเรโซแนนท์ (Ratanadecho et al. [15]) ที่บริเวณด้านล่างของยางธรรมชาติคอมพาวด์ ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกันทั้งผลที่ได้ทั้งจากการทดลองและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากผลการทดลองในรูปที่ 10 แสดงอิทธิพลของความหนาพบว่าความหนาส่งผลต่อการกระจายอุณหภูมิอย่างชัดเจน ในกรณีที่ความหนายางธรรมชาติคอมพาวด์น้อย (เช่น 1 ซม. และ 3 ซม.) พบว่าการดูดกลืนพลังงานไมโครเวฟและอุณหภูมิจะมีค่าสูงบริเวณด้านล่างเนื่องจากยางธรรมชาติมีค่าความลึกทะลุทะลวงสูงมาก ในขณะที่ยางธรรมชาติคอมพาวด์มีความหนาน้อยส่งผลให้พลังงานส่วนใหญ่ส่งผ่านตัววัสดุไปและมีพลังงานบางส่วนเกิดการเรโซแนนท์ที่บริเวณผิวรอยต่อวัสดุและอากาศบริเวณด้านล่างส่งผลให้เกิดพลังงานสูงขึ้นภายในชิ้นงานยางธรรมชาติคอมพาวด์ แต่เมื่อชิ้นงานยางธรรมชาติคอมพาวด์มีความหนามากขึ้น (เช่น 5 ซม. และ 8 ซม.) พบว่าปริมาณการดูดกลืนพลังงานไมโครเวฟมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากสัดส่วนค่าความลึกทะลุทะลวงต่อความหนาของชิ้นงานยางธรรมชาติคอมพาวด์เปลี่ยนแปลงไป นอกจากนั้นการเกิดการเรโซแนนท์ของคลื่นภายในชิ้นงานยางธรรมชาติคอมพาวด์ส่งผลให้เกิดสะท้อนของคลื่นไปข้างหน้า (Forward Wave) และย้อนกลับ (Backward Wave) ภายในชิ้นงานยางธรรมชาติคอมพาวด์เช่นเดียวกัน ซึ่งส่งผลทำให้เกิดการกระจายการดูดกลืนพลังงานไมโครเวฟสม่ำเสมอ ทำให้การกระจายอุณหภูมิมีความสม่ำเสมอ แสดงให้เห็นว่าพลังงานไมโครเวฟสามารถทำความร้อนในยางธรรมชาติที่มีความหนามาก ๆ ได้ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงแนวโน้มเพิ่มเติม พบว่าเมื่อความหนามากขึ้นการกระจายอุณหภูมิจะเปลี่ยนจากบริเวณด้านล่างวัสดุมาอยู่บริเวณตรงกลาง แต่ถ้าวัสดุมีความหนามากขึ้นมาก ๆ จนเข้าใกล้หรือมากกว่าค่าความลึกทะลุทะลวง วัสดุจะมีอุณหภูมิสูงบริเวณด้านบน

7. สรุปผล

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. พลังงานไมโครเวฟสามารถนำไปประยุกต์ใช้อุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ให้เริ่มร้อนก่อนเข้าสู่กระบวนการวัลคาไนซ์ได้ โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (E) ซึ่งค่าดังกล่าวแปรผันตรงกับการเปลี่ยนแปลงกำลังไมโครเวฟที่ป้อนเข้าไป

2. พลังงานไมโครเวฟสามารถให้ความร้อนในยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่มีความหนามาก ๆ ได้และสามารถให้ความร้อนสม่ำเสมอทุก ๆ ความหนา

3. พลังงานไมโครเวฟสามารถทำให้การอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์มีปริมาณการเชื่อมโยงพันธะเกิดขึ้นด้วยโดยที่อุณหภูมิดังกล่าวยังไม่ถึงอุณหภูมิการคงรูป (cure) เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีธรรมดา ซึ่งแสดงให้เห็นว่านอกจากใช้อุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ได้แล้วยังสามารถใช้ในการทำให้ยางคงรูปได้อีกด้วย

4. ปริมาณเขม่าดำที่เติมลงไปไม่ส่งผลต่อการเกิดการเชื่อมโยงพันธะภายในโครงสร้างของยางธรรมชาติคอมพาวด์

5. การเติมเขม่าดำทำให้ยางธรรมชาติคอมพาวด์มีค่า $\tan\delta$ สูงขึ้น มีผลทำให้การเกิดความร้อนภายในหรืออุณหภูมิเพิ่มขึ้นกว่ากรณีไม่เติมเขม่าดำ

8.ข้อเสนอแนะ

1. ข้อคิดเห็นของคณะทำงานวิจัยนี้พบจากการทดลองว่าชิ้นงานที่ได้หลังจากอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ด้วยพลังงานไมโครเวฟแบบทรงสี่เหลี่ยมจะมีไม่สามารถใช้กับยางคอมเปาวด์ที่มีปริมาณเขม่าดำสูงเกิน 10 phr ซึ่งทำให้การศึกษามีข้อจำกัดแต่เราสามารถใช้ผลจากการทดลองมาคำนวณเชิงทฤษฎีได้ดีเพื่อการคาดเดา

2. จากการศึกษาการใช้ความร้อนแก่ยางธรรมชาติด้วยเครื่องไมโครเวฟชนิดทรงเหลี่ยม (Rectangular Wave Guide, Mode TE_{10}) ไม่เหมือนระบบไมโครเวฟแบบทั่วไป โดยระบบจะใช้คลื่นแบบเดี่ยว มีข้อดีคือเราสามารถควบคุมความร้อนและเวลาได้เป็นอย่างดี สามารถคำนวณเป็นสมการทางความร้อนของยางธรรมชาติได้ ดังนั้นถ้าทำการศึกษาอย่างต่อเนื่องเสริมข้อมูลให้ละเอียดครบถ้วน เสนอแนะว่าสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในอุตสาหกรรมยางที่ต้องการใช้พลังงานไมโครเวฟมาทำการอุ่นยางอีกด้วย

3. พบว่าตัวอย่างยางธรรมชาติที่ผ่านให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟมีโครงสร้างภายในที่ไม่เปลี่ยนแปลงและไม่ผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาย และอื่นๆ ของยางคอมเปาวด์ อีกทั้งการอุ่นยางด้วยพลังงานไมโครเวฟสามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงพันธะได้ $1.85\text{x}10^{-4}$ mol/cm^3 ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้นในระยะเวลาสั้น แม้ยังไม่ได้นำมาให้ความร้อนโดย compression ทางคณะทำงานวิจัยจึงมีข้อเสนอแนะถึงความเป็นไปได้ในการนำความรู้และเทคโนโลยี ด้านพลังงาน

ไมโครเวฟไปใช้ในการออกแบบเครื่องไมโครเวฟที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ตัวอย่างยางได้อย่างเหมาะสม น่าจะนำเทคโนโลยีดังกล่าวนี้มาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยางที่ทำการผลิตผลิตภัณฑ์ยางตันหรือชิ้นงานที่มีความหนามากๆ และต้องการลดระยะเวลาในการให้ความร้อนหรือทำให้ปริมาณน้ำลดลงได้เป็นอย่างดี

9. เอกสารอ้างอิง

[1] Fred W, Billmeyer, JR. *Textbook of Polymer Science*, second edition, John Wiley and Son, Inc. New York; 1971.

[2] Warner Hofmann. *Rubber Technology Handbook*, Hanser Publishers, Munich Vienna New York; Oxford University Press, New York and Canada; 1989

[3] Peter A. Ciullo and Norman Hewitt. *The Rubber Formulary*, Noyes Publications, Norwich New York, USA; 1999.

[4] Nicholas P. Cheremisinoff. *Elastomer Technology Handbook*, CRC Press, Inc. USA; 1993.

[5] Roberts AD. *Natural Rubber Science and technology*. Brickendonbury. Oxford University; 1988.

[6] ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, ดวงเดือน อาจองค์, ณัฐวุฒิ สุวรรณภูมิ, สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย และสุชนม์ ปิยโชติ "การวิเคราะห์กระบวนการให้ความร้อนในวัสดุไดอิเลคตริคโดยใช้เตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง" *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย*ครั้งที่ 18 (ME-NETT 18) จังหวัดขอนแก่น, 18-20 ตุลาคม 2547

[7] รัชดา โสภาคะยัง *การประชุมวิชกาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย* ครั้งที่ 1, 2548, ชลบุรี

[8] ณัฐพงศ์ นิธิอุทัย และดนย์ปภพ ฉั่ววิเชียร หนังสืองานวิจัยยางพาราเพื่ออนาคตที่ยั่งยืน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ปี 2549

[9] Ratanadecho, P., Influence of Irradiation Time, Particle Size and Initial Moisture Content During Microwave Drying of Multi-layered Capillary Porous Materials. *ASME J. Heat Transfer*, 2002, Vol. 124. No. 1, 151-161.

[10] L.H., Sperling, Introdution to Physical Polymer Science, 4th ed., John Wiley and Son Inc. USA.1932.

[11] Allen, T.C., Bryan, B., and James, L., Characterization of Polymer-Filler Interface in γ-Irradiated Silica-Reinforced Polysiloxane Composites. *Materials Research Society*, 1996, Vol. 629, pp. 141-145.

[12] Brandrup, J., and Immergut, E.H., Polymer handbook. 3rd ed., A WILEY-INTERSCIENCE publication. USA.1986.

[13] Ratanadecho, P., Aoki, K. and Akahori, M., Experimental Validation of a Combined Electromagnetic and Thermal Model for a Microwave Heating of Multi-layered Materials Using a Rectangular Wave Guide, ASME, *J. Heat Transfer*, 2002, Vol.124, pp. 992-996.

[14] Ratanadecho, P., Aoki, K. and Akahori, M., A Numerical and Experimental Investigation of the Modeling of Microwave Heating for Liquid Using a Rectangular Wave Guide (Effect of Natural Convection and Electrical Conductivity), *Appl. Math. Modeling*, 2002, Vol.26 (3), pp. 449-472.

[15] Ratanadecho, P., Aoki, K. and Akahori, M., The Characteristics of Microwave Melting of Frozen Packed Bed Using a Rectangular Wave Guide, *IEEE Transaction of Microwave Theory and Techniques*,2002, Vol.50 (6), pp. 1487-1494.

[16] P.S.,Ghoshdastidar, Heat transfer India: Oxford University Press, 2004, pp. 568.