

# การอุ่นยางธรรมชาติด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้ระบบไมโครเวฟชนิดที่นำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (MODE: $TE_{10}$ )

นพวรรณ ดงาม<sup>1</sup> ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช<sup>2</sup> และ วารุณี กลิ่นไกล<sup>3</sup>

## Abstract

Doo-ngam, N.<sup>1</sup>, Rattanadecho, P.<sup>1</sup> and Klinklai, W.<sup>2</sup>

**Microwave pre-heating of natural rubber using a rectangular wave guide (MODE:  $TE_{10}$ )**

Songklanakarin 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:  $TE_{10}$ ) 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

<sup>1</sup>Research 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. <sup>2</sup>Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology, Thunyaburi, Pathum Thani 12110, Thailand.

<sup>1</sup>นักศึกษาหลักสูตร วศ.ม. สาขาวิศวกรรมเครื่องกล <sup>2</sup>Ph.D. (Mechanical Engineering) รองศาสตราจารย์ หน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (R.C.M.E.) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง ปทุมธานี 12120 <sup>3</sup>Ph.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 occur after pre-heating by microwave radiation though Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Finally, there is 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 ดูงาม ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช และ วารุณี กลิ่นไกล  
การอุ่นยางธรรมชาติด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้ระบบไมโครเวฟชนิดท่อนำคลื่น  
รูปทรงสี่เหลี่ยม (MODE: TE<sub>10</sub>)

ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2550 29(6) : 1599-1608

งานวิจัยนี้นำเสนอเกี่ยวกับการนำพลังงานไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ให้ความร้อนในยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่มีปริมาณของกำมะถันต่างกันทั้งหมด 4 สูตร โดยนำยางธรรมชาติคอมพาวด์มาอุ่นให้ร้อนด้วยระบบไมโครเวฟชนิดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (MODE: TE<sub>10</sub>) ทำงานที่ระดับถี่ 2.45 GHz สามารถแปรเปลี่ยนกำลังได้ตั้งแต่ 0 ถึง 1500W โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้า ขนาดความหนาชิ้นงาน และองค์ประกอบของส่วนผสมในชิ้นงาน ที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนและการเกิดโครงสร้างตาข่ายสามมิติภายในชิ้นงานทดสอบที่มีสมบัติไดอิเล็กตริก (dielectric properties) ต่างกัน (สูตรต่างกัน) รวมจนถึงโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าพลังงานไมโครเวฟสามารถใช้อุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ให้เริ่มร้อนก่อนเข้าสู่กระบวนการคงรูปที่มีความหนาต่าง ๆ ได้ ปัจจัยหลักที่มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคือ ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (E) และค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของยางธรรมชาติคอมพาวด์ นอกจากนี้พบว่า การอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์โดยใช้พลังงานไมโครเวฟสามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงพันธะ (cross-linked) ขึ้นด้วยแม้ว่ายังไม่ถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการคงรูปก็ตาม ปริมาณกำมะถันที่ต่างกันส่งผลน้อยมากต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของยางธรรมชาติคอมพาวด์ ยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่เติมเขม่าดำจะมีความสามารถในการแปรเปลี่ยนพลังงานที่วัสดุดูดซับเป็นพลังงานความร้อน (tanδ) มากกว่าที่ไม่เติมส่งผลให้พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นมีมากกว่า ประโยชน์ขององค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยชิ้นนี้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับกระบวนการคงรูปยางธรรมชาติในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

ยางธรรมชาติมีความสำคัญต่อชีวิตประจำวันของมนุษย์เป็นอย่างยิ่ง โดยพบอยู่ในรูปของยางรถยนต์ ยางพื้นรองเท้า ยางรัดของ ลูกมือยาง ท่อยาง หรือแม้แต่ในรูปของเครื่องมือทางการแพทย์ เป็นต้น นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศ เพราะในปัจจุบันประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการผลิตและส่งออกยางธรรมชาติมากที่สุดในโลก โดยในปี 2549 ประเทศไทยส่งออกยางดิบและผลิตภัณฑ์ยางรวมมีมูลค่า 200,000 ล้านบาท (หนังสือพิมพ์

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

ทำให้ไม่สามารถใช้งานได้นานจำเป็นต้องมีการผสมกับสารเคมีต่างๆ และนำยางคอมพาวด์ที่ผสมได้ไปผ่านกระบวนการคงรูป (vulcanization) เพื่อปรับสมบัติให้ได้ตามความเหมาะสมกับสภาพการใช้งานของผลิตภัณฑ์นั้นๆ โดยยางคอมพาวด์จะเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลเกิดเป็นโครงข่ายตาข่าย 3 มิติ (3-D network) หรือที่เรียกว่าเกิดการเชื่อมโยงพันธะ (crosslink) ทำให้ยางคงรูปมีความยืดหยุ่นดีและแข็งแรง มีสมบัติเชิงกลที่เสถียรและทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนและแสงแดดได้ดียิ่งขึ้น กระบวนการคงรูปต้องอาศัยสารเคมีกลุ่มที่ทำให้ยางคงรูป (vulcanizing or curing agents) และความร้อนเพื่อทำให้สารคงรูปซึ่งสำหรับยางธรรมชาติจะใช้กำมะถัน (sulphur) สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ (บุญธรรม และคณะ, 2530) อย่างไรก็ตามวิธีการที่ใช้อยู่ทั่วไปส่วนใหญ่เป็นการให้ความร้อนโดยวิธีธรรมดา (conventional heating method) ซึ่งมีการป้อนความร้อนที่ผิวหน้าชิ้นงาน บางครั้งอาจเกิดปัญหาที่ชิ้นงานที่มีความหนามากๆ เนื่องจากชิ้นงานได้รับความร้อนไม่ทั่วถึงหรือไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้กระบวนการผลิตใช้เวลานาน อีกทั้งยังทำให้สมบัติเชิงโครงสร้างและสมบัติเชิงคุณภาพของยางเปลี่ยนแปลงไป จึงเป็นที่มาของการแสวงหาวิธีใหม่ในการขจัดปัญหาที่เกิดขึ้นในวิธีดั้งเดิม การประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟมาก็เป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูงและเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการปรับปรุงคุณภาพยางธรรมชาติ เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟมีข้อได้เปรียบหลายประการ กล่าวคือ มีประสิทธิภาพทางความร้อนและคุณภาพของผลิตภัณฑ์สูงเพราะเป็นการให้ความร้อนเชิงปริมาตร ใช้ระยะเวลาในการทำความร้อนสั้น พลังงานที่ใช้เป็นพลังงานสะอาด ไม่มีเขม่าไอเสีย เครื่องจักรมีขนาดเล็กและค่าการบำรุงรักษาต่ำ เนื่องจากมีองค์ประกอบน้อยชิ้น เป็นต้น

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงย่านความถี่คลื่นของไมโครเวฟ (ความถี่ในช่วง 0.3-300 กิกะเฮิร์ต (GHz) หรือในช่วงความยาวคลื่นเท่ากับ 30 ซม. - 0.3 มม.) มาใช้เป็นแหล่งพลังงานให้ความร้อนเพื่อใช้แปรรูปวัตถุดิบต่างๆ ทางอุตสาหกรรม ยกตัวอย่างเช่น การวัลคาไนซยางธรรมชาติ (natural rubber vulcanization) การละลายเนื้อแข็ง และการอบแห้ง เป็นต้น โดยลักษณะเฉพาะของการให้ความร้อนต่อวัตถุดิบด้วยไมโครเวฟเป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ และไม่เหมือนวิธีการให้ความร้อน

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

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

ไมโครเวฟแบบท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (Mode:TE<sub>10</sub>) มาอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์เพื่อดูพฤติกรรมทางความร้อนและโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ โดยผลจากการทดลองนี้จะนำไปสู่การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีต่อไป ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมยางธรรมชาติได้ เช่น อุตสาหกรรมยางรถยนต์ ยางท่อต่างๆ และยางพองน้ำ เป็นต้น

### วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

#### 1. ศึกษาสมบัติเฉพาะเชิงความร้อนของยางธรรมชาติคอมพาวด์ (Thermal characteristic)

ยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ยางธรรมชาติ (STR 20) สารวัลคาไนซ์ (sulfur) 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 มาเตรียมให้มีขนาดความหนาประมาณ 1 ซม. เส้นผ่าศูนย์กลาง 6.5 ซม. ทำการวัด 5 จุดต่อหนึ่งชิ้นงานโดยใช้เครื่อง Network Analyzer (Figure 2) เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานเปรียบเทียบในการวิเคราะห์เชิงลึกรวมไปถึงเป็นข้อมูลป้อนเข้าสำหรับการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีด้วยเพราะสมบัติไดอิเล็กตริก เป็นสมบัติที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟและการผลิตพลังงานความร้อนที่เกิดจากการดูดซับพลังงานไมโครเวฟ บันทึกค่าที่ได้แล้วนำเรียงลำดับตัดค่าที่มากและน้อยที่สุดออก นำค่าที่เหลือมาหาค่าเฉลี่ยบันทึกเป็นค่าสมบัติไดอิเล็กตริก หลังจากนั้นนำมาหาค่า loss tangent coefficient (tan $\delta$ ) ทำการเปรียบเทียบค่าสมบัติไดอิเล็กตริกที่ได้ระหว่างยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่เติมและไม่เติมเขม่าดำ ต่อจากนั้นทำการอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ด้วยไมโครเวฟ โดยใช้ระบบไมโครเวฟชนิดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (MODE: TE<sub>10</sub>) ซึ่งแสดงใน Figure 2 ระบบไมโครเวฟนี้มีความถี่ใช้งานเท่ากับ 2.45 กิกะเฮิร์ต (GHz) เช่นเดียวกับเตาไมโครเวฟทั่วไป คลื่นไมโครเวฟที่อยู่ในท่อนำคลื่นจะเป็นคลื่นเดี่ยว (monochromatic หรือ single-mode) สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีรูปแบบเป็น TE<sub>10</sub> mode (transverse electric wave) คลื่นไมโครเวฟดังกล่าวกำเนิดจากแมกนีตรอน (Micro Denshi Co., model UM-1500) และเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างภายในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดภายในเท่ากับ 109.22 x 54.61 มม. ตามทิศทางในแนวแกน z โดยมีน้ำดูดซับคลื่นหรือพลังงานที่เหลือน้อยทั้งหมดบริเวณขอบเขตด้านล่าง (lower absorbing boundary) เพื่อป้องกันการสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟ

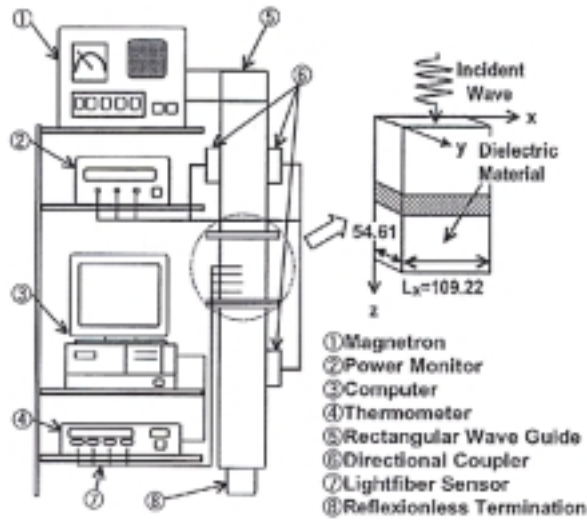
**Table 1. Admixture of natural rubber-compounding (unit : phr)**

| 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        |

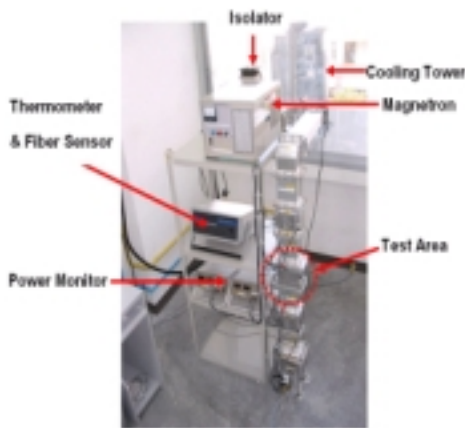
Note: phr (part per hundred part from rubber by dry weight)

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)

ไปสู่วัสดุทดสอบ นอกจากนั้นยังมีไอโซเลเตอร์ (isolator) เป็นตัวตัดคลื่นไมโครเวฟที่สะท้อนจากวัสดุทดสอบบริเวณขอบเขตด้านบน (upper absorbing boundary) เพื่อป้องกันความเสียหายของแมกนีตรอน กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟที่ออกจากแมกนีตรอนสามารถปรับได้ตั้งแต่ 0-1,500 วัตต์ การวัดค่ากำลังไฟฟ้าคลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อนและคลื่นส่งผ่านของวัสดุทดสอบภายในห้องนำคลื่นสามารถวัดได้โดยวัตต์มิเตอร์ (Micro Denshi Co., model

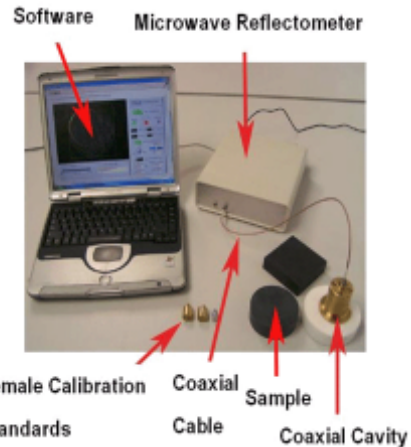


Figure 2. Network Analyzer (PUSCHNER, GERNAMEY; Dielectric Measurement Kit)

(Color figure can be viewed in the electronic version)

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

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

เมื่อ Q คือ microwave power absorbed ( $\text{W/m}^3$ )  
f คือ ความถี่ (ในงานวิจัยนี้ใช้ 2.45 GHz.)

Table 2. Dielectric properties

| Raw material                         | Relative dielectric constant( $\epsilon'_r$ ) | Dielectric loss factor ( $\epsilon''_r$ ) | Loss tangent coefficient ( $\tan\delta$ ) | Penetration depth (cm.) |
|--------------------------------------|---|---|---|-------------------------|
| NR <sup>(a)</sup> -01 <sup>(c)</sup> | 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 <sup>(b)</sup> -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)

$\epsilon_0$  คือ free space permittivity (F/m)

$\epsilon_r^1$  คือ relative permittivity (F/m)

$\tan\delta$  คือ loss tangent coefficient

$E$  คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m)

$\chi$  คือ rubber-solvent interaction parameter (0.406)

$V_s$  คือ molar volume of toluene (106.8 cm<sup>3</sup>/mol<sup>-1</sup>)

$\eta_{swell}$  คือ % การบวมตัวของยางธรรมชาติคอมพาวด์ (mol cm<sup>-3</sup>)

## 2. ศึกษาโครงสร้างทางเคมี

### 2.1 เพลอร์เซนต์การเชื่อมโยย (% cross-linked)

เป็นค่าที่แสดงถึงการเกิดโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ (3D network) ซึ่งยางที่คงรูปแล้วจะมีโครงสร้างดังกล่าวเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้ โดยมีกำมะถัน (sulphur) เป็นสารเคมีที่ทำให้เกิดโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ หาได้จากการนำยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่ผ่านการอุ่นให้ร้อนด้วยไมโครเวฟแล้วมาตัดให้เป็นทรงสี่เหลี่ยมนำไปชั่งและบันทึกน้ำหนัก จากนั้นแช่ในโทลูอินปริมาตร 30 มล. ทิ้งไว้ 1 สัปดาห์ นำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้งและคำนวณหาค่าเพลอร์เซนต์การเชื่อมโยยตามสูตรในสมการที่ 2 (Sperling, 1932; Allen et al., 2000; Hamed et al., 1989; Flory 1953) หลังจากนั้นนำมาเปรียบเทียบค่าเพลอร์เซนต์การเชื่อมโยย (% 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

อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ นำค่าที่ได้มาวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเปรียบเทียบกันระหว่างยางธรรมชาติและยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่อุ่นให้ร้อนด้วยไมโครเวฟแล้วที่ยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่มีสูตร กำลังไฟฟ้า และความหนาต่างกัน

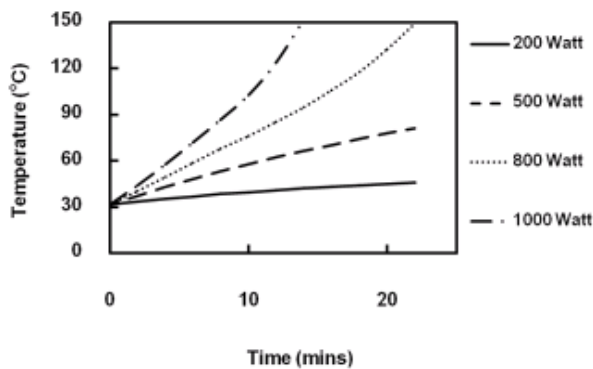
**ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล**

**1. สมบัติเฉพาะเชิงความร้อน**

ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่วัดโดยใช้เครื่อง Network Analyzer แสดงดัง Table 2 โดยจะแบ่งเป็นยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่เติมเขม่าดำและไม่เติมเขม่าดำ ในส่วนที่ไม่เติมเขม่าดำพบว่าค่า  $\tan \delta$  ต่ำกว่ายางธรรมชาติคอมพาวด์ที่เติมเขม่าดำมากเนื่องจากโดยปกติแล้วยางธรรมชาติจะเป็นวัสดุประเภทไม่มีขั้ว (non-polar) เมื่อเติมเขม่าดำลงไปยางธรรมชาติคอมพาวด์จึงส่งผลให้ยางธรรมชาติกลายเป็นวัสดุที่มีขั้ว (polar material) และมีสมบัติไดอิเล็กตริกสูงขึ้นด้วย แสดงใน Table 2 ดังนั้นเพื่อให้ยางธรรมชาติคอมพาวด์สามารถเกิดความร้อนได้ดีขึ้นจึงต้องมีการเติมเขม่าดำลงไปก่อนนำมาทำการอุ่นภายใต้พลังงานไมโครเวฟ

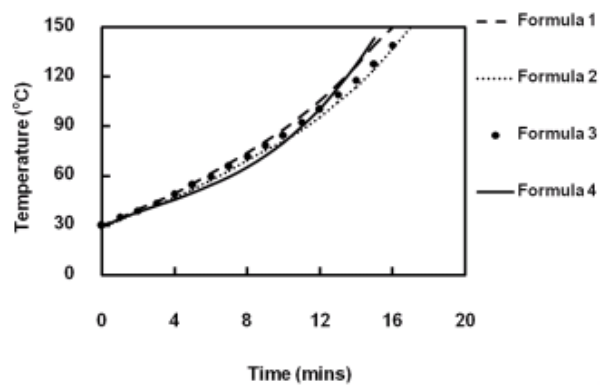
**1.1 อิทธิพลกำลังไฟฟ้าต่ออุณหภูมิ**

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่มีผลต่ออัตราการเพิ่มของอุณหภูมิแสดงใน Figure 3 พบว่าเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าให้กับยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่มีขนาดเท่ากัน อัตรา

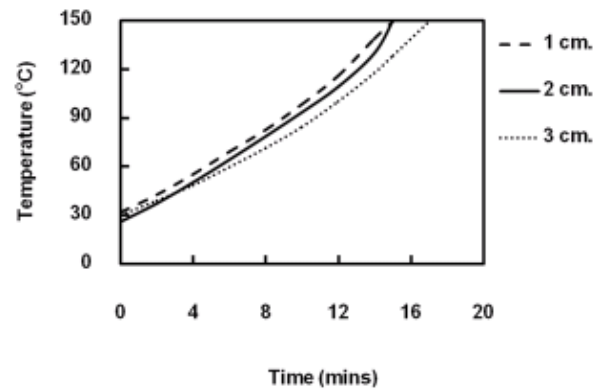


**Figure 3. Characteristics of temperature rise for natural rubber-compounding with various power input values**

การเพิ่มของอุณหภูมิของยางธรรมชาติคอมพาวด์ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากเมื่อกำลังไฟฟ้ามากขึ้นทำให้ความเข้มของสนามไฟฟ้ามากขึ้นส่งผลทำให้การดูดซับพลังไมโครเวฟมีมากขึ้นด้วยส่งผลให้เกิดความร้อนภายใน (Q) มากขึ้น เมื่อความร้อนมากก็จะส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (จากสมการที่ 1) ที่กำลังไฟฟ้า 200 วัตต์อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากสภาวะปกติเพียงเล็กน้อยเนื่องจากความร้อนที่ขึ้นงานได้รับมีน้อยและมีการถ่ายเทความร้อนภายในชิ้นงานด้วย ที่กำลังไฟฟ้า 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) แสดงอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมียางธรรมชาติคอมพาวด์ 4 สูตร (โดยแต่ละสูตรมีปริมาณกำมะถันต่างกัน) ที่ผ่านกระบวนการอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยยกตัวอย่างกรณีชิ้นงานหนา 3 ซม. กำลังไฟฟ้าที่ป้อน 1,000 วัตต์ จากผลการทดลองพบว่าปริมาณกำมะถันส่งผลน้อยมากต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นนอกจากความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ( $E$ ) แล้วสมบัติไดอิเล็กตริกยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการผลิตปริมาณความร้อน (ดังสมการที่ 1) จากการวัดด้วยเครื่อง network analyzer พบว่ายางธรรมชาติคอมพาวด์ทั้ง 4 สูตรที่ไม่เติมเขม่าดำมีค่า  $\tan\delta$  ใกล้เคียงกันมากจึงสามารถยืนยันได้ว่าปริมาณกำมะถันที่ต่างกันส่งผลต่อสมบัติไดอิเล็กตริกและการผลิตปริมาณความร้อนน้อยมาก เมื่อพิจารณา Figure 4 (b) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของความหนาที่ต่างกันคือ 1, 2 และ 3 ซม. พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมิแนวโน้มใกล้เคียงกันในช่วงแรก (ประมาณ 5 นาทีแรก) หลังจากนั้นที่ 1 และ 2 ซม. เวลาที่ใช้ในการเพิ่มของอุณหภูมิมิค่าใกล้เคียงกัน ส่วนที่ 3 ซม. จะใช้เวลานานกว่าแต่ก็ไม่มากเมื่อเทียบกับการใช้เวลาแบบดั้งเดิม ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณ

พลังงานที่ชิ้นงานดูดซับแล้วแปลงเป็นพลังงานความร้อนมีค่าเท่ากัน (กำลังไฟฟ้าและสมบัติไดอิเล็กตริกเท่ากัน) แต่ต่างกันตรงปริมาณในการถ่ายเทความร้อนเพราะชิ้นงานมีขนาดความหนาที่ต่างกัน 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 แม้จะเติมเขม่าดำลงไปก็ไม่ส่งผลต่อการเกิดการเชื่อมโยงพันธะของยางธรรมชาติคอมพาวด์แต่อย่างไร เนื่องจากการเกิดการเชื่อมโยงพันธะเกิดจากการที่กำมะถันไปสร้างพันธะกับยางธรรมชาติเท่านั้น ปกติโครงสร้างของยางธรรมชาติที่ยังไม่เติมสารเคมี

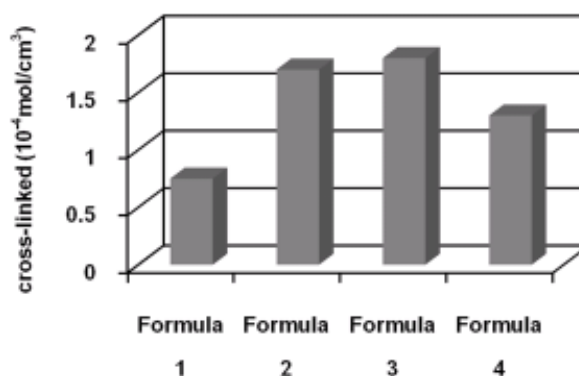


Figure 5. Cross-linked of natural rubber- compounding



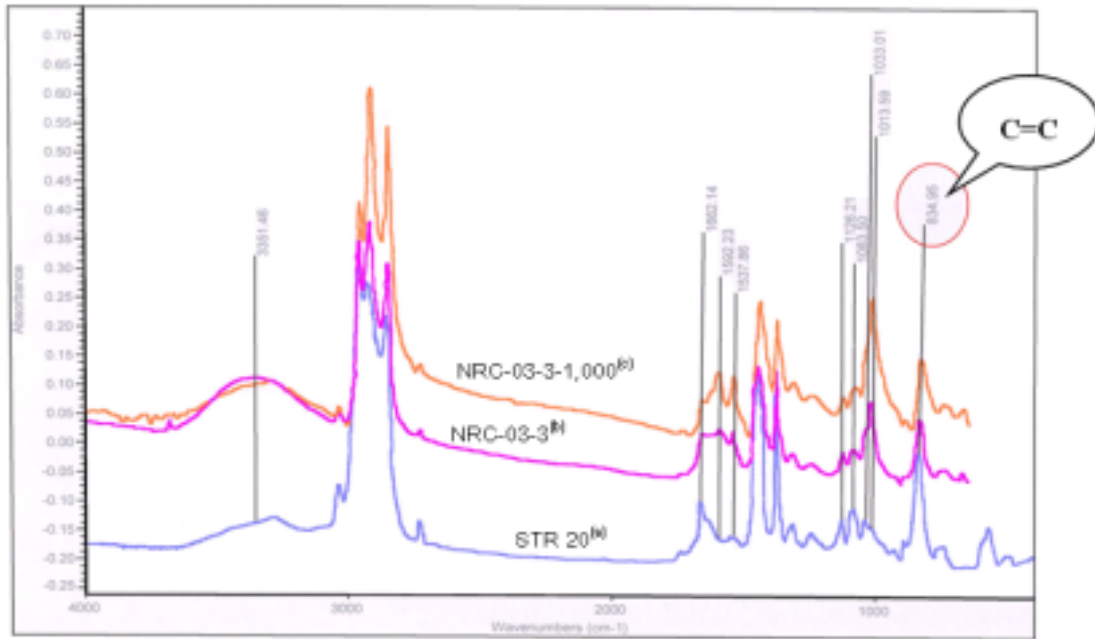


Figure 6. FTIR spectrum of (a) STR 20, (b) natural rubber- compounding under conventional heating and (c) natural rubber- compounding under microwave pre-heating

จะมีพันธะคู่อยู่ซึ่งมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา เมื่อเติมกำมะถันเข้าไปร่วมกับการได้รับความร้อนจากพลังงานไมโครเวฟซึ่งเป็นการเกิดความร้อนเชิงปริมาตร (volumetric heat) กล่าวคือ ความร้อนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานยางธรรมชาติคอมพาวด์จะเกิดขึ้นในระดับโมเลกุล เกิดจากภายในแล้วกระจายออกสู่ภายนอก ความร้อนที่เกิดขึ้นจึงเกิดแบบสม่ำเสมอ การแตกพันธะคู่ออกกลายเป็นพันธะเดี่ยวเชื่อมต่อกับอะตอมของกำมะถันจึงเกิดแบบสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน จึงทำให้สามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงพันธะได้ดีกว่าการให้ความร้อนแบบเก่าซึ่งให้ความร้อนที่ผิวชิ้นงานเท่านั้น เราสามารถตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีได้โดยเทคนิคอินฟราเรด Figure 6 แสดง FTIR spectrum ของยางธรรมชาติ (STR20), ยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่ให้ความร้อนแบบเก่า และยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่อุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟ จากสเปคตรัมเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ (STR20) พบว่าพีคที่ความยาวคลื่น 834 cm<sup>-1</sup> ซึ่งแสดงถึงพันธะ C=C ของหมู่ไอโซพรีนทั้งยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่ให้ความร้อนแบบเก่า และยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่อุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟมีค่าลดลง แสดงว่ามีการเกิดการเชื่อมโยงทางพันธะเกิดขึ้น

#### ข้อเสนอแนะ

จากการทดลอง พบว่า ชิ้นงานที่ได้หลังจากอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ด้วยพลังงานไมโครเวฟเกิดการบวมตัวทางด้านล่างที่กำลังไฟฟ้า 1,000 วัตต์ และการบวมตัวจะลดลงที่กำลังไฟฟ้า 500 วัตต์ นอกจากนี้ยังเกิดฟองอากาศขึ้นในชิ้นงานอีกด้วย ซึ่งจะทำการศึกษาเพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าวต่อไป

#### สรุป

จากผลการศึกษาวิจัยชิ้นนี้พบว่าพลังงานไมโครเวฟสามารถนำมาใช้อุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ได้โดยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. พลังงานไมโครเวฟสามารถนำไปประยุกต์ใช้อุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ให้เริ่มร้อนก่อนเข้าสู่กระบวนการคงรูปได้ โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (E) ซึ่งค่าดังกล่าวแปรผันตรงกับการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป

2. พลังงานไมโครเวฟสามารถให้ความร้อนในยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่มีความหนาหลายๆ ได้ และสามารถให้ความร้อนสม่ำเสมอทุกๆ ความหนา

3. พลังงานไมโครเวฟสามารถทำให้การอ่อนยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่มีปริมาณการเชื่อมโยงพันธะเกิดขึ้นด้วยโดยที่อุณหภูมิยังคงต่ำไม่ถึงอุณหภูมิการคงรูป (cure) เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีธรรมดา ซึ่งแสดงให้เห็นว่านอกจากใช้อุณหภูมิต่ำแล้วยังสามารถใช้ในการทำให้ยางคงรูปได้อีกด้วย

4. ปริมาณกำมะถันที่เติมเข้าไปมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนหรืออุณหภูมิที่เกิดขึ้นน้อยมากๆ แต่ปริมาณกำมะถันทำให้เกิดการเชื่อมโยงพันธะภายในโครงสร้างของยางธรรมชาติคอมพาวด์ ส่วนการเติมเจมาต์จะไม่ส่งผลกระทบต่อเกิดการเชื่อมโยงพันธะภายในโครงสร้างของยางธรรมชาติคอมพาวด์

5. การเติมเจมาต์ทำให้ยางธรรมชาติคอมพาวด์มีค่าสูงขึ้น มีผลทำให้เกิดความร้อนภายในหรืออุณหภูมิเพิ่มขึ้นกว่ากรณีไม่เติมเจมาต์

#### 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, 3<sup>rd</sup>ed. A WILEY-INTERSCIENCE publication, USA.
- Metaxas, A.C., and Meredith, 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, 4<sup>th</sup>ed. 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.