



รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากเศษยางพื้นรองเท้ารีไซเคิลด้วยไมโครเวฟและพอลิเอทิลีน  
ชนิดความหนาแน่นต่ำ

โดย

รศ.ดร.ดวงดาว อัจจงค์ และคณะ

มกราคม 2553

โครงการวิจัยขนาดกลางเรื่องยางพารา

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากเศษยางพื้นรองเท้ารีไซเคิลด้วยไมโครเวฟและพอลิเอทิลีน  
ชนิดความหนาแน่นต่ำ

คณะผู้วิจัย

สังกัด

- |                               |                       |
|-------------------------------|-----------------------|
| 1. รศ.ดร.ดวงดาว อัจฉริยะ      | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 2. น.ส.อมราภรณ์ สัมพันธ์รัตน์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |

ชุดโครงการวิจัยขนาดกลางเรื่องยางพารา

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

## รายงานสำหรับผู้บริหาร (Executive summary)

ชื่อโครงการ      เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากเศษยางพื้นรองเท้ารีไซเคิลด้วยไมโครเวฟและพอลิเอ  
ทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ  
Thermoplastic Elastomer from Microwave-Reclaimed Shoe sole Scrap and Low  
Density Polyethylene

### ชื่อหัวหน้าโครงการ

ชื่อ-สกุล รศ.ดร.ดวงดาว อัจฉรงค์

หน่วยงาน ภาควิชาวัสดุศาสตร์

ที่อยู่ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน  
กรุงเทพฯ 10330

โทรศัพท์.....0-2218-5559..... E-mail address .....duangdao.a@chula.ac.th

### นักศึกษาร่วมวิจัย

ชื่อ-สกุล น.ส.อมราภรณ์ สัมพันธ์รัตน์

หน่วยงาน ภาควิชาวัสดุศาสตร์

ที่อยู่ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน  
กรุงเทพฯ 10330

โทรศัพท์.....-..... E-mail address .....boof\_love@hotmail.com

ระยะเวลาดำเนินการ.....26.....เดือน ตั้งแต่วันที่.....11 ตุลาคม 2550.....ถึงวันที่.....31 ธันวาคม 2552

### ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญ

อุตสาหกรรมผลิตรองเท้าแตะยางเป็นอุตสาหกรรมที่มีการผลิตเป็นจำนวนมาก และมีการเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งภายหลังจากกระบวนการผลิตจะมีเศษยางพื้นรองเท้าแตะเหลือใช้ทิ้งอยู่เป็นจำนวนมากซึ่งอาจก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากยางไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ อย่างไรก็ตามได้มีการศึกษาวิธีที่จะนำยางไปใช้ประโยชน์ใหม่อีกครั้งนั่นคือ การรีไซเคิลหรือการดีวัลคาไนเซชันซึ่งเป็นวิธีการที่ทำให้ยางสามารถกลับคืนสู่สถานะะพลาสติกทำให้สามารถนำมาผสมและขึ้นรูปเป็น

ผลิตภัณฑ์ใหม่ได้อีกครั้ง ดังนั้นงานวิจัยนี้จะศึกษาแนวทางและความเป็นไปได้ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากเศษยางพั่นรองเท้าแตะ ซึ่งนอกจากจะเป็นวิธีที่สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับเศษวัสดุเหลือทิ้งแล้ว ยังช่วยลดปริมาณขยะที่เกิดจากอุตสาหกรรมยางได้อีกด้วย โดยในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาถึงอัตราส่วน วิธีการ และภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากเศษยางที่ผ่านการดีวัลคาไนเซชันด้วยไมโครเวฟและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำตลอดจนศึกษาถึงผลของสารรีไซเคิลที่มีต่อสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้ นอกจากนี้เปรียบเทียบเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ในทางการค้าเพื่อทราบถึงคุณภาพของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้

## วัตถุประสงค์

เพื่อเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากเศษยางพั่นรองเท้ารีไซเคิลด้วยไมโครเวฟและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

## ผลการดำเนินงาน

เตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากเศษยางพั่นรองเท้าที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่อัตราส่วนต่างๆ โดยการนำเศษยางพั่นรองเท้ามาผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟที่กำลังไมโครเวฟ 90 180 270 360 และ 450 วัตต์ ที่เวลา 30 60 และ 90 วินาที และใช้เตตระเมทิลไทูแรมไดซัลไฟด์เป็นสารรีไซเคิล จากนั้นทำการวิเคราะห์หาค่าการเชื่อมขวางของยางที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์จากค่าสัดส่วนเจลและอัตราส่วนการบวมตัวเป็นฟังก์ชันกับกำลังไมโครเวฟที่เวลาต่างๆ กัน เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการดีวัลคาไนซ์เศษยางพั่นรองเท้า นอกจากนี้ยังทำการศึกษาผลของพลังงานคลื่นไมโครเวฟและสารรีไซเคิลที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้

ผลการศึกษาพบว่าภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดีวัลคาไนซ์เศษยางคือที่กำลังไมโครเวฟ 360 วัตต์ เป็นเวลา 60 วินาที ค่าสัดส่วนเจลและอัตราส่วนการบวมตัวของยางที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ลดลงเมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้นสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเพิ่มขึ้น ในทางตรงข้ามสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพลดลงเมื่อใช้เศษยางพั่นรองเท้าที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับการใช้สารรีไซเคิลมาผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยอัตราส่วนของเศษยางพั่นรองเท้าและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานคืออัตราส่วน 80:20 ในภาวะที่เศษยางพั่นรองเท้าไม่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟและมีการใช้เตตระเมทิลไทูแรมไดซัลไฟด์ 2.75 phr และเมื่อทำการเปรียบเทียบเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากเศษยางพั่นรองเท้า ณ สภาวะที่เหมาะสมกับเทอร์โม

พลาสติกอิลาสโทเมอร์ในทางการค้าแล้วพบว่าความทนต่อการฉีกขาดของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์ที่เตรียมได้นั้นมีค่าที่สูงกว่าเทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์ในทางการค้าในขณะที่ค่าความแข็งและความทนแรงดึงนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามค่าการยืดดึง ณ จุดขาด และความทนต่อการขัดถูนั้นยังมีค่าที่ต่ำกว่าเทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์ในทางการค้า และเมื่อเปรียบเทียบในเชิงเศรษฐศาสตร์พบว่าเทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์มีต้นทุนในการผลิตเพียง 52.63% ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์ในทางการค้า หรือสามารถลดต้นทุนในการผลิตได้ถึง 47.37%

### สรุปผลการวิจัย

1. ปริมาณ LDPE ที่เพิ่มขึ้นทำให้สมบัติเชิงกล(เช่น สมบัติความทนแรงดึงและความทนการฉีกขาด) และสมบัติทางกายภาพ(เช่น ความแข็ง)ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์มีค่ามากขึ้น มีผลให้เทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์ที่ได้มีสมบัติใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมากขึ้นไปด้วย
2. ผลของพลังงานไมโครเวฟที่ใช้ในการรีเคลมเศษยางพื้นรองเท้ามีผลทำให้สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์มีค่าลดลง เนื่องจากความร้อนจากพลังงานไมโครเวฟทำให้สายโซ่โมเลกุลของเศษยางพื้นรองเท้าเกิดการแตกหักที่สายโซ่หลักทำให้น้ำหนักโมเลกุลต่ำลงหรือมีปริมาณการเชื่อมขวางลดลง
3. ผลของสารรีเคลม TMTD มีผลทำให้ค่าความทนแรงดึง(tensile strength)และ 500% มอดุลัสของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์(SSS/LDPE TPEs)เพิ่มขึ้นและค่าความทนแรงดึง ณ จุดขาดลดลงเนื่องจาก TMTD เกิดการแตกตัวระหว่างการผสมและเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางกับเศษยางพื้นรองเท้าขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อผสมสารรีเคลมหรือ TMTD กับเทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟ พบว่า TMTD ทำให้เทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์ที่เตรียมได้มีความทนแรงดึง 500%มอดุลัสและค่าการยืดดึง ณ จุดขาดมากกว่าเทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์ที่ไม่ได้ผสมสารรีเคลม
4. สารรีเคลมมีผลทำให้เทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์มีค่าอุณหภูมิกลาซทรานซิชัน(glass transition temperature,  $T_g$ )สูงขึ้นซึ่งเกิดจากการเชื่อมขวางระหว่างเศษยางพื้นรองเท้ากับสารรีเคลม
5. สภาวะเหมาะสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์คือที่อัตราส่วนของเศษยางพื้นรองเท้าและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 80:20 ในสภาวะเศษยางพื้นรองเท้าไม่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟและมีการใช้สารรีเคลม 2.75 phr
6. เมื่อทำการเปรียบเทียบเทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์จากเศษยางพื้นรองเท้า ณ สภาวะที่เหมาะสมกับเทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์ในทางการค้าแล้วพบว่าความทนต่อการฉีกขาดของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์ที่เตรียมได้นั้นมีค่าที่สูงกว่าเทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์ในทาง

การค้าในขณะที่ค่าความแข็งและความทนแรงดึงนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามค่าการยืดดึง ณ จุดขาด และความทนต่อการขาดนั้นยังมีค่าที่ต่ำกว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้า

7. เมื่อเปรียบเทียบในเชิงเศรษฐศาสตร์พบว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีต้นทุนในการผลิตเพียง 52.63% ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้า หรือสามารถลดต้นทุนในการผลิตได้ถึง 47.37%

### ข้อเสนอแนะ

1. ควรประยุกต์เทคนิคการผสมเศษยางพั่นรองเท้า และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำให้มีความต่อเนื่องมากยิ่งขึ้นด้วยเครื่องมือชนิดอื่นๆ เช่นเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่
2. ควรเติมสารเติมแต่งอื่นๆเช่นสารประสาน เพื่อช่วยให้การผสมระหว่างเศษยางพั่นรองเท้า และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ทั้งนี้เพื่อให้สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้นั้นมีความใกล้เคียงกันกับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้า

### ผลงานทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

1. บทความในวารสารวิชาการระดับนานาชาติที่มีค่า impact factor และ/หรือที่อยู่ในฐานข้อมูล

## สารบัญ

|                                                                         | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------|------|
| สารบัญ.....                                                             | ก    |
| สารบัญรูป.....                                                          | ค    |
| สารบัญตาราง.....                                                        | จ    |
| บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....                                                 | 1    |
| บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....                                              | 2    |
| บทที่ 1 บทนำ.....                                                       | 3    |
| บทที่ 2 การศึกษาค้นคว้าทฤษฎี.....                                       | 4    |
| 2.1 กระบวนการวัดค่าไนเซชัน.....                                         | 4    |
| 2.2 วิธีการกำจัดขยะยาง.....                                             | 4    |
| 2.3 ความรู้ทั่วไปของไมโครเวฟ.....                                       | 9    |
| 2.4 การดีวัลคาไนเซชันยางด้วยไมโครเวฟ.....                               | 11   |
| 2.5 เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์.....                                     | 13   |
| 2.6 เครื่องมือผสมและขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์.....              | 14   |
| 2.7 การทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และฐานฐานวิทยา.....            | 16   |
| ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์                                           |      |
| บทที่ 3 การทดลอง.....                                                   | 18   |
| 3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้.....                                   | 18   |
| 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....                                        | 19   |
| 3.3 วิธีการทดลอง.....                                                   | 23   |
| 3.4 การเปรียบเทียบเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้กับเทอร์โม..... | 28   |
| พลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้า                                          |      |
| 3.5 การวิเคราะห์และทดสอบเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์.....                 | 28   |
| บทที่ 4 ผลการทดลอง.....                                                 | 30   |
| 4.1 ค่าสัดส่วนเจลและอัตราส่วนการบวมตัวของเศษยางพื้น.....                | 30   |
| รองเท้ายางเคลมด้วยไมโครเวฟ                                              |      |
| 4.2 ฐานฐานวิทยาของเศษยางพื้นรองเท้ายางเคลมด้วยไมโครเวฟ.....             | 33   |
| 4.3 สมบัติเชิงกล.....                                                   | 35   |

|                                                                     | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------|------|
| 4.4 สมบัติทางกายภาพ.....                                            | 43   |
| 4.5 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์.....                   | 45   |
| 4.6 สมบัติวิสโคอีลาสติกของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ .....          | 49   |
| 4.7 เปรียบเทียบสมบัติระหว่าง TPE ทางการค้าและ TPE ที่เตรียมได้..... | 51   |
| 4.8 การวิเคราะห์ในเชิงเศรษฐศาสตร์.....                              | 52   |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....                                         | 55   |
| บรรณานุกรม.....                                                     | 58   |

## สารบัญรูป

|                                                                                                                                                                                                      | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 2.1 การกลับหัวของไดโพลซึ่งทำให้เกิดความร้อน.....                                                                                                                                              | 11   |
| รูปที่ 2.2 เครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่.....                                                                                                                                                           | 15   |
| รูปที่ 3.1 เศษยางพื้นรองเท้าที่ใช้ในการทดลอง.....                                                                                                                                                    | 18   |
| รูปที่ 3.2 ภาพแสดงตู้ไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลอง.....                                                                                                                                                   | 19   |
| รูปที่ 3.3 ภาพแสดงเครื่องบดลูกกลิ้งหรือเครื่องบดลมิล.....                                                                                                                                            | 20   |
| รูปที่ 3.4 เครื่องบดสองลูกกลิ้ง.....                                                                                                                                                                 | 20   |
| รูปที่ 3.5 ตู้อบ.....                                                                                                                                                                                | 21   |
| รูปที่ 3.6 เครื่องบด.....                                                                                                                                                                            | 21   |
| รูปที่ 3.7 เครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่.....                                                                                                                                                           | 22   |
| รูปที่ 3.8 เครื่องอัดแบบ LABTECH รุ่น LP-S-50.....                                                                                                                                                   | 22   |
| รูปที่ 3.9 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำวิจัยโดยรวม.....                                                                                                                                                    | 24   |
| รูปที่ 4.1 ผลของพลังงานไมโครเวฟที่มีต่อค่าสัดส่วนเจลของเศษยางพื้นรองเท้าที่<br>ผ่านการผสมหรือเคลือบรีเคลมด้วยไมโครเวฟที่กำลังไมโครเวฟและเวลาต่างๆ.....                                               | 32   |
| รูปที่ 4.2 ผลของพลังงานไมโครเวฟที่มีผลต่ออัตราการบวมตัวของเศษยางพื้นรองเท้าที่<br>ผ่านการผสมหรือเคลือบรีเคลมด้วยไมโครเวฟที่กำลังไมโครเวฟและเวลาต่างๆ.....                                            | 32   |
| รูปที่ 4.3 สัณฐานวิทยาของเศษยางพื้นรองเท้าแต่ละที่ไม่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟ.....<br>ผ่านการดีวัลคาไนซ์ที่สภาวะ 270 วัตต์ 60 วินาที และผ่านการดีวัลคาไนซ์ที่สภาวะ<br>360 วัตต์ 60 วินาที..... | 34   |
| รูปที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของเศษยางพื้นรองเท้าแต่ละที่ไม่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟ.....<br>ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟที่สภาวะ 360 วัตต์ 30 60 และ 90 วินาที.....                                | 35   |
| รูปที่ 4.5 ความเค้น-ความเครียดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ.....<br>ระหว่างเศษยางพื้นรองเท้า(SSS) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(LDPE).....                                       | 36   |
| รูปที่ 4.6 ผลของพลังงานไมโครเวฟและเตตระเมทิลไทูแรมไดซัลไฟด์ต่อค่า.....<br>ความทนแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ปริมาณพอลิเอทิลีน<br>ชนิดความหนาแน่นต่ำที่อัตราส่วนต่างๆ.....                  | 37   |

|                                                                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 4.7 ผลของพลังงานไมโครเวฟและเตตระเมทิลไทยแรมไดซัลไฟด์ต่อการยืดดึง                                                                                                         | 37 |
| ณ จุดขาดของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์ที่ปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่อัตราส่วนต่างๆ                                                                                    |    |
| รูปที่ 4.8 ผลของพลังงานไมโครเวฟและเตตระเมทิลไทยแรมไดซัลไฟด์ต่อ 500%มอดุลัส                                                                                                      | 38 |
| ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์ที่ปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่อัตราส่วนต่างๆ                                                                                            |    |
| รูปที่ 4.9 การสลายตัวของ EVA/NR โดยการกำจัดกรดแอซิดิก และเกิดเป็นพันธะคู่                                                                                                       | 39 |
| รูปที่ 4.10 กลไกการเกิดการแตกพันธะและการเชื่อมขวางของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์ระหว่าง กระบวนการรีเคลม                                                                          | 42 |
| รูปที่ 4.11 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์(SSS/LDPE TPEs) ที่ปริมาณ LDPE ต่างๆกัน                                                                                     | 46 |
| รูปที่ 4.12 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์ที่เตรียมจากเศษยาง                                                                                                          | 47 |
| พื้นรองเท้าและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่อัตราส่วน 80:20 ที่ไม่ผ่านการดีวัลคาไนเซชันด้วยไมโครเวฟ และผ่านการดีวัลคาไนเซชันด้วยไมโครเวฟที่สภาวะ 360 วัตต์ เป็นเวลา 60 วินาที |    |
| รูปที่ 4.13 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์ที่เตรียมจากเศษยาง                                                                                                          | 48 |
| พื้นรองเท้าและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่อัตราส่วน(SSS/LDPE TPEs) 80:20 ที่ไม่ใส่สารรีเคลม และใส่สารรีเคลม                                                                 |    |
| รูปที่ 4.14 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์ที่เตรียมจากเศษยาง                                                                                                          | 49 |
| พื้นรองเท้าที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(M-SSS/LDPE TPEs) ที่อัตราส่วน80:20 ที่ไม่ใส่สารรีเคลม และใส่สารรีเคลม                              |    |
| รูปที่ 4.15 กราฟระหว่าง $\tan \delta$ และอุณหภูมิ ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์ที่เตรียม                                                                                        | 50 |
| จากเศษยางพื้นรองเท้าและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(SSS/LDPE TPEs) ที่อัตราส่วน 80:20                                                                                          |    |
| รูปที่ 4.16 กราฟระหว่าง $\tan \delta$ และอุณหภูมิ ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์ที่เตรียม                                                                                        | 51 |
| จากเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(M-SSS/LDPE TPEs) ที่อัตราส่วน 80:20                                                |    |

## สารบัญตาราง

|                                                                                                                                                | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของ Santoprene® 101-87.....                                                                                              | 19   |
| ตารางที่ 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบสมบัติต่างๆ.....                                                                                        | 23   |
| ตารางที่ 3.3 กำลังของไมโครเวฟ และเวลาในการดีวัลคาร์ไนซ์เศษยางพ่นรองเท้า.....                                                                   | 25   |
| ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนการผสมของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์.....                                                                                 | 27   |
| ตารางที่ 4.1 แสดงค่าสัดส่วนเจลและอัตราส่วนการบวมตัวของเศษยางพ่นรองเท้า.....                                                                    | 31   |
| ที่ไม่ผสมกับผงเขม่าดำ                                                                                                                          |      |
| ตารางที่ 4.2 ความทนต่อการฉีกขาดของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์.....                                                                              | 41   |
| ตารางที่ 4.3 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์.....                                                                                        | 43   |
| ตารางที่ 4.4 ความทนต่อการขัดถูของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยาง.....                                                             | 44   |
| พ่นรองเท้ากับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่อัตราส่วน 80:20                                                                                   |      |
| ตารางที่ 4.5 ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว( $T_g$ )ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วน 80:20.....                                  | 50   |
| ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้กับเทอร์โมพลาสติก อิลาสโตเมอร์ในทางการค้า..... | 52   |
| (Santoprene® 101-87)                                                                                                                           |      |
| ตารางที่ 4.7 ต้นทุนวัตถุดิบของ TPE จากเศษยางพ่นรองเท้า และ TPE ในทางการค้า.....                                                                | 53   |
| (Santoprene® 101-87)                                                                                                                           |      |
| ตารางที่ 4.8 การคิดค่าไฟฟ้าของที่อยู่อาศัยที่อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าเกิน 150 หน่วย.....                                                        | 53   |
| ต่อเดือน                                                                                                                                       |      |
| ตารางที่ 4.9 ค่าไฟฟ้าของ TPE ที่เตรียมจากเศษยางพ่นรองเท้า และ TPE ในทางการค้า.....                                                             | 54   |
| (Santoprene® 101-87)                                                                                                                           |      |

## บทคัดย่อ

เศษยางพื้รองเท้าเป็นขยะยางชนิดหนึ่งที่เกิดจากกระบวนการผลิตรองเท้าและยางเป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการเพิ่มมูลค่าและช่วยลดปริมาณขยะยางลง โดยได้ทำการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากเศษยางพื้รองเท้าที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่อัตราส่วนต่างๆ โดยการนำเศษยางพื้รองเท้ามาผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟที่กำลังไมโครเวฟ 90 180 270 360 และ 450 วัตต์ ที่เวลา 30 60 และ 90 วินาที และใช้เตตระเมทิลไทูแรมไดซัลไฟด์เป็นสารรีเคลม จากนั้นทำการวิเคราะห์ห้ระดับการเชื่อมขวางของยางที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์จากค่าสัดส่วนเจลและอัตราส่วนการบวมตัวเป็นฟังก์ชันกับกำลังไมโครเวฟที่เวลาต่างๆกัน เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการดีวัลคาไนซ์เศษยางพื้รองเท้า นอกจากนี้ยังทำการศึกษาผลของพลังงานคลื่นไมโครเวฟและสารรีเคลมที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้ ผลการศึกษาพบว่าภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดีวัลคาไนซ์เศษยางคือที่กำลังไมโครเวฟ 360 วัตต์ เป็นเวลา 60 วินาที ค่าสัดส่วนเจลและอัตราส่วนการบวมตัวของยางที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ลดลงเมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้นสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเพิ่มขึ้น ในทางตรงข้ามสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพลดลงเมื่อใช้เศษยางพื้รองเท้าที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับการใช้สารรีเคลมมาผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยอัตราส่วนของเศษยางพื้รองเท้าและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานคืออัตราส่วน 80:20 ในภาวะที่เศษยางพื้รองเท้าไม่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟและมีการใช้เตตระเมทิลไทูแรมไดซัลไฟด์ 2.75 phr และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้า (Santoprene® 101-87) แล้วพบว่าความทนต่อการฉีกขาดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้นั้นมีค่าที่สูงกว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้าในขณะที่ค่าความแข็งและความทนแรงดึงนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามค่าการยืดดึง ณ จุดขาด และความทนต่อการขีดข่วนนั้นยังมีค่าที่ต่ำกว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้า

## Abstract

Shoe sole scrap is a by-product from rubber shoe factory, which can cause an environmental problem. Therefore, the goal of this research was to reduce the amount and increase added values of rubber wastes by preparing thermoplastic elastomers (TPE) from devulcanized shoe sole scrap and low density polyethylene (LDPE) at various ratios. Shoe sole scrap was devulcanized by microwave energy at various microwave power and devulcanizing time (90, 180, 270, 360, and 450 watt and 30, 60, and 90 sec, respectively) and by using tetra methyl thiuram disulfide (TMTD) as a reclaiming agent. The degree of crosslinking was evaluated by measurement of the gel fraction and swelling ratio of devulcanized shoe sole scrap as a function of microwave power and time to identify the optimum condition for devulcanizing shoe sole scrap. The effects of microwave energy and reclaiming agent on the mechanical, physical, and thermal properties as well as the morphology of the TPEs were studied. The results showed that the optimized condition to devulcanize shoe sole scrap by microwave energy was at 360 watt for 60 sec. The gel fraction and swelling ratio of devulcanized shoe sole scrap decreased with increasing microwave power. The mechanical and physical properties of TPEs were increased with increasing LDPE content. In contrast, the mechanical and physical properties of TPEs decreased when the microwave devulcanized shoe sole scrap and reclaiming agent were both added with the LDPE. The suitable ratio for preparing the TPE from this research was 80:20 for non-microwave devulcanized shoe sole scrap and LDPE, with the addition of 2.75 phr of TMTD. The selected TPE formula was compared with commercial TPE (Santoprene® 101-87). The results showed that the tear strength of the prepared TPE was higher than that of the commercial TPE; whereas the hardness and tensile strength values were comparable with those of the commercial one. Nevertheless, it was found that the elongation at break and abrasion resistance of the prepared TPE were still lower than those of the commercial TPE.

## บทที่ 1

### บทนำ

อุตสาหกรรมผลิตรองเท้าแตะยางเป็นอุตสาหกรรมที่มีการผลิตเป็นจำนวนมาก และมีการเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งภายหลังจากกระบวนการผลิตจะมีเศษยางพื้นรองเท้าแตะเหลือใช้ทิ้งอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้ผู้ผลิตต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น รวมทั้งเสียพื้นที่ในการจัดเก็บเศษยางพื้นรองเท้าแตะเหล่านั้นซึ่งอาจก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากยางไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ รวมทั้งไม่สามารถนำมาผสมหรือขึ้นรูปใหม่ได้ ทั้งนี้เนื่องจากยางมีโครงสร้างแบบเชื่อมขวาง 3 มิติ ยางจึงมีความเหนียวและแข็งแรง อย่างไรก็ตามได้มีการศึกษาวิธีที่จะนำยางไปใช้ประโยชน์ใหม่อีกครั้งนั่นคือ การรีเคลมหรือการดีวัลคาไนเซชันซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในการรีไซเคิลยาง กล่าวคือเป็นวิธีการที่ทำให้ยางสามารถกลับคืนสู่สถานะพลาสติกทำให้สามารถนำมาผสมและขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ได้อีกครั้ง ดังนั้นงานวิจัยนี้จะศึกษาแนวทางและความเป็นไปได้ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากเศษยางพื้นรองเท้าแตะ ซึ่งนอกจากจะเป็นวิธีที่สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับเศษวัสดุเหลือทิ้งแล้ว ยังช่วยลดปริมาณขยะที่เกิดจากอุตสาหกรรมยางได้อีกด้วย โดยในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาถึงอัตราส่วน วิธีการ และภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากเศษยางที่ผ่านการดีวัลคาไนเซชันด้วยไมโครเวฟและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำตลอดจนศึกษาถึงผลของสารรีเคลมที่มีต่อสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้

### วัตถุประสงค์

เพื่อเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากเศษยางพื้นรองเท้ารีเคลมด้วยไมโครเวฟและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

## บทที่ 2

### การศึกษาค้นคว้าทฤษฎี

ในปัจจุบัน ยางเป็นวัสดุที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น ยางรถยนต์ รองเท้ายาง ยางรัดของ ท่อ ยาง และถุงมือยาง เป็นต้น เนื่องจากยางมีสมบัติจำเพาะแตกต่างจากวัสดุอื่นๆ คือมีความยืดหยุ่นดี เมื่อดึงจะยืดออกและหดกลับได้ทันทีเมื่อปล่อยมือ เหนียว และแข็งแรงตลอดจนมีสมบัติหลากหลายสามารถเลือกตามการใช้งานได้ง่าย ในปัจจุบันอุตสาหกรรมยางจึงมีการเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ปริมาณขยะยางมีปริมาณมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งขยะที่เกิดจากยางนี้ใช้เวลานานในการย่อยสลายไปตามธรรมชาติ เนื่องจากยางเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซต(thermoset) ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน(vulcanization) ทำให้ยางมีโครงสร้างเป็นโครงร่างแหสามมิติ จึงไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยการให้ความร้อนหลอมเหลวและขึ้นรูปใหม่ได้เหมือนวัสดุประเภทอื่นๆ เช่น แก้ว โลหะหรือพลาสติก

#### 2.1 กระบวนการวัลคาไนเซชัน

กระบวนการวัลคาไนเซชัน คือกระบวนการเปลี่ยนยางซึ่งมีสภาพไม่คงตัวให้เป็นยางที่มีสภาพคงตัว โดยใช้สารวัลคาไนซ์ (vulcanizing agent) ในการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลยาง ซึ่งการเชื่อมขวางโมเลกุลจะทำให้โมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์จะมีสมบัติเปลี่ยนไป เช่น ไม่หลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน และไม่แข็งตัวเมื่อได้รับความเย็น รวมทั้งความสามารถในการละลายลดลง (เสาวรจน์, 2546)

#### 2.2 วิธีการกำจัดขยะยาง

ในปัจจุบันยางสามารถกำจัดได้หลายวิธี เช่น ผังกลบ เผาเป็นเชื้อเพลิง ทำยางรีเคลม ผลิตภัณฑ์ผง การกำจัดที่เป็นที่นิยมและทำได้ง่ายที่สุดคือ การผังกลบแต่การผังกลบก็มีข้อเสียคือต้องใช้พื้นที่ในการกำจัดมากและอาศัยเวลาในการย่อยสลายที่ยาวนานมาก เนื่องจากยางเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง ไม่สามารถละลายหรือถูกทำลายได้ด้วยสารเคมี ทนต่อสภาพแวดล้อมทำให้ย่อยสลายตามธรรมชาติได้ยาก อีกทั้งยังเป็นผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นวิธีการลดปริมาณขยะที่มีประสิทธิภาพและได้ผลมากที่สุดคือ การรีไซเคิลยางหรือการนำยางกลับมาใช้ใหม่ อีกทั้งยังเป็นการใช้งานทรัพยากรอย่างคุ้มค่ามากที่สุดวิธีหนึ่ง นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเศษยางที่ใช้แล้ว การรีไซเคิลยางทำได้หลายวิธีแต่วิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือ การนำมาผลิตเป็นยางรีเคลม วิธีการผลิตยางรีเคลมสามารถทำได้หลายวิธีเช่น Pan process, Reclamation or Devulcanization process

### 2.2.1 การรีไซเคิลหรือดีวัลคาไนเซชัน

การรีไซเคิลหรือการรีไซเคิลยาง (reclamation or recycle) เป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถลดปริมาณขยะที่เกิดจากยางได้ สมาคมอุตสาหกรรมรีไซเคิลแห่งชาติส่วนของการรีไซเคิลยาง (Rubber Recycling Division of the National Association of Recycling Industries (1980)) ประเทศสหรัฐอเมริกาได้ให้นิยามยางรีไซเคิลว่า เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำเศษยางเหลือทิ้งมาผ่านกระบวนการที่ทำให้ยางคืนกลับสู่สถานะพลาสติก (plastic state) ซึ่งทำให้สามารถนำเศษยางดังกล่าวมาผสมและขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ได้อีกครั้ง ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจจะมีการเติมหรือไม่เติมยางใหม่ (virgin rubber) ก็ได้ การทำให้ยางกลับคืนสู่สถานะพลาสติกนั้นต้องมีการทำลายพันธะเชื่อมขวางในยาง (devulcanization) แต่เนื่องจากค่าพลังงานพันธะระหว่างพันธะคาร์บอน-คาร์บอน (C-C) พันธะคาร์บอน-ซัลเฟอร์ (C-S) และพันธะซัลเฟอร์-ซัลเฟอร์ (S-S) มีค่าใกล้เคียงกันคือ 370, 310 และ 270 กิโลจูล/โมล ตามลำดับ ซึ่งในกระบวนการผลิตยางรีไซเคิล พันธะทุกพันธะในโครงสร้างของยางมีโอกาสแตกออกจากกันได้ ดังนั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นร่วมกัน คือ การแตกของพันธะเชื่อมขวางและการแตกของสายโซ่โมเลกุลของยาง (depolymerization) ซึ่งการที่โครงสร้างโมเลกุลของยางถูกทำลายนี้เอง ส่งผลให้ยางรีไซเคิลมีสมบัติเชิงกลด้อยกว่ายางใหม่และทำให้ขึ้นรูปได้ยาก(พนอ, 2548)

กระบวนการดีวัลคาไนเซชัน (devulcanization) มีอยู่หลายวิธี อันได้แก่ วิธีทางเชิงกล (mechanical) วิธีทางเคมีร่วมกับความร้อน (thermo chemical) วิธีการใช้ไมโครเวฟ (microwave) หรือการใช้อัลตราซาวด์ (ultrasound) เป็นต้น (P.C. Hitt Gaines, 2005)

ในปีค.ศ.2000 Yap (C.K. Yap, 2000) ได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตยางรีไซเคิลโดยใช้วิธีเชิงกล พบว่าเมื่อยางได้รับแรงกดอัดและแรงเฉือนที่มากเพียงพอสามารถทำให้พันธะเชื่อมขวางในยางแตกออกจากกันได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีใดๆช่วยในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งการผลิตยางรีไซเคิลทำได้โดยการนำเศษยางที่ถูกตัดให้เป็นชิ้นเล็กๆเข้าสู่เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) โดยปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งให้ใกล้เคียงศูนย์มากที่สุด ซึ่งพบว่าแรงกดอัดยางที่ได้รับมีค่าประมาณ 100 เมตริกตันหรือมากกว่า และปรับความเร็วของลูกกลิ้งทั้งสองให้ต่างกันเป็นอัตราส่วน 1:1.6 อุณหภูมิที่ใช้ในขณะบดผสมอยู่ในช่วง 70-100°C หลังจากบดยางประมาณ 30 รอบ การหมุนของลูกกลิ้งทำให้ได้ยางที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งยางที่ได้นี้สามารถนำไปผสมกับยาง สารเคมี หรือสารตัวเติม เพื่อนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ได้อีกครั้ง

และในปีเดียวกันนี้เอง Mouri และคณะ (M. Mouri, 2000) ได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตยางรีไซเคิลที่อาศัยทั้งความร้อนและแรงกดอัดเพื่อช่วยในการเกิดปฏิกิริยาดีวัลคาไนเซชัน ซึ่งสามารถใช้วิธีนี้กับยางได้หลายชนิด เช่น ยางธรรมชาติ (natural rubber) ยางสไตรีน-บิวทีไดอีน (styrene-butadiene rubber) โดยใช้แรงกด 10-150 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร อุณหภูมิ 180-350°C และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 1-5 นาที นอกจากนี้ยังมีการเติมเขม่าดำ (carbon black) เข้าไปในยางในระหว่างกระบวนการ

ดีวัลคาไนเซชันด้วย เพื่อให้ยางดีวัลคาไนซ์ที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดีเนื่องจากผงเขม่าดำทำหน้าที่เป็นสาร นอกจากนั้นเพื่อให้กระบวนการดีวัลคาไนเซชันเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นได้มีการเติมสารเคมีอื่นร่วมด้วย อาทิ สารที่ช่วยในการเกิดดีวัลคาไนซ์ เช่น ไทโอฟีนอล (thiophenol) ไดไซลิลไดซัลไฟด์ (dixylyl disulfide) หรือสารประเภทน้ำมัน เช่น น้ำมันแนฟทีนิกหรือน้ำมันพาราฟินิกลงไปด้วย ซึ่งยางรีเคลมที่ได้จากกระบวนการนี้มีสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับยางที่ไม่เคยผ่านกระบวนการใดมาก่อน จึงสามารถนำยางรีเคลมที่ได้จากกระบวนการนี้ไปใช้งานในด้านต่างๆได้ โดยไม่จำเป็นต้องนำไปผสมกับยางใหม่

### 2.2.2 สารรีเคลม(Reclaiming agent)

สารรีเคลมเป็นสารจำพวกเดียวกับสารตัดสายโซ่(Peptizer) (D. Debapriya, 2006) เป็นตัวช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดอย่างรวดเร็ว มีลักษณะการทำงานตรงกันข้ามกับสารเร่งให้ยางคงรูป แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆคือ

- อะลิฟาติก และอะโรมาติกเมอร์แคปแทน(Aliphatic and aromatic mercaptan) ซึ่งพบว่าอะลิฟาติกเมอร์แคปแทนมีประสิทธิภาพเหนือกว่าอะโรมาติกเมอร์แคปแทน แต่เป็นสารที่ไม่นิยมใช้เนื่องจากมีกลิ่นเหม็น
- สารประกอบอะมิโน(Amino compound) เป็นสารที่มีประสิทธิภาพในการหน่วงปฏิกิริยาการแข็งตัวเนื่องจากความร้อน(Heat hardening process) และนิยมใช้กับยางที่ไม่ได้วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน โดยประสิทธิภาพของเอมีน(Amine) สามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ Primary amine> Secondary amine> Tertiary amine
- ฟีนอลแอลคิลซัลไฟด์ และไดซัลไฟด์(Phenol alkyl sulfides and disulfides) เป็นสารที่นิยมใช้กับยางที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันโดยหลักการทำงานคือ เร่งให้โมเลกุลของยางขาดออกจากกัน นอกจากนี้ยังมีหน้าที่ป้องกันการกลับมารวมตัวกันใหม่ของสายโซ่พอลิเมอร์ที่ขาดออกจากกันและหากในปฏิกิริยามีออกซิเจนอยู่ด้วย จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสารรีเคลม (Reclaiming agent) ในกลุ่มนี้

ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของสารรีเคลมไดซัลไฟด์จากงานวิจัยของ B. Adhikari และคณะ (B. Adhikari et al, 2000) มีดังนี้





## 2.3 ความรู้ทั่วไปของไมโครเวฟ

ไมโครเวฟ คือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีลักษณะเหมือนแสงที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง และสามารถทะลุผ่านสารที่มีความโปร่งใสได้ เป็นพลังงาน (radiant energy) แตกต่างจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่างๆ คือความแตกต่างที่ความยาวของคลื่นและความถี่ ไมโครเวฟจะมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงของคลื่นวิทยุกับรังสีอินฟราเรด ความยาวคลื่นของแม่เหล็กไฟฟ้าจะแปรผกผันกับความถี่ ซึ่งมีความถี่ประมาณ 300 MHz ถึง 300 GHz ไมโครเวฟเดินทางเป็นเส้นตรงเหมือนกับแสง และสะท้อนหักเหกับโลหะผ่านอากาศและตัวกลางอื่นๆ แต่ไม่ทุกชนิด เช่น แก้วบางชนิด กระดาษ และพลาสติก ไมโครเวฟจะถูกดูดกลืนไมโครเวฟได้สูงสามารถถูกทำให้ร้อนได้ง่ายด้วยไมโครเวฟ

### 2.3.1 กลไกการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

วัตถุโดยทั่วไปจะประกอบด้วยอนุภาคประจุไฟฟ้าบวก และอนุภาคประจุไฟฟ้าลบจำนวนเท่ากัน จึงทำให้วัตถุนั้นมีลักษณะเป็นกลางทางไฟฟ้า ถ้าวัตถุไม่มีสมบัติการนำนั้นคือเป็นพวกสารไดอิเล็กตริก แต่เมื่อนำไปวางในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โมเลกุลจะถูกเหนี่ยวนำทำให้เกิดการเคลื่อนที่ไปทิศทางต่างๆ และพยายามเรียงตัวตามสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้านี้โมเลกุลจะทำตัวเหมือนมีสองขั้วและหมุนรอบตัวตามแกน โมเลกุลเหล่านี้จะจัดตัวตามแนวขั้วบวกและลบ กระแสไฟฟ้าทั่วไปจะเปลี่ยนทิศทางกลับไปมา 60 ครั้งใน 1 วินาที ในทำนองเดียวกันไมโครเวฟมีความถี่อยู่ในช่วง 915-2,450 MHz เมื่อผ่านไมโครเวฟลงไป โมเลกุลที่มีขั้วมีแนวโน้มที่จะเรียงตัวเป็นเส้นตรงตามสนามแม่เหล็ก แต่สนามแม่เหล็กจะกลับไปกลับมา 915-2,450 ล้านครั้งต่อวินาที โมเลกุลซึ่งพยายามที่จะแกว่งที่ความถี่นั้นจะทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างโมเลกุล จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว

จากการที่สารไดอิเล็กตริกสามารถทำให้ร้อนขึ้นได้จากการให้พลังงานไมโครเวฟเข้าไป โดยความร้อนที่เกิดขึ้น มาจากการจัดเรียงตัวของสารไดอิเล็กตริกตามขั้วไฟฟ้าภายใต้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีการสลับไปมาอย่างรวดเร็ว เรียกว่าการเกิดไดโพลโรเทชัน (Dipole rotation) ผลจากการเกิดไดโพลโรเทชันทำให้สารไดอิเล็กตริก ร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว ยกตัวอย่างเช่น โมเลกุลของน้ำ ซึ่งปกติเป็นโมเลกุลมีขั้วภายใต้ภาวะปกติ โมเลกุลของน้ำจะจัดเรียงตัวแบบอิสระ แต่เมื่อมีสนามไฟฟ้ามากระทำ มันจะพยายามจัดเรียงตัวตามสนามไฟฟ้า ผลจากการสลับไปมาของขั้วไฟฟ้า ทำให้โมเลกุลของน้ำต้องปรับตัวตามการเปลี่ยนแปลงมีผลทำให้ความร้อนเกิดขึ้น อันเนื่องมาจากการเสียดสีกันในระหว่างการหมุนของโมเลกุลตามสนามไฟฟ้า

การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟสามารถแสดงได้เป็นค่าคงที่เชิงซ้อน ( $\epsilon^*$ ) ดังสมการที่ 1

$$\epsilon^* = \epsilon' - j \epsilon'' \dots\dots\dots \text{สมการที่ 1}$$

โดยที่  $\epsilon'$  คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

$\epsilon''$  คือเทอม (Loss factor) เป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการทำให้สารไดอิเล็กตริกร้อนขึ้น

### 2.3.2 ลักษณะเด่นของคลื่นไมโครเวฟ

แบ่งเป็น 3 ประการ

1. การสะท้อนกลับ (Reflection) คลื่นไมโครเวฟเมื่อไปกระทบกับภาชนะที่เป็นโลหะหรือมีส่วนผสมของโลหะ คลื่นไมโครเวฟไม่สามารถทะลุผ่าน แต่จะสะท้อนกลับหมด ดังนั้นอาหารที่ใส่ในภาชนะที่เป็นโลหะจะไม่สุก
2. การส่งผ่าน (Transmission) คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านภาชนะที่ทำด้วยแก้ว กระจกใส เซรามิก และพลาสติกได้ เพราะภาชนะดังกล่าวไม่มีส่วนผสมของโลหะ
3. การดูดซับ (Absorption) ปกติอาหารทั่วไปมีน้ำเป็นองค์ประกอบ น้ำสามารถดูดซับไมโครเวฟทำให้อาหารร้อนอย่างรวดเร็ว

เมื่อคลื่นไมโครเวฟผ่านเข้าไปในอาหาร จะทำให้โมเลกุลในอาหารเกิดการสั่นสะเทือนและเสียดสีกันจนเกิดพลังงานความร้อนขึ้น

### 2.3.3 การทำงานของเตาไมโครเวฟ

เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าไปยังแท่งแคโทดจะเกิดความร้อนขึ้น แท่งแคโทดจะปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา โดยสภาวะที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก อิเล็กตรอนจะวนอยู่รอบๆ แท่งแคโทด แต่ในสภาวะที่มีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่หมุนเป็นวงกลมมากกว่าเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ทำให้เกิดการกระโดดจากแท่งแคโทดไปแอโนดต่อเนื่องกันภายใต้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 4000-6000 โวลต์ เป็นผลให้เกิดคลื่นไมโครเวฟขึ้น โดยมีสายอากาศเป็นตัวจับคลื่นที่เกิดจากแมกนีตรอนส่งผ่านไปยังท่อนำคลื่นเพื่อเดินทางไปกระทบกับใบพัดที่ทำจากโลหะ ทำให้เกิดการสะท้อนกลับของคลื่นและเกิดการกระจายของคลื่นไมโครเวฟได้อย่างทั่วถึง

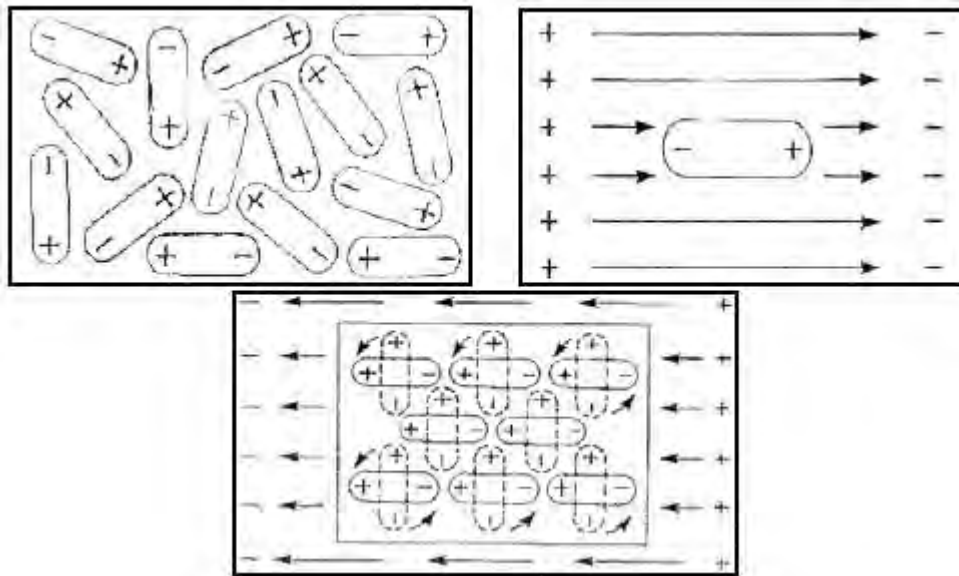
### 2.3.4 การเกิดความร้อนด้วยไมโครเวฟ

เมื่อคลื่นไมโครเวฟถูกดูดซับเข้าสู่ชิ้นอาหารจะเกิดความร้อนใน 2 แบบร่วมกัน ได้แก่

1. Ionic polarization เป็นการเกิดความร้อนจากการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายที่อยู่ในสนามไฟฟ้า เมื่อแต่ละไอออนถูกกระตุ้นจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่และเกิดการเสียดสีกับไอออนตัวอื่นๆ พลังงานจลน์ถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน แล้วกระจายความร้อนไปสู่ส่วนอื่นๆ
2. Dipole rotation เป็นการเกิดความร้อนกับสารประกอบที่มีขั้ว เช่น น้ำ ในสภาพปกติสารประกอบจะเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ เมื่อเข้าไปอยู่ในสนามไฟฟ้าประจุบวก และประจุลบจะถูกเหนี่ยวนำ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่เปลี่ยนทิศทางเพื่อเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ

การเคลื่อนที่ด้วยการหมุนตัวกลับไปกลับมาจะเกิดอย่างรวดเร็วตามระดับความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ คือ 915-2450 ล้านครั้งต่อวินาที ผลของความเร็วและการเสียดสีกันทำให้เกิดความร้อนขึ้น

ความร้อนที่เกิดขึ้นจากทั้งสองรูปแบบดังกล่าวที่จุดซึ่งไมโครเวฟสัมผัสอาหารจะค่อยๆกระจายตัวออกไปยังส่วนอื่นๆ โดยการนำความร้อนอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดความร้อนอย่างรวดเร็วกว่าการให้ความร้อนด้วยวิธีดั้งเดิมซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ภาพแสดงการกลับขั้วของไดโพลซึ่งทำให้เกิดความร้อน

## 2.4 การตีวัลคาไนเซชันยางด้วยไมโครเวฟ(Microwave Devulcanization)

การตีวัลคาไนเซชันยางด้วยไมโครเวฟเป็นวิธีการให้พลังงานไมโครเวฟกับยางในปริมาณที่เหมาะสมที่จะทำให้พันธะระหว่างคาร์บอน-ซัลเฟอร์ (C-S) และพันธะระหว่างซัลเฟอร์-ซัลเฟอร์ (S-S) แตกมากกว่าพันธะระหว่างคาร์บอน-คาร์บอน (C-C) วิธีนี้อาศัยหลักการในการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วโดยคลื่นที่เป็นระเบียบและสามารถเข้าถึงภายในชิ้นงานได้อย่างทั่วถึงทั้งชิ้นงาน ซึ่งโดยทั่วไปความถี่ของไมโครเวฟที่ใช้ในระดับอุตสาหกรรมและในครัวเรือนจะอยู่ในช่วง 915-2450 MHz การตีวัลคาไนเซชันด้วยไมโครเวฟมีข้อจำกัดคือ ยางที่ใช้จะต้องมีโครงสร้างที่มีขั้วหรือมีค่าไดอิเล็กทริก (dielectric) เพียงพอเพื่อใช้ในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟที่ปล่อยออกมาในปริมาณที่เหมาะสมต่อการเกิดตีวัลคาไนเซชัน อย่างไรก็ตาม เราสามารถปรับปรุงความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของยางได้ โดยการผสมสารที่สามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟให้กับยางนั้นคือ ผงเขม่าดำ(carbon black) (S. Moriwaki, 2006) เป็นวัสดุกึ่งตัวนำ (semiconductor material) ที่นิยมนำมาใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อเสริมแรงและเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าในยาง และยังสามารถใช้งานเป็นสารดูดซับพลังงานไมโครเวฟที่ดีได้อีกด้วย

ผงเขม่าดำ(Carbon black) ได้จากกระบวนการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์หรือการแตกตัวเนื่องจากความร้อน(Thermal cracking) ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง ก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น เขม่าดำจัดเป็นสารตัวเติมที่สำคัญที่สุดในอุตสาหกรรมยาง เนื่องจากเขม่าดำมีราคาถูก สามารถใส่เขม่าดำใน

ยางได้ในปริมาณมาก(มากกว่า 50 phr.) และที่สำคัญที่สุดคือเขม่าดำสามารถเสริมแรงให้กับยางอย่างมาก อาจทำให้ความแข็งแรง(Strength) ของยางเพิ่มมากกว่า 10 เท่า นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการแปรรูป(Processability) ของยางได้ง่ายขึ้นด้วย เช่น ลดความยืดหยุ่นของของไหล(Melt elasticity) ลดการหดตัว(Shrinkage) และการบิดเบี้ยว(Distortion) ของผลิตภัณฑ์ยางหลังการขึ้นรูป เป็นต้น นอกจากนี้ผงเขม่าดำยังเป็นสารที่สามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟที่ดีและร้อนได้อย่างรวดเร็วเมื่อได้รับพลังงานไมโครเวฟ

งานวิจัยที่แสดงถึงผลของผงเขม่าดำที่มีผลต่อการเกิดความร้อนจากไมโครเวฟเป็นงานวิจัยของ Jane Clarke และคณะ (Jane Clake, 2006) ได้ทำการศึกษาผลของพลังงานไมโครเวฟและปริมาณผงเขม่าดำต่อการเกิดความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟและสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเพื่อใช้ในการปรับปรุงความสามารถในการเกิดความร้อนของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงโดยการใส่ผงเขม่าดำผสมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง 0-30% โดยน้ำหนัก จากการทดลองพบว่าผงเขม่าดำสามารถทำให้พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีอุณหภูมิสูงขึ้นได้โดยการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ กล่าวคือที่ปริมาณผงเขม่าดำร้อยละ 8.5 6.4 และ 2.2 โดยน้ำหนัก และใช้พลังงานไมโครเวฟ 100 วัตต์ 200 วัตต์ และ 300 วัตต์ ตามลำดับ เป็นปริมาณผงเขม่าดำที่เริ่มทำให้ของผสมมีอุณหภูมิสูงขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณผงเขม่าดำมากขึ้นอัตราการเพิ่มอุณหภูมิของของผสมเท่ากับ  $7.2 \pm 0.2^{\circ}\text{C}/\text{ร้อยละ}$

สำหรับตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการดีวัลคาไนเซชันยางด้วยเทคนิคไมโครเวฟนั้นเป็นผลงานวิจัยของ Novotny และคณะ (Novotny, 1978) ซึ่งได้ทำการศึกษาวิธีการดีวัลคาไนเซชันยางด้วยเทคนิคไมโครเวฟ โดยยางที่ใช้ในการทดลองเป็นยางที่มีหมู่มีซั่ว(polar group)อยู่ในโครงสร้าง อันได้แก่ ยางอีพดีเอ็ม (EPDM) และยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์ ซึ่งซัลเฟอร์จะทำหน้าที่ดูดซับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในโครงสร้าง โดยความร้อนที่เกิดขึ้นนี้เองเป็นตัวแปรหนึ่งที่ทำให้ยางเกิดการดีวัลคาไนซ์ จากการศึกษาพบว่ายางที่ผ่านการดีวัลคาไนเซชันด้วยไมโครเวฟสามารถนำไปผสมและผ่านกระบวนการขึ้นรูปใหม่ได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติเหมือนกับยางก่อนดีวัลคาไนซ์

ในปีค.ศ.2006 Saburo Moriwaki และคณะ (S. Moriwaki, 2006) ได้ทำการศึกษาการเกิดดีไฮโดรคลอรีนชันของพอลิไวนิลคลอไรด์โดยใช้พลังงานไมโครเวฟพบว่าการเติมสารดูดซับพลังงานไมโครเวฟ อันได้แก่ ผงเฟอร์ไรต์ (ferrite powder) ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพต่อการเกิดความร้อนของพอลิไวนิลคลอไรด์อันเนื่องจากพลังงานไมโครเวฟได้สูง กล่าวคือเมื่อเติมสารดูดซับเหล่านี้ลงไปมีผลทำให้พอลิไวนิลคลอไรด์เกิดการดีไฮโดรคลอรีนชันเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะถ่านกัมมันต์มีผลทำให้เกิดการดีไฮโดรคลอรีนชันมากที่สุด

สำหรับงานวิจัยที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับพลังงานไมโครเวฟต่อการเกิดความร้อนในยาง ได้แก่ งานวิจัยของรัชดา(รัชดา, 2005) ในปี ค.ศ.2005 ซึ่งได้ทำการศึกษาการประยุกต์พลังงานไมโครเวฟในการให้ความร้อนแก่ยาง พบว่าการใช้พลังงานจากคลื่นไมโครเวฟในการให้ความร้อนซึ่งเป็นการให้ความร้อน

เชิงปริมาตร (volumetric heating) นั้น จะทำให้ยางมีความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และอุณหภูมิภายในเนื้อยางมีการกระจายตัวอย่างทั่วถึงภายในระยะเวลาอันรวดเร็วทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งนอกจากจะเป็นการลดเวลาในการให้ความร้อนแก่ยางได้ดีแล้วยังส่งผลต่อการลดต้นทุนในกระบวนการผลิตอีกด้วย โดยทั่วไปยางที่ผ่านการดีวัลคาไนเซชันจะมีสมบัติที่สำคัญบางประการลดลง เช่น ความทนแรงดึง มอดุลัส และความแข็งแรง ซึ่งวิธีการปรับปรุงสมบัติของยางรีไซเคิลที่มีประสิทธิภาพคือการนำยางที่ผ่านการดีวัลคาไนเซชันมาผสมกับพอลิเมอร์เกิดเป็นของผสมที่เรียกว่า เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ (K. Sadhan และคณะ, 2005)

## 2.5 เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์(Thermoplastic elastomer)

เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์เป็นวัสดุที่ได้รับการพัฒนาให้มีสมบัติยืดหยุ่นคล้ายยาง แต่สามารถเกิดการหลอมตัวใหม่ซึ่งเป็นสมบัติของเทอร์โมพลาสติกทำให้เกิดเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นและมีความแข็งแรงอีกทั้งยังสามารถนำกลับมารีไซเคิลได้ ดังนั้นการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์เป็นการปรับปรุงสมบัติของยางรีไซเคิลที่สามารถลดต้นทุนการผลิตและมีการใช้งานได้อย่างกว้างขวางโดยไม่ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม สมบัติของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ขึ้นอยู่กับความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างยางและพลาสติก กล่าวคือยางและพลาสติกจะต้องมีความสามารถในการยึดติดระหว่างพื้นผิวที่ดี ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วยางจะมีความสามารถในการยึดติดกับพลาสติกค่อนข้างต่ำทำให้สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้มีค่าต่ำ อย่างไรก็ตามสามารถปรับปรุงความสามารถในการยึดติดของพื้นผิวยางและพลาสติกได้โดยการเติมสารช่วยผสม ดังเช่นตัวอย่างงานวิจัยของ Rajalingam และคณะ(P. Rajalingam, 1992) ที่ได้ศึกษาผลของการเคลือบผิวเม็ดยางรถยนต์ด้วยพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหลายหมู่เพื่อปรับปรุงแรงกระแทกและความสามารถในการเข้ากันได้ (compatibility) ของวัสดุเชิงประกอบระหว่างเม็ดยางรถยนต์และพอลิเอทิลีน โดยได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบพอลิเอทิลีน 2 ชนิด อันได้แก่ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LLDPE) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) โดยเคลือบผิวของเม็ดยางรถยนต์ด้วยพอลิเมอร์ 4 ชนิดคือ เอทิลีนอะคริลิกแอซิดโคพอลิเมอร์ (ethylene acrylic acid copolymer), เอสอีบีเอสเทอร์พอลิเมอร์ (SEBS terpolymer), เอทิลีนไวนิลแอซีเตตโคพอลิเมอร์ (ethylene vinylacetate) และมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิเอทิลีน (maleic anhydride-grafted PE) ที่ปริมาณร้อยละ 0-15 โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีน ผลการศึกษาพบว่า เมื่อใส่พอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหลายหมู่ลงไปปริมาณร้อยละ 6.7 โดยน้ำหนัก จะทำให้ได้วัสดุเชิงประกอบที่มีความทนแรงกระแทกมากที่สุด ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบชนิดของพอลิเมอร์ทั้ง 4 ชนิดดังกล่าวพบว่า มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิเอทิลีนและเอสอีบีเอสสามารถปรับปรุงความทนต่อแรงกระแทกมากที่สุด

ในปีค.ศ.2000 Goncharuk และคณะ(G. P. Goncharuk, 2000) ได้ทำการศึกษาผลของการดัดแปรผงยางที่มีต่อสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ระหว่างผงยางรถยนต์และพอลิเอทิลีน

ความหนาแน่นต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากการผสมยางและพลาสติกนั้นจะต้องมีการบดยางให้มีขนาดเล็กซึ่งการบดยางนี้เองทำให้เกิดการออกซิเดชันขึ้นที่พื้นผิวส่งผลให้ความสามารถในการยึดติด (adhesion) ของยางกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมีค่าลดลง และเป็นสาเหตุทำให้สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ระหว่างยางกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมีค่าลดลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการปรับปรุงความสามารถในการยึดติดกันระหว่างยางและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำโดยการเติมสารช่วยผสม (compatibilizing agent) เช่น เอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์ (EVA) และสารเชื่อมขวาง (cross-linking agent) เช่น ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide) ลงในผงยางรถยนต์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยใช้เครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ (twin-screw extruder) ผลการศึกษาพบว่าค่าอีลาสติคโมดูลัสและการยึดติด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใส่เอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์ที่ปริมาณต่างๆ เนื่องจากเกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างไวนิลอะซีเตตซึ่งเป็นหมู่มีขั้วและพื้นผิวยางที่ถูกออกซิไดซ์ และค่าความทนแรงดึง การยึดติด ณ จุดขาด เพิ่มขึ้นเมื่อใส่ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ลงไปในเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ เนื่องจากไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ทำให้ LDPE เกิดการเชื่อมขวางขึ้น นอกจากนี้จากการศึกษาพบว่าเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์ยังทำหน้าที่เป็นพอลิเมอร์ที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดติดระหว่างพื้นผิวของยางกับพลาสติกและช่วยเพิ่มความคงรูปให้กับยางและพลาสติกได้อีกด้วย

## 2.6 เครื่องมือผสมและขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์

### 2.6.1 เครื่องบดลูกมิล (Ball mills)

เป็นเครื่องมือที่ประกอบด้วยหม้อบด ลูกบด และรางหมุนสำหรับกึ่งหม้อบด ทำหน้าที่ในการบดและผสมสารผสมให้เข้ากัน โดยนำสารที่ต้องการผสมหรือบดใส่ลงไปในหม้อบดที่มีปริมาณลูกบด 2 ใน 3 ของหม้อบด จากนั้นบดผสมโดยการนำหม้อบดไปหมุนในรางหมุน ซึ่งการกระทบหรือกระแทกกันของลูกบดทำให้สารเกิดการผสมกัน

### 2.6.2 เครื่องบดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill)

เป็นเครื่องผสมระบบเปิด ประกอบด้วยลูกกลิ้ง 2 ลูก วางในแนวนอน สามารถปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งได้ตามต้องการ บริเวณหัวท้ายของลูกกลิ้งมีแผ่นยึด (guide) ช่วยควบคุมปริมาณพลาสติกหรือยางในขณะผสมและช่วยกันไม่ให้พลาสติกหรือยางเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ปลายลูกกลิ้ง ซึ่งลูกกลิ้งที่ใช้บดจะทำจากเหล็กหล่อที่มีผิวหน้าเรียบ อีกทั้งต้องมีระบบหล่อเย็นโดยจะผ่านน้ำเข้าไปในลูกกลิ้งเพื่อป้องกันไม่ให้พลาสติกหรือยางเกิดการไหม้ในขณะผสม และในการทำงานนั้นลูกกลิ้งทั้งสองจะหมุนเข้าหากัน โดยขนาดและความเร็วของลูกกลิ้งจะมีผลต่อการกระจายตัวของพลาสติกหรือยางและส่วนผสม ซึ่งมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของพลาสติกและยางที่ผสมได้นั่นเอง

### 2.6.3 เครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) (รัจนา, 2546)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการผสมและขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ โดยการให้ความร้อนแก่วัสดุที่อยู่ภายในอุปกรณ์รูปทรงกระบอก หรือที่เรียกว่า barrel ให้มีความอ่อนตัวหรือเกิดการหลอมและเกิดแรงอัดเพื่อให้วัสดุสามารถไหลผ่านช่องทางออก(orifice หรือ die) ซึ่งเป็นตัวกำหนดรูปร่างของวัสดุที่ไหลออกมา(extrudate) ให้มีหน้าตัด(cross-section หรือ profile) ตามต้องการ ความร้อนที่ให้แก่วสดุเกิดจากความร้อนภายนอก(external heat) จากอุปกรณ์ทำความร้อน(heater) และความร้อนภายในที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทาน(viscous friction) จากการหมุนของสกรูเพื่อสร้างแรงดันให้วัสดุไหลผ่านช่องทางออก(die) ออกไปได้

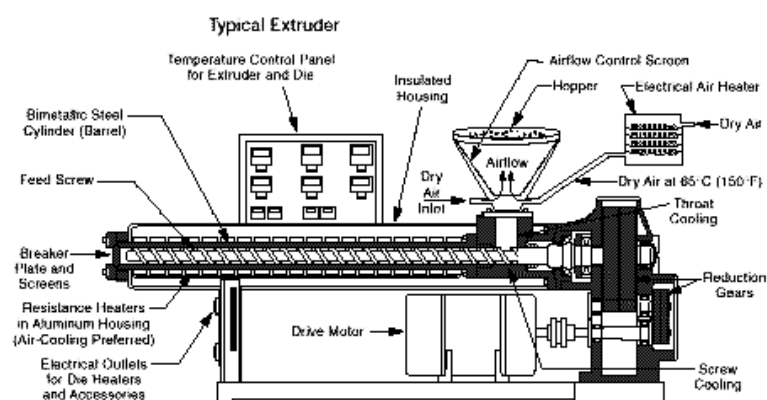
เครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ประกอบด้วยสกรูจำนวน 2 อัน อยู่ภายใน barrel เดียวกัน โดยสกรูหมุนไปในทิศทางเดียวกันหรือที่เรียกว่า co-rotation screw ซึ่งถูกควบคุมด้วยระบบไฟฟ้าและเฟือง สกรูถูกแบ่งออกเป็น 3 ช่วง(zones) ซึ่งสัมพันธ์กับ channel ของสกรู อันได้แก่ feed zone, transition หรือ compression zone และ metering

Feed zone เป็นช่วงแรกของสกรูโดยอยู่ใต้ feed hopper มีหน้าที่ลำเลียงวัสดุจาก hopper หรือ feedstock ด้วยอัตราคงที่สู่ extruder

Transition หรือ compression zone ในโซนนี้สกรูจะมี channel depth ค่อยๆลดลงอย่างสม่ำเสมอ(taper) เรซินจะออกจากโซนนี้ในสภาพที่เกิดการหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์และ เป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอ(homogeneous) รวมทั้งมีอุณหภูมิสูงตามความต้องการที่ die

Metering สกรูในช่วงสุดท้ายนี้ จะทำหน้าที่ทำให้เรซินหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน(homogenize) และบีบให้เรซินไหลผ่านช่องทางออก(die)

ระบบทำความร้อนและเย็นของสกรูโดยทั่วไปควบคุมด้วยการไหลวนของของไหล เช่น น้ำหรือน้ำมัน ที่ถูกควบคุมอุณหภูมิภายในท่อของสกรู



รูปที่ 2.2 แสดงเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่

#### 2.6.4 เครื่องอัดแบบ (Compression molding machine)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์โดยอาศัยแรงดันและความร้อน กล่าวคือความร้อนทำให้เรซินหรือของผสมเกิดการหลอมตัว ส่วนความดันทำให้ชิ้นงานมีรูปร่างหรือขนาดตามที่ต้องการ เพื่อนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติต่างๆ เช่น ความทนแรงดึง ความแข็ง และความทนการขีดถู เป็นต้น

### 2.7 การทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และสัญญาณวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

#### 2.7.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล(Mechanical properties) (พนอ, 2548)

ความทนแรงดึง(Tensile strength) มอดุลัสแรงดึง(Tensile modulus) และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) นับเป็นหนึ่งในสมบัติที่สำคัญที่สุดของวัสดุต่างๆและจำเป็นที่จะต้องทดสอบ สำหรับวัสดุพอลิเมอร์ การทดสอบแรงดึงคือ การวัดความสามารถของวัสดุหนึ่งที่จะทนทานต่อแรงดึงยืดออกจากกัน ก่อนที่จะเกิดการฉีกขาด แตกหัก หรือเสียสภาพ การทดสอบแรงดึงทำได้โดยการยึดชิ้นงานตัวอย่างที่มีขนาดและรูปร่างตามมาตรฐาน โดยใช้ที่จับ(Grips) สองชุด ที่จับข้างหนึ่งจะถูกยึดให้อยู่กับที่และอีกข้างหนึ่งจะเคลื่อนที่โดยมีเซลล์วัดแรง (Load cells) เป็นตัววัดและควบคุมแรงที่กระทำต่อชิ้นงานตัวอย่าง ชิ้นงานตัวอย่างจะถูกตัดเป็นรูปดัมเบลล์ (Dumb-bell) เพื่อให้ชิ้นงานตัวอย่างเกิดการขาดที่บริเวณตรงกลางของตัวอย่าง ห่างจากบริเวณที่จับ การยืดออกของชิ้นงานสามารถวัดได้จากการวัดระยะห่างระหว่างสองเส้น (Gauge marks) บนชิ้นงานตัวอย่างที่ห่างกันเป็นระยะเท่ากับความยาวเกจหรือ Gauge length ซึ่งตามมาตรฐานจะใช้ความยาวเกจ 25 มิลลิเมตร โดยการใช้เครื่องเอ็กซ์เทนโซมิเตอร์ (Extensometer)

ค่าแรงดึงและการยืดออกของตัวอย่างที่ได้จากเครื่อง สามารถคำนวณค่าสมบัติเชิงกลต่างๆ ได้ดังนี้

- ความเค้นดึง (Tensile stress),  $\sigma = F/A$
- ความเครียดดึง (Tensile strain),  $\epsilon = \Delta l/l_0$
- ร้อยละความเครียดหรือร้อยละการดึงยืด (% strain, Elongation),  $\% \epsilon = \Delta l/l_0 \times 100$
- มอดุลัสแรงดึง (Tensile modulus),  $E = \sigma/\epsilon$

โดย

$\sigma$  คือความเค้นดึง

$\epsilon$  คือความเครียดดึง

F คือแรงที่ใช้ดึง

A คือพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน

$\Delta l$  คือความยาวที่เปลี่ยนไป

$l_0$  คือความยาวเริ่มต้น

E คือมอดุลัสแรงดึง

## 2.7.2 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

### 2.7.2.1 ความแข็ง(Hardness) (สายฝน, 2546)

การวัดความแข็งของยางในปัจจุบันนี้ส่วนใหญ่ใช้ International Hardness scale มีหน่วยเป็น International Rubber Hardness Degree(IRHD) โดยวัดความลึกของหัวเข็ม(indentor) ที่กดลงไปในงาน ภายใต้น้ำหนักที่มีค่าคงที่ ความลึกที่วัดได้จะถูกเปลี่ยนเป็นค่าความแข็ง โดยความลึกจะแปรผกผันกับความแข็ง สเกลจะเริ่มจาก 0 (identify soft) จนถึง 100 (identify hard) ความแข็งปกติอยู่ในช่วง 30-85 IRHD หัวเข็มซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร ภายใต้แรงกด 5.7 บาร์ จะเป็นการทดสอบทั่วไปกับชิ้นงานที่มีความหนาอย่างน้อย 4 มม. และอาจใช้ micro test ที่มีหัวเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.395 มม. ด้วยแรงกดเพียง 153 mN กับชิ้นทดสอบบางๆ

อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบโดยวิธีการกดนี้ยังขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงานทดสอบ ยกเว้นชิ้นทดสอบที่มีความหนามากกว่าความลึกของรอยกดมากๆ ดังนั้นจึงควรใช้ความหนาตามมาตรฐานที่กำหนดไว้

### 2.7.2.2 ความทนการขัดถู (Abrasion resistance)

เป็นกระบวนการทางไดนามิกส์ เพื่อหาความทนทานต่อการขัดถูที่ผิวของวัสดุ เครื่องมือที่ใช้เรียกว่า abrasion tester หรือ abrader ซึ่งมีหลายชนิดได้แก่ Du Pont abrader, DIN abrader, Akron abrader และ Pico abrader เป็นต้น เครื่องทดสอบเหล่านี้ขึ้นกับความสัมพันธ์ของการเคลื่อนไหวยาวและการขัดถู (abradent)

ค่าความทนการขัดถูจะเพิ่มขึ้นเมื่อยางมีความทนต่อแรงดึง ความทนต่อการฉีกขาด ความแข็งดึง และความแข็งเพิ่มขึ้น การใช้คาร์บอนแบล็ก ซึ่งเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรงจะช่วยปรับปรุงความทนทานต่อการขัดถูให้เพิ่มมากขึ้น มีผลิตภัณฑ์หลายชนิดที่ถูกใช้งานในลักษณะได้รับการขัดถูหรือการเสียดสี เช่น ผิวหน้ารถยนต์ที่สัมผัสผืนถนน (tired tread) พื้นและส้นรองเท้า (sole&heel)

### 2.7.2.3 สันฐานวิทยา

การศึกษาสันฐานวิทยาเป็นการทดสอบที่สำคัญอย่างหนึ่งสำหรับพอลิเมอร์ผสม (heterogeneous polymer blends) ซึ่งผลของสันฐานวิทยาสามารถบ่งชี้ถึงสมบัติเชิงกลของวัสดุนั้นๆได้ เช่น การผสมที่มีวัสดุที่มีอนุภาคใหญ่ทำให้มีการยึดติดกันของวัสดุต่ำ ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลต่ำ ปัจจัยที่ส่งผลต่อสันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม เช่น อัตราส่วนการผสม และสภาวะในการผสม เป็นต้น

## บทที่ 3

### การทดลอง

#### 3.1 วัสดุดิบและสารเคมีที่ใช้

##### 3.1.1 เศษยางพื้นรองเท้าแตะ (Shoe sole scrap)

- โครงสร้างของยางพื้นรองเท้าประกอบไปด้วยชั้น 3 ชั้น โดยชั้นบนและล่างสุดมีส่วนประกอบของยางธรรมชาติ (NR) 70% และเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์โคพอลิเมอร์ (EVA) 30% ส่วนชั้นกลางนั้นประกอบด้วย EVA 70% และ LDPE 30%
- มีลักษณะเป็นแผ่นยางที่มีความยืดหยุ่นสูง และมีช่องว่างที่เกิดจากการตัดยางออกไปเป็นพื้นรองเท้าดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ภาพแสดงเศษยางพื้นรองเท้าที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low-density polyethylene)

- เม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำของบริษัท เอสซีจี เคมิคอล จำกัด เกรดอัดรีด LD1902F/FA มีความหนาแน่น 0.919 กรัม/ลบ.ซม. และมีดัชนีการหลอมไหล (Melt flow index, MFI) 2.0 กรัม/10 นาที

##### 3.1.3 ผงเขม่าดำ (Carbon black)

- เป็นวัสดุกึ่งตัวนำ (Semiconductor Material) ทำหน้าที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำให้ยางเกิดความร้อนจากพลังงานไมโครเวฟ
- ในงานวิจัยนี้ใช้ผงเขม่าดำขนาดอนุภาคประมาณ 95 นาโนเมตรของบริษัท JJ-Degussa Chemical ซึ่งมีชื่อทางการค้าคือ Printex XE 2B

#### 3.1.4 เตตระเมทิล ไทยูแรม ไดซัลไฟด์(Tetramethy thiuram disulfide, TMTD)

- ทำหน้าที่เป็นสารรีเคลม(reclaiming agent) ของ Fluka จากบริษัท A.C.S Thailand

#### 3.1.5 เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้า

- เพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้ ซึ่งในการทดลองนี้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้าคือ Santoprene® 101-87 ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท โกลบอล คอนเน็คชั่นส์ จำกัด (มหาชน) โดยมีสมบัติต่างๆดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของ Santoprene® 101-87

| Properties                      | Value   |
|---------------------------------|---------|
| Density (g/cm <sup>3</sup> )    | 0.960   |
| Hardness, shore A               | 89      |
| Tensile strength at break (MPa) | 12.483  |
| Elongation at break (%)         | 487.2   |
| Tear strength (kN/m)            | 52.1    |
| Processing temperature (°C)     | 175-230 |

### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.2.1 ตู้ไมโครเวฟ

ทำหน้าที่ในการให้ความร้อนในกระบวนการดีวัลคาไนเซชันเศษยางพั่นรองเท้าซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ไมโครเวฟรุ่น LG MS-2643C 28LL 900 วัตต์ ที่มีความสามารถในการปรับเปลี่ยนพลังงาน 10 ระดับ



รูปที่ 3.2 ภาพแสดงตู้ไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลอง (Microwave oven)

### 3.2.2 เครื่องบดลึง (Ball mills)

ทำหน้าที่ในการผสมเศษยางพื้นรองเท้ากับผงเขม่าดำ เพื่อให้ผงเขม่าดำเคลือบบนชิ้นงานเศษยางพื้นรองเท้า ก่อนจะนำไปเข้าสู่กระบวนการดีวัลคาไนเซชัน



รูปที่ 3.3 ภาพแสดงเครื่องบดลูกกลิ้งหรือเครื่องบดลึง (Ball mills machine)

### 3.2.3 เครื่องบดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mills)

ทำหน้าที่ในการบดและผสมเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์กับสารรีเคลมและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่อัตราส่วนต่างๆ โดยเครื่องบดสองลูกกลิ้งที่ใช้เป็นของบริษัท LABTECH engineering รุ่น LRM-S-200



รูปที่ 3.4 เครื่องบดสองลูกกลิ้ง (LABTECH รุ่น LRM-S-200)

### 3.2.4 ตู้อบชิ้นงาน

ทำหน้าที่ให้ความร้อนเพื่อระเหยสารละลายออกจากชิ้นงาน



รูปที่ 3.5 ภาพแสดงตู้อบ

### 3.2.5 เครื่องบด (Crusher machine)

ทำหน้าที่บดเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ได้จากเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งให้มีขนาดเล็กพอที่จะนำไปผสมต่อโดยใช้เครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ได้ เครื่องบดเป็นของห้างหุ้นส่วนจำกัด ณ ภัทรนันท์



รูปที่ 3.6 เครื่องบด(crusher machine)

### 3.2.6 เครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่(Twin-screw extruder)

ทำหน้าที่ในการผสมและอัดรีดเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ให้มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ เพื่อนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานต่อไป ซึ่งเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ที่ใช้เป็นของบริษัท Thermo PRISM รุ่น TSE-16-TC



รูปที่ 3.7 เครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ (Thermo PRISM รุ่น TSE-16-TC)

### 3.2.7 เครื่องอัดแบบ(Compression molding)

ทำหน้าที่ในการขึ้นรูปชิ้นงานจากเม็ดเทอร์โมพลาสติกเพื่อนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และสัณฐานวิทยาต่อไป ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องอัดแบบ LABTECH รุ่น LP-S-50



รูปที่ 3.8 เครื่องอัดแบบ LABTECH รุ่น LP-S-50

### 3.2.8 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆ

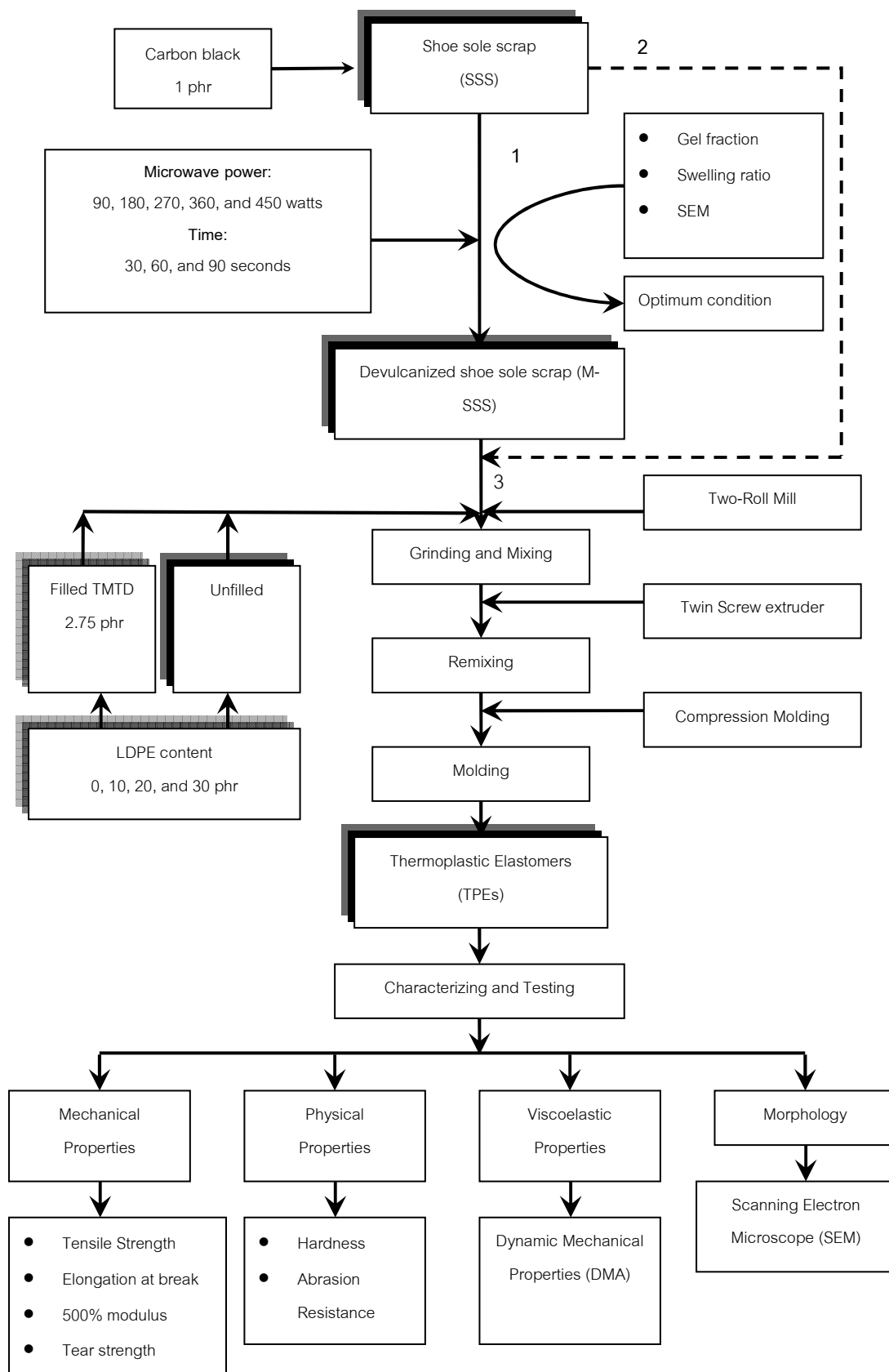
เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบสมบัติต่างๆ

| การทดสอบ/สมบัติ     | เครื่องมือที่ใช้ทดสอบ                               |
|---------------------|-----------------------------------------------------|
| ความทนแรงดึง        | Universal Testing Machine (LLOYD LR 10KN)           |
| ความทนการฉีกขาด     | Universal Testing Machine (Instron 446)             |
| ความแข็ง            | Hardness tester (IRHD)                              |
| ความทนการขัดถู      | Abrasion tester (Taber 5150)                        |
| สัณฐานวิทยา         | Scanning Electron Microscopy (JSM-4800 of JEOL Co.) |
| สมบัติวิสโคอีลาสติก | Dynamic Mechanical Analyzer NETZSCH                 |

### 3.3 วิธีการทดลอง

ขั้นตอนการทำการวิจัยโดยรวมในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำวิจัยโดยรวม

### 3.3.1 การตีโวลคาไนซ์เศษยางพื้รองเท้า

นำเศษยางพื้รองเท้าที่ไม่ผ่านและผ่านการผสมกับผงเขม่าดำ(1%ของน้ำหนักเศษยางพื้รองเท้า) โดยใช้เครื่องบดมิล(ball mills) เป็นเวลา 6 ชั่วโมงมาทำการตีโวลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้าและเวลาต่างๆกันดังแสดงในตารางที่ 3.3 โดยทำการเปรียบเทียบกับกรทดลองอีกส่วนหนึ่งซึ่งเศษยางพื้รองเท้าไม่ผ่านการตีโวลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟ

ตารางที่ 3.3 กำลังของไมโครเวฟ และเวลาในการตีโวลคาไนซ์เศษยางพื้รองเท้า

| Microwave power (watts) | Time (second) |
|-------------------------|---------------|
| 0                       | 0             |
| 180                     | 30            |
| 270                     | 30            |
| 360                     | 30            |
| 450                     | 30            |
| 180                     | 60            |
| 270                     | 60            |
| 360                     | 60            |
| 450                     | 60            |
| 180                     | 90            |
| 270                     | 90            |
| 360                     | 90            |
| 450                     | 90            |

### 3.3.2 การทดสอบหาปริมาณการเชื่อมขวางของเศษยางพื้รองเท้ารีเคลม

การทดสอบหาปริมาณการเชื่อมขวางของเศษยางพื้รองเท้าแต่ละโดยการวิเคราะห์อัตราส่วนการบวมตัว(Swelling ratio) และปริมาณสัดส่วเจล(Gel fraction) ของยาง ซึ่ง Tukachinsky และคณะ (A. Tukachinsky และคณะ, 1995) ได้ทำการศึกษาไว้พบว่าค่าความหนาแน่นในการเกิดเชื่อมขวางกับปริมาณสัดส่วเจล(%gel fraction) มีรูปแบบความสัมพันธ์ที่เฉพาะเจาะจง จึงสามารถนำค่าสัดส่วเจลมาวิเคราะห์กระบวนการรีเคลมได้ โดยอาศัยหลักการที่ว่าในระหว่างการตีโวลคาไนซ์ยาง โมเลกุลของยางจะเกิดการแตกสลายเป็นโมเลกุลเล็กลง ดังนั้นเมื่อนำยางที่ผ่านการตีโวลคาไนซ์มาสกัดด้วยตัวทำละลาย โมเลกุลที่เกิดการแตกสลายจะมีขนาดเล็กลงนี้จะถูกสกัดเข้าไปอยู่ในเฟสของตัวทำละลาย ส่งผลให้ปริมาณสัดส่วเจลในยางที่ผ่านการตีโวลคาไนซ์มีปริมาณลดลงด้วย

ในการทดลองหาปริมาณการเชื่อมขวางของเศษยางพื้รองเท้าแต่ละในงานวิจัยนี้ทำได้โดยการนำเศษยางพื้รองเท้า ณ สภาวะต่างๆ มาแช่ตัวทำละลายโทลูอินเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดำเนินการทดสอบ 3 ชิ้นงานโดยรายงานเป็นค่าเฉลี่ย ซึ่งข้อมูลที่ต้องบันทึกมีดังนี้

น้ำหนักยางก่อนดีวัลคาไนซ์ (W0)

น้ำหนักยางดีวัลคาไนซ์หลังแช่ตัวทำละลายโทลูอิน (W1)

และน้ำหนักยางดีวัลคาไนซ์หลังอบระเหยสารละลายออก (W2)

ซึ่งปริมาณสัดส่วนเจลและอัตราส่วนการบวมตัว มีสมการในการคำนวณดังนี้

$$\begin{aligned}\text{ปริมาณสัดส่วนเจล} &= \frac{W2}{W0} \times 100 && \text{สมการที่ 2} \\ &= (\text{น้ำหนักของยางรีเคลมหลังการสกัด/น้ำหนักของยางรีเคลมเริ่มต้น}) \times 100\end{aligned}$$

$$\text{อัตราส่วนการบวมตัว} = \frac{W1 - W0}{W0} \quad \text{สมการที่ 3}$$

### 3.3.3 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

นำเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านขั้นตอนการดีวัลคาไนซ์มาบดให้เป็นชิ้นเล็กๆด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง(two-roll mills) ที่อุณหภูมิ 60°C อัตราส่วนความเสียดทาน (friction ratio) 1:2 เป็นเวลา 40 นาที จากนั้นผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่อัตราส่วนต่างๆ (ดังตารางที่ 3.4) บดผสมต่อเป็นเวลา 10 นาที จนเศษยางพื้นรองเท้าและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่มีการเติมสารรีเคลม เตตระเมทิลไทยูเรมไดซัลไฟด์ในปริมาณ 2.75 phr นั้นผสมพร้อมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ นำแผ่นเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ได้ไปบดด้วยเครื่องบด(crusher) เพื่อให้มีขนาดเล็กลง

จากนั้นนำส่วนผสมทั้งหมดมาผ่านการผสมและขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ที่มีขนาดความยาว 30 ซม. และเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 ซม. ความเร็วสกรู 25-30 rpm อุณหภูมิของบาร์เรล(barrel temperature) จากส่วนที่ใส่สารจนถึงส่วนที่เป็นหัวรีด (feed zone ถึง die zone) คือ 170 175 185°C ตามลำดับ ภายหลังจากการผสมจะได้เป็นเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ (pallets)

ขั้นตอนสุดท้ายคือการนำเม็ดเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์มาขึ้นรูปเป็นแผ่นที่มีขนาด 150×150×2 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องอัดแบบ (Compression molding) ที่อุณหภูมิ 180°C แรงดัน 100 MPa เพื่อเตรียมเป็นชิ้นทดสอบต่างๆโดยมีอัตราส่วนของส่วนผสมดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนการผสมของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์

| พลังงานไมโครเวฟ                                                         | สารรีเคลม               | SSS | LDPE |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-----|------|
| เศษยางที่ไม่เกิดการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟ<br>(non-devulcanized SSS)    | ไม่ใส่สารรีเคลม         | 100 | 0    |
|                                                                         |                         | 90  | 10   |
|                                                                         |                         | 80  | 20   |
|                                                                         |                         | 70  | 30   |
|                                                                         | ใส่สารรีเคลม (2.75 phr) | 100 | 0    |
|                                                                         |                         | 90  | 10   |
|                                                                         |                         | 80  | 20   |
|                                                                         |                         | 70  | 30   |
| เศษยางที่เกิดการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟ<br>(Microwave-devulcanized SSS) | ไม่ใส่สารรีเคลม         | 100 | 0    |
|                                                                         |                         | 90  | 10   |
|                                                                         |                         | 80  | 20   |
|                                                                         |                         | 70  | 30   |
|                                                                         | ใส่สารรีเคลม (2.75 phr) | 100 | 0    |
|                                                                         |                         | 90  | 10   |
|                                                                         |                         | 80  | 20   |
|                                                                         |                         | 70  | 30   |

### 3.4 การเปรียบเทียบเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้กับเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ในทางการค้า

ทำการเปรียบเทียบสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้กับเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ในทางการค้า Santoprene® 101-87 ที่มีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลม โดยการขึ้นรูป Santoprene® 101-87 ที่อยู่ในรูปของเม็ดด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 360 วินาที แต่เนื่องจากปริมาณของตัวอย่างที่จำกัดทำให้สามารถทดสอบได้เพียงวิธีการทดสอบละ 1 ตัวอย่างเท่านั้น

### 3.5 การวิเคราะห์และทดสอบเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

#### 3.5.1 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

##### 3.5.1.1 สมบัติความทนแรงดึง (Tensile properties)

ทดสอบความทนแรงดึงโดยใช้เครื่อง Universal testing machine LLOYD LR 100K ตามมาตรฐาน ISO 37 โดยตัดชิ้นงานเป็นรูปดัมเบลล์ ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ระยะห่างระหว่างเกา 65 มิลลิเมตร อัตราเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตร/นาที และน้ำหนักโหลดเซลล์ (load cell) 1 kN ทดสอบชิ้นงาน 5 ชิ้น เพื่อหาค่าเฉลี่ย

##### 3.5.1.2 สมบัติความทนการฉีกขาด (Tear strength)

ทดสอบสมบัติความทนการฉีกขาดด้วยเครื่อง Universal testing machine Instron 446 โดยใช้ความเร็วในการฉีก 500 มิลลิเมตร/นาที ตามมาตรฐาน ISO 34 ทดสอบชิ้นงาน 5 ชิ้น เพื่อหาค่าเฉลี่ย

#### 3.5.2 สมบัติทางกายภาพของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

##### 3.5.2.1 ความแข็ง (hardness)

ทดสอบความแข็งตามมาตรฐาน ISO 48 โดยใช้ The international rubber hardness degrees (IRHD) ทำการทดสอบชิ้นงานที่มีความหนา 4 มิลลิเมตร จำนวน 5 ชิ้น โดยผลการทดลองเลือกจากชิ้นงานที่มีความแข็งลำดับที่ 3 หรือค่ากลางเป็นค่าความแข็งของชิ้นตัวอย่าง

##### 3.5.2.2 ความทนการขัดถู (abrasion resistance)

ทดสอบความทนการขัดถูตามมาตรฐาน ASTM D4060 โดยใช้เครื่องมือ Taber model 5150 ตัดชิ้นงานเป็นรูปวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร น้ำหนักและจำนวนรอบที่ใช้ขัดถู 500 กรัม และ 1,000 รอบ ทดสอบ 3 ชิ้น เพื่อหาค่าเฉลี่ย

##### 3.5.2.3 สมบัติวิสโคอิลาสติก (viscoelastic properties)

ทดสอบสมบัติวิสโคอิลาสติกด้วยเครื่องไดนามิกแมคคานิคอลแอนาไลเซอร์ (Dynamic mechanical analyzer: DMA) ด้วย dual cantilever ความถี่ 1 Hz. ขนาดชิ้นงาน 5×10×2 มิลลิเมตร ทดสอบภายใต้บรรยากาศที่เป็นไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -100 ถึง 100°C โดยมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3°C/นาที

#### 3.5.2.4 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (morphology)

วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยนำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความทนแรงดึงมาตรวจสอบและวิเคราะห์ทดสอบ ด้วยเครื่อง scanning electron microscope (SEM) รุ่น JEOL JSM-4800) ที่ 15 kV โดยการเคลือบชิ้นงานด้วยทองคำก่อนนำไปทดสอบ

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 ค่าสัดส่วนเจลและอัตราส่วนการบวมตัวของเศษยางพื้นรองเท้ารีเคลมด้วยไมโครเวฟ

ปริมาณการเชื่อมขวางของเศษยางพื้นรองเท้าสามารถวิเคราะห์ได้จากค่าสัดส่วนเจล กล่าวคือ ปริมาณการเชื่อมขวางของเศษยางพื้นรองเท้าลดลงเมื่อค่าสัดส่วนเจลมีค่าลดลง ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ คาดว่ากำลังไมโครเวฟจะสามารถทำให้พันธะเชื่อมขวางของยางเกิดการแตกหักหรือขาดออกจากกันจนมีขนาดของสายโซ่สั้นลง เพื่อเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ปริมาณการเชื่อมขวางของเศษยางพื้นรองเท้ามีค่าต่ำสุด นั่นคือมีค่าสัดส่วนเจลต่ำสุดและอัตราส่วนการบวมตัวสูงที่สุดเนื่องจากเกิดการแตกออกของพันธะที่เชื่อมขวางมากที่สุด เมื่อความยาวสายโซ่สั้นลงส่งผลให้ความสามารถในการนำเศษยางพื้นรองเท้ามาผ่านกระบวนการผลิตได้ง่ายขึ้น แต่จากตารางที่ 4.1 แสดงผลสัดส่วนเจลและอัตราส่วนการบวมตัวของการดีวัลคาไนซ์เศษยางพื้นรองเท้ารีเคลมด้วยไมโครเวฟ พบว่าปริมาณการเชื่อมขวางของเศษยางพื้นรองเท้าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใดเมื่อได้รับกำลังไมโครเวฟ เนื่องจากเศษยางพื้นรองเท้ามีความเป็นขั้วต่ำ จึงไม่สามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟแล้วก่อให้เกิดความร้อนขึ้นเพื่อทำให้การเชื่อมขวางแตกหรือขาดออกจากกันได้

ดังนั้นจึงปรับปรุงความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟโดยการผสมหรือเคลือบพื้นผิวของเศษยางพื้นรองเท้าด้วยสารที่มีความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ นั่นคือ ผงเขม่าดำ (Carbon black) โดยผสมในปริมาณ 1 % ของน้ำหนักของเศษยางพื้นรองเท้า ด้วยเครื่องบดบอลมิล ผสมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

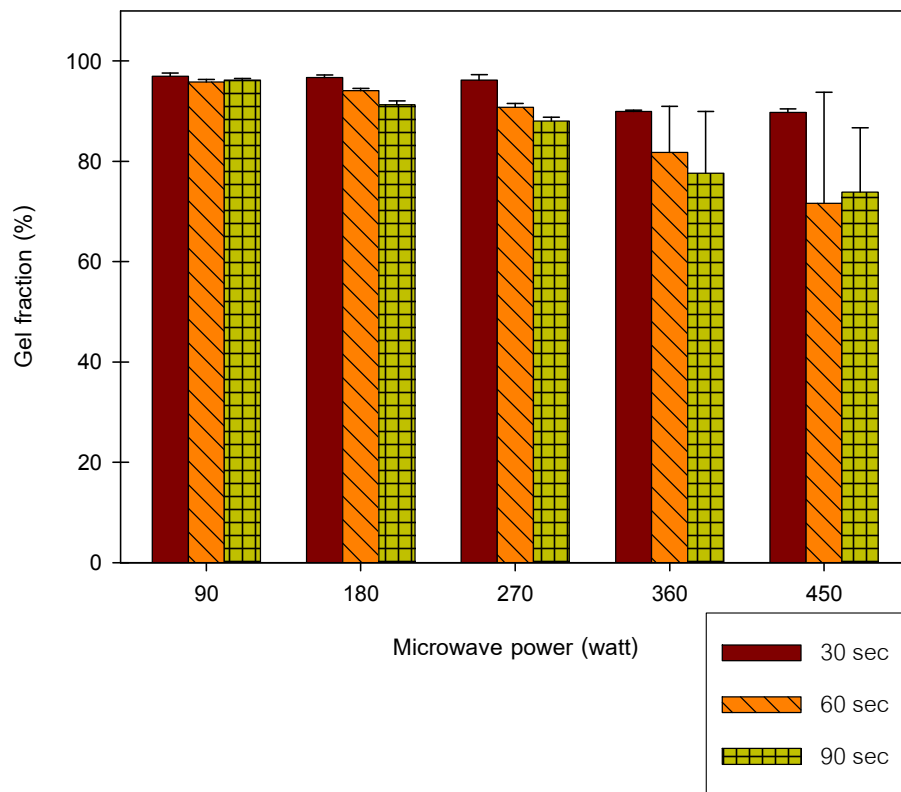
จากรูปที่ 4.1 แสดงผลของค่าสัดส่วนเจลของเศษยางพื้นรองเท้าหลังจากผสมหรือเคลือบผงเขม่าดำที่กำลังไมโครเวฟและเวลาต่างๆ พบว่าจากค่าสัดส่วนเจลปริมาณการเชื่อมขวางของเศษยางพื้นรองเท้าลดลงตามกำลังไมโครเวฟและเวลาที่เพิ่มขึ้น สภาวะกำลังไมโครเวฟและเวลาที่ทำให้ปริมาณการเชื่อมขวางของเศษยางพื้นรองเท้าต่ำอยู่ที่กำลังไมโครเวฟ 450 วัตต์เป็นเวลา 60 หรือ 90 วินาที และ 360 วัตต์ 90 วินาที แต่ที่ 3 สภาวะนี้เศษยางพื้นรองเท้าไหม้จึงทำให้มีค่าสัดส่วนเจลต่ำลง ส่งผลทำให้ไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นสภาวะในการดีวัลคาไนซ์เศษยางพื้นรองเท้า ฉะนั้นสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าสัดส่วนเจลมีค่าต่ำและไม่ไหม้คือที่สภาวะกำลังไมโครเวฟ 360 วัตต์ ใช้เวลา 60 วินาที

จากรูปที่ 4.2 อัตราส่วนการบวมตัวของเศษยางพื้นรองเท้าหลังจากผสมหรือเคลือบผงเขม่าดำที่กำลังไมโครเวฟและเวลาต่างๆ ผลอันไม่คาดคิดของค่าอัตราส่วนการบวมตัวคือเมื่อกำลังไมโครเวฟและเวลามากขึ้นอัตราส่วนการบวมตัวของเศษยางพื้นรองเท้าลดลง ซึ่งโดยทั่วไปเมื่อปริมาณการเชื่อมขวางลดลง อัตราการบวมตัวของเศษยางพื้นรองเท้าควรมีค่ามากขึ้น ผู้วิจัยตั้งข้อสังเกตว่าอาจเกิดจากการไหม้ของชิ้นงาน

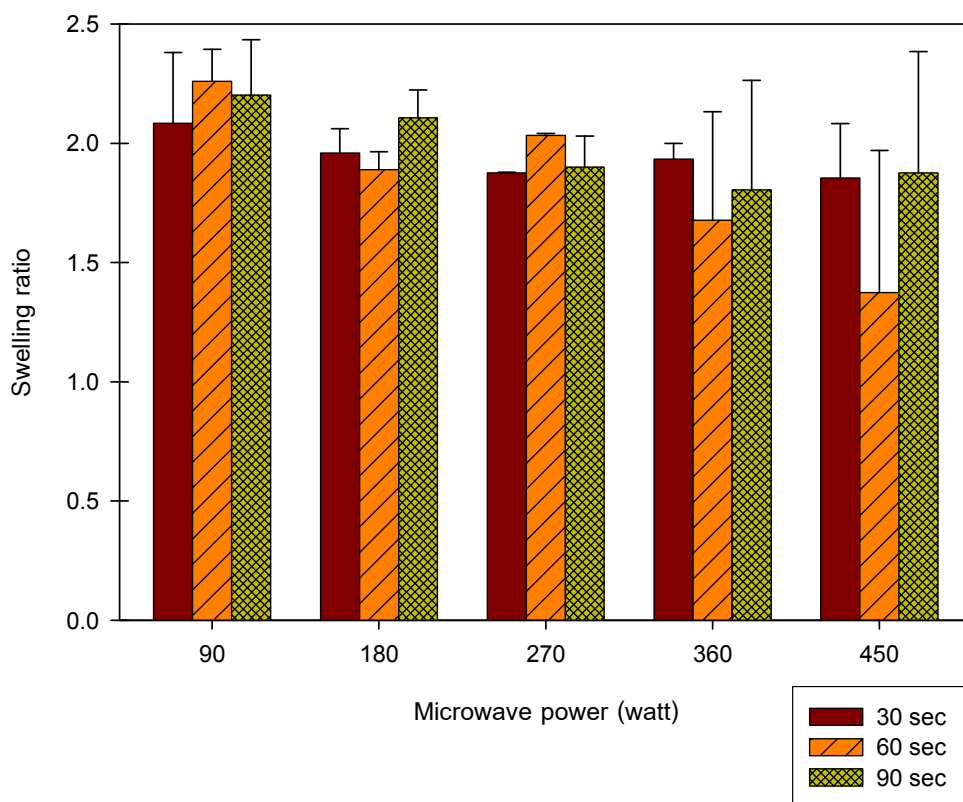
ทำให้น้ำหนักของเศษยางพื้นรองเท้ารีเคลมด้วยไมโครเวฟหลังแช่สารละลายมีค่าลดลง จึงส่งผลทำให้ อัตราส่วนการบวมตัวลดลงได้

**ตารางที่ 4.1** แสดงค่าสัดส่วนเจลและอัตราส่วนการบวมตัวของเศษยางพื้นรองเท้าที่ไม่ผสมกับผงเขม่าดำ

| Microwave power (watts) | Time (min) | % Gel fraction | Swelling ratio |
|-------------------------|------------|----------------|----------------|
| 0                       | 0          | 96.56          | 2.67           |
| 180                     | 1          | 96.00          | 2.67           |
| 270                     | 1          | 97.06          | 2.09           |
| 360                     | 1          | 95.93          | 2.23           |
| 450                     | 1          | 97.04          | 2.38           |
| 540                     | 1          | 96.58          | 1.56           |
| 630                     | 1          | 96.64          | 1.71           |
| 720                     | 1          | 96.30          | 2.55           |
| 180                     | 3          | 96.50          | 2.54           |
| 270                     | 3          | 95.89          | 2.77           |
| 360                     | 3          | 96.42          | 2.66           |
| 450                     | 3          | 96.93          | 2.07           |
| 540                     | 3          | 96.26          | 1.66           |
| 630                     | 3          | 94.66          | 2.47           |
| 720                     | 3          | 96.69          | 2.32           |
| 180                     | 5          | 94.99          | 3.03           |
| 270                     | 5          | 96.17          | 2.64           |
| 360                     | 5          | 95.79          | 2.55           |
| 450                     | 5          | 94.41          | 2.75           |
| 540                     | 5          | 97.19          | 3.29           |
| 630                     | 5          | 95.95          | 2.49           |
| 720                     | 5          | 93.88          | 3.46           |
| 180                     | 7          | 94.66          | 2.47           |
| 270                     | 7          | 95.76          | 2.60           |
| 360                     | 7          | 94.07          | 2.58           |
| 450                     | 7          | 95.62          | 3.00           |
| 540                     | 7          | 95.94          | 2.44           |
| 630                     | 7          | 96.93          | 2.07           |
| 720                     | 7          | 93.96          | 2.85           |



รูปที่ 4.1 ผลของพลังงานไมโครเวฟที่มีต่อค่าสัดส่วนเจลของเศษยางพ่นรองเท้าที่ผ่านการผสมหรือเคลือบ  
รีเคลมด้วยไมโครเวฟที่กำลังไมโครเวฟและเวลาต่างๆ



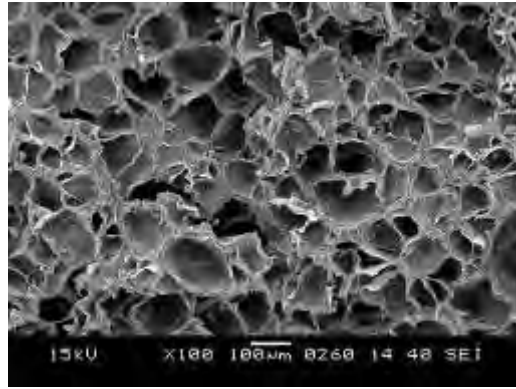
รูปที่ 4.2 ผลของพลังงานไมโครเวฟที่มีผลต่ออัตราการบวมตัวของเศษยางพ่นรองเท้าที่ผ่านการผสมหรือ  
เคลือบรีเคลมด้วยไมโครเวฟที่กำลังไมโครเวฟและเวลาต่างๆ

## 4.2 สันฐานวิทยาของเศษยางพื้นรองเท้ารีเคลมด้วยไมโครเวฟ

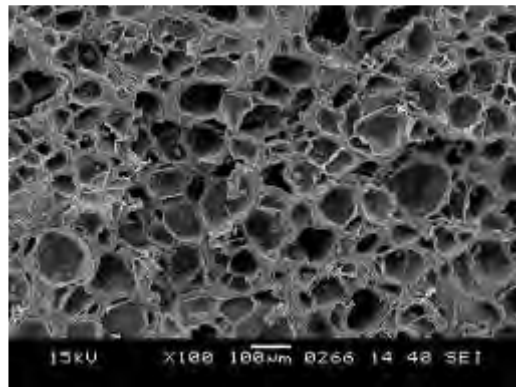
การศึกษาสันฐานวิทยาของเศษยางพื้นรองเท้ารีเคลมด้วยไมโครเวฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่า จากรูปที่ 4.3 ภาพแสดงการเปรียบเทียบสันฐานวิทยาของเศษยางพื้นรองเท้าก่อนและหลังรีเคลมด้วยไมโครเวฟที่กำลังไมโครเวฟ 270 และ 360 วัตต์ โดยใช้เวลาในการดีวัลคาไนซ์ 60 วินาที เพื่อสังเกตผลของกำลังไมโครเวฟที่มีต่อสันฐานวิทยาของเศษยางพื้นรองเท้า จากรูปที่ 4.3a โครงสร้างของเศษยางพื้นรองเท้าก่อนรีเคลมมีลักษณะเป็นเซลล์คล้ายโฟม ที่ขอบเซลล์มีลักษณะการขาดคล้ายริบปิ้นซึ่งเป็นสมบัติการขาดแบบพลาสติก คือมีการยืดดึงก่อนจึงขาด รูปที่ 4.3b โครงสร้างของเศษยางพื้นรองเท้าหลังรีเคลมด้วยกำลังไมโครเวฟ 270 วัตต์ 60 วินาที มีลักษณะของเซลล์เล็กลงจากเซลล์ของเศษยางพื้นรองเท้าก่อนรีเคลมเล็กน้อยซึ่งอาจเกิดจากการหลอมของเทอร์โมพลาสติกที่เป็นส่วนประกอบของเศษยางพื้นรองเท้า (พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและเอทิลีนไวนิลอะซีเตตโคพอลิเมอร์) และลักษณะการขาดของขอบเซลล์มีลักษณะขาดแบบริบปิ้นน้อยกว่ายางก่อนรีเคลม รูปที่ 4.3c โครงสร้างของเศษยางพื้นรองเท้าหลังรีเคลมด้วยกำลังไมโครเวฟ 360 วัตต์ 60 วินาที มีลักษณะของเซลล์เล็กลงมากกว่ารูปที่ 4.3(a) และ (b) อีกทั้งยังพบอนุภาคเล็กๆกระจายอยู่ในเซลล์ ซึ่งเกิดจากความร้อนที่ได้จากไมโครเวฟทำให้เซลล์บางส่วนเกิดการเสียรูปหรือถูกย่อยเกิดเป็นโมเลกุลเล็กขึ้น

จากรูปที่ 4.4 แสดงภาพสันฐานวิทยาของเศษยางพื้นรองเท้าก่อนและหลังรีเคลมด้วยไมโครเวฟที่กำลังไมโครเวฟ 360 วัตต์ที่เวลา 30 60 90 วินาที เพื่อศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการให้กำลังไมโครเวฟต่อสันฐานวิทยา ผลการทดลองพบว่าผลของเวลาต่อลักษณะทางสันฐานวิทยาของเศษยางให้ผลในทำนองเดียวกันกับผลของกำลังไมโครเวฟ กล่าวคือเมื่อใช้เวลาในการดีวัลคาไนซ์ยางด้วยไมโครเวฟมากขึ้น เซลล์ของเศษยางพื้นรองเท้ามีขนาดลดลง รวมทั้งมีปริมาณของโมเลกุลที่เกิดจากการเสียรูปมากขึ้นเมื่อใช้เวลามากขึ้น

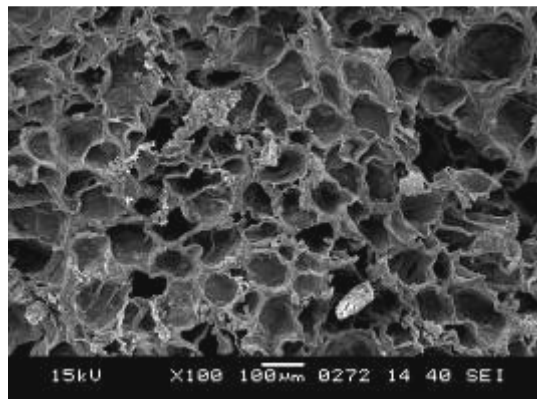
จากผลของสันฐานวิทยาพบว่าสอดคล้องกับผลของค่าสัดส่วนเจลที่ได้กล่าวมาข้างต้น นั่นคือเมื่อปริมาณการเชื่อมขวางของเศษยางพื้นรองเท้าลดลง ค่าสัดส่วนเจลลดลง และจากผลของสันฐานวิทยาแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างที่มีผลมาจากไมโครเวฟที่สภาวะต่างๆ เมื่อกำลังไมโครเวฟและเวลามากขึ้นสันฐานวิทยาแสดงถึงการเกิดการเสียรูปและเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างอย่างชัดเจน



(a)

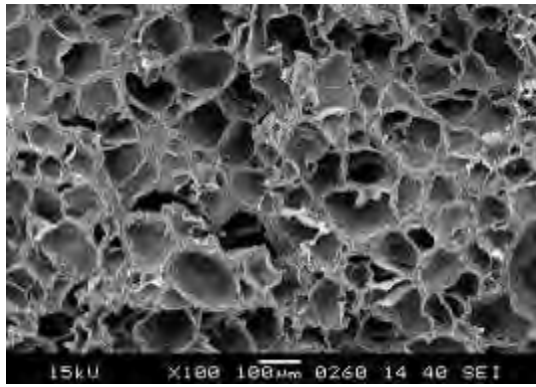


(b)

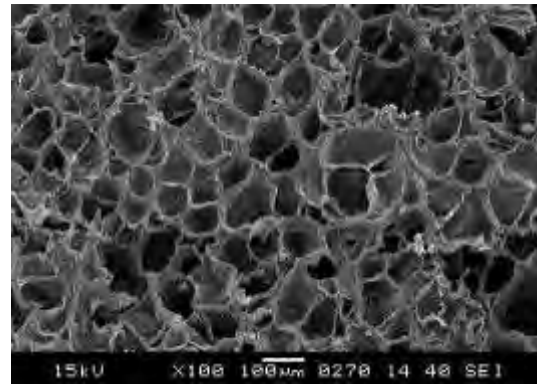


(c)

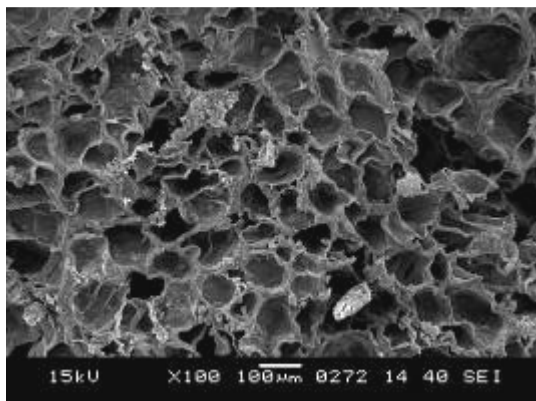
**รูปที่ 4.3** สัณฐานวิทยาของเศษยางพื้นรองเท้าแตะ (a) ไม่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟ (b) ผ่านการดีวัลคาไนซ์ที่สภาวะ 270 วัตต์ 60 วินาที (c) ผ่านการดีวัลคาไนซ์ที่สภาวะ 360 วัตต์ 60 วินาที



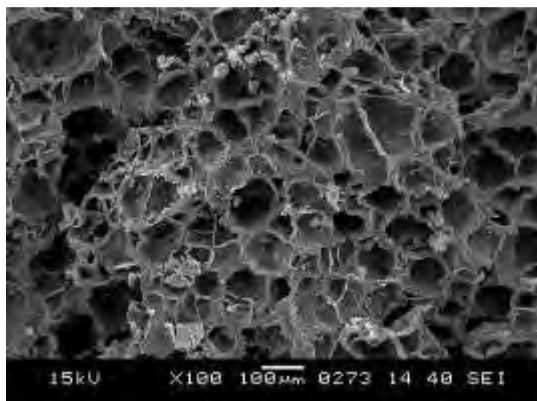
(a)



(b)



(c)



(d)

**รูปที่ 4.4** สัณฐานวิทยาของเศษยางพื้นรองเท้าแตะ (a) ไม่ผ่านการดีคาร์บอนไนซ์ด้วยไมโครเวฟ (b) ผ่านการดีคาร์บอนไนซ์ด้วยไมโครเวฟที่สภาวะ 360 วัตต์ 30 วินาที (c) ผ่านการดีคาร์บอนไนซ์ด้วยไมโครเวฟที่สภาวะ 360 วัตต์ 60 วินาที และ (d) ผ่านการดีคาร์บอนไนซ์ด้วยไมโครเวฟที่สภาวะ 360 วัตต์ 90 วินาที

#### 4.3 สมบัติเชิงกล(Mechanical properties)

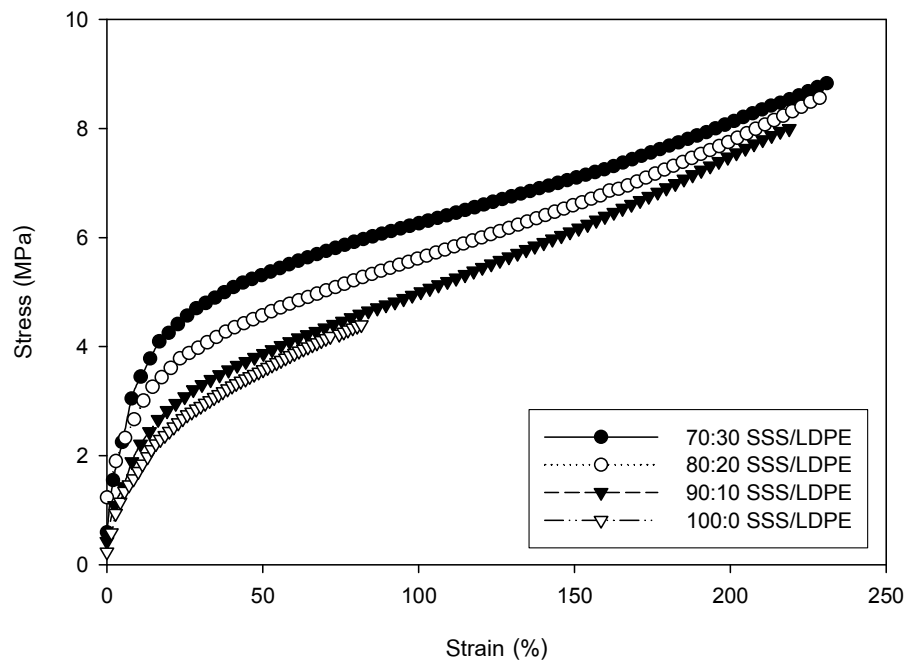
##### 4.3.1 ความทนแรงดึง (Tensile strength)

ภายหลังการขึ้นรูปและนำชิ้นงานรูปดัมเบลที่ได้มาทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง Universal testing machine ได้ผลการทดลองดังนี้

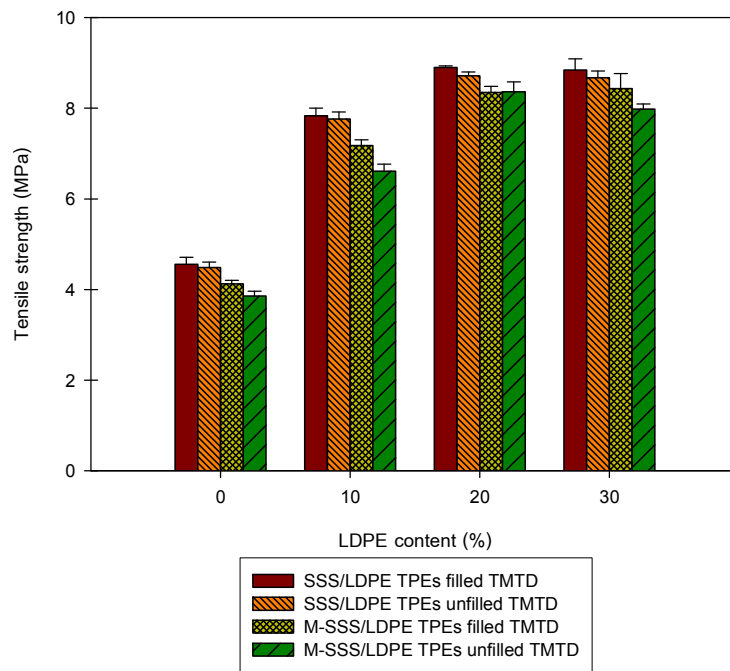
##### 4.3.1.1 ผลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

จากกราฟรูปที่ 4.5 แสดงค่าความเค้นและความเครียดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วนของเศษยางพื้นรองเท้าต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเท่ากับ 100:0 90:10 80:20 และ 70:30 พบว่าเมื่ออัตราส่วนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(LDPE) มากขึ้นค่าความเครียดและความเค้นสูงขึ้นตามลำดับ เนื่องจาก LDPE มีสมบัติความเหนียวและยืดตัวดี ดังนั้นเมื่อผสม LDPE ในอัตราส่วนที่มากขึ้นทำให้ TPE ที่เตรียมได้มีความเหนียวและยืดหยุ่นมากขึ้น นอกจากนี้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำยังทำหน้าที่เป็นตัวประสานระหว่างอนุภาคของเศษยางพื้นรองเท้า ดังนั้นสมบัติของเทอร์

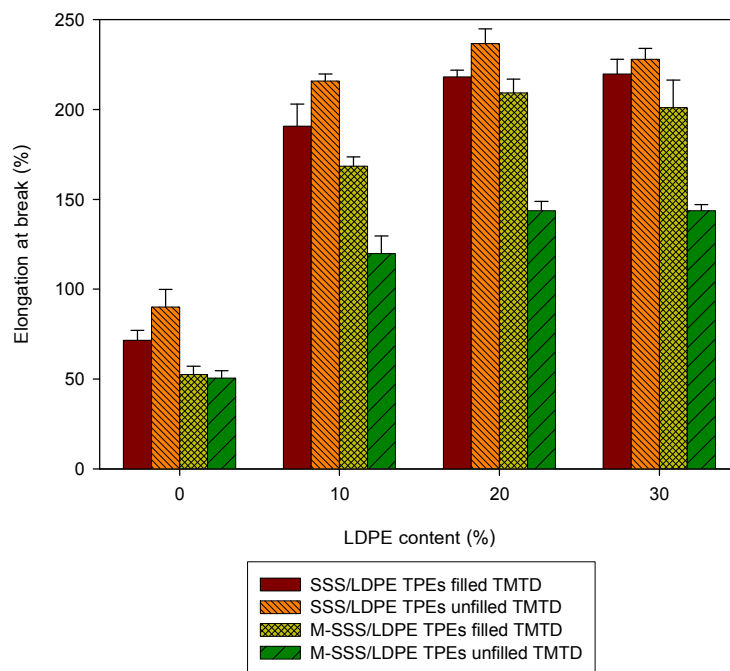
โพลอสติกอิลาสโทเมอร์ที่ได้จึงมีสมบัติใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมากขึ้นไปด้วย ซึ่งผลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำต่อสมบัติความทนแรงดึง (tensile strength), การยืดดึง ณ จุดขาด (elongation at break) และมอดุลัส (500% modulus) ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์นี้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 4.6 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ



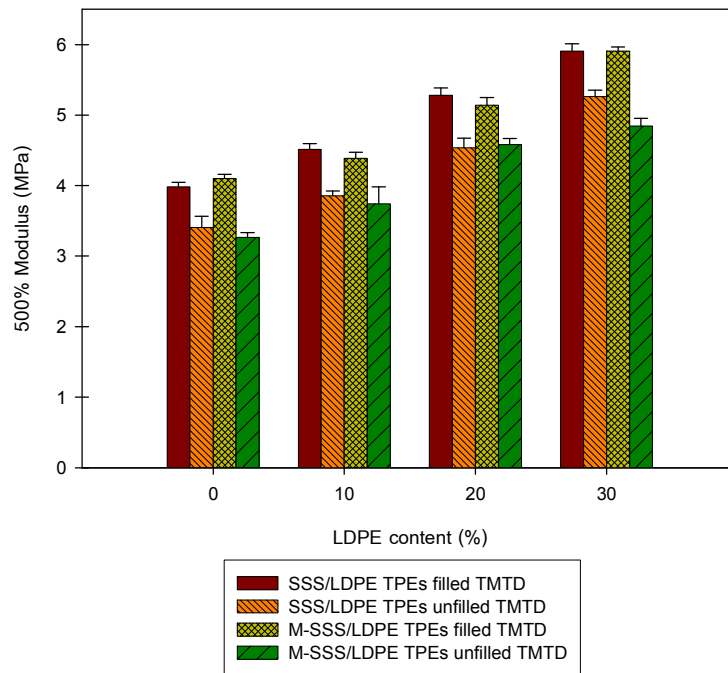
รูปที่4.5ความเค้น-ความเครียดของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆระหว่างเศษยางพารา (SSS) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(LDPE)



รูปที่ 4.6 ผลของพลังงานไมโครเวฟและเตตระเมทิลไทูแรมไดซัลไฟด์(reclaiming agent) ต่อค่าความทนแรงดึง(tensile strength) ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่อัตราส่วนต่างๆ



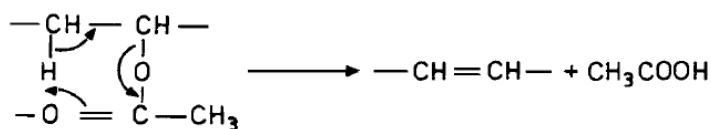
รูปที่ 4.7 ผลของพลังงานไมโครเวฟและเตตระเมทิลไทูแรมไดซัลไฟด์(reclaiming agent) ต่อการยืดถึง ณ จุดขาด(Elongation at break) ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่อัตราส่วนต่างๆ



**รูปที่ 4.8** ผลของพลังงานไมโครเวฟและเตตระเมทิลไทูแรมไดซัลไฟด์(reclaiming agent) ต่อ 500%มอดุลัส(500%modulus) ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่อัตราส่วนต่างๆ

#### 4.3.1.2 ผลของพลังงานไมโครเวฟ

ผลของพลังงานไมโครเวฟที่มีต่อค่า tensile strength, elongation at break และ 500%modulus ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์แสดงดังรูปที่ 4.6 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ ผลการทดลอง พบว่าพลังงานไมโครเวฟมีผลต่อค่า tensile strength และ elongation at break ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ กล่าวคือเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพั่นรองเท้าที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(M-SSS/LDPE)มีค่า tensile strength และ elongation at break ต่ำกว่าเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพั่นรองเท้าและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(SSS/LDPE) เนื่องจากความร้อนจากพลังงานไมโครเวฟทำให้สายโซ่โมเลกุลของเอทิลีนไวนิลอะซิเตต (polyethylene vinylacetate: EVA) ที่เป็นส่วนประกอบของเศษยางพั่นรองเท้าเกิดการแตกหักที่สายโซ่หลักทำให้น้ำหนักโมเลกุลต่ำลงหรือมีปริมาณการเชื่อมขวางลดลง ซึ่งการสลายตัวนี้เกิดจากการที่ส่วนของไวนิลอะซิเตตในสายโซ่โมเลกุลเกิดการปลดปล่อยกรดแอซิดิกออกมาและเกิดเป็นพันธะคู่ขึ้นบนสายโซ่โมเลกุลดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งพันธะคู่นี้เมื่อได้รับอุณหภูมิที่สูงขึ้นก็จะเกิดการสลายตัวได้ต่อไป ซึ่งทำให้ค่า tensile strength และ elongation at break ซึ่งเป็นค่าที่มีผลมาจากขนาดโมเลกุลของพอลิเมอร์มีค่าที่ลดต่ำลงตามไปด้วย อย่างไรก็ตามพลังงานไมโครเวฟไม่มีผลหรือมีผลน้อยมากต่อค่ามอดุลัส (500%modulus)



รูปที่ 4.9 การสลายตัวของ EVA/NR โดยการกำจัดกรดแอซิดิก และเกิดเป็นพันธะคู่

#### 4.3.1.3 ผลของเตตระเมทิลไทูรัมไดซัลไฟด์

ผลของเตตระเมทิลไทูรัมไดซัลไฟด์ที่มีต่อค่า tensile strength, elongation at break และ 500%modulus ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์แสดงดังรูปที่ 4.6 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าสารรีเคลมหรือเตตระเมทิลไทูรัมไดซัลไฟด์(tetramethyl thiuram disulfide:TMTD) ทำให้ค่า tensile strength และ 500%elastic modulus ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้ากับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (SSS/LDPE) มีค่าเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะค่ามอดุลัสจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด(รูปที่ 4.8) ซึ่งมีผลมาจากปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง (crosslinking reaction) ที่เกิดจากการแตกตัวของ TMTD ได้เป็นอนุมูลอิสระซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 กล่าวคือระหว่างผสมสารรีเคลมหรือ TMTD กับเศษยางพื้นรองเท้าด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง แรงเฉือนเชิงกลและอุณหภูมิที่สูงในการบดผสมทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางและโมเลกุลของ TMTD เกิดการแตกหักขึ้นแบบสุ่ม ซึ่ง TMTD จะเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระของไทโอคาร์บาเมต (thiocarbamate radicals) ดังรูปที่ 4.10 A ในขณะที่สายโซ่โมเลกุลของยางจะเกิดการแตกหักหรือขาดออกได้ 2 รูปแบบคือ เกิดการขาดออกของโมเลกุล(polymer chain breakdown(I)) หรือเกิดการขาดออกของพันธะเชื่อมขวาง(crosslink bond breakage(II))

การเกิดเรโซแนนซ์ของไทูรัมไดซัลไฟด์มีเสถียรภาพที่ต่ำ ดังนั้นโมเลกุลจึงมีการจัดเรียงตัวให้อยู่ในรูปของอนุมูลอิสระของไทโอคาร์บาเมต ซึ่งอนุมูลอิสระสามารถทำปฏิกิริยากับส่วนที่เป็นอนุมูลอิสระบนสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ 3 แบบ(III,IV และ V) ดังแสดงในรูปที่ 4.10 B ผลของการเกิดปฏิกิริยาทำให้น้ำหนักโมเลกุลของเศษยางพื้นรองเท้าลดลงอย่างไรก็ตามอนุมูลอิสระบนสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์อาจเกิดการทำปฏิกิริยากันเองทำให้น้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นได้

ในทำนองเดียวกันพบว่าสารรีเคลมหรือเตตระเมทิลไทูรัมไดซัลไฟด์(tetramethyl thiuram disulfide:TMTD) มีผลทำให้ค่า tensile strength และ 500%modulus รวมทั้งค่าelongation at break ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (M-SSS/LDPE) มีค่ามากกว่า M-SSS/LDPE TPEs ที่ไม่ผสมสารรีเคลม ทั้งนี้อาจเกิดจากพลังงานไมโครเวฟทำให้สายโซ่โมเลกุลที่เกิดการเชื่อมขวางของเศษยางพื้นรองเท้าขาดออก ทำให้เกิดตำแหน่งที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารรีเคลมได้มากขึ้น ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า

สำหรับค่า elongation at break พบว่าสารรีเคลมมีผลทำให้ค่า elongation at break ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านและไม่ผ่านการตีวัลไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟมีแนวโน้มต่างกัน กล่าวคือค่า elongation at break ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางที่ไม่ผ่านการตีวัลไนซ์ด้วยไมโครเวฟและผสมสารรีเคลม(SSS/LDPE TPEs filled TMTD) มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางที่ไม่ผ่านการตีวัลไนซ์ด้วยไมโครเวฟและไม่ผสมสารรีเคลม(SSS/LDPE TPEs unfilled TMTD) เนื่องจากสารรีเคลมทำให้พันธะเชื่อมขวางของเศษยางพื้นรองเท้าเกิดการแตกขาด ส่งผลให้ค่า elongation at break ต่ำลง

และดังที่ได้กล่าวไปแล้วในกรณีของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางที่ผ่านการตีวัลไนซ์ด้วยไมโครเวฟและผสมสารรีเคลม(M-SSS/LDPE TPEs filled TMTD) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางที่ผ่านการตีวัลไนซ์ด้วยไมโครเวฟและไม่ผสมสารรีเคลม(M-SSS/LDPE TPEs unfilled TMTD)เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟและสารรีเคลมทำให้สายโซ่โมเลกุลและพันธะเชื่อมขวางของเศษยางพื้นรองเท้าเกิดการแตกขาดขึ้น ก่อให้เกิดส่วนที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นและสารรีเคลมสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาก่อให้เกิดพันธะเชื่อมขวางขึ้นบางส่วนได้ ดังนั้นค่า elongation at break ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางที่ผ่านการตีวัลไนซ์ด้วยไมโครเวฟและผสมสารรีเคลม(M-SSS/LDPE TPEs filled TMTD) จึงมีค่ามากขึ้น

#### 4.3.2 ความทนต่อการฉีกขาด

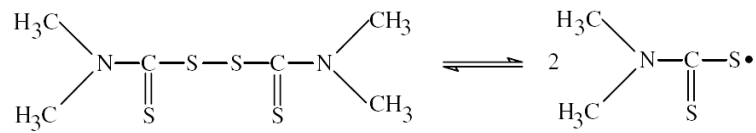
ความทนต่อการฉีกขาดของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์แสดงได้ดังตารางที่ 4.2 พบว่าความทนต่อการฉีกขาดของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของ LDPE มากขึ้น เนื่องจาก LDPE มีความเหนียวและยืดหยุ่น ประกอบกับในเศษยางพื้นรองเท้าก็มี LDPE เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยจึงทำให้เศษยางและ LDPE มีความเข้ากันได้ค่อนข้างดี ดังนั้นเมื่อผสม LDPE กับเศษยางพื้นรองเท้าในอัตราส่วนมากขึ้น จึงทำให้ความทนต่อการฉีกขาดของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของเศษยางที่ผ่านการตีวัลไนซ์ด้วยไมโครเวฟนั้นพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ LDPE ขึ้นถึง 30%wt ความทนต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้นถึง 88.75% เมื่อเทียบกับเศษยางที่ไม่มี LDPE

สำหรับพลังงานไมโครเวฟนั้นพบว่าเมื่อผลต่อความทนต่อการฉีกขาดของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วน LDPE เท่ากับ 0 %wt กล่าวคือพลังงานไมโครเวฟทำให้เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์มีความทนต่อการฉีกขาดลดลงหรือทำให้เศษยางพื้นรองเท้ามีความทนต่อการฉีกขาดลดลงนั่นเอง เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟทำให้สายโซ่โมเลกุลของเศษยางพื้นรองเท้าขาดส่งผลทำให้น้ำหนักโมเลกุลและความเปราะบางของเศษยางพื้นรองเท้าลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อผสม LDPE ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น พบว่าพลังงานไมโครเวฟไม่มีผลต่อความทนต่อการฉีกขาดของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ กล่าวคือค่าความทนต่อการฉีกขาดมีค่าใกล้เคียงกัน

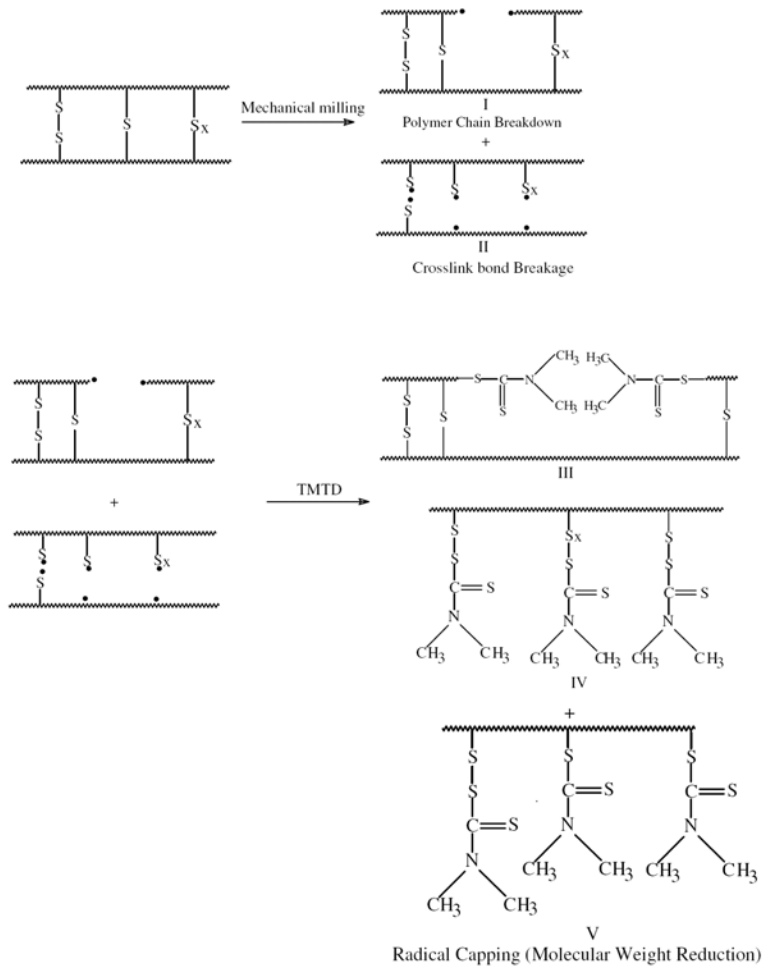
ในส่วนของสารรีเคลมหรือเตตระเมทิลไทูแรมไดซัลไฟด์(TMTD) นั้นพบว่าเมื่อมีความทนต่อการฉีกขาดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟที่อัตราส่วน LDPE เท่ากับ 0 %wt เท่านั้น เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟและสารรีเคลมทำให้สายโซ่โมเลกุลและพันธะเชื่อมขวางของเศษยางพื้นรองเท้าเกิดการแตกขาดขึ้น ก่อให้เกิดส่วนที่ว่างไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นและสารรีเคลมสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาก่อให้เกิดพันธะเชื่อมขวางขึ้นบางส่วนได้ ดังนั้นค่าความทนต่อการฉีกขาดของเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟและผสมสารรีเคลมมีค่าลดลง เมื่อเทียบกับเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟและไม่ผสมสารรีเคลม

ตารางที่ 4.2 ความทนต่อการฉีกขาดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์

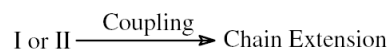
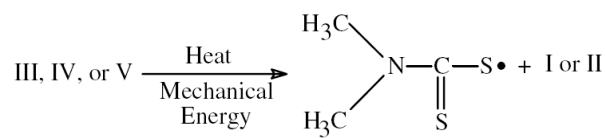
| LDPE<br>content<br>(%wt) | Tear strength (kN/m) |             |                            |             |
|--------------------------|----------------------|-------------|----------------------------|-------------|
|                          | Non-devulcanized SSS |             | Microwave-devulcanized SSS |             |
|                          | unfilled TMTD        | filled TMTD | unfilled TMTD              | filled TMTD |
| 0                        | 31.50±1.25           | 31.61±0.86  | 28.59±0.80                 | 25.59±0.68  |
| 10                       | 36.77±1.12           | 36.18±1.39  | 36.07±0.95                 | 36.81±0.98  |
| 20                       | 46.10±0.89           | 44.74±0.88  | 44.20±0.78                 | 43.65±0.71  |
| 30                       | 49.52±1.08           | 48.56±0.98  | 49.63±0.79                 | 48.30±0.52  |



(A)



(B)



(C)

รูปที่ 4.10 กลไกการเกิดการแตกพันธะและการเชื่อมขวางของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ระหว่างกระบวนการรีไซเคิล (B. Adhikari et al, 2000)

#### 4.4 สมบัติทางกายภาพ(Physical properties)

##### 4.4.1 ความแข็ง(hardness)

ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าความแข็งของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์มีค่ามากขึ้นเมื่ออัตราส่วน LDPE มากขึ้น กล่าวคือเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์มีความแข็งมากขึ้น เนื่องจากปริมาณของเฟส LDPE ซึ่งเป็นเฟสที่มีความแข็งมากกว่าอัตราส่วนเพิ่มขึ้น ทำให้เฟสที่เป็นเศษยางพื้นรองเท้าที่มีความยืดหยุ่นลดลง ดังนั้น สมบัติโดยรวมของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จึงมีความแข็งมากขึ้น

สำหรับพลังงานไมโครเวฟพบว่าไม่มีผลต่อความแข็งของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ เนื่องจากค่าความแข็งของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านและไม่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟมีค่าใกล้เคียงกันมาก

ในส่วนของสารรีเคลมหรือเตตระเมทิลไทูแรมไดซัลไฟด์(TMTD) นั้นพบว่ามีความแข็งของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์เล็กน้อย กล่าวคือความแข็งของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ผสม TMTD (filled TMTD) จะมีค่าความแข็งมากกว่าเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ไม่ผสม TMTD (unfilled TMTD) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปฏิกิริยาระหว่าง TMTD กับเศษยางพื้นรองเท้า ทำให้เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้มีปริมาณการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่มีการผสม TMTD มีความแข็งมากกว่า ซึ่งให้ผลเป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ D.Debapriya และคณะ (D. Debapriya, 2006) ซึ่งได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของ TMTD ต่อสมบัติความแข็งของผงยางรถยนต์ พบว่าค่าความแข็งของผงยางรถยนต์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณ TMTD เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีปริมาณการเชื่อมขวางมากขึ้น

ตารางที่ 4.3 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

| LDPE<br>content<br>(%wt) | Hardness (IRHD)      |             |                            |             |
|--------------------------|----------------------|-------------|----------------------------|-------------|
|                          | Non-devulcanized SSS |             | Microwave-devulcanized SSS |             |
|                          | unfilled<br>TMTD     | filled TMTD | unfilled<br>TMTD           | filled TMTD |
| 0                        | 81.4±0.49            | 80.5±0.45   | 80.0±0.19                  | 81.0±0.25   |
| 10                       | 86.6±0.20            | 87.3±0.34   | 84.3±0.25                  | 87.7±0.69   |
| 20                       | 90.7±0.30            | 91.5±0.30   | 90.7±0.23                  | 91.6±0.32   |
| 30                       | 92.4±0.17            | 93.8±0.61   | 92.3±0.19                  | 93.8±0.25   |

#### 4.4.2 ความทนต่อการขัดถู

ความทนต่อการขัดถูของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากงานวิจัยนี้ได้พิจารณาเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้ากับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ จากสูตรที่มีสมบัติความทนแรงดึง(tensile strength) และการยืดดึง ณ จุดขาด(elongation at break) ดีที่สุด ซึ่งพบว่าอัตราส่วนระหว่างเศษยางพื้นรองเท้ากับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเท่ากับ 80:20 มีสมบัติเชิงกลดังกล่าวดีที่สุด ดังนั้นจึงเลือกเทอร์โมพลาสติกที่อัตราส่วนผสมเท่ากับ 80:20 มาทดสอบความทนต่อการขัดถูดังแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งวัสดุที่มีค่า abrasion loss มากหมายความว่าวัสดุนั้นมีค่าความทนต่อการขัดถูต่ำ จากการทดสอบพบว่าความทนต่อการขัดถูของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์จะทนต่อการขัดถูได้น้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ไม่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ โดยเฉพาะในกรณีที่ไม่มีการเติมสารรีเคลมซึ่งจะมีค่า abrasion loss สูงที่สุดคือ 118 ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟเกิดการแตกหักทำให้ความแข็งแรงของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ลดลง ความทนต่อการขัดถูจึงลดลงตามไปด้วย

อย่างไรก็ตามพบว่าผลของสารรีเคลมที่มีต่อความทนต่อการขัดถูของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ทั้ง 2 กลุ่มนั้นจะให้ผลต่างกัน กล่าวคือผลของ TMTD ต่อเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟพบว่าความทนต่อการขัดถูของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ผสม TMTD จะมีค่ามากกว่าเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ไม่ผสม TMTD เนื่องจาก TMTD เกิดปฏิกิริยากับเศษยางพื้นรองเท้าเกิดโครงสร้างเชื่อมขวางขึ้นทำให้ความทนต่อการขัดถูมากขึ้น

ในขณะที่ผลของ TMTD ต่อเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางที่ไม่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟพบว่าความทนต่อการขัดถูของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ผสม TMTD จะมีค่าต่ำกว่าเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ไม่ผสม TMTD ซึ่งอาจเนื่องจาก TPE ที่ไม่ได้เติม TMTD มีความเป็นอีลาสติกมากกว่า TPE ที่เติม TMTD อีกนัยหนึ่งคือ TMTD ทำให้เศษยางพื้นรองเท้าเกิดการสูญเสียความเป็นอีลาสติก

ตารางที่ 4.4 ความทนต่อการขัดถูของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้ากับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่อัตราส่วน 80:20

| LDPE content<br>(%wt) | Abrasion loss (mg/1000 cycle) |             |                            |             |
|-----------------------|-------------------------------|-------------|----------------------------|-------------|
|                       | Non-devulcanized SSS          |             | Microwave-devulcanized SSS |             |
|                       | unfilled TMTD                 | filled TMTD | unfilled TMTD              | filled TMTD |
| 20                    | 108                           | 114         | 118                        | 115         |

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลการทดลองโดยรวมจะเห็นว่าการเติม TMTD นั้นจะให้ผลในเชิงบวกกับ TPE ที่เตรียมจากเศษยางที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟ กล่าวคือทำให้การสูญเสียน้ำหนักลดลง ทนต่อการขีดข่วนมากขึ้น ในขณะที่จะส่งผลในเชิงลบกับ TPE ที่เตรียมจากเศษยางที่ไม่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟนั่นคือ TPE จะเกิดการสูญเสียน้ำหนักมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

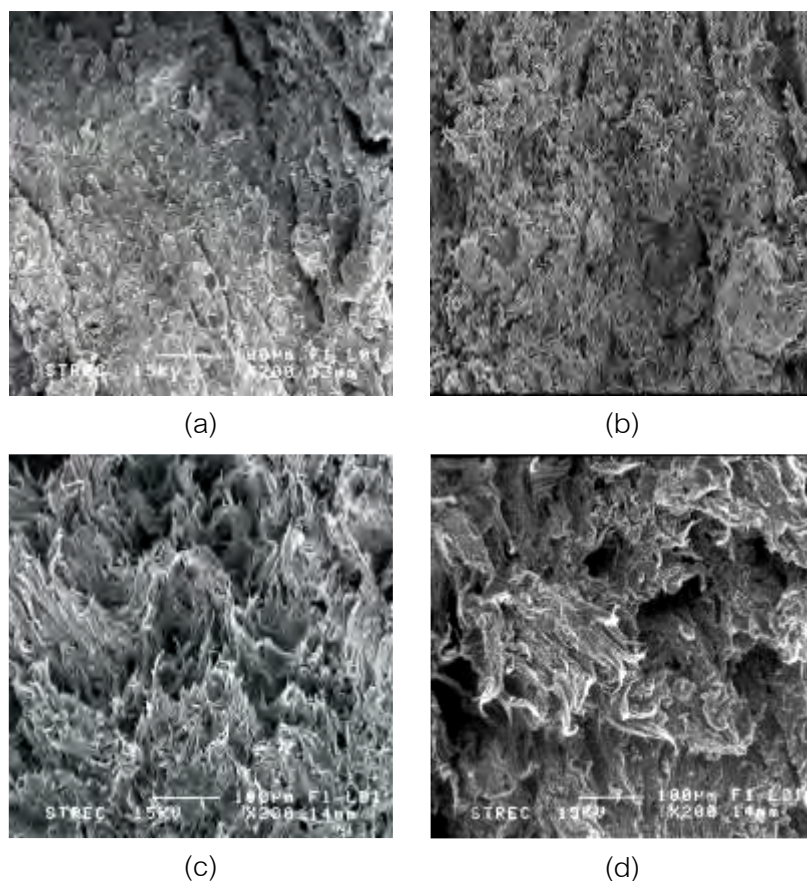
#### 4.5 สันฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

สันฐานวิทยาเป็นการทดสอบที่สำคัญที่ใช้ในการอธิบายสมบัติของพอลิเมอร์ผสม(polymer blends) กล่าวคือสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมสามารถอธิบายได้ด้วยสันฐานวิทยา เช่น พอลิเมอร์ผสมที่มีลักษณะทางสันฐานวิทยาคือมีขนาดของอนุภาคใหญ่และความสามารถในการยึดติดต่ำจะมีผลทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมมีค่าต่ำ ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะทางสันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมคือ อัตราส่วนในการผสม ความหนืดเมื่อหลอม(melt viscosity) และอัตราการเชื่อมระหว่างหลอมพอลิเมอร์ผสม ซึ่งในการทดสอบสันฐานวิทยาของงานวิจัยนี้จะทำการเตรียมตัวอย่างในการทดสอบจากผิวหน้าของชิ้นงานภายหลังจากการดึง(tensile fractured surface)

และในทำนองเดียวกันกับความทนต่อการขีดข่วน เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วนระหว่างเศษยางพื้นรองเท้าและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเท่ากับ 80:20 มีสมบัติความทนแรงดึงที่ดีที่สุด ดังนั้นจึงเลือกเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่สภาวะดังกล่าวมาทำการศึกษาสันฐานวิทยาซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

##### 4.5.1 ผลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำต่อสันฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

โครงสร้างสันฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าที่ไม่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(SSS/LDPE TPEs) ที่อัตราส่วนเท่ากับ 100:0 90:10 80:20 70:30 แสดงดังรูปที่ 4.11(a) (b) (c) และ(d) ตามลำดับ จากภาพ SEM พบว่าลักษณะการเสียรูปแบบพลาสติก(plastic deformation) คือมีลักษณะเป็นเส้นๆ(fibrillar structure) เพิ่มขึ้นตามปริมาณของ LDPE ที่มากขึ้น แสดงว่า TPEs ที่ได้มีความเหนียวมากขึ้นสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆที่กล่าวมาทั้งความทนแรงดึงและความทนต่อการขีดข่วน ส่วนหลุมหรือร่องที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการหลุดออกของอนุภาคยางที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ ดังนั้นเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จะมีความเหนียวเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณ LDPE เพิ่มขึ้น



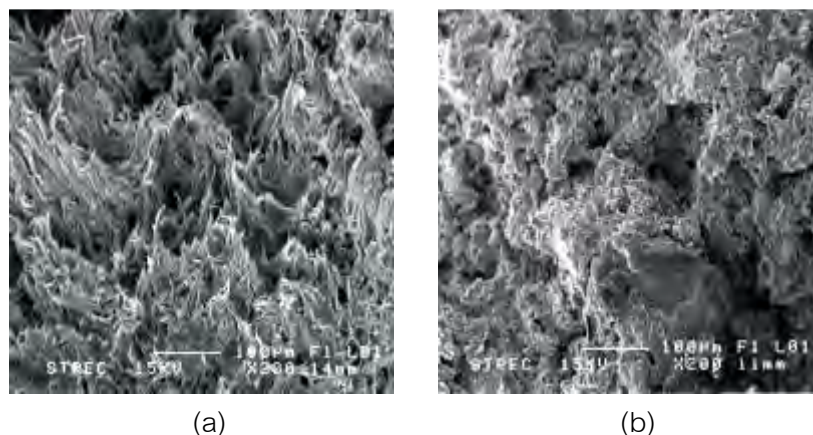
**รูปที่ 4.11** สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์(SSS/LDPE TPEs) ที่ปริมาณ LDPE ต่างๆกัน (a)100:0 (b)90:10 (c)80:20 (d)70:30

#### 4.5.2 ผลของพลังงานไมโครเวฟต่อสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์

โครงสร้างสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าที่ไม่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(SSS/LDPE TPEs) และเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(M-SSS/LDPE TPEs) แสดงดังรูปที่ 4.12(a) และ (b) ตามลำดับ พบว่าสัณฐานวิทยาของ SSS/LDPE TPEs มีลักษณะเป็นเส้น(fibrillar structure) ที่เกิดจากการเสียรูปแบบพลาสติก(plastic deformation) และมีหลุมร่องที่เกิดจากอนุภาคของเศษยางพื้นรองเท้าที่สม่ำเสมอ ซึ่งแตกต่างกับลักษณะการเสียรูปของ M-SSS/LDPE TPEs ซึ่งมีลักษณะเป็นก้อนๆ และมีหลุมร่องที่ไม่สม่ำเสมอไม่พบลักษณะของเส้นใยหรือ fibrillar structure เหมือนกรณี SSS/LDPE TPE

ลักษณะการเสียรูปแบบพลาสติกบ่งบอกว่า SSS/LDPE TPEs ที่เตรียมได้มีความเหนียวกว่า M-SSS/LDPE TPEs เนื่องจากการดีวัลคาไนซ์เศษยางพื้นรองเท้าด้วยพลังงานไมโครเวฟทำให้น้ำหนักโมเลกุลของเศษยางพื้นรองเท้าลดลง ส่งผลให้สมบัติอีลาสติกของเศษยางพื้นรองเท้าลดลง อีกทั้งยังส่งผลให้เศษยางพื้นรองเท้าบางส่วนหลอมเข้ากันได้ดีกับ LDPE ทำให้ความเหนียวและความยืดหยุ่นของ LDPE

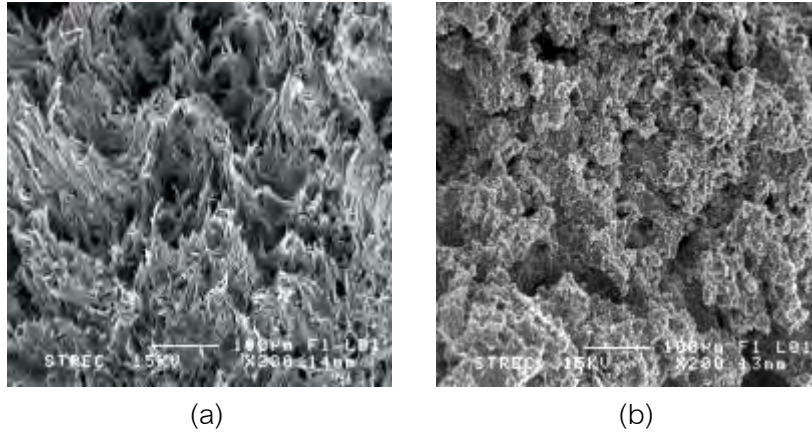
ลดลง สังเกตได้จากปริมาณการเสียรูปแบบพลาสติกลดลง ผลของสัญญาณวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์สอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติความทนแรงดึง



**รูปที่ 4.12** สัญญาณวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่อัตราส่วน 80:20 (a) ไม่ผ่านการดีวัลคาไนเซชันด้วยไมโครเวฟ (b) ผ่านการดีวัลคาไนเซชันด้วยไมโครเวฟที่สภาวะ 360 วัตต์ เป็นเวลา 60 วินาที

#### 4.5.3 ผลของสารรีเคลมต่อสัญญาณวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

โครงสร้างสัญญาณวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าที่ไม่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(SSS/LDPE TPEs) ที่ไม่ผสมและผสมสารรีเคลมหรือเตตระเมทิลไทูรัมไดซัลไฟด์(tetramethyl thiuramdisulfide;TMTD) แสดงดังรูปที่ 4.13(a) และ (b) พบว่าสารรีเคลมทำให้สัญญาณวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นก้อนๆ และมีหลุมร่องที่สม่ำเสมอและไม่มีลักษณะการเสียรูปแบบเส้นเหมือนเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ไม่ผสมสารรีเคลม ทั้งนี้คาดว่าเกิดจากสารรีเคลมช่วยทำให้เฟสของเศษยางพื้นรองเท้าเข้ากันได้ดีกับ LDPE มากขึ้น ส่งผลให้สมบัติตามธรรมชาติของ LDPE ลดลง [27] ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับสมบัติความทนแรงดึงและ 500%modulus(รูปที่ 4.6 และ 4.8 ตามลำดับ) อย่างไรก็ตามสารรีเคลมมีผลทำให้ความทนแรงยึดดึง ณ จุดขาดลดลง(รูปที่ 4.7) ซึ่งเห็นได้จากสัญญาณวิทยาของ TPEs ที่ผสมสารรีเคลมมีลักษณะการขาดแบบเปราะ(brittle failure) นั่นเอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าที่ไม่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ไม่ผสม TMTD(ดังรูปที่ 4.13(a))นี้ มีลักษณะการเสียรูปแบบพลาสติก(plastic deformation) ในขณะที่เมื่อเติม TMTD นั้นจะมีลักษณะการเสียรูปแบบเปราะ(brittle failure) ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.7 คือเมื่อเติม TMTD เข้าไปจะทำให้เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้มีค่าการยึดดึง ณ จุดขาดลดลง

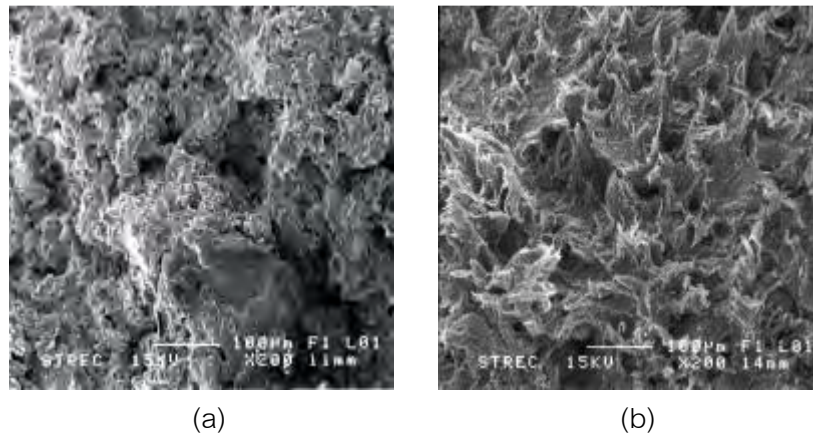


**รูปที่ 4.13** สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่อัตราส่วน(SSS/LDPE TPEs) 80:20 (a) ไม่ใส่สารรีเคลม (2.75 phr) (b) ใส่สารรีเคลม

สำหรับโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(M-SSS/LDPE TPEs) ที่ไม่ผสมและผสมสารรีเคลมหรือเตตระเมทิลไทูรามไดซัลไฟด์(tetramethyl thiuramdisulfide;TMTD) แสดงดังรูปที่ 4.14(a) และ (b) พบว่าสารรีเคลมทำให้สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟ(M-SSS/LDPE TPE) ที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นเส้น(fibrillar structure) ที่เกิดจากการเสียรูปแบบพลาสติก(plastic deformation) ซึ่งอาจเกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง TMTD กับเศษยางพื้นรองเท้า ทำให้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้มีปริมาณการเชื่อมขวางขึ้น ส่งผลทำให้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มีการผสม TMTD มีสมบัติเชิงกลสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ไม่ได้ผสม TMTD จะเห็นได้ว่าสัณฐานวิทยาที่ได้มีความสอดคล้องกับสมบัติความทนแรงดึง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟ(M-SSS/LDPE TPE) ที่ไม่ผสม TMTD (ดังรูปที่ 4.14(a))นี้มีลักษณะการเสียรูปที่ไม่สม่ำเสมอ(irregular) หรือเสียรูปแบบเปราะ(brittle failure) ในขณะที่เมื่อเติม TMTD นั้นจะมีลักษณะการเสียรูปเป็นเส้นแบบพลาสติก ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.7 คือเมื่อเติม TMTD เข้าไปจะทำให้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้มีค่าการยืดดึง ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าสารรีเคลมมีผลต่อค่าการยืดดึง ณ จุดขาดหรือ %elongation at break แตกต่างกัน กล่าวคือในกรณีของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ซึ่งเตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าที่ไม่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟนั้น การเติมสารรีเคลมจะทำให้ค่าดังกล่าวลดลง ดังจะเห็นได้จากภาพลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่มีลักษณะค่อนข้างเปราะ(รูปที่ 4.13(b)) ในขณะที่เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ซึ่งเตรียมจากเศษยางที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟนั้น สารรีเคลมนอกจากจะช่วยเพิ่มความทนแรงดึง มอ

ดูลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าการยืดดึง ณ จุดขาดให้เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งยืนยันได้จากลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่รูปที่ 4.14(b) ซึ่งมีลักษณะการเสียรูปแบบพลาสติกหรือ fibrillar structure นั้นเอง



**รูปที่ 4.14** สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกโกลาสไฟเบอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(M-SSS/LDPE TPEs) ที่อัตราส่วน 80:20 (a) ไม่ใส่สารรีเคลม(2.75 phr) (b) ใส่สารรีเคลม

#### 4.6 สมบัติวิสโคอิลาสติกของเทอร์โมพลาสติกโกลาสไฟเบอร์

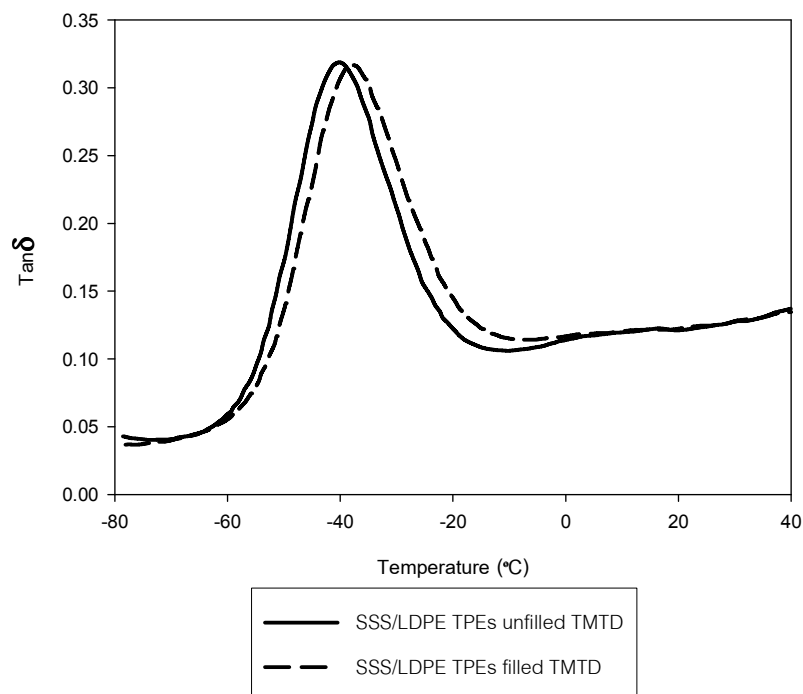
สมบัติวิสโคอิลาสติกของเทอร์โมพลาสติกโกลาสไฟเบอร์แสดงได้ดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.15 และ 4.16 ซึ่งพบว่าค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วหรืออุณหภูมิกลาสทรานซิชัน(glass transition temperature( $T_g$ )) ของเทอร์โมพลาสติกโกลาสไฟเบอร์ที่ผสมสารรีเคลมหรือเตตระเมทิลไทูแรมไดซัลไฟด์ (TMTD) มีค่าสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกโกลาสไฟเบอร์ที่ไม่ผสมสารรีเคลม ทั้งนี้เนื่องจากสารรีเคลมเกิดการแตกตัวขึ้นขณะผสม ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างเศษยางพื้นรองเท้าและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกโกลาสไฟเบอร์เกิดการเคลื่อนที่ (movement) ได้ยากขึ้น(แสดงตารางที่ 4.5)

สำหรับผลของพลังงานไมโครเวฟที่มีต่อค่า  $T_g$  ของเทอร์โมพลาสติกโกลาสไฟเบอร์ในระบบที่เติมและไม่เติมสารรีเคลมนั้นให้ผลต่างกัน กล่าวคือในระบบที่ไม่เติมสารรีเคลมนั้นให้ผลต่างกันกล่าวคือในระบบที่ไม่เติมสารรีเคลมนั้น เทอร์โมพลาสติกโกลาสไฟเบอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟ(M-SSS/LDPE TPEs unfilled TMTD) มีค่าต่ำกว่าเทอร์โมพลาสติกโกลาสไฟเบอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าที่ไม่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟ(SSS/LDPE TPEs unfilled TMTD)เล็กน้อย ทั้งนี้อาจเกิดจากพลังงานไมโครเวฟทำให้สายโซ่โมเลกุลของเศษยางพื้นรองเท้าแตกหักหรือขาดออกจากกัน ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น ทำให้ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเทอร์โมพลาสติกโกลาสไฟเบอร์มีค่าลดลง

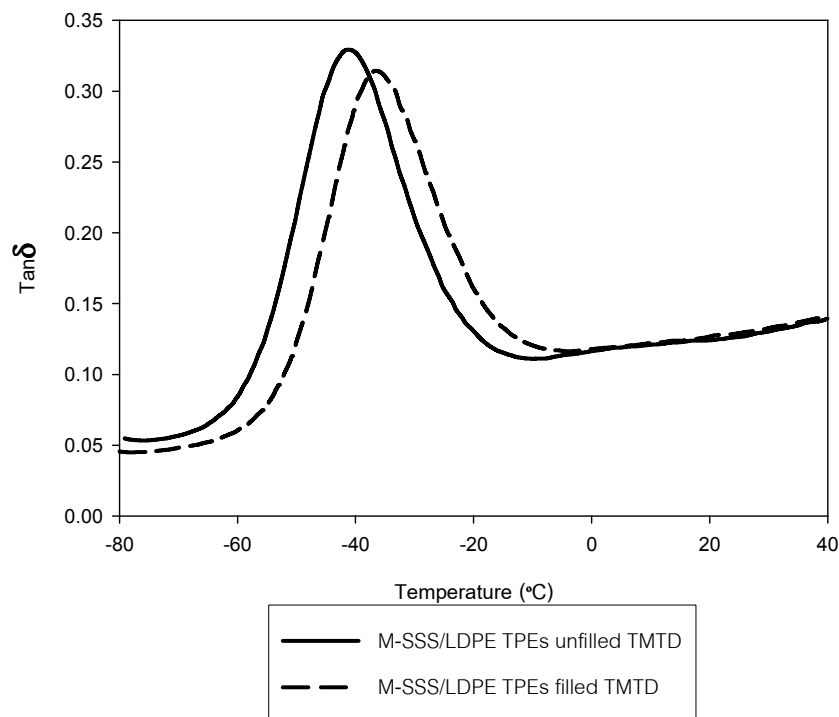
ในทางตรงกันข้าม สำหรับระบบที่มีการเติมสารรีเคลม(TMTD) นั้นพบว่าเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟ(M-SSS/LDPE TPEs filled TMTD) มีค่าสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าที่ไม่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟ(SSS/LDPE TPEs filled TMTD)เล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องจากสารรีเคลมเกิดการแตกตัวขึ้นขณะผสม ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างเศษยางพื้นรองเท้าและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์เกิดการเคลื่อนที่ (movement) ได้ยากขึ้น ค่า  $T_g$  จึงมีค่าสูงขึ้น

**ตารางที่ 4.5** ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว( $T_g$ )ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วน 80:20

| เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์    | $T_g$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) |
|-------------------------------|------------------------------|
| SSS/LDPE TPEs unfilled TMTD   | -40.10                       |
| SSS/LDPE TPEs filled TMTD     | -37.80                       |
| M-SSS/LDPE TPEs unfilled TMTD | -41.20                       |
| M-SSS/LDPE TPEs filled TMTD   | -36.60                       |



**รูปที่ 4.15** กราฟระหว่าง  $\tan \delta$  และอุณหภูมิ ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(SSS/LDPE TPEs) ที่อัตราส่วน 80:20



**รูปที่ 4.16** กราฟระหว่าง  $\tan \delta$  และอุณหภูมิ ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (M-SSS/LDPE TPEs) ที่อัตราส่วน 80:20

#### 4.7 เปรียบเทียบสมบัติระหว่าง TPE ทางการค้าและ TPE ที่เตรียมได้

จากผลการทดลองทั้งหมดที่ได้กล่าวมาสามารถเห็นได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากเศษยางพื้นรองเท้าคือที่อัตราส่วนของเศษยางพื้นรองเท้าและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 80:20 ในสภาวะเศษยางพื้นรองเท้าไม่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟและมีการใช้สารรีเคลม 2.75 phr (SSS/LDPE TPEs filled TMTD) และเพื่อให้ทราบถึงคุณภาพของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากเศษยางพื้นรองเท้าที่เตรียมได้ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงได้ทำการเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้า Santoprene® 101-87 ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท โกลบอลคอนเน็คชั่นส์ จำกัด (มหาชน)

จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.6 พบว่าความทนต่อการฉีกขาดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้นั้นมีค่าที่สูงกว่า Santoprene® 101-87 ที่ใช้ในทางการค้าในขณะที่ความทนแรงดึง และความแข็งแรงมีค่าที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามความยืดหยุ่น จุดขาด และความทนต่อการขัดถูนั้นต่ำกว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้า ทั้งนี้คาดว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้นั้นอยู่ในรูปของวัสดุเชิงประกอบของเศษยางพื้นรองเท้าและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำซึ่งเป็นการผสมเพียงเชิงกลเท่านั้นแต่ในทางกลับกันเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ทางการค้านั้นอยู่ในรูปของพอลิเมอร์ผสมที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า ดังนั้นวัสดุเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้จึงเกิดการเสียรูป

บริเวณรอยต่อระหว่างสององค์ประกอบนี้ได้ง่ายกว่าทำให้ความความยืด หยุ่น จุดขาด และความทนต่อการ ชำรุดนั้นต่ำกว่า

**ตารางที่ 4.6** เปรียบเทียบสมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียม ได้กับเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ในทางการค้า (Santoprene® 101-87)

| Properties                          | เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์(TPEs) |                                   |
|-------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
|                                     | Santoprene® 101-87               | M-SSS/LDPE TPEs filled TMTD 80:20 |
| Tensile strength, MPa               | 9.09                             | 8.90 ( $\pm 0.03$ )               |
| Elongation at break, %              | 354.32                           | 218.08 ( $\pm 3.79$ )             |
| Tear strength, N/mm.                | 3.51                             | 44.20 ( $\pm 0.78$ )              |
| Hardness, IRHD                      | 90.24                            | 91.5 ( $\pm 0.30$ )               |
| Abrasion resistance, mg/1000 cycles | 48                               | 114                               |

#### 4.8 การวิเคราะห์ในเชิงเศรษฐศาสตร์

ดำเนินการเปรียบเทียบ TPE ที่เตรียมได้ที่อัตราส่วนของเศษยางพื้นรองเท้าและพอลิเอทิลีนชนิด ความหนาแน่นต่ำ 80:20 ในสภาวะเศษยางพื้นรองเท้าไม่ผ่านการดีวัลคาร์บอนซ์ด้วยไมโครเวฟและมีการใช้ สารรีเคลม 2.75 phr (SSS/LDPE TPEs filled TMTD) กับ TPE ในทางการค้าโดยคำนวณค่าใช้จ่ายทั้ง วัตถุดิบ และกระบวนการขึ้นรูป

##### 4.8.1 เปรียบเทียบวัตถุดิบ

เปรียบเทียบในปริมาณ 1 กิโลกรัมของ TPE ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังตารางที่ 4.7 พบว่า TPE จาก เศษยางพื้นรองเท้านั้นมีต้นทุนเพียง 6.14% ของ TPE ในทางการค้า หรือสามารถลดต้นทุนวัตถุดิบได้ถึง 93.86%

**ตารางที่ 4.7** ต้นทุนวัตถุดิบของ TPE จากเศษยางพื้ร่องเท้า และ TPE ในทางการค้า

(Santoprene® 101-87)

| องค์ประกอบ                           | ราคา<br>(บาท/กิโลกรัม) | ปริมาณ (กิโลกรัม) | ค่าวัสดุ (บาท) | ต้นทุนวัสดุรวม<br>(บาท) |
|--------------------------------------|------------------------|-------------------|----------------|-------------------------|
| TPE ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้า    |                        |                   |                |                         |
| เศษยางพื้นรองเท้า                    | 0                      | 0.8               | 0              | 91.12                   |
| พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ        | 69                     | 0.2               | 13.8           |                         |
| ผงเขม่าดำ (1%)*                      | 40                     | 0.008             | 0.32           |                         |
| TMTD (2.75 phr)                      | 2,800                  | 0.0275            | 77             |                         |
| TPE ในทางการค้า (Santoprene® 101-87) |                        |                   |                |                         |
| Santoprene® 101-87                   | 230                    | 1                 | 230            | 230                     |

\* ปริมาณผงเขม่าดำ 1% ของน้ำหนักเศษยางพื้ร่องเท้า

#### 4.8.2 เปรียบเทียบกระบวนการขึ้นรูป

ทำการคำนวณค่าไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูป TPE ปริมาณ 1 กิโลกรัม โดยอาศัยวิธีการคำนวณค่าไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวงด้วยอัตราของบ้านอยู่อาศัยที่อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าเกิน 150 หน่วยต่อเดือน ดังตารางที่ 4.8 ซึ่งเป็นการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบเท่านั้นเพราะในการขึ้นรูปจริงอัตราค่าไฟฟ้าจะใช้อีกอัตราหนึ่งที่ต่างออกไป ซึ่งค่าไฟฟ้าในการขึ้นรูปที่คำนวณได้แสดงไว้ดังตารางที่ 4.9 โดยหน่วยของไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้ (การไฟฟ้านครหลวง, 2553)

หน่วยไฟฟ้า = (กำลังของเครื่องใช้ไฟฟ้า (W)/1000) × จำนวนเครื่องใช้ไฟฟ้า × เวลาในการใช้งาน (ชม.)

**ตารางที่ 4.8** การคิดค่าไฟฟ้าของที่อยู่อาศัยที่อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าเกิน 150 หน่วยต่อเดือน

|                                          |         |            |
|------------------------------------------|---------|------------|
| 150 หน่วยแรก (หน่วยที่ 1-150)            | หน่วยละ | 1.8047 บาท |
| 150 หน่วยถัดไป (หน่วยที่ 151-400)        | หน่วยละ | 2.7781 บาท |
| เกินกว่า 400 หน่วย (หน่วยที่ 400 ขึ้นไป) | หน่วยละ | 2.9780 บาท |

ตารางที่ 4.9 ค่าไฟฟ้าของ TPE ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้า และ TPE ในทางการค้า (Santoprene® 101-87)

| เครื่องมือ                           | เวลาในการทำงาน<br>(นาท) | หน่วยไฟฟ้า | ค่าไฟฟ้า (บาท) |
|--------------------------------------|-------------------------|------------|----------------|
| TPE ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้า    |                         |            |                |
| เครื่องบดสองลูกกลิ้ง (9000 W)        | 50                      | 7.5        | 45.1175        |
| เครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ (260 W)   | 180                     | 0.78       |                |
| เครื่องอัดแบบ (16,000 W)             | 60                      | 16         |                |
| TPE ในทางการค้า (Santoprene® 101-87) |                         |            |                |
| เครื่องอัดแบบ (16,000 W)             | 60                      | 16         | 28.8752        |

ดังนั้นในกระบวนการขึ้นรูปสามารถเห็นได้ว่า TPE ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้านั้นมีค่าไฟฟ้าในกระบวนการขึ้นรูปสูงกว่า TPE ในทางการค้าร้อยละ 155.25 เนื่องจากต้องมีขั้นตอนการผสมกันขององค์ประกอบต่างๆ รวมถึงการเตรียมให้เป็นเม็ดเพื่อให้ง่ายในการขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบในขณะที่ TPE ในทางการค้านั้นใช้ขั้นตอนเดียวคือเครื่องอัดแบบ เนื่องจาก TPR ทางการค้ามีลักษณะเป็นเม็ดที่พร้อมสำหรับการขึ้นรูปแล้ว

ดังนั้นจากการคำนวณต้นทุนในการผลิตของ TPE ทั้ง 2 ชนิด คือ

ต้นทุนในการผลิต = ต้นทุนวัตถุดิบ + ต้นทุนค่าไฟฟ้าในการขึ้นรูป

TPE จากเศษยางพื้นรองเท้า = 91.12 + 45.1175  
= 136.2375 บาท

Santoprene® 101-87 = 230 + 28.8752  
= 258.8752 บาท

ดังนั้น TPE จากเศษยางพื้นรองเท้าสามารถลดต้นทุนได้ =  $100 - [(TPE \text{ SSS}/TPE \text{ commercial}) \times 100]$   
=  $100 - [(136.2375/258.8752) \times 100]$   
= 47.37 %

จากการคำนวณต้นทุนในการผลิต TPE ด้วยเศษยางพื้นรองเท้าพบว่า มีต้นทุนที่ต่ำกว่าคิดเป็น 52.63% ของ TPE ในทางการค้า หรือสามารถลดต้นทุนในการผลิตได้ถึง 47.37% ซึ่งมีความเหมาะสมในการใช้งานทั่วไป และยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้ได้เป็นอย่างดี

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 การตีมูลค่าไนซ์เศษยางพื้รองเท้า

- พลังงานไมโครเวฟไม่สามารถตีมูลค่าไนซ์เศษยางพื้รองเท้าได้ เนื่องจากเศษยางพื้รองเท้ามีความเป็นขั้วต่ำ ซึ่งแสดงได้จากค่าสัดส่วนเจลและอัตราส่วนการบวมตัวของเศษยางพื้รองเท้าที่มีค่าคงที่หรือปริมาณการเชื่อมขวางไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง
- เมื่อผสมผงเขม่าซึ่งเป็นวัสดุที่มีขั้วสูงกับเศษยางพื้รองเท้าพบว่าพลังงานไมโครเวฟทำให้ปริมาณการเชื่อมขวางของยางลดลง นั่นคือให้ผลค่าสัดส่วนเจลลดลง และเกิดผลที่ไม่คาดคิดขึ้นคือผลของอัตราส่วนการบวมตัวของเศษยางพื้รองเท้าหลังผสมกับผงเขม่าดำมีค่าลดลงเช่นกัน คาดว่าน่าจะเกิดจากเศษยางพื้รองเท้าเกิดการสลายตัวเนื่องจากพลังงานไมโครเวฟ ส่งผลทำให้น้ำหนักของเศษยางพื้รองเท้าลดลง อัตราการบวมตัวจึงลดลง
- สภาวะของกำลังไมโครเวฟและเวลาที่เหมาะสมต่อการตีมูลค่าไนซ์เศษยางพื้รองเท้าคือ ที่กำลังไมโครเวฟ 360 วัตต์ที่เวลา 60 วินาที

#### 5.2 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

##### 5.2.1 ผลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

- ปริมาณ LDPE ที่เพิ่มขึ้นทำให้สมบัติเชิงกล(เช่น สมบัติความทนแรงดึงและความทนการฉีกขาด) และสมบัติทางกายภาพ(เช่น ความแข็ง)ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์มีค่ามากขึ้น เนื่องจาก LDPE มีสมบัติความเหนียวและยืดตัวดี นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นตัวประสานระหว่างอนุภาคของเศษยางพื้รองเท้า ดังนั้นสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ได้จึงมีสมบัติใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมากขึ้นไปด้วย

##### 5.2.2 ผลของพลังงานไมโครเวฟ

- ผลของพลังงานไมโครเวฟที่ใช้ในการรีเคลมเศษยางพื้รองเท้ามีผลทำให้สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์มีค่าลดลง เนื่องจากความร้อนจากพลังงานไมโครเวฟทำให้สายโซ่โมเลกุลของเศษยางพื้รองเท้าเกิดการแตกหักที่สายโซ่หลักทำให้น้ำหนักโมเลกุลต่ำลงหรือมีปริมาณการเชื่อมขวางลดลง

##### 5.2.3 ผลของสารรีเคลม TMTD

- ผลของสารรีเคลม TMTD มีผลทำให้ค่าความทนแรงดึง(tensile strength)และ 500% มอดุลัสของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์(SSS/LDPE TPEs)เพิ่มขึ้นและค่าความทนแรงดึงฉีกขาดลดลง เนื่องจาก TMTD เกิดการแตกตัวระหว่างการผสมและเกิดปฏิกิริยาเชื่อม

ขวางกับเศษยางพื้นรองเท้าขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อผสมสารรีเคลมหรือ TMTD กับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการดิวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(M-SSS/LDPE TPEs) พบว่า TMTD ทำให้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้มีความทนแรงดึง 500%มอดุลัสและค่าการยืดดึง ณ จุดขาด มากกว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ไม่ได้ผสมสารรีเคลม ซึ่งผลการทดลองสามารถยืนยันได้จากลักษณะทางสัณฐานวิทยา

- สารรีเคลมมีผลทำให้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีค่าอุณหภูมิกลาซทรานซิชัน(glass transition temperature,  $T_g$ ) สูงขึ้นซึ่งเกิดจากการเชื่อมขวางระหว่างเศษยางพื้นรองเท้ากับสารรีเคลม

#### 5.2.4 สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากเศษยางพื้นรองเท้า

- สภาวะเหมาะสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์คือที่อัตราส่วนของเศษยางพื้นรองเท้าและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 80:20 ในสภาวะเศษยางพื้นรองเท้าไม่ผ่านการดิวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟและมีการใช้สารรีเคลม 2.75 phr

### 5.3 การเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้า

- เมื่อทำการเปรียบเทียบเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากเศษยางพื้นรองเท้า ณ สภาวะที่เหมาะสมกับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้าแล้วพบว่าความทนต่อการฉีกขาดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้นั้นมีค่าที่สูงกว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้าในขณะที่ค่าความแข็งและความทนแรงดึงนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามค่าการยืดดึง ณ จุดขาด และความทนต่อการขาดฉีกนั้นยังมีค่าที่ต่ำกว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้า
- เมื่อเปรียบเทียบในเชิงเศรษฐศาสตร์พบว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีต้นทุนในการผลิตเพียง 52.63% ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้า หรือสามารถลดต้นทุนในการผลิตได้ถึง 47.37%

พลังงานไมโครเวฟมีผลทำให้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ไม่ผสมสารรีเคลมมีค่าอุณหภูมิกลาซทรานซิชันต่ำลง เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟทำให้เกิดการแตกหักของเศษยางพื้นรองเท้าส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์เคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น ในทางตรงกันข้ามเมื่อผสมสารรีเคลมกับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์พบว่าสารรีเคลมมีผลทำให้อุณหภูมิกลาซทรานซิชันของเทอร์โม

พลาสติกอิลาสโตเมอร์มีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเชื่อมขวางระหว่างสายยางพื้นรองเท้ากับสารรีเคลมทำให้สายโซ่โมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์เคลื่อนที่ได้ยากขึ้น

### **ข้อเสนอแนะ**

ควรประยุกต์เทคนิคการผสมสายยางพื้นรองเท้า และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำให้มีความต่อเนื่องมากยิ่งขึ้นด้วยเครื่องมือชนิดอื่นๆ เช่นเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ นอกจากนี้ควรเติมสารเติมแต่งอื่นๆเช่นสารประสาน เพื่อช่วยให้การผสมระหว่างสายยางพื้นรองเท้า และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ทั้งนี้เพื่อให้สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้นั้นมีความใกล้เคียงกันกับเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ในทางการค้า

## เอกสารอ้างอิง

- เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร. เอกสารประกอบการเรียนวิชาเทคโนโลยียาง, โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2546.
- พนอ วรรณวงศ์. ผลขององค์ประกอบและภาวะการเตรียมต่อสมบัติของยางรีไซเคิลจากเศษยางเหลือใช้.วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- Hitt Gaines P.C., US Patent, 20,050,203, 197, 2005.
- Yap, C.K., US Patent, 6,047,911. 2000.
- M. Mouri, , US Patent, 6,133,413 2000.
- D. Debapriya et al. Reclaiming of ground rubber tire (GRT) by a novel reclaiming agent, *European polymer journal*. 2006, 42, 917-927.
- B. Adhikari, D. De, S. Maiti, Reclamation and recycling of waste rubber, *Progress in polymer science*, 2000, 25, 909-948.
- S. Moriwaki et al. Dehydrochlorination of poly(vinyl chloride) by microwave irradiation, *Applied thermal engineering*, 2006, 26, 745-750.
- Novotny., US Patent, 4,104,205. 1978.
- J. Clarke et al. Effect of microwave power and filler content on microwave heating and mechanical properties of carbon black filled high density polyethylene [online]. Available from:<http://www.sump4.com/publications/paper048.doc>. [2006,November 20].
- รัชดา ไสภาคะยัง, Application of microwave energy for rubber heating, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 1, 11-13 พฤษภาคม 2548 ณ โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ ซิตี้ จอมเทียน ชลบุรี.
- K. Sadhan et al. Rubber recycling, 247-294, CRC press, Boca Raton, 2005.
- ชิตีไชยดิษฐ์ สายวารี, อีัยมาน เลาะยิ และเจริญ นาคะสรรค์, การรีไซเคิลยางรีไซเคิลจากเศษยางมือยางธรรมชาติ, Research on NR วิจัยยางพารา เล่มที่ 4 โครงการวิจัยแห่งชาติ: ยางพารา ฝ่ายุคอุตสาหกรรม สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, 2552, 84-92.
- P. Rajalingam and W.E. Baker. *Rubber Chem Technol.*, 1992, 65, 908.
- G.P. Goncharuk et al., Mechanical properties of thermoplastic elastomers based on low-density polyethylene and rubber powder, *Polymer Recycling*, 2000, 5, 161.

รัจนา ศิริสุข เอกสารประกอบการเรียนวิชาการกระบวนการผลิตพอลิเมอร์, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะ  
วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ, 2546

สายฝน เจริญเผ่า พนิดา โพธิ์ทอง, โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาเคมี  
เทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

A. Tukachinsky, D. Schworm, A.I.Isayev. Devulcanization of waste tire rubber by  
powerful ultrasound, *Rubber Chemistry and Technology*, 1995, 69, 92-103.

<http://www.mea.or.th/internet/Elecvalue/tarifftype1.htm>, 2553.

ภาคผนวก

ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ได้ดำเนินการมา และผลที่ได้รับตลอดโครงการ

วัตถุประสงค์

เพื่อเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากเศษยางพั่นรองเท้ารีเคลมด้วยไมโครเวฟและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

| ขั้นตอนการดำเนินงาน                                                                                                       | เดือนที่มีกิจกรรม และการทำงาน |           |           |           |        |           |           | ผลที่ได้รับ                                                                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|--------|-----------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                           | 1-3                           | 4-6       | 7-9       | 10-12     | 13-15  | 16-18     | 19-20     |                                                                                              |
| 1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎี และรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง                                                                       | ↔<br>↔---                     |           |           |           |        |           |           | ทราบข้อมูลเบื้องต้น สามารถวางแผนจัดซื้อวัสดุ และออกแบบการทดลอง                               |
| 2. จัดหาวัสดุ สารเคมี และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง                                                                          | ↔<br>↔---                     |           |           |           |        |           |           | วัสดุที่ใช้ในการทดลอง                                                                        |
| 3. เตรียมยางรีเคลมโดยนำเศษยางพั่นรองเท้ามาผ่านกระบวนการตีวัลคาร์ในเซชัน                                                   |                               | ↔<br>↔--- |           |           |        |           |           | เศษยางพั่นรองเท้าที่ผ่านการรีเคลมด้วยไมโครเวฟ                                                |
| 4. วิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการตีวัลคาไนซ์เศษยางพั่นรองเท้าด้วยไมโครเวฟ โดยวิเคราะห์ปริมาณการเชื่อมขวาง และสัณฐานวิทยา |                               | ↔<br>↔--- |           |           |        |           |           | สภาวะที่เหมาะสมในการตีวัลคาร์ไนซ์เศษยางพั่นรองเท้าด้วยไมโครเวฟ                               |
| จัดทำรายงานความก้าวหน้า 6 เดือน                                                                                           |                               | ↔<br>↔--- |           |           |        |           |           | รายงานความก้าวหน้า 6 เดือน                                                                   |
| 5. เตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากเศษยางพั่นรองเท้ารีเคลมด้วยไมโครเวฟ และสารเคมีกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ      |                               |           | ↔<br>↔--- |           |        |           |           | เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากเศษยางพั่นรองเท้าและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำอัตราส่วนต่างๆ |
| 6. ทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้ และที่จำหน่ายในท้องตลาด      |                               |           | ↔<br>↔--- |           |        |           |           | สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์                     |
| จัดทำรายงานความก้าวหน้า 12 เดือน                                                                                          |                               |           |           | ↔<br>↔--- |        |           |           | รายงานความก้าวหน้า 12 เดือน                                                                  |
| 7. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของพลังงานไมโครเวฟ และสารเคมี ต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้                  |                               |           |           |           | ↔<br>↔ |           |           | ผลของพลังงานไมโครเวฟ และสารเคมีต่อสมบัติต่างๆเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์                      |
| 8. วิเคราะห์สูตร และสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์                                                  |                               |           |           |           | ↔<br>↔ |           |           | สูตรและสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์                                 |
| 9. ทดลองขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ตัวอย่างจากสูตรเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่มีความเหมาะสม                                         |                               |           |           |           |        | ↔<br>↔--- |           | ทดลองแล้วแต่ไม่สามารถดำเนินการได้เนื่องจากปัญหาในการขึ้นรูป                                  |
| 10. วิเคราะห์ผลเชิงวิชาการ เชิงเศรษฐศาสตร์ และสรุปผลการทดลอง                                                              |                               |           | ↔<br>↔--- |           |        |           |           | ผลงานในเชิงวิชาการ และการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์                                            |
| จัดทำรายงานสมบูรณ์ปิดโครงการ                                                                                              |                               |           |           |           |        |           | ↔<br>↔--- | รายงานฉบับสมบูรณ์                                                                            |

# เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากเศษยางพื้นรองเท้ารีเคลมด้วยไมโครเวฟ และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

รศ.ดร.ดวงดาว อาจองค์ และ อมราภรณ์ สัมพันธ์รัตน์

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน  
กรุงเทพฯ

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการเพิ่มมูลค่าและช่วยลดปริมาณขยะยางลง โดยได้ทำการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่อัตราส่วนต่าง ๆ โดยการนำเศษยางพื้นรองเท้ามาผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟที่กำลังไมโครเวฟ 90 180 270 360 และ 450 วัตต์ ที่เวลา 30 60 และ 90 วินาที และใช้เตตระเมทิลไทยแรมไดซัลไฟด์เป็นสารรีเคลม ผลการศึกษาพบว่าภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดีวัลคาไนซ์เศษยางคือที่กำลังไมโครเวฟ 360 วัตต์ เป็นเวลา 60 วินาที ค่าสัดส่วนเจลและอัตราส่วนการบวมตัวของยางที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ลดลงเมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้น สมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเพิ่มขึ้น ในทางตรงข้ามสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพลดลงเมื่อใช้เศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับการใช้สารรีเคลมมาผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยอัตราส่วนของเศษยางพื้นรองเท้าและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานคืออัตราส่วน 80:20 ในภาวะที่เศษยางพื้นรองเท้าไม่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟและมีการใช้เตตระเมทิลไทยแรมไดซัลไฟด์ 2.75 phr และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้า (Santoprene® 101-87) แล้วพบว่าความทนต่อการฉีกขาดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้นั้นมีค่าที่สูงกว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้าในขณะที่ค่าความแข็งและความทนแรงดึงนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามค่าการยืดดึง ณ จุดขาด และความทนต่อการขัดถูนั้นยังมีค่าที่ด้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้า

คำสำคัญ: ไมโครเวฟ, รีเคลม, ยางธรรมชาติ, เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์, พอลิเอทิลีน

## Abstract

Shoe sole scrap is a by-product from rubber shoe factory, which can cause an environmental problem. Therefore, the goal of this research was to reduce the amount and increase added values of rubber wastes by preparing thermoplastic elastomers (TPE) from devulcanized shoe sole scrap and low density polyethylene (LDPE) at various ratios. Shoe sole scrap was devulcanized by microwave energy at various microwave power and devulcanizing time (90, 180, 270, 360, and 450 watt and 30, 60, and 90 sec, respectively) and by using tetra methyl thiuram disulfide (TMTD) as a reclaiming agent. The degree of crosslinking was evaluated by measurement of the gel fraction and swelling ratio of devulcanized shoe sole scrap as a function of microwave power and time to identify the

optimum condition for devulcanizing shoe sole scrap. The effects of microwave energy and reclaiming agent on the mechanical, physical, and thermal properties as well as the morphology of the TPEs were studied. The results showed that the optimized condition to devulcanize shoe sole scrap by microwave energy was at 360 watt for 60 sec. The gel fraction and swelling ratio of devulcanized shoe sole scrap decreased with increasing microwave power. The mechanical and physical properties of TPEs were increased with increasing LDPE content. In contrast, the mechanical and physical properties of TPEs increased when the microwave devulcanized shoe sole scrap and reclaiming agent were both added with the LDPE. The suitable ratio for preparing the TPE from this research was 80:20 for non-microwave devulcanized shoe sole scrap and LDPE, with the addition of 2.75 phr of TMTD. The selected TPE formula was compared with commercial TPE (Santoprene® 101-87). The results showed that the tear strength of the prepared TPE was higher than that of the commercial TPE; whereas the hardness and tensile strength values were comparable with those of the commercial one. Nevertheless, it was found that the elongation at break and abrasion resistance of the prepared TPE were still lower than those of the commercial TPE.

Keywords: Microwave, reclaimed, natural rubber, thermoplastic elastomer, polyethylene

## คำนำ

อุตสาหกรรมผลิตรองเท้าแตะยางเป็นอุตสาหกรรมที่มีการผลิตเป็นจำนวนมาก และมีการเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งภายหลังจากกระบวนการผลิตจะมีเศษยางพื้นรองเท้าแตะเหลือใช้ทั้งอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้ผู้ผลิตต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น รวมทั้งเสียพื้นที่ในการจัดเก็บเศษยางพื้นรองเท้าแตะเหล่านั้นซึ่งอาจก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม การรีไซเคิลหรือการดีวัลคาไนเซชันซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในการรีไซเคิลยาง กล่าวคือเป็นวิธีการที่ทำให้ยางสามารถกลับคืนสู่สถานะพลาสติกทำให้สามารถนำมาผสมและขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ได้อีกครั้ง ดังนั้นงานวิจัยนี้จะศึกษาแนวทางและความเป็นไปได้ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากเศษยางพื้นรองเท้าแตะโดยศึกษาถึงอัตราส่วน วิธีการ และภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากเศษยางที่ผ่านการดีวัลคาไนเซชันด้วยไมโครเวฟและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำตลอดจนศึกษาถึงผลของสารรีไซเคิลที่มีต่อสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้

## วัตถุประสงค์

เพื่อเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากเศษยางพื้นรองเท้าแตะรีไซเคิลด้วยไมโครเวฟและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

## วิธีการวิจัย

### 1. วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้

#### 1.1 เศษยางพื้นรองเท้าแตะ (Shoe sole scrap)

- เศษยางพื้นรองเท้าแตะประกอบด้วยพอลิเมอร์ 3 ชนิดคือ ยางธรรมชาติ เอทิลีนไวน์ลอะซีเตตโคพอลิเมอร์ และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ มีลักษณะเป็นแผ่นยางที่มีช่องว่างมีความยืดหยุ่นสูง

#### 1.2 ผงเขม่าดำ (Carbon black)

- เป็นวัสดุกึ่งตัวนำ (Semiconductor Material) ทำหน้าที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำให้ยางเกิดความร้อนจากพลังงานไมโครเวฟซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ผงเขม่าดำขนาดอนุภาคประมาณ 95 นาโนเมตรของบริษัท JJ-Degussa Chemical ซึ่งมีชื่อทางการค้าคือ Printex XE 2B

#### 1.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low-density polyethylene)

- เม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำของบริษัท เอสซีจี เคมิคอล จำกัด เกรดอัดรีด LD1902F/FA มีความหนาแน่น 0.919 กรัม/ลบ.ซม. และมีดัชนีการหลอมไหล (Melt flow index, MFI) 2.0 กรัม/10 นาที

#### 1.4 เตตระเมทิล ไทยูแรม ไดซัลไฟด์ (Tetramethy thiuram disulfide, TMTD)

- ทำหน้าที่เป็นสารรีเคลม (reclaiming agent) ของ Fluka จากบริษัท A.C.S Thailand

#### 1.5 เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้า

- เพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้ ซึ่งในการทดลองนี้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้าคือ Santoprene® 101-87 ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท โกบอล คอนเน็คชั่นส์ จำกัด (มหาชน)

## 2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

### 2.1 ตู้ไมโครเวฟ

ทำหน้าที่ในการดีวัลคาไนเซชันเศษยางพื้นรองเท้า ไมโครเวฟรุ่น LG MS-2643C 28LL 900 วัตต์ 10 ระดับ

### 2.2 เครื่องบดบอลมิล (Ball mills)

ทำหน้าที่ในการผสมเศษยางพื้นรองเท้ากับผงเขม่าดำ เพื่อให้ผงเขม่าดำเคลือบบนชิ้นงานเศษยางพื้นรองเท้าก่อนจะนำไปเข้าสู่กระบวนการดีวัลคาไนเซชัน

### 2.3 ตู้อบชิ้นงาน

ทำหน้าที่ให้ความร้อนเพื่อระเหยสารละลายออกจากชิ้นงาน

### 2.4 เครื่องบด (Crusher machine)

ทำหน้าที่บดเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ได้จากเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งให้มีขนาดเล็กพอที่จะนำไปผสมต่อโดยใช้เครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ได้ เครื่องบดเป็นของห้างหุ้นส่วนจำกัด ณ ภัทรนันท์

### 2.5 เครื่องบดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mills)

ทำหน้าที่ในการบดและผสมเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์กับสารรีเคลมและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่อัตราส่วนต่างๆ โดยเครื่องบดสองลูกกลิ้งที่ใช้เป็นของบริษัท LABTECH engineering รุ่น LRM-S-200

## 2.6 เครื่องอัดรีดเกลียวทวินคู่(Twin-screw extruder)

ทำหน้าที่ในการผสมและอัดรีดเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ให้มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ เพื่อนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานต่อไป ซึ่งเครื่องอัดรีดเกลียวทวินคู่ที่ใช้เป็นของบริษัท Thermo PRISM รุ่น TSE-16-TC

## 2.7 เครื่องอัดแบบ(Compression molding)

ทำหน้าที่ในการขึ้นรูปชิ้นงานจากเม็ดเทอร์โมพลาสติก เพื่อนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และสัญญาณไฟฟ้าต่อไป ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องอัดแบบ LABTECH รุ่น LP-S-50

## 2.8 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆ

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ได้แก่ Universal Testing Machine (LLOYD LR 10KN) (ทดสอบความทนแรงดึง) Universal Testing Machine (Instron 446) (ทดสอบความทนการฉีกขาด) (ทดสอบความแข็ง) Abrasion tester (Taber 5150) (ทดสอบความทนการขัดถู) Scanning Electron Microscopy (JSM-4800 of JEOL Co.) (ทดสอบสัญญาณไฟฟ้า) และ Dynamic Mechanical Analyzer NETZSCH (ทดสอบสมบัติวิสโคอีลาสติก)

## 3. การดัดแปลงในเชิงกายภาพ

นำเศษยางพื้นรองเท้าที่ไม่ผ่านและผ่านการผสมกับผงเขม่าดำ (1%ของน้ำหนักเศษยางพื้นรองเท้า) โดยใช้เครื่องบดมิล(ball mills) เป็นเวลา 6 ชั่วโมงมาทำการดัดแปลงด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 90 180 270 360 และ 450 วัตต์เป็นเวลา 30 60 และ 90 วินาที ซึ่งเศษยางที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟในขั้นตอนนี้มี 2 ส่วนคือ เศษยางที่เกิดการดัดแปลงและเศษยางที่ไม่เกิดการดัดแปลงเนื่องจากไม่มีการผสมผงเขม่าดำเพื่อช่วยดูดซับคลื่นไมโครเวฟนั่นเอง

## 4. การทดสอบหาปริมาณการเชื่อมขวางของเศษยางพื้นรองเท้ารีไซเคิล

การทดสอบหาปริมาณการเชื่อมขวางของเศษยางพื้นรองเท้าและโดยการวิเคราะห์ปริมาณสัดส่วนเจล (Gel fraction) และอัตราส่วนการบวมตัว(Swelling ratio) ของยาง เป็นการวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการที่ว่า ในระหว่างการดัดแปลงในเชิงกายภาพ โมเลกุลของยางจะเกิดการแตกสลายเป็นโมเลกุลเล็กลง ดังนั้นเมื่อนำยางที่ผ่านการดัดแปลงในเชิงกายภาพมาสกัดด้วยตัวทำละลายโมเลกุลที่เกิดการแตกสลายจะมีขนาดเล็กลงนี้จะถูกสกัดเข้าไปอยู่ในเฟสของตัวทำละลาย ส่งผลให้ปริมาณสัดส่วนเจลในยางที่ผ่านการดัดแปลงในเชิงกายภาพมีปริมาณลดลงโดยในการทดลองหาปริมาณการเชื่อมขวางของเศษยางพื้นรองเท้าและในงานวิจัยนี้ทำได้โดยการนำเศษยางพื้นรองเท้า สภาวะต่างๆ มาแช่ตัวทำละลายโทลูอีนเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งข้อมูลที่ต้องบันทึกได้แก่ น้ำหนักยางก่อนดัดแปลง(W0) น้ำหนักยางดัดแปลง(W1) และน้ำหนักยางดัดแปลงหลังอบระเหยสารละลายออก(W2) ซึ่งปริมาณสัดส่วนเจลและอัตราส่วนการบวมตัว มีสมการในการคำนวณดังนี้

$$\text{ปริมาณสัดส่วนเจล} = \frac{W2}{W0} \times 100$$

$$\text{อัตราส่วนการบวมตัว} = \frac{W1 - W0}{W0}$$

## 5. การเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์

นำเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านขั้นตอนที่ 3 มาบดให้เป็นชิ้นเล็กๆด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง(two-roll mills) ที่อุณหภูมิ 60°C อัตราส่วนความเสียดทาน (friction ratio) 1:2 เป็นเวลา 40 นาที จากนั้นผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ปริมาณ 0% 10% 20% และ 30% โดยนำหนักบดผสมต่อเป็นเวลา 10 นาที จน

เศษยางพั่นรองเท้าและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนเทอร์โมพลาสติกโกลาสโทเมอร์ที่มีการเติมสารรีเคลม เตตระเมทิลไทูเรมไดซัลไฟด์ในปริมาณ 2.75 phr นั้นผสมพร้อมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ นำแผ่นเทอร์โมพลาสติกโกลาสโทเมอร์ที่ได้ไปบดด้วยเครื่องบด(crusher) เพื่อให้มีขนาดเล็กลง จากนั้นนำส่วนผสมทั้งหมดมาผ่านการผสมและขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหอนคู่ได้เป็นเทอร์โมพลาสติกโกลาสโทเมอร์ที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ (pallets) ขั้นตอนสุดท้ายคือการนำเม็ดเทอร์โมพลาสติกโกลาสโทเมอร์มาขึ้นรูปเป็นแผ่นที่มีขนาด 150×150×2 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องอัดแบบ (Compression molding) ที่อุณหภูมิ 180°C แรงดัน 100 MPa เพื่อเตรียมเป็นชิ้นทดสอบต่างๆ

## 6. การวิเคราะห์และทดสอบเทอร์โมพลาสติกโกลาสโทเมอร์

### 6.1 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกโกลาสโทเมอร์

#### 6.1.1 สมบัติความทนแรงดึง (Tensile properties)

ทดสอบความทนแรงดึงโดยใช้เครื่อง Universal testing machine LLOYD LR 100K ตามมาตรฐาน ISO 37

#### 6.1.2 สมบัติความทนการฉีกขาด(Tear strength)

ทดสอบสมบัติความทนการฉีกขาดด้วยเครื่อง Universal testing machine Instron 446 ตามมาตรฐาน ISO 34

### 6.2 สมบัติทางกายภาพของเทอร์โมพลาสติกโกลาสโทเมอร์

#### 6.2.1 ความแข็ง (hardness)

ทดสอบความแข็งตามมาตรฐาน ISO 48 โดยใช้ The international rubber hardness degrees (IRHD)

#### 6.2.2 ความทนการขัดถู (abrasion resistance)

ทดสอบความทนการขัดถูตามมาตรฐาน ASTM D4060 โดยใช้เครื่องมือ Taber model 5150 น้ำหนักและจำนวนรอบที่ใช้ขัดถู 500 กรัม และ 1,000 รอบ

#### 6.2.3 สมบัติวิสโคอีลาสติก (viscoelastic properties)

ทดสอบสมบัติวิสโคอีลาสติกด้วยเครื่องไดนามิกแมคคานิคอลแอนาไลเซอร์ (Dynamic mechanical analyzer: DMA) ด้วย dual cantilever ความถี่ 1 Hz. ขนาดชิ้นงาน 5×10×2 มิลลิเมตร ทดสอบภายใต้บรรยากาศที่เป็นไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -100 ถึง 100°C โดยมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3°C/นาที

#### 6.2.4 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกโกลาสโทเมอร์ (morphology)

วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยนำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความทนแรงดึงมาตรวจสอบและวิเคราะห์ทดสอบ ด้วยเครื่อง scanning electron microscope (SEM) รุ่น JEOL JSM-4800 ที่ 15 kV

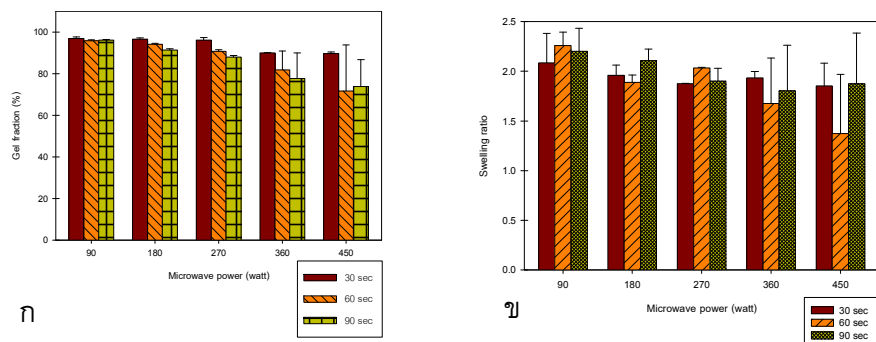
ทั้งนี้ผลการทดลองที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกโกลาสโทเมอร์ในทางการค้า

## **ผลการทดลอง**

### 1. ค่าสัดส่วนเจลและอัตราส่วนการบวมตัวของเศษยางพั่นรองเท้ารีเคลมด้วยไมโครเวฟ

ปริมาณการเชื่อมขวางของเศษยางพั่นรองเท้าสามารถวิเคราะห์ได้จากค่าสัดส่วนเจล กล่าวคือปริมาณการเชื่อมขวางของเศษยางพั่นรองเท้าลดลงเมื่อค่าสัดส่วนเจลมีค่าลดลง ดังนั้นเพื่อเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ปริมาณการเชื่อมขวางของเศษยางพั่นรองเท้ามีค่าต่ำสุด นั่นคือมีค่าสัดส่วนเจลต่ำสุดและอัตราส่วนการบวม

ตัวสูงที่สุด อันเนื่องมาจากการแตกของพันธะเชื่อมขวาง จากการทดลองในเบื้องต้นพบว่าสัดส่วนเจลและอัตราส่วนการบวมตัวของสารดีวีแอลในซีเอสยางพื้รองเท้ายี่เคลมด้วยไมโครเวฟ พบว่าปริมาณการเชื่อมขวางของซีเอสยางพื้รองเท้ายี่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใดเมื่อได้รับกำลังไมโครเวฟ เนื่องจากซีเอสยางพื้รองเท้ายี่มีความเป็นขั้วต่ำ จึงไม่สามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟแล้วก่อให้เกิดความร้อนขึ้นเพื่อทำให้การเชื่อมขวางแตกหรือขาดออกจากกันได้ ดังนั้นจึงปรับปรุงความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟโดยการผสมหรือเคลือบพื้นผิวของซีเอสยางพื้รองเท้ายี่ด้วยสารที่มีความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ดีนั่นคือ ผงเขม่าดำ (Carbon black) โดยผสมในปริมาณ 1 %ของน้ำหนักของซีเอสยางพื้รองเท้ายี่ ด้วยเครื่องบดบอลมิลผสมเป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยจากรูปที่ 1ก. แสดงผลของค่าสัดส่วนเจลของซีเอสยางพื้รองเท้ายี่หลังจากผสมหรือเคลือบผงเขม่าดำที่กัลังไมโครเวฟและเวลาต่างๆ พบว่าจากค่าสัดส่วนเจลปริมาณการเชื่อมขวางของซีเอสยางพื้รองเท้ายี่ลดลงตามกัลังไมโครเวฟและเวลาที่เพิ่มขึ้นสภาวะกัลังไมโครเวฟและเวลาที่ทำให้ปริมาณการเชื่อมขวางของซีเอสยางพื้รองเท้ายี่ต่ำลงอยู่ที่กัลังไมโครเวฟ 450 วัตต์เป็นเวลา 60 หรือ 90 วินาที และ 360 วัตต์ 90 วินาที แต่ที่ 3 สภาวะนี้ซีเอสยางพื้รองเท้ายี่ใหม่จึงทำให้มีค่าสัดส่วนเจลต่ำลง ส่งผลทำให้ไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นสภาวะในการดีวีแอลในซีเอสยางพื้รองเท้ายี่ ฉะนั้นสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าสัดส่วนเจลมีค่าต่ำและไม่ใหม่คือที่สภาวะกัลังไมโครเวฟ 360 วัตต์ ใช้เวลา 60 วินาที และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 1ข. พบว่าอัตราส่วนการบวมตัวของซีเอสยางพื้รองเท้ายี่หลังจากผสมหรือเคลือบผงเขม่าดำที่กัลังไมโครเวฟและเวลาต่างๆ ผลอันไม่คาดคิดของค่าอัตราส่วนการบวมตัวคือเมื่อกัลังไมโครเวฟและเวลามากขึ้นอัตราส่วนการบวมตัวของซีเอสยางพื้รองเท้ายี่ลดลง ซึ่งโดยทั่วไปเมื่อปริมาณการเชื่อมขวางลดลง อัตราการบวมตัวของซีเอสยางพื้รองเท้ายี่ควรมีค่ามากขึ้นผู้วิจัยตั้งข้อสงสัยเกิดจากการไหม้ของชิ้นงานทำให้น้ำหนักของซีเอสยางพื้รองเท้ายี่รีเคลมด้วยไมโครเวฟหลังแช่สารละลายมีค่าลดลง จึงส่งผลทำให้อัตราส่วนการบวมตัวลดลงได้



รูปที่ 1 ภาพแสดงผลของพลังงานไมโครเวฟที่มีผลต่อค่าสัดส่วนเจล (ก) และอัตราการบวมตัว (ข) ของซีเอสยางพื้รองเท้ายี่ผ่านการผสมหรือเคลือบรีเคลมด้วยไมโครเวฟที่กัลังไมโครเวฟและเวลาต่างๆ

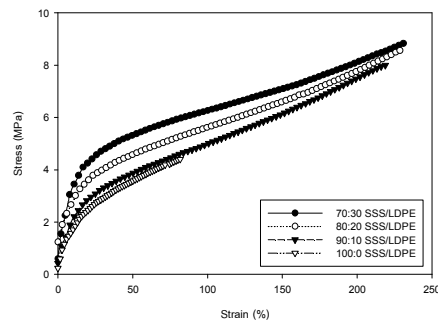
## 2. สมบัติเชิงกล(Mechanical properties)

### 2.1 ความทนแรงดึง (Tensile strength)

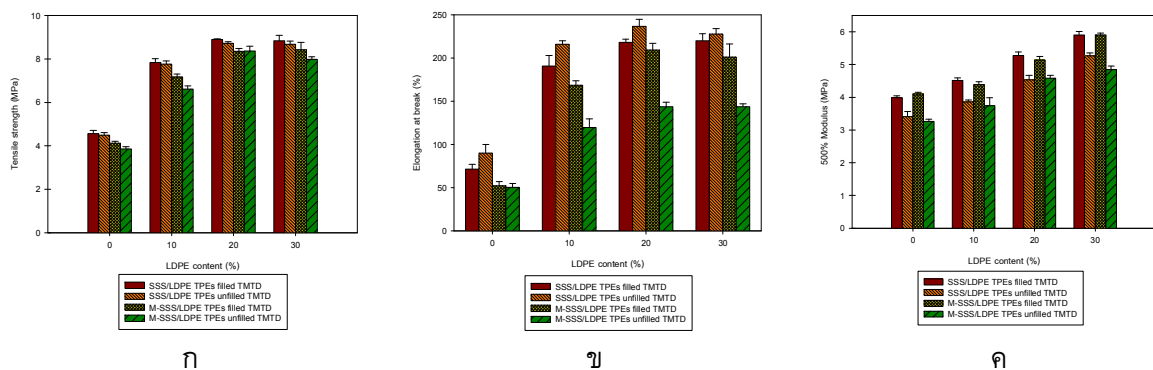
#### 2.1.1 ผลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

จากราฟรูปที่ 2 แสดงค่าความเค้นและความเครียดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วนของซีเอสยางพื้รองเท้ายี่ต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเท่ากับ 100:0 90:10 80:20 และ 70:30 พบว่าเมื่ออัตราส่วนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(LDPE) มากขึ้นค่าความเครียดและความเค้นสูงขึ้นตามลำดับเนื่องจาก LDPE มีสมบัติความเหนียวและยืดตัวดี ดังนั้นเมื่อผสม LDPE ในอัตราส่วนที่มากขึ้นทำให้ TPE ที่

เตรียมได้มีความเหนียวและยืดหยุ่นมากขึ้น นอกจากนี้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำยังทำหน้าที่เป็นตัวประสานระหว่างอนุภาคของเศษยางพื้นรองเท้า ดังนั้นสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ได้จึงมีสมบัติใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมากขึ้นไปด้วย ซึ่งผลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำต่อสมบัติความทนแรงดึง (tensile strength), การยืดถึง ณ จุดขาด (elongation at break) และมอดุลัส (50%modulus) ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์นี้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 3ก 3ข และ 3ค ตามลำดับ



รูปที่ 2 ความเค้น-ความเครียดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆระหว่างเศษยางพื้นรองเท้า (SSS) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(LDPE)



รูปที่ 3 ผลของพลังงานไมโครเวฟและเตตระเมทิลไทูแรนไดซัลไฟด์(reclaiming agent) ต่อ ก) ความทนแรงดึง(tensile strength) ข) การยืดถึง ณ จุดขาด(Elongation at break) และ ค) 500%มอดุลัส (500%modulus) ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่อัตราส่วนต่างๆ

### 2.1.2 ผลของพลังงานไมโครเวฟ

ผลของพลังงานไมโครเวฟต่อเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ต่อค่า tensile strength elongation at break และ 500%modulus แสดงดังรูปที่ 3ก 3ข และ 3ค ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าพลังงานไมโครเวฟมีผลต่อค่า tensile strength และ elongation at break ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ กล่าวคือเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการดิวลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(M-SSS/LDPE)มีค่า tensile strength และ elongation at break ต่ำกว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(SSS/LDPE)

เนื่องจากความร้อนจากพลังงานไมโครเวฟทำให้สายโซ่โมเลกุลของเอทิลีนไวนิลอะซิเตต (polyethylene vinylacetate: EVA) ที่เป็นส่วนประกอบของเศษยางพื้นรองทำให้เกิดการแตกหักที่สายโซ่หลักทำให้น้ำหนักโมเลกุลต่ำลงหรือมีปริมาณการเชื่อมขวางลดลง จึงทำให้ค่า tensile strength และ elongation at break ซึ่งเป็นค่าที่มีผลมาจากขนาดโมเลกุลของพอลิเมอร์ มีค่าที่ลดลงตามไปด้วย อย่างไรก็ตามพลังงานไมโครเวฟไม่มีผลหรือมีผลน้อยมากต่อค่ามอดุลัส (500%modulus)

### 2.1.3 ผลของเตตระเมทิลไทยูรัมไดซัลไฟด์

ผลของเตตระเมทิลไทยูรัมไดซัลไฟด์ต่อเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ต่อค่า tensile strength elongation at break และ 500%modulus แสดงดังรูปที่ 3ก 3ข และ 3ค ผลการทดลองพบว่าสารรีเคลมหรือเตตระเมทิลไทยูรัมไดซัลไฟด์(tetramethyl thiuram disulfide:TMTD) ทำให้ค่า tensile strength และ 500%elastic modulus ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท่ากับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (SSS/LDPE) มีค่าเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะค่ามอดุลัสจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด(รูปที่ 3ค) ซึ่งมีผลมาจากปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง (crosslinking reaction) ที่เกิดจากการแตกตัวของ TMTD ได้เป็นอนุมูลอิสระซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ อย่างไรก็ตามอนุมูลอิสระบนสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์อาจเกิดการทำปฏิกิริยากันเองทำให้น้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นได้และในทำนองเดียวกันพบว่าสารรีเคลม มีผลทำให้ค่า tensile strength และ 500%modulus รวมทั้งค่าelongation at break ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท่าที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (M-SSS/LDPE) มีค่ามากกว่า M-SSS/LDPE TPEs ที่ไม่ผสมสารรีเคลม ทั้งนี้อาจเกิดจากพลังงานไมโครเวฟทำให้สายโซ่โมเลกุลที่เกิดการเชื่อมขวางของเศษยางพื้นรองเท่าขาดออก ทำให้เกิดตำแหน่งที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารรีเคลมได้มากขึ้น ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า สำหรับค่า elongation at break พบว่าสารรีเคลมมีผลทำให้ค่า elongation at break ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท่าที่ผ่านและไม่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟมีแนวโน้มต่างกัน กล่าวคือค่า elongation at break ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางที่ไม่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟและผสมสารรีเคลม(SSS/LDPE TPEs filled TMTD) มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางที่ไม่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟและไม่ผสมสารรีเคลม(SSS/LDPE TPEs unfilled TMTD) เนื่องจากสารรีเคลมทำให้พันธะเชื่อมขวางของเศษยางพื้นรองเท่าเกิดการแตกขาด ส่งผลให้ค่า elongation at break ต่ำลง และดังที่ได้กล่าวไปแล้วในกรณีของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟและผสมสารรีเคลม(M-SSS/LDPE TPEs filled TMTD) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟและไม่ผสมสารรีเคลม(M-SSS/LDPE TPEs unfilled TMTD)เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟและสารรีเคลมทำให้สายโซ่โมเลกุลและพันธะเชื่อมขวางของเศษยางพื้นรองเท่าเกิดการแตกขาดขึ้น ก่อให้เกิดส่วนที่วงวโคจรต่อการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นและสารรีเคลมสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาก่อให้เกิดพันธะเชื่อมขวางขึ้นบางส่วนได้ ดังนั้นค่า elongation at break ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางที่

ผ่านการตีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟและผสมสารรีเคลม(M-SSS/LDPE TPEs filled TMTD) จึงมีค่ามากขึ้น

## 2.2 ความทนต่อการฉีกขาด

ความทนต่อการฉีกขาดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์แสดงได้ดังตารางที่ 1 พบว่าความทนต่อการฉีกขาดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของ LDPE มากขึ้น เนื่องจาก LDPE มีความเหนียวและยืดหยุ่น ประกอบกับในเศษยางพื้นรองแท้งก็มี LDPE เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยจึงทำให้เศษยางและ LDPE มีความเข้ากันได้ค่อนข้างดี จึงทำให้ความทนต่อการฉีกขาดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของเศษยางที่ผ่านการตีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟนั้นพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ LDPE ขึ้นถึง 30%wt ความทนต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้นถึง 88.75% เมื่อเทียบกับเศษยางที่ไม่มี LDPE

สำหรับพลังงานไมโครเวฟนั้นพบว่าเมื่อผลต่อความทนต่อการฉีกขาดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่อัตราส่วน LDPE เท่ากับ 0 %wt กล่าวคือพลังงานไมโครเวฟทำให้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีความทนต่อการฉีกขาดลดลง เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟทำให้สายโซ่โมเลกุลของเศษยางพื้นรองแท้งขาดส่งผลทำให้น้ำหนักโมเลกุลและความเป็นอีลาสติกของเศษยางพื้นรองแท้งลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อผสม LDPE ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น พบว่าพลังงานไมโครเวฟไม่มีผลต่อความทนต่อการฉีกขาดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ กล่าวคือค่าความทนต่อการฉีกขาดมีค่าใกล้เคียงกัน

ในส่วนของสารรีเคลมหรือเตตระเมทิลไทยแรมไดซัลไฟด์(TMTD) นั้นพบว่าเมื่อผลต่อความทนต่อการฉีกขาดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองแท้งที่ผ่านการตีวัลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟที่อัตราส่วน LDPE เท่ากับ 0 %wt เท่านั้น นั่นคือค่าความทนต่อการฉีกขาดของเศษยางพื้นรองแท้งที่ผ่านการตีวัลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟมีค่าลดลงเมื่อผสมสารรีเคลม

ตารางที่ 1 ความทนต่อการฉีกขาดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์

| LDPE content (%wt) | Tear strength (kN/m) |             |                            |             |
|--------------------|----------------------|-------------|----------------------------|-------------|
|                    | Non-devulcanized SSS |             | Microwave-devulcanized SSS |             |
|                    | unfilled TMTD        | filled TMTD | unfilled TMTD              | filled TMTD |
| 0                  | 31.50±1.25           | 31.61±0.86  | 28.59±0.80                 | 25.59±0.68  |
| 10                 | 36.77±1.12           | 36.18±1.39  | 36.07±0.95                 | 36.81±0.98  |
| 20                 | 46.10±0.89           | 44.74±0.88  | 44.20±0.78                 | 43.65±0.71  |
| 30                 | 49.52±1.08           | 48.56±0.98  | 49.63±0.79                 | 48.30±0.52  |

## 3. สมบัติทางกายภาพ(Physical properties)

### 3.1 ความแข็ง(hardness)

ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์แสดงดังตารางที่ 2 พบว่าความแข็งของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีค่ามากขึ้นเมื่ออัตราส่วน LDPE มากขึ้น เนื่องจากปริมาณของเฟส LDPE ซึ่งเป็นเฟสที่มีความแข็งมากกว่ามีอัตราส่วนเพิ่มขึ้น สำหรับ พลังงานไมโครเวฟ และสารรีเคลม (TMTD)พบว่าไม่มีผลมากนักต่อความแข็งของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์

ตารางที่ 2 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์

| LDPE content<br>(%wt) | Hardness (IRHD)      |             |                            |             |
|-----------------------|----------------------|-------------|----------------------------|-------------|
|                       | Non-devulcanized SSS |             | Microwave-devulcanized SSS |             |
|                       | unfilled TMTD        | filled TMTD | unfilled TMTD              | filled TMTD |
| 0                     | 81.4±0.49            | 80.5±0.45   | 80.0±0.19                  | 81.0±0.25   |
| 10                    | 86.6±0.20            | 87.3±0.34   | 84.3±0.25                  | 87.7±0.69   |
| 20                    | 90.7±0.30            | 91.5±0.30   | 90.7±0.23                  | 91.6±0.32   |
| 30                    | 92.4±0.17            | 93.8±0.61   | 92.3±0.19                  | 93.8±0.25   |

### 3.2 ความทนต่อการขัดถู

ความทนต่อการขัดถูของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์ จากสูตรที่มีสมบัติความทนแรงดึง(tensile strength) และการยืดถึง ณ จุดขาด(elongation at break) ดีที่สุด ซึ่งพบว่าที่อัตราส่วนระหว่างเศษยางพื้นรองเท้ากับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเท่ากับ 80:20 มีสมบัติเชิงกลดังกล่าวดีที่สุด ผลการทดสอบความทนต่อการขัดถูดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งพบว่าความทนต่อการขัดถูของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์จะทนต่อการขัดถูได้น้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์ที่ไม่ผ่านการดีวัลคาไนซ์โดยเฉพาะในกรณีที่ไม่มีสารเติมเคลมซึ่งจะมีค่า abrasion loss สูงที่สุดคือ 118 ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟเกิดการแตกหักทำให้ความแข็งแรงของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์ลดลง ความทนต่อการขัดถูจึงลดลงตามไปด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลการทดลองโดยรวมจะเห็นว่าการเติม TMTD นั้นจะให้ผลในเชิงบวกกับ TPE ที่เตรียมจากเศษยางที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟ กล่าวคือทำให้การสูญเสียน้ำหนักลดลง ทนต่อการขัดถูมากขึ้น ในขณะที่จะส่งผลในเชิงลบกับ TPE ที่เตรียมจากเศษยางที่ไม่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟนั่นคือ TPE จะเกิดการสูญเสียน้ำหนักมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

ตารางที่ 3 ความทนต่อการขัดถูของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้ากับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่อัตราส่วน 80:20

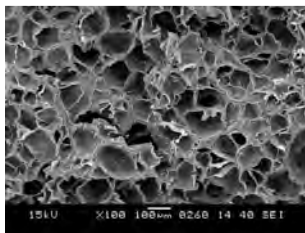
| LDPE content<br>(%wt) | Abrasion loss (mg/1000 cycle) |             |                            |             |
|-----------------------|-------------------------------|-------------|----------------------------|-------------|
|                       | Non-devulcanized SSS          |             | Microwave-devulcanized SSS |             |
|                       | unfilled TMTD                 | filled TMTD | unfilled TMTD              | filled TMTD |
| 20                    | 108                           | 114         | 118                        | 115         |

## 4. ฐานวิทยของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโทเมอร์

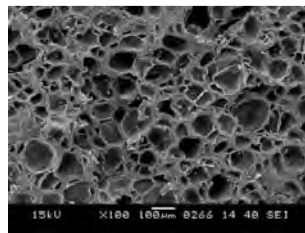
### 4.1. ฐานวิทยของเศษยางพื้นรองเท้ารีเคลมด้วยไมโครเวฟ

การศึกษาฐานวิทยของเศษยางพื้นรองเท้ารีเคลมด้วยไมโครเวฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่า จากรูปที่ 4 ภาพแสดงการเปรียบเทียบฐานวิทยของเศษยางพื้นรองเท้าก่อนและหลังรีเคลมด้วยไมโครเวฟที่กำลังไมโครเวฟ 270 และ 360 วัตต์ โดยใช้เวลาในการดีวัลคาไนซ์ 60 วินาที จากรูปที่ 4ก โครงสร้างของเศษยางพื้นรองเท้าก่อนรีเคลมมีลักษณะเป็นเซลล์คล้ายโฟม ที่ขอบเซลล์มีลักษณะการขาดคล้ายริบิ้นซึ่งเป็นสมบัติการขาดแบบพลาสติก คือมีการยืดดึงก่อนจึงขาด รูปที่ 4ข โครงสร้างของเศษยางพื้น

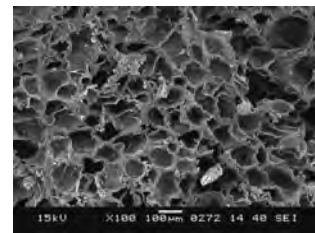
รองเท้าหลังรีเคลมด้วยกำลังไมโครเวฟ 270 วัตต์ 60 วินาที มีลักษณะของเซลล์เล็กลงอาจเกิดจากการหลอมของเทอร์โมพลาสติกที่เป็นส่วนประกอบของเศษยางพื้นรองเท้า และลักษณะการขาดของขอบเซลล์มีลักษณะขาดแบบเรียบน้อยกว่ายางก่อนรีเคลม รูปที่ 4ค โครงสร้างของเศษยางพื้นรองเท้าหลังรีเคลมด้วยกำลังไมโครเวฟ 360 วัตต์ 60 วินาที มีลักษณะของเซลล์เล็กลงมากกว่า รูปที่ 4ก และ 4ข อีกทั้งยังพบอนุภาคเล็กๆกระจายอยู่ในเซลล์ ซึ่งเกิดจากความร้อนที่ได้จากไมโครเวฟทำให้เซลล์บางส่วนเกิดการเสียรูปหรือถูกย่อยยเกิดเป็นโมเลกุลเล็กขึ้น



(ก)



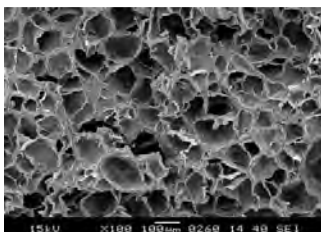
(ข)



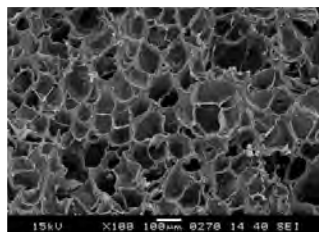
(ค)

รูปที่ 4 แสดงสัณฐานวิทยาของเศษยางพื้นรองเท้าแต่ละ ก) ไม่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟ ข) ผ่านการดีวัลคาไนซ์ที่สภาวะ 270 วัตต์ 60 วินาที ค) ผ่านการดีวัลคาไนซ์ที่สภาวะ 360 วัตต์ 60 วินาที

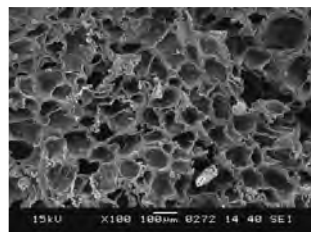
จากรูปที่ 5 แสดงภาพสัณฐานวิทยาของเศษยางพื้นรองเท้ายกก่อนและหลังรีเคลมด้วยไมโครเวฟที่กำลังไมโครเวฟ 360 วัตต์ที่เวลา 30 60 90 วินาที พบว่าผลของเวลามีผลเหมือนกันกับผลของกำลังไมโครเวฟคือเมื่อใช้เวลาในการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟมากขึ้น เซลล์ของเศษยางพื้นรองเท้าลดลง รวมทั้งมีปริมาณของโมเลกุลที่เกิดจากการเสียรูปมากขึ้นเมื่อใช้เวลามากขึ้น



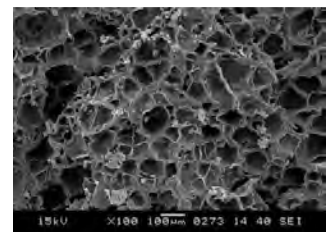
(ก)



(ข)



(ค)

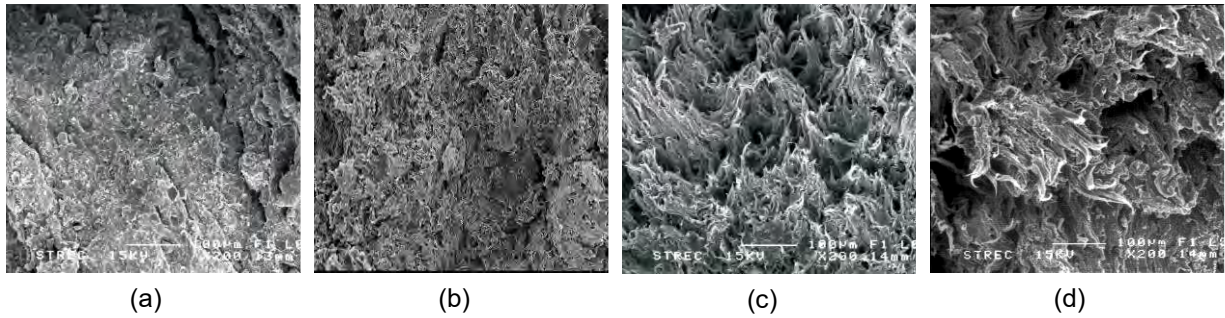


(ง)

รูปที่ 5 แสดงสัณฐานวิทยาของเศษยางพื้นรองเท้าแต่ละ (ก) ไม่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟ (ข) ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟที่สภาวะ 360 วัตต์ 30 วินาที (ค) ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟที่สภาวะ 360 วัตต์ 60 วินาที และ (ง) ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟที่สภาวะ 360 วัตต์ 90 วินาที

#### 4.2. ผลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำต่อสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์

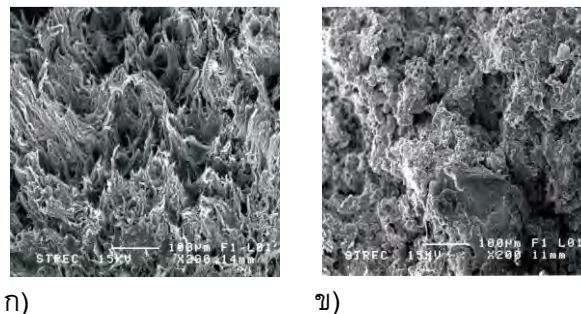
โครงสร้างสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าที่ไม่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(SSS/LDPE TPEs) ที่อัตราส่วนเท่ากับ 100:0 90:10 80:20 70:30 แสดงดังรูปที่ 6(a) (b) (c) และ(d) ตามลำดับ จากภาพ SEM พบว่าลักษณะการเสียรูปแบบพลาสติก(plastic deformation) คือมีลักษณะเป็นเส้นๆ(fibrillar structure) เพิ่มขึ้นตามปริมาณของ LDPE ที่มากขึ้น แสดงว่า TPEs ที่ได้มีความเหนียวมากขึ้นสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆที่กล่าวมาทั้งความทนแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาด



รูปที่ 6 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์(SSS/LDPE TPEs) ที่ปริมาณ LDPE ต่าง ๆ กัน (a)100:0 (b)90:10 (c)80:20 (d)70:30

#### 4.3 ผลของพลังงานไมโครเวฟต่อสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์

จากรูปที่ 7ก และ 7ข ตามลำดับ พบว่าสัณฐานวิทยาของ SSS/LDPE TPEs มีลักษณะเป็นเส้น(fibrillar structure) ที่เกิดจากการเสียรูปแบบพลาสติก(plastic deformation) และมีหลุมร่องที่เกิดจากอนุภาคของเศษยางพื้นรองเท้าที่สม่ำเสมอ ซึ่งแตกต่างกับลักษณะการเสียรูปของ M-SSS/LDPE TPEs ซึ่งมีลักษณะเป็นก้อนๆ และมีหลุมร่องที่ไม่สม่ำเสมอไม่พบลักษณะของเส้นใยหรือ fibrillar structure เหมือนกรณี SSS/LDPE TPE ซึ่งลักษณะการเสียรูปแบบพลาสติกบ่งบอกว่า SSS/LDPE TPEs ที่เตรียมได้มีความเหนียวกว่า M-SSS/LDPE TPEs เนื่องจากการดีวัลคาไนซ์เศษยางพื้นรองเท้าด้วยพลังงานไมโครเวฟทำให้น้ำหนักโมเลกุลของเศษยางพื้นรองเท้าลดลง ส่งผลให้สมบัติอีลาสติคของเศษยางพื้นรองเท้าลดลง สังเกตได้จากปริมาณการเสียรูปแบบพลาสติกลดลง ซึ่งผลของสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์สอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติความทนแรงดึง

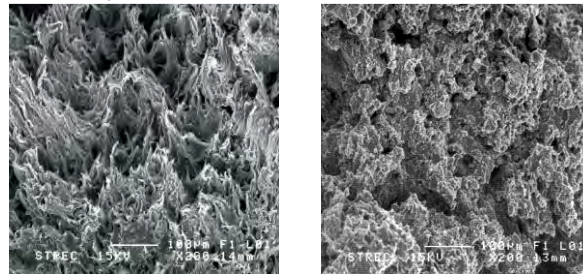


รูปที่ 7 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่อัตราส่วน 80:20 ก) ไม่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟ ข) ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟที่สภาวะ 360 วัตต์ เป็นเวลา 60 วินาที

#### 4.4 ผลของสารรีเคลมต่อสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์

โครงสร้างสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าที่ไม่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(SSS/LDPE TPEs) ที่ไม่ผสมและผสมสารรีเคลมหรือเตตระเมทิลไทูรัมไดซัลไฟด์(tetramethyl thiuramdisulfide;TMTD) แสดงดังรูปที่ 8ก และ 8ข พบว่าสารรีเคลมทำให้สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นก้อนๆ และมีหลุมร่องที่สม่ำเสมอและไม่มีลักษณะการเสียรูปแบบเส้นเหมือนเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ไม่ผสมสารรีเคลม ทั้งนี้คาดว่าเกิดจากสารรีเคลมช่วยทำให้เฟสของเศษยางพื้นรองเท้าเข้ากันได้ดีกับ LDPE มากขึ้น ส่งผลให้

สมบัติตามธรรมชาติของ LDPE ลดลง ( Yan Li, Yong Zhang, and Yinxu Zhang, 2004) ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับสมบัติความทนแรงดึงและ 50%modulus(รูปที่ 3ก และ 3ค ตามลำดับ) อย่างไรก็ตามสารรีเคลมมีผลทำให้ความทนแรงยึดดึง ณ จุดขาดลดลง(รูปที่ 3ข) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าที่ไม่ผ่านการดิวัลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟและไม่ผสม TMTD(ดังรูปที่ 8(a)) นี้ มีลักษณะการเสียรูปแบบพลาสติก(plastic deformation) ในขณะที่เมื่อเติม TMTD นั้นจะมีลักษณะการเสียรูปแบบเปราะ(brittle failure) ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 3ข คือเมื่อเติม TMTD เข้าไปจะทำให้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้มีค่าการยึดดึง ณ จุดขาดลดลง

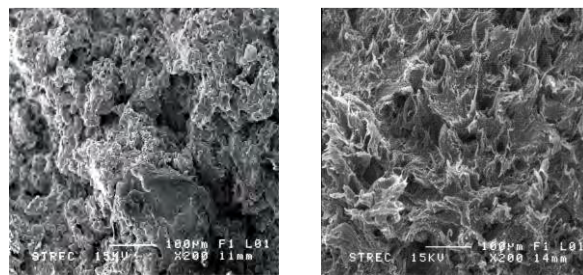


ก)

ข)

รูปที่ 8 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่อัตราส่วน(SSS/LDPE TPEs) 80:20 ก) ไม่ใส่สารรีเคลม(2.75 phr) ข) ใส่สารรีเคลม

สำหรับโครงสร้างสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการดิวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(M-SSS/LDPE TPEs) ที่ไม่ผสมและผสมสารรีเคลมหรือเตตระเมทิลไทูรัมไดซัลไฟด์(tetramethyl thiuramdisulfide;TMTD) แสดงดังรูปที่ 9ก และ 9ข พบว่าสารรีเคลมทำให้สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีลักษณะเป็นเส้น(fibrillar structure) ที่เกิดจากการเสียรูปแบบพลาสติก(plastic deformation) เนื่องจากมีปริมาณการเชื่อมขวางขึ้น ส่งผลทำให้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มีการผสม TMTD มีสมบัติเชิงกลสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ไม่ได้ผสม TMTD



ก)

ข)

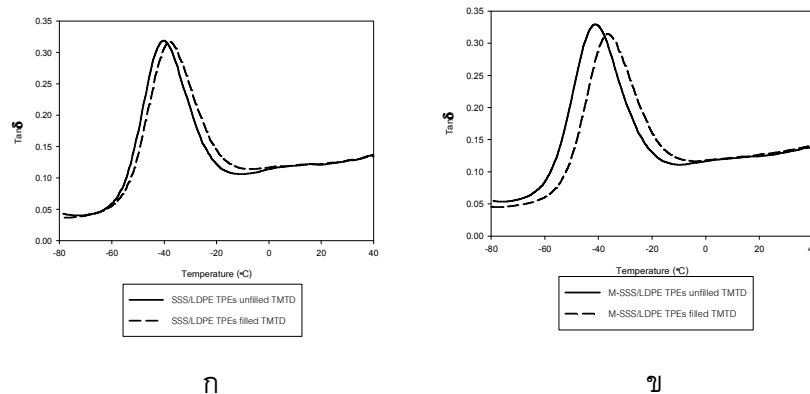
รูปที่ 9 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการดิวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(M-SSS/LDPE TPEs) ที่อัตราส่วน80:20 ก) ไม่ใส่สารรีเคลม(2.75 phr) ข) ใส่สารรีเคลม

## 5. สมบัติวิสโคอิลาสติกของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

สมบัติวิสโคอิลาสติกของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์แสดงได้ดังรูปที่ 10ก และ 10ข ซึ่งพบว่าค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วหรืออุณหภูมิกลาสทรานซิชัน(glass transition temperature( $T_g$ )) ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ผสมสารรีเคลมหรือเตตระเมทิลไทยแรมไดซัลไฟด์(TMTD) มีค่าสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ไม่ผสมสารรีเคลม ทั้งนี้อาจเนื่องจากสารรีเคลมเกิดการแตกตัวขึ้นขณะผสม ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างสายยางพื้นรองเท้าและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์เกิดการเคลื่อนที่(movement)ได้ยากขึ้น

สำหรับผลของพลังงานไมโครเวฟที่มีต่อค่า  $T_g$  นั้นในระบบที่เติมและไม่เติมสารรีเคลมนั้นให้ผลต่างกัน กล่าวคือในระบบที่ไม่เติมสารรีเคลมนั้น เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์เตรียมจากสายยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟ(M-SSS/LDPE TPEs unfilled TMTD) มีค่าต่ำกว่าเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากสายยางพื้นรองเท้าที่ไม่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟ(SSS/LDPE TPEs unfilled TMTD)เล็กน้อย ทั้งนี้อาจเกิดจากพลังงานไมโครเวฟทำให้สายโซ่โมเลกุลของสายยางพื้นรองเท้าแตกหัก ส่งผลให้โมเลกุลเกิดการเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น ทำให้ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์มีค่าลดลง

ในทางตรงกันข้าม สำหรับระบบที่มีการเติมสารรีเคลม(TMTD) นั้นพบว่าเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากสายยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟ(M-SSS/LDPE TPEs filled TMTD) มีค่าสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากสายยางพื้นรองเท้าที่ไม่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟ(SSS/LDPE TPEs filled TMTD)เล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องจากสารรีเคลมเกิดการแตกตัวขึ้นขณะผสม ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างสายยางพื้นรองเท้าและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์เกิดการเคลื่อนที่(movement)ได้ยากขึ้น ค่า  $T_g$  จึงมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 10 กราฟระหว่าง  $\tan \delta$  และอุณหภูมิ ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากสายยางพื้นรองเท้าและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ก) ไม่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟ (SSS/LDPE TPEs) และ ข) ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟ ที่อัตราส่วน 80:20

#### 6. เปรียบเทียบสมบัติระหว่าง TPE ทางการค้าและ TPE เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้า

เมื่อทำการเปรียบเทียบเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากเศษยางพื้นรองเท้าที่ไม่ผ่านการดีวัลคาร์ไบซ์ด้วยไมโครเวฟ และเติม TMTD ที่อัตราส่วนเศษยางพื้นรองเท้าต่อพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ 80:20 กับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้า Santoprene® 101-87 ผลการทดลอง (ตารางที่ 4) พบว่าความทนต่อการฉีกขาดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้นั้นมีค่าที่สูงกว่า Santoprene® 101-87 ที่ใช้ในทางการค้าในขณะที่ความทนแรงดึง และความแข็งมีค่าที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามพบว่าความยืด หยุ่น จุดขาด และความทนต่อการขัดถูนั้นต่ำกว่า ทั้งนี้คาดว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้นั้นอยู่ในรูปของวัสดุเชิงประกอบของเศษยางพื้นรองเท้าและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำซึ่งเป็นการผสมเพียงเชิงกลเท่านั้นในขณะที่เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ทางการค้านั้นอยู่ในรูปของพอลิเมอร์ผสมที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า ดังนั้น TPE ที่เตรียมได้จึงเกิดการเสียรูป ผนริเวณรอยต่อระหว่างสององค์ประกอบนี้ได้ง่ายกว่าทำให้ความความยืด หยุ่น จุดขาด และความทนต่อการขัดถูนั้นต่ำกว่า

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้กับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้า (Santoprene® 101-87)

| Properties                          | เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์(TPEs) |                                   |
|-------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
|                                     | Santoprene® 101-87               | M-SSS/LDPE TPEs filled TMTD 80:20 |
| Tensile strength, MPa               | 9.09                             | 8.90 ( $\pm 0.03$ )               |
| Elongation at break, %              | 354.32                           | 218.08 ( $\pm 3.79$ )             |
| Tear strength, N/mm.                | 3.51                             | 44.20 ( $\pm 0.78$ )              |
| Hardness, IRHD                      | 90.24                            | 91.5 ( $\pm 0.30$ )               |
| Abrasion resistance, mg/1000 cycles | 48                               | 114                               |

#### สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าพลังงานไมโครเวฟสามารถดีวัลคาร์ไบซ์เศษยางพื้นรองเท้าเมื่อผสมผงเขม่าดำได้ทำให้ปริมาณการเชื่อมขวางของยางลดลง โดยสภาวะของกำลังไมโครเวฟและเวลาที่เหมาะสมต่อการดีวัลคาร์ไบซ์เศษยางพื้นรองเท้าคือ ที่กำลังไมโครเวฟ 360 วัตต์ที่เวลา 60 วินาที จากผลการทดลองพบว่าปริมาณ LDPE ที่เพิ่มขึ้นทำให้สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีค่ามากขึ้น นอกจากนี้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำยังทำหน้าที่เป็นตัวประสานระหว่างอนุภาคของเศษยางพื้นรองเท้า และพลังงานไมโครเวฟมีผลทำให้สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีค่าลดลง ในส่วนผลของสารรีเคลม TMTD มีผลทำให้ค่าความทนแรงดึง(tensile strength)และ 500%มอดุลัสของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์(SSS/LDPE TPEs) เพิ่มขึ้นและค่าความทนแรงดึง ผนริเวณจุดขาดลดลง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อผสมสารรีเคลมหรือ TMTD กับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการดีวัลคาร์ไบซ์ด้วยไมโครเวฟและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(M-SSS/LDPE TPEs) พบว่า TMTD ทำให้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้มีความทนแรงดึง 500%มอดุลัสและค่าการยืดดึง ผนริเวณจุดขาด มากกว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ไม่ได้ผสมสารรีเคลมนอกจากนี้สารรีเคลมมีผลทำให้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีค่าอุณหภูมิกลาซทรานซิชัน(glass

transition temperature,  $T_g$ ) สูงขึ้นด้วย เมื่อทำการเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้า แล้วพบว่าความทนต่อการฉีกขาดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้นั้นมีค่าที่สูงกว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้า ในขณะที่ค่าความแข็งและความทนแรงดึงนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม ค่าการยืดดึง ณ จุดขาด และความทนต่อการขีดข่วนนั้นยังมีค่าที่ต่ำกว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้า

ดังนั้นงานวิจัยนี้สามารถเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์แบบยางพ่นร่องเท้ารีเคลมด้วยไมโครเวฟ และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่อัตราส่วน 80:20 ในภาวะที่แบบยางพ่นร่องเท้าไม่ผ่านการดิวลคาไนซ์ ด้วยไมโครเวฟและมีการใช้เตตระเมทิลไทอูเรียมไดซัลไฟด์ 2.75 phr

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถดำเนินการแล้วเสร็จลงได้ด้วยความรู้ความสามารถอย่างสูงของเจ้าหน้าที่ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดร.อรสา ขยันการ และเจ้าหน้าที่กรมวิทยาศาสตร์บริการที่ได้ให้คำปรึกษาในการทดสอบตัวอย่าง และขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ได้สนับสนุนทุนการวิจัยในครั้งนี้

### เอกสารอ้างอิง

Yan Li, Yong Zhang, and Yinxi Zhang. Morphology and mechanical properties of HDPE/SRP/elastomer composites: effect of elastomer polarity. Polymer Testing., 2004, 23, 83-90.



# เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากเศษยางพื้นรองเท้ารีไซเคิลด้วยไมโครเวฟและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ



## Thermoplastic elastomer from microwave-reclaimed shoe sole scrap and low density polyethylene

รศ.ดร.ดวงดาว อาจองค์<sup>1</sup>, และ อมราภรณ์ สัมพันธ์รัตน์<sup>1</sup>  
(ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.))

### บทคัดย่อ

เศษยางพื้นรองเท้าเป็นขยะชนิดหนึ่งที่เหลือจากระบบการผลิตรองเท้าและยางเป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดปัญหาล้างแวล้อมขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการเพิ่มมูลค่าและช่วยลดปริมาณขยะยางลง โดยได้ทำการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการดิวลาคาไนซ์ และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่อัตราส่วนต่างๆ โดยการนำเศษยางพื้นรองเท้ามาผ่านการดิวลาคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟที่กำลังไมโครเวฟ 90 180 270 360 และ 450 วัตต์ ที่เวลา 30 60 และ 90 วินาที และใช้เตตระเมทิลไฮโดรเจนไดซัลไฟด์เป็นสารรีไซเคิล จากนั้นทำการวิเคราะห์ระดับการเชื่อมขวางของยางที่ผ่านการดิวลาคาไนซ์จากค่าสัดส่วนเจลและอัตราส่วนการบวมตัวเป็นฟังก์ชันกับกำลังไมโครเวฟที่เวลาต่างๆกัน เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการดิวลาคาไนซ์เศษยางพื้นรองเท้า นอกจากนี้ยังทำการศึกษาลักษณะของพลาสมาคลื่นไมโครเวฟและสารรีไซเคิลที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และคุณสมบัติทางเคมีของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้ ผลการศึกษาพบว่าภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดิวลาคาไนซ์เศษยางคือที่กำลังไมโครเวฟ 360 วัตต์ เป็นเวลา 60 วินาที ค่าสัดส่วนเจลและอัตราส่วนการบวมตัวของยางที่ผ่านการดิวลาคาไนซ์ลดลงเมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้นสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเพิ่มขึ้น ในทางตรงข้ามสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพลดลงเมื่อใช้เศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการดิวลาคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับการใช้สารรีไซเคิลมาผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยอัตราส่วนของเศษยางพื้นรองเท้าและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานคืออัตราส่วน 80:20 ในภาวะที่เศษยางพื้นรองเท้าไม่ผ่านการดิวลาคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟและมีการใช้เตตระเมทิลไฮโดรเจนไดซัลไฟด์ 2.75 phr และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้า (Santoprene® 101-87) แล้วพบว่าความทนต่อการขีดข่วนของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้นั้นมีค่าที่สูงกว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้า ในขณะที่ค่าความแข็งแรงและความทนแรงดึงนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามค่าการยืดดึง ณ จุดขาด และความทนต่อการขีดข่วนยังมีค่าที่ต่ำกว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้า

### คำนำ

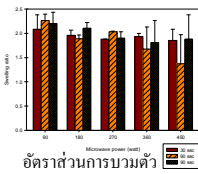
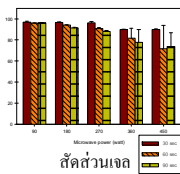
อุตสาหกรรมผลิตรองเท้าและยางเป็นอุตสาหกรรมที่มีการผลิตเป็นจำนวนมาก และมีการเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งภายหลังจากระบบการผลิตจะมีเศษยางพื้นรองเท้าและเหลือใช้ทั้งอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้ผู้ผลิตต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น รวมทั้งเสียพื้นที่ในการจัดเก็บเศษยางพื้นรองเท้าและเหล่านี้นี่ซึ่งอาจก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม การรีไซเคิลหรือการดิวลาคาไนซ์ซึ่งเป็นการนำเศษยางพื้นรองเท้าไปใช้เคลือบยาง กล่าวคือเป็นวิธีการที่ทำให้ยางสามารถกลับคืนสู่สถานะพลาสติคทำให้สามารถนำมาผสมผสมขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ได้อีกครั้ง ดังนั้นงานวิจัยนี้จะศึกษาแนวทางและความเป็นไปได้ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) จากเศษยางพื้นรองเท้าและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำตลอดจนศึกษาถึงผลของสารรีไซเคิลที่มีต่อสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้

### ผลการทดลอง

#### 1. ค่าสัดส่วนเจลและอัตราส่วนการบวมตัวของเศษยางพื้นรองเท้ารีไซเคิลด้วยไมโครเวฟ

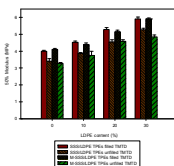
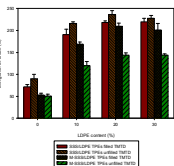
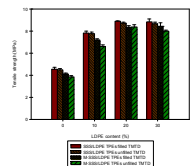
จากการทดลองในเบื้องต้นพบว่าสัดส่วนเจลและอัตราส่วนการบวมตัวของยางที่ผ่านการดิวลาคาไนซ์เศษยางพื้นรองเท้ารีไซเคิลด้วยไมโครเวฟ พบว่าปริมาณการเชื่อมขวางของเศษยางพื้นรองเท้าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับกำลังไมโครเวฟ ดังนั้นจึงปรับปรุงความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟโดยการผสมหรือเคลือบพื้นผิวของเศษยางพื้นรองเท้าด้วยผงผงคาร์บอนดำ (Carbon black) โดยผสมในปริมาณ 1 %ของน้ำหนักของเศษยางพื้นรองเท้า

ค่าสัดส่วนเจลปริมาณการเชื่อมขวางของเศษยางพื้นรองเท้าลดลงตามกำลังไมโครเวฟและเวลาที่เพิ่มขึ้นสามารถกำลังไมโครเวฟและเวลาที่ทำให้ปริมาณการเชื่อมขวางของเศษยางพื้นรองเท้าที่ลดลงโดยสภาวะที่เหมาะสมในการดิวลาคาไนซ์เศษยางพื้นรองเท้าคือที่กำลังของไมโครเวฟ 360 วัตต์ เป็นเวลานาน 30 วินาที โดยไม่เกิดการไหม้ของชิ้นงาน



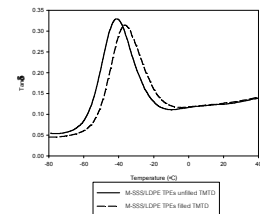
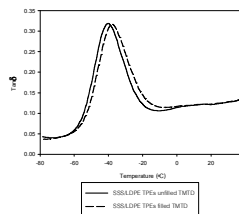
#### 2. สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

ในส่วนของสมบัติเชิงกลของ TPE ที่ได้ โดยเมื่อปริมาณของ LDPE ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ TPE มีสมบัติคล้ายคลึงกับ TPE มากขึ้นจึงส่งผลให้ค่า ความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และ 500% มอดุลัส มีค่าที่เพิ่มมากขึ้นดังรูป ที่ 1n 1x และ 1c ตามลำดับ และจากรูปดังกล่าวจะเห็นได้ว่าพลังงานไมโครเวฟ (SSS/LDPE) มีผลทำให้ค่าความทนแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดนั้นมีค่าที่ต่ำกว่า TPE ที่ผ่านการดิวลาคาไนซ์ร่วมกับไมโครเวฟ (M-SSS/LDPE) เนื่องจากปริมาณการเชื่อมขวางที่ลดลง แต่ค่า 500% มอดุลัสนั้นพบว่าไม่แตกต่างกันมากนัก นอกจากนี้ผลของ TMTD ที่เป็นส่วนรีไซเคิลนั้นพบว่าช่วยทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้นในกรณีของ TPE ที่ผ่านการดิวลาคาไนซ์ร่วมกับไมโครเวฟ แต่ค่า TPE นั้นไม่ผ่านการดิวลาคาไนซ์ร่วมกับไมโครเวฟมาก่อนพบว่า TMTD นี้จะทำให้สมบัติเชิงกลนั้นมีค่าที่ลดลง



#### 3. สมบัติวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic properties)

ดังนั้นเมื่อทำการทดสอบแล้วพบว่าที่อัตราส่วนระหว่างเศษยางพื้นรองเท้าและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 80:20 นั้นสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดซึ่งเมื่อทำการทดสอบสมบัติวิสโคอีลาสติกด้วยเทคนิค DMA พบว่าการเติมสารรีไซเคิล (TMTD) นั้นพบว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการดิวลาคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟ (M-SSS/LDPE TPEs filled TMTD) มีค่า  $T_g$  สูงกว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าที่ไม่ผ่านการดิวลาคาไนซ์ด้วยพลังงานไมโครเวฟ (SSS/LDPE TPEs filled TMTD) เล็กน้อย



#### 4. เปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้า

ทำการเปรียบเทียบเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากเศษยางพื้นรองเท้าที่ไม่ผ่านการดิวลาคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟ และเติม TMTD ที่อัตราส่วนเศษยางพื้นรองเท้าต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 80:20 กับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้า Santoprene® 101-87 พบว่าความทนต่อการขีดข่วนของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้นั้นมีค่าที่สูงกว่า Santoprene® 101-87 ที่ใช้ในการการค้า ในขณะที่ความทนแรงดึง และความแข็งแรงมีค่าที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามพบว่าความยืด ณ จุดขาด และความทนต่อการขีดข่วนมีค่าที่ต่ำกว่า ทั้งนี้คาดว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้ขึ้นอยู่กับรูปของวัสดุเชิงประกอบของเศษยางพื้นรองเท้าและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำซึ่งเป็นการผสมเพียงเชิงกลเท่านั้นแต่ในทางกลับกันกับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ทางการค้าที่นั้นอยู่ในรูปของพอลิเมอร์ผสมที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า ดังนั้นวัสดุจึงเกิดการเสียรูป ณ บริเวณรอยต่อระหว่างสององค์ประกอบนี้ได้ง่ายกว่าทำให้มีความความยืด ณ จุดขาด และความทนต่อการขีดข่วนต่ำกว่า

| Properties                          | เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPEs) |                                   |
|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|                                     | Santoprene® 101-87                | M-SSS/LDPE TPEs filled TMTD 80:20 |
| Tensile strength, Mpa               | 9.09                              | 8.90 (±0.03)                      |
| Elongation at break, %              | 354.32                            | 218.08 (±3.79)                    |
| Tear strength, N/mm                 | 3.51                              | 44.20 (±0.78)                     |
| Hardness, IRHD                      | 90.24                             | 91.5 (±0.30)                      |
| Abrasion resistance, mg/1000 cycles | 48                                | 114                               |
| ต้นทุนในการผลิต/กก.                 | 258.8752                          | 136.2375                          |

### สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าพลังงานไมโครเวฟสามารถดิวลาคาไนซ์เศษยางพื้นรองเท้าเมื่อผสมผงผงคาร์บอนดำได้ทำให้ปริมาณการเชื่อมขวางของยางลดลง โดยสภาวะของกำลังไมโครเวฟและเวลาที่เหมาะสมต่อการดิวลาคาไนซ์เศษยางพื้นรองเท้าคือที่กำลังไมโครเวฟ 360 วัตต์ที่เวลา 60 วินาที ซึ่งปริมาณ LDPE ที่เพิ่มขึ้นทำให้สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีค่ามากขึ้น นอกจากนี้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำยังทำหน้าที่เป็นตัวประสานระหว่างอนุภาคของเศษยางพื้นรองเท้า และพลังงานไมโครเวฟมีผลทำให้สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีค่าลดลง ในส่วนของผลของสารรีไซเคิล TMTD มีผลทำให้ค่าความทนแรงดึง (tensile strength) และ 500%มอดุลัสของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (SSS/LDPE TPEs) เพิ่มขึ้นและค่าความทนแรงดึง ณ จุดขาดลดลง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อผสมสารรีไซเคิลหรือ TMTD กับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากเศษยางพื้นรองเท้าที่ผ่านการดิวลาคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (M-SSS/LDPE TPEs) พบว่า TMTD ทำให้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้มีความทนแรงดึง 500%มอดุลัสและค่าการยืดดึง ณ จุดขาด มากกว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ไม่ได้ผสมสารรีไซเคิลมาผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (glass transition temperature,  $T_g$ ) สูงขึ้นซึ่งสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์คือที่อัตราส่วนเศษยางพื้นรองเท้าต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 80:20 ในภาวะที่เศษยางพื้นรองเท้าไม่ผ่านการดิวลาคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟและมีการใช้เตตระเมทิลไฮโดรเจนไดซัลไฟด์ 2.75 phr และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้า (Santoprene® 101-87) แล้วพบว่าความทนต่อการขีดข่วนของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้นั้นมีค่าที่สูงกว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้า ในขณะที่ค่าความแข็งแรงและความทนแรงดึงนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามค่าการยืดดึง ณ จุดขาด และความทนต่อการขีดข่วนมีค่าที่ต่ำกว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ในทางการค้า

<sup>1</sup> ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330