

การอุ่นยางธรรมชาติด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้ระบบไมโครเวฟ ชนิดที่นำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (MODE: TE₁₀)

นพวรรณ ดุงาม¹ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช² และ วารุณี กลิ่นไกล³

Abstract

Doo-ngam, N.¹, Rattanadecho, P.¹ and Klinklai, W.²

**Microwave pre-heating of natural rubber using a rectangular wave guide
(MODE: TE₁₀)**

Songklanakar J. Sci. Technol., 2007, 29(6) : 1599-1608

This paper presents an application of microwave radiation for pre-heating of natural rubber-compounding with various sulphur contents. The natural rubber-compounding was pre-heated by microwave radiation using a rectangular wave guide system (MODE: TE₁₀) operating at frequency of 2.45 GHz in which the power can vary from 0 to 1500 W. In the present work, the influence of power input, sample thickness, and sulphur content were examined after applying microwave radiation to the rubber samples. Results are discussed regarding the thermal properties, 3-D network, dielectric properties and chemical structures. From the result, firstly, it was found that microwave radiation can be applied to pre-heating

¹Research Center of Microwave Utilization in Engineering (R.C.M.E.), Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Rungsit Campus, Klong Luang, Pathum Thani 12120, Thailand. ²Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology, Thunyaburi, Pathum Thani 12110, Thailand.

นักศึกษาลำดับต้น วศ.ม. สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ²Ph.D. (Mechanical Engineering) รองศาสตราจารย์ หน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (R.C.M.E.) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง ปทุมธานี 12120 ³Ph.D. (Material Science and Engineering) ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

Corresponding e-mail: ratphadu@engr.tu.ac.th

รับต้นฉบับ 1 พฤศจิกายน 2549 รับลงพิมพ์ 18 เมษายน 2550

natural rubber-compounding before the vulcanization process. Secondly, microwave radiation was very useful for pre-heating natural rubber-compounding that has a thickness greater than 5mm. Thirdly, cross-linking in natural rubber-compounding may occurs after pre-heating by microwave radiation though Fourier Transform Infrared Spectroscopy(FTIR). Finally, there a little effect of sulphur content on temperature profiles after applying microwave radiation to the natural rubber-compounding. Moreover, natural rubber-compounding without carbon black showed a lower heat absorption compared with natural rubber-compounding filled carbon black. This is due to the difference in dielectric loss factor. This preliminary result will be useful information in terms of microwave radiation for pre-heating natural rubber-compounding and rubber processing in industry.

Key words : microwave pre-heating, natural rubber-compounding, rectangular wave guide

บทคัดย่อ

นพวรรณ ดวงม ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช และ วรุณี กลิ่นไกล
การอุ่นยางธรรมชาติด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้ระบบไมโครเวฟชนิดท่อนำคลื่น
รูปทรงสี่เหลี่ยม (MODE: TE₁₀)
ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2550 29(6) : 1599-1608

งานวิจัยนี้นำเสนอเกี่ยวกับการนำพลังงานไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ให้ความร้อนในยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่มีปริมาณของกำมะถันต่างกันทั้งหมด 4 สูตร โดยนำยางธรรมชาติคอมพาวด์มาอุ่นให้ร้อนด้วยระบบไมโครเวฟชนิดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (MODE: TE₁₀) ทำงานที่ระดับถี่ 2.45 GHz สามารถแปรเปลี่ยนกำลังได้ตั้งแต่ 0 ถึง 1500W โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้า ขนาดความหนาชิ้นงาน และองค์ประกอบของส่วนผสมในชิ้นงาน ที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนและการเกิดโครงสร้างตาข่ายสามมิติภายในชิ้นงานทดสอบที่มีสมบัติไดอิเล็กตริก (dielectric properties) ต่างกัน (สูตรต่างกัน) รวมจนถึงโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าพลังงานไมโครเวฟสามารถอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ให้เริ่มร้อนก่อนเข้าสู่กระบวนการคงรูปที่มีความหนามาก ๆ ได้ ปัจจัยหลักที่มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคือ ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (E) และค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของยางธรรมชาติคอมพาวด์ นอกจากนี้พบว่า การอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์โดยใช้พลังงานไมโครเวฟสามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงพันธะ (cross-linked) ขึ้นด้วยแม้ว่ายังไม่ถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการคงรูปก็ตาม ปริมาณกำมะถันที่ต่างกันส่งผลน้อยมากต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของยางธรรมชาติคอมพาวด์ ยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่เติมเขม่าดำจะมีค่าความสามารถในการแปรเปลี่ยนพลังงานที่วัสดุดูดซับเป็นพลังงานความร้อน (tanδ) มากกว่าที่ไม่เติมส่งผลให้พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นมีมากกว่า ประโยชน์ขององค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยชิ้นนี้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับกระบวนการคงรูปยางธรรมชาติในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

ยางธรรมชาติมีความสำคัญต่อชีวิตประจำวันของมนุษย์ เป็นอย่างยิ่ง โดยพบอยู่ในรูปของยางรถยนต์ ยางพื้นรองเท้า ยางรัดของ ถังมือยาง ท่อยาง หรือแม้แต่ในรูปของเครื่องมือทางการแพทย์ เป็นต้น นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศ เพราะในปัจจุบันประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการผลิตและส่งออกยางธรรมชาติมากที่สุดในโลก โดยในปี 2549 ประเทศไทยส่งออกยางดิบและผลิตภัณฑ์ยางรวมมีมูลค่า 200,000 ล้านบาท (หนังสือพิมพ์

ข่าวสด ประจำวันที่ 24 มกราคม 2550) ปัจจุบันปัญหาหลักของอุตสาหกรรมยางและผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เกิดจากการขาดแคลนบุคลากรที่มีความรู้พื้นฐานทางด้านเทคโนโลยีวิทยา ทำให้ไม่มีการปรับปรุงกระบวนการผลิต รวมทั้งขาดการทำวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ เพื่อตอบสนองความต้องการของตลาดในกลุ่มเป้าหมาย (พงษ์ธร, 2547) ยางธรรมชาติจัดเป็นวัสดุในกลุ่มพอลิเมอร์ มีสมบัติเด่นเรื่องความยืดหยุ่น แต่มีจุดอ่อนเรื่องการเปลี่ยนแปลงลักษณะไปตามอุณหภูมิ

ที่ไม่สามารถใช้งานได้นานจำเป็นต้องมีการผสมกับสารต่าง ๆ และนำยางคอมพาวด์ที่ผสมได้ไปผ่านกระบวนการ (vulcanization) เพื่อปรับสมบัติให้ได้ตามความเหมาะสมกับสภาพการใช้งานของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ โดยยางที่พาวด์จะเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลเกิดโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ (3-D network) หรือที่เรียกว่า การเชื่อมโยงพันธะ (crosslink) ทำให้ยางคงรูปมีความยืดหยุ่นดีและแข็งแรง มีสมบัติเชิงกลที่เสถียรและทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนและแสงแดดได้ดียิ่งขึ้นกระบวนการคงรูปต้องอาศัยสารเคมีกลุ่มที่ทำให้ยางคงรูป (vulcanizing or curing agents) และความร้อนเพื่อทำให้คงรูปซึ่งสำหรับยางธรรมชาติจะใช้กำมะถัน (sulphur) สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ (บุญธรรม และคณะ, 2530) อย่างไรก็ตามวิธีการที่ใช้อยู่ทั่วไปส่วนใหญ่เป็นการให้ความร้อนโดยธรรมดา (conventional heating method) ซึ่งมีการสูญเสียความร้อนที่ผิวหน้าชิ้นงาน บางครั้งอาจเกิดปัญหาเกี่ยวกับงานที่มีความหนาแน่นมาก ๆ เนื่องจากชิ้นงานได้รับความร้อนทั่วถึงหรือไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้กระบวนการผลิตใช้เวลานาน อีกทั้งยังทำให้สมบัติเชิงโครงสร้างและสมบัติเชิงคุณภาพของยางเปลี่ยนแปลงไป จึงเป็นที่มาของการแสวงหาวิธีใหม่ในการขจัดปัญหาที่เกิดขึ้นในวิธีดั้งเดิม การประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟมาก็เป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูงและในทางเลือกหนึ่งสำหรับการปรับปรุงคุณภาพยางธรรมชาติหลังจากพลังงานไมโครเวฟมีข้อได้เปรียบหลายประการ กล่าวคือ มีประสิทธิภาพทางความร้อนและคุณภาพของผลิตภัณฑ์สูงเพราะเป็นการให้ความร้อนเชิงปริมาตร ใช้ระยะเวลาในการทำความร้อนสั้น พลังงานที่ใช้เป็นพลังงานสะอาด มีเขม่าไอเสีย เครื่องจักรมีขนาดเล็กและค่าการบำรุงรักษา เนื่องจากมีองค์ประกอบน้อยชิ้น เป็นต้น

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงย่านความถี่คลื่นของไมโครเวฟ (ความถี่ในช่วง 9-300 กิกะเฮิร์ต (GHz) หรือในช่วงความยาวคลื่นเท่ากับ 3-1 มม. - 0.3 มม.) มาใช้เป็นแหล่งพลังงานให้ความร้อนที่ใช้แปรรูปวัตถุต่างๆ ทางอุตสาหกรรม ยกตัวอย่างเช่นวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ (natural rubber vulcanization) การละลายเนื้อแช่แข็ง และการอบแห้ง เป็นต้น โดยเฉพาะเฉพาะของการให้ความร้อนต่อวัตถุด้วยไมโครเวฟมีอีกวิธีหนึ่งที่ที่น่าสนใจ และไม่เหมือนวิธีการให้ความร้อน

แบบเก่าที่ให้ความร้อนจากภายนอกผ่านผิววัตถุ ในระหว่างที่รังสีไมโครเวฟผ่านเข้าไปในวัตถุพลังงานของไมโครเวฟจะลดลงโดยจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนภายในวัตถุ การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟดีกว่าการให้ความร้อนแบบการนำความร้อนและพาความร้อน ซึ่งมีปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของการกระจายอุณหภูมิและความชื้นภายในผลิตภัณฑ์นั้น การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟจะอาศัยสมบัติของการดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟภายในผลิตภัณฑ์ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่นำมาผ่านกระบวนการนี้ต้องเป็นวัสดุประเภทวัสดุไดอิเล็กตริก หมายถึงวัสดุที่ฉนวนที่มีโครงสร้างพื้นฐานทางจุลภาคมีลักษณะเป็นไดโพลไฟฟ้า (electric dipoles) ซึ่งอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างไดโพลและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่งผลทำให้เกิดความร้อนภายในชิ้น (internal heat generation) ดังนั้นผลิตภัณฑ์จะกระจายความร้อนจากภายในออกสู่ผิวหน้า ซึ่งหลักการนี้จะทำให้ผิวของผลิตภัณฑ์ไม่เสียหายหรือต่างไปจากเดิมมากนัก เนื่องจากวิธีการดังกล่าวระบบนี้จะทำให้เกิดการระเหยของความชื้นภายในผลิตภัณฑ์เป็นไปอย่างรวดเร็วและมีการกระจายตัวของอุณหภูมิสม่ำเสมอ สามารถลดการเกิดรอยร้าวและรอยไหม้ในผลิตภัณฑ์ ซึ่งการใช้พลังงานจากคลื่นไมโครเวฟจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในทางอุตสาหกรรมได้หลายประเภท (Metaxas and Meredith, 1983)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการนำพลังงานไมโครเวฟมาใช้กับยางล้อรถยนต์โดยการแยกออกมาเป็นคาร์บอน (Dobozsy, 2004) การแตกพันธะเคมีของเศษยางวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Wicks et al., 2002) ใช้เตาอบไมโครเวฟกับยางรีเคลมเพื่อเป็นวัตถุดิบนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป (Anderson, 1978) หรือการนำคลื่นไมโครเวฟมาใช้ในการศึกษาสมบัติไดอิเล็กตริกของยางธรรมชาติก่อนและหลังการวัลคาไนซ์ (Bovtun et al., 2001) งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่ศึกษาคลื่นไมโครเวฟแบบมัลติโหมด (multi-mode) ซึ่งเป็นไมโครเวฟที่ใช้กันตามบ้านเรือน พลังงานไมโครเวฟสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมยางธรรมชาติได้ แต่ในประเทศไทยยังมีการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องนี้น้อยมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับอุตสาหกรรมยางธรรมชาติ อันเนื่องมาจากความซับซ้อนของกระบวนการและปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น งานวิจัยนี้นำเสนอเกี่ยวกับการใช้ระบบ

ไมโครเวฟแบบท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (Mode:TE₁₀) มาอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์เพื่อดูพฤติกรรมทางความร้อนและโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ โดยผลจากการทดลองนี้จะนำไปสู่การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีต่อไป ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมยางธรรมชาติได้ เช่น อุตสาหกรรมยางรถยนต์ ยางท่อต่างๆ และยางพองน้ำ เป็นต้น

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

1. ศึกษาสมบัติเฉพาะเชิงความร้อนของยางธรรมชาติคอมพาวด์ (Thermal characteristic)

ยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ยางธรรมชาติ (STR 20) สารวัลคาไนซ์ (sulfer) สารกระตุ้น (ZnO, stearic acid) สารตัวเติม (carbon black grade N330) และสารตัวเร่ง (MBTS, DPG) ดังแสดงอัตราส่วนการผสมของยางคอมพาวด์ใน Table 1 ขนาดความหนาของชิ้นงานมี 3 ขนาด คือ 1, 2, และ 3 ซม.

การเตรียมยางธรรมชาติคอมพาวด์เริ่มจากการบดผสมยางธรรมชาติและสารเคมีต่างๆ (แบ่งออกเป็น 2 ชุด โดยชุดแรกจะไม่ผสมเขม่าดำส่วนชุดที่สองผสมเขม่าดำด้วย) บนลูกกลิ้ง (Two Roll Mill, Lab Tech Company Ltd) ที่อุณหภูมิ 50°C เวลา 20 นาที หลังจากนั้นนำมาอัดเข้าแม่พิมพ์ (Compression Molding, Lab Tech company Ltd) ได้เป็นชิ้นงานยางธรรมชาติคอมพาวด์ ทำการวัดค่าสมบัติไดอิเล็กตริก เริ่มจากนำยางธรรมชาติคอมพาวด์จาก

Table 1 มาเตรียมให้มีความหนาประมาณ 1 ซม. เส้นผ่าศูนย์กลาง 6.5 ซม. ทำการวัด 5 จุดต่อหนึ่งชิ้นงานโดยใช้เครื่อง Network Analyzer (Figure 2) เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานเปรียบเทียบในการวิเคราะห์เชิงลึกรวมไปถึงเป็นข้อมูลป้อนเข้าสำหรับการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีด้วยเพราะสมบัติไดอิเล็กตริก เป็นสมบัติที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟและการผลิตพลังงานความร้อนที่เกิดจากการดูดซับพลังงานไมโครเวฟ บันทึกค่าที่ได้แล้วนำเรียงลำดับตัดค่าที่มากและน้อยที่สุดออก นำค่าที่เหลือมาหาค่าเฉลี่ยบันทึกเป็นค่าสมบัติไดอิเล็กตริก หลังจากนั้นนำมาหาค่า loss tangent coefficient (tan δ) ทำการเปรียบเทียบค่าสมบัติไดอิเล็กตริกที่ได้ระหว่างยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่เติมและไม่เติมเขม่าดำ ต่อจากนั้นทำการอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ด้วยไมโครเวฟ โดยใช้ระบบไมโครเวฟชนิดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (MODE: TE₁₀) ซึ่งแสดงใน Figure 2 ระบบไมโครเวฟนี้มีความถี่ใช้งานเท่ากับ 2.45 กิกะเฮิร์ต (GHz) เช่นเดียวกับเตาไมโครเวฟทั่วไป คลื่นไมโครเวฟที่อยู่ในท่อมัลักษณะเป็นคลื่นเดียว (monochromatic หรือ single-mode) สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีรูปแบบเป็น TE₁₀ mode (transverse electric wave) คลื่นไมโครเวฟดังกล่าวกำเนิดจากแมกนีตรอน (Micro Denshi Co., model UM-1500) และเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างภายในท่อนำคลื่นรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดภายในเท่ากับ 109.22 x 54.61 มม. ตามทิศทางในแนวแกน z โดยมีน้ำดูดซับคลื่นหรือพลังงานที่เคลื่อนทั้งหมดบริเวณขอบเขตด้านล่าง (lower absorbing boundary) เพื่อป้องกันการสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟ

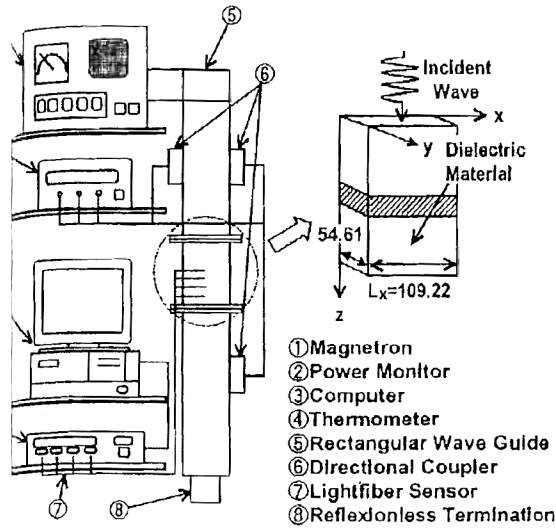
Table 1. Admixture of natural rubber-compounding (unit : phr)

Raw material	Formula 1	Formula 2	Formula 3	Formula 4
STR 20	100	100	100	100
ZnO	5.0	5.0	5.0	5.0
Stearic acid	1.0	1.0	1.0	1.0
MBTS	0.8	0.8	0.8	0.8
DPG	0.2	0.2	0.2	0.2
Sulphur	1.5	2.0	2.5	3.0
Carbon black	10	10	10	10

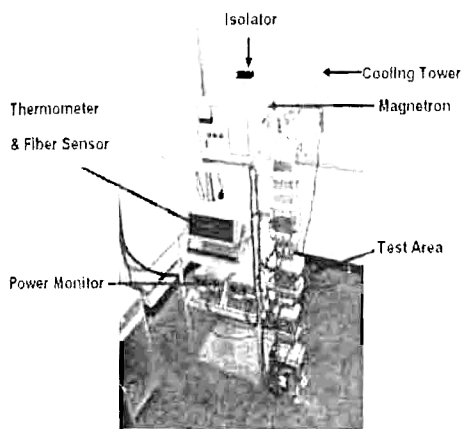
Note: phr (part per hundred part from rubber by dry weight)

MBTS (Dibenzothiazyl disulphide)

DPG (Diphenyl guanidine)



(a) Diagram of experimental facility
(Ratanadecho, P., 2002)



(b) Experimental measuring
(Micro Denshi Co., model UM-1500)

Figure 1. Microwave system

(Color figure can be viewed in the electronic version)

วัสดุทดสอบ นอกจากนั้นยังมีไอโซเลเตอร์ (isolator) ตัวตัดคลื่นไมโครเวฟที่สะท้อนจากวัสดุทดสอบบริเวณเขตด้านบน (upper absorbing boundary) เพื่อป้องกันความเสียหายของแมกนีตรอน กำลังไฟฟ้าของวงจรที่ออกจากแมกนีตรอนสามารถปรับได้ตั้งแต่ 0-1000 วัตต์ การวัดค่ากำลังไฟฟ้าคลื่นตกกระทบ คลื่นอินและคลื่นส่งผ่านของวัสดุทดสอบภายในห้องนำคลื่นทำได้โดยใช้วัตต์มิเตอร์ (Micro Denshi Co., model

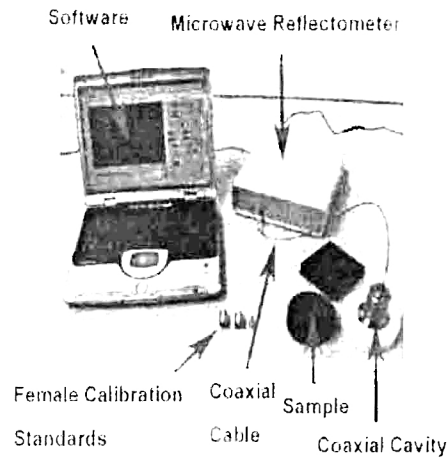


Figure 2. Network Analyzer (PUSCHNER, GERNAMY; Dielectric Measurement Kit)

(Color figure can be viewed in the electronic version)

DR-500) ในระหว่างการทดลองอุณหภูมิวัสดุทดสอบสามารถวัดได้โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ใยแก้วนำแสง (Luxtron fluoptic thermometer model 790 (ความถูกต้องอยู่ในช่วง $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$)) และค่าอุณหภูมิที่ได้จากเทอร์โมมิเตอร์ใยแก้วนำแสงจะถูกบันทึกข้อมูลลงเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยซอฟต์แวร์ที่เชื่อมต่อกับข้อมูลกับเทอร์โมมิเตอร์ทันที โดยนำยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่เตรียมไว้ (Table 1) มาเจาะรูสำหรับใส่สายเทอร์โมมิเตอร์ใยแก้วนำแสง หลังจากนั้นนำมาใส่กล่องพลาสติก (polypropylene) รูปทรงสี่เหลี่ยมใสในเครื่องไมโครเวฟ ทำการปรับกำลังไฟที่ต้องการ (1,000, 800, 500 และ 200 วัตต์ตามลำดับ) ให้เครื่องทำงานจนชิ้นงานมีอุณหภูมิประมาณ 150°C (เป็นช่วงอุณหภูมิที่นิยมใช้ในการทำยางคงรูปโดยทั่วไป) จึงปิดเครื่อง หลังจากนั้นเปรียบเทียบผลของอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในแต่ละกำลังไฟฟ้า องค์ประกอบของส่วนผสม และความหนาของยางธรรมชาติคอมพาวด์ โดยกำลังไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าอัตราการกำเนิดปริมาณความร้อนภายใน (microwave power absorbed, Q) แสดงดังสมการที่ 1 (Rattandecho, 2001)

$$Q = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r' (\tan \delta) E^2 \quad (1)$$

เมื่อ Q คือ microwave power absorbed (W/m^3)
 f คือ ความถี่ (ในงานวิจัยนี้ใช้ 2.45 GHz.)

Table 2. Dielectric properties

Raw material	Relative dielectric constant(ϵ'_r)	Dielectric loss factor (ϵ''_r)	Loss tangent coefficient ($\tan\delta$)	Penetration depth (cm.)
NR ^(a) -01 ^(c)	2.043	0.000002	0.000001	27
NR-02	2.161	0.000004	0.000002	25
NR-03	2.017	0.000009	0.000004	27
NR-04	2.272	0.000004	0.000002	24
NRC ^(b) -01	3.790	0.007	0.002	16
NRC-02	3.330	0.006	0.002	18
NRC-03	3.375	0.011	0.003	18
NRC-04	3.269	0.009	0.003	18

Note: (a) Natural rubber-compounding without carbon black

(b) Natural rubber-compounding with carbon black

(c) Amount of sulphur (phr)

ϵ_0 คือ free space permittivity (F/m)

ϵ_r^1 คือ relative permittivity (F/m)

$\tan\delta$ คือ loss tangent coefficient

E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m)

χ คือ rubber-solvent interaction parameter (0.406)

V_s คือ molar volume of toluene (106.8 cm³/mol⁻¹)

η_{swell} คือ % การบวมตัวของยางธรรมชาติคอมพาวด์ (mol cm⁻³)

2. ศึกษาโครงสร้างทางเคมี

2.1 เปรอร์เซ็นต์การเชื่อมโยง (% cross-linked)

เป็นค่าที่แสดงถึงการเกิดโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ (3D network) ซึ่งยางที่คงรูปแล้วจะมีโครงสร้างดังกล่าวเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้ โดยมีกำมะถัน (sulphur) เป็นสารเคมีที่ทำให้เกิดโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ หาได้จากการนำยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่ผ่านการอุ่นให้ร้อนด้วยไมโครเวฟแล้วมาตัดให้เป็นทรงสี่เหลี่ยมนำไปชั่งและบันทึกน้ำหนัก จากนั้นแช่ในโทลูอินปริมาตร 30 มล. ทิ้งไว้ 1 สัปดาห์ นำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้งและคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยงตามสูตรในสมการที่ 2 (Sperling, 1932; Allen et al., 2000; Hamed et al., 1989; Flory 1953) หลังจากนั้นนำมาเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยง (% cross-linked) ในยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่มีสูตร กำลังไฟฟ้า และความหนาต่างกัน

$$-\ln(1 - V_r) - V_r - \chi V_r^2 = V_s \eta_{swell} \left(V_r^{1/3} - \frac{V_r}{2} \right) \quad (2)$$

เมื่อ V_r คือ volume fraction of rubber in swollen gel

2.2 วิเคราะห์โครงสร้างของยางธรรมชาติคอมพาวด์ด้วยเครื่องฟลูเรียทรานฟอรัมอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FT-IR, Nicolet NEXUS 470)

โดยทั่วไปเทคนิคสเปกโทรสโกปีมักใช้หลักการการกระจายแสง (dispersion) ของสเปกตรัมการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงที่สนใจเป็นตัวกำหนด โดยวัดความเข้มของแสงหรือกำลังของแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ กันอย่างต่อเนื่องเทียบกับเวลาเรียกว่า time-domain spectrum หรือโดยทั่วไปเรียกว่า Fourier transform spectroscopy จากนั้น time-domain spectrum จะถูกเปลี่ยนเป็น frequency-domain spectrum ด้วย Fourier transform จากการใช้ดิจิทัลคอมพิวเตอร์ สเปกตรัมจาก Fourier transform spectroscopy ได้จากการวัดการดูดกลืนที่ความถี่ต่างๆ พร้อมกันทั้งหมด ดังนั้น Fourier transform จึงให้เกิดการวิเคราะห์ที่รวดเร็วขึ้นการแยก resolution ก็ดีขึ้น ขั้นตอนการทดสอบทำโดยการตัดชิ้นงานให้มีขนาด 1 x 2 x 0.1 ซม. ใส่ในอุปกรณ์บรรจุชิ้นงาน นำเข้าเครื่องฟลูเรียทรานฟอรัม

งารเรตสเปกโตรมิเตอร์ นำค่าที่ได้มาวิเคราะห์ผลการ
 ขนแปลงโครงสร้างเปรียบเทียบกันระหว่างยางธรรมชาติ
 ยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่อุ่นให้ร้อนด้วยไมโครเวฟแล้วที่
 ธรรมชาติคอมพาวด์ที่มีสูตร กำลังไฟฟ้า และความหนา
 กัน

ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

สมบัติเฉพาะเชิงความร้อน

ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่
 อยใช้เครื่อง Network Analyzer แสดงดัง Table 2
 จะแบ่งเป็นยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่เติมเขม่าดำและไม่
 เขม่าดำ ในส่วนที่ไม่เติมเขม่าดำพบว่าค่า $\tan \delta$ ต่ำกว่า
 ธรรมชาติคอมพาวด์ที่เติมเขม่าดำมากเนื่องจากโดยปกติ
 ยางธรรมชาติจะเป็นวัสดุประเภทไม่มีขั้ว (non-polar)
 เติมเขม่าดำลงไปยางธรรมชาติคอมพาวด์จึงส่งผลให้
 ธรรมชาติกลายเป็นวัสดุที่มีขั้ว (polar material) และมี
 ติไดอิเล็กตริกสูงขึ้นด้วย แสดงใน Table 2 ดังนั้นเพื่อ
 งธรรมชาติคอมพาวด์สามารถเกิดความร้อนได้ดีขึ้นจึง
 มีการเติมเขม่าดำลงไปก่อนนำมาทำการอุ่นภายใต้
 งานไมโครเวฟ

1.1 อิทธิพลกำลังไฟฟ้าต่ออุณหภูมิ

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่มีผลต่ออัตรา
 พิมของอุณหภูมิแสดงใน Figure 3 พบว่าเมื่อเพิ่มกำลัง
 ให้กับยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่มีขนาดเท่ากัน อัตรา

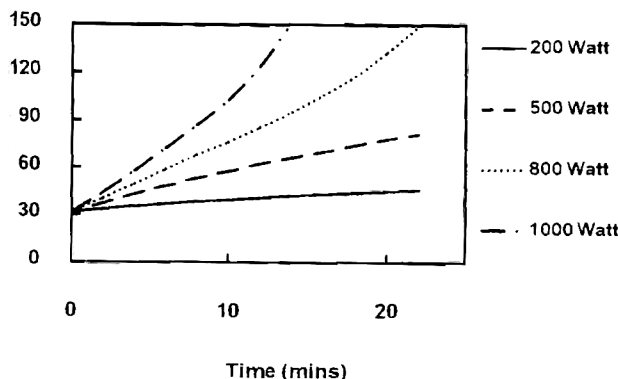
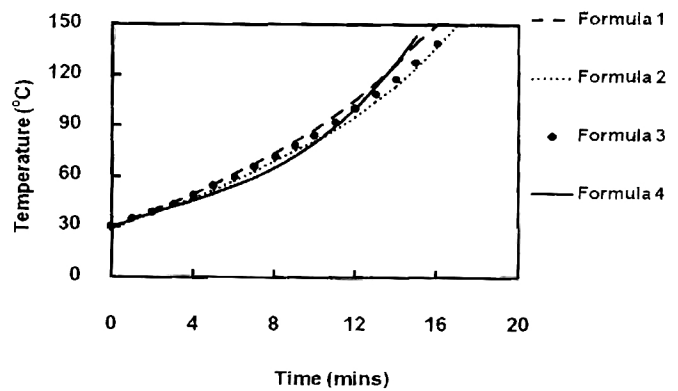
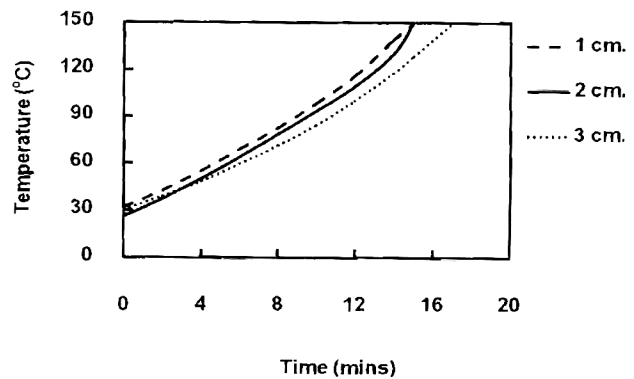


Figure 3. Characteristics of temperature rise for natural rubber-compounding with various power input values

การเพิ่มของอุณหภูมิของยางธรรมชาติคอมพาวด์ก็จะเพิ่มขึ้น
 ตามไปด้วย เนื่องจากเมื่อกำลังไฟฟ้ามากขึ้นทำให้ความเข้ม
 ของสนามไฟฟ้ามากขึ้นส่งผลทำให้การดูดซับพลังไมโครเวฟ
 มีมากขึ้นด้วยส่งผลให้เกิดความร้อนภายใน (Q) มากขึ้น เมื่อ
 ความร้อนมากก็จะส่งผลทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามไปด้วย
 (จากสมการที่ 1) ที่กำลังไฟฟ้า 200 วัตต์อุณหภูมิเพิ่มขึ้น
 จากสภาวะปกติเพียงเล็กน้อยเนื่องจากความร้อนที่ขึ้นงานได้
 รับมีน้อยและมีการถ่ายเทความร้อนภายในชิ้นงานด้วย ที่
 กำลังไฟฟ้า 500, 800 และ 1,000 วัตต์ อัตราการเพิ่ม



(a)



(b)

Figure 4. Characteristics of temperature rise for natural rubber-compounding with various formulas and thickness at power input 1,000 watt.

(a) Natural rubber-compounding with various formulas

(b) Natural rubber-compounding with various thicknesses

อุณหภูมิมีมากขึ้นตามลำดับเนื่องจากความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (E) ที่เพิ่มขึ้นทำให้ยางธรรมชาติคอมพาวด์ดูดซับพลังงานและแปลงเป็นความร้อนได้มากขึ้นตามลำดับ ในขณะที่การถ่ายเทความร้อนภายในชิ้นงานยังมีค่าเท่าเดิม (เนื่องจากปริมาตรเท่าเดิม)

Figure 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของยางธรรมชาติคอมพาวด์กับเวลา (a) แสดงอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากธรรมชาติคอมพาวด์ 4 สูตร (โดยแต่ละสูตรมีปริมาณกำมะถันต่างกัน) ที่ผ่านกระบวนการอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยยกตัวอย่างกรณีชิ้นงานหนา 3 ซม. กำลังไฟฟ้าที่ป้อน 1,000 วัตต์ จากผลการทดลองพบว่าปริมาณกำมะถันส่งผลน้อยมากต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นนอกจากความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (E) แล้ว สมบัติไดอิเล็กตริกยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการผลิตปริมาณความร้อน (ดังสมการที่ 1) จากการวัดด้วยเครื่อง network analyzer พบว่ายางธรรมชาติคอมพาวด์ทั้ง 4 สูตรที่ไม่เติมเขม่าดำมีค่า $\tan\delta$ ใกล้เคียงกันมากจึงสามารถยืนยันได้ว่าปริมาณกำมะถันที่ต่างกันส่งผลต่อสมบัติไดอิเล็กตริกและการผลิตปริมาณความร้อนน้อยมาก เมื่อพิจารณา Figure 4 (b) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของความหนาที่ต่างกันคือ 1, 2 และ 3 ซม. พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมิมีแนวโน้มใกล้เคียงกันในช่วงแรก (ประมาณ 5 นาทีแรก) หลังจากนั้นที่ 1 และ 2 ซม. เวลาที่ใช้ในการเพิ่มของอุณหภูมิมิมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนที่ 3 ซม. จะใช้เวลานานกว่าแต่ก็ไม่มากเมื่อเทียบกับการใช้เวลาแบบดั้งเดิม ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณ

พลังงานที่ชิ้นงานดูดซับแล้วแปลงเป็นพลังงานความร้อนมีค่าเท่ากัน (กำลังไฟฟ้าและสมบัติไดอิเล็กตริกเท่ากัน) แต่ต่างกันตรงปริมาตรในการถ่ายเทความร้อนเพราะชิ้นงานมีขนาดความหนาที่ต่างกัน ทำให้ชิ้นที่หนามากกว่าต้องถ่ายเทความร้อนมากกว่าด้วย

2. โครงสร้างทางเคมี

2.1 ความหนาแน่นของพันธะ (Crosslink density)

ความหนาแน่นพันธะของยางธรรมชาติขึ้นอยู่กับปริมาณกำมะถันที่เติมลงไป ปริมาณกำมะถันมากการเกิดการเชื่อมโยงก็จะมีแนวโน้มมากตามไปด้วยดังแสดงใน Figure 5 เห็นได้ว่ายางธรรมชาติคอมพาวด์สูตรที่ 1, 2 และ 3 ที่มีปริมาณกำมะถันเพิ่มขึ้นตามลำดับ การเกิดการเชื่อมโยงก็มีเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่วนยางธรรมชาติคอมพาวด์สูตรที่ 4 แม้ว่าจะมีปริมาณที่เติมลงไปมากแต่ปริมาณการเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นมีน้อยกว่าสูตรที่ 2 และ 3 นั้นอาจเนื่องมาจากการที่เติมปริมาณกำมะถันมากเกินไปทำให้เกิดการบลูม (Bloom) (บุญธรรม และคณะ, 2530) ของกำมะถันขึ้นได้ การบลูมคือ การที่มีปริมาณกำมะถันในยางคอมพาวด์มากเกินไป ทำให้กำมะถันบางส่วนแทรกตัวออกมายังบริเวณผิวของชิ้นงานยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่มีปริมาณการเชื่อมโยงพันธะมากจะมีความแข็งแรงมาก ซึ่งต่างกับเขม่าดำกล่าวคือ แม้จะเติมเขม่าดำลงไปก็ไม่ส่งผลต่อการเกิดการเชื่อมโยงพันธะของยางธรรมชาติคอมพาวด์แต่อย่างใด เนื่องจากการเกิดการเชื่อมโยงพันธะเกิดจากการที่กำมะถันไปสร้างพันธะกับยางธรรมชาติเท่านั้น ปกติโครงสร้างของยางธรรมชาติที่ยังไม่เติมสารเคมี

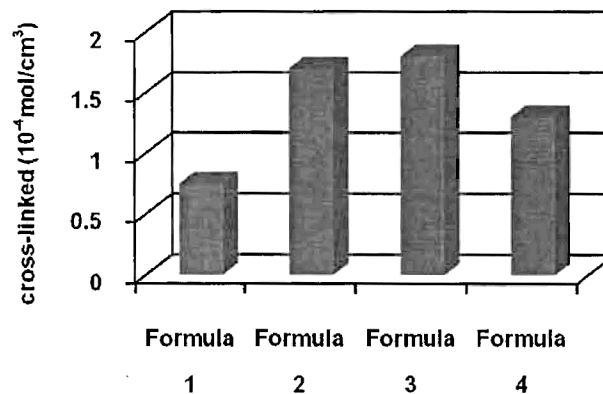


Figure 5. Cross-linked of natural rubber- compounding

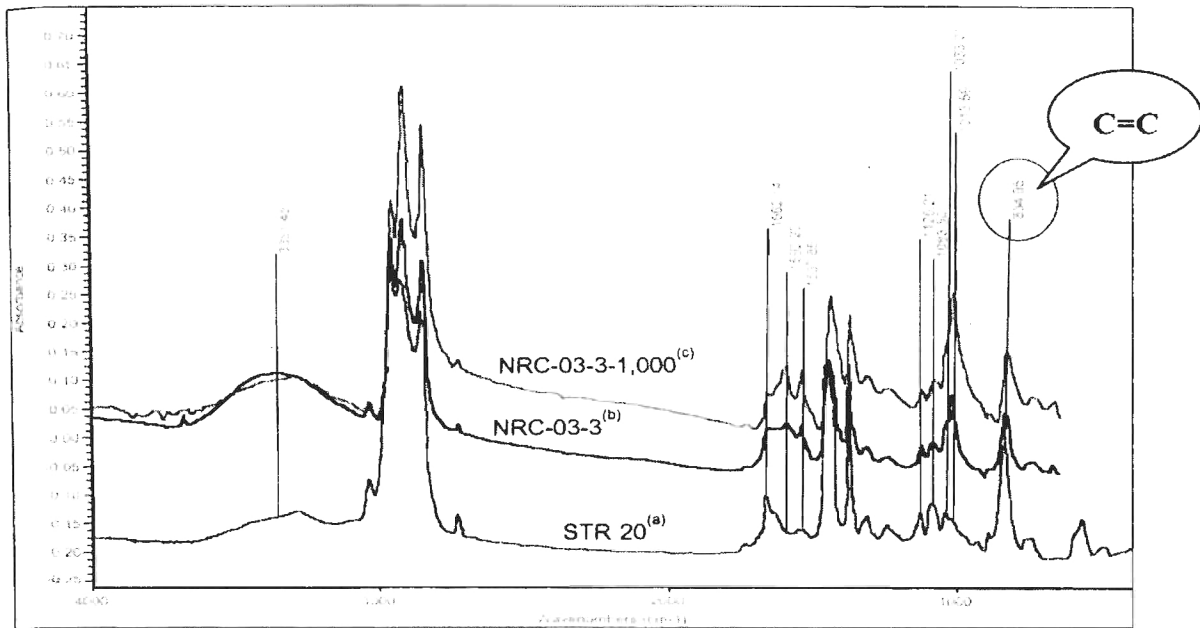


Figure 6. FTIR spectrum of (a) STR 20, (b) natural rubber- compounding under conventional heating and (c) natural rubber- compounding under microwave pre-heating

มีพันธะคู่อยู่ซึ่งมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา เมื่อเติม
มะถันเข้าไปร่วมกับการได้รับความร้อนจากพลังงาน
ไมโครเวฟซึ่งเป็นการเกิดความร้อนเชิงปริมาตร (volumetric
heat) กล่าวคือ ความร้อนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานยางธรรมชาติ
ผสมพาวด์จะเกิดขึ้นในระดับโมเลกุล เกิดจากภายในแล้ว
กระจายออกสู่ภายนอก ความร้อนที่เกิดขึ้นจึงเกิดแบบสม่ำเสมอ
การแตกพันธะคู่ออกกลายเป็นพันธะเดี่ยวเชื่อมต่อกับ
คอมพอกซ์ของกำมะถันจึงเกิดแบบสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน จึง
ให้สามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงพันธะได้ดีกว่าการให้
ความร้อนแบบเก่าซึ่งให้ความร้อนที่ผิวชิ้นงานเท่านั้น เรา
จึงตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีได้โดยเทคนิคอินฟราเรด
Figure 6 แสดง FTIR spectrum ของยางธรรมชาติ
(STR20), ยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่ให้ความร้อนแบบเก่า
และยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่อ่อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ จาก
ปฏิกิริยาเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ (STR20) พบว่าพีคที่
ถ่วงมวลคลื่น 834 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงพันธะ C=C ของหมู่
ไซพรินทั้งยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่ให้ความร้อนแบบเก่า
และยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่อ่อนด้วยพลังงานไมโครเวฟมีค่า
ลดลง แสดงว่ามีการเกิดการเชื่อมโยงทางพันธะเกิดขึ้น

ข้อเสนอแนะ

จากการทดลอง พบว่า ชิ้นงานที่ได้หลังจากอ่อนยาง
ธรรมชาติคอมพาวด์ด้วยพลังงานไมโครเวฟเกิดการบวมตัว
ทางด้านล่างที่กำลังไฟฟ้า 1,000 วัตต์ และการบวมตัวจะ
ลดลงที่กำลังไฟฟ้า 500 วัตต์ นอกจากนี้ยังเกิดฟองอากาศ
ขึ้นในชิ้นงานอีกด้วย ซึ่งจะทำการศึกษาเพื่อแก้ไขข้อจำกัด
ดังกล่าวต่อไป

สรุป

จากผลการศึกษางานวิจัยชิ้นนี้พบว่าพลังงานไมโครเวฟ
สามารถนำมาใช้อ่อนยางธรรมชาติคอมพาวด์ได้โดยสามารถ
สรุปผลได้ดังนี้

1. พลังงานไมโครเวฟสามารถนำไปประยุกต์ใช้อ่อน
ยางธรรมชาติคอมพาวด์ให้เริ่มร้อนก่อนเข้าสู่กระบวนการ
คงรูปได้ โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลง
อุณหภูมิคือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (E) ซึ่งค่าดังกล่าวแปรผัน
ตรงกับการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป

2. พลังงานไมโครเวฟสามารถให้ความร้อนในยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่มีความหนาแน่นมาก ๆ ได้ และสามารถให้ความร้อนสม่ำเสมอทุก ๆ ความหนา

3. พลังงานไมโครเวฟสามารถทำให้การอ่อนยางธรรมชาติคอมพาวด์มีปริมาณการเชื่อมโยงพันธะเกิดขึ้นด้วยโดยที่อุณหภูมิตั้งกล่าวยังไม่ถึงอุณหภูมิการคงรูป (cure) เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีธรรมดา ซึ่งแสดงให้เห็นว่านอกจากใช้อุณหภูมิของธรรมชาติคอมพาวด์ได้แล้วยังสามารถใช้ในการทำให้ยางคงรูปได้อีกด้วย

4. ปริมาณกำมะถันที่เติมเข้าไปมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนหรืออุณหภูมิที่เกิดขึ้นน้อยมาก ๆ แต่ปริมาณกำมะถันทำให้เกิดการเชื่อมโยงพันธะภายในโครงสร้างของยางธรรมชาติคอมพาวด์ ส่วนการเติมเจมาต์จะไม่ส่งผลต่อการเกิดการเชื่อมโยงพันธะภายในโครงสร้างของยางธรรมชาติคอมพาวด์

5. การเติมเจมาต์ทำให้ยางธรรมชาติคอมพาวด์มีค่าสูงขึ้น มีผลทำให้การเกิดความร้อนภายในหรืออุณหภูมิเพิ่มขึ้นกว่ากรณีไม่เติมเจมาต์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ

เอกสารอ้างอิง

บุญธรรม นิธิอุทัย พรพรรณ นิธิอุทัย และปรีชา ป้องภัย. 2530.

สารเคมีสำหรับยางและเทคนิคการออกสูตรยาง. พิมพ์ครั้งที่ 1. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.

พงษ์ธร แซ่ฮุย. 2547. ยาง ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. พิมพ์ครั้งที่ 1. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค), กรุงเทพฯ.

Allen, T.C., Bryan, B., and James, L. 2000. Characterization of Polymer-Filler Interface in -Irradiated Silica-Reinforced Polysiloxane Composites. Materials Research Society; 629: FF5.14.1-FF5.14.5.

Anderson, E. 1978. Method and apparatus for microwave heating of flowable material. United States Patent. 4,129,768

Bovtun, V., Stark, W., Kelm, J., Porokhonsky, V. and Yakimenko, Y. 2001. Microwave dielectric properties of rubber compounds undergoing vulcanization. KGK-Kautschuk und Gummi Kunststoffe 54 (12): 673-678.

Dobozy, J. 2004. Method and apparatus for recovering an elastomeric material. United States Patent. 6,722,593.

Flory, P.J. 1953. Principles of Polymer Chemistry, Cornell University Press, USA.

Hamed, G.R., Brandrup, J., Immergut, E.H. 1989. Polymer handbook, 3rded. A WILEY-INTERSCIENCE publication, USA.

Metaxas, A.C., and Meridith, R.J. 1983. Industrial Microwave Heating. Peter Peregrinus, Ltd., London.

Ratanadecho, P. 2001. A Numerical and Experimental Investigation of The Modelling of Microwave Melting of Frozen Packed Beds Using A Rectangular Wave Guide. Int. Comm. Heat Mass Transfer. 23(6): 751-762.

Ratanadecho, P. 2002. Influence of irradiation time, particle sizes and initial moisture content during microwave drying of multi-layered capillary porous materials. J. ASME. Heat Transfer. 124(1): 151-161.

Sperling, L.H. 1932. Introduction to Physical Polymer Science, 4thed. John Wiley and Son Inc, USA.

Wicks, G.G., Schulz, R.L., Clark, D.E., and Folz, D.C. 2002. Microwave treatment of vulcanized rubber. United States Patent. 6,420,457.