



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ ศึกษาสมบัติของยาง STR20 และ RSS3 หลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ
(Properties of STR20 and RSS3 after Pre-heating by Microwave Energy)

โดย ดร.วารุณี กลิ่นไกล และคณะ

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ ศึกษาสมบัติของยาง STR20 และ RSS3 หลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ
(Properties of STR20 and RSS3 after Pre-heating by Microwave Energy)

คณะผู้วิจัย		สังกัด
1. ดร.วารุณี	กลีนไกล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
2. นายณัฐนที	ขาน้อย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
3. นายปกรณ์	ช่วยเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ชุดโครงการ โครงการวิจัยยางพาราขนาดเล็ก (Small Project Rubber)

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

ส่วนที่ 1 ข้อมูลโครงการ:

ชื่อโครงการ	ศึกษาสมบัติของยาง STR20 และ RSS3 หลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ
สัญญาเลขที่	RDG4950023
ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน	ดร. วารุณี กลิ่นไกล
หน่วยงานต้นสังกัด	ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
โครงการเริ่มเมื่อวันที่	1 พฤศจิกายน 2548
ร่างรายงานฉบับสมบูรณ์	31 สิงหาคม 2549
รวมเวลาที่ทำวิจัยทั้งสิ้น	10 เดือน

แบบสรุปโครงการวิจัย (Executive Summary)

ความสำคัญ / ความเป็นมา

ปัจจุบันการมีการนำคลื่นไมโครเวฟมาใช้อย่างแพร่หลาย เช่น ในการอุ่นอาหาร ในการอบแห้ง ในการนำมาใช้เป็นเครื่องมือทดสอบ และได้มีการเริ่มนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมกันมากขึ้นในโดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมการผลิตอาหาร แต่ในอุตสาหกรรมหลักของประเทศไทยได้แก่อุตสาหกรรมยาง มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาการนำคลื่นไมโครเวฟใช้นั้นยังมีน้อยมากและยังไม่พบการรายงานถึงสมบัติของยางหลังอบให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ ที่มาของปัญหาที่พบในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมยางคือ ขั้นตอนในกระบวนการวัลคาไนเซชันผลิตภัณฑ์ยางเกือบทุกชนิด โดยคือวิธีดั้งเดิมใช้ลมร้อนในการเคียว ดังนั้นคณะนักวิจัยมีแนวคิดในการประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟในการทดลองให้ความร้อนแก่ยางธรรมชาติแทนการให้ความร้อนด้วยตู้อบซึ่งใช้ลมร้อน โดยคาดว่าจะยังคงสมบัติที่ดีของยางธรรมชาติครบถ้วน เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟจะให้ความร้อนที่สม่ำเสมอทั่วถึง และกระบวนการในการผลิตสะอาดและรวดเร็ว ประหยัดพลังงาน และประหยัดเนื้อที่ สามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ยางและออกแบบเครื่องไมโครเวฟต่อไป

ในประเทศไทยมีบางงานวิจัยได้นำร่องศึกษาการนำคลื่นไมโครเวฟแบบหลายเฟส (Multi-phase) ซึ่งเป็นไมโครเวฟที่ใช้กันตามบ้านเรือนมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมยาง แต่ยังไม่ปรากฏการรายงานผลที่ชัดเจนในการอธิบายด้านโครงสร้างและหลักการทำงานของอันตรกิริยาระหว่างคลื่นไมโครเวฟและยางธรรมชาติ เนื่องมาจากความซับซ้อนของกระบวนการและปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ดังนั้นคณะผู้วิจัยมีความมุ่งมั่นที่จะศึกษาการให้ความร้อนหรืออุ่นยาง (Pre-heating) โดยใช้พลังงานไมโครเวฟระบบท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมเป็นแบบเฟสเดียว (single phase) ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิ จำนวนกำลังวัตต์ที่ใช้ โดยจะศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางกายภาพ รวมถึงผลของ non-rubber content ที่มีในเนื้อยางหลังจากอุ่นด้วยพลังงาน

ไมโครเวฟ โดยเลือกยางธรรมชาติ 2 ชนิดคือ STR20 และ RSS3 ในการทำวิจัย โดยความรู้ที่ได้จะเป็นองค์ความรู้พื้นฐานในการนำไปประยุกต์ใช้งานในการออกแบบระบบไมโครเวฟที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง ได้แก่ การผลิตยางล้อรถยนต์ หรือผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่มีความหนาแน่นๆ ได้

วัตถุประสงค์โครงการ

1. เพื่อศึกษาโครงสร้าง สมบัติทางไฟฟ้า และทางกายภาพของยางแท่ง STR20 และยางแผ่นรมควัน RSS3 หลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ
2. เพื่อศึกษาผลของการให้ความร้อน (pre-heating) ด้วยพลังงานไมโครเวฟที่มีการเชื่อมโยงพันธะของยางแท่ง STR 20 และยางแผ่นรมควัน RSS3 หลังการคอมเปา์
3. เพื่อศึกษาผลของ non-rubber ในยางแท่ง STR 20 และยางแผ่นรมควัน RSS3 ที่มีอยู่ในเนื้อยางหลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ

ผลที่ได้รับ	บรรลุวัตถุประสงค์ข้อที่.....	โดยทำให้.....
1. ทราบลักษณะโครงสร้าง สมบัติไดอิเล็กตริกและความหนาแน่นของยาง STR 20 และ RSS3 หลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ	ข้อที่ 1 คือเพื่อศึกษาโครงสร้าง สมบัติทางไฟฟ้าและทางกายภาพของยางแท่ง STR20 และยางแผ่นรมควัน RSS3 หลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ	โดยทำให้การอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟไม่ทำให้โครงสร้างและความหนาแน่นของยางแท่ง STR20 และแผ่นรมควัน RSS3 เปลี่ยนแปลงแต่อย่างใดและสมบัติไดอิเล็กตริกของยางเปลี่ยนจาก 3.0×10^{-6} เป็น 3.0×10^{-3} เมื่อมีการเติมเขม่าดำลงไป 10 phr
2. ทราบถึงเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยง (Crosslinking) หลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟกับยาง STR20 และ RSS3	ข้อที่ 2 คือ เพื่อศึกษาผลของเวลาในการให้ความร้อน (Pre-heating) ด้วยพลังงานไมโครเวฟที่มีการเชื่อมโยงพันธะของยางแท่ง STR20 และยางแผ่นรมควัน RSS3 หลังการคอมเปา์	โดยทำให้ได้ %Crosslinking ของยางแท่ง STR20 และยางแผ่นรมควัน RSS3 เปลี่ยนจาก 0 mol/cm^3 เป็น 0.8, 1.6, 1.8 และ 1.3 mol/cm^3 ตามลำดับ เมื่อให้พลังงานไมโครเวฟที่ 1000 W แก่ชิ้นงานความหนา 3 cm แก่ยางทั้งสองชนิดที่มีปริมาณกำมะถันเป็น 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 phr ตามลำดับ
3. ทราบถึงปริมาณเก่าในเนื้อยางหลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟกับยาง STR 20 และ RSS3	ข้อที่ 3 คือเพื่อศึกษาผลของ non-rubber ในยาง STR20 และ RSS3 ที่มีอยู่ในเนื้อยางหลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ	โดยทำให้ปริมาณเก่าในยางธรรมชาติ STR20 จากเดิม 0.17% และยางธรรมชาติ RSS3 จากเดิม 0.40% ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ

การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

1. เป็นข้อมูลพื้นฐานในการทำไปใช้ประโยชน์ในการอนุรักษ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟและการออกแบบระบบอนุรักษ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟ
2. เป็นแนวทางในการต่อยอดในทางอุตสาหกรรมยางโดยเฉพาะอุตสาหกรรมยางรถยนต์

การประชาสัมพันธ์

1. ผลงานวิจัยบางส่วนจะนำเสนอผลงานทางวิชาการภาคบรรยายในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20 ระหว่างวันที่ 18-20 ตุลาคม 2549 จังหวัดนครราชสีมา
2. จะทำการตีพิมพ์ในหนังสือวารสารของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
3. เพื่อเผยแพร่การนำเทคโนโลยีไมโครเวฟมาใช้ในการอนุรักษ์ธรรมชาติ รวมทั้งผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติแก่อุตสาหกรรมยางเป็นการต่อยอดงานวิจัย

บทคัดย่อ

เทคโนโลยีการให้ความร้อนแก่ยางธรรมชาติด้วยพลังงานไมโครเวฟนั้นว่ามีความเป็นไปได้อย่างมากในการอนุรักษ์ยางธรรมชาติคอมปาวด์ที่ผสมและไม่ผสมด้วยเขม่าดำ แม้ว่ามีการวิจัยที่ผ่านมาเรานิยมใช้การอนุรักษ์ด้วยการให้ความร้อนด้วยเตาอบ โดยความร้อนจะนำผ่านไปยังผิวชั้นงาน อย่างไรก็ตามการให้ความร้อนด้วยวิธีดังกล่าวต้องใช้เวลานานมาก ใช้พลังงานปริมาณมากและสูญเสียพลังงาน ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะนำพลังงานไมโครเวฟมาใช้ในการอนุรักษ์ธรรมชาติแทนวิธีแบบดั้งเดิม โดยศึกษาถึงโครงสร้างและสมบัติต่างๆ เช่น สมบัติทางกายภาพ ทางไฟฟ้า การเชื่อมโยงพันธะ และปริมาณแก้ว ที่มีผลต่อการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ rectangular wave guide (MODE: TE₁₀) ที่ความถี่ 2.45 GHz และใช้กำลังวัตต์ 1000 W แก่ชิ้นงานหนา 3 cm เท่ากัน จากการทดลองพบว่าโครงสร้างของยางไม่ถูกทำลายไปและพบฟีกใหม่ที่ 1596 cm⁻¹ ในยางทั้ง STR20 และ RSS3 หลังเติมกำมะถันและเขม่าดำ คาดว่าน่าจะเป็นฟีกการเชื่อมโยงพันธะซึ่งจะสัมพันธ์กับค่า % Crosslinking ที่เพิ่มขึ้นจาก 0 mol/cm³ เป็น 0.8, 1.6, 1.8 และ 1.3 mol/cm³ เมื่อมีปริมาณกำมะถันเป็น 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 phr ตามลำดับ ค่า Dielectric loss tangent coefficient (Tan δ) ของยางธรรมชาติทั้ง STR20 และ RSS3 เพิ่มขึ้นจาก 10⁻⁶ เป็น 10⁻³ หลังจากเติมเขม่าดำลงไป 10 phr แสดงให้เห็นว่ายางธรรมชาติจากเดิมที่ไม่มีขั้วกลายเป็นวัสดุมีขั้วมากขึ้นซึ่งจะผลต่อการดูดซับพลังงานจากไมโครเวฟและเปลี่ยนมาเป็นพลังงานความร้อนได้ดีกว่า และจากการทดลองพบว่าพลังงานไมโครเวฟเหมาะสมในการอนุรักษ์ได้โดยไม่ทำให้ความหนาแน่นและปริมาณ non-rubber เปลี่ยนแปลง

Abstract

Pre-heating of natural rubber with Microwave Energy has shown a remarkable potential as an effective method for pre-heating and aging of green rubber compounding (NR) and carbon black filled natural rubber (NR filled CB). In the previous work, a useful method for pre-heating and vulcanizing rubber is conventional heating oven by heat conduction through a heating medium. However, vulcanization by the conventional heating is the need of time consuming, labor intensive and energy consuming. In this regard, microwave energy is recognized to have a potential and cheaper processing. In the present work, structure and properties of NR and NR filled CB after pre-heating with microwave energy was investigated using a rectangular wave guide (MODE: TE₁₀) at frequency of 2.45 GHz and power input 1000 Watts. From FTIR Spectra, there are no side reaction occurs. However, we found a new peak appears at 1596 cm^{-1} , suggesting that crosslinking occurs after pre-heating. It is consistent with the result of % crosslinking which was increased from 0 mol/cm³ to 0.8, 1.6, 1.8 and 1.3 mol/cm³ when we added sulfur content from 0 to 1.5, 2.0, 2.5 and 3.0 phr., respectively. Dielectric loss tangent coefficient ($\tan \delta$) for NR was increased from 10^{-6} to 10^{-3} , after filling with carbon black for 10 phr, reflecting that NR becomes polar materials useful for absorbing energy. To observe physical properties, the resulting compounding within and without carbon black was subjected to density measurement. It was observed that there is no change in the density for all samples. Microwave energy is suitable to use for pre-heating NR and NR filled CB without destroying structure and properties. There is no change in non-rubber content after pre-heating the rubber with microwave.

ส่วนที่ 2 รายงานเนื้อหา:

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ปัจจุบันการมีการนำคลื่นไมโครเวฟมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น ในการอุ่นอาหาร ในการอบแห้ง ในการนำมาใช้เป็นเครื่องมือทดสอบ และได้มีการเริ่มนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมกันมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมการผลิตอาหาร แต่ในอุตสาหกรรมหลักของประเทศไทยได้แก่อุตสาหกรรมยาง มีงานวิจัยที่ทำการศึกษานำคลื่นไมโครเวฟมาใช้นั้นยังมีน้อยมากและยังไม่พบการรายงานถึงสมบัติของยางหลังอบให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ ที่มาของปัญหาที่พบในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมยางคือ ขั้นตอนในกระบวนการวัลคาไนเซชันผลิตภัณฑ์ยางเกือบทุกชนิด โดยคือวิธีดั้งเดิมใช้ลมร้อนในการเคียว ดังนั้นคณะนักวิจัยมีแนวคิดในการประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟในการทดลองให้ความร้อนแก่ยางธรรมชาติแทนการให้ความร้อนด้วยตู้อบซึ่งใช้ลมร้อน โดยคาดว่าจะยังคงสมบัติที่ดีของยางธรรมชาติครบถ้วน เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟจะให้ความร้อนที่สม่ำเสมอทั่วถึง และกระบวนการในการผลิตสะอาดและรวดเร็ว ประหยัดพลังงาน และประหยัดเนื้อที่ สามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ยางและออกแบบเครื่องไมโครเวฟต่อไป [1-4]

ในประเทศไทยมีบางงานวิจัยได้นำร่องศึกษานำคลื่นไมโครเวฟแบบหลายเฟส (Multi-phase) ซึ่งเป็นไมโครเวฟที่ใช้กันตามบ้านเรือนมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมยาง แต่ยังไม่ปรากฏการรายงานผลที่ชัดเจนในการอธิบายด้านโครงสร้างและหลักการอันตรกิริยาระหว่างคลื่นไมโครเวฟและยางธรรมชาติ เนื่องมาจากความซับซ้อนของกระบวนการและปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ดังนั้นคณะผู้วิจัยมีความมุ่งมั่นที่จะศึกษาการให้ความร้อนหรืออุ่นยาง (Pre-heating) โดยใช้พลังงานไมโครเวฟระบบท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมเป็นแบบเฟสเดียว (single phase) ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิ จำนวนกำลังวัตต์ที่ใช้ โดยจะศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางกายภาพ รวมถึงผลของ non-rubber content ที่มีในเนื้อยางหลังจากอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยเลือกยางธรรมชาติ 2 ชนิดคือ STR20 และ RSS3 ในการทำวิจัย โดยความรู้ที่ได้จะเป็นองค์ความรู้พื้นฐานในการนำไปประยุกต์ใช้งานในการออกแบบระบบไมโครเวฟที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง ได้แก่ การผลิตยางล้อรถยนต์ หรือผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่มีความหนาแน่นๆ ได้

ที่ผ่านมากลุ่มนักวิจัยที่ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ไมโครเวฟในการให้ความร้อนกับยางธรรมชาติ ได้แก่ ผดุงศักดิ์ และคณะ [5] ได้ทำการศึกษานำพลังงานไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้กับยางพาราและอุตสาหกรรมทางด้านเซรามิกส์ โดยที่การวิจัยดังกล่าวใช้อุปกรณ์คือ เตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง จากการทดลองในส่วนของยางพาราก็พบว่าสามารถช่วยลดขั้นตอนในการรีดแผ่นยาง โดยสามารถนำยางพาราทั้งก้อนไปทำการอบได้เลยซึ่ง

รัชดา [6] ได้ทำการศึกษาระดับเริ่มต้นถึงการนำพลังงานไมโครเวฟมาใช้ในการให้ความร้อนยางเปรียบเทียบกับวิธีการให้ความร้อนแบบธรรมดา พบว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟแบบคลื่นผสมในการให้ความร้อน ซึ่งเป็นการให้ความร้อนเชิงปริมาตรจะทำให้ยางมีความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและ

อุณหภูมิภายในเนื้อยางกระจายตัวอย่างทั่วถึงภายในเวลาอันรวดเร็วเนื่องจากความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นไมโครเวฟ

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

งานวิจัยที่ผ่านมา Eldon E. Anderson และคณะ [8] ศึกษาเกี่ยวกับ วิธีการและอุปกรณ์สำหรับให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟของวัสดุไหลและโดยเฉพาะอย่างยิ่งการตีวัลคาไนเซชันของชั้นส่วนเศษยา พบว่าเศษยางที่ผ่านการตีวัลคาไนซ์โดยการใช้พลังงานไมโครเวฟสามารถนำกลับมารีไซเคิลเป็นยางชนิดใหม่ได้ อย่างไรก็ตามการใช้งานของเทคนิคนี้มีข้อจำกัดเพราะว่าไม่สามารถหาวิธีที่เหมาะสมและอุปกรณ์ที่สามารถทำซ้ำได้เหมือนเดิม รวมถึงการขยายการผลิตในระดับที่มากขึ้นปกติยางเคียวได้ยากด้วยคลื่นไมโครเวฟเพราะว่ายางที่อุณหภูมิห้องนั้นไม่นำไฟฟ้า แต่การนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ หมายความว่า การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟจะมีประสิทธิภาพมากขึ้นถ้าเพิ่มอุณหภูมิให้เพียงพอกับการตีวัลคาไนเซชันบางส่วนของยางเนื่องจากเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าในยางดังกล่าว แต่ผลย้อนกลับที่ได้ทำให้เกิดสภาพความร้อนสูญเสียไปในตัวอย่างยางเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งตัวอย่างยางเมื่อเพิ่มความร้อนมากขึ้นมันจะทำดูดกลืนความร้อนไม่เหมาะสมกับพลังงานไมโครเวฟที่ให้เข้าไปทำให้เกิดความร้อนสะสมมากเกินไปและไหม้เป็นเปลวไฟได้ ความพยายามที่จะขึ้นรูปยางวัลคาไนซ์ใหม่ทำได้โดยการลำเลียงด้วยสายพานแล้วผ่านด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยระบบมีการพัฒนาการขนส่งลำเลียงวัสดุอย่างต่อเนื่องและให้ความร้อนหรือเกิดปฏิกิริยาในเตาอบไมโครเวฟขณะที่สภาวะเกิดการบ่มจะแยกออกจากบรรยากาศปกติ

2. วัตถุประสงค์ของโครงการ

2.1 เพื่อศึกษาโครงสร้าง สมบัติทางไฟฟ้า และทางกายภาพของยางแท่ง STR 20 และยางแผ่นรมควัน RSS3 หลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ

2.2 เพื่อศึกษาผลของการให้ความร้อน (pre-heating) ด้วยพลังงานไมโครเวฟที่มีการเชื่อมโยงพันธะของยางแท่ง STR 20 และยางแผ่นรมควัน RSS3 หลังการคอมเปา์

2.3 เพื่อศึกษาผลของ non-rubber ในยางแท่ง STR 20 และยางแผ่นรมควัน RSS3 ที่มีอยู่ในเนื้อยางหลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ

3. ทางเลือกและแนวทางการแก้ปัญหา

แม้ว่าในประเทศไทยได้มีการศึกษาการนำคลีนไมโครเวฟแบบหลายเฟส (Multi-phase) ซึ่งเป็นไมโครเวฟที่ใช้กันตามบ้านเรือนมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมยางบ้างเล็กน้อย แต่ยังไม่ปรากฏการรายงานผลที่ชัดเจนในการอธิบายด้านโครงสร้างและหลักการอันตรกิริยาระหว่างคลีนไมโครเวฟและยางธรรมชาติ เนื่องมาจากความซับซ้อนของกระบวนการและปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ดังนั้นคณะผู้วิจัยมีความตั้งใจที่จะศึกษาการให้ความร้อนหรืออุ่นยาง (Pre-heating) โดยใช้พลังงานไมโครเวฟโดยใช้ระบบท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมเป็นแบบเฟสเดียว (single phase) ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิ จำนวนกำลังวัตต์ที่ใช้ โดยจะศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางกายภาพ รวมถึงผลของ non-rubber content ที่มีในเนื้อยางหลังจากอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยเลือกยางธรรมชาติ 2 ชนิดคือ STR20 และ RSS3 ในการทำวิจัย โดยความรู้ที่ได้จะเป็นองค์ความรู้พื้นฐานในการนำไปประยุกต์ใช้งานในการออกแบบระบบไมโครเวฟที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง ได้แก่ การผลิตยางล้อรถยนต์ หรือผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่มีความหนาแน่นๆ ได้

4. สารเคมี อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

4.1. วัตถุดิบและสารเคมี

- 4.1.1 ยางแท่ง (Standard Thailand Rubber, STR20)
- 4.1.2 ยางแผ่นรมควัน (Ribbed Smoked Sheet, RSS3)
- 4.1.3 กำมะถัน (Sulfur) ซื้อจากบริษัท เคมีเคิล เอ็กซ์เพรส จำกัด
- 4.1.4 กรดสเตียริก (Stearic acid) ซื้อจากบริษัท เคมีเคิล เอ็กซ์เพรส จำกัด
- 4.1.5 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide) ซื้อจากบริษัท เคมีเคิล เอ็กซ์เพรส จำกัด
- 4.1.6 DPG (Diphenyl guanidine)
- 4.1.7 MBTS (Dibenzothiazyl disulphide)
- 4.1.8 ผงดำ (Carbon Black, grade N330)
- 4.1.9 ไอโซโพรพานอล (Isopropanol) ซื้อจากบริษัท Bang Trading (Thailand) Co., Ltd
- 4.1.10 โทลูอีน (Toluene) ซื้อจากบริษัท Bang Trading (Thailand) Co., Ltd

4.2. อุปกรณ์ในการทดลอง

- 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 ถังมือป้องกันความร้อน
- 4.2.6 แปรงทองเหลือง

- 4.2.7 มีดักเตอร์และไม้บรรทัดเหล็ก
- 4.2.8 แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นงาน
- 4.2.9 เครื่องไมโครเวฟ (Microwave Machine), ยี่ห้อ Micro Denshi, Japan และอุปกรณ์ประกอบดังแสดงในรูปที่ 1
- 4.2.10 เครื่อง Network Analyzer สำหรับการวัดค่า Dielectric Properties และอุปกรณ์ประกอบดังแสดงในรูปที่ 2
- 4.2.11 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR 470) ยี่ห้อ Nicolet ประเทศสหรัฐอเมริกา ดังแสดงในรูปที่ 3
- 4.2.12 เครื่องทดสอบความหนาแน่น ดังแสดงในรูปที่ 4

4.3. การเตรียมตัวอย่างยาง

4.3.1 การเตรียมตัวอย่างยางคอมปาว์

ยางคอมพาวด์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ยางธรรมชาติ สารวัลคาไนซ์ สารกระตุ้น สารตัวเติม และสารตัวเร่ง ดังแสดงอัตราส่วนการผสมของยางคอมพาวด์ในตารางที่ 1 การเตรียมยางคอมพาวด์ โดยเริ่มนำยางธรรมชาติมาทำการบดผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิประมาณ 50°C ใช้เวลาประมาณ 5 นาที จนยางเริ่มพ่นลูกกลิ้งมองเห็นเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นใส่ ZnO ลงไปบดผสมใช้มีดกรีดและบดผสมไปเรื่อยๆ ใช้เวลาประมาณ 3 นาที ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ใส่ Stearic acid ลงไปบดผสมใช้มีดกรีดและบดผสมไปเรื่อยๆ ใช้เวลาประมาณ 3 นาที ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ใส่ MBTS ลงไปบดผสมใช้มีดกรีดและบดผสมไปเรื่อยๆ ใช้เวลาประมาณ 3 นาที อุ่นผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ต่อมาใส่ DPG ลงไปบดผสมใช้มีดกรีดและบดผสมไปเรื่อยๆ ใช้เวลาอีกประมาณ 3 นาที และ ใส่ Sulphur ลงไปบดผสมใช้มีดกรีดและบดผสมไปเรื่อยๆ ใช้เวลาประมาณ 3 นาที และใส่เขม่าดำลงไปบดให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันอีก 3 นาที

ตารางที่ 1 แสดงอัตราส่วนยางคอมพาวด์ที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุดิบ	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3	สูตรที่ 4
STR20 หรือ RSS3	100	100	100	100
ZnO (Zinc Oxide)	5.0	5.0	5.0	5.0
Stearic Acid	1.0	1.0	1.0	1.0
MBTS(Dibenzothiazyl disulphide)	0.8	0.8	0.8	0.8
DPG (Diphenyl guanidine)	0.2	0.2	0.2	0.2
Sulphur	1.5	2.0	2.5	3.0
Carbon Black N330	10		10	10

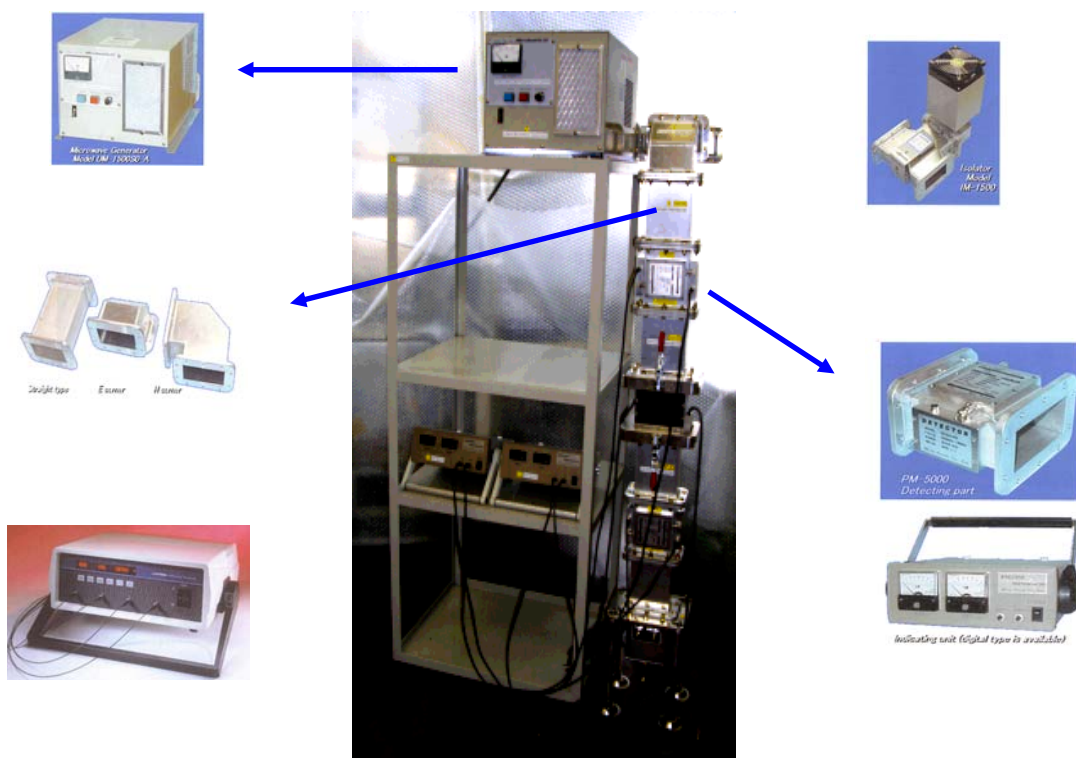
4.3.2 การเตรียมพิมพ์ของตัวอย่างชิ้นยาง

นำยางคอมปาว์ที่ผ่านเครื่องบดผสมแล้วในข้อที่ 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 หลังจากนั้นก็ให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยการปรับอุณหภูมิ เวลา และความเข้มข้นของคลื่นไมโครเวฟอย่างเหมาะสม



รูปที่ 1 แสดงเตาอบไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลอง

เตาอบไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย

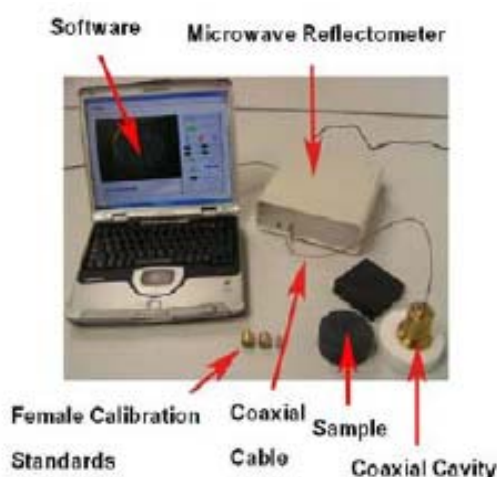
- เครื่องกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ ช่วงคลื่นที่ 2,450MHz เป็นเครื่องของไมโครเดนชิ โมเดล UN 1500

- ตัววัดคลื่นไมโครเวฟ ป้องกันการย้อนกลับของคลื่น เป็นเครื่องของไมโครเทนซิ โมเดล D 25 M-TM
- ท่อนำคลื่น สำหรับใส่ชิ้นงานทดสอบ ขนาดกว้าง 54.46 มิลลิเมตร ยาว 109.22 มิลลิเมตร สูง 50.00 มิลลิเมตร

4.4.2 วิธีการหา Dielectric properties

การวัดค่าไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) ของตัวอย่างทำได้โดยใช้เครื่องมือ Network Analyzer ดังแสดงในรูปที่ 2 เครื่องมือชุดวัดสมบัติไดอิเล็กตริกเน็ตเวิร์คแอนนาไลเซอร์ สามารถให้วัดวัสดุได้หลายประเภท หลายสถานะ เช่น วัสดุแข็ง วัสดุกึ่งแข็ง วัสดุที่เป็นผง รวมไปถึง วัสดุเหลว ตัวเครื่องมือประกอบที่จำเป็นต่อการวัดอย่างสมบูรณ์แบบ เช่น การรักษาสัญญาณ ไมโครเวฟ การคำนวณสัญญาณ การเก็บข้อมูลจากการคำนวณ และการนำผลดังกล่าวมาแสดงเป็น กราฟ การควบคุมระบบการทำงานทั้งหมดจะถูกควบคุมด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์เพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นภายในหัววัด (cavity) รวมไปถึงตัวแปรคุณภาพ (Quality factor) และนำข้อมูลที่ได้แปรกลับเป็นค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ถูกทดสอบ และผลการวัดจะถูกแสดงในรูปแบบกราฟหลายลักษณะและสามารถบันทึกข้อมูลเก็บไว้ได้ หัววัดที่ใช้วัดค่าถูกออกแบบมาอย่างเหมาะสม สามารถวัดวิเคราะห์วัสดุไดอิเล็กตริกได้หลายชนิด การวัดทำได้ง่ายเพียงนำหัววัดไปทาบกับวัสดุที่ต้องการทราบค่า ซึ่งหัววัดดังกล่าวมีข้อได้เปรียบที่ความยืดหยุ่นของการใช้งาน ความรวดเร็วในการวัดและความแม่นยำของข้อมูล

ขั้นตอนการวัดค่าสมบัติไดอิเล็กตริกเริ่มจากนำตัวอย่างชิ้นงาน มาเตรียมให้มีความหนาประมาณ 1 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 เซนติเมตร หลังจากนั้นทำการวัด 5 จุดต่อหนึ่งชิ้นงาน บันทึกค่าที่ได้แล้วนำมาหาค่า $\tan \delta$



รูปที่ 2 แสดงเครื่อง Network Analyzer

4.4.3 ศึกษาโครงสร้างด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy

การศึกษาโครงสร้างของยางธรรมชาติก่อนและหลังให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟสามารถทำได้โดยให้เทคนิคอินฟราเรด (FTIR-470, Nicolet, USA) ดังแสดงในรูป 3 นำสารตัวอย่างยางละลายด้วยคลอโรฟอร์ม และหยดเป็นฟิล์มบางๆ บนแผ่น KBr จากนั้นรอให้สารเคมีระเหย ก็ทำไปการทดสอบโดยให้คลื่นอินฟราเรดผ่านและประมวลผล



รูปที่ 3 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

4.4.4 วิธีการหาค่า % Crosslinking

การศึกษากการทนต่อความร้อนของยางธรรมชาติก่อนและหลังให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟสามารถทำได้โดยให้การหาค่า % crosslinking เนื่องจากเมื่อยางเกิดจุดเชื่อมโยงในโครงสร้างจะทำให้การทนต่อความร้อนเพิ่มมากขึ้น โดยวิธีการหาค่า เปอร์เซนต์การเชื่อมโยง (% crosslinking) ได้จากการนำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟแล้วมาตัดให้เป็นทรงสี่เหลี่ยมนำไปชั่งและบันทึกน้ำหนัก จากนั้นแช่ในโทลูอีนปริมาตร 30 มล.ทิ้งไว้ประมาณ 1 สัปดาห์ นำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้งและคำนวณหาค่าเปอร์เซนต์การเชื่อมโยงตามสูตรในสมการที่ 1 [9-11]

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

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 ($106.8 \text{ cm}^3/\text{mol}^{-1}$)

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

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

4.4.5 วิธีการหาค่าความหนาแน่น

การหาค่าความหนาแน่นทำได้โดยวิธีการชั่งน้ำ ชั่งอากาศ ใช้มาตรฐานอ้างอิง ASTM 792 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างมวลและปริมาตร พอลิเมอร์ที่ทราบความหนาแน่น และทำการชั่งน้ำหนักในอากาศจุ่มในไอโซโพรพานอล) Isopropanol (จะเกิดการสูญเสียน้ำหนักของพอลิเมอร์ ไปแทนที่น้ำหนักของไอโซโพรพานอล มีความหนาแน่น 0.8 g/cm³)

ความหนาแน่นหาได้จากการใช้ของเหลวที่ทราบความหนาแน่นที่แน่นอนซึ่งทำการชั่งน้ำหนักในอากาศและเมื่อจุ่มลงในของเหลวจากน้ำหนักทั้งสองความหนาแน่น (2ρ) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$2\rho = \frac{A}{A + B} \cdot \rho_0$$

หรือ

$$2\rho = \frac{A}{P} \cdot \rho_0$$

เมื่อ	2ρ	=	ความหนาแน่นของของแข็ง
	ρ_0	=	ความหนาแน่นของของเหลวที่ทดสอบที่อุณหภูมิ
	A	=	น้ำหนักของของในอากาศ
	B	=	น้ำหนักของของเมื่อจุ่มลงในของเหลว
	P	=	กำลังลอยตัวของของแข็งในของเหลวที่ทดสอบ

วิธีการทดสอบ

1. ทำการเตรียมตัวอย่างและสารตัวกลาง
2. ทำการติดตั้งอุปกรณ์โดยติดตั้ง wave basket ในปีกเกอร์ซึ่งมีไอโซโพรพานอล บรรจุอยู่ เหนือปีกเกอร์จะเป็น gem holder
3. ติดตั้ง gem holder
4. กด tare เครื่องชั่งให้เป็นศูนย์
5. คีบตัวอย่างมาวางบน gem holder ทำการอ่านค่าจากเครื่องชั่งในหน่วยกรัม บันทึกผลการชั่งน้ำหนักนี้เป็นน้ำหนัก A ของของแข็งเมื่อชั่งในอากาศ
6. เมื่ออ่านค่าแล้วคีบตัวอย่างออกมาวางบนภาชนะที่เตรียมไว้
7. คีบตัวอย่างจากขั้นตอนที่ 5 ที่อยู่ในภาชนะที่เตรียมไว้ในขั้นตอนที่ 6 ไปวาง wave basket ซึ่งอยู่ใน ไอโซโพรพานอลทำการอ่านค่าจากเครื่องชั่งในหน่วยกรัมบันทึกผลการชั่งน้ำหนักเป็นน้ำหนัก B
8. ของของแข็งเมื่อชั่งในไอโซโพรพานอล
9. ทำการทดลองซ้ำ 3-2 ครั้ง
10. นำค่าที่ได้มาคำนวณหาความหนาแน่นของพลาสติกนั้น



รูปที่ 4 เครื่องทดสอบหาค่าความหนาแน่น

4.4.6 วิธีการทดสอบปริมาณเถ้า (Determination of Ash Content)

เถ้า (Ash) ในยางธรรมชาติประกอบด้วยเกลืออนินทรีย์ (Inorganic salt) พวกคาร์บอเนตออกไซด์ และฟอสเฟตของโพแทสเซียม แมกนีเซียม แคลเซียม โซเดียมและแร่ธาตุอื่นๆ นอกจากนี้เถ้าอาจเป็นพวกซิลิกาหรือซิลิเกต ที่มีอยู่ในยางเองหรือปะปนมาจากข้างนอก ปริมาณเถ้าจะเป็นตัวบ่งชี้ปริมาณแร่ธาตุที่มีอยู่ในยางดิบและช่วยบ่งชี้ว่ามีการเติมสารตัวเติม (Filler) ลงไปเพื่อเพิ่มน้ำหนักยางหรือไม่ ทำตามมาตรฐาน ASTM D1278-91a Standard Test Method for Rubber from Natural Sources Chemical Analysis

วิธีการทดสอบคือ

1. ชั่งยางที่เตรียมไว้ให้ได้น้ำหนัก 5 กรัมและชั่งละเอียด 0.0001 กรัม
2. ห้อยยางด้วยกระดาษกรอง ใส่ในถ้วยทนความร้อน ที่สะอาด แห้ง และบันทึกน้ำหนักไว้แล้ว
3. นำเข้าเผาในเตาเผาอุณหภูมิที่ 550 C + 200 C จนกระทั่งการเผาไหม้สมบูรณ์ ใช้เวลาประมาณ 4-5 ชั่วโมง
4. ทำให้เย็นในเถ้าแก้วดูความชื้น แล้วชั่งละเอียด 0.0001 กรัม

วิธีการคำนวณ

$$\begin{aligned}\text{ปริมาณเถ้า} &= \frac{\text{น้ำหนักเถ้า/น้ำหนักชิ้นทดสอบ}}{\text{น้ำหนักชิ้นทดสอบ}} \times 100 \% \\ &= \frac{B-A}{W} \times 100 \%\end{aligned}$$

เมื่อ A = น้ำหนักถ้วยทนความร้อน หน่วยเป็นกรัม

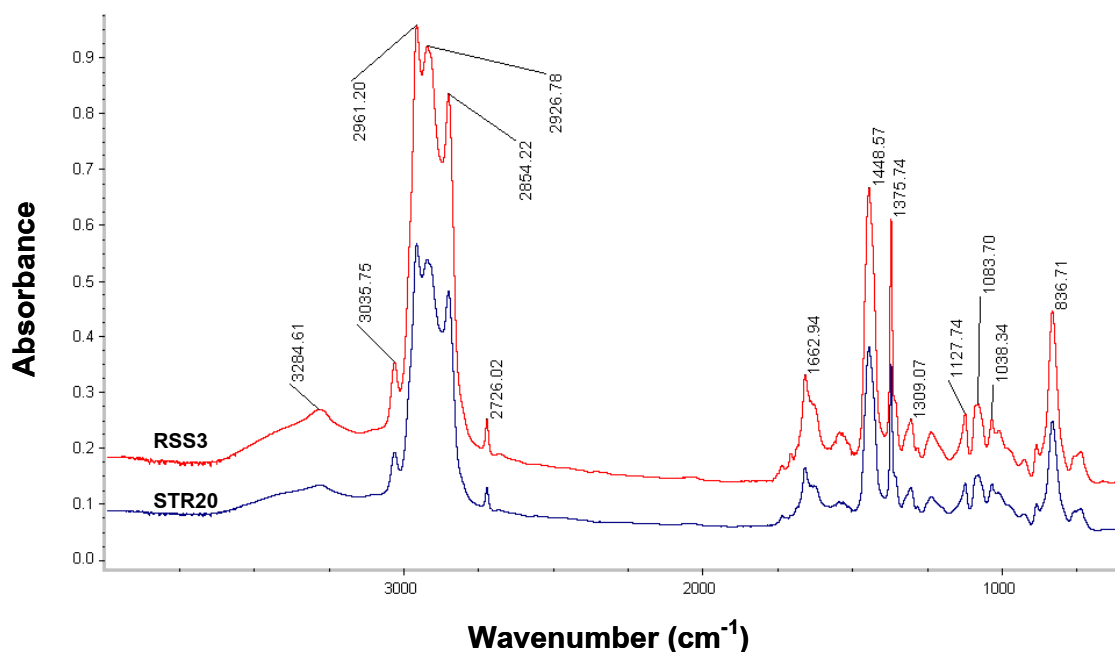
B = น้ำหนักถ้วยทนความร้อนพร้อมเถ้า หน่วยเป็นกรัม

W = น้ำหนักชิ้นทดสอบ หน่วยเป็นกรัม

5. ผลและการวิเคราะห์ผล

5.1 ลักษณะโครงสร้างของยางธรรมชาติ STR20 และ RSS3 ก่อนการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

นำยางธรรมชาติ STR20 และ RSS3 มาทำการศึกษาโครงสร้างภายในก่อนการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ รูปที่ 5 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของยางธรรมชาติ STR20 และ RSS3



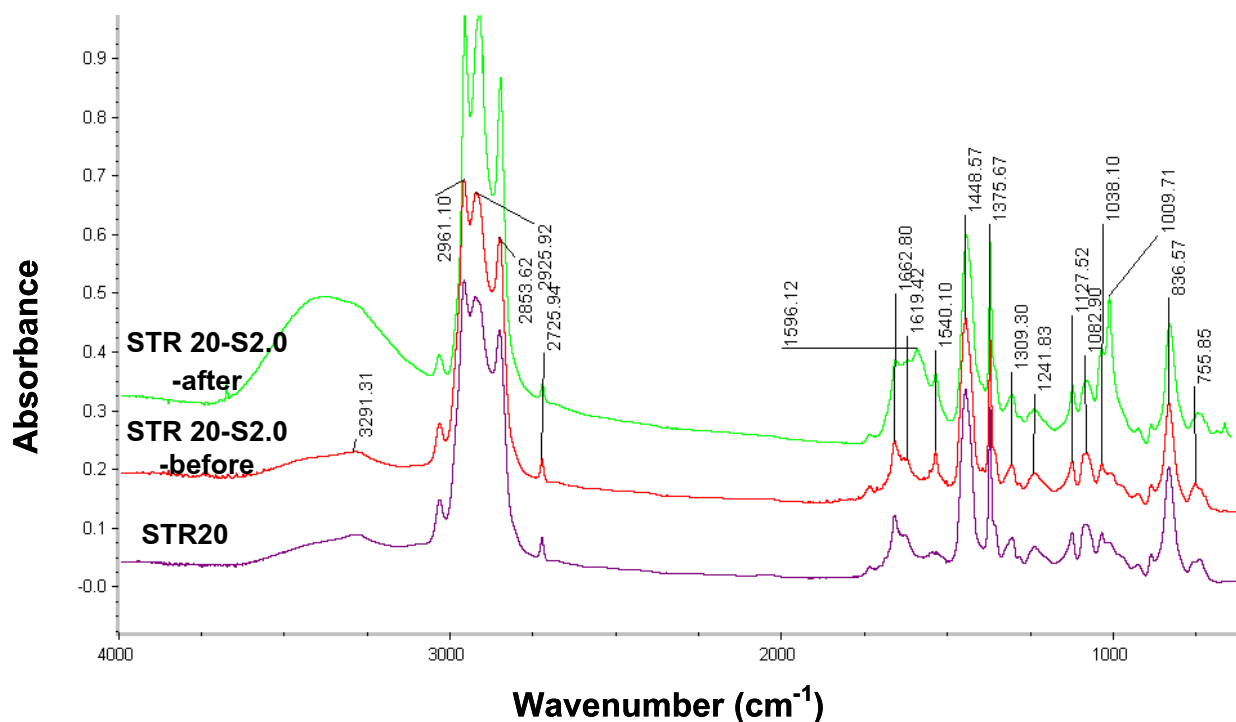
รูปที่ 5 อินฟราเรดสเปกตรัมของยางธรรมชาติ STR20 และ RSS3

จากรูปที่ 5 พบว่ายางธรรมชาติ STR20 และ RSS3 มีฟังก์ชันพื้นฐานของโพลีไอโซพรีน ดังนี้ คือ C-H asymmetric stretching ใน CH_3 , $-\text{CH}_2-$ และ $-\text{CH}_3$ แสดงฟังก์ชันที่ 2961, 2926 และ 2854 cm^{-1} ตามลำดับ ส่วนฟังก์ชันที่ 1448 และ 1375 cm^{-1} คือ $-\text{CH}_2-$ และ $-\text{CH}_3-$ ตามลำดับ นอกจากนี้ฟังก์ชันของ C=C bending และ stretching จะมีฟังก์ชันปรากฏที่ 836 และ 1663 cm^{-1} ตามลำดับ ระหว่างฟังก์ชันที่ 3300-3600 cm^{-1} คือ hydroxyl group ซึ่งพบฟังก์ชันสูงสุดอยู่ที่ 3284 cm^{-1} [10-11]

ยางธรรมชาติทั้งสองชนิดแสดงโครงสร้างที่คล้ายๆ กันดังรูปที่ 5 หลังจากนั้นนำยางธรรมชาติดังกล่าวมาผสมกับกำมะถัน เขม่าดำและสารอื่นๆ เพื่อทำคอมปาวด์ที่สูตรต่างๆ กัน แล้วนำมาให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ

5.2 ลักษณะโครงสร้างของยางธรรมชาติ STR20 และ RSS3 หลังให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ

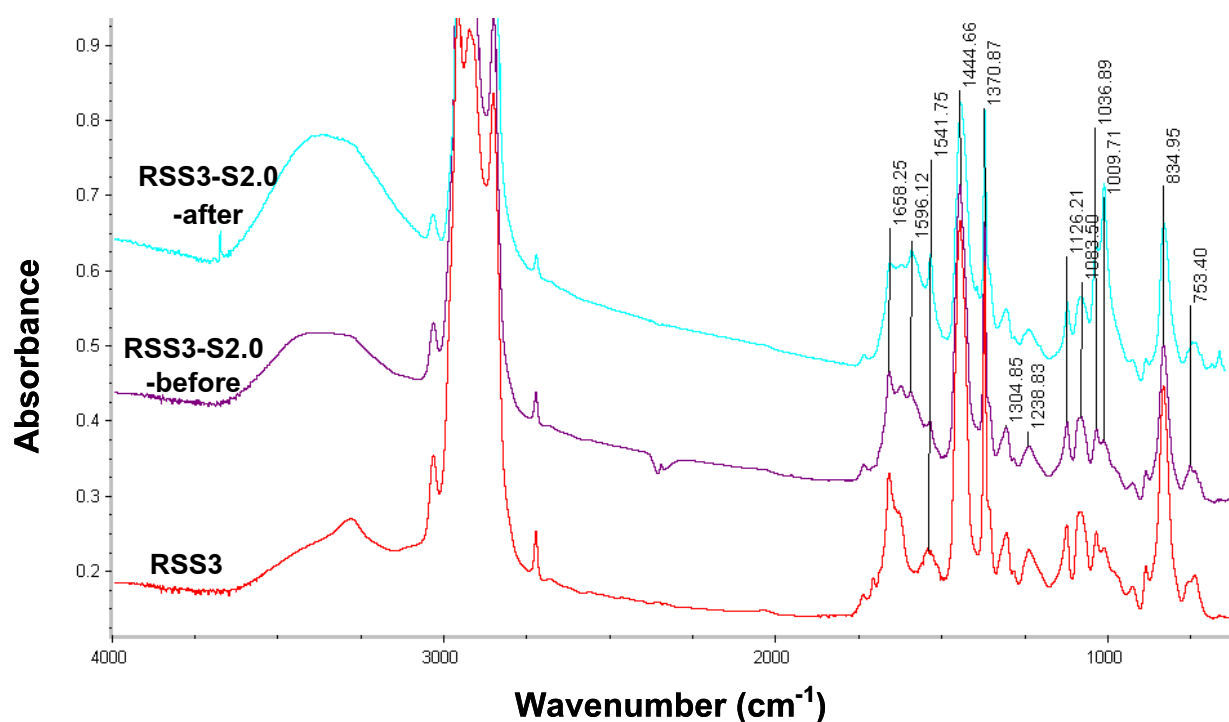
นำยางธรรมชาติคอมเปาต์ STR20 ผสมกับซัลเฟอร์ 2 phr มาทำการศึกษาโครงสร้างภายในก่อนและหลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟเปรียบเทียบกับยาง STR20 ก่อนคอมเปาต์ โดยควบคุมกำลังวัตต์ของคลื่นไมโครเวฟที่ความเข้มเท่ากับ 1,000 วัตต์ และความหนาชิ้นงาน 3 cm ดังแสดงในรูปที่ 6



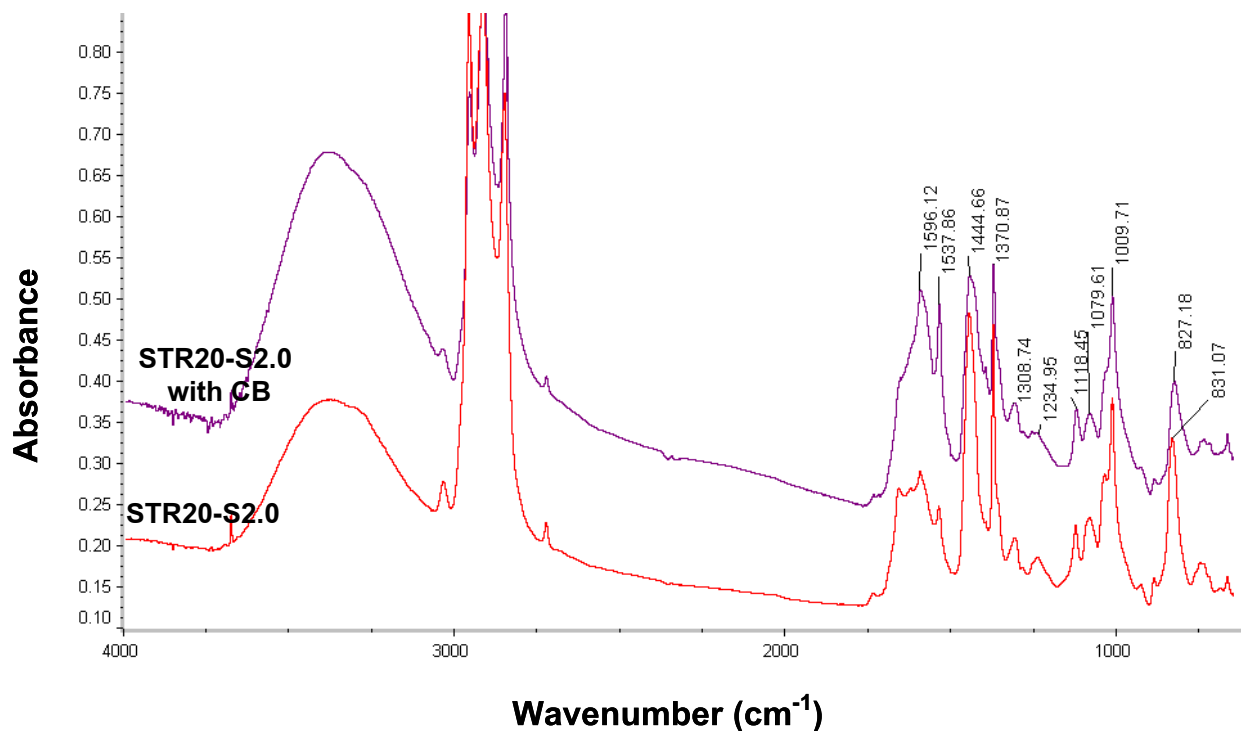
รูปที่ 6 อินฟราเรดสเปกตรัมของยาง STR20 เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ STR20 คอมเปาต์ก่อนผ่านและหลังผ่านพลังงานไมโครเวฟ

จากรูปที่ 6 พบว่ายางธรรมชาติคอมเปาต์ STR20 ก่อนผ่านพลังงานไมโครเวฟ (STR20-S2.0 before) มีลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของยางธรรมชาติคล้ายดังอธิบายในข้อที่ 5.1 แต่โครงสร้างของยางคอมเปาต์ STR20 หลังผ่านพลังงานไมโครเวฟ (STR20-S2.0 after) จะพบพีกใหม่เกิดขึ้นที่ 1596 cm⁻¹ และ 1009.71 cm⁻¹ แนะนำว่าน่าจะเกิดการเชื่อมโยงพันธะหลังให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ และพบพีกที่บริเวณ 3300-3600 cm⁻¹ ซึ่งแสดงถึงการดูดกลืนพลังงานของหมู่ไฮดรอกซี (-OH group)

นำยางธรรมชาติคอมเปาเวต์ RSS3 ผสมกับซัลเฟอร์ 2 phr มาทำการศึกษาโครงสร้างภายในก่อนและการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟเปรียบเทียบกับยาง RSS3 โดยควบคุมกำลังวัตต์ของคลื่นไมโครเวฟที่ความเข้มเท่ากับ 1,000 วัตต์ และความหนา 3 cm รูปที่ 7 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของยางธรรมชาติ RSS3 เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ RSS3 คอมเปาเวต์ก่อนและหลังผ่านพลังงานไมโครเวฟซึ่งจะพบการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างในลักษณะเดียวกันกับยางแท่ง STR20



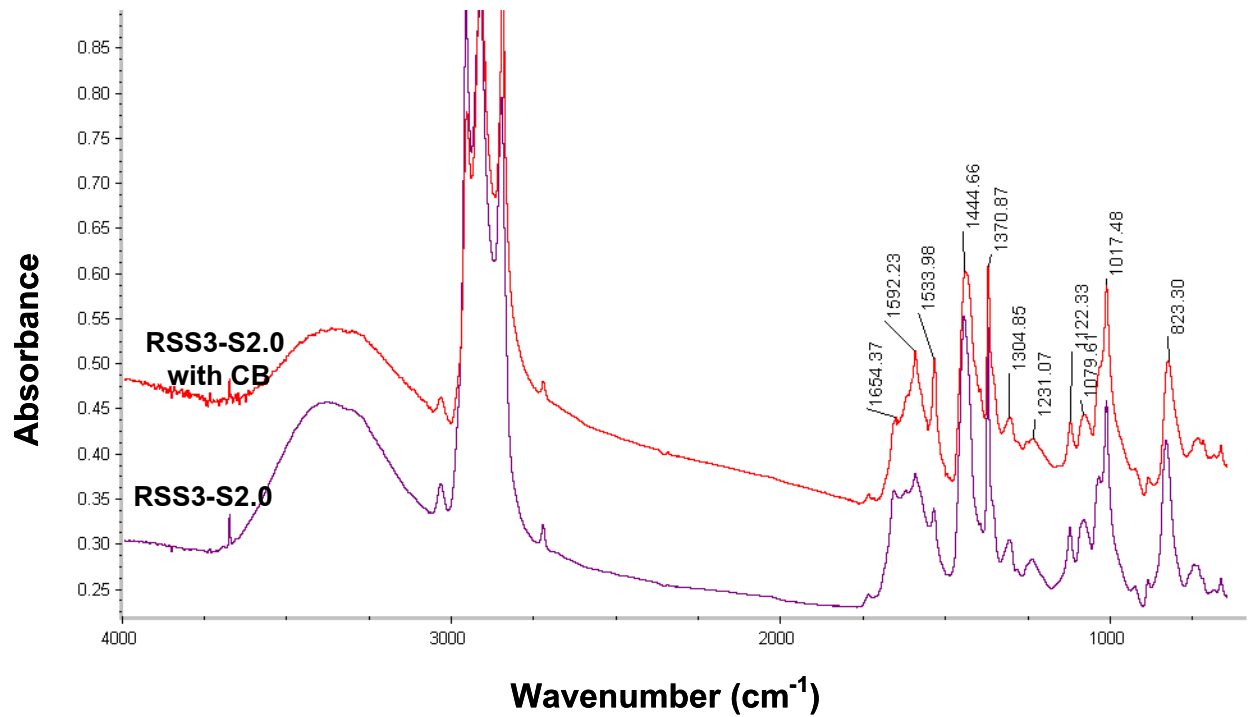
รูปที่ 7 อินฟราเรดสเปกตรัมของยางธรรมชาติ RSS3 เปรียบเทียบกับยาง RSS3 คอมเปาเวต์ก่อนและหลังผ่านพลังงานไมโครเวฟ



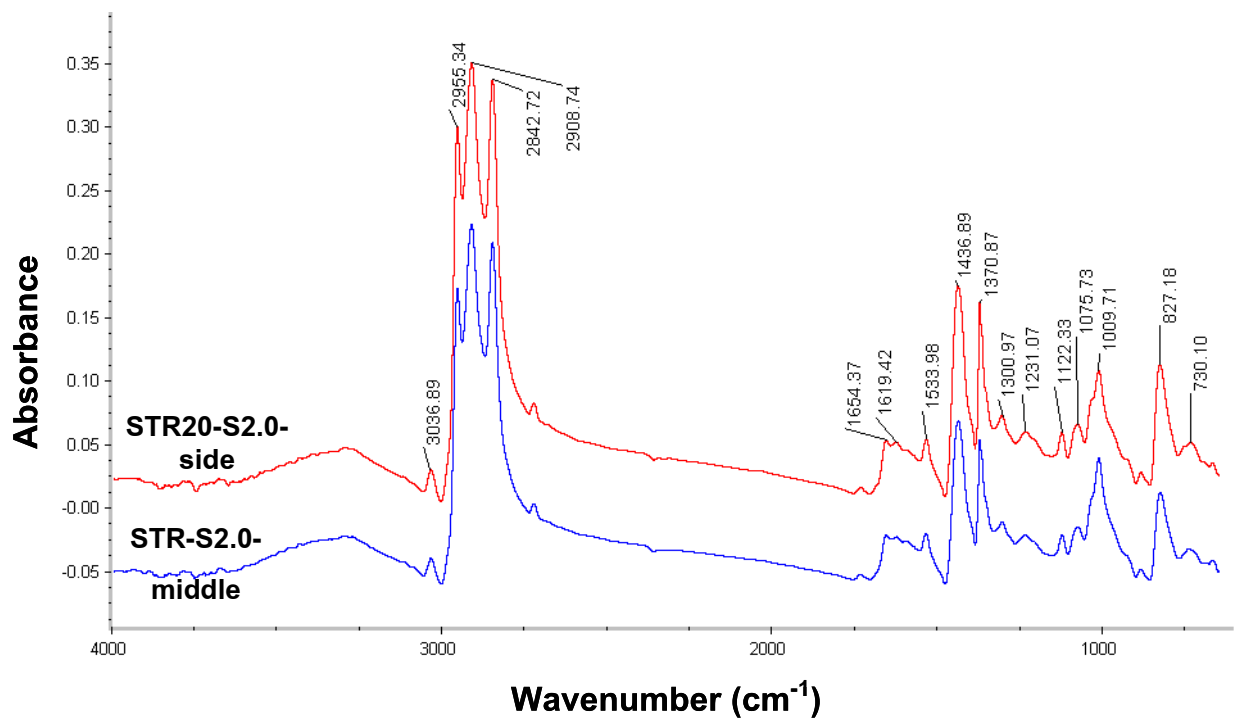
รูปที่ 8 อินฟราเรดสเปกตรัมของยางธรรมชาติ STR20 คอมเปาวด์เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ STR20 คอมเปาวด์ที่ผสมเขม่าดำหลังผ่านพลังงานไมโครเวฟ

หลังจากนั้นนำยางธรรมชาติ STR20 และ RSS3 ที่ผสมด้วยกำมะถัน 2 phr มาผสมกับเขม่าดำและตรวจดูโครงสร้างภายในหลังให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่ 1000 W สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9 ซึ่งพบว่าพีคของพันธะ C=C ในยางธรรมชาติทั้งสองชนิดมีค่าลดลงหลังจากที่เติมด้วยเขม่าดำ แนะนำว่าอาจจะมีการเชื่อมโยงพันธะเกิดขึ้น

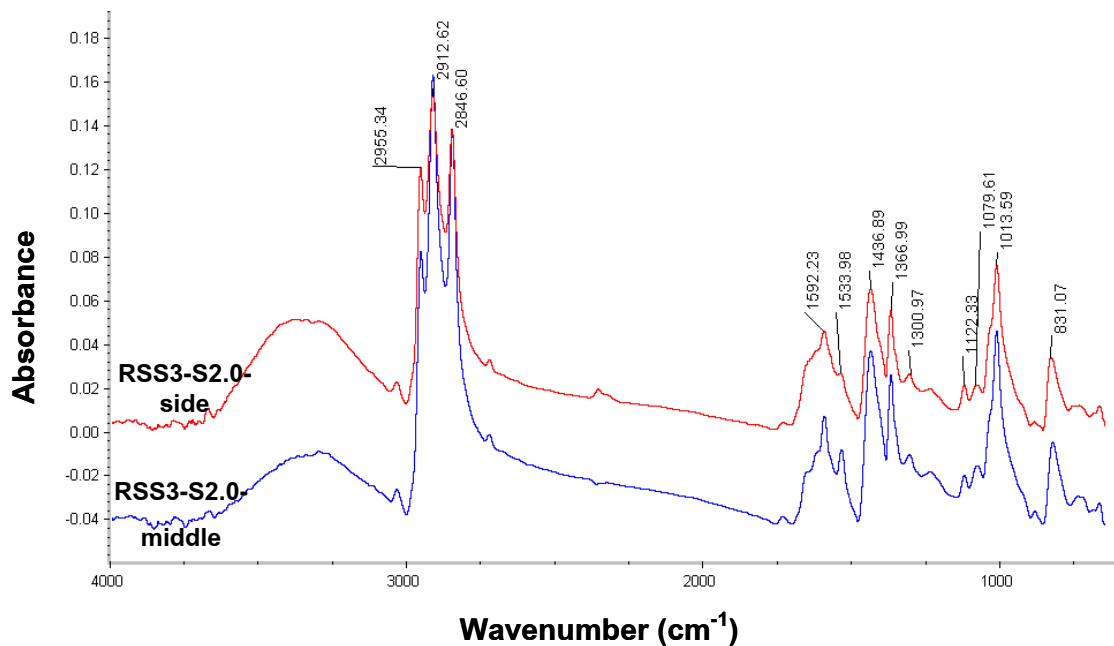
จากนั้นเรายืนยันผลการตรวจดูโครงสร้างภายในของยางธรรมชาติ STR20 และ RSS3 ที่ผสมด้วยกำมะถัน 2 phr หลังผ่านไมโครเวฟ โดยตัดส่วนด้านข้างและด้านในเพื่อนำมาทดสอบเนื่องจากคลื่นไมโครเวฟจะทะลุผ่านวัสดุและความร้อนจะเกิดจากภายในมาสู่ภายนอก ดังนั้นเราคาดว่าถ้ามีการเชื่อมโยงพันธะเกิดขึ้นดังนั้นวัสดุด้านในควรมีการเชื่อมโยงมากกว่าด้านนอก จากรูปที่ 10 และ 11 พบว่าพีคของพันธะ C=C ในยางธรรมชาติทั้งสองที่มาภายในชั้นงานของยางทั้งสองชนิดมีค่าน้อยกว่าด้านนอก แนะนำว่าน่าจะมาจากเชื่อมโยงซึ่งสามารถยืนยันด้วยการวัดค่า % Crosslinking ในส่วนที่จะอธิบายต่อไป



รูปที่ 9 อินฟราเรดสเปกตรัมของยางธรรมชาติ RSS3 คอมเปาวด์เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ RSS3 คอมเปาวด์ที่ผสมเขม่าดำหลังจากผ่านพลังงานไมโครเวฟ



รูปที่ 10 อินฟราเรดสเปกตรัมของยางธรรมชาติ STR20 คอมเปาวด์ชิ้นงานตรงกลางเปรียบเทียบกับด้านข้างหลังจากผ่านพลังงานไมโครเวฟ



รูปที่ 11 อินฟราเรดสเปกตรัมของยางธรรมชาติ RSS3 คอมเปาวด์ชิ้นงานตรงกลางเปรียบเทียบกับด้านข้างหลังผ่านพลังงานไมโครเวฟ

5.3 สมบัติทางไฟฟ้า (Dielectric Properties)

การศึกษาการอ่อนยางด้วยพลังงานไมโครเวฟซึ่งมีการให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง สมบัติไดอิเล็กทริกในวัสดุเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในกระบวนการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟเพราะสมบัติไดอิเล็กทริกเป็นสมบัติที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟและการผลิตพลังงานความร้อนที่เกิดจากการดูดซับพลังงานไมโครเวฟ ดังนั้นการวัดค่าสมบัติไดอิเล็กทริกในวัสดุที่ต้องการให้ความร้อนด้วยกระบวนการไมโครเวฟจึงจำเป็นอย่างยิ่ง ตารางที่ 1 แสดงค่า Dielectric constant (ϵ_r'), Dielectric loss factor (ϵ_r'') และค่า Loss tangent coefficient ($\tan \delta$) ของตัวอย่างยางธรรมชาติคอมเปาวด์ที่ไม่ใส่ขี้เถ้าและยางธรรมชาติคอมเปาวด์ที่ใส่ขี้เถ้า 10 phr และในแต่ละสูตรมีการเปลี่ยนปริมาณกำมะถันตั้งแต่ 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 phr ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าค่า ϵ_r' , ϵ_r'' และค่า $\tan \delta$ % ของยางธรรมชาติ STR20 ผสมกับกำมะถัน 2.0 phr ที่ไม่ได้เติมขี้เถ้า คือ 2.253, 0.00002 และ 0.000008 ตามลำดับ หลังจากเติมขี้เถ้าลงไป 10 phr ส่งผลทำให้ค่า ϵ_r' , ϵ_r'' และค่า $\tan \delta$ % ของยางธรรมชาติเปลี่ยนไปเป็น 3.349, 0.008 และ 0.003 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าปริมาณขี้เถ้าที่เติมลงไปส่งผลทำให้เนื้อยางธรรมชาติโดยปกติจะจัดว่าเป็นวัสดุไม่มีขั้ว (non-polar materials) กลายเป็นวัสดุที่มีขั้วได้ (polar materials) หลังจากที่มีการเติมขี้เถ้าลงไป ทำให้เกิดความร้อนขึ้นได้ ดังรายงานอื่นๆ [12-13] ทั้งนี้เนื่องจากว่าวัสดุยางดังกล่าวจะดูดซับพลังงานไมโครเวฟและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้มากขึ้น สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อคลื่นไมโครเวฟทะลุผ่านวัสดุไดอิเล็กทริกจะถูกดูดซับและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน เรียกว่า การกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (Q) ซึ่งจะสัมพันธ์กับ

สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในวัสดุไดอิเล็กตริก[12] โดยค่าของการกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร เมื่อสมมุติให้ไม่มีการสูญเสียสนามแม่เหล็ก แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$Q = \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' E^2$$

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

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)

$\tan \delta = \epsilon_r'' / \epsilon_r'$ คือความสามารถในการแปรเปลี่ยนพลังงานที่วัสดุดูดซับเป็นพลังงานความร้อน (Dielectric Loss Tangent Coefficient)

และจากตารางที่ 1 เรามีการเปลี่ยนปริมาณกัมมันต์ระหว่าง 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 phr ในแต่ละสูตร จากการทดลองพบว่าปริมาณกัมมันต์ที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลทำให้ค่าสมบัติทางไดอิเล็กตริกเปลี่ยนมากนัก

ตารางที่ 1 แสดงค่า Dielectric Constant (ϵ_r'), Dielectric Loss Factor (ϵ_r'') และค่า Loss Tangent Coefficient ($\tan \delta$) ของยางธรรมชาติ STR20 คอมเปาเวต์

Specimens	Dielectric Constant (ϵ_r')	Dielectric Loss Factor (ϵ_r'')	Loss Tangent Coefficient ($\tan \delta$)
STR20-S1.5	2.121	0.000010	0.000005
STR20-S2.0	2.253	0.000018	0.000008
STR20-S2.5	2.262	0.000005	0.000002
STR20-S3.0	2.207	0.000005	0.000003
STR20-S1.5-CB	3.345	0.011460	0.003435
STR20-S2.0-CB	3.349	0.007504	0.003221
STR20-S2.5-CB	3.417	0.016525	0.004775
STR20-S3.0-CB	3.210	0.010144	0.003096

หมายเหตุ

STR20-S1.5-C หมายถึง สูตรยางธรรมชาติ STR20 ที่ผสมกัมมันต์ (S) 1.5 phr และเขม่าดำ (CB) 10 phr ตามลำดับ

จากการทดลองเมื่อเปลี่ยนจากยางธรรมชาติ STR20 เป็น RSS3 พบว่าให้แนวโน้มที่เหมือนกันดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งแนะนำได้ว่ามีเพียงเฉพาะเขม่าดำเท่านั้นที่เป็นตัวแปรหลักต่อสมบัติทางไฟฟ้าของยางธรรมชาติคอมปาวด์ โดยเขม่าดำที่ใช้ คือ N330 ไม่ได้ตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยเครื่อง Network Analyzer แต่ตรวจวัดหลังจากที่เติมลงไปยางธรรมชาติเรียบร้อยแล้ว

ตารางที่ 2 แสดงค่า Dielectric Constant (ϵ_r'), Dielectric Loss Factor (ϵ_r'') และค่า Loss Tangent Coefficient ($\tan \delta$) ของยางธรรมชาติ RSS3 คอมปาวด์

Specimens	Dielectric Constant (ϵ_r')	Dielectric Loss Factor (ϵ_r'')	Loss Tangent Coefficient ($\tan \delta$)
RSS3-S1.5	2.274	0.000002	0.000005
RSS3-S2.0	2.138	0.000006	0.000003
RSS3-S2.5	2.222	0.000011	0.000005
RSS3-S3.0	2.250	0.000003	0.000002
RSS3-S1.5-CB	3.221	0.008370	0.002585
RSS3-S2.0-CB	3.195	0.008250	0.002557
RSS3-S2.5-CB	3.222	0.003762	0.001201
RSS3-S3.0-CB	3.012	0.005817	0.001822

หมายเหตุ

RSS3-S1.5-C หมายถึง สูตรยางธรรมชาติ RSS3 ที่ผสมกำมะถัน (S) 1.5 phr และเขม่าดำ (CB) 10 phr ตามลำดับ

5.4 ค่าความหนาแน่น (Density)

จากการทดสอบสมบัติทางกายภาพ คือความหนาแน่นของยางธรรมชาติ STR20 ก่อนและหลังอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟ 1000 วัตต์ พบว่า ความหนาแน่นของยางทั้ง STR20 และ RSS3 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากประมาณ 0.91 g/cm^3 เป็น 0.95 g/cm^3 หลังจากเติมซัลเฟอร์และเพิ่มเป็น 0.97 g/cm^3 หลังจากเติมเขม่าดำ แต่ไม่พบว่าความหนาแน่นของยางทั้งสองชนิดเกิดการเปลี่ยนแปลงหลังอุ่นด้วยไมโครเวฟ ดังแสดงในตารางที่ 4 และ 5

ตารางที่ 4 แสดงความหนาแน่นของยาง STR20 ก่อนและหลังอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟ 1000 วัตต์

วัสดุ	ความหนาแน่น (g/cm ³)	
	ก่อนเข้าไมโครเวฟ	หลังอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟ
ยางแท่ง STR 20	0.9088	0.9104
STR20-S2.0	0.9491	0.9414
STR20-S1.5-CB	0.9711	0.9732
STR20-S2.0-CB	0.9713	0.9702
STR20-S2.5-CB	0.9743	0.9776
STR20-S3.0-CB	0.9751	0.9801

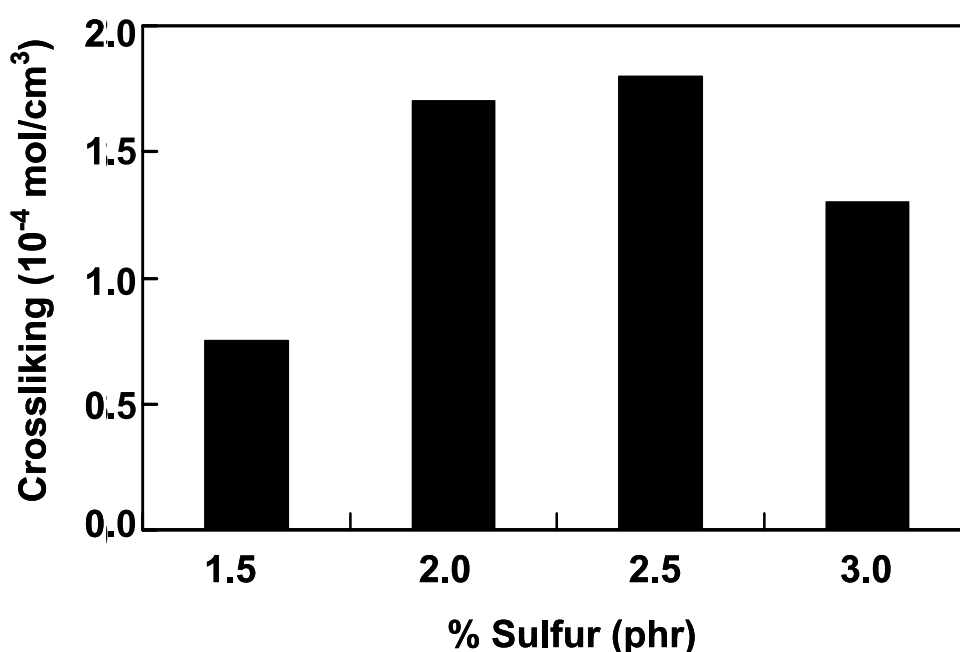
ตารางที่ 5 แสดงความหนาแน่นของยาง RSS3 ก่อนและหลังอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟ 1000 วัตต์

วัสดุ	ความหนาแน่น (g/cm ³)	
	ก่อนเข้าไมโครเวฟ	หลังอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟ
ยางแผ่น RSS3	0.9102	0.9113
RSS3-S2.0	0.9531	0.9546
RSS3-S1.5-CB	0.9734	0.9733
RSS3-S2.0-CB	0.9714	0.9714
RSS3-S2.5-CB	0.9732	0.9728
RSS3-S3.0-CB	0.9761	0.9758

5.5 ค่าเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยงพันธะ (%Crosslinking)

การหาเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยงพันธะในยาง กระทำได้โดยนำยางคอมปาวด์ที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟมาละลายในสารละลายโทลูอีน จากการทดสอบยางธรรมชาติทั้ง STR20 และ RSS3 พบว่าผลการเชื่อมโยงพันธะมีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยนำเสนอรูปกราฟของยางธรรมชาติ STR20 คอมปาวด์ที่เติมกำมะถันไป 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 phr ตามลำดับที่ความหนา 3 cm ใช้ผ่านไมโครเวฟกำลังวัตต์ 1000 วัตต์ ดังแสดงในรูปที่ 12 จากรูปพบว่าเมื่อปริมาณกำมะถันเปลี่ยนแปลง %Crosslinking ที่ได้จะเปลี่ยนไปด้วยดังนี้คือ จาก 0 เป็น 0.8, 1.6, 1.8 และ 1.3 mol/cm³ ตามลำดับ ในกรณีที่เติมกำมะถันลง 3.0 phr แต่ค่า %Crosslinking กลับลดลงเล็กน้อย สาเหตุอาจเกิดมาจากการผิดพลาดในการทดสอบ ดังนั้นควรมีการทดสอบเพิ่มเติม การเกิดการเชื่อมโยงสูงขึ้นส่งผลให้ยางธรรมชาติที่ได้มีความแข็งแรงมากขึ้น

ปกติโครงสร้างของยางธรรมชาติที่ยังไม่เติมสารเคมีจะมีพันธะคู่อยู่ซึ่งมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา เมื่อเติมกำมะถันเข้าไปรวมกับการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟจึงเกิดการแตกพันธะคู่ออกกลายเป็นพันธะเดี่ยวซึ่งมีความอึดตัวมากกว่า เราสามารถตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีได้โดยเทคนิคอินฟราเรด ของยางธรรมชาติก่อนและหลังอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ผ่านมาข้างต้น จากสเปกตรัมพบว่าพีคที่ความยาวคลื่น 836 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงพันธะ C=C ของหมู่ไอโซพรีนลดลง และพบพีคใหม่เกิดขึ้นที่ 1596 cm^{-1} ในอินฟราเรดสเปกตรัมของยางคอมพาวด์ที่ผ่านพลังงานไมโครเวฟดังรายละเอียดที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แสดงว่าการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟสามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงทางพันธะได้ เหมือนกับการใช้ความร้อนแบบธรรมดาในการอุ่นยาง



รูปที่ 12 แสดงเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยงพันธะของยางธรรมชาติ STR20 คอมพาวด์ที่เติมเซม่าต่ำลงไป 10 phr

5.6 ผลของ non-rubber ที่มีในเนื้อยางหลังอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟ

ผลของ non-rubber ในรูปแก้วที่มีในเนื้อยางหลังอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6 และ 7 ซึ่งใช้ยาง STR20 และ RSS3 ตามลำดับ จากผลการทดลองดังกล่าวพบว่าปริมาณแก้วที่มีในยางแท่ง STR20, STR20-S2.0, STR20-S1.5-CB, STR20-S2.0-CB, STR20-S2.5-CB and STR20-S3.0-CB มีค่าเท่ากับ 0.17% , 0.18%, 0.60%, 0.61%, 0.59% และ 0.62% ตามลำดับ หลังจากอุ่นด้วยไมโครเวฟไม่พบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแก้วในเนื้อยางดังแสดงค่าในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงปริมาณกำมะถันที่มีอยู่ในเนื้อยาง STR20 ก่อนและหลังอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟ 1000 วัตต์

วัสดุ	ปริมาณกำมะถัน (%wt)	
	ก่อนเข้าไมโครเวฟ	หลังอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟ
ยางแท่ง STR 20	0.17%	0.16%
STR20-S2.0	0.18%	0.18%
STR20-S1.5-C	0.60%	0.61%
STR20-S2.0-C	0.61%	0.63%
STR20-S2.5-C	0.59%	0.61%
STR20-S3.0-C	0.62%	0.62%

ในกรณีที่ใช้อย่างคนละชนิดกัน ได้แก่ RSS3 ผลการทดลองพบว่า ปริมาณกำมะถันที่มีในยางแผ่น RSS3, RSS3-S2.0, RSS3-S1.5-CB, RSS3-S2.0-CB, RSS3-S2.5-CB and RSS3-S3.0-CB มีค่าเท่ากับ 0.40% , 0.42%, 1.04%, 1.10%, 1.11% และ 1.01% ตามลำดับ หลังจากอุ่นด้วยไมโครเวฟ ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณกำมะถันในเนื้อยางเช่นกัน ดังแสดงค่าในตารางที่ 7 เราสามารถบอกได้ว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟไม่ได้ส่งผลต่อการลดลงของสารอื่นๆ ที่อยู่ในเนื้อยางเลย

ตารางที่ 7 แสดงปริมาณกำมะถันที่มีอยู่ในเนื้อยาง RSS3 ก่อนและหลังอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟ 1000 วัตต์

วัสดุ	ปริมาณกำมะถัน (%wt)	
	ก่อนเข้าไมโครเวฟ	หลังอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟ
ยางแผ่น RSS3	0.40%	0.40%
RSS3-S2.0	0.42%	0.41%
RSS3-S1.5-C	1.04%	0.99%
RSS3-S2.0-C	1.10%	1.04%
RSS3-S2.5-C	1.11%	1.10%
RSS3-S3.0-C	1.01%	1.07%

6. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

6.1 โครงสร้างของยางธรรมชาติที่ศึกษา คือ STR20 และ RSS3 ไม่พบพีกที่บ่งถึงปฏิกิริยาเคมีหรือโครงสร้างที่ถูกทำลายที่เกิดขึ้นเนื่องจากการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ แต่พบพีกที่ 1596 cm^{-1} หลังจากอุ่นด้วยไมโครเวฟซึ่งสันนิษฐานว่าเป็นจุดเชื่อมโยงพันธะที่เกิดขึ้น

6.2 สมบัติทางไฟฟ้าของยาง STR20 และ RSS3 เมื่อปริมาณกำมะถันเปลี่ยนจาก 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 phr ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก แต่พบการเปลี่ยนแปลงมากเมื่อมีการเติมเซมาต่ำลงไปเพียง 10 phr ทำให้ค่า ϵ' , ϵ'' และค่า $\tan \delta$ % ของยางธรรมชาติ STR20 และ RSS3 ที่ไม่ได้เติมเซมาต่ำ คือ 2.121, 0.000007 และ 0.000004 เปลี่ยนไปเป็น 3.3, 0.01 และ 0.003 ตามลำดับหลังเติมเซมาต่ำ

6.3 ความหนาแน่นของยางทั้ง STR20 และ RSS3 เพิ่มขึ้นจากประมาณ 0.91 g/cm^3 เป็น 0.97 g/cm^3 หลังจากเติมซัลเฟอร์และเซมาต่ำ แต่ไม่เปลี่ยนแปลงหลังอุ่นด้วยไมโครเวฟ

6.4 หลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟแก่ชิ้นงานยางธรรมชาติ STR20 และ RSS3 ที่มีความหนา 3 cm สามารถทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงพันธะได้ โดยเปลี่ยนจาก 0 mol/cm^3 เป็น 0.8, 1.6, 1.8 และ 1.3 mol/cm^3 เมื่อให้พลังงานไมโครเวฟที่ 1000 W แก่ยางทั้งสองชนิดที่มีปริมาณกำมะถันเป็น 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 phr ตามลำดับ

6.5 ปริมาณแก้วหรือสารที่ไม่ใช่เนื้อยางในยาง STR20 เพิ่มขึ้นจาก 0.17% เป็น 0.60% เมื่อเติมเซมาต่ำลงไป 10 phr และไม่พบการเปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถัน ส่วนกรณีของยาง RSS3 ค่าปริมาณแก้วเพิ่มขึ้นจาก 0.40% เป็นประมาณ 1.10% เมื่อเติมเซมาต่ำลงไป 10 phr และไม่พบการเปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถันเช่นเดียวกัน หลังจากนำยางดังกล่าวทั้งสองชนิดไปอุ่นด้วยไมโครเวฟปริมาณแก้วที่ได้พบว่าปริมาณไม่เปลี่ยนแปลง

7. 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] Nicholas P. Cheremisinoff. *Elastomer Technology Handbook*, CRC Press, Inc. USA; **1993**.
- [4] Roberts AD. *Natural Rubber Science and technology*. Brickendonbury. Oxford University; **1988**.
- [5] ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, ดวงเดือน อัจจงค์, ณัฐวุฒิ สุวรรณภูมิ, สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย และสุชนม์ ปิยโชติ “การวิเคราะห์กระบวนการให้ความร้อนในวัสดุไดอิเล็กตริกโดยใช้เตาไมโครเวฟ ชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18 (ME-NETT 18) จังหวัดขอนแก่น, 18-20 ตุลาคม 2547
- [6] รัชดา โสภาคะยัง การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 1, 2548, ชลบุรี
- [7] ณัฐพงศ์ นิธิอุทัย และदनย์ปภพ จั้ววิเชียร หนังสืองานวิจัยทางพาราเพื่ออนาคตที่ยั่งยืน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ปี 2549
- [8] Eldon E. Anderson. *US Patent No. 4,129,768*; **1978**.
- [9] L.H., Sperling, **1932**. Introduction to Physical Polymer Science, 4th ed., John Wiley and Son Inc. USA.
- [10] 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.; **1996**
- [11] Brandrup, J., and Immergut, E.H., **1989**. Polymer handbook. 3rd ed., A WILEY-INTERSCIENCE publication. USA.
- [12] Metaxas AC. And Meridith RJ. *Industrial Microwave Heating*. Peter Peregrinus, Ltd. London; **1983**.
- [13] Peter A. Ciullo and Norman Hewitt. *The Rubber Formulary*, Noyes Publications, Norwich New York, USA; **1999**.

8. ข้อคิดเห็นและเสนอแนะ สกว.

1. ข้อคิดเห็นของคณะทำงานวิจัยนี้พบจากการทดลองว่าชิ้นงานที่ได้หลังจากอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ด้วยพลังงานไมโครเวฟเกิดการบวมตัวทางด้านล่างที่กำลังวัตต์ 500 วัตต์และการบวมตัวจะลดลงที่กำลังวัตต์ 1,000 วัตต์ นอกจากนี้ยังเกิดฟองอากาศขึ้นในชิ้นงานอีกด้วย ซึ่งจะทำให้การศึกษาเพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าวต่อไป

2. จากการศึกษาการใช้ความร้อนแก่ยางธรรมชาติด้วยเครื่องไมโครเวฟชนิดทรงเหลี่ยม (Rectangular Wave Guide, Mode TE₁₀) ไม่เหมือนระบบไมโครเวฟแบบทั่วไป โดยระบบจะใช้คลื่นแบบเดี่ยว มีข้อดีคือเราสามารถควบคุมความร้อนและเวลาได้เป็นอย่างดี สามารถคำนวณเป็นสมการทางความร้อนของยางธรรมชาติได้ ดังนั้นถ้าทำการศึกษาอย่างต่อเนื่องเสริมข้อมูลให้ละเอียดครบถ้วน เสนอแนะว่าสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในอุตสาหกรรมยางที่ต้องการใช้พลังงานไมโครเวฟมาทำการอุ่นยางอีกด้วย

3. พบว่าตัวอย่างยางธรรมชาติที่ผ่านให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟมีโครงสร้างภายในที่ไม่เปลี่ยนแปลงและไม่ผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพ และอื่นๆ ของยางคอมพาวด์ อีกทั้งการอุ่นยางด้วยพลังงานไมโครเวฟสามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงพันธะได้ $1.8 \times 10^{-4} \text{ mol/cm}^3$ ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้นในระยะเวลาสั้น แม้ยังไม่ได้นำมาให้ความร้อนโดย compression ทางคณะทำงานวิจัยจึงมีข้อเสนอแนะถึงความเป็นไปได้ในการนำความรู้และเทคโนโลยี ด้านพลังงานไมโครเวฟไปใช้ในการออกแบบเครื่องไมโครเวฟที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ตัวอย่างยางได้อย่างเหมาะสม น่าจะนำเทคโนโลยีดังกล่าวนี้มาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยางที่ทำการผลิตล้อยรถยนต์หรือชิ้นงานที่มีความหนาหลายๆ และต้องการลดระยะเวลาในการให้ความร้อนหรือทำให้ปริมาณน้ำลดลงได้เป็นอย่างดี

9. ภาคผนวก

วัตถุประสงค์ข้อที่.....	กิจกรรมที่วางแผนไว้	กิจกรรมที่ดำเนินการมา	โดยทำให้....	ผลที่ได้รับตลอดโครงการ
ข้อที่ 1 คือ เพื่อศึกษาโครงสร้าง สมบัติทางไฟฟ้าและทางกายภาพของยางแท่ง STR 20 และยางแผ่นรมควัน RSS3 ก่อนการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ	1.เตรียมยางธรรมชาติคอมเปาต์ทั้งยางแท่ง STR 20 และแผ่นรมควัน RSS3 2.ทำการวัดด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ 1000 วัตต์ ความหนา 3 cm 3. วัดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง ไฟฟ้า และกายภาพด้วย FTIR, Network Analyzer, Density	1. ได้ยาง STR20 compounding และยาง RSS3 compounding 2. ได้ชิ้นงานหนา 3 cm 3. ได้กราฟจาก อินฟราเรดสเปกตรัม ค่าไดอิเล็กตริกและความหนาแน่นก่อนและหลังผ่านไมโครเวฟ	โดยทำให้สามารถให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟแก่ยางแท่ง STR 20 และแผ่นรมควัน RSS3 ได้รวดเร็ว โดยไม่เสียรูปร่างด้านโครงสร้างโดยพบพีกใหม่ที่ 1596 cm^{-1} หลังจากผ่านไมโครเวฟและสมบัติทางกายภาพไม่เปลี่ยนแปลง	ทราบถึงโครงสร้างและสมบัติทางไดอิเล็กตริกและความหนาแน่นของยางแท่ง STR 20 และแผ่นรมควัน RSS3 ได้ และสามารถใช้พลังงานไมโครเวฟและกำลังวัตต์ที่เหมาะสมคือ 1000 W โดยไม่ทำลายโครงสร้างภายในยางและสมบัติทางกายภาพ
ข้อที่ 2 คือ ผลของการให้ความร้อน (pre-heating) ด้วยพลังงานไมโครเวฟที่มีต่อ % crosslinking ของยางแท่ง STR 20 และยางแผ่นรมควัน RSS3 หลังการคอมเปา์	จะทำการวัดปริมาณการเกิดการเชื่อมโยงพันธะในยางก่อนและหลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟเมื่อปริมาณกำมะถันเปลี่ยนจาก 0 เป็น 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 phr ตามลำดับ	ได้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงการเชื่อมโยงในชิ้นงานหลังการจากอุ่นด้วยเครื่องไมโครเวฟที่ 1000 W	โดยทำให้ยางแท่ง STR 20 และแผ่นรมควัน RSS3 เกิดการเชื่อมโยงพันธะได้ โดยเปลี่ยนจาก 0 เป็น 0.8, 1.6, 1.8 และ 1.3 mol/cm^3 เมื่อมีปริมาณกำมะถันเป็น 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 phr ตามลำดับ	ทราบว่า การอุ่นยางด้วยพลังงานไมโครเวฟนอกจากจะทำให้ความชื้นลดลงได้แล้วยังสามารถทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงด้วยการเชื่อมโยงพันธะได้อีกด้วยซึ่งพบพีกใหม่เกิดขึ้นที่ 1596 cm^{-1} ในอินฟราเรดสเปกตรัม

วัตถุประสงค์ข้อที่.....	กิจกรรมที่วางแผนไว้	กิจกรรมที่ดำเนินการมา	โดยทำให้....	ผลที่ได้รับตลอดโครงการ
ข้อที่ 3 คือ เพื่อศึกษาผลของ non-rubber ในยางแท่ง STR 20 และยางแผ่นรมควัน RSS3 ที่มีอยู่ในเนื้อยางหลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ	จะทำการวัดปริมาณถ่านในยางก่อนและหลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ	ทราบค่าปริมาณความชื้นในชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องไมโครเวฟที่ความหนาต่างๆ กัน	โดยทำให้ปริมาณถ่านในยางธรรมชาติ STR20 จากเดิม 0.17% และยางธรรมชาติ RSS3 จากเดิม 0.40% ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ	ทราบถึงการอ่อนยางด้วยพลังงานไมโครเวฟไม่มีผลกระทบมาจาก non-rubber ทั้งในยางแท่ง STR 20 และยางแผ่นรมควัน RSS3

คำชี้แจงของนักวิจัยต่อข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ

ทางคณะผู้วิจัยต้องขอขอบคุณสำหรับข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการอย่างมาก และได้จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์ตามคำแนะนำดังต่อไปนี้

1. ได้แก้ไขคำผิดในแบบสรุปโครงการวิจัยหน้า 1/3, 2/3 และ 3/3 เรียบร้อยแล้ว ดังข้อเสนอแนะข้อ 1 และ 2
2. ข้อเสนอแนะข้อ 3 ให้เขียน NR แทนด้วย STR20 และ RSS3 ลงในตารางและตัดคำอธิบายออก ได้ทำการแก้ไขเรียบร้อยแล้ว ดังแสดงในตารางผลการทดลองที่ 2-7
3. ข้อเสนอแนะข้อ 4 คือให้ใส่เลขหน้าในรายงานฉบับสมบูรณ์ด้วย ได้ใส่เรียบร้อยแล้ว
4. ข้อเสนอแนะข้อ 5 ได้แก้ไขการพิมพ์ผิดพลาดของพิก $C=C$ ในอินฟราเรดสเปกตรัม พบที่ 836 cm^{-1} ไม่ใช่ที่ 384 cm^{-1} ได้แก้ไขเรียบร้อยแล้วในหน้า 23 หัวข้อ 5.5
5. ข้อเสนอแนะข้อ 6 ตัดคำว่า green ออก เปลี่ยนเป็น STR20-S2.0 แทน STR20-green ซึ่งจะหมายถึงยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมด้วยเขม่าดำ
6. ข้อเสนอแนะข้อ 7,8 และ 9 ได้แก้ไขเรียบร้อยแล้วในเรื่องการอธิบายผลการทดลองเพิ่มเติม
7. ตอบข้อเสนอแนะข้อ 10 เรื่องอุณหภูมิการเตรียมยางคอมปาวด์ด้วยเครื่องบดลูกกลิ้งคู่ที่ภาควิชาวิศวกรรมพลาสติก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ปกติเราจะตั้งอุณหภูมิที่ขึ้นหน้าจอเครื่องไว้ที่ 50 องศาเซลเซียส แต่เนื่องจากการเสียดสีและทำการตียางเป็นเวลาประมาณ 20 นาทีจะทำให้เกิดความร้อนสะสมที่เกิดกับยางจนเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ โดยถ้าเราตั้งไว้ที่ 70 องศาเซลเซียสถ้าเราทำการตียางไปเรื่อยๆ ยางจะเกิดไหมได้
8. ข้อเสนอแนะข้อ 11 และ 14 ได้ทำการแก้ไขเรียบร้อยแล้ว
9. ข้อเสนอแนะข้อ 15 จะจัดทำหนังสือขออนุญาตย้อนหลังให้ทาง สกว. รวมทั้งการ Acknowledge TRF ในฐานะผู้ให้ทุน ในกรณีที่จะเผยแพร่ผลงานวิจัย