



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การเตรียมน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ

โดย น.ส. ฉันทิทิพ คำนวนทิพย์ และ คณะ

พฤษภาคม 2549

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การใช้ซีโอไลต์เป็นสารหน่วงไฟในยางธรรมชาติ

คณะผู้วิจัย สังกัด

1. น.ส. ฉันททิพย์ คำนวนทิพย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
2. นาย กรกฤษณ์ ดิษฐาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
3. นาย พรชัย รัตนบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
4. นาย ปิยะพงษ์ เทพมูณี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ชุดโครงการ "โครงการวิจัยแห่งชาติ: ยางพารา"

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปย่อรายงานสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย): การเตรียมน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ

(ภาษาอังกฤษ): Preparation of Prevulcanised Latex by Microwave Irradiation

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด และที่อยู่

ชื่อ-สกุล: ดร. ฉันททิพย์ คำนวมทิพย์

หน่วยงาน: ภาควิชาวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัตนบุรี

ที่อยู่: ภาควิชาวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัตนบุรี

ถนน รังสิต-นครนายก ตำบล คลองหก อำเภอ รัตนบุรี ปทุมธานี 12120

โทรศัพท์/โทรสาร: 02-5493484-5 / 02-5493483

E-mail: chuntipk@yahoo.com, ckumnuantip@hotmail.com

นักศึกษาร่วมโครงการ

ชื่อ-สกุล: นาย กรกฤษณ์ ดิษฐาน

ชื่อ-สกุล: นาย พรชัย รัตนบุรี

ชื่อ-สกุล: นาย ปิยะพงษ์ เทพมณี

หน่วยงาน: ภาควิชาวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัตนบุรี

ที่อยู่: ภาควิชาวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัตนบุรี

ถนน รังสิต-นครนายก ตำบล คลองหก อำเภอ รัตนบุรี ปทุมธานี 12120

โทรศัพท์/โทรสาร: 02-5493484-5 / 02-5493483

ปัญหาที่ท้าวิจัยและความสำคัญ

กระบวนการผลิตวัสดุโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ เป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับอุตสาหกรรม
การผลิตวัสดุ นอกจากนี้การผลิตวัสดุโดยใช้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟยังช่วยปรับปรุงสมบัติของวัสดุให้ดีขึ้น
ประโยชน์ที่ได้รับจากการผลิตวัสดุด้วยคลื่นไมโครเวฟมีหลายประการได้แก่ ทำให้ความร้อนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว
ในเนื้อวัสดุและความร้อนเกิดขึ้นภายในอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นวัสดุที่ได้รับคลื่นไมโครเวฟ จึงเป็นกระบวนการ
ผลิตที่ใช้เวลาน้อยกว่ากระบวนการผลิตโดยใช้ความร้อนวิธีอื่นๆ ทำให้ประหยัดเวลาและพลังงานที่ใช้ใน
กระบวนการผลิต นอกจากนี้ยังเป็นพลังงานสะอาด ระบบการทำงานเงียบ ไม่รบกวนสิ่งแวดล้อม

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจะเห็นได้ว่ากระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์โดยใช้คลื่นไมโครเวฟ เป็นเทคโนโลยี
ที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตวัสดุ แต่ในประเทศไทยยังมีการประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟใน
อุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์อย่างน้อย เนื่องจากยังขาดความเข้าใจในพฤติกรรมของยางที่ตอบสนองต่อคลื่น

ไมโครเวฟ ตลอดจนงานวิจัยเกี่ยวกับผลของคลื่นไมโครเวฟต่อยางนั้นมีปริมาณจำกัดทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงสภาวะที่ใช้ในการวัลคาไนเซชันนี้ยางธรรมชาติโดยคลื่นไมโครเวฟ และศึกษาสมบัติของน้ำยางธรรมชาติ (latex) ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันโดยคลื่นไมโครเวฟ เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นอันจะนำไปสู่การพัฒนาการใช้คลื่นไมโครเวฟในอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ยางในประเทศต่อไป

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาสภาวะที่ใช้ในกระบวนการวัลคาไนเซชันนี้ยางธรรมชาติโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ
2. ศึกษาสมบัติของน้ำยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันโดยคลื่นไมโครเวฟ

ผลการดำเนินงาน

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงการหาสภาวะที่เหมาะสมในการวัลคาไนเซชันนี้ยางธรรมชาติด้วยคลื่นไมโครเวฟ และศึกษาถึงสมบัติของยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนเซชันด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยจะทำการทดลองเปรียบเทียบกับการวัลคาไนเซชันด้วยตู้อบความร้อนที่ใช้กันโดยปกติทั่วไป โดยในการดำเนินงานวิจัยนี้จะแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่

ขั้นตอนที่ 1 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการวัลคาไนเซชันนี้ยางด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ในขั้นตอนนี้จะทำการหาสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการวัลคาไนเซชันนี้ยางด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยทำการหากำลังของคลื่นไมโครเวฟและเวลาที่เหมาะสมในการวัลคาไนเซชัน และทำการหาเวลาที่เหมาะสมในการวัลคาไนเซชันยางโดยใช้ตู้อบที่อุณหภูมิ 60 °C [13] ในการทดลองนั้นจะทำการวัลคาไนเซชันนี้ยางที่สภาวะต่างๆ แล้วจากนั้นนำน้ำยางที่ผ่านการวัลคาไนเซชันไปทำการวัลคาไนเซชันต่อโดยใช้ตู้อบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง [13] เพื่อสังเกตถึงลักษณะของชิ้นงานที่ได้ และนำชิ้นงานที่ใช้ได้ไปทดสอบสมบัติในขั้นตอนที่ 2 ต่อไป

ขั้นตอนที่ 2 การศึกษาสมบัติของยางวัลคาไนเซชันที่ผ่านการวัลคาไนเซชันโดยคลื่นไมโครเวฟ

ในขั้นตอนนี้จะทำการศึกษาสมบัติต่างๆของยางวัลคาไนเซชัน โดยสมบัติที่ทำการศึกษาได้แก่

- ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง (crosslink density)
- พฤติกรรมการบวมตัว (swelling behavior) ในตัวทำละลาย
- ความทนแรงดึง (tensile strength) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 412
- ความทนต่อแรงฉีกขาด (tear strength) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 624
- ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพทางความร้อน (heat aging) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 573
- ความหนาแน่น ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 792

จากผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการวัลคาไนเซชันนี้ยางธรรมชาติด้วยคลื่นไมโครเวฟ นั้นคือ ใช้คลื่นไมโครเวฟ ที่กำลัง 80 วัตต์ เป็นเวลา 30 – 90 วินาที ส่วนเวลาที่เหมาะสมในการวัลคาไนเซชันนี้ยางธรรมชาติด้วยตู้อบความร้อนอุณหภูมิ 60 °C คือ 1200-1800 ซึ่งการวัลคาไนเซชันนี้ยางธรรมชาติด้วยคลื่นไมโครเวฟ ใช้เวลาดำกว่าการวัลคาไนเซชันนี้ยางด้วยตู้อบความร้อนมากถึง ประมาณ 13-40 เท่า แต่ให้ยางที่มีสมบัติใกล้เคียงกัน ทั้งสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล

สรุปผลการวิจัย

- สภาพที่เหมาะสมในการพรีวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติด้วยคลิ่นไมโครเวฟ นั่นคือ ใช้คลิ่นไมโครเวฟ ที่กำลัง 80 วัตต์ เป็นเวลา 30 – 90 วินาที โดยในการพรีวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติด้วยคลิ่นไมโครเวฟ เป็นเวลา 90 วินาที จะส่งผลให้ยางที่ได้มีความต้านทานความร้อนได้สูงที่สุด
- การพรีวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติด้วยคลิ่นไมโครเวฟใช้เวลาต่ำกว่าการพรีวัลคาไนซ์ยางด้วยตู้อบความร้อนมากถึง ประมาณ 13-40 เท่า แต่ให้ยางที่มีสมบัติใกล้เคียงกัน

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะควรวิจัยเพิ่มเติม และวิธีการที่ควรพัฒนาต่อยอดสู่ภาคปฏิบัติจริง

การใช้คลิ่นไมโครเวฟในการพรีวัลคาไนซ์ยางธรรมชาตินั้นใช้เวลาดำรงมาก อันเป็นข้อดีที่จะช่วยลดเวลาและการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์จากน้ำยาง จึงน่าจะมีโอกาสที่จะศึกษาและพัฒนาเพื่อนำไปสู่การใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

ผลทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

ผลที่เกิดขึ้นจากการวิจัยนี้คาดว่าจะสามารถนำไปตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับประเทศหรือระดับนานาชาติได้อย่างน้อย 1 ฉบับ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการพรีวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติโดยใช้คลื่นไมโครเวฟและตู้อบความร้อน รวมถึงศึกษาสมบัติของน้ำยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการพรีวัลคาไนซ์โดยใช้คลื่นไมโครเวฟ โดยทำการเปรียบเทียบกับพรีวัลคาไนซ์ด้วยตู้อบความร้อน โดยทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมและการทดสอบคุณสมบัติของน้ำยางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ทำโดย นำน้ำยางธรรมชาติผสมสารเคมีมาผ่านกระบวนการพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟและพรีวัลคาไนซ์ด้วยตู้อบความร้อน หลังจากนั้นนำมาวัลคาไนซ์ต่อในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 ชม. แล้วนำชิ้นงานที่ได้มาทดสอบหาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพ

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการพรีวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C คือที่ เวลา 1200 - 1800 วินาที ส่วนสภาวะที่เหมาะสมในการพรีวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติด้วยคลื่นไมโครเวฟคือที่ กำลังวัตต์ 80 วัตต์ เวลา 30-90 วินาที ตามลำดับ และจากผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของยางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟและตู้อบ พบว่าให้สมบัติใกล้เคียงกัน

ABSTRACT

This work aimed to investigate the optimum condition for latex pre - vulcanization by microwave irradiation. The properties of the vulcanized natural rubbers, which were pre - vulcanized by microwave irradiation, were studied and compared with those were pre - vulcanized by the conventional oven. In this study, the latex compounds were pre - vulcanized by microwave irradiation and the conventional oven and then they were vulcanized by the conventional oven at 100°C for 1 hour. The vulcanized rubber samples were tested the crosslink density swelling behaviors and mechanical properties.

It was found that the optimum times for pre - vulcanized latex by microwave irradiation were 30 -90 seconds by 80 watt microwave power. On the other hand the optimum times for pre - vulcanize latex at 30 °C for the conventional oven were 1200 - 1800 seconds. The properties of the samples, which pre - vulcanized by microwave irradiation were the same as the samples that pre - vulcanized by the conventional oven. However, the pre - vulcanized time from microwave irradiation was very shorter than the pre - vulcanized time from the conventional oven.

1. ความสำคัญและความเป็นมาของงานวิจัย

ปัจจุบันประเทศไทยเป็นผู้ผลิตยางธรรมชาติรายใหญ่ของโลก ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่ทำรายได้เข้าประเทศนับแสนล้านบาท และมีพื้นที่สำหรับปลูกยางทั่วประเทศถึง 12.3 ล้านไร่ [1] จากสถานการณ์ยางปี 2544 ราคายางธรรมชาติตกต่ำ ผลผลิตล้นตลาด โดยในปี 2544 ประเทศไทยผลิตยางธรรมชาติได้ถึง 2.41 ล้านตัน และเป็นประเทศที่ส่งออกยางธรรมชาติเป็นอันดับหนึ่งของโลก โดยสัดส่วนการส่งออกเป็นร้อยละ 42.3 ของปริมาณการส่งออกยางธรรมชาติของโลก [2] โดยสถานการณ์ยางของประเทศไทยเมื่อปี 2544 ประเทศไทยส่งออกยางดิบแปรรูปเบื้องต้นถึง 90 % ของผลผลิต สร้างรายได้ 46,700 ล้านบาท และใช้เพียง 10 % ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใช้เองในประเทศและเหลือส่งออกสร้างรายได้จากการส่งออกได้ถึง 48,500 ล้านบาท จึงกล่าวได้ว่าการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางนั้นสร้างมูลค่าเพิ่มได้ถึง 10 เท่า [3] แต่อุตสาหกรรม การแปรรูปยางธรรมชาติเป็นผลิตภัณฑ์ในประเทศไทย ยังมีข้อจำกัดหลายปัจจัย อาทิเช่น โรงงานขาด เทคโนโลยีการผลิต โดยเฉพาะโรงงานขนาดเล็ก-กลาง ผู้ใช้และผู้บริโภคขาดข้อมูลของชนิดของผลิตภัณฑ์ และยังไม่ทราบว่าผลิตภัณฑ์ชนิดใดผลิตจากยางธรรมชาติ ผู้ใช้และผู้บริโภคขาดความเชื่อมั่นในคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และรูปลักษณะของผลิตภัณฑ์ไม่ดึงดูด ดังนั้นในปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนาในด้านอุตสาหกรรม ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง โดยเน้นในเรื่องของการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ และการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิต

ในการแปรรูปน้ำยางข้นเป็นผลิตภัณฑ์ยางนั้น จำเป็นจะต้องมีการนำยางมาผ่านกระบวนการ “วัลคาไนเซชัน (vulcanization)” อันเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของยางจากเส้นตรง (linear) ไปเป็นร่างแหเชื่อมโยง (crosslink) เพื่อให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นและมีสมบัติที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในกระบวนการวัลคาไนเซชันนั้น โมเลกุลของยางจะต้องมีการทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารเชื่อมโยง (vulcanizing agent) โดยจะต้องมีการใช้ความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องในการเกิดปฏิกิริยา และในกระบวนการวัลคาไนเซชันนี้เอง เป็นกระบวนการที่ใช้เวลาและพลังงานมากในขั้นตอนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง ซึ่งถ้ามีการพัฒนากระบวนการวัลคาไนเซชันให้มีระยะเวลาที่สั้นลง น่าจะเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มอัตราเร็วในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง ตลอดจนลดพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการผลิต อันจะส่งผลให้มีส่วนในการลดต้นทุนการผลิตลง ซึ่งทั้งหมดนี้จะมีส่วนในการเพิ่มศักยภาพของอุตสาหกรรมในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางของประเทศไทย ในการแข่งขันกับนานาประเทศมากยิ่งขึ้น

กระบวนการผลิตวัลสคูโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ เป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับอุตสาหกรรม การผลิตวัลสคู นอกจากนี้การผลิตวัลสคูโดยใช้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟยังช่วยปรับปรุงสมบัติของวัลสคูให้ดีขึ้น ประโยชน์ที่ได้รับจากการผลิตวัลสคูด้วยคลื่นไมโครเวฟมีหลายประการได้แก่ ทำให้ความร้อนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในเนื้อวัลสคูและความร้อนเกิดขึ้นภายในอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นวัลสคูที่ได้รับคลื่นไมโครเวฟ จึงเป็นกระบวนการผลิตที่ใช้เวลาน้อยกว่ากระบวนการผลิตโดยใช้ความร้อนวิธีอื่นๆ ทำให้ประหยัดเวลาและพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิต นอกจากนี้ยังเป็นพลังงานสะอาด ระบบการทำงานเงียบ ไม่รบกวนสิ่งแวดล้อม [4]

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจะเห็นได้ว่ากระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์โดยใช้คลื่นไมโครเวฟ เป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตวัลสคู แต่ในประเทศไทยยังมีการประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟในอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ยางน้อย เนื่องจากยังขาดความเข้าใจในพฤติกรรมของ

ยางที่ตอบสนองต่อคลื่นไมโครเวฟ ตลอดจนงานวิจัยเกี่ยวกับผลของคลื่นไมโครเวฟต่อยางนั้น มีปริมาณจำกัดทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงสถานะที่ใช้ในการวัลคาไนเซชันน้ำยางธรรมชาติโดยคลื่นไมโครเวฟ และศึกษาสมบัติของน้ำยางธรรมชาติ (latex) ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันโดยคลื่นไมโครเวฟ เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นอันจะนำไปสู่การพัฒนาการใช้คลื่นไมโครเวฟในอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ยางในประเทศต่อไป

2. วัตถุประสงค์

ศึกษาสถานะที่ใช้ในกระบวนการวัลคาไนเซชันน้ำยางธรรมชาติโดยใช้คลื่นไมโครเวฟและศึกษาสมบัติของน้ำยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

3. ทฤษฎีแนวคิดในการทำงานวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง

ไมโครเวฟ(microwave)เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความถี่คลื่นอยู่ระหว่าง 300เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz) – 300 จิกะเฮิร์ตซ์ และมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 1 มิลลิเมตร-1เมตร ความถี่คลื่นที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมโดยทั่วไป คือ 915 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 2,450 เมกะเฮิร์ตซ์ [5] การให้ความร้อนโดยคลื่นไมโครเวฟมีหลักการที่แตกต่างจากการให้ความร้อนโดยวิธีธรรมดาทั่วไป กล่าวคือ ความร้อนที่วัสดุที่ได้รับคลื่นไมโครเวฟนั้นจะเป็นความร้อนที่เกิดขึ้นเองภายในชิ้นวัสดุ แทนที่จะเกิดจากการได้รับความร้อนที่ถ่ายเทมาจากแหล่งกำเนิดความร้อนจากภายนอก เช่น ลวดความร้อน (heat coil) แผงความร้อน (heating element) เป็นต้น ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นโดยคลื่นไมโครเวฟนี้ เป็นความร้อนแบบภายในที่เกิดขึ้นทั่วถึงทั้งชิ้นวัสดุ (internal and volumetric heating) ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในชิ้นวัสดุและการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นกับวัสดุที่ได้รับความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ มีลักษณะตรงข้ามกับวัสดุที่ได้รับความร้อนโดยวิธีอื่น กล่าวคือความร้อนภายในชิ้นวัสดุจะสูงกว่าที่ผิวนอก ดังนั้นความร้อนจะถ่ายเทจากภายในออกสู่ผิวภายนอก ในขณะที่วัสดุที่ได้รับความร้อนโดยวิธีทั่วไปจะมีอุณหภูมิที่ผิวภายนอกสูงกว่าภายในและจะถ่ายเทความร้อนเข้าไปภายในชิ้นวัสดุนั้นๆ [4]

การที่วัสดุร้อนขึ้นภายใต้คลื่นไมโครเวฟนั้น เกิดขึ้นจากกลไก 2 ประการ อย่างใดอย่างหนึ่ง คือ กระบวนการโพลาไรเซชัน (polarization process) หรือเกิดจากการนำไฟฟ้าของวัสดุ (conduction process) [4] กระบวนการโพลาไรเซชันนั้นจะเกี่ยวข้องกับการจัดเรียงตัวของประจุใหม่ การสั่นหรือการหมุนตัวของไดโพล ภายใต้สนามไฟฟ้าหรือแม่เหล็ก ซึ่งถือเป็นการเคลื่อนที่ของประจุในระยะสั้น (short-range displacement) ซึ่งโมเลกุลของวัสดุที่ไม่เป็นกลางทางไฟฟ้า ดังที่แสดงในรูปที่ 3 เช่น น้ำ จะมีการหมุนกลับตัวไปตามความถี่ของคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ (2,450 เมกะเฮิร์ตซ์) เป็นจำนวน 2,450 ล้านรอบต่อวินาที ในหนึ่งรอบคลื่นจะประกอบไปด้วยคลื่นช่วงบวกและคลื่นช่วงลบ ดังนั้นโมเลกุลของวัสดุจะหันขั้วบวกไปทางขั้วลบของสนามไฟฟ้าอีก 2,450 ล้านครั้งต่อวินาที และจะหันขั้วขั้วลบของโมเลกุลไปทางขั้วบวกของสนามไฟฟ้าอีก 2,450 ล้านครั้งต่อวินาที รวมแล้วโมเลกุลต้องกลับตัวถึง 4,900 ล้านครั้งต่อวินาที ทำให้เกิดการชนกันและการเสียดสีของโมเลกุล เกิดเป็นพลังงานความร้อนทำให้อุณหภูมิของวัสดุสูงขึ้นในที่สุด ในกรณีของความร้อนที่เกิดขึ้นภายใต้กระบวนการการนำไฟฟ้าของวัสดุนั้น เกิดจากการที่คลื่นไมโครเวฟผ่านเข้ามาในวัสดุ คลื่นจะถูกดูดกลืนและจะไปเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นภายใน และ สนามไฟฟ้านี้จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุต่างๆ แรงต้านทาน การเคลื่อนที่ซึ่งรวมไปถึงแรงเฉือน แรง

ยึดหยุ่น และแรงเสียดทานจากการชนกันของประจุต่างๆ ทำให้เกิดเป็นความร้อนขึ้นภายในเนื้อวัสดุ ในที่สุด ซึ่งจะเป็นความร้อนที่เกิดขึ้นทั่วทั้งชิ้นวัสดุ(volumetric heating) ตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในข้างต้น

ลักษณะการตอบสนองต่อคลื่นไมโครเวฟของวัสดุชนิดต่างๆนั้นขึ้นอยู่กับชนิดและสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุนั้นๆ [6] วัสดุที่มีความเป็นฉนวนไฟฟ้า มีค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำ จะยอมให้คลื่นไมโครเวฟทะลุผ่าน ตัวอย่างเช่น แก้วทนความร้อน กระจกเบี่ยงเคลือบ พลาสติกบางประเภท เช่น โพลีโพรพิลีน ดังนั้นวัสดุเหล่านี้จะไม่สามารถถูกทำให้ร้อนขึ้นได้โดยคลื่นไมโครเวฟ วัสดุที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูง เช่น โลหะ จะสะท้อนคลื่นไมโครเวฟ ทำให้คลื่นไม่สามารถทะลุผ่านได้ ดังนั้นผนังของเตาไมโครเวฟจึงมักทำมาจากวัสดุที่เป็นโลหะ เพื่อป้องกันการรั่วของคลื่น และช่วยในการกระจายตัวของคลื่นภายในเตาโดยอาศัยการสะท้อน สำหรับวัสดุบางประเภทเช่น น้ำ คาร์บอน ซิลิกอนคาร์ไบด์ พลาสติกบางประเภท เช่น โพลีเอสเตอร์เรซิน ชนิดไม่อม้มตัว อีพอกซีเรซิน วัสดุเหล่านี้จะมีความเป็นฉนวนที่ต่ำ จะสามารถดูดคลื่นไมโครเวฟ ทำให้กำลังงานของคลื่นลดลงไป และกำลังงานที่ถูกดูดกลืนไว้นี้จะถูกเปลี่ยนเป็นความร้อนทำให้วัสดุร้อนขึ้น ตามกระบวนการที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

สำหรับยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่มีการนำไฟฟ้าที่ต่ำ โมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นกลางทางไฟฟ้า ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงไม่ดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ แต่ยอมให้คลื่นทะลุผ่านไป [5] แต่ในกรณีของน้ำยางข้น ซึ่งมีน้ำเป็นองค์ประกอบ โมเลกุลของน้ำภายในน้ำยางข้นนี้เองจะเป็นตัวที่ดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟเอาไว้ ทำให้เกิดการสั่น การกลับตัวไปมาของโมเลกุลอย่างรวดเร็ว การชนและการเสียดสีกันของโมเลกุล อันจะนำไปสู่การเกิดความร้อนขึ้นเมื่อได้รับคลื่นไมโครเวฟตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น อุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้จะนำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน จากเหตุผลดังกล่าวนี้จึงมีความเป็นไปได้ในการนำคลื่นไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการวัลคาไนเซชันของน้ำยางข้น การประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟในการวัลคาไนเซชันยางนั้น จะมีส่วนช่วยให้ยางเกิดการวัลคาไนเซชันขึ้นอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอทั้งชิ้นงาน

ในปัจจุบันการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีไมโครเวฟกับวัสดุโพลีเมอร์ยังมีการทำการศึกษากันอย่างไม่แพร่หลายนัก ส่วนใหญ่การใช้คลื่นไมโครเวฟในกระบวนการผลิตวัสดุจำพวกโพลีเมอร์มักจะทำการศึกษากับวัสดุที่เป็นเทอร์โมเซตเรซิน(Thermoset Resin) เช่น อีพอกซีเรซิน ส่วนการศึกษาถึงพฤติกรรมการตอบสนองของวัสดุที่เป็นยางหรืออีลาสโตเมอร์(Elastomer)ต่อคลื่นไมโครเวฟนั้น ยังมีการทำการศึกษาในวงที่จำกัดมาก

S.L. Bai และคณะ [7] ได้ทำการศึกษเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของอีพอกซีเรซินที่ถูกบ่มเร่งให้แข็งตัวด้วยคลื่นไมโครเวฟและความร้อนในระบบปกติ พบว่าอีพอกซีเรซินที่ถูกบ่มเร่งให้แข็งตัวด้วยคลื่นไมโครเวฟจะมีความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) โมดูลัส (Modulus) ที่สูงกว่าอีพอกซีเรซินที่ถูกบ่มเร่งให้แข็งตัวด้วยการให้ความร้อนในระบบปกติ เนื่องจากมีความสม่ำเสมอของโครงสร้างและปริมาณการเกิดพันธะเชื่อมขวางที่คิดว่า

F.Y.C. Boey [8] ทำการศึกษาถึงการใช้คลื่นไมโครเวฟในการบ่มเร่งอีพอกซีเรซินให้แข็งตัว ในวัสดุผสม(Composite)ระหว่างอีพอกซีเรซินและใยแก้ว พบว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟในกระบวนการดังกล่าวจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะกันระหว่างผิวของใยแก้วกับเนื้อเรซิน เนื่องจากฟองอากาศระหว่างผิวสัมผัสนั้นถูกทำให้ลดลง จึงทำให้มีความแข็งแรงเชิงกลมากยิ่งขึ้น

Chia L.H.L และคณะ [9] ได้ทำการศึกษาการใช้คลื่นไมโครเวฟในกระบวนการโพลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ของ เมทิลเมทาครีเลต (Methyl-methacrylate) ไปเป็นโพลิเมทิลเมทาครีเลต (Poly (methyl-methacrylate)) พบว่าโพลิเมทิลเมทาครีเลตที่สังเคราะห์ได้นั้นมีสมบัติที่เหมือนกับที่ได้จากการโพลิเมอไรเซชันคนความร้อนปกติ แต่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เร็วกว่า

D. Martin และคณะ [10] ได้ทำการศึกษาการวัลคาไนซ์ยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางบิวตะไดอีน (Butadiene Rubber) ที่มีเขม่าดำเป็นสารเสริมแรง โดยใช้ลำแสงอิเล็กตรอน (electron beam) และคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลำแสงอิเล็กตรอน พบว่าถ้ามีการใช้คลื่นไมโครเวฟมาช่วยในการวัลคาไนเซชันด้วยนั้น จะทำให้ลดเวลาในการเกิดการวัลคาไนเซชันลงเป็นอย่างมาก

Jian Zhou และคณะ [11] ทำการศึกษาการใช้คลื่นไมโครเวฟในกระบวนการผลิตโพลิเมอร์ โดยใช้คลื่นไมโครเวฟในการบ่มเร่งอิพอกซีเรซินให้แข็งตัว โดยมีการใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) ตัวเร่งปฏิกิริยาการเกิดพันธะเชื่อมขวาง (curing agent) พบว่าการบ่มเร่งเรซินให้แข็งตัวด้วยคลื่นไมโครเวฟจะช่วยให้ลดเวลาในการทำให้เรซินแข็งตัว และใช้ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาการเกิดพันธะเชื่อมขวางลดลง เมื่อเทียบกับการบ่มเรซินให้แข็งตัวด้วยความร้อนปกติ นอกจากนี้เรซินที่ได้จากการบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟยังให้สมบัติเชิงกลที่สูงกว่าเรซินที่ได้จากการบ่มด้วยความร้อนปกติ

N. Sombatsompop และ C. Kumnuantip [12] ทำการศึกษาการวัลคาไนเซชันยางผสมระหว่างยางรีเทรมกับยางธรรมชาติ โดยมีเขม่าดำเป็นสารเสริมแรง พบว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟในการวัลคาไนเซชันนั้นมีผลกระทบต่อชนิดของพันธะเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นในยาง โดยพันธะเชื่อมขวางที่เกิดจากการวัลคาไนเซชันด้วยคลื่นไมโครเวฟนั้น มีแนวโน้มที่จะเป็น mono- และ di-sulfidic crosslink มากกว่ายางในสูตรเดียวกันที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยความร้อนแบบปกติ

ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาการวัลคาไนเซชันน้ำยางธรรมชาติโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ เนื่องจากในน้ำยางขั้นต้นมีองค์ประกอบของน้ำอันจะช่วยดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟและทำให้เกิดความร้อนขึ้น อันจะนำไปสู่ปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน และทำการศึกษาสมบัติของยางที่ผ่านการวัลคาไนเซชันด้วยคลื่นไมโครเวฟ อันจะนำไปสู่การเกิดความรู้ความเข้าใจในผลของคลื่นไมโครเวฟต่อสมบัติของยางมากยิ่งขึ้น ซึ่งความรู้ความเข้าใจที่ได้รับจากการทำวิจัยในครั้งนี้ จะเป็นข้อมูลที่จะนำไปสู่การพัฒนาการใช้คลื่นไมโครเวฟในอุตสาหกรรมการแปรรูปผลิตภัณฑ์ยางในประเทศต่อไป

4. วิธีการ

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงการหาสภาวะที่เหมาะสมในการพรีวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติด้วยคลื่นไมโครเวฟ และศึกษาถึงสมบัติของยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยจะทำการทดลองเปรียบเทียบกับพรีวัลคาไนซ์ด้วยอุณหภูมิความร้อนที่ใช้กันโดยปกติทั่วไป กระบวนการทำงานทั้งหมดในงานวิจัยนี้สรุปได้ดังแผนผังการทำงานที่แสดงในรูปที่ 4.1 โดยในการทดลองนี้จะทำการผสมน้ำยางตามองค์ประกอบที่แสดงในตารางที่ 4.1

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

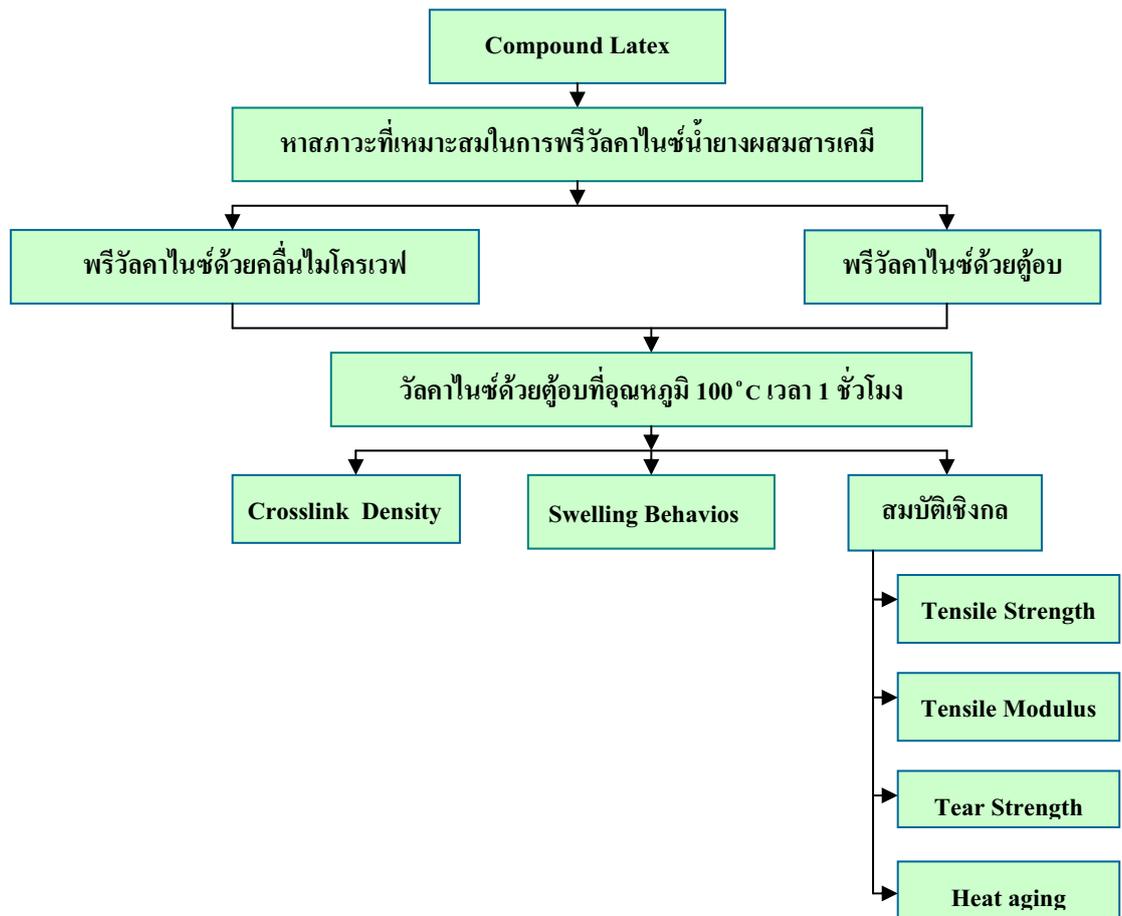
- 1.1 น้ำยางขั้นแอมโมเนียสูง (60 % HA Latex)
- 1.2 50% ดิสเพิซชันกำมะถัน (50% dispersion Sulfur)
- 1.3 50% ดิสเพิซชันซิงค์ออกไซด์ (50% dispersion Zinc oxide)

1.4 50% ดิสเพิซชั่น Acill (50% dispersion Acill)

1.5 25% อิมัลชัน Emulvines (25% emulsion Emulvines)

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำยางและสารเคมีต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

ส่วนประกอบ	ส่วนโดยน้ำหนักเปียก (กรัม)
60 % HA Latex	167
50 % ดิสเพิซชั่นกำมะถัน	2
50 % ดิสเพิซชั่นซิงค์ออกไซด์	3
50 % ดิสเพิซชั่น Acill	2
25% อิมัลชัน Emulvines	3



รูปที่ 4.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยนั้นจะแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่

ขั้นตอนที่ 1 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการพรีวัลคาไนซ์น้ำยางด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ในขั้นตอนนี้จะทำการหาสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการพรีวัลคาไนซ์น้ำยางด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยจำทำการหาค่ากำลังของคลื่นไมโครเวฟและเวลาที่เหมาะสมในการพรีวัลคาไนซ์ และทำการหาเวลาที่เหมาะสมในการพรีวัลคาไนซ์โดยใช้ตู้อบ ที่อุณหภูมิ 60 °C [13] ในการทดลองนั้นจะทำการพรีวัลคาไนซ์น้ำยางที่สภาวะต่างๆ แล้วจากนั้นนำน้ำยางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ ไปทำการวัลคาไนซ์ต่อโดยใช้ตู้อบ ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง [13] เพื่อสังเกตถึงลักษณะของชิ้นงานที่ได้ และนำชิ้นงานที่ใช้ได้ไปทดสอบสมบัติในขั้นตอนที่ 2 ต่อไป

ขั้นตอนที่ 2 การศึกษาสมบัติของยางวัลคาไนซ์ที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์โดยคลื่นไมโครเวฟ

ในขั้นตอนนี้จะทำการศึกษาสมบัติต่างๆของยางวัลคาไนซ์ โดยสมบัติที่ทำการศึกษาได้แก่

- ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง (crosslink density)

ในการหาความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางจะทำโดยกระบวนการ Swelling Method โดยจะนำยางวัลคาไนซ์ไปแช่ในตัวทำละลายโทลูอีน (Toluene) และทำการคำนวณหาความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง (Crosslink Density) โดยใช้สมการ Flory – Rehner [14]

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

- เมื่อ V_r = ปริมาตรของยางในการบวมตัวของเหลว
 V_s = ปริมาณ mol ของโพลูอิน (ในการใช้งาน 106.2 cm³/mol)
 χ = ผลรวมของตัวทำละลาย (ในกรณี 0.3795)
 η_{swell} = ความหนาแน่นความเชื่อมโยงของยาง (mol/cm³)
 f = โครงสร้างของการเชื่อมโยง (สำหรับการวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์)

- พฤติกรรมการบวมตัว (swelling behavior) ในตัวทำละลาย

ในการหาพฤติกรรมการบวมตัวของตัวทำละลายนั้นทำได้โดย นำชิ้นงานยางวัลคาไนซ์ไปแช่ในตัวทำละลายโพลูอิน และทำการคำนวณหาค่า %mole ของโพลูอินที่ถูกดูดซับเข้าไปในยางในเวลาต่างๆ จากสมการ [15]

$$Q_t = \left[\frac{W_t - W_0}{W_0} \right] \times 100$$

เมื่อ

Q_t = จำนวน mole % ของตัวทำละลายที่เวลา t

W_0 = น้ำหนักของตัวอย่างก่อนการทดลอง

W_t = น้ำหนักของชิ้นทดสอบที่แช่โพลูอินในเวลาต่างๆ

M = น้ำหนักโมเลกุลของ 92.14 g/mole

- ความทนแรงดึง (tensile strength) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 412
- ความทนต่อแรงฉีกขาด (tear strength) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 624
- ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพทางความร้อน (heat aging) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 573
- ความหนาแน่น ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 792

5. ผลการวิจัย

5.1 ผลการหาสถานะที่เหมาะสมในการพรีวัลคาไนซ์น้ำยางด้วยคลีนไมโครเวฟ

การกำลังที่เหมาะสมของคลีนไมโครเวฟในการพรีวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติ

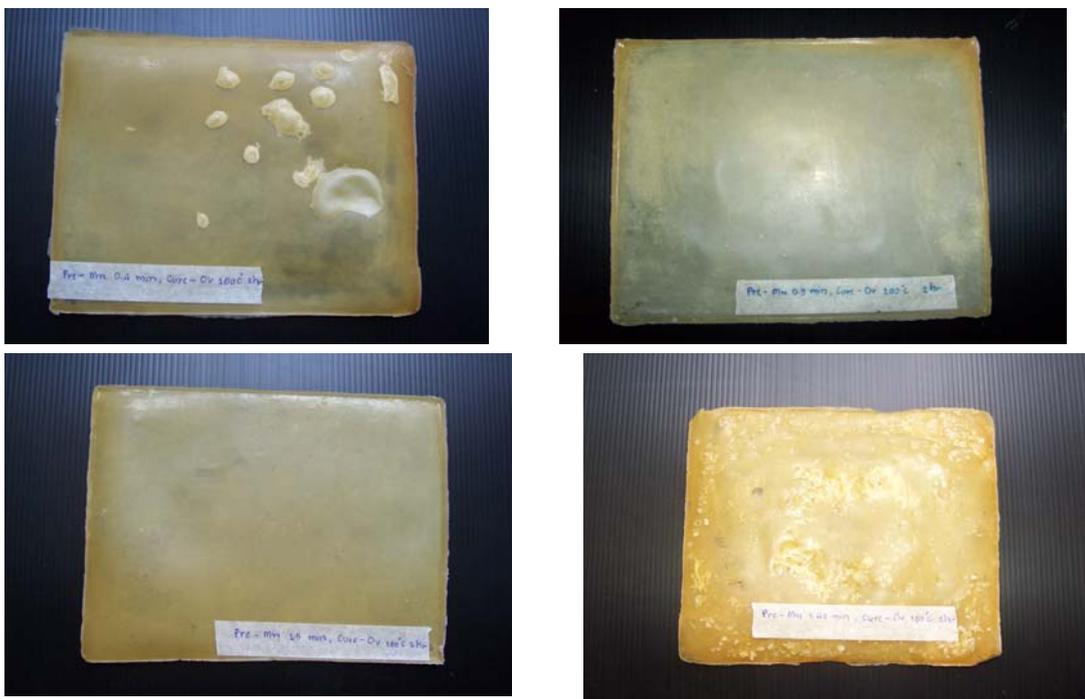
จากการทดลองนำน้ำยางธรรมชาติมาทำการพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลีนไมโครเวฟ ที่กำลัง 80, 400 และ 800 วัตต์ เป็น เวลา 30 วินาที พบว่า น้ำยางธรรมชาติที่ทำการพรีวัลคาไนซ์ที่กำลัง 400 และ 800 วัตต์ มีฟองอากาศเกิดขึ้น และมีสีที่ดูคล้ำลงคล้ายกับการไหม้เกิดขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงเลือกทำการพรีวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติด้วยคลีนไมโครเวฟ กำลัง 80 วัตต์

การหาเวลาที่เหมาะสมการพรีวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติด้วยคลีนไมโครเวฟและตู้อบ

จากผลการทดลองพบว่าเวลาที่เหมาะสมในการพรีวัลคาไนซ์น้ำยางด้วยคลีนไมโครเวฟอยู่ที่ 30-90 วินาที เนื่องจากชิ้นงานที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ในช่วงเวลาดังกล่าว จะไม่มีฟองอากาศเกิดขึ้นภายในชิ้นงาน

ภายหลังจากที่ผ่านการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในกรณีของน้ำยางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ที่เวลา 20 วินาที หลังจากผ่านการวัลคาไนซ์แล้วพบว่ามีฟองอากาศเกิดขึ้นภายในชิ้นงาน ลักษณะฟองอากาศจะเกิดในบางบริเวณของชิ้นงานและมีขนาดใหญ่ ในขณะที่น้ำยางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ที่เวลา 100 วินาที หลังจากผ่านการวัลคาไนซ์แล้วพบว่าไม่มีฟองอากาศเกิดขึ้นภายในชิ้นงาน ลักษณะฟองอากาศมีขนาดเล็กเกิดทั่วบริเวณของชิ้นงาน ลักษณะของชิ้นงานต่างๆดังกล่าวแสดงในรูปที่ 5.1

จากผลการทดลองพบว่าเวลาที่เหมาะสมในการพรีวัลคาไนซ์น้ำยางด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C อยู่ที่ 1200วินาทีขึ้นไป เนื่องจากชิ้นงานที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ในช่วงเวลาดังกล่าว จะไม่มีฟองอากาศเกิดขึ้นภายในชิ้นงานภายหลังจากที่ผ่านการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในกรณีของน้ำยางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ที่เวลา 900 วินาที หลังจากผ่านการวัลคาไนซ์แล้วพบว่ามีฟองอากาศเกิดขึ้นภายในชิ้นงาน ลักษณะฟองอากาศจะเกิดในบางบริเวณของชิ้นงานและมีขนาดใหญ่ ลักษณะของชิ้นงานต่างๆดังกล่าวแสดงในรูปที่ 5.2

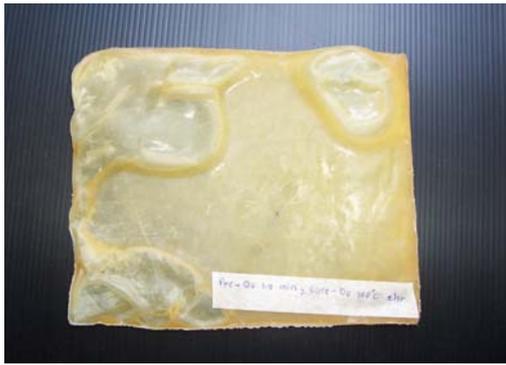


ก)

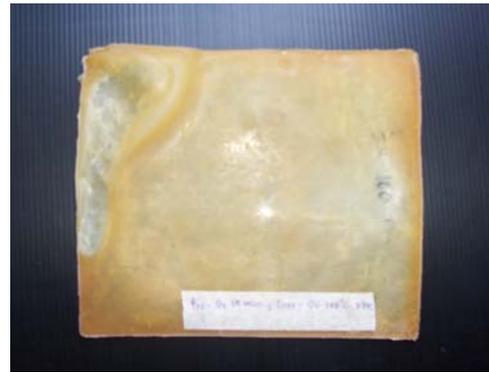
ง)

รูปที่ 5.1 ลักษณะของยางธรรมชาติภายหลังจากผ่านการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

- ก) ยางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟ 80 วัตต์ เป็นเวลา 20 วินาที
- ข) ยางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟ 80 วัตต์ เป็นเวลา 30 วินาที
- ค) ยางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟ 80 วัตต์ เป็นเวลา 90 วินาที
- ง) ยางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟ 80 วัตต์ เป็นเวลา 100 วินาที



ก)



ข)



ค)



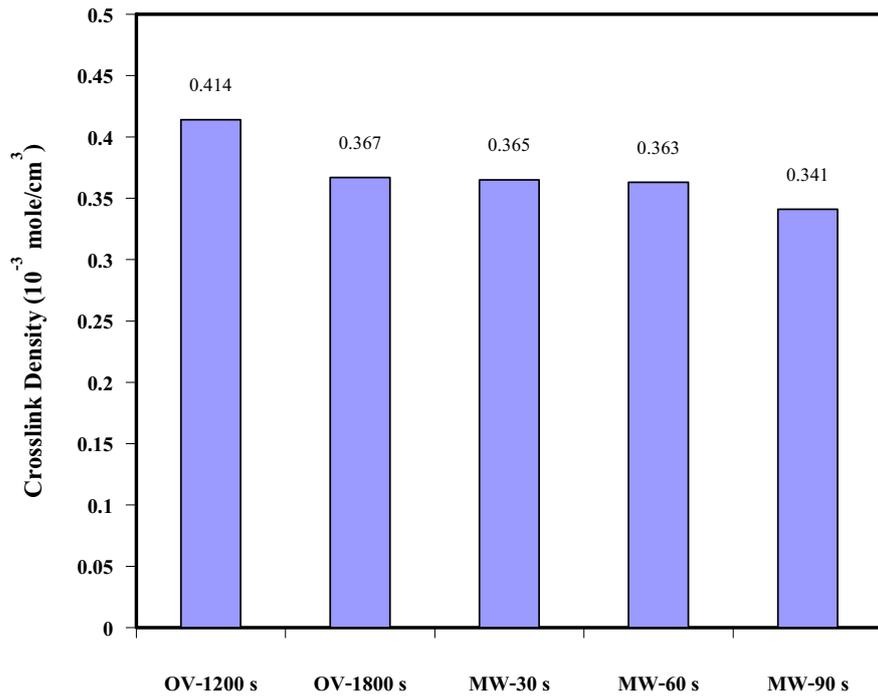
ง)

รูปที่ 5.2 ลักษณะของยางธรรมชาติภายหลังผ่านการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

- ก) ยางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 90 วินาที
- ข) ยางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 900 วินาที
- ค) ยางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1200 วินาที
- ง) ยางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1800 วินาที

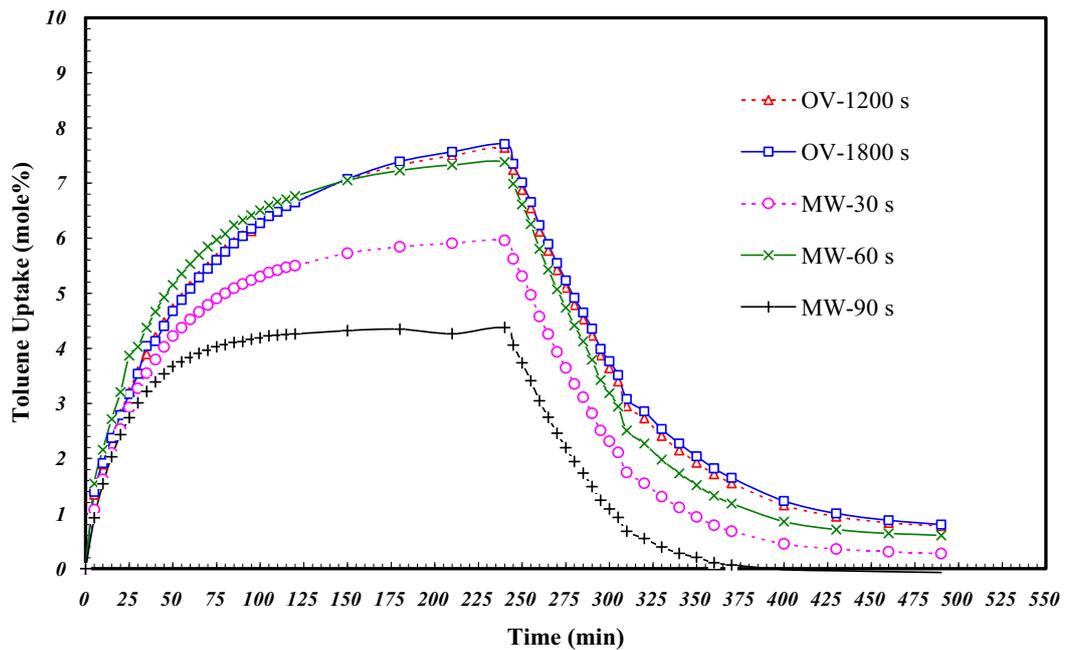
5.2 ผลการศึกษาสมบัติของยางวัลคาไนซ์ที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์โดยคลื่นไมโครเวฟ

รูปที่ 5.3 แสดงค่าความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง (crosslink density) ของยางวัลคาไนซ์ ทั้งผ่านการพรีวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1200 และ 1800 วินาที (OV-1200 และ OV-1800) และยางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ 80 วัตต์ เป็นเวลา 30, 60 และ 90 วินาที (MW-30, MW-60 และ MW-90) จากผลการทดลองพบว่า ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางของยางทั้งหมดอยู่ในช่วง $0.314-0.414 \cdot 10^{-3} \text{ mole/cm}^3$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้งยางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟและยางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์โดยใช้เตาอบ ที่อุณหภูมิ 60 °C จะให้ค่าความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางที่ใกล้เคียงกัน เพราะยางทั้งหมดต้องประกอบของสารวัลคาไนซ์ที่เหมือนกัน และผ่านการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เช่นเดียวกัน แต่จะสังเกตได้ว่าแม้จะให้ค่าของความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางที่ใกล้เคียงกัน แต่การพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟใช้เวลาต่ำกว่ามากถึง ประมาณ 13-40 เท่า



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง

รูปที่ 5.4 แสดงพฤติกรรมการบวมตัวเนื่องจากการดูดซับตัวทำละลายโทลูอีนของยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์ ทั้งยังผ่านการพรีวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1200 และ 1800 วินาที (OV-1200 และ OV-1800) และยางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ 80 วัตต์ เป็นเวลา 30, 60 และ 90 วินาที (MW-30, MW-60 และ MW-90) พบว่ายางธรรมชาติจะดูดซับตัวทำละลายโทลูอีนอย่างรวดเร็ว ในช่วงเวลาเริ่มต้นของการทดลองไปจนถึงนาทีที่ 50 อัตราเร็วของการดูดซับโทลูอีนจะค่อนข้างสูง โดยสังเกตได้จากความชันของกราฟ และเมื่อเข้าใกล้จุดอิ่มตัว (equilibrium point) อัตราเร็วของการดูดซับโทลูอีนจะลดลง โดยสังเกตจากความชันของกราฟที่ลดลงเช่นเดียวกัน และเมื่อถึงจุดอิ่มตัวในประมาณนาทีที่ 100 ของการทดลองปริมาณการดูดซับโทลูอีนจะคงที่ ในนาทีที่ 250 เป็นเวลาที่นำชิ้นงานออกจากตัวทำละลายโทลูอีน หลังจากนั้นนาทีที่ 250 เป็นต้นไป โมเลกุลของโทลูอีนจะเริ่มถูกปลดปล่อยออกจากการดูดซับของยาง จะสังเกตได้ว่าอัตราเร็วของการปลดปล่อยโทลูอีนในช่วงแรกจะรวดเร็ว และเริ่มลดลงเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นตั้งแต่นาทีที่ 310 เป็นต้นไป จากการทดลองจะสังเกตได้ว่าอัตราเร็วของการดูดซับและปลดปล่อยโทลูอีนของยางทั้งที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 60 °C และยางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ 80 วัตต์ค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยสังเกตได้จากความชันของกราฟในช่วงเวลาที่มีการดูดซับและปลดปล่อยโทลูอีน

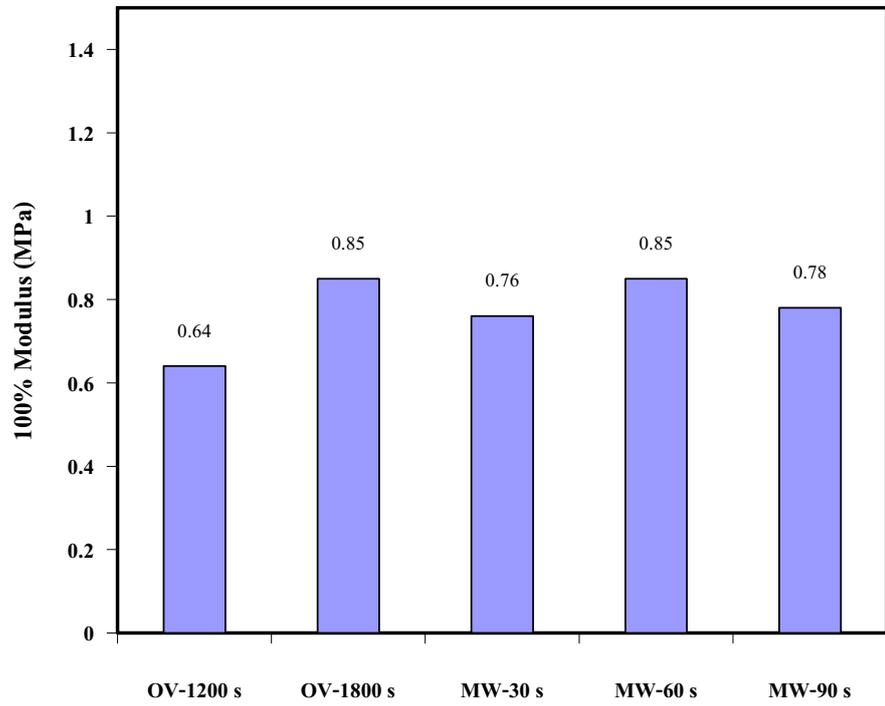


รูปที่ 5.4 กราฟแสดงพฤติกรรมการบวมตัวเนื่องจากตัวทำละลายโทลูอีน

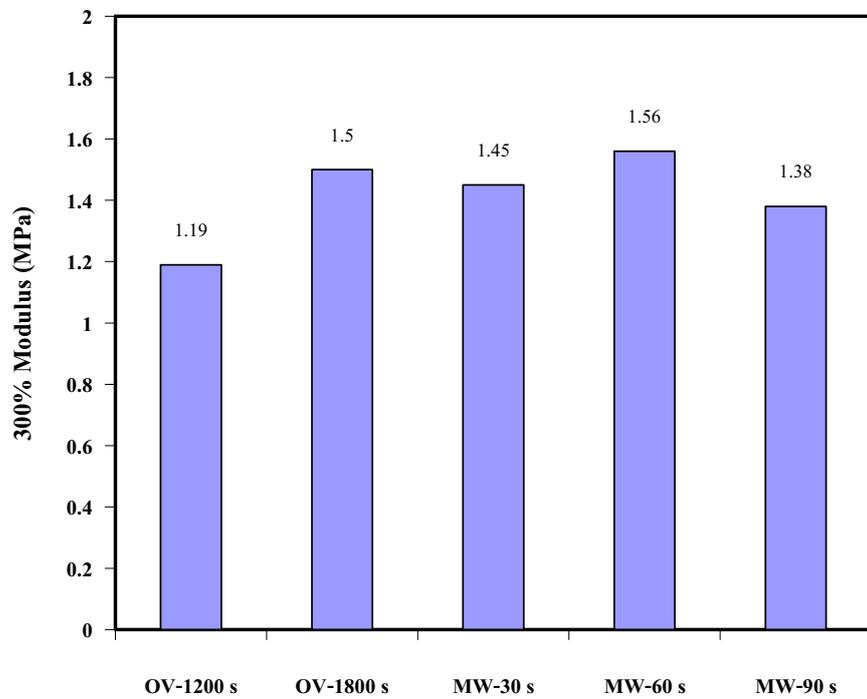
รูปที่ 5.5 แสดงค่า 100% Modulus ของยางวัลคาไนซ์ ทั้งยังผ่านการพรีวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1200 และ 1800 วินาที (OV-1200 และ OV-1800) และยังที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ 80 วัตต์ เป็นเวลา 30, 60 และ 90 วินาที (MW-30, MW-60 และ MW-90) จากผลการทดลองพบว่า จากผลการทดลองพบว่าค่า 100% Modulus ของยางทั้งหมดอยู่ในช่วง 0.64-0.85 MPa ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้งยังที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟและยังที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์โดยใช้เตาอบ ที่อุณหภูมิ 60 °C จะให้ค่า 100% Modulus ที่ใกล้เคียงกัน แต่การพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟใช้เวลาต่ำกว่ามาก

รูปที่ 5.6 แสดงค่า 300% Modulus ของยางวัลคาไนซ์ ทั้งยังผ่านการพรีวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1200 และ 1800 วินาที (OV-1200 และ OV-1800) และยังที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ 80 วัตต์ เป็นเวลา 30, 60 และ 90 วินาที (MW-30, MW-60 และ MW-90) จากผลการทดลองพบว่า จากผลการทดลองพบว่าค่า 300% Modulus ของยางทั้งหมดอยู่ในช่วง 1.19-1.56 MPa ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้งยังที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟและยังที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์โดยใช้เตาอบ ที่อุณหภูมิ 60 °C จะให้ค่า 300% Modulus ที่ใกล้เคียงกัน

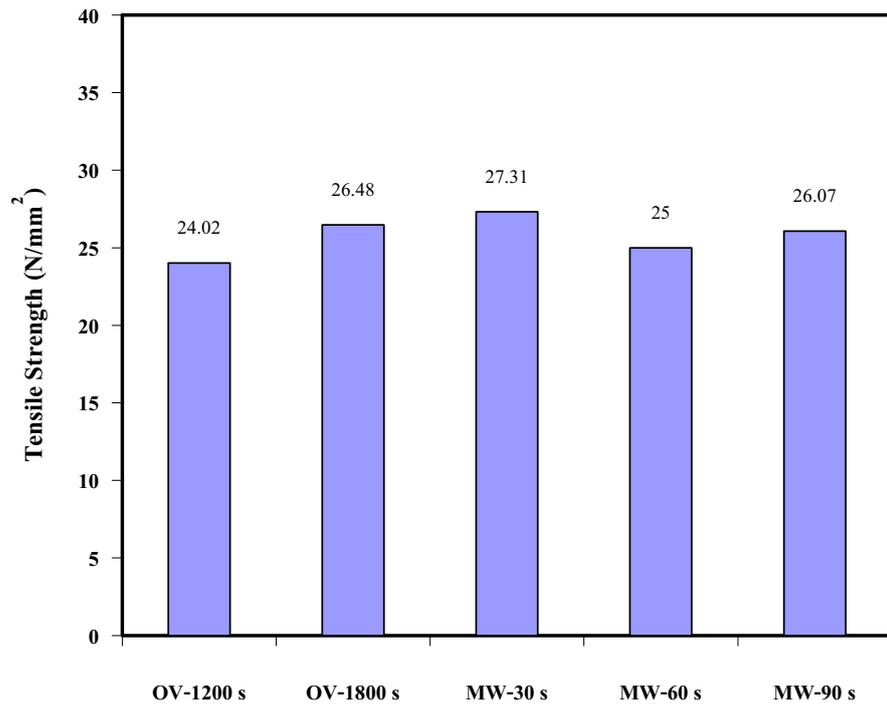
รูปที่ 5.7 แสดงค่าความทนต่อแรงดึง (tensile strength) ของยางวัลคาไนซ์ ทั้งยังผ่านการพรีวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1200 และ 1800 วินาที (OV-1200 และ OV-1800) และยังที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ 80 วัตต์ เป็นเวลา 30, 60 และ 90 วินาที (MW-30, MW-60 และ MW-90) จากผลการทดลองพบว่า จากผลการทดลองพบว่าค่าความทนแรงดึง ของยางทั้งหมดอยู่ในช่วง 24.02 – 27.31 N/mm² ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้งยังที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟและยังที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์โดยใช้เตาอบ ที่อุณหภูมิ 60 °C จะให้ค่าความทนต่อแรงดึง ที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงค่า 100 % Modulus



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงค่า 300 % Modulus



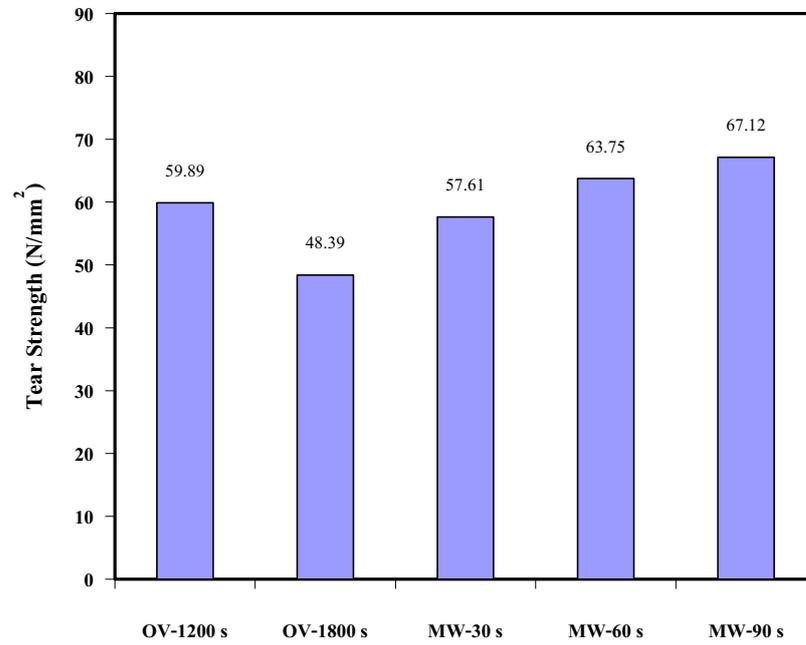
รูปที่ 5.7 กราฟแสดงค่าความทนแรงดึง

รูปที่ 5.8 แสดงค่าความทนต่อแรงฉีกขาด (tear strength) ของยางวัลคาไนซ์ ทั้งยังผ่านการพรีวัลคาไนซ์ ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1200 และ 1800 วินาที (OV-1200 และ OV-1800) และยางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ ด้วยคลื่นไมโครเวฟ 80 วัตต์ เป็นเวลา 30, 60 และ 90 วินาที (MW-30, MW-60 และ MW-90) จากผลการทดลองพบว่า จากผลการทดลองพบว่าค่าความทนต่อแรงฉีกขาด ของยางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 60 °C ทั้งหมดอยู่ในช่วง 48.39 – 59.89 N/mm² ค่าความทนต่อแรงฉีกขาด ของยางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่น ไมโครเวฟ 80 วัตต์ ทั้งหมดอยู่ในช่วง 57.61 – 67.12 N/mm² ซึ่งจะเห็นได้ว่ายางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่น ไมโครเวฟจะให้ค่าความทนต่อแรงดึงที่มีแนวโน้มสูงกว่า แม้ใช้เวลาในการพรีวัลคาไนซ์ที่ต่ำกว่ามาก

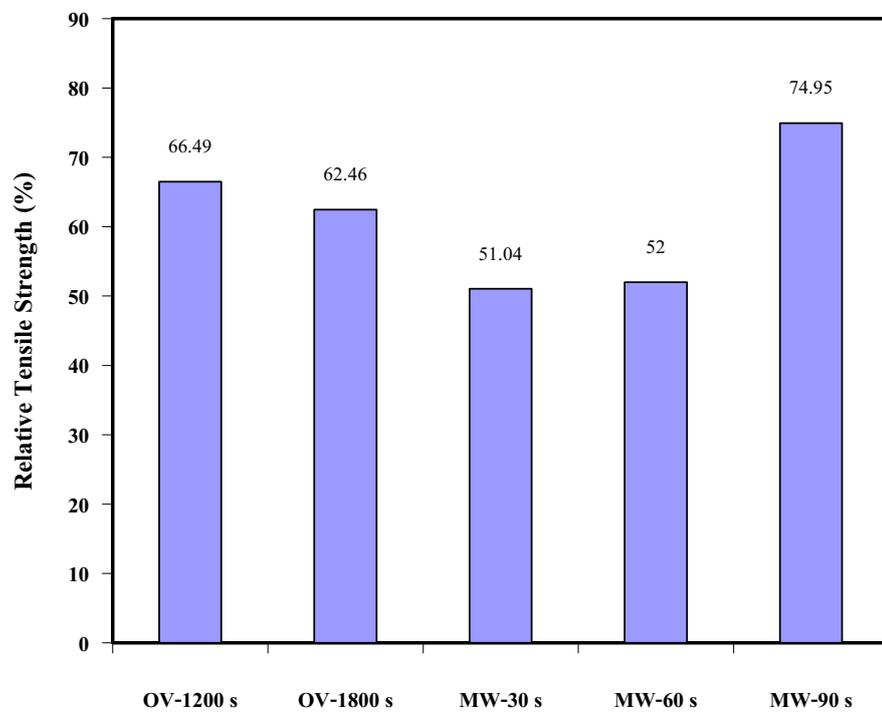
รูปที่ 5.9 แสดงค่า relative tensile strength ของยางวัลคาไนซ์ ทั้งยังผ่านการพรีวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1200 และ 1800 วินาที (OV-1200 และ OV-1800) และยางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่น ไมโครเวฟ 80 วัตต์ เป็นเวลา 30, 60 และ 90 วินาที (MW-30, MW-60 และ MW-90) ซึ่งค่า relative tensile strength นั้นเป็นค่าแสดงอัตราส่วนร้อยละ (%) ระหว่างค่าความทนแรงดึงของยางภายหลังการอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง กับค่าความทนแรงดึงของยางก่อนการอบ จากผลการทดลองพบว่าค่า relative tensile strength ของยางทั้งหมดอยู่ในช่วง 51.04 – 74.95 %

รูปที่ 5.10 แสดงค่าความหนาแน่น (density) ของยางวัลคาไนซ์ ทั้งยังผ่านการพรีวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1200 และ 1800 วินาที (OV-1200 และ OV-1800) และยางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่น ไมโครเวฟ 80 วัตต์ เป็นเวลา 30, 60 และ 90 วินาที (MW-30, MW-60 และ MW-90) จากผลการทดลองพบว่า จากผลการทดลองพบว่าค่าความทนแรงดึง ของยางทั้งหมดอยู่ในช่วง 0.85 – 0.94 g/cm³ ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้งยางที่ผ่าน

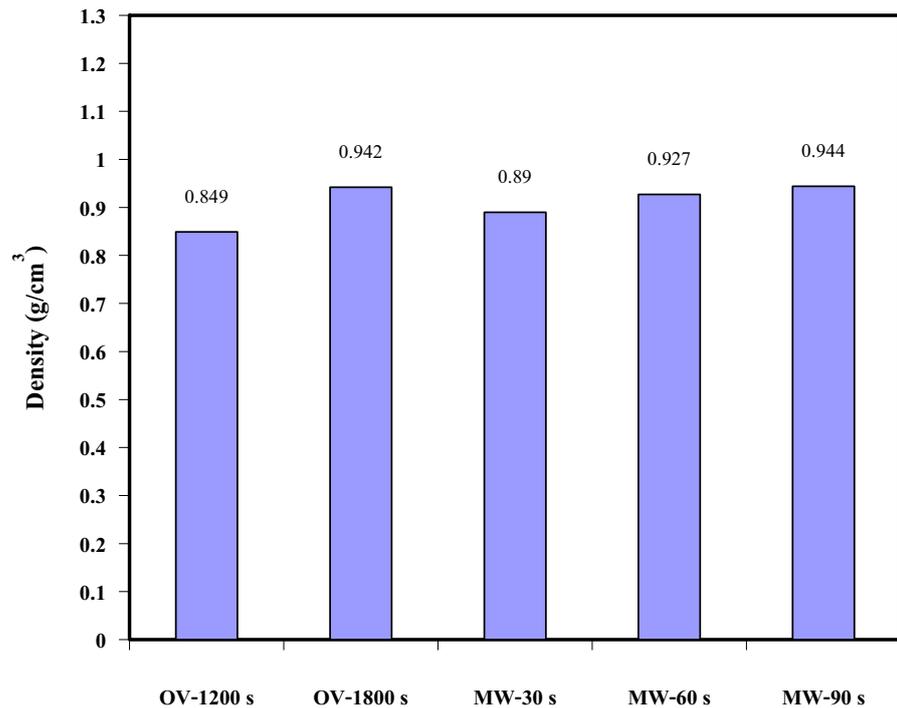
การพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟและยางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์โดยใช้เตาอบ ที่อุณหภูมิ 60 °C จะให้ค่าความหนาแน่น ที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงค่าความทนต่อแรงฉีกขาด



รูปที่ 5.9 กราฟแสดงค่า Relative Tensile Strength



รูปที่ 5.10 กราฟแสดงค่าความหนาแน่น

6. วิจัยรณผล

6.1 ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมในการพรีวัลคาไนซันน้ำยางด้วยคลื่นไมโครเวฟ

จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้พบว่ากำลังของคลื่นไมโครเวฟที่เหมาะสมในการพรีวัลคาไนซันน้ำยางธรรมชาติอยู่ที่ 80 วัตต์ ส่วนคลื่นไมโครเวฟกำลัง 400 และ 800 วัตต์ ไม่เหมาะในการใช้พรีวัลคาไนซันน้ำยางธรรมชาติ เพราะมีกำลังที่สูงเกินไปทำให้น้ำยางถูกทำให้ร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว มีฟองอากาศขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วชิ้นงาน เหมือนกับการเกิดการเดือด และน้ำยางมีสีคล้ำเหมือนมีการไหม้เกิดขึ้นในบางส่วน

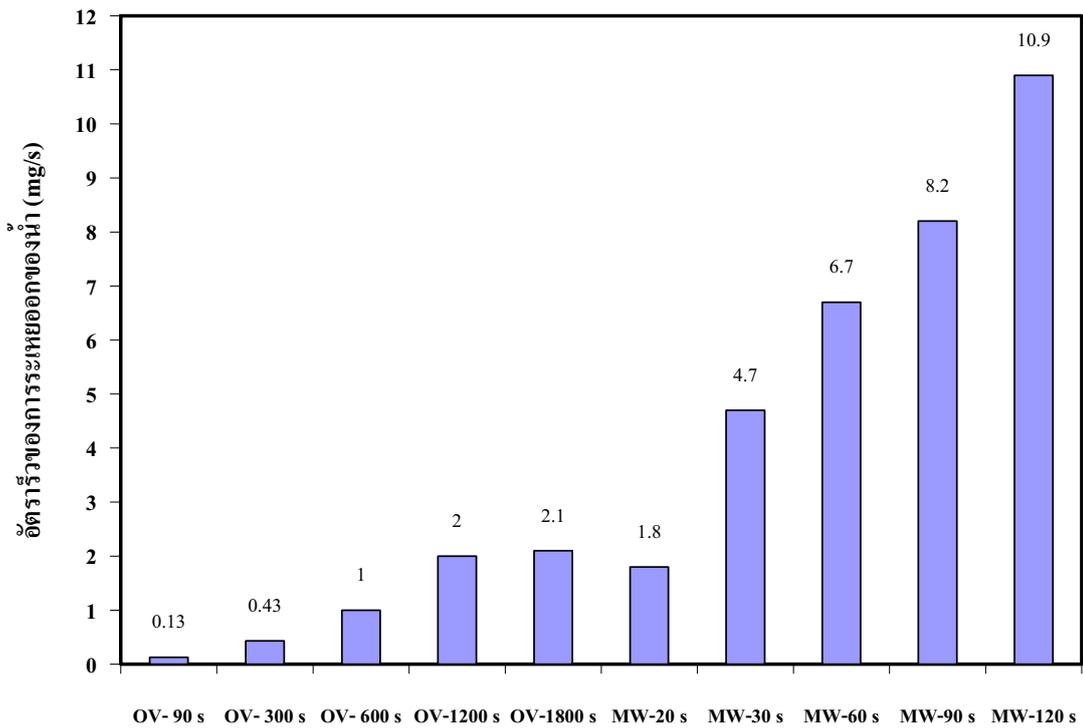
ผลการหาเวลาที่เหมาะสมในการพรีวัลคาไนซันน้ำยางธรรมชาติ พบว่าเวลาที่เหมาะสมในการพรีวัลคาไนซันน้ำยางด้วยคลื่นไมโครเวฟอยู่ที่ 30-90 วินาที เนื่องจากชิ้นงานที่ผ่านการพรีวัลคาไนซันในช่วงเวลาดังกล่าว จะไม่มีฟองอากาศเกิดขึ้นภายในชิ้นงานหลังจากที่ผ่านการวัลคาไนซันที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และจากผลการทดลองพบว่าเวลาที่เหมาะสมในการพรีวัลคาไนซันน้ำยางด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C อยู่ที่ 1200 วินาทีขึ้นไป เนื่องจากชิ้นงานที่ผ่านการ พรีวัลคาไนซันในช่วงเวลาดังกล่าว จะไม่มีฟองอากาศเกิดขึ้นภายในชิ้นงานหลังจากที่ผ่านการวัลคาไนซันที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ในกรณีของน้ำยางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซันด้วยคลื่นไมโครเวฟที่เวลา 20 วินาที และในกรณีของน้ำยางที่ผ่านการ พรีวัลคาไนซันด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C ที่เวลา 900 วินาที ภายหลังจากผ่านการวัลคาไนซันแล้ว พบว่ามีฟองอากาศเกิดขึ้นภายในชิ้นงาน ลักษณะฟองอากาศจะเกิดในบางบริเวณของชิ้นงานและมีขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 5.1 และ 5.2 นั้น สันนิษฐานว่าฟองอากาศที่เกิดขึ้นเกิดจากการระเหยของน้ำที่อยู่ในน้ำยาง ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวนี้ยังระเหยออกจากชิ้นงานอย่างรวดเร็วที่ยังไม่มากพอ เมื่อน้ำยางดังกล่าวไปผ่านกระบวนการวัลคาไนซันที่ยังอยู่ในชิ้นงานก็พยายามที่จะออกมาจากชิ้นงานอันสะท้อนออกมาเป็นผลของฟองอากาศที่

เกิดขึ้นในชั้นงานดังแสดงรูปดังแสดงในรูปที่ 5.1 และ 5.2 ซึ่งอัตราเร็วของการระเหยของน้ำออกจากน้ำยาง ภายหลังการพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟและตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C ที่เวลาต่างๆแสดงในตารางที่ 6.1 และ รูปที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 แสดงค่าอัตราเร็วของการระเหยออกของน้ำจากน้ำยางภายหลังการพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ และตู้อบความร้อน ณ อุณหภูมิ 60 °C ที่เวลาต่างๆ

การพรีวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติ	เวลาที่ใช้ในการพรีวัลคาไนซ์ (s)	อัตราเร็วของการระเหยออกของน้ำ (mg/s)
ตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C	90	0.13
	300	0.43
	600	1.0
	1200	2.0
	1800	2.1
คลื่นไมโครเวฟกำลัง 80 วัตต์	20	1.8
	30	4.7
	60	6.7
	90	8.2
	120	10.9



รูปที่ 6.1 อัตราเร็วของการระเหยออกของน้ำจากน้ำยางภายหลังการพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟและตู้อบความร้อน ณ อุณหภูมิ 60 °C ที่เวลาต่างๆ

ในขณะที่น้ำยางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ที่เวลา 100 วินาที หลังจากผ่านการวัลคาไนซ์แล้วพบว่ามีฟองอากาศเกิดขึ้นภายในชิ้นงาน ลักษณะฟองอากาศมีขนาดเล็กเกิดทั่วบริเวณของชิ้นงาน ลักษณะของชิ้นงานต่างๆดังกล่าวแสดงในรูปที่ 5.1 สันนิษฐานว่าฟองอากาศดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากการเดือดของน้ำยาง

การที่น้ำยางได้รับคลื่นไมโครเวฟแล้วถูกทำให้ร้อนขึ้นได้นั้น เกิดจากโมเลกุลของน้ำภายในน้ำยางชิ้นนี้เองจะเป็นตัวที่ถูกคลื่นไมโครเวฟเอาไว้ การที่โมเลกุลของน้ำถูกทำให้ร้อนขึ้นภายใต้คลื่นไมโครเวฟนั้นเกิดขึ้นจากกลไก 2 ประการ อย่างใดอย่างหนึ่ง คือกระบวนการโพลาไรเซชัน (polarization process) หรือเกิดจากการนำไฟฟ้าของวัสดุ (conduction process) [4] กระบวนการโพลาไรเซชันนั้นจะเกี่ยวข้องกับการจัดเรียงตัวของประจุใหม่ การสั่นหรือการหมุนตัวของไดโพล ภายใต้สนามไฟฟ้าหรือแม่เหล็ก ซึ่งถือเป็นการเคลื่อนที่ของประจุในระยะสั้น (short-rang displacement) ซึ่งโมเลกุลของวัสดุที่ไม่เป็นกลางทางไฟฟ้า เช่น น้ำ จะมีการหมุนกลับตัวไปมาตามความถี่ของคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ (2,450 เมกะเฮิร์ตซ์) เป็นจำนวน 2,450 ล้านรอบต่อวินาที ในหนึ่งรอบคลื่นจะประกอบไปด้วยคลื่นช่วงบวกและคลื่นช่วงลบ ดังนั้น โมเลกุลของน้ำจะหันขั้วบวกไปทางขั้วลบของสนามไฟฟ้าอีก 2,450 ล้านครั้งต่อวินาที และจะหันขั้วขั้วลบของโมเลกุลไปทางขั้วบวกของสนามไฟฟ้าอีก 2,450 ล้านครั้งต่อวินาที รวมแล้วโมเลกุลต้องกลับตัวถึง 4,900 ล้านครั้งต่อวินาที ทำให้เกิดการชนกันและการเสียดสีของโมเลกุล เกิดเป็นพลังงานความร้อนทำให้อุณหภูมิของน้ำสูงขึ้นในที่สุด ในกรณีของความร้อนที่เกิดขึ้นภายใต้กระบวนการการนำไฟฟ้าของวัสดุนั้น เกิดจากการที่คลื่นไมโครเวฟผ่านเข้ามาในวัสดุ คลื่นจะถูกดูดกลืนและจะไปเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นภายใน และสนามไฟฟ้านี้จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุต่างๆ แรงต้านทาน การเคลื่อนที่ซึ่งรวมไปถึงแรงเฉือน แรงยึดหยุ่น และแรงเสียดทานจากการชนกันของประจุต่างๆ

ทำให้เกิดเป็นความร้อนขึ้นภายในวัสดุในที่สุด ซึ่งจะเป็นความร้อนที่เกิดขึ้นทั่วทั้งชิ้นวัสดุ(volumetric heating) เนื่องจากกลไกดังกล่าวนี้เองเมื่อน้ำยางได้รับคลื่นไมโครเวฟจึงถูกทำให้ร้อนขึ้นในเวลาอันรวดเร็ว และเมื่อได้รับคลื่นไมโครเวฟในระยะเวลาที่ยาวนานขึ้นความร้อนที่เกิดขึ้นก็จะยิ่งมากขึ้นตามลำดับ จากการทดลองพบว่า ยิ่งน้ำยางผ่านการพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟเป็นระยะเวลาที่ยาวนานขึ้น อัตราเร็วของการระเหยออกของน้ำ ก็จะยิ่งมีค่ามากขึ้น และเป็นที่สังเกตได้อย่างชัดเจนว่าการพรีวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติด้วยคลื่นไมโครเวฟ จะมีอัตราเร็วของการระเหยออกของน้ำยางที่มากกว่าและใช้เวลาที่สั้นกว่าการพรีวัลคาไนซ์น้ำยางด้วยตู้อบความร้อนมาก ดังแสดงในตารางและรูปที่ 6.1

6.2 ผลการศึกษาสมบัติของยางวัลคาไนซ์ที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์โดยคลื่นไมโครเวฟ

จากผลการทดลองพบว่ายางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟและตู้อบความร้อนจะมีสมบัติการทนแรงดึง ทั้งในค่า Modulus และ ความทนต่อแรงดึง (tensile strength) ที่ใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 5.5, 5.6 และ 5.7 ทั้งนี้เนื่องจาก ทั้งยางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟและตู้อบความร้อนมีค่าความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.3 ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้พบว่าพันธะเชื่อมขวางจะมีผลต่อค่า Modulus ของยาง [14] อีกทั้งในการทดลองนี้ทั้งยางที่ผ่านพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟและตู้อบความร้อน ล้วนมีองค์ประกอบของสารเคมีที่ใช้ในการออกสูตรเหมือนกัน จึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมของยางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟและตู้อบความร้อนนั้นใกล้เคียงกัน

มีผลการทดลองที่น่าสนใจเกิดขึ้นในเรื่องของความต้านทานความร้อนดังแสดงในรูปที่ 5.9 พบว่ายางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ ด้วยตู้อบความร้อนนั้นมีค่า relative tensile strength ที่สูงกว่ายางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟที่เวลา 30 และ 60 วินาที ในขณะที่ยางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟที่เวลา 90 วินาที จะมีค่า relative tensile strength ที่สูงที่สุด การที่ยางมีค่า relative tensile strength ที่มีค่าสูงนั้น แสดงถึงยางมีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนได้ดี ในการทดลองนี้สูตรของสารวัลคาไนซ์ที่ใช้เป็นสูตรที่จะให้เกิดการวัลคาไนซ์ในระบบ Semi-Efficient Vulcanization (Semi-EV) ซึ่งในระบบดังกล่าวจะทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของยาง ด้วยพันธะทั้งชนิด mono-sulfidic crosslink, di-sulfidic crosslink และ polysulfidic crosslink โดยพันธะเชื่อมขวางชนิด mono-sulfidic crosslink และ di-sulfidic crosslink นั้นจะมีเสถียรภาพต่อความร้อนดีกว่าพันธะเชื่อมขวางชนิด polysulfidic crosslink ดังนั้นการที่ยางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟที่เวลา 90 วินาที และ ยางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ ด้วยตู้อบความร้อนนั้นมีค่า relative tensile strength ที่สูง น่าจะเกิดจาก การที่ยางดังกล่าวมีพันธะเชื่อมขวางที่เป็นชนิด mono-sulfidic crosslink และ di-sulfidic crosslink เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของยางวัลคาไนซ์ มากกว่ายางที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟที่เวลา 30 และ 60 วินาที เพื่อพิสูจน์แนวความคิดดังกล่าว ในการทดลองนี้จึงทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์ชนิดของพันธะเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นโดยวิธีอ้อม (indirect method) ในการทดลองนี้ได้ใช้วิธีคำนวณค่า Mooney-Rivlin constant (C_2) จากการวัดค่าความเค้น (stress) และความเครียด (strain) ในงานวิจัยที่ผ่านมา [16-18] พบว่าค่า Mooney-Rivlin constant (C_2) มีความสัมพันธ์กับชนิดของพันธะเชื่อมขวางที่เกิดขึ้น โดยถ้าในระบบของการวัลคาไนซ์มีพันธะเชื่อมขวางชนิด mono-sulfidic crosslink และ di-sulfidic crosslink เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของยางวัลคาไนซ์ มากกว่า ก็จะให้ค่า Mooney-Rivlin constant (C_2) ที่สูงกว่า [16-18] ในการทดลองนี้ได้ทำการหาค่า Mooney-Rivlin constant (C_2) โดยใช้ค่าความเค้น (stress) และความเครียด (strain) และนำค่าความเค้น (stress) และความเครียด (strain) มาใช้ในการคำนวณ ในสมการ Mooney-Rivlin Equation [16-18]

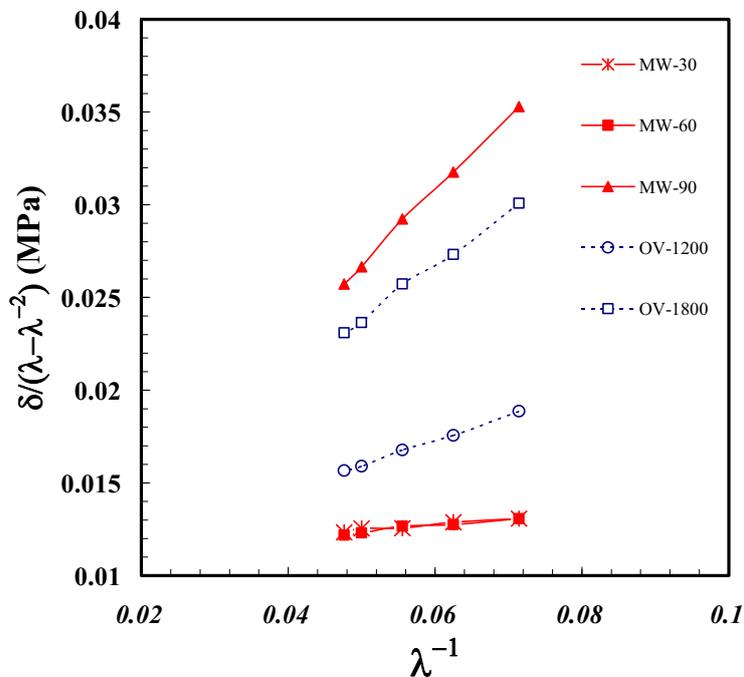
$$\frac{\sigma}{(\lambda-\lambda^{-2})} = 2C_1 + \left(\frac{2C_2}{\lambda}\right)$$

เมื่อ σ คือ ความเครียด (stress)

λ คือ extension ratio ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1 + \varepsilon$ เมื่อ ε คือ ความเครียด (strain)

C_1 และ C_2 คือ Mooney-Rivlin constants

ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองหาค่าความเค้น (stress) และ ความเครียด (strain) ในช่วงความเครียดต่ำๆ ตั้งแต่ 13- 20 %strain ($1/\lambda \approx 0.048 - 0.071$) และทำการเขียนกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง $\sigma/(\lambda-\lambda^{-2})$ และ $1/\lambda$ ซึ่งค่า Mooney-Rivlin constant (C_2) จะคำนวณได้จากความชันของกราฟดังกล่าว [ref] รูปที่ 6.2 เป็นกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง $\sigma/(\lambda-\lambda^{-2})$ และ $1/\lambda$ จากผลการทดลองพบว่า ยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์ด้วยคลีนไมโครเวฟ เป็นเวลา 90 วินาทีจะให้เส้นกราฟที่มีความชันสูงที่สุด ในขณะที่ยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์ด้วยคลีนไมโครเวฟ เป็นเวลา 30 และ 60 วินาที จะให้เส้นกราฟที่มีความชันค่อนข้างต่ำ ตารางที่ 6.2 แสดงค่า Mooney-Rivlin constant (C_2) ของยางแต่ละชนิด จากผลการทดลองพบว่า ยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์ด้วยคลีนไมโครเวฟ เป็นเวลา 30 และ 60 วินาที มีค่า Mooney-Rivlin constant (C_2) ที่ต่ำกว่ายางที่ผ่านการวัลคาไนซ์ด้วยตู้อบความร้อน และยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์ด้วยคลีนไมโครเวฟ เป็นเวลา 90 วินาทีมีค่า Mooney-Rivlin constant (C_2) ที่สูงที่สุด อันแสดงถึงว่า ยางชนิดใดมีค่า Mooney-Rivlin constant (C_2) จะมีแนวโน้มที่มีพันธะเชื่อมขวางเป็นชนิด mono-sulfidic crosslink และ di-sulfidic crosslink ที่มากกว่า ซึ่งพันธะเชื่อมขวางดังกล่าวมีเสถียรภาพต่อความร้อนที่สูงกว่าพันธะเชื่อมขวางชนิด polysulfidic crosslink ซึ่งผลการทดลองในรูปที่ 6.2 และ ตารางที่ 6.2 นั้น สอดคล้องกับผลการทดลองในเรื่องของความต้านทานความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 5.9



รูปที่ 6.2 กราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง $\sigma/(\lambda-\lambda^{-2})$ และ $1/\lambda$

ตารางที่ 6.2 ตารางแสดง ค่า Mooney-Rivlin constant (C_2) ของยาง

การพรีวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติ	เวลาที่ใช้ในการพรีวัลคาไนซ์ (s)	ค่า Mooney-Rivlin constant (C_2)
สู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C	1200	0.075
	1800	0.15
คลื่นไมโครเวฟกำลัง 80 วัตต์	30	0.015
	60	0.017
	90	0.2

7. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า

- สภาพที่เหมาะสมในการพรีวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติด้วยคลื่นไมโครเวฟ นั้นคือ ใช้คลื่นไมโครเวฟ ที่กำลัง 80 วัตต์ เป็นเวลา 30 – 90 วินาที โดยในการพรีวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติด้วยคลื่นไมโครเวฟ เป็นเวลา 90 วินาที จะส่งผลให้ยางที่ได้มีความต้านทานความร้อนได้สูงที่สุด
- การพรีวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติด้วยคลื่นไมโครเวฟใช้เวลาต่ำกว่าการพรีวัลคาไนซ์น้ำยางด้วยสู้อบความร้อนมากถึง ประมาณ 13-40 เท่า แต่ให้ยางที่มีสมบัติใกล้เคียงกัน

8. ข้อเสนอแนะ

การใช้คลื่นไมโครเวฟในการพรีวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาตินั้นใช้เวลาต่ำมาก อันเป็นข้อดีที่จะช่วยลดเวลาและ การใช้พลังงานในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์จากน้ำยาง จึงน่าจะมีโอกาสที่จะศึกษาและพัฒนาเพื่อนำไปสู่การใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

9. เอกสารอ้างอิง

1. <http://www.thailandrubber.thigov.net/knowledge/1m.html> (2003) , สำนักงานกองทุนสงเคราะห์การทำสวนยาง
2. <http://www.bot.or.th/BOTHomepage/DataBank/Real Sector/agriculture/> (2003) ,ธนาคารแห่งประเทศไทย
3. สุธีระ ประเสริฐสรณ์ (2547) แนวทางการพัฒนายางให้เป็นเครื่องจักรเศรษฐกิจของประเทศ- **ประชาคมวิจัย**, 54 (เดือน มีนาคม-เมษายน 2547): 3-7
4. Edward H. Grant (1991) – **Microwave: Industrial, Scientific, and Medical Applications**, Artech House, London.
5. Roger Meredith (1998) – **Engineers' Handbook of Industrial Microwave heating**, The Institute of Electrical Engineers, London.

6. http://www.antonpaar.com/ap/apinternet/file/cmse698d4d.en.0/theory_microwave_technology.pdf.
(2005), Anton Paar Co.,Ltd.
7. S.L. Bai, V. Djafari, M. Andreani and D. Francois (1994) A Comparative of the Mechanical Behaviour of an Epoxy Resin Cured by Microwaves with One Cured Thermally - **European Polymer Journal** , 31(9): 875-884.
8. F.Y.C. Boey (1995) Humidity and Autoclave Pressure Effect on the Interfacial Shear Strength of a Microwave Cured Epoxy-Glass Fiber Composite – **Polymer Testing**, 14: 471-477.
9. Chia L. H. L., J. Jacob and F.Y.C. Boey (1995) Radiation Curing of Poly-Methyl-Methacrylate Using a Variable Power Microwave Source – **Journal of Materials Processing Technology**, 48: 445-449.
10. D. Martin, D. Ighigeanu, E. Mateescu, G. Craciun and A. Ighigeanu (2002) Vulcanization of Rubber Mixtures by Simultaneous Electron Beam and Microwave Irradiation – **Radiation Physics and Chemistry** , 65 : 63-65.
11. Jian Zhou, Chun Shi, Bingchu Mei, Runzhang Yuan and Zhengyi Fu (2003) Research on the Technology and the Mechanical Properties of the Microwave Processing of Polymer – **Journal of Materials Processing Technology** , 137 : 156-158.
12. Kumnuantip C and Sombatsompop N (2005) Effects of Reclaimed and Carbon Black Contents in NR Compounds using Microwave Irradiation Cure System- **The Society of Plastics Engineers: Annual Technical Conference, SPE ANTEC Technical Papers**, 1-5 May 2005, Boston USA, 51: 3211-3215.
13. วราภรณ์ ขจรไชยกูล - เทคโนโลยียาง, สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ
14. Sombatsompop N and Kumnuantip C (2003) Rheology, Cure Characteristics, Physical and Mechanical Properties of Tire-Tread Reclaimed Rubber/NR Compounds - **Journal of Applied Polymer Science**, 87 (10), 1723-1731.
15. Kumnuantip C and Sombatsompop N (2003) Dynamic Mechanical Properties and Swelling Behaviour of NR/Reclaimed Rubber Blends - **Materials Letters**, 57 (21): 3167-3174.
16. Sombatsompop N (1998) Investigation of Swelling Behavior of NR Vulcanisates - **Polymer-Plastics Technology and Engineering**, 37: 19-39.
17. Sombatsompop N (1998) Effects of Crosslink Characteristics on Density and Swelling Behaviour of Expanded Natural Rubber Vulcanisates - **Cellular Polymer**, 17: 63-74.

18. Sombatsompop N (1998) Analysis of Cure Characteristics on Cross-Link Density and Type, and Viscoelastic Properties of Natural Rubber - **Polymer-Plastics Technology and Engineering**, 37: 333-349.

10. สรุปข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิต่อโครงการ

1. ในรายงานไม่ได้กล่าวถึงสมบัติและสภาพของยางก่อน preheating
ตอบ สภาพของยางก่อน preheating เป็นน้ำยางชั้นแอมโมเนียสูง (60 % HA Latex) เป็นของเหลวสีขาวขุ่น
2. ในรายงานไม่ได้กล่าวถึง รูปทรง มวลและ geometry ของชิ้นงาน
ตอบ ชิ้นงานนั้นขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ที่ทำมาจากเทฟลอน ขึ้นรูปชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 120 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร ลึก 2 มิลลิเมตร
3. ในรายงานไม่ได้กล่าวถึงลักษณะของเตา ซึ่งประกอบด้วยขนาดรูปทรง cavity ตำแหน่งการวางของหลอด magnetron และรูปแบบการกระจายคลื่นไมโครเวฟภายในเตาอบ
ตอบ ลักษณะของเตาไมโครเวฟที่ใช้เป็นเตาไมโครเวฟยี่ห้อ Panasonic รุ่น NN-S215WF/MF ความจุ 22 ลิตร ดังแสดงในรูปที่ 10.1 ใช้หลอดแมกนีตรอนในการให้กำเนิดคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2,450 เมกะเฮิร์ตซ์ ให้กำลังสูงสุด 800 วัตต์ รูปแบบการกระจายคลื่นเป็นแบบ Multimode Cavity ของตู้มีขนาด กว้าง 285 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร สูง 195 มิลลิเมตร หลอดแมกนีตรอนติดตั้งอยู่ด้านขวามือ ของ Cavityของตู้ ดังแสดงในรูปที่10.2



รูปที่ 10.1 เตาไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 10.2 Cavity ของเตาไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลอง

4. ในรายงานไม่ได้กล่าวถึงตำแหน่งการวางของชิ้นงานในเตาไมโครเวฟ
ตอบ ในการวางชิ้นงานในเตาไมโครเวฟ จะวางแม่พิมพ์ไว้ในตำแหน่งกลางของ Turntable Plate ของเตาไมโครเวฟ
5. ในรายงานไม่ได้กล่าวถึงการควบคุมพลังงานคลื่นไมโครเวฟ
ตอบ ในงานวิจัยนี้ใช้คลื่นไมโครเวฟ กำลัง 80 วัตต์ ควบคุมโดยชุดควบคุมกำลังวัตต์ของเตาไมโครเวฟที่ตัวเครื่อง
6. ในรายงานไม่กล่าวถึงการวัดอุณหภูมิและตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิของชิ้นยาง
ตอบ ในการดำเนินการทดลองไม่มีการวัดอุณหภูมิของชิ้นงาน อุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในตู้อบเป็นอุณหภูมิที่ควบคุมโดยระบบการควบคุมอุณหภูมิของตู้อบความร้อน
7. ปัญหาใหญ่ที่สุดของการอบยาง (preheating) ด้วยคลื่นไมโครเวฟคือ การเกิดรูพรุนขึ้นภายในเนื้อยาง ซึ่งยังไม่ชัดเจนว่าเกิดจากฟองอากาศ หรือเกิดจากการระเหิดของสารเคมีบางตัว ซึ่งผู้วิจัยไม่ได้กล่าวถึงมากนักหรือตระหนักถึงความสำคัญในเรื่องนี้
ตอบ รูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานยางผู้วิจัยสันนิษฐานว่าเกิดจากการระเหยของน้ำในน้ำยาง ดังที่กล่าวไปแล้วในผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง
8. นักวิจัยควรสรุปผลเรื่องสมบัติทางกายภาพของยางที่ pre vulcanized ด้วยไมโครเวฟและตู้อบด้วย
ตอบ สมบัติทางกายภาพของยางคู่ได้จากลักษณะภายนอกของชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 5.1, 5.2 และค่าความหนาแน่น ในรูปที่ 5.10