



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ ศึกษาผลของอุณหภูมิและขนาดความหนาชิ้นงานที่มี
ต่อความชื้นในยางแท่ง STR20 และ RSS3 หลังการ
ให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ
(Effect of Temperature and Sample Thickness on
Moisture Content in STR20 and RSS3 after Pre-
heating by Microwave Energy)

โดย ดร.วารุณี กลิ่นไกล และคณะ

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ ศึกษาผลของอุณหภูมิและขนาดความหนาชิ้นงานที่มี
 ต่อความชื้นในยางแท่ง STR 20 และ RSS 3 หลังการ
 ให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ

(Effect of Temperature and Sample Thickness on
Moisture Content in STR20 and RSS3 after Pre-
heating by Microwave Energy)

คณะผู้วิจัย	สังกัด
1. ดร.วารุณี กลิ่นไกล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
2. นายธีรพงศ์ หนูแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
3. นางสาวนุสรินทร์ นุราช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ชุดโครงการ โครงการวิจัยยางพาราขนาดเล็ก (Small Project Rubber)

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

แบบสรุปโครงการวิจัย

สัญญาเลขที่... RDG4950023...ชื่อโครงการ...ศึกษาผลของอุณหภูมิและขนาดความหนา
ชั้นงานที่มีต่อความขึ้นในยางแท่ง STR20 และ RSS3 หลังการให้ความร้อนด้วยพลังงาน
ไมโครเวฟ..หัวข้อโครงการ...ดร. วารุณี กลิ่นไกล....สถาบัน....มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลธัญบุรี โทรศัพท์.....02 549 3484-5 โทรสาร..02 549 3483.....
E-mail:... warunee.a@en.rmutt.ac.th, k_warunee@yahoo.com.....

ความสำคัญ / ความเป็นมา

ที่มาของปัญหาที่พบในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ของอุตสาหกรรมยาง คือ มีขั้นตอนหนึ่งที่มี
บทบาทสำคัญในการอบให้ความร้อนก่อนการเคียวยาง วิธีดั้งเดิมที่ใช้ลมร้อนโดยวิธีธรรมชาติ
ยังมีปัญหาเรื่องความไม่สมบูรณ์ของเนื้อยางและปัญหาความล่าช้าของกระบวนการผลิต ความ
ร้อนที่ป้อนให้แก่วัสดุนั้นจะสัมผัสเฉพาะที่ผิวหน้าวัสดุที่นำมาจากกระบวนการเท่านั้น ซึ่งทำให้
การกระจายความร้อนเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้อันตริยาที่เกิดขึ้นกับเนื้อยางธรรมชาติ
เป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอซึ่งมีผลต่อสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ของยางธรรมชาติ
ด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ตำแหน่งที่วัสดุสัมผัสความร้อนโดยตรงอาจจะเกิดการเสียหายได้เพราะ
ต้องใช้เวลาจนกว่าความร้อนจะเข้าถึงภายในเนื้อวัสดุอย่างทั่วถึง ด้วยเหตุนี้ ทำให้ต้องเสีย
พลังงานและใช้เวลานาน รวมถึงการควบคุมคุณภาพทำได้ยากลำบาก จึงมักมีปัญหาในเรื่องของ
การส่งออก ดังนั้นจึงมีแนวคิดนำพลังงานไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมยาง แต่ใน
ประเทศไทยยังมีการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องนี้้อย่างน้อยโดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมยางพารา
อันเนื่องมาจากความซับซ้อนของกระบวนการและปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น แต่งานวิจัยนี้จะ
ทำการศึกษาการให้ความร้อนหรืออุ่นยาง (Pre-heating) โดยใช้พลังงานไมโครเวฟระบบท่อนำ
คลื่นทรงสี่เหลี่ยมเป็นแบบเฟสเดียว (single phase) ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิ จำนวนกำลัง
วัตต์ที่ใช้ โดยจะศึกษาผลของอุณหภูมิและความหนาชั้นงานยางตัวอย่างที่มีต่อปริมาณความขึ้น
ในเนื้อยางหลังจากอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยเลือกยางธรรมชาติ 2 ชนิดคือ STR20 และ
RSS3 ในการทำวิจัย โดยความรู้ที่ได้จะเป็นองค์ความรู้พื้นฐานในการนำไปประยุกต์ใช้งานใน
การออกแบบระบบไมโครเวฟที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง ได้แก่ การผลิตยางล้อรถยนต์ หรือ
ผลิตภัณฑ์ยางอื่นๆ ที่มีความหนาต่างๆ

วัตถุประสงค์โครงการ

1. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาหลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟกับยางแท่ง STR20 และแผ่นรมควัน RSS3
2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของคลีนไมโครเวฟที่มีต่อปริมาณความชื้นหลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟกับยางแท่ง STR20 และยางแผ่นรมควัน RSS3
3. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชิ้นงานที่มีผลต่อปริมาณชื้นหลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟกับยางแท่ง STR20 และยางแผ่นรมควัน RSS3

ผลที่ได้รับ	บรรลุวัตถุประสงค์ข้อที่.....	โดยทำให้.....
1. ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาหลังการให้ความร้อน (pre-heating) ด้วยพลังงานไมโครเวฟ	ข้อที่ 1 คือ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาหลังการให้ความร้อน (pre-heating) ด้วยพลังงานไมโครเวฟกับยางแท่ง STR 20 และแผ่นรมควัน RSS3	โดยทำให้สามารถให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟแก่ยางแท่ง STR 20 และแผ่นรมควัน RSS3 ได้รวดเร็ว โดยไม่เสียรูปร่างแต่อย่างใด
2. ทราบถึงความชื้นที่หายไปหลังการให้ความร้อน (pre-heating) ด้วยพลังงานไมโครเวฟกับยางแท่ง STR 20 และยางแผ่นรมควัน RSS3	ข้อที่ 2 คือ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของคลีนไมโครเวฟที่มีต่อปริมาณความชื้นหลังการให้ความร้อน (pre-heating) ด้วยพลังงานไมโครเวฟกับยางแท่ง STR 20 และยางแผ่นรมควัน RSS3	โดยทำให้ได้ %Moisture ของยางแท่ง STR 20 และยางแผ่นรมควัน RSS3 ลดลงเป็น 25.80 % และ 26.08 % ตามลำดับ เมื่อให้พลังงานไมโครเวฟที่ 1000 W แก่ชิ้นงานความหนา 2 cm
3. ค่าความชื้นที่ลดลงไปเมื่อความหนาต่างๆ กัน	ข้อที่ 3 คือ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชิ้นงานที่มีผลต่อปริมาณชื้นหลังการให้ความร้อน (pre-heating) ด้วยพลังงานไมโครเวฟกับยางแท่ง STR 20 และยางแผ่นรมควัน RSS3	โดยทำให้ค่าความชื้นในยางยางธรรมชาติ STR20 ที่มีความหนา 1, 2 และ 3 cm ลดลงเป็น 20.00 %, 16.12% และ 12.12 % ตามลำดับ และในกรณียางยางธรรมชาติ RSS3 สามารถลดปริมาณความชื้นได้ 19.23 %, 18.51% และ 10.71 % ตามลำดับ หลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ

การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

- 1.เป็นข้อมูลพื้นฐานในการทำไปใช้ประโยชน์ในการอนุรักษ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟและการออกแบบระบบอนุรักษ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟ
2. เป็นแนวทางในการต่อยอดในทางอุตสาหกรรมยาง

การประชาสัมพันธ์

- 1.ผลงานวิจัยบางส่วนจะนำเสนอผลงานทางวิชาการภาคบรรยายในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20 ระหว่างวันที่ 18-20 ตุลาคม 2549 จังหวัดนครราชสีมา
2. จะทำการตีพิมพ์ในหนังสือวารสารของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- 3.จะนำเสนอผลงานทางวิชาการในระดับนานาชาติ (4th EMSES) ที่ประเทศญี่ปุ่น วันที่ 29 สิงหาคม – 1 กันยายน พ.ศ. 2549
- 4.สามารถเผยแพร่ผลงานวิจัยนี้ต่ออุตสาหกรรมยางล้อรถยนต์เพื่อประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟในขั้นตอนการอบยางเพื่อกำจัดความชื้นได้ต่อไป

ส่วนที่ 1 ข้อมูลโครงการ:

ชื่อโครงการ	ศึกษาผลของอุณหภูมิและขนาดความหนาชิ้นงานที่มีต่อความขึ้นในยางแท่ง 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

ในปัจจุบันประเทศไทยสามารถผลิตยางธรรมชาติ (Natural Rubber) ได้เป็นอันดับหนึ่งของโลก ซึ่งอยู่ในรูปของน้ำยางข้นและยางดิบแห่งชนิดต่าง ๆ ในการนำไปใช้งานของยางธรรมชาติยังไม่กว้างขวางมากนัก ส่วนใหญ่จะผลิตเป็นยางแท่ง ยางแผ่นรมควัน ส่งขายต่างประเทศ ซึ่งมีราคาถูก สมบัติของยางธรรมชาติที่พิเศษแตกต่างจากวัสดุอื่น ๆ เช่น มีความยืดหยุ่นดี ให้สมบัติเชิงกลสูง เนื่องจากเมื่อถูกยืดออกโมเลกุลจะเรียงตัวเป็นระเบียบทำให้ความต้านทานแรงดึงสูง สมบัติการคืนตัวและการกระดอนสูงกว่ายางสังเคราะห์อื่น ๆ นอกจากนี้ยังมีเนื้อหีบ สามารถกันน้ำและอากาศไม่ให้ผ่านได้โดยง่ายอีกทั้งไม่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ดังนั้นยางจึงเป็นวัสดุที่มีประโยชน์และคุณค่ามาก [1-5]

ที่มาของปัญหาที่พบในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมยางคือ มีขั้นตอนหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการวัลคาไนเซชันผลิตภัณฑ์ยางเกือบทุกชนิดคือ การอบให้ความร้อนหรือการเคียว ซึ่งกระบวนการเคียวโดยวิธีดั้งเดิมโดยใช้ลมร้อนนั้นยังมีปัญหาเรื่องความไม่สมบูรณ์ของเนื้อยางและปัญหาความล่าช้าของกระบวนการผลิต ความร้อนที่ป้อนให้แก่วัสดุนั้นจะสัมผัสเฉพาะที่ผิวหน้าวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการเท่านั้น ซึ่งทำให้การกระจายความร้อนเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอส่งผลให้อันตักิริยาที่เกิดขึ้นกับเนื้อยางธรรมชาติเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ของยางธรรมชาติด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ตำแหน่งที่วัสดุสัมผัสความร้อนโดยตรงอาจเกิดการเสียหายได้เพราะต้องใช้เวลาอันยาวนานกว่าความร้อนจะเข้าถึงภายในเนื้อวัสดุอย่างทั่วถึง ด้วยเหตุนี้ ทำให้ต้องเสียพลังงานและเวลาในผลิต รวมถึงการควบคุมคุณภาพทำได้ยากลำบาก จึงมักมีปัญหาในเรื่องของการส่งออก ทำให้มีแนวคิดในการนำพลังงานไมโครเวฟมาใช้ทดลองให้ความร้อนแก่ยางธรรมชาติ โดยคงสมบัติที่ดีของยางธรรมชาติอยู่ครบถ้วน เนื่องจาก

พลังงานไมโครเวฟจะให้ความร้อนที่สม่ำเสมอทั่วถึงและมีข้อได้เปรียบ คือ ความร้อนที่ยางได้รับจะมีความสม่ำเสมอ กระบวนการในการผลิตสะอาดและรวดเร็ว เกิดความร้อนได้เร็วมาก ประหยัดพลังงาน และ ประหยัดเนื้อที่ จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีการศึกษาเกี่ยวกับการนำพลังงานไมโครเวฟมาใช้ดูลักษณะของยางธรรมชาติที่ใส่และไม่ใส่เขม่าดำในยางล้อรถยนต์โดยการแยกพันธะคาร์บอน การแตกพันธะเคมีของเศษยางวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ การใช้เตาอบไมโครเวฟกับยางรีไซเคิลเพื่อเป็นวัตถุดิบที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ แต่งานวิจัยส่วนใหญ่ศึกษาคลื่นไมโครเวฟแบบหลายเฟส (Multi-phase) ซึ่งเป็นไมโครเวฟที่ใช้กันตามบ้านเรือน ถึงแม้ว่าพลังงานไมโครเวฟสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมยางธรรมชาติได้ แต่ในประเทศไทยมีการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องนี้น้อยมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมยางพารา ทั้งนี้เนื่องมาจากความซับซ้อนของกระบวนการและปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น แต่งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการให้ความร้อนหรืออุ่นยาง (Pre-heating) โดยใช้พลังงานไมโครเวฟระบบท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมเป็นแบบเฟสเดียว (single phase) ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิ จำนวนกำลังวัตต์ที่ใช้ โดยจะศึกษาผลของอุณหภูมิและความหนาชั้นยางตัวอย่างที่มีต่อปริมาณความชื้นในเนื้อยางหลังจากอุ่นด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยเลือกยางธรรมชาติ 2 ชนิดคือ STR20 และ RSS3 ในการทำวิจัย โดยความรู้ที่ได้จะเป็นองค์ความรู้พื้นฐานในการนำไปประยุกต์ใช้งานในการออกแบบระบบไมโครเวฟที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง ได้แก่การผลิตยางล้อรถยนต์ หรือผลิตภัณฑ์ยางอื่นๆ ที่มีความหนาต่างๆ ได้

วัตถุประสงค์โครงการ

1. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาหลังการให้ความร้อน (Pre-heating) ด้วยพลังงานไมโครเวฟกับยางแท่ง STR 20 และแผ่นรมควัน RSS3
2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อปริมาณความชื้นหลังการให้ความร้อน (pre-heating) ด้วยพลังงานไมโครเวฟกับยางแท่ง STR 20 และยางแผ่นรมควัน RSS3
3. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นยางที่มีผลต่อปริมาณความชื้นหลังการให้ความร้อน (pre-heating) ด้วยพลังงานไมโครเวฟกับยางแท่ง STR 20 และยางแผ่นรมควัน RSS3

ผลที่ได้รับ	บรรลุลักษณะประสงค์ข้อที่.....	โดยทำให้.....
1. ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาหลังการให้ความร้อน (pre-heating) ด้วยพลังงานไมโครเวฟ	ข้อที่ 1 คือ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาหลังการให้ความร้อน (pre-heating) ด้วยพลังงานไมโครเวฟกับยางแท่ง STR 20 และแผ่นรมควัน RSS3	โดยทำให้สามารถให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟแก่ยางแท่ง STR 20 และแผ่นรมควัน RSS3 ได้รวดเร็ว โดยไม่เสียรูปร่างแต่อย่างใด
2. ทราบถึงความชื้นที่หายไปหลังการให้ความร้อน (pre-heating) ด้วยพลังงานไมโครเวฟกับยางแท่ง STR 20 และยางแผ่นรมควัน RSS3	ข้อที่ 2 คือ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของคลีนไมโครเวฟที่มีต่อปริมาณความชื้นหลังการให้ความร้อน (pre-heating) ด้วยพลังงานไมโครเวฟกับยางแท่ง STR 20 และยางแผ่นรมควัน RSS3	โดยทำให้ได้ %Moisture ของยางแท่ง STR 20 และยางแผ่นรมควัน RSS3 ลดลงเป็น 25.80 % และ 26.08 % ตามลำดับ เมื่อให้พลังงานไมโครเวฟที่ 1000 W แก่ชิ้นงานความหนา 2 cm
3. ค่าความชื้นที่ลดลงไปเมื่อความหนาต่างๆ กัน	ข้อที่ 3 คือ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชิ้นงานที่มีผลต่อปริมาณชื้นหลังการให้ความร้อน (pre-heating) ด้วยพลังงานไมโครเวฟกับยางแท่ง STR 20 และยางแผ่นรมควัน RSS3	โดยทำให้ค่าความชื้นในยางธรรมชาติ STR20 ที่มีความหนา 1, 2 และ 3 cm ลดลงเป็น 20.00 %, 16.12% และ 12.12 % ตามลำดับ และในกรณียางธรรมชาติ RSS3 สามารถลดปริมาณความชื้นได้ 19.23 %, 18.51% และ 10.71 % ตามลำดับ หลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ

การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

1. เป็นข้อมูลพื้นฐานในการทำไปใช้ประโยชน์ในการอุ่นยางด้วยพลังงานไมโครเวฟและการออกแบบระบบอุ่นยางด้วยพลังงานไมโครเวฟ
2. เป็นแนวทางในการต่อยอดในทางอุตสาหกรรมยาง

การประชาสัมพันธ์

1. ผลงานวิจัยบางส่วนจะนำเสนอผลงานทางวิชาการภาคบรรยายในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่20 ระหว่างวันที่ 18-20 ตุลาคม 2549 จังหวัดนครราชสีมา
2. จะทำการตีพิมพ์ในหนังสือวารสารของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีธบุรี
3. จะนำเสนอผลงานทางวิชาการในระดับนานาชาติ (4th EMSES) ที่ประเทศญี่ปุ่น วันที่ 29 สิงหาคม – 1 กันยายน พ.ศ. 2549
4. สามารถเผยแพร่ผลงานวิจัยนี้ต่ออุตสาหกรรมยางล้อรถยนต์เพื่อประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟในขั้นตอนการอบยางเพื่อกำจัดความชื้นได้ต่อไป

บทคัดย่อ

เทคโนโลยีการให้ความร้อนแก่ยางธรรมชาติด้วยพลังงานไมโครเวฟนั้นว่ามีความเป็นไปได้อย่างมากในการอุ่นยางธรรมชาติคอมเปาต์ที่ผสมและไม่ผสมด้วยเขม่าดำ แม้ว่ามีงานวิจัยที่ผ่านมาเรานิยมใช้การอุ่นยางด้วยการให้ความร้อนด้วยเตาอบโดยความร้อนจะผ่านไปยังผิวชิ้นงาน แต่อย่างไรก็ตาม การให้ความร้อนด้วยวิธีดังกล่าวต้องใช้เวลานานมาก ใช้คนงานปริมาณมากและสูญเสียพลังงาน ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะนำพลังงานไมโครเวฟมาใช้ในการอุ่นยางธรรมชาติแทนวิธีแบบดั้งเดิม โดยศึกษาถึงสภาวะต่างๆ เช่น กำลังวัตต์ ปริมาณกัมมะถัน ความหนาชิ้นงาน ที่มีผลต่อการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ จากนั้นก็นำยางธรรมชาติคอมเปาต์ทั้งสองชนิดมาผ่านพลังงานไมโครเวฟโดยใช้ rectangular wave guide (MODE: TE₁₀) ที่ความถี่ 2.45 GHz และเปลี่ยนกำลังวัตต์ตั้งแต่ 200, 500, 800 และ 1000 วัตต์ ตามลำดับ จากการทดลองเราพบว่ากำลังวัตต์ที่เหมาะสมแก่การอุ่นยางคือ 1000 วัตต์ โดยสามารถให้ความร้อนแก่ยางที่อุณหภูมิถึง 150 °C ใช้เวลาน้อยกว่า 20 นาทีและชิ้นงานมีรูปร่างปกติ สามารถลดปริมาณความชื้นในชิ้นงานยางธรรมชาติทั้ง STR20 และ RSS3 ได้ 25.80 % และ 26.08 % ตามลำดับ

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, a condition for pre-heating of NR and NR filled CB with microwave energy was investigated with respect to sample thickness and rubber compositions. To observe temperature profile time scale of microwave radiation, the resulting compounding within and without carbon black were subjected to a microwave energy using a rectangular wave guide (MODE: TE₁₀) at frequency of 2.45 GHz and power input varies from 200, 500, 800 and 1,000 Watts, respectively. It was observed that a suitable power input for all samples was 1000 Watts in which the increment of temperature can reach to 150 C within 20 mins without any deterioration of sample surface. It was also found that % moisture in rubber compound reduced to 25.80% for STR20 compound and 26.08 % for RSS3 compound, respectively.

ส่วนที่ 2 รายงานเนื้อหา:

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ในปัจจุบันประเทศไทยสามารถผลิตยางธรรมชาติ (Natural Rubber) ได้เป็นอันดับหนึ่งของโลก ซึ่งอยู่ในรูปของน้ำยางข้นและยางดิบแห้งชนิดต่าง ๆ ในการนำไปใช้งานของยางธรรมชาติยังไม่กว้างขวางมากนัก ส่วนใหญ่จะผลิตเป็นยางแท่ง ยางแผ่นรมควัน ส่งขายต่างประเทศ ซึ่งมีราคาถูก สมบัติของยางธรรมชาติที่พิเศษแตกต่างจากวัสดุอื่น ๆ เช่น มีความยืดหยุ่นดี ให้สมบัติเชิงกลสูง เนื่องจากเมื่อถูกยืดออกโมเลกุลจะเรียงตัวเป็นระเบียบทำให้ความต้านทานแรงดึงสูง สมบัติการคืนตัวและการกระดอนสูงกว่ายางสังเคราะห์อื่น ๆ นอกจากนี้ยังมีเนื้อหีบ สามารถกันน้ำและอากาศไม่ให้ผ่านได้โดยง่ายอีกทั้งไม่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ดังนั้นยางจึงเป็นวัสดุที่มีประโยชน์และคุณค่ามาก [1-5]

ที่มาของปัญหาที่พบในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ของอุตสาหกรรมยางคือ มีขั้นตอนหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการวัลคาไนเซชันผลิตภัณฑ์ยางเกือบทุกชนิดคือ การอบให้ความร้อนหรือการเคียว กระบวนการเคียวโดยวิธีดั้งเดิมคือลมร้อนนั้นยังมีปัญหาเรื่องความไม่สมบูรณ์ของเนื้อยาง และปัญหาความล่าช้าของกระบวนการ ผลิต ความร้อนที่ป้อนให้แก่วัสดุนั้นจะสัมผัสเฉพาะที่ผิวหน้าวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการเท่านั้น ซึ่งทำให้การกระจายความร้อนเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นกับเนื้อยางธรรมชาติเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอ ซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ของยางธรรมชาติด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ตำแหน่งที่วัสดุสัมผัสความร้อนโดยตรงอาจจะเกิดการเสียหายได้เพราะต้องใช้เวลาอันยาวนานกว่าความร้อนจะเข้าถึงภายในเนื้อวัสดุอย่างทั่วถึง ด้วยเหตุนี้ ทำให้ต้องเสียพลังงานและเวลาในผลิต รวมถึงการควบคุมคุณภาพทำได้ยากลำบาก จึงมักมีปัญหในเรื่องของการส่งออก ด้วยเหตุนี้ทำให้คณะผู้วิจัยมีแนวคิดในการนำพลังงานไมโครเวฟมาใช้ในการทดลองให้ความร้อนแก่ยางธรรมชาติ โดยให้มีสมบัติที่ดีของยางธรรมชาติอยู่ครบถ้วน เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟจะให้ความร้อนที่สม่ำเสมอทั่วถึง และการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟจะมีข้อได้เปรียบคือ ความร้อนที่ยางได้รับจะมีความสม่ำเสมอ กระบวนการผลิตสะอาดและรวดเร็ว ประหยัดพลังงานและประหยัดเนื้อที่

งานวิจัยที่ผ่านมา Eldon E. Anderson และคณะ [6] ศึกษาเกี่ยวกับ วิธีการและอุปกรณ์สำหรับให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟของวัสดุไหล โดยเฉพาะอย่างยิ่งการดีวัลคาไนเซชัน (De-vulcanization) ของชิ้นส่วนเศษยาง งานวิจัยเน้นการนำไปใช้กับกระบวนการของการวัลคาไนซ์เศษยางเพื่อการดีวัลคาไนซ์บางส่วนโดยการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ เป็นที่ทราบกันดีว่าเศษยางที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟสามารถนำกลับมารีไซเคิลเป็นยางชนิดใหม่ได้ อย่างไรก็ตามการใช้งานของเทคนิคนี้มีข้อจำกัดเพราะว่าไม่สามารถหาวิธีที่เหมาะสมและอุปกรณ์ที่สามารถทำได้เหมือนเดิมในกรณีที่มีการขยายการผลิตในระดับที่ใหญ่ขึ้น โดยปกติยางจะวัลคาไนซ์ได้ยากด้วยคลื่นไมโครเวฟเพราะว่าที่อุณหภูมิห้องนั้นยางไม่นำไฟฟ้าแต่การนำไฟฟ้าจะเพิ่มมากขึ้นถ้าเพิ่มอุณหภูมิ หมายถึงว่าต้องใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อให้ความร้อนแก่ยางในอุณหภูมิที่สูงขึ้น ให้เพียงพอ

กับการดีวัลคาไนเซชันบางส่วนของยางและยังเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าในยางดังกล่าวด้วย ซึ่งผลย้อนกลับทำให้เกิดสภาพความร้อนสูญหายไปในตัวอย่างยางเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งตัวอย่างยางเมื่อเพิ่มความร้อนมากขึ้นมันจะทำให้การดูดกลืนความร้อนไม่เหมาะสมกับพลังงานไมโครเวฟที่ให้เข้าไปทำให้เกิดความร้อนสะสมมากเกินไปและไหม้เป็นเปลวไฟได้ ความพยายามที่จะทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางอีกครั้งจากยางวัลคาไนซ์โดยการลำเลียงด้วยสายพานโดยใช้พลังงานไมโครเวฟยังไม่สามารถทำในทางการค้าได้ ดังนั้นจึงมีความต้องการในการพัฒนาวิธีการใหม่รวมถึงอุปกรณ์ในการดีวัลคาไนซ์เศษยางโดยพัฒนาระบบขนส่งลำเลียงวัสดุอย่างต่อเนื่องและให้ความร้อนหรือให้เกิดปฏิกิริยาในเตาอบไมโครเวฟ โดยที่สภาวะการบ่มควรจะแยกออกจากบรรยากาศปกติ

Akinobu Sejimo และ Ono Shigeo [7] ศึกษาวิธีการวัลคาไนซ์ท่อแบบต่อเนื่อง สามารถทำได้โดยสองขั้นตอนคือ ใช้การวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟและการวัลคาไนเซชันด้วยวิธีดั้งเดิมโดยการนำพาความร้อนผ่านตัวกลางที่เป็นตัวให้ความร้อน ชั้นของเรซินสังเคราะห์ที่ใส่ตัวต้านทานความร้อนซึ่งมีค่าอุณหภูมิหลอมตัวสูงกว่าอุณหภูมิของการวัลคาไนซ์จะหุ้มไว้ด้านนอกของท่ออย่างในความหนาที่ไม่สม่ำเสมอ และจะสัมผัสกับท่ออย่างใกล้ชิดแต่ไม่ยึดติดกับท่ออย่าง หลังจากนั้นชั้นของเรซินจะถูกทำให้เย็นตัวลงและแข็งตัว โดยท่ออย่างจะนำมาให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟก่อน จากนั้นนำไปวัลคาไนซ์ด้วยการพาความร้อนผ่านตัวกลางที่ให้ความร้อนในระบบปกติหลังจากการวัลคาไนซ์เสร็จสมบูรณ์ ชั้นของเรซินนั้นจะถูกดึงออกจากท่ออย่าง

สิทธิบัตรอเมริกาเลขที่ 4,104,205 [8] พูดถึงวิธีการเพื่อจะดีวัลคาไนซ์ยางจากเศษท่ออย่างรวมถึงท่อปัสสาวะยางบิวทิลและวัสดุทำดอกยาง แต่ปฏิกิริยาการคายความร้อนนั้นเกิดขึ้นได้ยากและสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ผ่านพลังงานไมโครเวฟมีการรายงานไว้เช่นกัน

สิทธิบัตรอเมริกาเลขที่ 4,341,667 [9] กล่าวว่าความทนทานต่อแรงดึง (green strength) ของเศษอีลาสโตเมอร์เหลือใช้ที่ไม่ผสมสารเคมี โดยผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ การทรีทเมนต์ด้วยสารเคมีหรือแรงเฉือนจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเติมด้วยบิวทินโพลิเมอร์

สิทธิบัตรอเมริกาเลขที่ 4,469,817 [10] กล่าวถึงการทรีทเมนต์ด้วยพลังงานไมโครเวฟของยางวัลคาไนซ์ การทรีทเมนต์จะใช้พลังงานไมโครเวฟในการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ยางให้เป็นอุณหภูมิดีวัลคาไนเซชัน จากนั้นก็ทำให้แตกตัวทันทีด้วยน้ำ

สิทธิบัตรอเมริกาเลขที่ 4,665,101 [11] ได้พิสูจน์เรื่องการพาความร้อนของยางที่ใช้แล้วด้วยลมร้อน และการให้ความร้อนจากพลังงานไมโครเวฟแต่ผลิตภัณฑ์ยาง ซึ่งการนำวิธีการให้ความร้อนสองแบบมารวมกันก็เพื่อจะให้ความร้อนในตัวอย่างยางมีความสม่ำเสมอมากขึ้นและหลีกเลี่ยงอุณหภูมิจำกัดเฉพาะส่วนในวัสดุที่ผ่านการให้ความร้อนดังกล่าว

2. วัตถุประสงค์ของโครงการ

2.1 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาหลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟกับยางแท่ง STR20 และแผ่นรมควัน RSS3

2.2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มของคลื่นไมโครเวฟหลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟกับยางแท่ง STR20 และยางแผ่นรมควัน RSS3

2.3 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชิ้นงานที่มีผลต่อปริมาณขึ้นหลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟกับยางแท่ง STR20 และยางแผ่นรมควัน RSS3

3. ทางเลือกและแนวทางการแก้ปัญหา

การอบแห้งยางธรรมชาติโดยใช้การแผ่รังสีสามารถทำได้โดยใช้พลังงานการแผ่รังสี เช่น ความถี่คลื่นวิทยุ ความถี่คลื่นไมโครเวฟ ซึ่งการใช้ความถี่ไมโครเวฟจะมีข้อดีหลายอย่าง คือ การอบแห้งยางเป็นไปอย่างรวดเร็วและเป็นระเบียบ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีผิวหน้าสวยงาม ซึ่งไม่ต้องการการทำความสะอาดเพิ่มเติม การเสียรูปร่างของยางมีน้อย ใช้เวลาน้อย การควบคุมคุณภาพทำได้ง่าย ดังนั้น เราสามารถนำยางธรรมชาติมาทำให้สามารถเพิ่มคุณภาพและมูลค่าเพิ่มของผลิตภัณฑ์เกิดมูลค่าเพิ่ม เช่น สามารถหาวิธีการอบแห้งยางธรรมชาติให้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานในการผลิตวัสดุผสมยางธรรมชาติ ยางล้อรถยนต์ต่อไป โครงการนี้จะเป็นสิ่งที่มีประโยชน์อย่างมากต่อประเทศโดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตสินค้าส่งออกในรูปแบบผลิตภัณฑ์ยาง

ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมีความตั้งใจที่จะศึกษาวิธีการให้ความร้อนกับยางธรรมชาติโดยการประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟอย่างสมบูรณ์มาช่วยในการอบแห้ง (pre-heating) โดยศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ปริมาณความเข้มของคลื่นไมโครเวฟ และความหนาชิ้นงานยางธรรมชาติ ก่อนและหลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ ซึ่งองค์ความรู้และเทคโนโลยีที่ได้จากการวิจัยนี้จะเป็นปัจจัยพื้นฐานในระดับห้องทดลอง ไปจนถึงการนำไปสู่ระดับอุตสาหกรรมยางได้อย่างยั่งยืน

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 เขม่าดำ (Carbon Black, grade N330)
- 4.1.9 เมทานอล (Methanol, AR) ซื้อจากบริษัท Bang Trading (Thailand) Co., Ltd
- 4.1.10 คลอโรฟอร์ม (Chloroform) ซื้อจากบริษัท Bang Trading (Thailand) Co., Ltd
- 4.1.11 อะซิโตน (Acetone) ซื้อจากบริษัท Bang Trading (Thailand) Co., Ltd

4.2 อุปกรณ์ในการทดลอง

- 4.2.1 เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (Two roll mill, Lab Tech Co., Ltd) ดังแสดงในรูปที่ 1
- 4.2.2 เครื่องอัดขึ้นรูป (compression molding machine, Lab Tech Co., Ltd) ดังแสดงในรูปที่ 2
- 4.2.3 เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด 4 ตำแหน่ง (Electronic balance)
- 4.2.4 สเตอริโอเรอฮอทเพลท (stirrer/hot plate) ยี่ห้อ corning ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 4.2.5 เตาอบสุญญากาศ (Vacuum oven)
- 4.2.6 เทอร์โมมิเตอร์
- 4.2.7 เกรียงทองเหลือง
- 4.2.8 ถุงมือป้องกันความร้อน
- 4.2.9 แปรงทองเหลือง
- 4.2.10 มีดคัตเตอร์และไม้บรรทัดเหล็ก
- 4.2.11 แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นงาน
- 4.2.12 เครื่องไมโครเวฟ (Microwave Machine), ยี่ห้อ Micro Denshi, Japan และอุปกรณ์ประกอบดังแสดงในรูปที่ 3
- 4.1.13 เครื่อง Moisture Analyzer โมเดล AND MX-50 ดังแสดงในรูปที่ 4

4.3 การเตรียมตัวอย่างยาง

4.3.1 การเตรียมตัวอย่างยางคอมเพาท์

ยางคอมเพาท์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ยางธรรมชาติ สารวัลคาไนซ์ สารกระตุ้น สารตัวเติม และสารตัวเร่ง ดังแสดงอัตราส่วนการผสมของยางคอมเพาท์ในตารางที่ 1 การเตรียมยางคอมเพาท์ โดยเริ่มนำยางธรรมชาติมาทำการบดผสมด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง ดังแสดงในรูปที่ 1 ทำให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยตั้งอุณหภูมิของเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งไว้ที่ 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 ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ต่อมาใส่ DPG ลงไปบดผสมใช้มีดกรีดและบดผสมไปเรื่อยๆ ใช้เวลาประมาณ 3 นาที ผสม

ให้เป็นเนื้อเดียวกัน และ ใส่ Sulfur ลงไปบดผสมใช้มีดกรีดและบดผสมไปเรื่อยๆ ใช้เวลาประมาณ 3 นาที และเติมด้วยเขม่าดำลงไปผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันใช้เวลาประมาณ 3 นาที

ตารางที่ 1 แสดงอัตราส่วนยางคอมเพาท์ที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุดิบ	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3	สูตรที่ 4
NR	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 : NR (Natural rubber คือ STR20 และ RSS3)

MBTS (Dibenzothiazyl disulphide)

DPG (Diphenyl guanidine)

Carbon Black (N330)



รูปที่ 1 แสดงเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง

4.3.2 การเตรียมพิมพ์ของตัวอย่างชิ้นยาง

สั่งทำแม่พิมพ์โลหะสำหรับใส่ชิ้นงานให้มีขนาดความหนาต่างๆ กัน และนำยางคอมเพาไรต์ผ่านเครื่องบดผสมแล้ว มาทำอัดด้วยเครื่อง Compression molding ดังแสดงในรูปที่ 2 ให้เป็นชิ้นงานตามขนาดที่ต้องการที่อุณหภูมิห้อง นาน 5 นาที โดยทำที่สภาวะเดียวกันทุกชิ้นงาน จากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่องไมโครเวฟ และ เครื่องวัดความชื้น

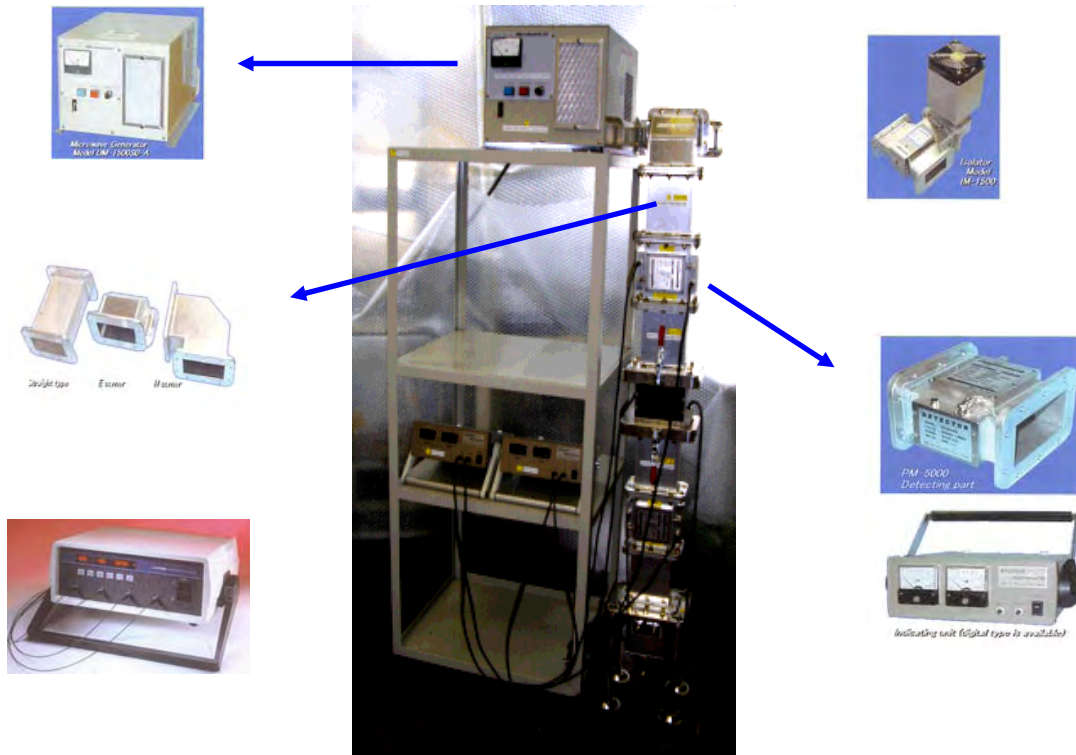


รูปที่ 2 แสดงเครื่อง Compression molding

4.4 การทดสอบ

4.4.1 การให้ความร้อนกับยางด้วยพลังงานไมโครเวฟ

นำตัวอย่างยางธรรมชาติแบบต่าง ๆ ใส่ในแม่พิมพ์ แล้วนำไปใส่ในช่องในตัวอย่างในเครื่องไมโครเวฟชนิดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (Mode: TE₁₀) แสดงดังรูปที่ 3 ประกอบด้วยแมกนีตรอนซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความถี่ 2.54 GHz และกำลังวัตต์ที่ใช้ในการทดลองคือ 200, 500, 800 และ 1000 Watts หลังจากนั้นก็ให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยการปรับอุณหภูมิ เวลา และความเข้มข้นของคลื่นไมโครเวฟอย่างเหมาะสม



รูปที่ 3 แสดงเตาอบไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลอง

เตาอบไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย

- เครื่องกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ ช่วงคลื่นที่ 2,450 MHz เป็นเครื่องของไมโครเดนชิ โมเดล UN 1500
- ตัวดักคลื่นไมโครเวฟ ป้องกันการย้อนกลับของคลื่น เป็นเครื่องของไมโครเดนชิ โมเดล D 25 M-TM
- ท่อนำคลื่น สำหรับใส่ชิ้นงานทดสอบ ขนาดกว้าง 54.46 มิลลิเมตร ยาว 109.22 มิลลิเมตร สูง 50.00 มิลลิเมตร

4.4.2 วิธีการหาค่าปริมาณความชื้น (Moisture Content Testing)

การดูดความชื้น (Water Absorption) คือ ปริมาณการแทรกซึมของน้ำที่อยู่ภายในโครงสร้างของวัสดุ เช่น พลาสติก ยาง เป็นต้น จะทำการศึกษาปริมาณความชื้นที่อยู่ในยางโดยการนำทดสอบด้วยเครื่อง Moisture Analyzer, AND MX-50 ดังแสดงในรูปที่ 4 วิธีการคำนวณค่าปริมาณความชื้นสามารถคำนวณได้จากสมการข้างล่างนี้

$$\% \text{Water Absorption} = (\text{Wet Weight} - \text{Dry Weight}) * 100 / \text{Wet Weight}$$

วิธีการทดลอง

- ชั่งตัวอย่างประมาณ 5 กรัม
- ทำการ Set เครื่อง Moisture Content ให้มีอุณหภูมิ 100 °C
- นำถาดกลมเปล่าเข้าเครื่องแล้ว Set Zero
- นำตัวอย่างเข้าเครื่องแล้วปิดฝา กด Start
- รอจนเครื่องหยุดทำงาน
- บันทึกผลที่ได้ เช่น เวลาที่ใช้, %Moisture, % การคายความชื้น



รูปที่ 4 เครื่อง Moisture Analyzer

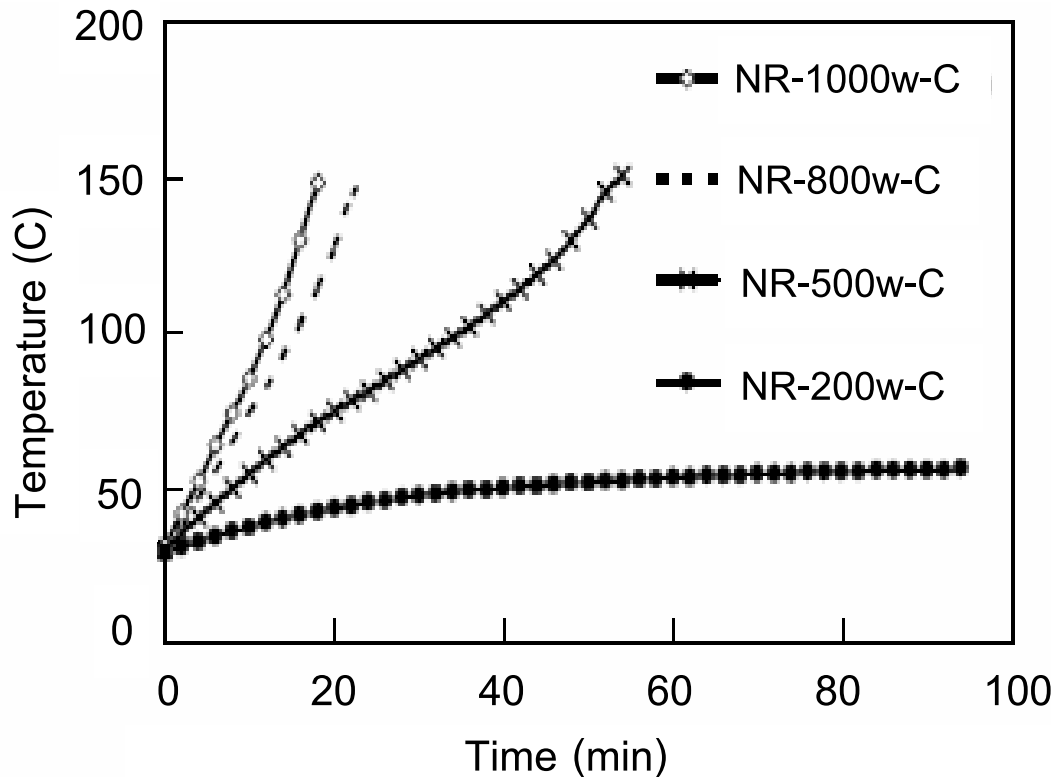
5. ผลและการวิเคราะห์ผล

5.1 พฤติกรรมของยางธรรมชาติคอมเพาท์หลังให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ

5.1.1 อิทธิพลของกำลังวัตต์ที่มีต่ออุณหภูมิและเวลาของยางภายใต้พลังงาน

ไมโครเวฟ (Time-Temperature Profile)

นำยางธรรมชาติคอมเพาท์แล้วมาทำการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนภายใต้พลังงานไมโครเวฟ โดยจะควบคุมกำลังวัตต์ของคลื่นไมโครเวฟที่ความเข้มต่างๆ กันคือ 200, 500, 800 และ 1,000 วัตต์ และดูโปรไฟล์การเกิดความร้อนในเนื้อยางธรรมชาติคอมเพาท์ รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของยางธรรมชาติคอมเพาท์เมื่อกำลังวัตต์ที่ให้แตกต่างกัน เพื่อหาสภาวะกำลังวัตต์ที่เหมาะสมในการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟแก่ยางธรรมชาติคอมเพาท์



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของยางธรรมชาติคอมเปาว์ STR20-S2.0-C ที่ความหนา 1 cm ที่กำลังวัตต์ต่างกัน

จากรูปที่ 5 พบว่าเมื่อให้ความร้อนแก่ตัวอย่างยางธรรมชาติคอมเปาว์ที่กำลังวัตต์ต่างกันคือ 200, 500, 800 ไปจนถึง 1,000 วัตต์ พบว่าเมื่อกำลังวัตต์ที่ใช้มากขึ้นเวลาที่วัสดุยางคอมเปาว์ได้รับความร้อนจะใช้น้อยลง เช่น ที่กำลังวัตต์ 1000 วัตต์จะใช้ประมาณ 15 นาที ในการให้ความร้อนในเนื้อวัสดุยางได้สูง 150 °C เนื่องจากว่าวัสดุยางธรรมชาติสามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้มากขึ้นนั่นเอง สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อคลื่นไมโครเวฟทะลุผ่านวัสดุไดอิเล็กทริกจะถูกดูดซับและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน เรียกว่า การกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (Q) ซึ่งจะสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในวัสดุไดอิเล็กทริก[12] โดยค่าของการกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร เมื่อสมมุติให้ไม่มีการสูญเสียสนามแม่เหล็ก แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้ [13]

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

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

ซึ่ง Q = Density of Microwave Power Absorbed (W/m³)

E = สนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง f

f = ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ (Hz)

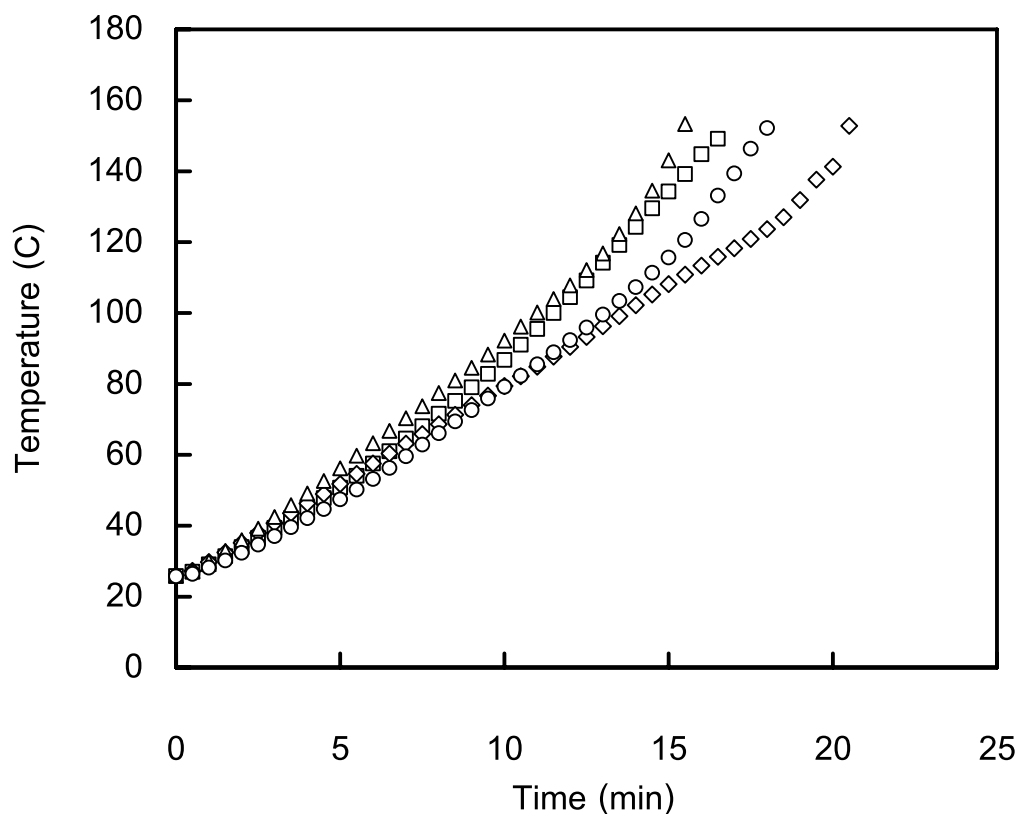
ω = ความเร็วเชิงมุมของคลื่นไมโครเวฟ (rad/s)

ϵ_0 = ความสามารถของช่องว่างที่ไม่มีการดูดซับ ส่งผ่าน และสะท้อนพลังงานจากส่วนที่เป็นสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ (Dielectric Constant)

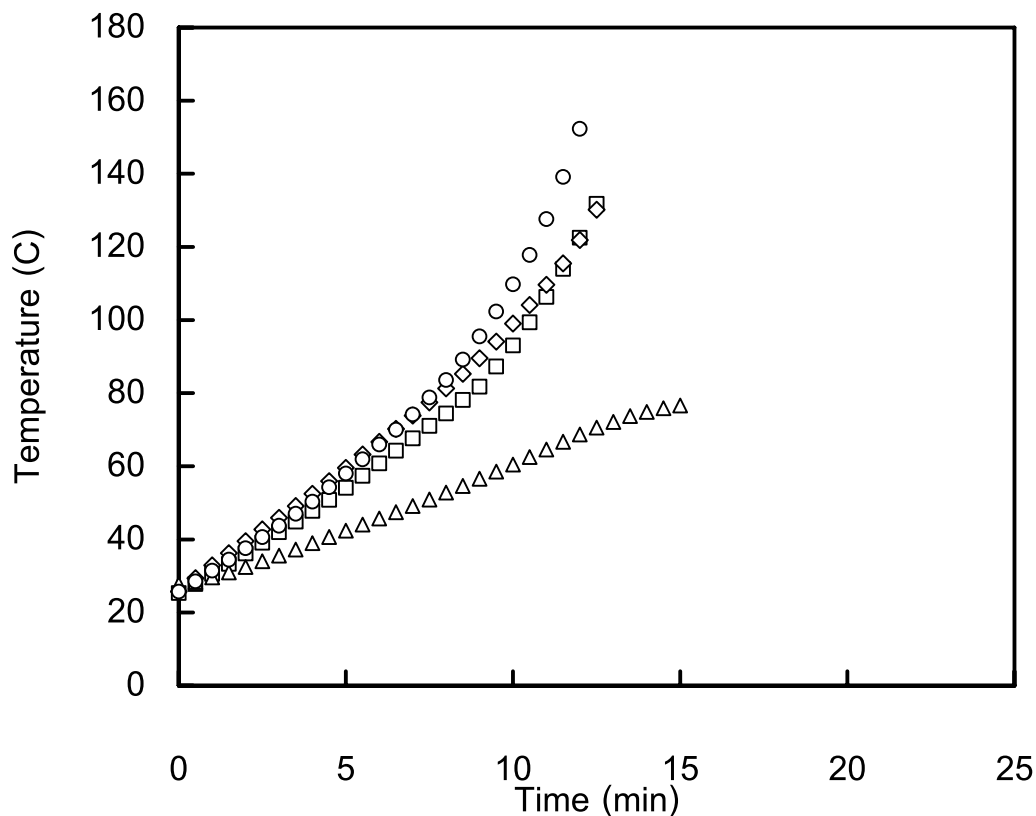
$\tan \delta = \epsilon'' / \epsilon'$ คือความสามารถในการแปรเปลี่ยนพลังงานที่วัสดุดูดซับเป็นพลังงานความร้อน (Dielectric Loss Tangent Coefficient)

ดังนั้นจากการทดลองเราพบว่าในการให้ความร้อนแก่ยางธรรมชาติคอมเปอร์ด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 1000 วัตต์เหมาะสมเนื่องจากใช้เวลาในการให้ความร้อนน้อยและชิ้นงานไม่เกิดการเสียรูปร่าง โดยในการทดลองจะใช้ยางธรรมชาติคือ STR20 และ RSS3

5.1.2 ผลของปริมาณกำมะถันที่มีต่ออุณหภูมิและเวลาของยางภายใต้พลังงานไมโครเวฟ (Time-Temperature Profile)



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของยางธรรมชาติ STR20 คอมเปอร์ ที่ความหนา 2 ซม. ใช้กำลังวัตต์ 1000 วัตต์ และเปลี่ยนปริมาณกำมะถัน; S=1.5 ($\square$), S=2.0 ($\diamond$), S=2.5 ($\triangle$) และ S=3.0 ($\circ$) ตามลำดับ

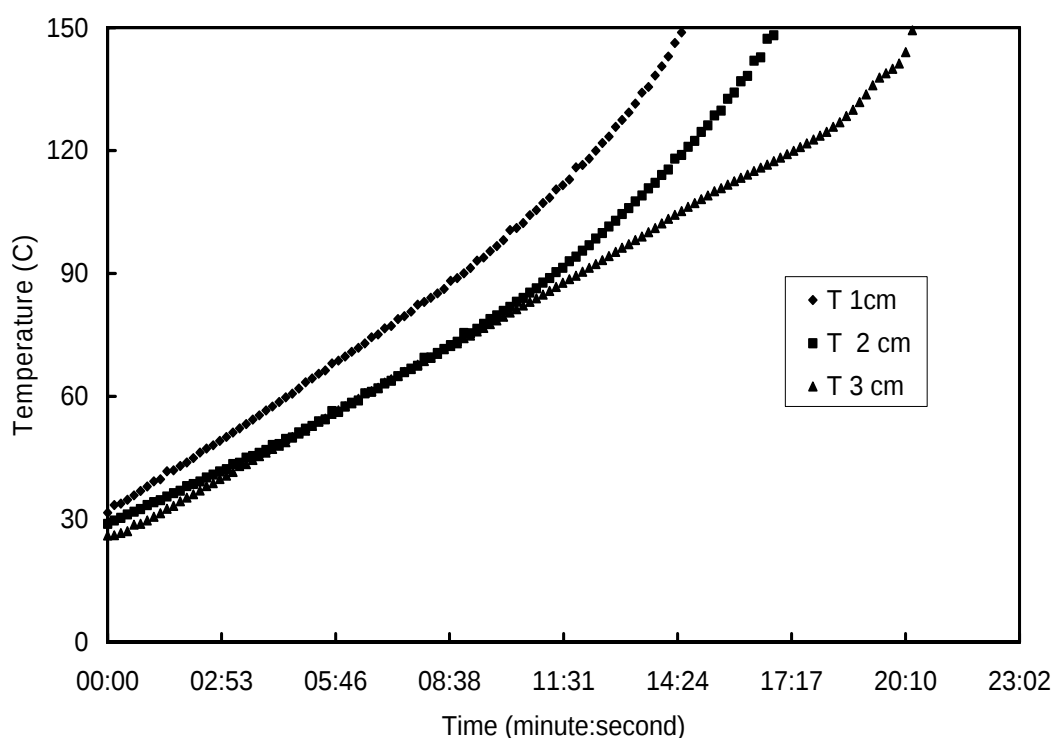


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของยางธรรมชาติ RSS3 คอมเปาว์ ที่ความหนา 2 ซม. ใช้กำลังวัตต์ 1000 วัตต์ และเปลี่ยนปริมาณกำมะถัน; S=1.5 ($\square$), S=2.0 ($\diamond$), S=2.5 ($\triangle$) และ S=3.0 ($\circ$) ตามลำดับ

จากรูปที่ 6 และ 7 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของยางธรรมชาติคอมเปาว์ STR20 และ RSS3 ความหนาที่ 2 ซม. ใช้กำลังวัตต์ 1000 วัตต์ เมื่อปริมาณกำมะถันเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 phr พบว่าปริมาณกำมะถันที่เปลี่ยนไปไม่ส่งผลต่อกราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาโดยให้กราฟที่มีแนวโน้มที่คล้ายๆ กัน แต่ในกรณีของยางธรรมชาติ RSS3 คอมเปาว์มีข้อสังเกตว่าใช้เวลาในการให้ความร้อนน้อยกว่ายางธรรมชาติ STR20 คอมเปาว์ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการยางแผ่นรมควันผ่านการอบรมควันที่อุณหภูมิประมาณ 60-70 C เป็นเวลา 2-3 วันหรือมากกว่านั้นก่อนนำมาอัดเป็นก้อน ทำให้การสุกของยางดังกล่าวเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า

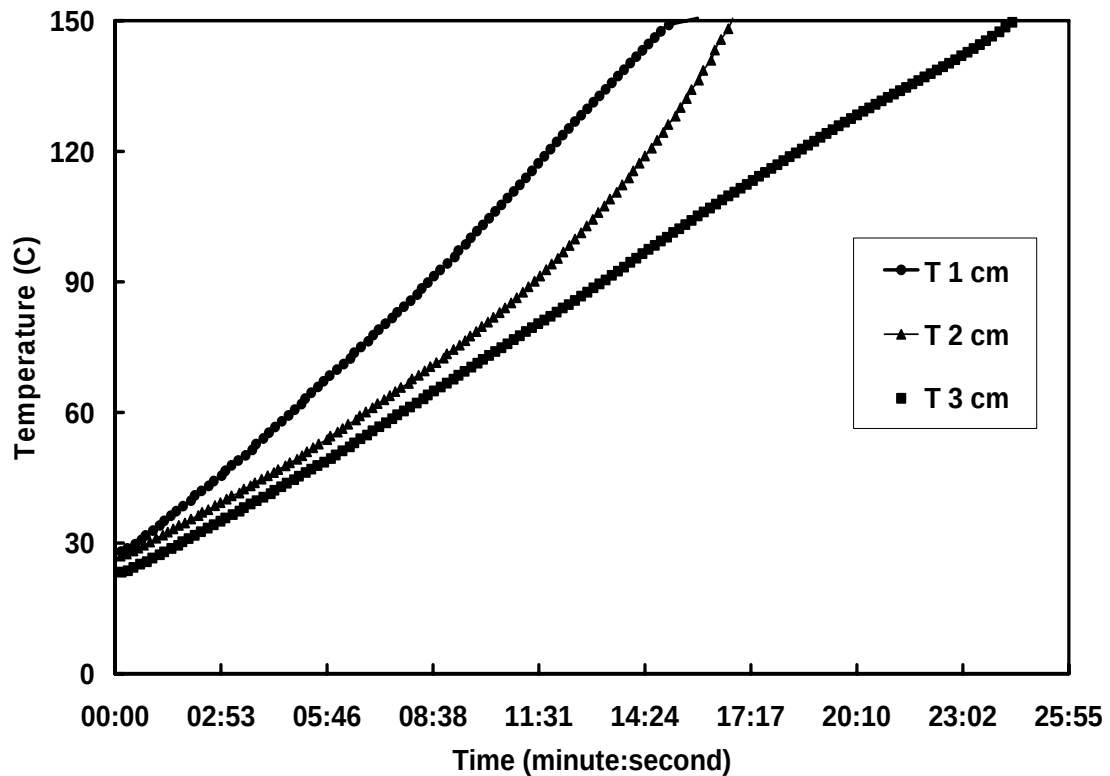
5.1.3 ผลของความหนาชั้นงานที่มีต่ออุณหภูมิและเวลาของยางภายใต้พลังงานไมโครเวฟ (Time-Temperature Profile)

นำยางธรรมชาติคอมเปาว์ทั้งสองชนิดคือ STR20 และ RSS3 มาทำการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนภายใต้พลังงานไมโครเวฟ โดยจะควบคุมกำลังวัตต์ของคลื่นไมโครเวฟที่ความเข้ม 1,000 วัตต์ และดูโปรไฟล์การเกิดความร้อนในเนื้อยางธรรมชาติคอมเปาว์ที่มีความหนาชั้นงานต่างกันคือ 1 cm, 2 cm และ 3 cm ตามลำดับ



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของยางธรรมชาติคอมเปาว์ STR20-S2.0, ใช้กำลังวัตต์ 1000 วัตต์ และเปลี่ยนความหนา; T=1 cm, 2 cm และ 3 cm ตามลำดับ

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของยางธรรมชาติ STR20 คอมเปาว์เมื่อความหนาของชั้นงานตัวอย่างต่างกัน จากรูปพบว่าที่ความหนาชั้นงาน 1 cm ใช้เวลาในการให้ความร้อนถึงอุณหภูมิ 150 C เท่ากับ 14.40 นาที ส่วนที่ความหนาชั้นงาน 2 cm ใช้เวลาในการให้ความร้อนถึงอุณหภูมิ 150 C เท่ากับ 17.00 นาที และเมื่อเปลี่ยนเป็นความหนาชั้นงาน 3 cm ใช้เวลาในการให้ความร้อนถึงอุณหภูมิ 150 C เท่ากับ 20.20 นาที ตามลำดับ ซึ่งการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟความร้อนจะแพร่ผ่านยางจากภายในสู่ภายนอกและมีผลโดยตรงต่อความหนาชั้นงานคือความหนาของชั้นงานน้อยกว่าจะใช้เวลาดำกว่านั่นเอง



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของยางธรรมชาติคอมเปาว์ RSS3-S2.0, ใช้กำลังวัตต์ 1000 วัตต์ และเปลี่ยนความหนา; T=1 cm, 2 cm และ 3 cm ตามลำดับ

รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของยางธรรมชาติ RSS3 คอมเปาว์ เมื่อความหนาของชิ้นงานตัวอย่างต่างกัน จากรูปพบว่าที่ความหนาชิ้นงาน 1 cm ใช้เวลาในการให้ความร้อนถึงอุณหภูมิ 150 C เท่ากับ 15.50 นาที ส่วนที่ความหนาชิ้นงาน 2 cm ใช้เวลาในการให้ความร้อนถึงอุณหภูมิ 150 C เท่ากับ 16.47 นาที และเมื่อเปลี่ยนเป็นความหนาชิ้นงาน 3 cm ใช้เวลาในการให้ความร้อนถึงอุณหภูมิ 150 C เท่ากับ 24.30 นาที ตามลำดับ ซึ่งการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกับยาง STR20 และ RSS3 ให้ความสัมพันธ์ทางความร้อนจะแปรเปลี่ยนตามความหนาของชิ้นงานในลักษณะคล้ายคลึงกัน

5.1.4 ผลของกำลังวัตต์ที่มีต่อความชื้นในยางคอมปาว์ STR20 และ RSS3

ตารางที่ 2 แสดงค่าปริมาณความชื้นในชิ้นงานยางคอมปาว์ STR20 และ RSS3 มีความหนา 2 ซม. และมีปริมาณกำมะถัน 2 phr ที่กำลังวัตต์ 200, 500, 800 และ 1000 วัตต์

สูตร	ค่าปริมาณความชื้น (%)				
	ก่อนผ่าน พลังงาน ไมโครเวฟ	หลังผ่านพลังงาน ไมโครเวฟ		ความชื้นที่ลดลงหลังผ่าน พลังงานไมโครเวฟ(%)	
		ด้านใน	ด้านนอก	ด้านใน	ด้านนอก
STR20-200W	0.34	0.30	0.33	11.76	2.94
STR20-500W	0.32	0.27	0.29	15.62	9.37
STR20-800W	0.33	0.26	0.29	21.21	12.12
STR20-1000W	0.31	0.23	0.27	25.80	12.90
RSS3-200W	0.25	0.22	0.24	12.00	4.00
RSS3-500W	0.26	0.22	0.24	15.38	7.69
RSS3-800W	0.24	0.19	0.21	20.83	12.50
RSS3-1000W	0.23	0.17	0.20	26.08	13.04

จากตารางที่ 2 พบว่าปริมาณความชื้นคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เปลี่ยนแปลงตามกำลังวัตต์ของพลังงานไมโครเวฟที่ให้แก่วางยางคอมปาว์ทั้งสองชนิดคือ STR20 และ RSS3 นั่นคือเมื่อกำลังวัตต์ของพลังงานไมโครเวฟจาก 200 วัตต์เป็น 1000 วัตต์ ปริมาณความชื้นด้านในของยางคอมปาว์ STR20 ที่หายไปคิดเป็น 11.76 % และ 25.80 % ตามลำดับ กรณีของยางคอมปาว์ RSS3 ปริมาณความชื้นด้านในลดลงจาก 12.0 % ไปเป็น 26.08 % ตามลำดับ มีข้อสังเกตอีกว่าปริมาณความชื้นในตัวอยางยางคอมปาว์ทั้งสองชนิดที่ลดลงหลังผ่านพลังงานไมโครเวฟนั้น ด้านในชิ้นงานและด้านนอกมีความแตกต่างกันโดยด้านในมีการลดลงของปริมาณความชื้นมากกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากพฤติกรรมการแพร่ผ่านความร้อนของพลังงานไมโครเวฟที่มีการทะลุทะลวงจากด้านในมาสู่ด้านนอกส่งผลให้ความชื้นลดหายไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีเกี่ยวกับการนำพาความร้อนของพลังงานไมโครเวฟดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

5.1.5 ผลของความหนาแน่นของชั้นงานที่มีต่อความชื้นในยางคอมเพาท์ STR20 และ RSS3

ตารางที่ 3 แสดงค่าปริมาณความชื้นในชั้นงานยางคอมเพาท์ STR20 และ RSS3 ที่ 1000 วัตต์ และมีปริมาณกำมะถัน 2 phr โดยที่ความหนาของชั้นงานเป็น 1, 2 และ 3 ซม.

สูตร	ค่าปริมาณความชื้น (%)				
	ก่อนผ่านพลังงานไมโครเวฟ	หลังผ่านพลังงานไมโครเวฟ		ความชื้นที่ลดลงหลังผ่านพลังงานไมโครเวฟ(%)	
		ด้านใน	ด้านนอก	ด้านใน	ด้านนอก
STR20-1cm	0.30	0.24	0.26	20.0	13.3
STR20-2cm	0.31	0.27	0.29	16.12	9.69
STR20-3cm	0.33	0.29	0.31	12.12	6.06
RSS3-1cm	0.26	0.21	0.23	19.23	11.53
RSS3-2cm	0.27	0.22	0.25	18.51	7.40
RSS3-3cm	0.28	0.25	0.26	10.71	7.14

จากตารางที่ 3 พบว่าความหนาของชั้นงานมีผลต่อปริมาณความชื้นในชั้นงานยางคอมเพาท์อย่างมาก โดยชั้นงานที่มีความหนาน้อยกว่าปริมาณความชื้นที่หายไปมีค่ามากกว่า โดยยางคอมเพาท์ทั้งสองชนิดให้ผลที่มีแนวโน้มคล้ายกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากความลึกของการแพร่ผ่านของพลังงานไมโครเวฟ (Penetration depth) นั้นเอง

5.1.6 ผลของปริมาณกำมะถันที่มีต่อความชื้นในยางคอมปาว์ STR20 และ RSS3

ตารางที่ 4 แสดงค่าปริมาณความชื้นในชิ้นงานยางคอมปาว์ STR20 และ RSS3 ที่ 1000 วัตต์ และความหนาของชิ้นงาน 2 ซม. และมีปริมาณกำมะถัน 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 phr

สูตร	ค่าปริมาณความชื้น (%)				
	ก่อนผ่านพลังงานไมโครเวฟ	หลังผ่านพลังงานไมโครเวฟ		ความชื้นที่ลดลงหลังผ่านพลังงานไมโครเวฟ (%)	
		ด้านใน	ด้านนอก	ด้านใน	ด้านนอก
STR 20	0.30	-	-	-	-
STR20-S2.0	0.34	0.29	0.31	14.70	8.82
STR20-S1.5-C	0.30	0.25	0.27	16.66	10.00
STR20-S2.0-C	0.33	0.26	0.29	21.21	12.12
STR20-S2.5-C	0.28	0.24	0.26	14.28	7.14
STR20-S3.0-C	0.29	0.24	0.26	17.24	10.34
RSS3	0.10	-	-	-	-
RSS3-S2.0	0.16	0.12	0.14	25.00	12.50
RSS3-S1.5-C	0.28	0.23	0.25	17.85	10.71
RSS3-S2.0-C	0.31	0.25	0.28	19.35	9.67
RSS3-S2.5-C	0.32	0.26	0.29	18.75	9.37
RSS3-S3.0-C	0.23	0.18	0.21	21.73	8.69

จากตารางที่ 4 พบว่าค่าปริมาณความชื้นที่ตรวจวัดในชิ้นงานยางคอมปาว์ STR20 และ RSS3 ที่ผสมด้วยเขม่าดำและไม่ผสมเขม่าดำ ไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณกำมะถันและเขม่าดำที่เติมลงไป แต่ยังคงพบว่าปริมาณความชื้นในตัวอย่างสามารถลดลงได้หลังจากผ่านพลังงานไมโครเวฟโดยที่ความชื้นด้านในชิ้นงานสูญเสียไปมากกว่าด้านนอก ซึ่งยืนยันได้ว่าพลังงานไมโครเวฟนั้นสามารถนำมาใช้ในการอ่อนยางธรรมชาติได้ทั้งยางก่อนคอมปาว์และหลังคอมปาว์

5.2 แสดงตัวอย่างการให้ความร้อนกับยางธรรมชาติคอมเปา์ด้วยพลังงานไมโครเวฟ

5.2.1 ยาง STR20 ความหนา 2 cm หลังการผ่านคลื่นที่ 1,000 W 100 °C



รูปที่ 10 STR20 ความหนา 2 cm หลังการผ่านคลื่นที่ 1,000 W 100 °C (ด้านล่าง)



รูปที่ 11 STR20 ความหนา 2 cm หลังการผ่านคลื่นที่ 1,000 W 100 °C (ด้านบน)



รูปที่ 12 STR20 ความหนา 2 cm หลังการผ่านคลื่นที่ 1,000 W 100 °C (ด้านข้าง)



รูปที่ 13 STR20 ความหนา 2 cm หลังการผ่านคลื่นที่ 1,000 W 100 °C (ด้านใน)

รูปที่ 10-13 แสดงลักษณะยางธรรมชาติ STR20 คอมเปาเวต์ ความหนา 2 cm หลังการผ่านคลื่นที่ 1,000 W 100 °C พบว่าความร้อนที่เกิดขึ้นมาจากด้านในแผ่ออกมาด้านนอก ชิ้นงานที่ได้ไม่มีการเสียรูปร่าง มีรูปทรงบ้างเล็กน้อยเนื่องจากใช้เวลาการผ่านคลื่นไมโครเวฟที่เร็ว ด้านในไม่มีรอยไหม้ส่วนบริเวณผิวด้านนอกสภาพปกติไม่มีการเสียรูปร่าง

5.2.2 ยาง STR20 ความหนา 2 cm หลังการผ่านคลื่นที่ 1,000 W 150 °C



รูปที่ 14 STR20 ความหนา 2 cm หลังการผ่านคลื่นที่ 1,000 W 150 °C (ด้านล่าง)



รูปที่ 15 STR20 ความหนา 2 cm หลังการผ่านคลื่นที่ 1,000 W 150 °C (ด้านบน)



รูปที่ 16 STR20 ความหนา 2 cm หลังการผ่านคลื่นที่ 1,000 W 150 °C (ด้านข้าง)



รูปที่ 17 STR20 ความหนา 2 cm หลังการผ่านคลื่นที่ 1,000 W 150 °C (ด้านใน)

รูปที่ 14-17 แสดงลักษณะทางธรรมชาติ STR20 คอมเปาวด์ ความหนา 2 cm หลังการผ่านคลื่นที่ 1,000 W 150 °C พบว่าความร้อนที่เกิดขึ้นมาจากด้านในแผ่ออกมาด้านนอกเช่นเดียวกัน ชี้นงานขยายตัวเล็กน้อย ใช้เวลาการผ่านคลื่นไม่นานนักด้านในไม่เกิดรอยไหม้ส่วนบริเวณผิวด้านนอกสภาพปกติความร้อนแผ่ยังผิวด้านนอกได้มากขึ้นเนื่องจากใช้อุณหภูมิสูงถึง 150 °C

**5.2.3 ยาง STR20 ผสมเขม่าดำ ความหนา 2 cm หลังการผ่านคลื่นที่ 1,000 W
100 °C**



รูปที่ 18 STR20-Carbon black ความหนา 2 cm หลังการผ่านคลื่นที่ 1,000 W 150 °C (ด้านล่าง)



รูปที่ 19 STR20-Carbon black ความหนา 2 cm หลังการผ่านคลื่นที่ 1,000 W 150 °C (ด้านบน)



รูปที่ 20 STR20-Carbon black ความหนา 2 cm หลังการผ่านคลื่นที่ 1,000 W 150 °C (ด้านข้าง)



รูปที่ 21 STR20-Carbon black ความหนา 2 cm หลังการผ่านคลื่นที่ 1,000 W 150 °C (ด้านใน)

รูปที่ 18-21 แสดงลักษณะยาง STR20-Carbon black ความหนา 2 cm หลังการผ่านคลื่นที่ 1,000 W 150 °C พบว่าความร้อนที่เกิดขึ้นมาจากด้านในแผ่ออกมาด้านนอก ชื้นงานคงรูปปกติ เนื่องจากใช้เวลาการผ่านคลื่นเร็ว ด้านในไม่มีรอยไหม้ส่วนบริเวณผิวด้านนอกสภาพปกติความร้อนดี ซึ่งจากรูปพบว่าเราสามารถใช้เวลาไมโครเวฟในการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานยางธรรมชาติทั้งที่มีการเติมและไม่เติมเขม่าดำโดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายแต่อย่างใดแก่ชิ้นงาน

6. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

6.1 กำลังวัตต์ที่เหมาะสมต่อการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟของยางธรรมชาติที่ศึกษานี้ คือ 1000 W เนื่องจากให้ความร้อนเร็วและใช้เวลาน้อยที่สุด ชิ้นงานไม่เสียรูปร่าง

6.2 ชนิดของยางธรรมชาติคือ STR20 และ RSS3 และปริมาณกำมะถัน ไม่มีผลต่อการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ

6.3 ที่พลังงานไมโครเวฟ กำลังวัตต์ 1000 W สามารถลดปริมาณความชื้นภายในชิ้นงานหนา 2 ซม. และมีปริมาณกำมะถัน 2 phr ในยางธรรมชาติ STR20 ได้ 25.80 % และในยางธรรมชาติ RSS3 ได้ 26.08 %ตามลำดับ

6.4 หลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟแก่ชิ้นงานยางธรรมชาติ STR20 ที่มีความหนา 1, 2 และ 3 cm สามารถลดปริมาณความชื้นได้ 20.00 %, 16.12% และ 12.12 % ตามลำดับ ในกรณียางธรรมชาติ RSS3 สามารถลดปริมาณความชื้นได้ 19.23 %, 18.51% และ 10.71 % ตามลำดับ

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] Peter A. Ciullo and Norman Hewitt. *The Rubber Formulary*, Noyes Publications, Norwich New York, USA; 1999.
- [4] Nicholas P. Cheremisinoff. *Elastomer Technology Handbook*, CRC Press, Inc. USA; 1993.
- [5] Roberts AD. *Natural Rubber Science and technology*. Brickendonbury. Oxford University; 1988.
- [6] Eldon E. Anderson. *US Patent No. 4,129,768*; 1978.
- [7] Akinobu Sejimo, Ono Shigeo. *US Patent No. 4,702,867*; 1987.
- [8] Novotny DS, Marsh RL, Masters FC, Tally DN. *US Patent No. 4,104,205*; 1978.
- [9] Lal. *US Patent No. 4,341,667*; 1982.
- [10] Hayashi. *US Patent No. 4,469,817*; 1984.
- [11] Ficker. *US Patent No. 4,665,101*; 1987.

[12] Metaxas AC. And Meridith RJ. *Industrail Microwave Heating*. Peter Peregrinus, Ltd. London; **1983**.

[13] Ratanadecho, P. 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; **2002**.

8. ข้อคิดเห็นและเสนอแนะ สกว.

1. ในส่วนข้อคิดเห็นของคณะทำงานวิจัยนี้พบอุปสรรคในการวิเคราะห์ผลด้วยเครื่องไมโครเวฟ เนื่องจากต้องทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิ ซึ่งตัววัดอุณหภูมิ (Temperature Sensor) จะเกิดการเสียหายได้ง่าย ทำให้งานเกิดการล่าช้าออกไป

2. ข้อเสนอแนะเนื่องจากการศึกษาการใช้ความร้อนแก่ยางธรรมชาติด้วยเครื่องไมโครเวฟชนิดทรงเหลี่ยม (Rectangular Wave Guide, Mode TE₁₀) ไม่เหมือนระบบไมโครเวฟแบบทั่วไป โดยระบบจะใช้คลื่นแบบเดียว มีข้อดีคือเราสามารถควบคุมความร้อนและเวลาได้เป็นอย่างดี สามารถคำนวณเป็นสมการทางความร้อนที่เป็นของยางธรรมชาติได้ ดังนั้นถ้าทำการศึกษาอย่างต่อเนื่องเสริมข้อมูลให้ละเอียดครบถ้วน เสนอแนะว่าสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญในอุตสาหกรรมยางที่ต้องการใช้พลังงานไมโครเวฟมาทำการอุ่นยางอีกด้วย โดยสามารถช่วยในการออกแบบและสร้างเครื่องไมโครเวฟขึ้นมาใช้เองในประเทศไทยได้ ไม่ต้องเสียเงินซื้อเครื่องจากต่างประเทศซึ่งมีราคาแพง

3. จากการศึกษาพบว่าตัวอย่างยางธรรมชาติที่ผ่านให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟสามารถลดปริมาณความชื้นลงได้ถึง 20% ใช้ระยะเพียง 20 นาที ลักษณะชิ้นงานที่ได้โดยดูจากลักษณะภายนอกมีรูปร่างปกติ ทางคณะทำงานวิจัยจึงมีข้อเสนอแนะถึงความเป็นไปได้ในการนำความรู้และเทคโนโลยีด้านพลังงานไมโครเวฟไปใช้ในการออกแบบเครื่องไมโครเวฟที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ตัวอย่างยางได้อย่างเหมาะสม น่าจะนำเทคโนโลยีดังกล่าวนี้มาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยางที่ทำการผลิตล้อรถยนต์ ท่อยางหรือชิ้นงานที่มีความหนาหลายๆ และต้องการลดระยะเวลาในการให้ความร้อนหรือทำให้ปริมาณน้ำลดลงได้เป็นอย่างดี

9. ภาคผนวก

วัตถุประสงค์ข้อที่.....	กิจกรรมที่วางแผนไว้	กิจกรรมที่ดำเนินการมา	โดยทำให้....	ผลที่ได้รับตลอดโครงการ
ข้อที่ 1 คือ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาหลังการให้ความร้อน (pre-heating) ด้วยพลังงานไมโครเวฟกับยางแท่ง STR 20 และแผ่นรมควัน RSS3	1.เตรียมยางธรรมชาติคอมเปาต์ทั้งยางแท่ง STR 20 และแผ่นรมควัน RSS3 2.เตรียมทำแม่พิมพ์โลหะในการขึ้นรูปชิ้นงาน 3. วัดการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยไมโครเวฟ	1. ได้ยาง STR20 compounding และยาง RSS3 compounding 2. ได้แม่พิมพ์หนาขนาด 1,2 และ 3 cm 3. ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาหลัง	โดยทำให้สามารถให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟแก่ยางยางแท่ง STR 20 และแผ่นรมควัน RSS3 ได้รวดเร็ว โดยไม่เสียรูปร่างแต่อย่างใด	ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างอุณหภูมิและเวลาหลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟและกำลังวัตต์ที่เหมาะสมคือ 1000 W ในการทดลองนี้
ข้อที่ 2 คือเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อปริมาณความชื้นหลังการให้ความร้อน (pre-heating) ด้วยพลังงานไมโครเวฟกับยางแท่ง STR 20 และยางแผ่นรมควัน RSS3	จะทำการวัดปริมาณความชื้นในยางก่อนและหลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟเมื่อความชื้นเปลี่ยนจาก 200, 500, 800 และ 1,000 W ตามลำดับ	ได้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างๆ กัน	โดยทำให้ได้ %Moisture ของยางแท่ง STR 20 และยางแผ่นรมควัน RSS3 ลดลงเป็น 25.80 % และ 26.08 % ตามลำดับ เมื่อให้พลังงานไมโครเวฟที่ 1000 W แก่ชิ้นงานความหนา 2 cm	ทราบสภาวะกำลังวัตต์ที่เหมาะสมในการทดลองนี้ คือ 1000 W และปริมาณความชื้นที่ลดลงได้โดยไม่มี การเสียรูปร่างชิ้นงานที่ 150 C

วัตถุประสงค์ข้อที่.....	กิจกรรมที่วางแผนไว้	กิจกรรมที่ดำเนินการมา	โดยทำให้....	ผลที่ได้รับตลอดโครงการ
ข้อที่ 3 คือ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นงานที่มีผลต่อปริมาณขึ้นหลังการให้ความร้อน (pre-heating) ด้วยพลังงานไมโครเวฟกับยางแท่ง STR 20 และยางแผ่นรมควัน RSS3	จะทำการวัดปริมาณความชื้นในยางก่อนและหลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟเมื่อความหนาของชั้นงานเท่ากับ 1,2 และ 3 cm ตามลำดับ	ทราบค่าปริมาณความชื้นในชั้นงานทดสอบด้วยเครื่องไมโครเวฟที่ความหนาต่างๆกัน	โดยทำให้ค่าความชื้นในยางยางธรรมชาติ STR20 ที่มีความหนา 1, 2 และ 3 cm ลดลงเป็น 20.00 %, 16.12% และ 12.12 % ตามลำดับ และในกรณียางยางธรรมชาติ RSS3 สามารถลดปริมาณความชื้นได้ 19.23 %, 18.51% และ 10.71 % ตามลำดับ หลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ	ทราบถึงการอุ่นยางด้วยพลังงานไมโครเวฟสามารถลดปริมาณความชื้นได้แต่ต้องคำนึงถึงความหนาของชั้นงานด้วย

คำชี้แจงของนักวิจัยต่อข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ

ทางคณะผู้วิจัยต้องขอขอบคุณสำหรับข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการอย่างมาก และได้จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์ตามคำแนะนำดังต่อไปนี้

1. ได้เรียบเรียงข้อเสนอแนะข้อ 1 และ 2 ตามเอกสารแนบ เป็นที่เรียบร้อยในรายงานหน้า 1 และ 6 โดยตัดส่วนที่ไม่เกี่ยวข้องออกไปเพื่อให้ข้อมูลกระชับขึ้นและไม่ซ้ำซ้อน
2. บทคัดย่อทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษได้ทำการแก้ไขเรียบร้อยแล้วดังรายงานหน้า 4-5
3. แก้ไขการแปลความหมายเป็น ความต้านทานต่อแรงดึง ดังแสดงในรายงานหน้า 7
4. ข้อเสนอแนะข้อ 5 และ 6 ได้รายงานเพิ่มเติมเรียบร้อยแล้วในหน้า 10-11
5. ข้อเสนอแนะข้อ 7 ตัดคำว่า green ออก เปลี่ยนเป็น STR20-S2.0 แทน STR20-green ซึ่งจะหมายถึงยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมด้วยเขม่าดำ เพื่อผู้อ่านได้เข้าใจง่ายขึ้น
6. ข้อเสนอแนะข้อ 8 และ 9 ได้แก้ไขโดยระบุกำลังวัตต์เป็น 200, 500, 800 และ 1,000 วัตต์เรียบร้อยแล้ว
7. ตอบข้อเสนอแนะข้อ 10 เรื่องอุณหภูมิการเตรียมยางคอมปาวด์ด้วยเครื่องบดลูกกลิ้งคู่ที่ภาควิชาวิศวกรรมพลาสติก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ปกติเราจะตั้งอุณหภูมิที่ขึ้นหน้าจอเครื่องไว้ที่ 50 องศาเซลเซียส แต่เนื่องจากการเสียดสีและทำการตียางเป็นเวลาประมาณ 20 นาทีจะทำให้เกิดความร้อนสะสมที่เกิดกับยางจนเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ โดยถ้าเราตั้งไว้ที่ 70 องศาเซลเซียสถ้าเราทำการตียางไปเรื่อยๆ ยางจะเกิดไหมได้
8. ข้อเสนอแนะข้อ 11 และ 13 ได้ทำการแก้ไขเรียบร้อยแล้ว
9. ข้อเสนอแนะข้อ 12 จะจัดทำหนังสือขออนุญาตยืมหลังให้ทาง สกว. รวมทั้งการ Acknowledge TRF ในฐานะผู้ให้ทุน