การอุ่นยางธรรมชาติด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยใช้ระบบท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยม: (I) ผลของความหนาชิ้นงานและองค์ประกอบในยางธรรมชาติคอมเปาวด์

Pre-heating of Natural Rubber with Microwave Energy Using a Rectangular Wave Guide (MODE: TE10): (I) Effect of Sample Thickness and Compositions

วารุณี กลิ่นไกล[1*] และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช[2]
[1]ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทร.02-549-3484-5 อีเมลล์*: warunee.a@rmutt.ac.th
[2]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120 โทร. 02-564-3001-9

บทคัดย่อ—เทคโนโลยีการให้ความร้อนแก่ยางธรรมชาติด้วยพลังงานไมโครเวฟนับว่ามีความเป็นไปได้อย่างมากในการอุ่นยางธรรมชาติคอมเปาวด์ที่ผสมและไม่ผสมด้วยเขม่าดำ แม้ว่ามีงานวิจัยที่ผ่านมาเรานิยมใช้การอุ่นยางด้วยการให้ความร้อนด้วยเตาอบโดยความร้อนจะผ่านไปยังผิวชิ้นงานแต่อย่างไรก็ตาม การให้ความร้อนด้วยวิธีดังกล่าวต้องใช้เวลานานมาก ใช้คนงานปริมาณมากและสูญเสียพลังงาน ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมีความสนในที่จะนำพลังงานไมโครเวฟมาใช้ในการอุ่นยางธรรมชาติแทนวิธีแบบดั้งเดิม โดยศึกษาถึงสภาวะต่างๆ เช่น กำลังวัตต์ ปริมาณกำมะถัน ความหนาชิ้นงาน ที่มีผลต่อการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟของยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมด้วยเขม่าดำและที่เติมด้วยเขม่าดำ ยางธรรมชาติคอมเปาวด์จะผ่านพลังงานไมโครเวฟโดยใช้ 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 สามารถลดปริมาณความชื้นในชิ้นงานยางธรรมชาติได้ 25.80 %

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%.

1. คำนำ (Introduction)

ในปัจจุบันประเทศไทยสามารถผลิตยางธรรมชาติ (Natural Rubber) ได้เป็นอันดับหนึ่งของโลก ซึ่งอยู่ในรูปของน้ำยางข้นและยางดิบแห้งชนิดต่าง ๆ โดยส่วนใหญ่จะผลิตเป็นยางแท่ง ยางแผ่นรมควันและส่งขายต่างประเทศ ซึ่งมีราคาถูก แต่ในประเทศไทยการนำยางธรรมชาติไปทำเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อใช้งานยังไม่กว้างขวางมากนักเนื่องจากขาดเทคโนโลยีในพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ให้หลากหลายรวมถึงกระบวนผลิตที่ยังล้าสมัย เป็นต้น แม้ว่ายางธรรมชาติจะมีสมบัติที่พิเศษแตกต่างจากวัสดุอื่น ๆ เช่น มีความยืดหยุ่นดีให้สมบัติเชิงกลสูงเนื่องจากเมื่อถูกยืดออกโมเลกุลจะเรียงตัวเป็นระเบียบทำให้ความต้านทานแรงดึงสูง สมบัติการคืนตัวและการกระดอนสูงกว่ายางสังเคราะห์อื่นๆ นอกจากนี้ยังมีเนื้อทึบสามารถกันน้ำและอากาศไม่ให้ผ่านได้โดยง่าย อีกทั้งไม่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ดังนั้นยางจึงเป็นวัสดุที่มีประโยชน์และคุณค่ามาก [1-5]

ที่มาของปัญหาที่พบในกระบวนผลิตของอุตสาหกรรมยางคือ มีขั้นตอนหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการวัลคาไนเซชั่นผลิตภัณฑ์ยางเกือบทุกชนิดคือการอบให้ความร้อนหรือการเคียว (Cure) ซึ่งกระบวนการเคียวโดยวิธีดั้งเดิมโดยใช้ลมร้อนนั้นยังมีปัญหาเรื่องความไม่สมบูรณ์ของเนื้อยางและปัญหาความล่าช้าของกระบวนการผลิต ความร้อนที่ป้อนให้แก่วัสดุนั้นจะสัมผัสเฉพาะที่ผิวหน้าวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการเท่านั้น ซึ่งทำให้การกระจายความร้อนเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้อันตกิริยาที่เกิดขึ้นกับเนื้อยางธรรมชาติเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอ และมีผลต่อสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ของยางธรรมชาติด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ตำแหน่งที่วัสดุสัมผัสความร้อนโดยตรงอาจจะเกิดการเสียหายได้เพราะต้องใช้เวลานานจนกว่าความร้อนจะเข้าถึงภายในเนื้อวัสดุอย่างทั่วถึง ด้วยเหตุนี้ ทำให้ต้องเสียพลังงานและเวลาในกระบวนการผลิต รวมถึงการควบคุมคุณภาพทำได้ยากลำบาก จึงมักมีปัญหาในเรื่องของการส่งออก ทำให้มีแนวคิดในการนำพลังงาน

ไมโครเวฟมาใช้ทดลองให้ความร้อนแก่ยางธรรมชาติ โดยคงสมบัติที่ดีของยางธรรมชาติอยู่ครบถ้วน เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟจะให้ความร้อนที่สม่ำเสมอทั่วถึงและมีข้อได้เปรียบ คือ ความร้อนที่ยางได้รับจะมีความสม่ำเสมอ กระบวนการในการผลิตสะอาดและรวดเร็ว เกิดความร้อนได้เร็วทำให้ประหยัดพลังงานและประหยัดเนื้อที่

งานวิจัยที่ผ่านมา [6] ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการและอุปกรณ์สำหรับให้ความร้อนแก่วัสดุด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการดีวัลคาไนเซชั่น (De-vulcanization) ของชิ้นส่วนที่เป็นเศษยาง โดยการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ พบว่าเศษยางที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟสามารถนำกลับมารีไซเคิลเป็นยางชนิดใหม่ได้ อย่างไรก็ตามการใช้งานของเทคนิคนี้มีข้อจำกัดเพราะว่าไม่สามารถหาวิธีที่เหมาะสมและอุปกรณ์ที่สามารถทำได้เหมือนเดิมในกรณีที่มีการขยายการผลิตในระดับที่ใหญ่ขึ้น โดยปกติยางจะวัลคาไนซ์ได้ยากด้วยคลื่นไมโครเวฟเพราะว่าที่อุณหภูมิห้องนั้นยางไม่นำไฟฟ้าแต่การนำไฟฟ้าจะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งถ้าเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นหมายถึงว่าต้องใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อให้ความร้อนแก่ยางในอุณหภูมิที่สูงขึ้นตามไปด้วย เพื่อให้เพียงพอกับการดีวัลคาไนเซชั่นบางส่วนของยางและยังต้องเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าในยางดังกล่าวด้วย ซึ่งผลข้อนกลับทำให้เกิดสภาพความร้อนสูญหายไปในตัวอย่างยางเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งตัวอย่างยางเมื่อเพิ่มความร้อนมากขึ้นมันจะทำให้การดูดกลืนความร้อนไม่เหมาะสมกับพลังงานไมโครเวฟที่ให้เข้าไปทำให้เกิดความร้อนสะสมมากเกินไปและไหม้เป็นเปลวไฟได้ ความพยายามที่จะทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางจากเศษยางที่ผ่านการดีวัลคาไนเซชั่นด้วยการลำเลียงด้วยสายพานโดยใช้พลังงานไมโครเวฟก็ยังไม่สามารถทำในทางการค้าได้ ดังนั้นจึงมีความต้องการในการพัฒนาวิธีการใหม่รวมถึงอุปกรณ์ในการดีวัลคาไนซ์เศษยางโดยพัฒนาระบบขนส่งลำเลียงวัสดุอย่างต่อเนื่องและให้ความร้อนหรือให้เกิดปฏิกิริยาในเตาอบไมโครเวฟ

นอกจากนี้มีกลุ่มวิจัย [7] ได้นำพลังงานไมโครเวฟมาผสมกับการอบด้วยลมร้อนแบบดั้งเดิม ในการวัลคาไนซ์ท่อยาง (rubber hose) โดยใช้สองขั้นตอนคือ ใช้การพรีวัลคาไนซ์ (Pre-vulcanization) ด้วยพลังงานไมโครเวฟและการวัลคาไนเซชันด้วยวิธีดั้งเดิมโดยการนำพาความร้อนผ่านตัวกลางที่เป็นตัวให้ความร้อน โดยจะมีชั้นของเรซินสังเคราะห์ที่ใส่ตัวต้านทานความร้อนซึ่งมีค่าอุณหภูมิหลอมตัวสูงกว่าอุณหภูมิของการวัลคาไนซ์ หุ้มท่อยางไว้ด้านนอกโดยจะสัมผัสกับท่อยางแต่ไม่ยึดติดกับท่อยาง โดยท่อยางจะนำมาให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟก่อน จากนั้นนำไปวัลคาไนซ์ด้วยการพาความร้อนผ่านตัวกลางที่ให้ความร้อนในระบบปกติหลังจากการวัลคาไนซ์เสร็จสมบูรณ์ ชั้นของเรซินนั้นหลังจากนั้นชั้นของเรซินจะถูกทำให้เย็นตัวลงและแข็งตัวและจะถูกดึงออกจากท่อยาง พบว่าการวัลคาไนเซชั่นยางด้วยการให้ความร้อนจากพลังงานไมโครเวฟและแบบลมร้อนนั้นจะช่วยลดระยะเวลาการเดียวของยางได้ เนื่อง จากพลังงานไมโครเวฟจะช่วยทำให้ยางเกิดความร้อนจากชิ้นงานด้านในสู่ด้านนอกภายในระยะเวลาอันรวดเร็ว และพอผ่านชิ้นงานตัวอย่างดังกล่าวไปยังตู้อบด้วยลมร้อนอย่างต่อเนื่องนั้นจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่สามารถขึ้นรูปได้รวดเร็ว และประหยัดพลังงานเมื่อเทียบกับกระบวนการวัลคาไนเซชั่นแบบดั้งเดิม

ถึงแม้ว่าที่ผ่านมาจะมีการจดสิทธิบัตรในการประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟในการวัลคาไนเซชั่นผลิตภัณฑ์ยาง ได้แก่ ยางสังเคราะห์ [8] อีลาสโตเมอร์ [9] และทั้งยางธรรมชาติ [10-11]ก็ตาม แต่ก็ยังไม่มีผลงานตีพิมพ์ในวารสารที่กล่าวถึงความสัมพันธ์ด้านการให้ความร้อน สมบัติ โครงสร้างของยาง รวมทั้งตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อสมบัติของยางหลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ ทั้งนี้เนื่องมาจากความซับซ้อนของกระบวนการและปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น และงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่ศึกษาคลื่นไมโครเวฟแบบหลายเฟส (Multi-phase) ซึ่งเป็นไมโครเวฟที่ใช้กันตามบ้านเรือน ถึงแม้ว่าพลังงาน ไมโครเวฟสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมยางได้ แต่ในประเทศไทยมีการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องนี้น้อยมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมยางพารา ดังนั้นงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นถึงการศึกษาการให้ความร้อนหรืออุ่นยาง (Pre-heating) โดยใช้พลังงานไมโครเวฟระบบท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมเป็นแบบเฟสเดียว (single phase) ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิ จำนวนกำลังวัตต์ที่ใช้ โดยจะศึกษาผลความหนาชิ้นงานยางตัวอย่างและปริมาณกำมะถันในเนื้อยางคอมเปาวด์ โดยความรู้ที่ได้จะเป็นองค์ความรู้ขั้นพื้นฐานในการนำไปประยุกต์ใช้งานในการออกแบบระบบการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง ได้แก่ การผลิตยางล้อรถยนต์ หรือผลิตภัณฑ์ยางอื่นๆ ที่มีความหนามากๆ ได้

2. วิธีการทดลอง (Experimentals)

2.1 การเตรียมตัวอย่างยางคอมเปาว์

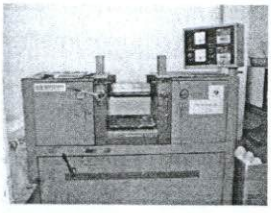
ยางคอมเพาด์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ยางธรรมชาติ สารวัลคาไนซ์ สารกระตุ้น สารตัวเติม และสารตัวเร่ง ดังแสดงอัตราส่วนการผสมของยางคอมเพาด์ในตารางที่ 1 การเตรียมยางคอมเพาด์ โดยเริ่มนำยางธรรมชาติมาทำการบดผสมด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง ดังแสดงในรูปที่ 1 ทำให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยตั้งอุณหภูมิของเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งไว้ที่ 50°C ใช้เวลาประมาณ 5นาที จนยางเริ่มพันลูกกลิ้งมองเห็นเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นใส่ ZnO ลงไปบดผสมใช้มีดกรีดและบดผสมไปเรื่อยๆใช้เวลาประมาณ 3นาที ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ใส่ Stearic acid ลงไปบดผสมใช้มีดกรีดและบดผสมไปเรื่อยๆใช้เวลาประมาณ 3นาที ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ใส่ MBTS ลงไปบดผสมใช้มีดกรีดและบดผสมไปเรื่อยๆใช้เวลาประมาณ 3นาที ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ค่อมาใส่ DPG ลงไปบดผสมใช้มีดกรีดและบดผสมไปเรื่อยๆ ใช้เวลาประมาณ 3นาที ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน และ ใส่ Sulfur ลงไปบดผสมใช้มีดกรีดและบดผสมไปเรื่อยๆ ใช้เวลาประมาณ 3นาที และเติมด้วยเขม่าดำลงไปผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันใช้เวลาประมาณ 3นาที

2.2 การเตรียมพิมพ์สำหรับขึ้นรูปตัวอย่างชิ้นยาง

สั่งทำแม่พิมพ์โลหะสำหรับใส่ชิ้นงานให้มีขนาดความหนาต่างๆ กัน และนำยางคอมเปาว์ที่ผ่านเครื่องบดผสมแล้วมาทำการอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป ดังแสดงในรูปที่ 2 ให้เป็นชิ้นงานตามขนาดที่ต้องการที่อุณหภูมิห้อง นาน 5 นาที โดยทำที่สภาวะเดียวกันทุกชิ้นงาน จากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่องไมโครเวฟ (Microwave Machine), ยี่ห้อ Micro Denshi, Japan และอุปกรณ์ประกอบ

ตารางที่ 1 แสดงอัตราส่วนยางคอมเพาด์ที่ใช้ในการทดลอง

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

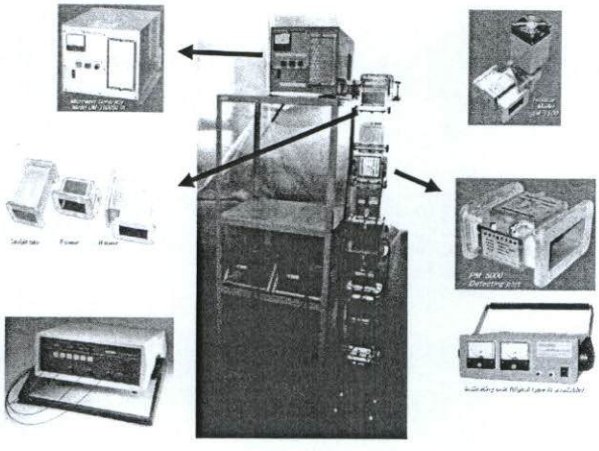


รูปที่ 1 แสดงเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง
(Two roll mill, Lab Tech Co., Ltd)

รูปที่ 2 แสดงเครื่องอัดขึ้นรูป
(compression molding machine, Lab Tech Co., Ltd)

2.3.การทดสอบการให้ความร้อนกับยางด้วยพลังงานไมโครเวฟ

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

เตาอบไมโครเวฟที่**ใช้ในการ**ทดลอง ประกอบด้วย

-เครื่องกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ ช่วงคลื่นที่ 2,450MHz เป็นเครื่องของไมโครเดนชิ โมเดล UN 1500

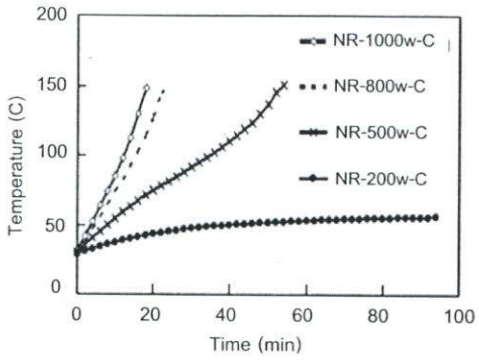
-ตัวดักคลื่นไมโครเวฟ ป้องกันการย้อนกลับของคลื่น เป็นเครื่องของไมโครเดนชิ โมเดล D25 M-TM

-ท่อนำคลื่น สำหรับใส่ชิ้นงานทดสอบ ขนาดกว้าง 54.46มิลลิเมตร ยาว 109.22มิลลิเมตร สูง 50.00มิลลิเมตร

3.ผลการทดลอง (Results and Discussion)

3.1. อิทธิพลของกำลังวัตต์ที่มีต่ออุณหภูมิและเวลาของยางภายใต้พลังงานไมโครเวฟ

นำยางธรรมชาติคอมเปาว์ มีความหนา 2 ซม. และมีปริมาณกำมะถัน 2 phr มาทำการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนภายใต้พลังงานไมโครเวฟ โดยควบคุมกำลังวัตต์ของคลื่นไมโครเวฟที่ความเข้มต่างๆ กัน คือ 200, 500, 800 และ 1,000 วัตต์ และดูการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการเกิดความร้อนในเนื้อยางธรรมชาติคอมเพาว์



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของยางธรรมชาติคอมเปาว์ที่กำลังวัตต์ต่างกัน

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของยางธรรมชาติคอมเปาว์เมื่อกำลังวัตต์ที่ให้แตกต่างกันเพื่อหาสภาวะกำลังวัตต์ที่เหมาะสมในการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟแก่ยางธรรมชาติคอมเปาว์ จากรูปที่ 4 พบว่าเมื่อให้ความร้อนแก่ตัวอย่างยางธรรมชาติคอมเปาว์ที่กำลังวัตต์ต่างกันคือ 200, 500, 800 ไปจนถึง 1,000 วัตต์ พบว่า เมื่อกำลังวัตต์ที่ใช้มากขึ้น เวลาที่วัสดุยางได้รับความร้อนจะใช้น้อยลง เช่น ที่กำลังวัตต์ 1000 วัตต์จะใช้ประมาณ 15 นาที ในการให้ความร้อนในเนื้อวัสดุยางได้สูง 150 C เนื่องจากว่าวัสดุยางธรรมชาติสามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้มากขึ้นนั่นเอง สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อคลื่นไมโครเวฟทะลุผ่านวัสดุไดอิเล็กตริคจะถูกดูดซับและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน เรียกว่า การกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (Q) ซึ่งจะสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในวัสดุไดอิเล็กตริค[12] โดยค่าของการกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร เมื่อสมมุติให้ไม่มีการสูญเสียสนามแม่เหล็กแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้ [13]

$$Q = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r'' E^2$$

$$Q = 2\pi \cdot f \cdot \varepsilon_0 \varepsilon_r' (\tan \delta) E^2$$

ซึ่ง Q = Density of Microwave Power Absorbed (W/m^3)

E = สนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง f

f = ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ (Hz)

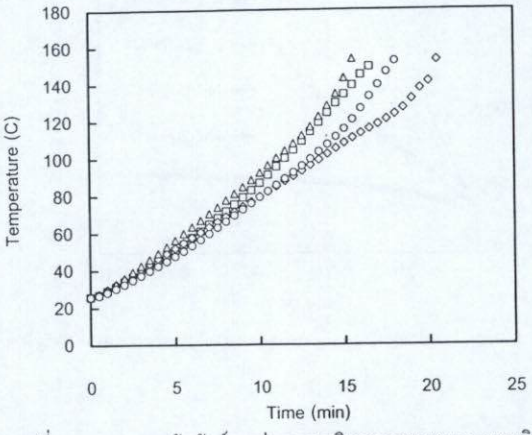
ω = ความเร็วเชิงมุมของคลื่นไมโครเวฟ (rad/s)

ε_0 =ความสามารถของช่องว่างที่ไม่มีการดูดซับ ส่งผ่าน และสะท้อนพลังงานจากส่วนที่เป็นสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ (Dielectric Constant)

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

ดังนั้นจากการทดลองเราพบว่าในการให้ความร้อนแก่ยางธรรมชาติคอมเปาว์ด้วยพลังงานไมโครเวฟ ที่กำลังวัตต์ 1000 วัตต์เหมาะสมเนื่องจากใช้เวลาในการให้ความร้อนน้อยและชิ้นงานไม่เกิดการเสียรูปร่าง

2. ผลของปริมาณกำมะถันที่มีต่ออุณหภูมิและเวลาของยางภายใต้พลังงานไมโครเวฟ

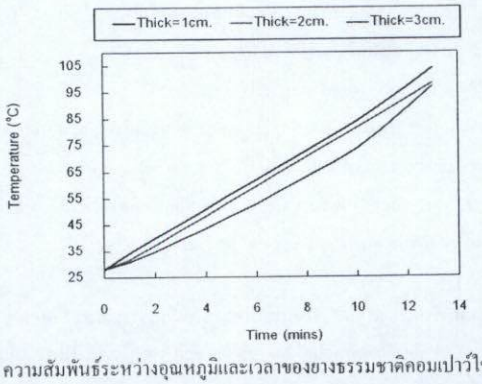


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของยางธรรมชาติคอมเปาว์ที่ความหนา 2 ซม. ใช้กำลังวัตต์ 1000 วัตต์ และเปลี่ยนปริมาณกำมะถัน; S=1.5 (□), S=2.0 (◇), S=2.5 (△) และ S=3.0 (○) ตามลำดับ

จากรูปที่ 5 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของยางธรรมชาติคอมเปาวด์ความหนา 2 ซม.ใช้กำลังวัตต์ 1000 วัตต์ เมื่อปริมาณกำมะถันเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 phr ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าปริมาณกำมะถันที่เปลี่ยนไปไม่ส่งผลต่อกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาโดยให้กราฟที่มีแนวโน้มที่คล้ายๆ กัน โดยจะใช้เวลาในการให้ความร้อนแต่วัสดุยางให้ถึงอุณหภูมิ 150 C ประมาณ 15-20 นาที ทั้งนี้เนื่องมาจากการเติมกำมะถันซึ่งไม่มีขั้วลงไปในยางธรรมชาติไม่ได้เป็นการเพิ่มค่าไดอิเล็กตริคให้แก่วัสดุยางดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ทำให้ไม่พบการเปลี่ยนแปลงใดๆ เมื่อให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ

3. ผลของความหนาชิ้นงานที่มีต่ออุณหภูมิและเวลาของยางภายใต้พลังงานไมโครเวฟ

นำยางธรรมชาติคอมเปาว์ มาทำการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนภายใต้พลังงานไมโครเวฟ โดยจะควบคุมกำลังวัตต์ของคลื่นไมโครเวฟที่ความเข้ม 1,000 วัตต์ และดูความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการเกิดความร้อนในเนื้อยางธรรมชาติคอมเพาว์ที่ความหนาชิ้นงานต่างกันคือ 1 cm, 2 cm และ 3 cm ตามลำดับ



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของยางธรรมชาติคอมเปาว์ใช้กำลังวัตต์ 1000 วัตต์ และเปลี่ยนความหนา; T=1 cm, 2 cm และ 3 cm ตามลำดับ

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของยางธรรมชาติคอมเปาว์เมื่อความหนาของชิ้นงานตัวอย่างต่างกัน จากรูปพบว่าที่ความหนาชิ้นงาน 1 cm ใช้เวลาในการให้ความร้อนถึงอุณหภูมิ 150 C เท่ากับ 14.40 นาที ส่วนที่ความหนาชิ้นงาน 2 cm ใช้เวลาในการให้ความร้อน เท่ากับ 17.00 นาที และเมื่อเปลี่ยน เป็นความหนาชิ้นงาน 3 cm ใช้เวลาในการให้ความร้อนเท่ากับ 20.2 นาที ตามลำดับ ซึ่งการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟความร้อนจะแพร่ผ่านยางจากภายในสู่ภายนอกและมีผลโดยตรงต่อความหนาชิ้นงานคือความหนาของชิ้นงานน้อยกว่าจะใช้เวลาต่ำกว่านั่นเอง

4. ผลของกำลังวัตต์ที่มีต่อความชื้นในยางคอมเปาว์

ตารางที่ 2 แสดงค่าปริมาณความชื้นในชิ้นงานยางคอมเปาว์ มีความหนา 2 ซม. และมีปริมาณกำมะถัน 2 phr ที่กำลังวัตต์ต่างๆ กันคือ 200, 500, 800 และ 1000 วัตต์ ตามลำดับ

สูตร	ค่าปริมาณความชื้น (%)				
	ก่อนผ่านพลังงานไมโครเวฟ	หลังผ่านพลังงานไมโครเวฟ		ความชื้นที่ลดลงหลังผ่านพลังงานไมโครเวฟ(%)	
		ด้านใน	ด้านนอก	ด้านใน	ด้านนอก
NR-200W	0.34	0.30	0.33	11.76	2.94
NR-500W	0.32	0.27	0.29	15.62	9.37
NR-800W	0.33	0.26	0.29	21.21	12.12
NR-1000W	0.31	0.23	0.27	25.80	12.90

จากตารางที่ 2 พบว่าปริมาณความชื้นคิดเป็นเปอร์เซนต์เปลี่ยนแปลงตามกำลังวัตต์ของพลังงานไมโครเวฟที่ให้แก่ตัวอย่างยางคอมเปาด์ นั่นคือเมื่อกำลังวัตต์ของพลังงานไมโครเวฟเพิ่มจาก 200 วัตต์เป็น 1000 วัตต์ ปริมาณความชื้นด้านในของเนื้อยางคอมเปาว์ STR2 ที่หายไปคิดเป็น 11.76 % และ 25.80 % ตามลำดับ มีข้อสังเกตอีกว่าปริมาณความชื้นในตัวอย่างยางคอมเปาด์ลดลงหลังผ่านพลังงานไมโครเวฟของชิ้นงานด้านในชิ้นงานและด้านนอกมีความแตกต่างกันโดยด้านในมีการลดลงของปริมาณความชื้นมากกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากการสนับสนุนข้อเสนอที่ว่าพฤติกรรมการแพร่ผ่านความร้อนของพลังงานไมโครเวฟที่มีการทะลุทะลวงจากด้านในมาสู่ด้านนอกส่งผลให้ความชื้นลดหายไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีเกี่ยวกับการนำพาความร้อนของพลังงานไมโครเวฟดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

5. ผลของความหนาชิ้นงานที่มีต่อความชื้นในยางคอมเปาว์

ตารางที่ 3 แสดงค่าปริมาณความชื้นในชิ้นงานยางคอมเปาว์ ที่กำลังวัตต์ 1000 วัตต์ และมีปริมาณกำมะถัน 2 phr โดยที่ความหนาของชิ้นงานเป็น 1, 2 และ 3 ซม. ตามลำดับ

สูตร	ค่าปริมาณความชื้น (%)				
	ก่อนผ่านพลังงานไมโครเวฟ	หลังผ่านพลังงานไมโครเวฟ		ความชื้นที่ลดลงหลังผ่านพลังงานไมโครเวฟ(%)	
		ด้านใน	ด้านนอก	ด้านใน	ด้านนอก
NR-1cm	0.30	0.24	0.26	20.0	13.3
NR -2cm	0.31	0.27	0.29	16.12	9.69
NR-3cm	0.33	0.29	0.31	12.12	6.06

จากตารางที่ 3 พบว่าความหนาของชิ้นงานมีผลต่อปริมาณความชื้นในชิ้นงานยางคอมเปาวด์ อย่างมาก โดยชิ้นงานที่มีความหนาน้อยกว่าปริมาณความชื้นที่หายไปมีค่ามากกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของความลึกของการแพร่ผ่านของพลังงานไมโครเวฟ (Penetration depth) นั่นเอง

6. ผลของปริมาณกำมะถันที่มีต่อความชื้นในยางคอมเปาว์

ตารางที่ 4 แสดงค่าปริมาณความชื้นในชิ้นงานยางคอมเปาว์ที่กำลังวัตต์ 1000 วัตต์ และความหนาของชิ้นงาน 2 ซม. และมีปริมาณกำมะถัน 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 phr

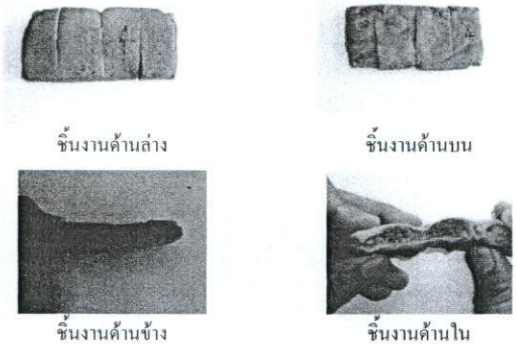
สูตร	ค่าปริมาณความชื้น (%)				
	ก่อนผ่านพลังงานไมโครเวฟ	หลังผ่านพลังงานไมโครเวฟ		ความชื้นที่ลดลงหลังผ่านพลังงานไมโครเวฟ (%)	
		ด้านใน	ด้านนอก	ด้านใน	ด้านนอก
NR	0.30	-	-	-	-
NR-S2.0	0.34	0.29	0.31	14.70	8.82
NR-S1.5-CB	0.30	0.25	0.27	16.66	10.00
NR-S2.0-CB	0.33	0.26	0.29	21.21	12.12
NR-S2.5-CB	0.28	0.24	0.26	14.28	7.14
NR-S3.0-CB	0.29	0.24	0.26	17.24	10.34

ตามลำดับ

จากตารางที่ 4 พบว่าค่าปริมาณความชื้นที่ตรวจวัดในชิ้นงานยางคอมเปาวด์ไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณกำมะถัน และในการทดลองได้มีการเปรียบเทียบผลกับยางที่มีการเติมด้วยเขม่าดำลงไปคงที่ 10 phr แต่ยังคงพบว่าปริมาณ ความชื้นในตัวอย่างยางสามารถลดลงได้หลังจากผ่านพลังงานไมโครเวฟโดยที่ความชื้นด้านในชิ้นงานสูญเสียไปมากกว่าด้านนอกและไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณเขม่าดำที่เติมลงไป ซึ่งยืนยันได้ว่าพลังงานไมโครเวฟนั้นสามารถนำมาให้ในการอุ่นยางธรรมชาติได้ทั้งยางก่อนคอมเปาด์และหลังคอมเปาด์

7. แสดงตัวอย่างการให้ความร้อนกับยางธรรมชาติคอมเปาว์ด้วยพลังงานไมโครเวฟ

7.1 ยางธรรมชาติ ความหนา 2 cm หลังการผ่านคลื่นที่ 1,000 W 100 °C



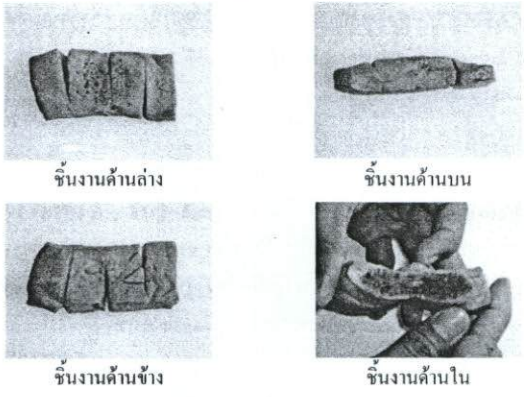
ชิ้นงานด้านล่าง ชิ้นงานด้านบน

ชิ้นงานด้านข้าง ชิ้นงานด้านใน

รูปที่ 7 แสดงรูปตัวอย่างยางหลังการผ่านคลื่นคลื่นไมโครเวฟ1,000 W ที่ 100 °C ด้านล่าง ด้านบน ด้านข้างและด้านใน

รูปที่ 7 แสดงลักษณะยางธรรมชาติ ความหนา 2 cm หลังการผ่านคลื่นที่ 1,000 W ที่ 100 °C พบว่าความร้อนที่เกิดขึ้นมาจากด้านในแผ่ออกมาด้านนอก ชิ้นงานที่ได้ไม่มีการเสียรูปร่าง มีรูพรุนบ้างเล็กน้อยเนื่องจากใช้เวลาการผ่านคลื่นไมโครเวฟที่เร็ว ด้านในไม่มีรอยไหม้ส่วนบริเวณผิวด้านนอกสภาพปกติไม่มีการเสียรูปร่าง

7.2 ยางธรรมชาติ ความหนา 2 cm หลังการผ่านคลื่นที่ 1,000 W ที่ 150 °C



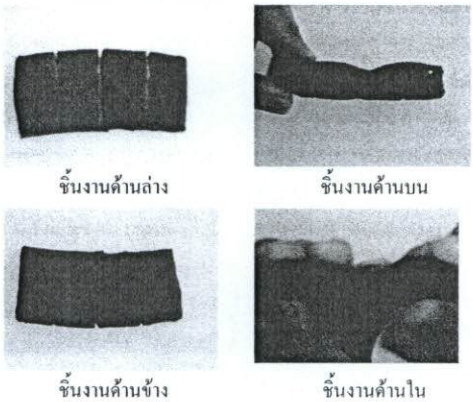
ชิ้นงานด้านล่าง ชิ้นงานด้านบน

ชิ้นงานด้านข้าง ชิ้นงานด้านใน

รูปที่ 8 แสดงรูปตัวอย่างยางหลังการผ่านคลื่นคลื่นไมโครเวฟ1,000 W ที่ 150 °C ด้านล่าง ด้านบน ด้านข้างและด้านใน

รูปที่ 8 แสดงลักษณะยางธรรมชาติคอมเปาวด์ ความหนา 2 cm หลังการผ่านคลื่นที่ 1,000 W ที่อุณหภูมิ 150 °C พบว่าความร้อนที่เกิดขึ้นมาจากด้าน ในแผ่ออกมาด้านนอกชิ้นงานขยายตัวเล็กน้อย ใช้เวลาการผ่านคลื่นถึงอุณภูมิ 150 °C เป็นเวลาประมาณ 12-15 นาทีส่งผลให้ชิ้นงานด้านในเกิดเป็นรูพรุนเล็กน้อย ส่วนบริเวณผิวด้านนอกสภาพปกติความร้อนแผ่มายังผิวด้านนอกได้มากขึ้นเนื่องจากใช้อุณหภูมิสูง

7.3 ยางธรรมชาติผสมเขม่าดำ ความหนา 2 cm หลังการผ่านคลื่น 1,000 W ที่ 100 °C



ชิ้นงานด้านล่าง ชิ้นงานด้านบน

ชิ้นงานด้านข้าง ชิ้นงานด้านใน

รูปที่ 9 แสดงรูปตัวอย่างยางผสมเขม่าดำหลังการผ่านคลื่นไมโครเวฟ1,000 W ที่ 100 °C ด้านล่าง ด้านบน ด้านข้างและด้านใน

รูปที่ 9 แสดงลักษณะยางที่ผสมเขม่าดำ ชิ้นงานมีความหนา 2 cm หลังการผ่านคลื่นที่ 1,000 W 100 °C พบว่าความร้อนที่เกิดขึ้นมาจากด้านในแผ่ออกมาด้านนอก ชิ้นงานคงรูปปกติ เนื่องจากใช้เวลาการผ่านคลื่นเร็ว ด้านในไม่มีรอยไหม้ส่วนบริเวณผิวด้านนอกสภาพปกติความร้อนซึ่งจากรูปพบว่าเราสามารถใช้พลังงานไมโครเวฟในการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานยางธรรมชาติทั้งที่มีการเติมและไม่เติมเขม่าดำโดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายแต่อย่างใดแก่ชิ้น งาน

สรุป

1. กำลังวัตต์ที่เหมาะสมต่อการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟของยางธรรมชาติที่ศึกษานี้ คือ 1000 W เนื่องจากให้ความร้อนเร็วและใช้เวลาน้อยที่สุด ชิ้นงานไม่เสียรูปร่าง
2. ปริมาณกำมะถัน ไม่มีผลต่อการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ
3. ที่พลังงานไมโครเวฟ กำลังวัตต์ 1000 W สามารถลดปริมาณความชื้นภายในชิ้น

งานหนา 2 ซม. และมีปริมาณกำมะถัน 2 phr ในยางธรรมชาติ ได้ 25.80 %

4. หลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟแก่ชิ้นงานยางธรรมชาติที่มีความหนา 1, 2 และ 3 cm สามารถลดปริมาณความชื้นได้ 20.00 %, 16.12% และ 12.12 % ตามลำดับ

คำขอบคุณ (Acknowledgements)

ผู้เขียนขอขอบคุณโครงการวิจัยยางพาราขนาดเล็ก (SPR) ประจำปี พ.ศ. 2549 สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนสนับสนุนตลอดการวิจัย (รหัสโครงการ RDG4950023) และ รศ.ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสติ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบเครื่องไมโครเวฟ

เอกสารอ้างอิง (References)

[1] Billmeyer, F. W. JR. Textbook of Polymer Science, second edition, John Wiley and Son, Inc. New York, 1971.

[2] Hofmann, W. Rubber Technology Handbook, Hanser Publishers, Munich Vienna New York, Oxford University Press, New York and Canada, 1989

[3] Ciullo, P.A. and Hewitt, N. The Rubber Formulary, Noyes Publications, Norwich New York, USA, 1999.

[4] Cheremisinoff, N.P. Elastomer Technology Handbook, CRC Press, Inc. USA, 1993.

[5] Roberts, A.D. Natural Rubber Science and technology. Brickendonbury. OxfordUniversity, 1988.

[6] Anderson, E.E. US Patent No. 4,129,768 , 1978.

[7] Sejimo, A. and Shigeo, O. US Patent No. 4,702,867, 1987.

[8] Novotny, D.S., Marsh, R.L., Masters, F.C. *et al.*(ed.) US Patent No. 4,104,205, 1978.

[9] Lal. US Patent No. 4,341,667; 1982.

[10] Wick, G.G., Schulz, R. L., Clark, D.E. *et.al.*(ed.) US Patent No. 6,420,457, 2002

[11] Ficker. US Patent No. 4,665,101; 1987.

[12] Metaxas, A.C. and Meridith, R.J. 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*, 2002, 124 (1), 151-161.