

การอุ่นยางธรรมชาติด้วยคลื่นไมโครเวฟ
โดยใช้ระบบไมโครเวฟชนิดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (MODE: TE10)
Microwave Pre-Heating of Natural Rubber
Using a Rectangular Wave Guide (MODE: TE10)

นพวรรณ ดุงาม¹, ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช^{1*} และ วารุณี กลิ่นไกล²

¹หน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (R.C.M.E.)

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ คลองหลวง ปทุมธานี 12120

โทร 0-2564-3001-9 โทรสาร 0-2564-3001-9 *อีเมล ratphadu@engr.tu.ac.th

²ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ธัญบุรี ปทุมธานี 12110

โทร 0-2549-3480 โทรสาร 0-2549-3483

(* ผู้รับผิดชอบบทความ)

Noppawan Doo-ngam¹, Phadungsak Rattanadecho^{1*}, and Warunee Klinklai²

¹ Microwave Utilization Research Center for Engineering (R.C.M.E.)

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University (Rangsit Campus), Pathumthani
12120, Thailand, Tel: 0-2564-3001-9, Fax: 0-2564-3001-9, *E-mail: ratphadu@engr.tu.ac.th

² Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology,
Thunyaburi, Pathumthani 12110, Thailand, Tel: 0-2549-3480, Fax: 0-2549-3483

(* Corresponding Author)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอเกี่ยวกับการนำพลังงานไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้กับการให้ความร้อนในยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่มีปริมาณของกำมะถันต่างกันทั้งหมด 4 สูตร โดยใช้ระบบไมโครเวฟชนิดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (MODE: TE10) ประกอบด้วยแมกนีตรอนซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟที่ระดับถี่ 2.45 GHz สามารถแปรเปลี่ยนกำลังได้ตั้งแต่ 0 ถึง 1500W โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ กำลังวัตต์ที่ป้อนเข้า ขนาดความหนาชิ้นงาน ระยะเวลาที่ให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน และองค์ประกอบของส่วนผสมในชิ้นงาน ที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนและการเกิดโครงสร้างตาข่ายสามมิติภายในชิ้นงานทดสอบที่มีสมบัติไดอิเล็กตริกต่างกัน (สูตรต่างกัน) รวมถึงโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าพลังงานไมโครเวฟสามารถใช้อุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ให้เริ่มร้อนก่อนเข้าสู่กระบวนการวัลคาไนซ์ที่มีความหนา ๑ มม. โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (E) และค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุด้วย

นอกจากนี้พบว่า การอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์โดยใช้พลังงานไมโครเวฟสามารถเพิ่มการเกิดการเชื่อมโยงพันธะได้ดีกว่าวิธีทั่วไป ซึ่งหมายถึงช่วยให้ประสิทธิภาพในการคงรูปมีมากขึ้นอีกด้วย การเติมปริมาณกำมะถันที่ต่างกันไม่มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของยางธรรมชาติคอมพาวด์ ยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่เติมเขม่าดำจะมีค่าความสามารถในการแปรเปลี่ยนพลังงานที่วัสดุดูดซับเป็นพลังงานความร้อน ($\tan \delta$) มากกว่าที่เติมส่งผลให้พลังงานความร้อนที่ได้รับมีมากกว่า ประโยชน์ขององค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยชิ้นนี้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับกระบวนการคงรูปยางธรรมชาติในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

Abstract

This paper presents an application of microwave energy for preheating of natural rubber-compounding with different amount of sulfur. The rubber was heated by microwave energy using rectangular wave guide system (MODE: TE10) operating

at frequency of 2.45 GHz which a power can vary from 0 to 1500 W influence of The power input, sample thickness, heating time and components of the rubber samples on the thermal properties, 3-D network and chemical structures. Were clearly investigated. Furthermore, it was found that the pre-heating of rubber by microwave energy can improve the cross-linking better than he conventional methods. Different amount of sulfur does not effect to temperature profile. Natural rubber compound without carbon black (low dielectric loss factor) result in a lower heat absorption on comparison with case of fill carbon black (high dielectric loss factor). The results from this study can be applied for rubber vulcanization industries.

Keyword: Microwave Pre-Heating, Rectangular Wave Guide, natural rubber-compounding

1. บทนำ

ยางธรรมชาติมีความสำคัญต่อชีวิตประจำวันของมนุษย์เป็นอย่างยิ่ง โดยพบอยู่ในรูปของยางรถยนต์ ยางพื้นรองเท้า ยางรัดของ ถุงมือยาง ท่อยาง หรือแม้แต่ในรูปของเครื่องมือทางการแพทย์ เป็นต้น นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศ เพราะในปัจจุบันประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการผลิตและส่งออกยางธรรมชาติมากที่สุดในโลก โดยในแต่ละปีประเทศไทยส่งออกยางดิบและผลิตภัณฑ์ยางรวมมีมูลค่า 100,000 ล้านบาท ปัจจุบันปัญหาหลักของอุตสาหกรรมยางและผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เกิดจากการขาดแคลนบุคลากรที่มีความรู้พื้นฐานทางด้านเทคโนโลยียาง ทำให้ไม่มีการปรับปรุงกระบวนการผลิต รวมทั้งขาดการทำวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ เพื่อตอบสนองความต้องการของตลาดในกลุ่มเป้าหมาย [1] ยางธรรมชาติจัดเป็นวัสดุในกลุ่มพอลิเมอร์ มีสมบัติเด่นคือความยืดหยุ่น แต่มีจุดอ่อนเรื่องการเปลี่ยนแปลงลักษณะไปตามอุณหภูมิ ทำให้ไม่สามารถใช้งานได้นานจำเป็นต้องมีการผสมกับสารเคมีต่างๆ และนำยางคอมพาวด์ที่ผสมได้ไปผ่านกระบวนการคงรูป (vulcanization) เพื่อปรับสมบัติให้ได้ตามความเหมาะสมกับสภาพการใช้งานของผลิตภัณฑ์นั้นๆ โดยยางคอมพาวด์จะเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ (3-D network) หรือที่เรียกว่าเกิด crosslink ทำให้ยางคงรูปมีความยืดหยุ่นดีและแข็งแรง มีสมบัติเชิงกลที่เสถียรและทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนและแสงแดดได้ดียิ่งขึ้น กระบวนการคงรูปต้องอาศัยสารเคมีกลุ่มที่ทำให้ยางคงรูป (vulcanizing or curing agents) และความร้อนเพื่อทำให้สารดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ อย่างไรก็ตามวิธีการที่ใช้อยู่ทั่วไปส่วนใหญ่เป็นการให้ความร้อนโดยวิธีธรรมดา (conventional heating method) ซึ่งมีการป้อนความร้อนที่ผิวหน้าชิ้นงาน บางครั้งอาจเกิดปัญหากับชิ้นงานที่มีความหนาหลายๆ เนื่องจากชิ้นงานได้รับความร้อนไม่ทั่วถึงหรือไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้กระบวนการผลิตใช้เวลานาน อีกทั้งยังทำให้สมบัติเชิงโครงสร้างและสมบัติเชิงคุณภาพของยางเปลี่ยนไป จึงเป็นที่มาของการแสวงหาวิธีใหม่ในการขจัด

ปัญหาที่เกิดขึ้นในวิธีดั้งเดิม การประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟมาเป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูงและเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการปรับปรุงคุณภาพยางธรรมชาติ เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟมีข้อได้เปรียบหลายประการ กล่าวคือ มีประสิทธิภาพทางความร้อนและคุณภาพของผลิตภัณฑ์สูงเพราะเป็นการให้ความร้อนเชิงปริมาตร ใช้ระยะเวลาในการทำความร้อนสั้น พลังงานที่ใช้เป็นพลังงานสะอาดไม่มีเขม่าไอเสีย เครื่องจักรมีขนาดเล็กและค่าการบำรุงรักษาต่ำ เนื่องจากมีองค์ประกอบน้อยชิ้น เป็นต้น

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงย่านความถี่คลื่นของไมโครเวฟ (ความถี่ในช่วง 0.3 - 300 กิกะเฮิร์ต (GHz) หรือ ในช่วงความยาวคลื่นเท่ากับ 30 ซม. - 0.3 มม.) มาใช้เป็นแหล่งพลังงานให้ความร้อนเพื่อใช้แปรรูปวัตถุต่างๆ ทางอุตสาหกรรม ยกตัวอย่างเช่น การวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ (Natural Rubber Vulcanization) การละลายเนื้อแข็ง และการอบแห้ง เป็นต้น โดยลักษณะเฉพาะของการให้ความร้อนต่อวัตถุด้วยไมโครเวฟเป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ และไม่เหมือนวิธีการให้ความร้อนแบบเก่าที่ให้ความร้อนจากภายนอกผ่านผิววัตถุ ในระหว่างที่รังสีไมโครเวฟผ่านเข้าไปในวัตถุพลังงานของไมโครเวฟจะลดลงโดยจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนภายในวัตถุ การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟดีกว่าการให้ความร้อนแบบการนำความร้อนและพาความร้อน ซึ่งมีปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของการกระจายอุณหภูมิและความชื้นภายในผลิตภัณฑ์นั้น การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟจะอาศัยสมบัติของการดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟภายในผลิตภัณฑ์ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่นำมาผ่านกระบวนการนี้ต้องเป็นวัสดุประเภทวัสดุไดอิเล็กตริก หมายถึงวัสดุที่ฉนวนที่มีโครงสร้างพื้นฐานทางจุลภาคมีลักษณะเป็นขั้วทางไฟฟ้า (Dipoles) ซึ่งอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างขั้ว (Dipoles) และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่งผลทำให้เกิดความร้อนภายในชิ้น (Internal Heat Generation) ดังนั้นผลิตภัณฑ์จะกระจายความร้อนจากภายในออกสู่ผิวนอก ซึ่งหลักการนี้จะทำให้ผิวของผลิตภัณฑ์ไม่เสียหายหรือต่างไปจากเดิมมากนัก เนื่องจากวิธีการดังกล่าวระบบนี้จะทำให้เกิดการกระจายของความร้อนภายในผลิตภัณฑ์เป็นไปอย่างรวดเร็วและมีการกระจายตัวของอุณหภูมิสม่ำเสมอ สามารถลดการเกิดรอยร้าวและรอยไหม้ในผลิตภัณฑ์ ซึ่งการใช้พลังงานจากคลื่นไมโครเวฟจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางอุตสาหกรรมได้หลายประเภท [2]

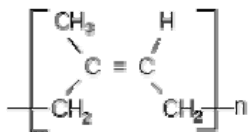
จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการนำพลังงานไมโครเวฟมาใช้ดูลักษณะของยางธรรมชาติที่ใส่และไม่ใส่เขม่าดำ [3] ยางล้อรถยนต์โดยการแยกออกมาเป็นคาร์บอน[4] การแตกพันธะเคมีของเศษยางวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ [5] ใช้เตาอบไมโครเวฟกับยางรีเคลมเพื่อเป็นวัตถุดิบนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป [6] หรือการนำคลื่นไมโครเวฟมาใช้ในการศึกษาสมบัติไดอิเล็กตริกของยางธรรมชาติก่อนและหลังวัลคาไนซ์ [7] งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่ศึกษาคลื่นไมโครเวฟแบบมัลติโหมด (multi-mode) ซึ่งเป็นไมโครเวฟที่ใช้กันตามบ้านเรือน พลังงานไมโครเวฟสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมยางธรรมชาติได้แต่ในประเทศไทยยังมี

การศึกษาเกี่ยวกับเรื่องนี้มีน้อยมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับอุตสาหกรรมยางธรรมชาติ อันเนื่องมาจากความซับซ้อนของกระบวนการและปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น งานวิจัยนี้นำเสนอเกี่ยวกับการนำคลื่นไมโครเวฟแบบซิงเกิ้ลโหมด (single mode:10) มาใช้ในการให้ความร้อนแก่ยางธรรมชาติเพื่อดูพฤติกรรมทางความร้อนและโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติหลังจากได้รับความร้อนแล้ว โดยผลจากการทดลองนี้จะนำไปสู่การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีต่อไป ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมยางธรรมชาติได้ เช่น อุตสาหกรรมยางรถยนต์ ยางท่อต่างๆ และยางพองน้ำ เป็นต้น

2. ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติเป็นสารประกอบในกลุ่มพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ประกอบด้วยหน่วยย่อยชนิดเดียว มีสมบัติที่สำคัญคือความยืดหยุ่น โครงสร้างทางเคมีของหน่วยย่อยของยางธรรมชาติประกอบด้วยคาร์บอน 5 อะตอม และไฮโดรเจน 8 อะตอม (C₅H₈) มีชื่อทางเคมีว่า ไอโซพรีน (isoprene) หน่วยย่อยดังกล่าวเมื่อเกิดการเชื่อมโยงเป็นโมเลกุล จะเรียงตัวกันในแบบ cis- 1, 4 Configuration ดังรูปที่ 1[8]

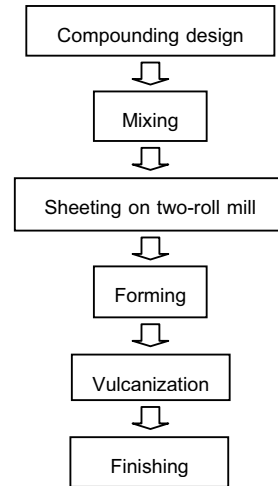


รูปที่ 1 สูตรโครงสร้างยางธรรมชาติ

จากโครงสร้างทางเคมีดังกล่าวทำให้ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีว่า polyisoprene มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ประมาณหนึ่งล้านขึ้นไป ซึ่งพืชที่สามารถให้น้ำยางนำมาใช้ประโยชน์ในเชิงการค้าคือ ยางธรรมชาติที่ได้จากพืชสกุล Hevea หรือที่เรียกว่า ยางพารา และยางวายยูเล่ (Guayule) กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางพาราได้ดังรูปที่ 2 สัตว์ส่วนยางและสารเคมีขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดและประสิทธิภาพของสารเคมี กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ เป็นต้น [8]

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบและปริมาณของยางและสารเคมีต่าง ๆ

ในสูตรผลิตภัณฑ์ยางพื้นฐาน [8]	
ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)
ยาง (ชนิดเดียว หรือ 2 ชนิดขึ้นไป) (rubber)	100
กำมะถัน (sulphur)	2.5-3.5
สารกระตุ้น (activator)	1-5
สารเร่งให้ยางคงรูป (accelerator)	0.5-2.0
สารตัวเติม (filler)	(ตามที่ต้องการ)
สารทำให้ยางนิ่ม (plasticizer, peptizer)	5-10
สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (antidegradant)	1-2



รูปที่ 2 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางโดยทั่วไป

2.2 การทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ

2.2.1 การกระจายความร้อนและการกระจายตัวของคลื่น

เมื่อวัสดุไดอิเล็กตริก เช่น ไม้ กระดาษ พลาสติก อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริกจะหมุนและเคลื่อนที่หลายล้านครั้งต่อวินาทีตามการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าซึ่งพลังงานไมโครเวฟหรือสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อผ่านเข้าไปยังวัสดุไดอิเล็กตริก พลังงานบางส่วนจะสะท้อนกลับที่บริเวณผิวหน้าวัสดุ บางส่วนจะทะลุผ่านวัสดุ และบางส่วนจะถูกดูดกลืนไว้ภายในวัสดุไดอิเล็กตริกซึ่งพลังงานในส่วนที่ดูดกลืนนี้เป็นพลังงานที่ใช้ในการทำให้โมเลกุลของวัสดุไดอิเล็กตริกเคลื่อนตัวและก่อให้เกิดเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งมีผลมากต่อกระบวนการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ

2.2.2 สมการพื้นฐาน

คลื่นไมโครเวฟเมื่อทะลุผ่านวัสดุไดอิเล็กตริกจะถูกดูดซับและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน เรียกว่าการกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (Density of Microwave Power Absorbed, Q (W/m³)) ซึ่งสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในวัสดุไดอิเล็กตริก [2] อย่างไรก็ตามวัสดุไดอิเล็กตริกไม่มีผลต่อสภาพเชิงขั้วแม่เหล็กเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจึงไม่มีสนามแม่เหล็กสูญเสียในระหว่างการแผ่รังสีไมโครเวฟ การเปลี่ยนแปลงเฟสของสนามไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยเวลาจะเร็วมาก ดังนั้นค่าเฉลี่ยรากที่สองของความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกใช้ในการประมาณค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับโดยวัสดุไดอิเล็กตริก เมื่อสมมติให้ไม่มีการสูญเสียสนามแม่เหล็ก ค่าของการกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรสามารถแสดงได้ในรูปสมการที่ (1) ต่อไปนี้ [9]

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

เมื่อ E คือ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง f คือค่าความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ ω คือ ความเร็วเชิงมุมของคลื่นไมโครเวฟ ค่าDielectric Constant คือ ϵ สมบัติของวัสดุใดๆที่อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับ ส่งผ่าน และสะท้อนพลังงานจากส่วนที่เป็นสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ โดย ϵ_0 คือ ค่า permittivity ของอากาศ และ $\tan \delta$ คือ ค่า Dielectric Loss Tangent Coefficient

จากสมการที่ (1) ค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับจะแปรผันตรงกับค่าความถี่ของสนามไฟฟ้า, Dielectric Loss Tangent Coefficient และ ค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้า แต่ถ้าวัดค่า Dielectric Constant และค่า Dielectric Loss Tangent Coefficient ของชิ้นทดสอบมีค่ามากจะส่งผลให้การดูดซับพลังงานจากไมโครเวฟและปริมาณความร้อนเกิดมากขึ้นตาม แต่ถ้ามีค่าน้อย คลื่นไมโครเวฟจะทะลุผ่านชิ้นทดสอบโดยไม่เกิดความร้อน อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นอาจจะขึ้นอยู่กับตัวแปรอื่นเช่น ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) ค่าความชื้น (moisture content) คุณลักษณะของชิ้นทดสอบและขนาดของชิ้นทดสอบ

3. การทดลอง

ยางคอมพาวด์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ยางธรรมชาติ (STR 20) สารวัลคาไนซ์ สารกระตุ้น สารตัวเติม (carbon black grade N330) และสารตัวเร่ง ดังแสดงอัตราส่วนการผสมของยางคอมพาวด์ในตารางที่ 2 ขนาดความหนาของชิ้นงานมี 3 ขนาด คือ 1, 2, และ3 เซนติเมตร

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของยางคอมพาวด์ (หน่วย : phr)

วัสดุเติม	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3	สูตรที่ 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

หมายเหตุ : phr (part per hundred part from rubber by weight)

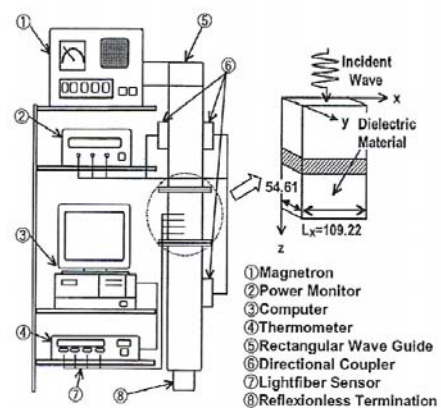
MBTS (Dibenzothiazyl disulphide)
 DPG (Diphenyl guanidine)

การเตรียมยางคอมพาวด์เริ่มจากการบดผสมยางและสารเคมีต่าง ๆ บนลูกกลิ้ง (Two Roll Mill, Lab Tech company Ltd) ที่อุณหภูมิ 50°C เวลา 20 นาที และอัดเข้าแม่พิมพ์ (compression Molding, Lab Tech company Ltd) ได้เป็นชิ้นงานยางคอมพาวด์

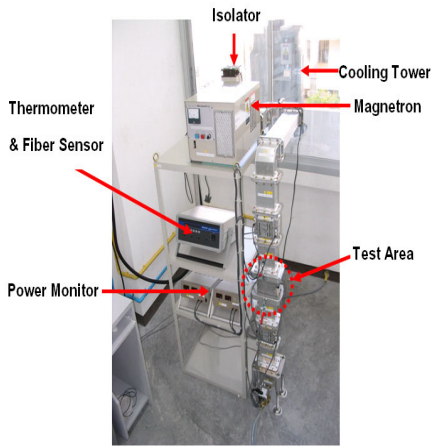
การอุ่นยางคอมพาวด์ด้วยพลังงานไมโครเวฟ ให้ความร้อนกับยางคอมพาวด์โดยใช้ระบบไมโครเวฟชนิดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (MODE: TE10) ซึ่งประกอบด้วยแมกนีตรอนซึ่งเป็นแหล่งกำเนิด

คลื่นไมโครเวฟที่ระดับที่ 2.45 GHz ที่สามารถแปรเปลี่ยนกำลังได้ตั้งแต่ 0 ถึง 1500W ดังแสดงในรูปที่ 3 ระบบไมโครเวฟนี้มีความถี่ใช้งานเท่ากับ 2.45 กิกะเฮิร์ต (GHz) เช่นเดียวกับเตาไมโครเวฟทั่วไป คลื่นไมโครเวฟที่อยู่ในท่อนำคลื่นมีลักษณะเป็นคลื่นเดี่ยว (monochromatic หรือ single-mode) สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีรูปแบบเป็น TE₁₀ mode (transverse electric wave) คลื่นไมโครเวฟดังกล่าวกำเนิดจากแมกนี ตรอน (Micro Denshi Co., model UM-1500) และเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างภายในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดภายในเท่ากับ 109.22 มม. x 54.61 มม. ตามทิศทางในแนวแกน z โดยมีน้ำดูดซับคลื่นหรือพลังงานที่เหลือทั้งหมดบริเวณขอบเขตด้านล่าง (lower absorbing boundary) เพื่อป้องกันการสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟไปสู่วัสดุทดสอบ นอกจากนั้นยังมีไอโซเลเตอร์ (isolator) เป็นตัวตัดคลื่นไมโครเวฟที่สะท้อนจากวัสดุทดสอบบริเวณขอบเขตด้านบน (upperabsorbing boundary) เพื่อป้องกันความเสียหายของแมกนีตรอน กำลังวัตต์ของไมโครเวฟที่ออกจากแมกนี ตรอนสามารถปรับได้ตั้งแต่ 0-1500 วัตต์ การวัดค่ากำลังวัตต์คลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อนและคลื่นส่งผ่านของวัสดุทดสอบภายในท่อนำคลื่นสามารถวัดได้โดยวัตต์มิเตอร์ (Micro Denshi Co., model DR-500) ในระหว่างการทดลอง อุณหภูมิวัสดุทดสอบสามารถวัดได้โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ใยแก้วนำแสง (Luxtron fluoptic thermometer model 790 (accurate to ± 0.5 °C)) และค่าอุณหภูมิที่ได้จากเทอร์โมมิเตอร์ใยแก้วนำแสงจะถูกบันทึกข้อมูลลงเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยซอฟต์แวร์ที่เชื่อมต่อข้อมูลกับเทอร์โมมิเตอร์ทันที

ขั้นตอนการทดลองเริ่มจากนำตัวอย่างชิ้นงานที่เตรียมไว้ (ดังตารางที่ 2) มาเจาะรูสำหรับใส่สายเทอร์โมมิเตอร์ใยแก้วนำแสง นำตัวอย่างชิ้นงานมาใส่กล่องพลาสติก (polypropylene) รูปทรงสี่เหลี่ยมใสในเครื่องไมโครเวฟ ทำการปรับกำลังวัตต์ที่ต้องการ (1,000, 800, 500, และ200 วัตต์ ตามลำดับ) ให้เครื่องทำงานจนชิ้นงานมีอุณหภูมิประมาณ 150°C (อุณหภูมิที่ทำให้ยางคงรูป) จึงปิดเครื่อง



(ก) ไลออะแกรมรายละเอียดเครื่องมือทดลอง [9]

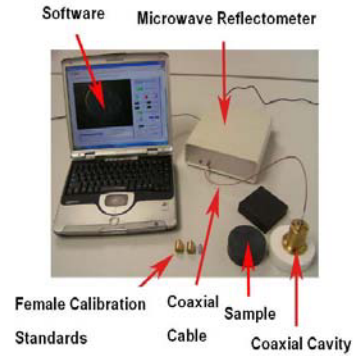


(ข) อุปกรณ์ทดลองจริง
 รูปที่ 3 เครื่องไมโครเวฟท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม

สำหรับงานวิจัยนี้เนื่องจากศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนที่เกิดจากพลังงานไมโครเวฟในยางคอมพาวด์แล้ว ยังทำการวัดค่าไดอิเล็กตริกด้วยเครื่องเน็ตเวิร์คแอนาไลเซอร์ (Network Analyzer) ดังแสดงในรูปที่ 4 เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานเปรียบเทียบในการวิเคราะห์เชิงลึก รวมไปถึงเป็นข้อมูลป้อนเข้าสำหรับการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีด้วยสมบัติไดอิเล็กตริกในวัสดุเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในกระบวนการไมโครเวฟเพราะสมบัติไดอิเล็กตริกเป็นสมบัติที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟและการผลิตพลังงานความร้อนที่เกิดจากการดูดซับพลังงานไมโครเวฟ ดังนั้นการรู้ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกในวัสดุที่ต้องการทำความร้อนด้วยกระบวนการไมโครเวฟจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง เครื่องมือชุดวัดสมบัติไดอิเล็กตริกเน็ตเวิร์คแอนาไลเซอร์สามารถใช้วัดสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุได้หลากหลายประเภทหลากหลายสถานะ อาทิเช่น วัสดุแข็ง วัสดุกึ่งแข็ง วัสดุที่เป็นผง รวมไปถึงวัสดุเหลว ตัวเครื่องมือองค์ประกอบที่จำเป็นต่อการวัดอย่างสมบูรณ์แบบเช่น การรักษาสัญญาณไมโครเวฟ การคำนวณสัญญาณ การเก็บข้อมูลจากการคำนวณ และการนำผลดังกล่าวมาแสดงเป็นกราฟ การควบคุมระบบการทำงานทั้งหมดจะถูกควบคุมด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์เพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นภายในวัสดุที่ถูกทดสอบ จากนั้นจะตรวจจับความถี่การสั่นพ้องของคลื่นภายในหัววัด (cavity) รวมไปถึงปัจจัยคุณภาพ (quality factor) และนำข้อมูลที่ได้นำกลับมาเป็นค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ถูกทดสอบ ทำയสุดผลการวัดจะถูกแสดงในรูปแบบกราฟหลายลักษณะและสามารถบันทึกข้อมูลเก็บไว้ได้ หัววัดที่ใช้วัดค่าถูกออกแบบมาอย่างเหมาะสม สามารถใช้วิเคราะห์วัสดุไดอิเล็กตริกได้หลายชนิด การวัดทำได้ง่ายเพียงนำหัววัดไปทาบกับวัสดุที่ต้องการทราบค่า ซึ่งหัววัดดังกล่าวมีข้อได้เปรียบที่ความยืดหยุ่นของการใช้งาน ความรวดเร็วในการวัด และความแม่นยำของข้อมูล

ขั้นตอนการวัดค่าสมบัติไดอิเล็กตริกเริ่มจากนำตัวอย่างชิ้นงานจากตารางที่ 2 มาเตรียมให้มีความหนาประมาณ 1 เซนติเมตร

เส้นผ่าศูนย์กลาง 6.5 เซนติเมตร หลังจากนั้นทำการวัด 5 จุดต่อหนึ่งชิ้นงาน (ใช้เครื่องเน็ตเวิร์คแอนาไลเซอร์ (Network Analyzer) บันทึกค่าที่ได้แล้วนำมาหาค่า $\tan \delta$



รูปที่ 4 เครื่องเน็ตเวิร์คแอนาไลเซอร์

เปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยง (% crosslinked) ได้จากการนำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟแล้วมาตัดให้เป็นทรงสี่เหลี่ยมนำไปชั่งและบันทึกน้ำหนัก จากนั้นแช่ในโทลูอีนปริมาตร 30 มล.ทิ้งไว้ 1 สัปดาห์ นำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้งและคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยงตามสูตรในสมการที่ 2 [10-12]

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

เมื่อ V_r คือ volume fraction of rubber in swollen gel

χ คือ rubber-solvent interaction parameter (0.3795)

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

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

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

วิเคราะห์โครงสร้างของยางคอมพาวด์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานซฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR, Nicolet NEXUS 470) โดยทั่วไปเทคนิคสเปกโทรสโกปีมักใช้หลักการการกระจายแสง (dispersion) ของสเปกตรัมการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงที่สนใจเป็นตัวกำหนดโดยวัดความเข้มของแสงหรือกำลังของแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ กันอย่างต่อเนื่องเทียบกับเวลาเรียกว่า Time-Domain Spectrum หรือโดยทั่วไปเรียกว่า Fourier Transform Spectroscopy จากนั้น Time-Domain Spectrum จะถูกเปลี่ยนเป็น Frequency-Domain Spectrum ด้วย Fourier Transform จากการใช้ดิจิทัลคอมพิวเตอร์สเปกตรัมจาก Fourier Transform Spectroscopy ได้จากการวัดการดูดกลืนที่ความถี่ต่างๆพร้อมกันทั้งหมด ดังนั้น Fourier Transform จึงให้เกิดการวิเคราะห์ที่รวดเร็วขึ้นการแยก Resolution ก็ดีขึ้น

ขั้นตอนการทดสอบการวิเคราะห์โครงสร้างของยางคอมพาวด์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานซฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR) ทำโดยการตัดชิ้นงานให้มีขนาด 1X2X0.1 cm ใส่ในอุปกรณ์รับรูชิ้นงาน นำเข้าเครื่องฟู

เรียทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ นำค่าที่ได้มาวิเคราะห์ ผลการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเปรียบเทียบกัน

4. ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

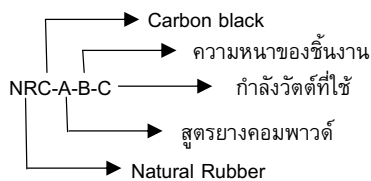
4.1 พฤติกรรมทางความร้อน

ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่วัดโดยใช้ เครื่องเน็ตเวิร์คแอนาไลเซอร์ (Network Analyzer) แสดงดังตารางที่ 4 โดยจะแบ่งเป็นยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่เติมเขม่าดำและไม่เติม เขม่าดำ ในส่วนที่ไม่เติมเขม่าดำพบว่าค่า $\tan \delta$ ต่ำกว่ายางธรรมชาติคอมพาวด์ที่เติมเขม่าดำมากเนื่องจากโดยปกติแล้วยางธรรมชาติจะเป็นวัสดุประเภทไม่มีขั้ว (non-polar) เมื่อเติมเขม่าดำลงไป ในยางธรรมชาติจึงส่งผลให้ยางธรรมชาติกลายเป็นวัสดุที่มีขั้ว (polar material) ดูได้จากตารางที่ 4 ดังนั้นเพื่อให้ยางธรรมชาติคอมพาวด์สามารถเกิดความร้อนได้ดีขึ้นจึงต้องมีการเติมเขม่าดำลงไป ก่อนนำมาทำการอุ่นภายใต้พลังงานไมโครเวฟ

ตารางที่ 4 ค่าสมบัติไดอิเล็กตริก

วัสดุ	ค่า Dielectric constant (ϵ'_r)	ค่า Dielectric loss factor (ϵ''_r)	ค่า Loss tangent coefficient ($\tan \delta$)
NR-01	2.043	0.000002	0.000001
NR-02	2.161	0.000004	0.000002
NR-03	2.017	0.000009	0.000004
NR-04	2.272	0.000004	0.000002
NRC-01	3.790	0.007	0.002
NRC-02	3.330	0.006	0.002
NRC-03	3.375	0.011	0.003
NRC-04	3.269	0.009	0.003

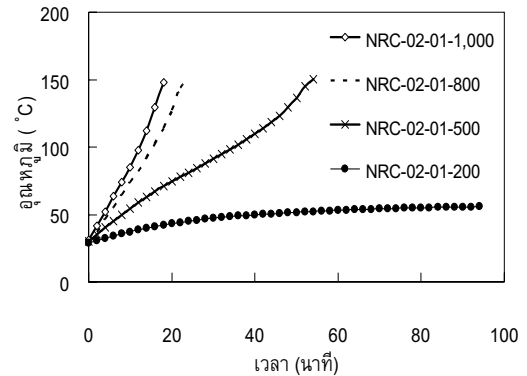
หมายเหตุ สัญลักษณ์ของยางธรรมชาติคอมพาวด์สูตรต่าง ๆ มีความหมายดังนี้



4.1.1 อิทธิพลกำลังวัตต์ต่ออุณหภูมิภายใต้ไมโครเวฟ

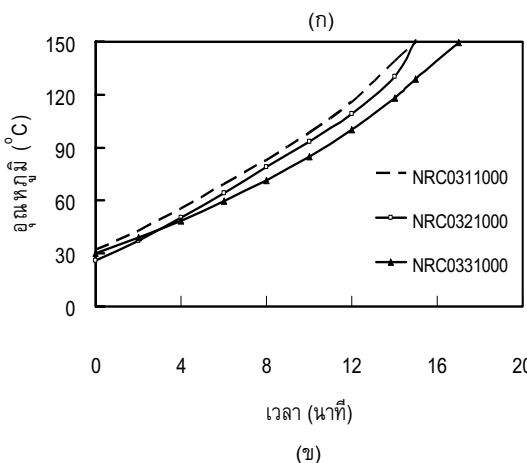
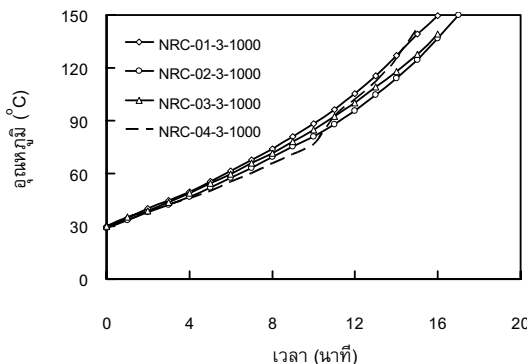
รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังวัตต์ที่มีผลต่อระยะเวลาและอุณหภูมิ พบว่าเมื่อเพิ่มกำลังวัตต์ให้กับยางธรรมชาติคอมพาวด์อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิของยางคอมพาวด์ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากเมื่อกำลังวัตต์มากขึ้นความเข้มของสนามไฟฟ้ามากขึ้นส่งผลให้เกิดความร้อนภายใน (Q) มากขึ้น (จากสมการที่ 1) ที่กำลังวัตต์ 200 วัตต์อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากสภาวะปกติเพียงเล็กน้อยเนื่องจากความร้อนที่ชั้นงานได้รับมีน้อยและมีการสูญเสียความร้อนแก่สิ่งแวดล้อม ที่กำลังวัตต์ 800 และ 1,000 วัตต์อัตราการเพิ่มอุณหภูมิมีมากขึ้นเนื่องจากความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (E) ที่เพิ่มขึ้นทำให้โมเลกุลของยางคอมพาวด์

ได้รับความร้อนมากขึ้นอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิจึงมีมากกว่าที่ กำลังวัตต์ต่ำๆและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานไมโครเวฟเป็นพลังงานความร้อนมีมากกว่าการสูญเสียความร้อนออกสู่ภายนอก



รูปที่ 5 โพรไฟล์อุณหภูมิของยางคอมพาวด์ที่ กำลังวัตต์ต่างกันข

4.1.2 อิทธิพลส่วนประกอบและความหนาของยางคอมพาวด์

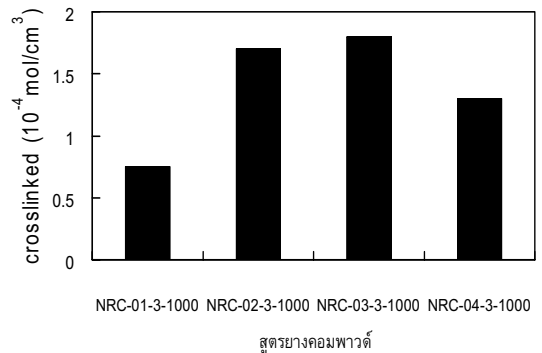


รูปที่ 6 โพรไฟล์อุณหภูมิยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่สูตรและความหนาต่างกันโดยใช้กำลังวัตต์ 1,000 วัตต์

(ก) ยางธรรมชาติคอมพาวด์หนา 3 ซม. ที่สูตรต่างกัน

(ข) ยางธรรมชาติคอมพาวด์สูตรที่ 3 ที่ความหนาต่างกัน

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโพไรไฟลัอ์ของยางธรรมชาติคอมพาวด์กับเวลา (ก) แสดงโพไรไฟลัอ์ของยางธรรมชาติคอมพาวด์ 4 สูตร (โดยแต่ละสูตรมีปริมาณกำมะถันต่างกัน) ที่ผ่านกระบวนการอุ่นยางด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยยกตัวอย่างกรณีชิ้นงานหนา 3 ซม. กำลังวัตต์ที่ป้อน 1,000 วัตต์ จากผลการทดลองพบว่าปริมาณกำมะถันไม่มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นนอกจากความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (E) แล้วสมบัติของวัสดุหรือสมบัติไดอิเล็กทริกยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการผลิตปริมาณความร้อน (ดังสมการที่ 1) จากการวัดด้วยเครื่องเน็ตเวิร์คแอนาไลเซอร์ (Network Analyzer) พบว่ายางธรรมชาติคอมพาวด์ทั้ง 4 สูตรที่ไม่เติมเขม่าดำมีค่า $\tan \delta$ ใกล้เคียงกันมากจึงสามารถยืนยันได้ว่าปริมาณกำมะถันที่ต่างกันไม่ส่งผลต่อสมบัติไดอิเล็กทริกและการผลิตปริมาณความร้อน เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 6 (ข) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของความหนาที่ต่างกัน คือ 1, 2 และ 3 ซม. พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ที่ 1 และ 2 ซม. เวลาที่ใช้ในการเพิ่มของอุณหภูมิมียุทธศาสตร์ใกล้เคียงกัน ส่วนที่ 3 ซม. ถึงแม้ว่าจะใช้เวลาานกว่าแต่ก็ไม่มากเมื่อเทียบกับการใช้เวลาแบบดั้งเดิม



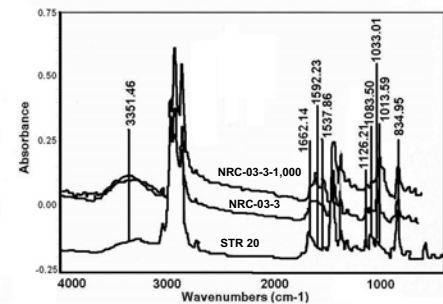
รูปที่ 7 เปรอ์เซ็นต์การเชื่อมโยงพันธะ (cross-linked)

จากการทดลองพบว่าชิ้นงานที่ได้หลังจากอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ด้วยพลังงานไมโครเวฟเกิดการบวมตัวทางด้านล่างที่กำลังวัตต์ 500 วัตต์และการบวมตัวจะลดลงที่ กำลังวัตต์ 1,000 วัตต์ นอกจากนี้ยังเกิดฟองอากาศขึ้นในชิ้นงานอีกด้วย ซึ่งจะทำการศึกษาเพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าวต่อไป

4.2 โครงสร้างทางเคมี

4.2.1 ความหนาแน่นของพันธะ (Crosslink density)

ความหนาแน่นพันธะของยางธรรมชาติขึ้นอยู่กับปริมาณกำมะถันที่เติมลงไป ปริมาณกำมะถันมากการเกิดการเชื่อมโยงจะมากตามไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 7 เห็นได้ว่าสูตรยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่มีปริมาณกำมะถันมากการเกิดการเชื่อมโยงก็มีมากตามไปด้วยทำให้ยางธรรมชาติที่ได้มีความแข็งแรงมากขึ้นซึ่งต่างกับเขม่าดำกล่าวคือ แม้จะเติมเขม่าดำลงไปก็ไม่ส่งผลต่อการเกิดการเชื่อมโยงพันธะของยางธรรมชาติแต่อย่างไรเนื่องจากการเกิดการเชื่อมโยงพันธะเกิดจากการที่กำมะถันไปสร้างพันธะกับยางธรรมชาติเท่านั้น ปกติโครงสร้างของยางธรรมชาติที่ยังไม่เติมสารเคมีจะมีพันธะคู่อยู่ซึ่งมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา เมื่อเติมกำมะถันเข้าไปรวมกับการได้รับความร้อนจากพลังงานไมโครเวฟซึ่งเป็นการเกิดความร้อนระดับโมเลกุลจึงเกิดการแตกพันธะคู่ออกกลายเป็นพันธะเดี่ยวเชื่อมต่อกับอะตอมของกำมะถัน เนื่องจากไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนที่ระดับโมเลกุลจึงสามารถเกิดการเชื่อมโยงพันธะได้ดีกว่าการให้ความร้อนแบบเก่าซึ่งให้ความร้อนที่ผิวชิ้นงานเท่านั้น เราสามารถตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีได้โดยเทคนิคอินฟราเรด รูปที่ 8 แสดง FTIR spectrum ของยางธรรมชาติ (STR20), ยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่ให้ความร้อนแบบเก่าและยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่อุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟ จากสเปกตรัมเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ (STR20)พบว่าพีคที่ความยาวคลื่น 834 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงพันธะ C=C ของหมู่ไอโซพรีนทั้งยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่ให้ความร้อนแบบเก่าและยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่อุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟมีค่าลดลง แสดงว่ามีการเกิดการเชื่อมโยงทางพันธะเกิดขึ้น



รูปที่ 8 FTIR spectrum ของยางธรรมชาติและยางคอมพาวด์

5. สรุป

จากผลการศึกษาทางวิจัยชิ้นนี้พบว่าพลังงานไมโครเวฟสามารถนำมาใช้อุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ได้โดยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. พลังงานไมโครเวฟสามารถนำไปประยุกต์ใช้อุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ให้เริ่มร้อนก่อนเข้าสู่กระบวนการวัลคาไนซ์ได้โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (E) ซึ่งค่าดังกล่าวแปรผันตรงกับการเปลี่ยนแปลงกำลังวัตต์ที่ป้อนเข้าไป
2. พลังงานไมโครเวฟสามารถให้ความร้อนในยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่มีความหนาต่าง ๆ ได้และสามารถให้ความร้อนสม่ำเสมอทุก ๆ ความหนา
3. พลังงานไมโครเวฟสามารถทำให้การอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์มีปริมาณการเชื่อมโยงพันธะเกิดขึ้นด้วยโดยที่อุณหภูมิดังกล่าวยังไม่ถึงอุณหภูมิการคงรูป (cure) เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี

ธรรมชาติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่านอกจากใช้อุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ได้แล้วยังสามารถใช้ในการทำให้อย่างคงรูปได้อีกด้วย

4. ปริมาณกำมะถันที่เติมเข้าไปไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนหรืออุณหภูมิที่เกิดขึ้น แต่ปริมาณกำมะถันทำให้เกิดการเชื่อมโยงพันธะภายในโครงสร้างของยางธรรมชาติคอมพาวด์ ส่วนการเติมเซมาต้าจะไม่ส่งผลต่อการเกิดการเชื่อมโยงพันธะภายในโครงสร้างของยางธรรมชาติคอมพาวด์

5. การเติมเซมาต้าทำให้ยางธรรมชาติคอมพาวด์มีค่า $\tan \delta$ สูงขึ้น มีผลทำให้เกิดความร้อนภายในหรืออุณหภูมิเพิ่มขึ้นกว่ากรณีไม่เติมเซมาต้า

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ

เอกสารอ้างอิง

- [1]พงษ์ธร แซ่อูย, 2547. ยาง ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. พิมพ์ครั้งที่ 1, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค).
- [2]Metaxas, A.C., and Meredith, R.J., 1983. Industrial Microwave Heating. Peter Peregrinus, Ltd., London.
- [3]Laurence, L., Christopher, M.L., Norman, S.A., Michele, E., and Robert, S.W., Use of microwave dielectric loss spectroscopy for characterisation of natural rubber/carbon black composites. Manchester, England.
- [4]Dobozy, J., 2004. Method and apparatus for recovering an elastomeric material. United States Patent. 6,722,593.
- [5]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.
- [6]Anderson, E., E., 1978. Method and apparatus for microwave heating of flowable material. United States Patent. 4,129,768
- [7]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), pp. 673-678.
- [8] Information.
<http://rubber.sc.mahidol.ac.th/RTU/information3.htm>
(accessed on November 2005).
- [9]Ratanadecho, P., 2002. Influence of Irradiation Time, Particle Sizes and Initial Moisture Content During Microwave Drying of Multi-Layered Capillary Porous Materials. ASME J. Heat Transfer, Vol. 124, No. 1, 151-161.

- [10]L.H., Sperling, 1932. Introduction to Physical Polymer Science, 4th ed., John Wiley and Son Inc. USA.
- [11]Allen, T.C., Bryan, B., and James, L., Characterization of Polymer-Filler Interface in γ -Irradiated Silica-Reinforced Polysiloxane Composites. Materials Research Society, Vol. 629, pp. FF5.14.1-FF5.14.5.
- [12]J.Brandrup, E.H., Immergut, 1989. Polymer handbook. 3rd ed., A WILEY-INTERSCIENCE publication. USA.