



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การออกแบบและสร้างแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟที่ผลิตจากยางพารา
Rubber Pad Railroad Crossing made from Natural Rubber (NR)

อิทธิพล แจ่มชัด

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากแหล่งเงินงบประมาณแผ่นดิน
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การออกแบบและสร้างแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟที่ผลิตจากยางพารา
Rubber Pad Railroad Crossing made from Natural Rubber (NR)

อิทธิพล แจ่มชัด

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากแหล่งเงินงบประมาณแผ่นดิน

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ การออกแบบและสร้างแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟที่ผลิตจากยางพารา
 ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 4,072,068 บาท
 ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2560 ถึง 1 กันยายน 2561

ผู้รับผิดชอบ พร้อมคณะทำงาน

1. รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด (หัวหน้าโครงการ)

หน่วยงานที่สังกัดภาควิชา เคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2. รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข (ผู้ร่วมโครงการ)

หน่วยงานที่สังกัดภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
 เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3. นายชยุต สุวรรณพิมพ์กุล (ผู้ร่วมโครงการ)

หน่วยงานที่สังกัดบริษัท เอส.เค.โพลีเมอร์ จำกัด (S.K. Polymer Co. Ltd.)

4. นายวีระชัย ตรีพรเจริญ (ผู้ร่วมโครงการ)

หน่วยงานที่สังกัดบริษัท เอ็กซ์เทนซีฟว์ รีเสิร์ช โพลีเมอร์ส จำกัด (Extensive Research Polymers Co. Ltd.)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการออกแบบและสร้างแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟต้นแบบที่ผลิตจากยางพารา โดยเน้นการศึกษาการออกแบบ และสูตรยางสำหรับทำแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟ ซึ่งเตรียมจากยางผสม (blends) ระหว่างยางคลอโรพรีน (CR) และยางธรรมชาติ (NR) การพัฒนาสูตรยางชั้นนอกของแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟ ได้มีการอ้างอิงตามมาตรฐานยางรองรางรถไฟของการรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติของยางผสมสูตร เช่น อัตราส่วนยางผสม CR/NR (75/25, 50/50 และ 25/75) ปริมาณสารตัวเติมเขม่าดำ (40, 50 และ 60 phr) สำหรับสมบัติที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความเหนียวนี้ ลักษณะการเชื่อมโยง สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และสัณฐานวิทยา จากผลการแปรอัตราส่วนยาง CR/NR พบว่าการเพิ่มปริมาณยางคลอโรพรีน จะทำให้ยางมีสมบัติที่ความทนทานต่อน้ำมัน ความต้านทานต่อโอโซน ทนต่อความร้อน นอกจากนี้ยังมีค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดที่ต่ำ มีค่ามอดูลัสกดอัดที่สูง และความต้านทานการขัดถูที่ดี จากการศึกษาสูตรยางที่เหมาะสมกับการใช้งาน คือ สูตรยางที่มีอัตราส่วนของยาง CR/NR ที่อัตราส่วน 75/25 จากผลการแปรปริมาณเขม่าดำ 40-60 phr พบว่าค่ามอดูลัสที่ 100% และค่าความแข็งกดมีค่าสูงขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง ค่าความแข็งแรงดึงก่อนและหลังการบ่มเร่งไม่มีการเปลี่ยนแปลง การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย SEM พบว่าเขม่าดำมีการกระจายตัวที่ดี จากการศึกษาปริมาณเขม่าดำที่เหมาะสมกับการใช้งาน คือ ปริมาณเขม่าดำ 60 phr ซึ่งมีสมบัติโดยรวมผ่านมาตรฐานของการรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) โดยราคาต้นทุนวัตถุดิบประมาณ 141 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งมีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์

คำสำคัญ : แผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟ, ยางคลอโรพรีน, ยางธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: Rubber Pad Railroad Crossing made from Natural Rubber (NR)

Researchers:

1. Assoc.Prof. Jarruwat Charoensuk (Faculty of Science, of Chemistry, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang)
2. Assoc.Prof. Jarruwat Charoensuk (Faculty of Faculty of Engineering, of Mechanical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang)
3. Mr. Chayood Suwanpimolkul (S.K. Polymer Co. Ltd.)
4. Mr. Veerachai Treeporncharoen (Extensive Research Polymers Co. Ltd.)

Abstract

This research work was focused on design and making a prototype of rubber railway crossing panel. Rubber formulas for producing the crossing panel were studied. Blends of chloroprene rubber (CR) and natural rubber (NR) were used as based rubbers for outside (shell) structure. As a benchmark for developing rubber formulas, standard of rail pad rubber from State Railway of Thailand (SRT) was used. Some factors affecting rubber properties were studied including CR/NR ratios (75/25, 50/50, and 25/75) and carbon black loadings (40, 50, and 60 phr). Several rubber properties were tested, such as, Mooney viscosity, cure characteristics, mechanical properties, physical properties and morphology. It was found that better resistance to oil, ozone and heat aging were achieved when CR/NR ratio was increased. Moreover, improved compression set, compression modulus, and abrasion resistance were also gained as CR loading was increased. CR/NR ratio of 75/25 seemed to be an optimum ratio for the final formula. As carbon black loading was increased from 40 to 60 phr, rubber modulus and hardness were higher, whereas, %elongation at break was decreased. Tensile strength before and after aging seemed to be unchanged. As revealed by SEM, morphology showed good carbon black dispersion. Carbon black loading of 60 phr seemed to be an optimum ratio for the final formula. Finally, optimum formula was achieved. The formula met the standard of State Railway of Thailand (SRT) with approximate cost of 141 baht/kg. It has high potentials for commercial production.

Keywords : Rubber Railway Crossing Panel, Chloroprene rubber, Natural rubber

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร และคุณอันณา สุขหอม ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือ รวมทั้งให้คำแนะนำในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ คุณชยุต สุวรรณพิมลกุล คุณฐิตาพรรณ หลีกภัย และคุณเดชาธร ฉันทรักษ์ บริษัท เอสโพลีเมอร์ จำกัด ที่ให้การสนับสนุนวัสดุวิจัยและ .ความสะดวกในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ คุณวีระชัย ตริพรเจริญ บริษัท เอ็กซ์เท็นซีฟว์ รีเสิร์ช โพลีเมอร์ส จำกัด ที่ให้การสนับสนุน ค่าปรึกษา และคำแนะนำในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ คุณชญาภา นิ่มสุวรรณ นักวิเคราะห์อาวุโส หน่วยเฉพาะทางด้านยางธรรมชาติ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ได้ช่วยเหลือในการสืบค้นมาตรฐานการทดสอบในการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ คุณอรรรถพล เก่าประเสริฐ วิศวกรกำกับการกองทางถาวร ศูนย์ทางถาวร ฝ่ายการช่างโยธา การรถไฟแห่งประเทศไทย ที่ได้ให้คำปรึกษาในการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่อาคารฝึกปฏิบัติการและเทคโนโลยีพอลิเมอร์ ที่อำนวยความสะดวก และให้ความช่วยเหลือ รวมทั้งให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ภาควิชาเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวก ในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จไปได้ด้วยดี และบุคลากรอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวมา คณะผู้จัดทำ จึงขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

คณะวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	6
1.3 ขอบเขต.....	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR).....	8
2.2 ยางสังเคราะห์ (Synthetic rubber, SR).....	10
2.3 ยางคลอโรพรีน (Chloroprene rubber, CR).....	10
2.4 สารเคมีสำหรับยาง (Additives).....	11
2.4.1 สารทำให้ยางคงรูปหรือสารวัลคาไนซิ่ง (Vulcanizing agents).....	10
2.4.2 สารเร่งปฏิกิริยายางคงรูป (Vulcanization accelerators).....	12
2.4.3 สารกระตุ้นสารเร่งปฏิกิริยายางคงรูป (Accelerator activators).....	13
2.4.4 สารตัวเติม (Fillers).....	14
2.4.5 สารพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers).....	13
2.4.6 สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (Protective agents).....	16
2.4.7 สารอื่น ๆ	17
2.5 กระบวนการผลิต (Processing).....	17
2.6 กระบวนการผสมยางกับสารเคมี (Compounding).....	18
2.7 การทดสอบสมบัติของยาง.....	19
2.7.1 การทดสอบคุณภาพยางดิบ	19
2.7.2 การทดสอบสมบัติในกระบวนการผลิต	19
2.7.3 การทดสอบสมบัติของยางคงรูป.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7.4 การทดสอบสัณฐานวิทยา.....	26
2.8 ตัวอย่างผู้ผลิตแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟในต่างประเทศ	27
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	35
3.1 ยางและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	35
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	36
3.3 วิธีการทดสอบ	37
3.3.1 ขั้นตอนการผสมยางและเตรียมชิ้นงานทดสอบ	37
3.3.2 ศึกษาสูตรยางและการบดยางผสมสารเคมี	40
3.4 การทดสอบยางผสมสูตร.....	42
3.4.1 ความหนืดมูนี่	42
3.4.2 เวลาเชื่อมโยงของยางผสมสูตร.....	42
3.4.3 การเชื่อมโยงยาง	42
3.4.4 ความแข็งกด	42
3.4.5 ความแข็งแรงดึง.....	43
3.4.6 มอดุลัสกดอัด.....	44
3.4.7 ความต้านทานต่อการฉีกขาด	44
3.4.8 ทดสอบสมบัติหลังเร่งการเสื่อมอายุ	45
3.4.9 การยุบตัวเนื่องจากแรงกด	46
3.4.10 การยืดตัวเนื่องจากแรงดึง.....	47
3.4.11 ความต้านทานต่อการเสียดสีขัดถู.....	48
3.4.12 ความต้านการลื่น	48
3.4.13 ความต้านทานต่อโอโซน	44
3.4.14 ความทนทานต่อน้ำมัน.....	50
3.4.15 สภาพต้านทานไฟฟ้า.....	51
3.4.16 สัณฐานวิทยา.....	52
3.5 การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	52
3.5.1 การตั้งค่าคุณสมบัติวัสดุ (Material Properties) ของแบบจำลอง.....	52
3.5.2 การตั้งค่าจุดสัมผัส (Contacts) ของแบบจำลอง	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.3 การตั้งค่าสภาวะแวดล้อม (Boundary Condition).....	53
3.5.4 อัตราส่วนความปลอดภัย (Safety Factor).....	55
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	57
4.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างยางคลอโรพรีนต่อยางธรรมชาติ	58
4.1.1 สมบัติเชิงกลก่อนบ่มเร่งที่มีอัตราส่วนยางผสม CR/NR ที่ต่างกัน	58
4.1.2 สมบัติเชิงกลหลังบ่มเร่งที่มีอัตราส่วนยางผสม CR/NR ที่ต่างกัน.....	63
4.1.3 สมบัติทางกายภาพที่มีอัตราส่วนยางผสม CR/NR ที่ต่างกัน	71
4.1.3.1 ความทนทานต่อน้ำมัน	71
4.1.3.2 สภาพต้านไฟฟ้า	72
4.1.3.3 ความต้านทานต่อโอโซน	73
4.1.4 การศึกษาสัณฐานวิทยาที่มีอัตราส่วนยางผสม CR/NR ที่ต่างกัน	74
4.2 การศึกษาผลของการเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติในยางผสมสูตรที่มีปริมาณเขม่าดำ ที่ต่างกัน	75
4.2.1 สมบัติเชิงกลก่อนบ่มเร่งที่มีอัตราส่วนยางผสม CR/NR และเขม่าดำที่ต่างกัน	76
4.2.2 สมบัติเชิงกลหลังบ่มเร่งที่มีอัตราส่วนยางผสม CR/NR และเขม่าดำที่ต่างกัน	81
4.2.3 สมบัติทางกายภาพที่มีอัตราส่วนยางผสม CR/NR และเขม่าดำที่ต่างกัน	89
4.2.3.1 ความทนทานต่อน้ำมัน	90
4.2.3.2 สภาพต้านไฟฟ้า	91
4.2.4 การศึกษาสัณฐานวิทยาที่มีอัตราส่วนยางผสม CR/NR และเขม่าดำที่ต่างกัน	91
4.3 สูตรสูตรที่เหมาะสมและสมบัติของแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟ	94
4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ในการทำแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟ..	96
4.5 ผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	97
4.5.1 การเสีรูปของแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟ	97
4.5.2 การเสีรูปของหมอนคอนกรีต	99
4.5.3 การเสีรูปของแผ่นโลหะรองแผ่นยาง	102
4.5.4 การเสีรูปของแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟแบบอื่นๆ (การเสีรูปในแนวแกน X).....	104
4.5.5 Equivalent strain ของแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟ	105
4.5.6 Maximum principle stress ของหมอนคอนกรีต	107

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5.7 Maximum von-mises stress ของแผ่นโลหะรองยาง.....	110
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	112
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	112
5.2 ข้อเสนอแนะ	115
บทที่ 6 สรุปผลผลิตงานวิจัย.....	116
เอกสารอ้างอิง.....	119
ภาคผนวก	124
ภาคผนวก ก.....	125
สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย.....	128
ข้อมูลประวัติผู้วิจัย	129



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางมาตรฐานแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟของบริษัท HiRAIL	28
3.1 สมบัติบางประการของยางคลอโรพรีนที่ใช้ในงานวิจัย	36
3.2 สมบัติบางประการของยางธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัย	36
3.3 สมบัติบางประการของน้ำมันชนิดเกรด SAE 40 ที่ใช้ในงานวิจัย	36
3.4 สรุปมาตรฐานแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟและสมบัติที่คาดหวัง	40
3.5 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษา	41
3.6 คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์	53
3.7 คุณสมบัติของยางที่ใช้ในการวิเคราะห์	53
4.1 ผลการทดสอบความต้านทานต่อโอโซน	73
4.2 สมบัติของแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟที่ทดสอบได้	95
4.3 ต้นทุนวัตถุดิบของแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟที่ทำจากยางคลอโรพรีนและ ยางธรรมชาติ	96
5.1 สรุปสูตรเบื้องต้นในการทำแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟ	112
5.2 การเปรียบเทียบมาตรฐานของแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟที่ได้จากงานวิจัย กับผู้ผลิตเชิงพาณิชย์ของบริษัท HiRAIL	113
5.3 ตารางสรุปผลการวิเคราะห์ขนาดการเสีรูปของแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	114
5.4 ตารางสรุปค่าความปลอดภัยของแบบจำลอง	114
ก.1 ผลการทดสอบค่าแรงเสียดทาน	125

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ยางพารา.....	1
1.2 การขนส่งทางรถไฟ	2
1.3 เส้นทางรถไฟในประเทศไทย	3
1.4 ตัวอย่างการชำรุดของแผ่นทางผ่านจุดตัดทางรถไฟจากท่อนไม้และแผ่นคอนกรีต	4
1.5 ตัวอย่างการออกแบบแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟที่ผลิตจากยางคลอโรพรีน และยางธรรมชาติในงานวิจัยนี้	5
2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ	8
2.2 การแยกชั้นของน้ำยางสดหลังจากผ่านกระบวนการหมุนเหวี่ยง.....	9
2.3 แบบจำลองอนุภาคยางธรรมชาติ.....	9
2.4 สูตรโครงสร้างของยางคลอโรพรีน	10
2.5 ภาพโครงสร้างของเขม่าดำหรือ Carbon black.....	14
2.6 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางโดยทั่วไป	18
2.7 กราฟการวัลคาไนเซชันที่วัดได้จากเครื่อง ODR.....	20
2.8 การทดสอบมอดุลัสกดอัด.....	22
2.9 DIN Abrasion Resistance Test Machine	24
2.10 British Pendulum Tester (BPT).....	25
2.11 เครื่องทดสอบสภาพต้านทานไฟฟ้า	26
2.12 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง SEM.....	27
2.13 ตัวอย่างแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟของบริษัท HIRAIL.....	28
2.14 ตัวอย่างแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟของบริษัท STRAIL.....	29
2.15 ตัวอย่างแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟของบริษัท Trelleborg	30
2.16 ตัวอย่างแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟของบริษัท Rosehill Rail.....	30
3.1 แผ่นผังการผสมและเตรียมชิ้นงาน.....	39
3.2 ชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบลล์	43
3.3 ลักษณะชิ้นงานทดสอบมอดุลัสกดอัด	44
3.4 ชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด	45
3.5 ลักษณะชิ้นงานทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงกด.....	46
3.6 ลักษณะชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อการเสียดสีขัดถู	48
3.7 องค์ประกอบของ British Pendulum Tester (BPT).....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.8 วงจรการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร	51
3.9 องค์ประกอบของแบบจำลอง	52
3.10 Fixed Support.....	53
3.11 แรงกระทำจุดที่ 1 บริเวณแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวนอก.....	54
3.12 แรงกระทำจุดที่ 2 บริเวณแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวในใกล้กับรางรถไฟ.....	54
3.13 แรงกระทำจุดที่ 3 บริเวณกึ่งกลางแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน	54
3.14 แรงกระทำจุดที่ 4 บริเวณใกล้กับจุดต่อระหว่างแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน	55
3.15 แรงกระทำจุดที่ 5 บริเวณจุดต่อระหว่างแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน	55
4.1 แผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟ	57
4.2 ค่าความแข็งแรงดึง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr.....	58
4.3 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr.....	59
4.4 ค่ามอดูลัสที่ 100% แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr	59
4.5 ค่าความแข็งกด แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr	60
4.6 ค่ามอดูลัสกดอัดที่ 20% Strain แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr .	60
4.7 ค่าปริมาตรสูญเสียดังกล่าวจากการเสียดสีขัดถู แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr.....	61
4.8 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr .	61
4.9 ค่าความแข็งแรงดึงหลังบ่มเร่ง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr....	63
4.10 ค่าร้อยละความแข็งแรงดึงที่ยังคงอยู่ แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr	63
4.11 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดหลังบ่มเร่ง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr	64
4.12 ค่าร้อยละร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่ยังคงอยู่ แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr	64
4.13 ค่ามอดูลัสที่ 100% หลังบ่มเร่ง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr	65
4.14 ค่าร้อยละมอดูลัสที่ 100% ที่ยังคงอยู่ แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr.....	65
4.15 ค่าความแข็งกดหลังบ่มเร่ง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.16 ค่าร้อยละความแข็งแรงที่ยังคงอยู่ แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr	66
4.17 ค่ามอดุลัสกดอัดที่ 20% Strain หลังปมเร่ง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณ เขม่าดำ 60 phr	67
4.18 ค่าร้อยละมอดุลัสกดอัดที่ 20% Strain ที่ยังคงอยู่ แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr	67
4.19 ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกด แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr ...	68
4.20 ค่าการยืดตัวเนื่องจากแรงดึง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr....	68
4.21 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดหลังปมเร่ง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณ เขม่าดำ 60 phr	69
4.22 ค่าร้อยละความต้านทานต่อการฉีกขาดที่ยังคงอยู่ แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr	69
4.23 ค่าร้อยละการบวมตัวของยางในน้ำมัน แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr.....	71
4.24 ค่าสภาพต้านไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 1.00 ± 0.01 V แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr.....	72
4.25 รอยแตกขณะยืด 20% จากการทดสอบความต้านทานต่อโอโซน แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr.....	73
4.26 สันฐานวิทยาของยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 75/25 ปริมาณเขม่าดำ 60 phr	74
4.27 สันฐานวิทยาของยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 50/50 ปริมาณเขม่าดำ 60 phr	74
4.28 สันฐานวิทยาของยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 25/75 ปริมาณเขม่าดำ 60 phr	75
4.29 ความหนืดมูนนี่ (ML 1 + 4 (100 °C)) ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr.....	76
4.30 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณ เขม่าดำ 40 – 60 phr	77
4.31 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr	77
4.32 ค่ามอดุลัสที่ 100% ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณ เขม่าดำ 40 – 60 phr	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.33 ค่าความแข็งกดของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr.....	78
4.34 ค่ามอดุลัสกดอัดที่ 20% Strain ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr	79
4.35 ค่าปริมาตรสูญเสียจากการเสียดสีขัดถูของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr.....	79
4.36 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr	80
4.37 ค่าความแข็งแรงดึงหลังบ่มเร่งของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr	81
4.38 ค่าร้อยละความแข็งแรงดึงที่คงอยู่ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr	82
4.39 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดหลังบ่มเร่งของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr.....	82
4.40 ค่าร้อยละร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่คงอยู่ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr.....	83
4.41 ค่ามอดุลัสที่ 100% หลังบ่มเร่งของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr	83
4.42 ค่าร้อยละมอดุลัสที่ 100% ที่คงอยู่ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr	84
4.43 ค่าความแข็งกดหลังบ่มเร่งของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr	84
4.44 ค่าร้อยละความแข็งกดที่คงอยู่ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr	85
4.45 ค่ามอดุลัสกดอัดที่ 20% Strain หลังบ่มเร่งของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr.....	85
4.46 ค่าร้อยละมอดุลัสกดอัดที่ 20% Strain ที่ยังคงอยู่ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr.....	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.47 ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเคมีดำ 40 – 60 phr	86
4.48 ค่าการยืดตัวเนื่องจากแรงดึงของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเคมีดำ 40 – 60 phr	87
4.49 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดหลังบ่มเร่งของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเคมีดำ 40 – 60 phr.....	87
4.50 ค่าร้อยละความต้านทานต่อการฉีกขาดที่ยังคงอยู่ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเคมีดำ 40 – 60 phr.....	88
4.51 ค่าร้อยละการบวมตัวของยางในน้ำมัน ในการทดสอบความทนทานต่อน้ำมัน ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเคมีดำ 40 – 60 phr	90
4.52 ค่าสภาพต้านไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 1.00 ± 0.01 V ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเคมีดำ 40 – 60 phr	91
4.53 สันฐานวิทยาของยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 75/25 ปริมาณเคมีดำ 60 phr	92
4.54 สันฐานวิทยาของยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 75/25 ปริมาณเคมีดำ 50 phr	92
4.55 สันฐานวิทยาของยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 75/25 ปริมาณเคมีดำ 40 phr	92
4.56 สันฐานวิทยาของยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 50/50 ปริมาณเคมีดำ 60 phr	93
4.57 สันฐานวิทยาของยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 50/50 ปริมาณเคมีดำ 50 phr	93
4.58 สันฐานวิทยาของยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 50/50 ปริมาณเคมีดำ 40 phr	93
4.59 การยุบตัวของแผ่นยาง จุดที่ 1 บริเวณแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวนอก.....	97
4.60 การยุบตัวของแผ่นยาง จุดที่ 2 บริเวณแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวในใกล้ กับรางรถไฟ.....	97
4.61 การยุบตัวของแผ่นยาง จุดที่ 3 บริเวณกึ่งกลางแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน	97
4.62 การยุบตัวของแผ่นยาง จุดที่ 4 บริเวณใกล้กับจุดต่อระหว่างแผ่นยางข้ามจุดตัด	98
4.63 การยุบตัวของแผ่นยาง จุดที่ 5 บริเวณจุดต่อระหว่างแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน	98
4.64 การเสียรูปของหมอนคอนกรีต จุดที่ 1 บริเวณแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวนอก.....	99
4.65 การเสียรูปของคอนกรีตตัวนอก จุดที่ 1 บริเวณแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวนอก	99
4.66 การเสียรูปของหมอนคอนกรีต จุดที่ 2 บริเวณแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน ใกล้กับรางรถไฟ.....	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.67 การเสีयरูปของหมอนคอนกรีต จุดที่ 3 บริเวณกึ่งกลางแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟ ตัวใน	100
4.68 การเสีयरูปของหมอนคอนกรีต จุดที่ 4 บริเวณใกล้กับจุดต่อระหว่างแผ่นยาง ข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน.....	101
4.69 การเสีयरูปของหมอนคอนกรีต จุดที่ 5 บริเวณจุดต่อระหว่างแผ่นยางข้ามจุดตัด ทางรถไฟตัวใน.....	101
4.70 การเสีयरูปของแผ่นโลหะรองแผ่นยาง จุดที่ 2 บริเวณแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน ใกล้กับรางรถไฟ.....	102
4.71 การเสีयरูปของแผ่นโลหะรองแผ่นยาง จุดที่ 3 บริเวณกึ่งกลางแผ่นยางข้าม จุดตัดทางรถไฟตัวใน	102
4.72 การเสีयरูปของแผ่นโลหะรองแผ่นยาง จุดที่ 4 บริเวณใกล้กับจุดต่อระหว่างแผ่นยางข้าม จุดตัดทางรถไฟตัวใน	103
4.73 การเสีयरูปของแผ่นโลหะรองแผ่นยาง จุดที่ 5 บริเวณจุดต่อระหว่างแผ่นยางข้ามจุดตัด ทางรถไฟตัวใน.....	103
4.74 การแยกตัวของของแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน จุดที่ 4 บริเวณใกล้กับจุดต่อ ระหว่างแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน	104
4.75 การแยกตัวของของแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน จุดที่ 5 บริเวณจุดต่อ ระหว่างแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน	105
4.76 Equivalent strain ของแผ่นยาง จุดที่ 1 บริเวณแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวนอก	105
4.77 Equivalent strain ของแผ่นยาง จุดที่ 2 บริเวณแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน ใกล้กับรางรถไฟ.....	106
4.78 Equivalent strain ของแผ่นยาง จุดที่ 3 บริเวณกึ่งกลางแผ่นยางข้าม จุดตัดทางรถไฟตัวใน	106
4.79 Equivalent strain ของแผ่นยาง จุดที่ 4 บริเวณใกล้กับจุดต่อระหว่างแผ่นยาง ข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน.....	106
4.80 Equivalent strain ของแผ่นยาง จุดที่ 5 บริเวณจุดต่อระหว่างแผ่นยางข้าม จุดตัดทางรถไฟตัวใน	107
4.81 Maximum principle stress ของหมอนคอนกรีต จุดที่ 1 บริเวณแผ่นยางข้าม จุดตัดทางรถไฟตัวนอก	107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.82 Maximum principle stress ของหมอนคอนกรีต จุดที่ 2 บริเวณแผ่นยาง ข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวในใกล้กับรางรถไฟ.....	108
4.83 Maximum principle stress ของหมอนคอนกรีต จุดที่ 3 บริเวณกึ่งกลางแผ่นยาง ข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน.....	108
4.84 Maximum principle stress ของหมอนคอนกรีต จุดที่ 4 บริเวณใกล้กับจุดต่อ ระหว่างแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน.....	109
4.85 Maximum principle stress ของหมอนคอนกรีต จุดที่ 5 บริเวณจุดต่อระหว่าง แผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน.....	109
4.86 Maximum von-mises stress ของแผ่นโลหะรองแผ่นยาง จุดที่ 2 บริเวณแผ่นยาง ข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวในใกล้กับรางรถไฟ.....	110
4.87 Maximum von-mises stress ของแผ่นโลหะรองแผ่นยาง จุดที่ 3 บริเวณกึ่งกลาง แผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน.....	110
4.88 Maximum von-mises stress ของแผ่นโลหะรองแผ่นยาง จุดที่ 4 บริเวณใกล้กับ จุดต่อระหว่างแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน.....	111
4.89 Maximum von-mises stress ของแผ่นโลหะรองแผ่นยาง จุดที่ 5 บริเวณจุดต่อ ระหว่างแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน.....	111
6.1 ตัวอย่างแม่พิมพ์.....	117
6.2 ตัวอย่างชิ้นงานยางรองรางรถไฟ.....	118
ก.1 การเกิดแรงเสียดทานระหว่างล้อยางกับผิวทาง.....	126
ก.2 องค์ประกอบของแรงที่ส่งผลต่อค่าความเสียดทาน.....	126
ก.3 ลักษณะพื้นผิวที่ส่งผลต่อค่าความเสียดทาน.....	127

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ราคายางธรรมชาติและยางสังเคราะห์มีความเกี่ยวข้องกับสถานการณ์หลายอย่าง รวมถึงราคาน้ำมันในตลาดโลก เมื่อน้ำมันราคาแพงทำให้ราคายางสังเคราะห์แพงตามไปด้วย ส่งผลให้หลายประเทศรวมทั้งประเทศไทยหันไปส่งเสริมให้ปลูกยางธรรมชาติหรือยางพาราภายในประเทศมากขึ้น เพื่อลดการนำเข้ายางสังเคราะห์ แต่พอราคาน้ำมันลดลงราคายางสังเคราะห์ก็ลดลงตาม แต่ปริมาณการผลิตยางพารายังคงมากและเกินความต้องการของตลาด ทำให้ราคายางพาราดกต่ำ ซึ่งเกิดขึ้นเป็นระยะ ๆ ปริมาณการผลิตยางพารา ตั้งแต่ช่วงปี 2554 – 2560 [1] ทำให้เกิดความไม่สมดุลกัน ซึ่งการใช้ยางพาราในประเทศไทยน้อยลงเมื่อเทียบกับผลผลิต ประเทศไทยผลิตยางพาราราว 4.5 ล้านตันต่อปี มีการใช้ยางพาราในประเทศเพียง 0.6 ล้านตันต่อปี ที่เหลือทำการส่งออก ซึ่งทำให้ราคายางพาราของประเทศไทยนั้นต้องขึ้นอยู่กับราคากลางโลก โดยประเทศไทย อินโดนีเซีย และมาเลเซีย ถือว่าเป็นประเทศผู้ผลิตยางพารารายใหญ่ของโลก มีพื้นที่กรีดยางพารารวมกันมากกว่า 50 ล้านไร่ คิดเป็น ร้อยละ 62 ของเนื้อที่กรีดยางพาราของโลก มีผลผลิตรวม 8.6 ล้านตันต่อปี คิดเป็นร้อยละ 63 ของผลผลิตโลก [1] ซึ่งแนวทางการแก้ไขปัญหายางพาราของรัฐบาล เช่น ส่งเสริมให้เกษตรกรชาวสวนยางมีการประกอบอาชีพเสริม ส่งเสริมให้มีการใช้ยางพาราเพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ภายในประเทศให้มากขึ้น เช่น การสร้างถนน ลานกีฬา ถุงมือยาง เป็นต้น



ภาพที่ 1.1 ยางพารา [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การขนส่งทางระบบราง หรือการขนส่งทางรถไฟ เกิดขึ้นเป็นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2429 [3] ต่อมา เมื่อวันที่ 26 มีนาคม พ.ศ. 2439 จึงได้มีพิธีเปิดการเดินรถไฟระหว่างกรุงเทพฯ – อยุธยา และได้ถือเอาวันนั้นเป็นวันสถาปนากิจการรถไฟหลวงอย่างเป็นทางการ สำหรับการขนส่งทางรางเป็นรูปแบบการขนส่งระบบโลจิสติกส์ ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ยกระดับความสามารถทางการแข่งขันทาง การค้าการลงทุนของแต่ละธุรกิจ เพราะถือเป็นต้นทุนสำคัญของผู้ประกอบการ ทั้งในภาคเกษตร อุตสาหกรรม และการบริการ ข้อดีของการขนส่งทางรถไฟ คือ สามารถขนส่งสินค้าได้ครั้งละจำนวนมาก จึงทำให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งต่อหน่วยต่ำกว่าการขนส่งในรูปแบบอื่น ๆ อีกทั้งก่อให้เกิดมลภาวะน้อยกว่าทางถนน สินค้าที่นิยมขนส่งจึงมักเป็นสินค้าที่มีมูลค่าต่ำ และน้ำหนักมาก ๆ เช่น ปูนซีเมนต์ ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม เป็นต้น ส่วนข้อเสียของการขนส่งทางรถไฟ คือ ใช้ระยะเวลาในการเดินทางนาน บรรจุภัณฑ์ของสินค้าจะต้องสามารถทนต่อแรงกระแทกสูงได้ เพราะต้องมีการขนถ่ายเข้าจากสถานีรถไฟไปยังสถานที่ปลายทาง [4]



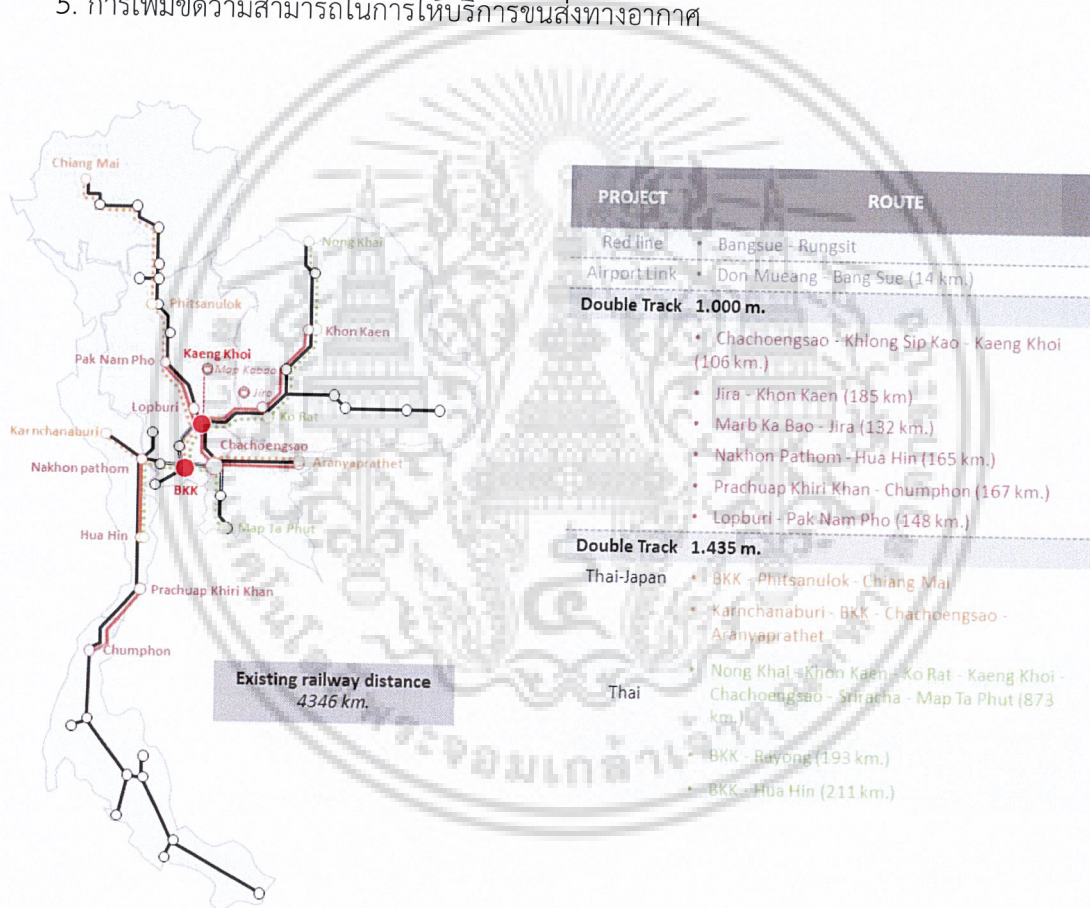
ภาพที่ 1.2 การขนส่งทางรถไฟ [5]

สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ได้จัดทำยุทธศาสตร์การพัฒนา ระบบโลจิสติกส์ของประเทศไทยเป็นครั้งแรกเมื่อปี 2548 [4] และมีการพัฒนาปรับปรุงรายละเอียดต่าง ๆ เรื่อยมาจนกระทั่งปี 2552 ตามแผนยุทธศาสตร์การพัฒนา ระบบโลจิสติกส์ของประเทศไทย 2550 – 2554 ที่ได้กำหนดให้ประเทศไทยมีระบบโลจิสติกส์ที่ได้มาตรฐานสากล เพื่อสนับสนุนการเป็น ศูนย์กลางธุรกิจและการค้าของภูมิภาคอินโดจีน โดยมุ่งลดต้นทุนโลจิสติกส์ เพิ่มขีดความสามารถของ ธุรกิจในการตอบสนองความต้องการของลูกค้า เพิ่มความปลอดภัย ความเชื่อถือในกระบวนการนำส่ง สินค้าและบริการ รวมทั้งการสร้างมูลค่าเพิ่มทางเศรษฐกิจจากอุตสาหกรรมโลจิสติกส์

จากนโยบายรัฐบาลในส่วนที่เกี่ยวข้องกับกระทรวงคมนาคม และแผนพัฒนาในระดับต่าง ๆ คณะรักษาความสงบแห่งชาติ (คสช.) ได้มีมติเห็นชอบเมื่อเดือนกรกฎาคม 2557 [4] ในหลักการ ยุทธศาสตร์การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านคมนาคมขนส่งของไทย 2558 – 2565 ของสำนักงาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นโยบายและแผนการขนส่งและจราจร (สนข.) ตามกรอบยุทธศาสตร์ที่มีเป้าหมาย 4 อย่าง ได้แก่ การสร้างรากฐานความมั่นคงทางสังคม สร้างรากฐานความมั่นคงทางเศรษฐกิจ เสริมสร้างความมั่นคงความปลอดภัยในการเดินทางและการขนส่ง และการสร้างโอกาสสำหรับการใช้ประโยชน์สูงสุดจากการเป็นประชาคมอาเซียน ซึ่งนำไปสู่ 5 แผนงานหลัก คือ

1. การพัฒนาโครงข่ายรถไฟระหว่างเมือง
2. การพัฒนาโครงข่ายขนส่งสาธารณะเพื่อแก้ไขปัญหาจราจรในกทม. และปริมณฑล
3. การเพิ่มขีดความสามารถทางหลวงเพื่อเชื่อมโยงฐานการผลิตที่สำคัญของประเทศเชื่อมโยงกับประเทศเพื่อนบ้าน
4. การพัฒนาโครงข่ายการขนส่งทางน้ำ
5. การเพิ่มขีดความสามารถในการให้บริการขนส่งทางอากาศ



ภาพที่ 1.3 เส้นทางรถไฟในประเทศไทย [4]

ปัจจุบันการรถไฟฯ มีระยะทางการเดินรถแล้วรวมทั้งสิ้น 4,346 กิโลเมตร [4] โดยเส้นทางของรถไฟจะถูกสร้างครอบคลุมทุกภูมิภาคทั่วประเทศ แต่ข้อจำกัดในการขนส่งทางรถไฟของประเทศไทยยังคงมีปัจจัยอื่น ๆ ที่ต้องพัฒนาอีกมาก เช่น ทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟทั่วประเทศไทยจำนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2,463 แห่ง [6] แต่มีจำนวน 1,636 แห่ง ที่ไม่มีความปลอดภัย เนื่องจากทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟชำรุด การข้ามทางแบบผิดกฎหมาย และไม่มีอุปกรณ์รักษาความปลอดภัย เป็นต้น

สำหรับปัญหาทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟ ซึ่งแผ่นทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟนั้น จะใช้แผ่นคอนกรีต (Concrete railroad crossing) หรือท่อนไม้ (ตามรูปที่ 1.4) เพื่อให้ยานพาหนะต่าง ๆ สามารถข้ามสัญจรไปมาได้ เช่น รถจักรยานยนต์ รถยนต์ รถบรรทุก เป็นต้น ปัจจุบันมีการขนส่งสินค้าทางรถไฟ และรถบรรทุกมากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้เกิดความเสียหายต่อแผ่นทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟ ซึ่งเกิดจากการบรรทุกสินค้าข้ามแผ่นทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟมากขึ้น การชำรุดของแผ่นทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟ มีสาเหตุหลักเนื่องมาจากเกิดการสั่นสะเทือนขณะรถที่มีน้ำหนักมากวิ่งผ่าน เกิดแรงแบบซ้ำ ๆ (Dynamic loads) แผ่นทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟที่ผลิตจากคอนกรีตหรือท่อนไม้ ซึ่งแข็งแต่เปราะ (Brittle) ที่ไม่ทนทานต่อแรงซ้ำ ๆ มีสมบัติไดนามิกส์หรือพลวัต (Dynamic properties) ต่ำ จึงเกิดการหักหรือแตกร้าว ทำให้เกิดอุบัติเหตุได้ แผ่นทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟที่ผลิตจากคอนกรีตที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน มีข้อเสียหลายประการ เช่น

- อายุการใช้งานจำกัด เกิดการแตกร้าว ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงหรือต้องเปลี่ยนแผ่นทางผ่านจุดตัดรถไฟแผ่นใหม่
- แผ่นคอนกรีตเกิดการกระแทกกับรถ ทำให้รถต้องชะลอความเร็ว ส่งผลให้เกิดปัญหาการจราจรติดขัด
- เกิดความเสียหายให้กับระบบกันสะเทือนของรถที่วิ่งผ่าน มีเสียงดัง สร้างความรำคาญ



(ก) ท่อนไม้



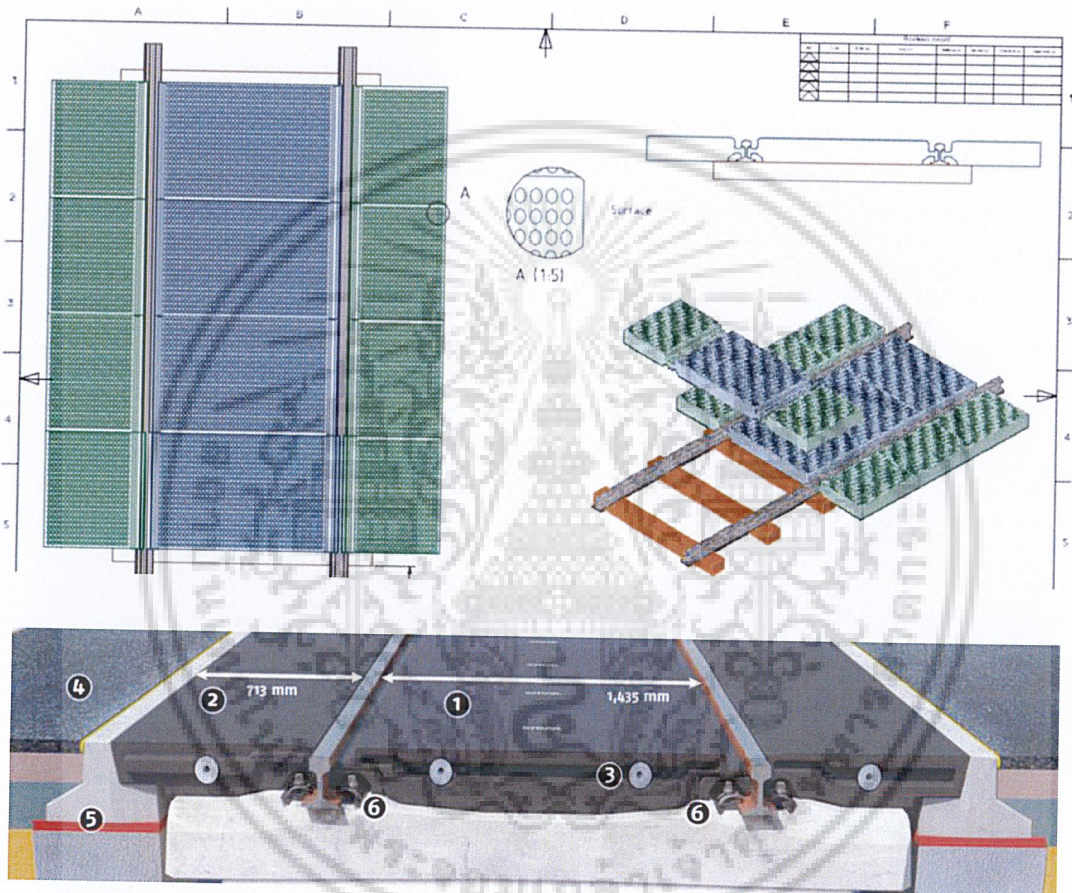
(ข) แผ่นคอนกรีต

ภาพที่ 1.4 ตัวอย่างการชำรุดของแผ่นทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟจาก (ก) ท่อนไม้ และ (ข) แผ่นคอนกรีต [7 – 8]

คณะผู้วิจัยจึงทำการพัฒนาสูตรยาง (Rubber formula) ในการผลิตแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟ (Rubber Railway Crossing Panel) ที่ทำจากยางคลอโรพรีน (Chloroprene rubber, CR) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และยางธรรมชาติ หรือยางพารา (Natural rubber, NR) ตามรูปที่ 1.5 เพื่อจัดหาวัสดุยางทดแทนแผ่นคอนกรีตที่ใช้ทำแผ่นทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟ ซึ่งมีข้อดี คือ

- ใช้วัสดุยางที่นิ่ม ไม่แตกกร้าว รับแรงสั่นสะเทือนได้ดี
- มีความเงียบในขณะที่รถยนต์วิ่งผ่านได้
- ส่งเสริมการใช้ยางพาราในประเทศไทย
- ออกแบบและสร้างสินค้าต้นแบบ ที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์



ภาพที่ 1.5 ตัวอย่างการออกแบบแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟที่ผลิตจากยางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติในงานวิจัยนี้

ในงานวิจัยนี้เสนอใช้ยางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติ มาเป็นวัตถุดิบในการทำแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟ เนื่องจากยางคลอโรพรีน เป็นยางสังเคราะห์ที่มีสมบัติเด่นที่เหมาะสมกับการใช้งาน คือ ทนต่อน้ำมัน (Oil resistance) ทนโอโซน (Ozone resistance) และทนทานต่อดินฟ้าอากาศ (Weathering resistance) ส่วนยางธรรมชาติมีสมบัติเด่นที่เหมาะสมกับการใช้งาน คือ ความแข็งแรงดึงสูง (Tensile strength) ต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance) ยืดหยุ่นและ คืนตัวดี (Resilience) นอกจากนี้ยังมีราคาถูก และเป็นการส่งเสริมการใช้ยางธรรมชาติในประเทศ [9] เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้คณะผู้วิจัยเล็งเห็นถึงความสำคัญในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ เพื่อเพิ่มมูลค่าของยางธรรมชาติ และเพิ่มปริมาณการใช้งานของยางธรรมชาติ ซึ่งในปัจจุบันอุตสาหกรรมยางได้มีแนวคิดในการพัฒนาต่าง ๆ เช่น การใช้ยางผสม (Rubber blends) ในผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีวัตถุประสงค์ คือ ลดต้นทุนการผลิต จึงได้นำยางธรรมชาติเข้ามาทดแทนยางสังเคราะห์บางส่วน และนอกจากนี้เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติที่ดีของยางแต่ละชนิดอีกด้วย

งานวิจัยนี้เป็นความร่วมมือกันระหว่างภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) ร่วมกับบริษัท เอส.เค. โพลีเมอร์ จำกัด (S.K. Polymer Co., Ltd.) และบริษัท เอ็กซ์เท็นซีฟว์ รีเสิร์ช โพลีเมอร์ส จำกัด (Extensive Research Polymers Co., Ltd.) อีกทั้งยังได้รับความอนุเคราะห์จากวิศวกรฝ่ายช่างการโยธาของการรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) และนักวิเคราะห์หน่วยเฉพาะทางด้านยางธรรมชาติจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ในการวิจัยและพัฒนาสูตรยางเพื่อการออกแบบแผ่นยางปูทางผ่านเสมอรระดับทางรถไฟ และการนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถใช้งานได้จริง

คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาสูตรยางผสมระหว่างยางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติ เพื่อใช้เป็นวัสดุในการทำแผ่นยางปูทางผ่านเสมอรระดับทางรถไฟ โดยทำการขึ้นรูปยางที่มี 2 ชั้นประกบกัน คือ ยางชั้นในและยางชั้นนอก ซึ่งสูตรยางชั้นในจะใช้สูตรยางของบริษัท เอส.เค. โพลีเมอร์ จำกัด และสูตรยางชั้นนอกได้ทำการศึกษาสูตรยางเดิม ซึ่งได้มีการพัฒนาสูตรมาจากยางรองรางรถไฟ และมีการพัฒนาสูตรให้เหมาะสมกับการใช้งาน สำหรับสมบัติที่ต้องการของแผ่นยางปูทางผ่านเสมอรระดับทางรถไฟ ได้แก่ ความแข็งแรง ความแข็งแรงดึง โมดูลัสกดอัด ความต้านทานต่อการฉีกขาด การยุบตัวเนื่องจากแรงกด การยืดตัวเนื่องจากแรงดึง ความต้านทานต่อการเสียดสีขัดถู ความต้านทานการลื่น ความต้านทานต่อไอโซน ความต้านทานต่อน้ำมัน สภาพต้านทานไฟฟ้า และสัณฐานวิทยา

1.2 วัตถุประสงค์

วิจัยและพัฒนา เพื่อศึกษาสูตรยางชั้นนอกที่เหมาะสมของแผ่นยางปูทางผ่านเสมอรระดับทางรถไฟที่ผลิตจากยางคลอโรพรีน (CR) และยางธรรมชาติ (NR) โดยเน้นศึกษาปัจจัยบางประการที่ส่งผลต่อสมบัติ เช่น อัตราส่วนของยาง CR/NR ปริมาณของสารตัวเติม เป็นต้น

1.3 ขอบเขต

- 1) เตรียมยางผสมสูตรของแผ่นยางปูทางผ่านเสมอรระดับทางรถไฟ
- 2) ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างยางคลอโรพรีนต่อยางธรรมชาติ ศึกษาผลของการเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติในยางผสมสูตรที่มีปริมาณเขม่าดำที่ต่างกัน
- 3) ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของตัวอย่างชิ้นงานยางที่เตรียมได้ ได้แก่ ลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics) สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) สมบัติทางกายภาพ (Physical properties) และสัณฐานวิทยา (Morphology) ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) วิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เพิ่มมูลค่าและปริมาณการใช้วัตถุดิบยางพาราภายในประเทศ แก้ปัญหายางล้นตลาด ราคาขายตกต่ำ และช่วยเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกร
- 2) เพื่อทำให้เกิดแผ่นทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟในจุดตัดทางรถไฟ ผลิตจากวัสดุยางที่ไม่แตกร้าว ทนทาน ลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง
- 3) แผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟที่ผลิตจากยางมีความเสียบในขณะที่รถยนต์วิ่งผ่าน เพิ่มความเร็ว และแก้ปัญหการจราจรติดขัด



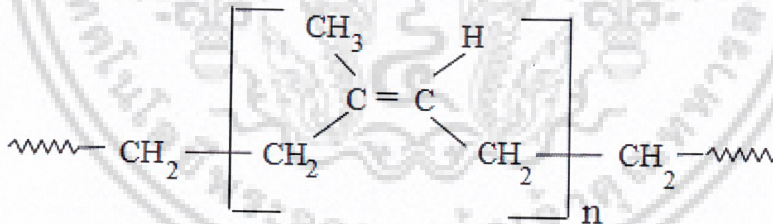
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

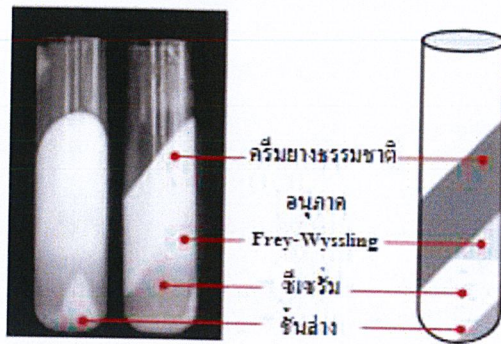
2.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) [10]

ยางธรรมชาติส่วนมากเป็นยางที่ได้มาจากต้นยางพารา (*Hevea Brasiliensis*) บางครั้งจะถูกเรียกว่า ยางฮีเวีย (*Hevea latex*) หรือยางพารา เป็นต้นไม้ยืนต้น สูงใหญ่อายุยืน มีหลากหลายพันธุ์ น้ำยางสดที่กรี๊ดได้จากต้นยางมีลักษณะสีขาวขุ่น และมีเนื้อยางแห้ง (Dry rubber) ประมาณ 30% แขนงลอยอยู่ในน้ำ ถ้านำน้ำยางที่ได้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 60% เรียกว่า น้ำยางข้น (Concentrated latex) การเติมสารแอมโมเนียลงไปจะช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ *cis-1,4-polyisoprene* โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบบอสัญฐาน (Amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยาง สามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำ หรือเมื่อถูกยืดจึงสามารถเกิดผลึก (Crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (Low temperature crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำขึ้นยางจะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (Strain induced crystallization) ทำให้งามีสมบัติเชิงกลดี ยางจะมีความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ความทนต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) สูง

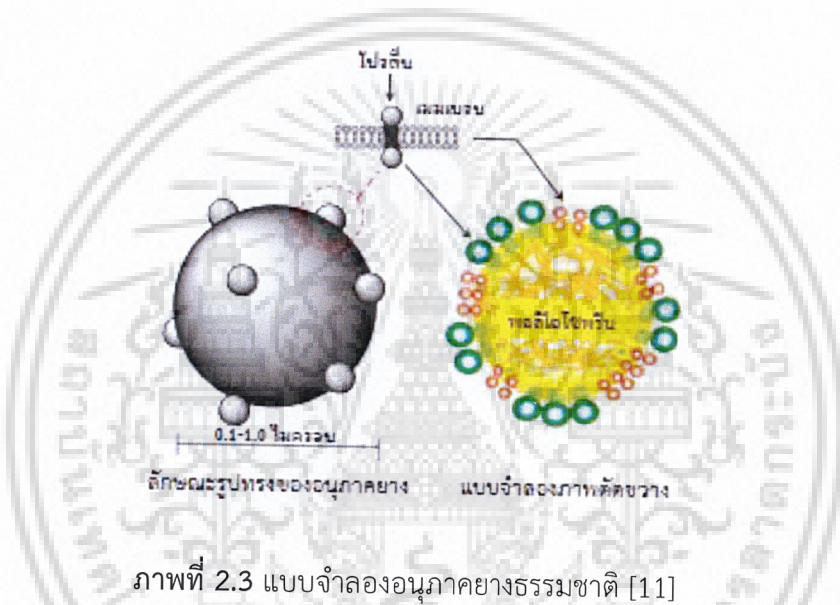


poly-cis-1.4-isoprene

ภาพที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (ซิส-1,4 พอลิไอโซพรีน) [10]



ภาพที่ 2.2 การแยกชั้นของน้ำยางสดหลังจากผ่านกระบวนการหมุนเหวี่ยง [11]



ภาพที่ 2.3 แบบจำลองอนุภาคยางธรรมชาติ [11]

ภาพที่ 2.3 แสดงแบบจำลองอนุภาคยางธรรมชาติ ซึ่งอนุภาคยางธรรมชาติมีลักษณะรูปทรงค่อนข้างกลม โดยมีโปรตีนและเมมเบรนล้อมรอบอยู่บริเวณพื้นผิวของอนุภาค ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลที่โดดเด่นกว่ายางสังเคราะห์ ซึ่งเป็นผลมาจากโครงข่ายที่เกิดจากการเชื่อมโยงตามธรรมชาติของหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่โพลิเมอร์ แต่ยางธรรมชาตินั้นมีขีดจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำและลักษณะทางกายภาพที่ไม่เสถียรขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่สูงขึ้น ยางจะอ่อนนิ่มและเหนียวเมื่อร้อนหรืออุณหภูมิสูง แต่จะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้ยางธรรมชาติจึงต้องผสมเข้ากับสารเคมีต่าง ๆ เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ และสารตัวเร่งต่าง ๆ เป็นต้น หลังการบดผสมยางผสมสูตรหรือยางคอมพาวด์ (Rubber compound) ที่ได้จะถูกนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้เรียกว่า วุลคาไนเซชัน (Vulcanization) [11] ยางที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปเรียกว่า ยางสุกหรือยางคงรูป (Vulcanizate) ซึ่งสมบัติของยางคงรูปมีความเสถียรไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก และมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น เพื่อที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ยางสังเคราะห์ (Synthetic rubber, SR)

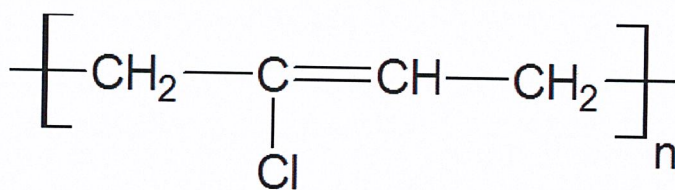
ยางสังเคราะห์ ไม่ได้หมายความถึงยางเทียมที่มีลักษณะทางเคมีและสมบัติคล้ายคลึงกับยางธรรมชาติ (cis-1,4-polyisoprene, IR) เท่านั้น แต่ยังรวมถึงยางชนิดต่าง ๆ ที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาเคมี สาเหตุสำคัญที่ผลักดันให้เกิดการริเริ่มค้นคว้าการผลิตยางสังเคราะห์ จนขยายมาเป็นการผลิตเชิงการค้า อาจสรุปได้ดังนี้

- ปัญหาการขาดแคลนยางธรรมชาติที่จำเป็นต้องใช้ในการผลิตอาวุธยุทโธปกรณ์ในช่วงสงครามของประเทศ
- ราคาที่ไม่แน่นอนของยางธรรมชาติ
- ความต้องการยางที่มีคุณสมบัติพิเศษบางประการ เช่น มีความทนต่อน้ำมัน สารเคมี และความร้อนสูง ๆ

การผลิตยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการผลิตโมโนเมอร์ และขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน ยางสังเคราะห์แต่ละชนิดจะแตกต่างกันที่ชนิดของ โมโนเมอร์ ซึ่งประกอบด้วยโมโนเมอร์ชนิดเดียวจะเรียกว่า โฮโมโพลิเมอร์ (Homopolymer) เช่น ยางโพลิบิวทาไดอีน (Polybutadiene, BR) หรือยางโพลิไอโซพรีน (Polyisoprene, IR) ยางสังเคราะห์บางชนิดอาจประกอบด้วยโมโนเมอร์มากกว่า 1 ชนิด เรียกว่า โคโพลิเมอร์ (Copolymer) เช่น ยาง สไตรีนบิวทาไดอีน (Styrene-butadiene rubber, SBR) ยางคลอโรพรีน (Chloroprene rubber, CR) ฯลฯ

2.3 ยางคลอโรพรีน (Chloroprene rubber, CR)

ยางคลอโรพรีน (Chloroprene rubber) มีชื่อทางการค้าว่า ยางนีโอพรีน (Neoprene®) สูตรโครงสร้างทางเคมี คือ Trans-1,4 Polychloroprene เป็นยางสังเคราะห์จากคลอโรพรีนโมโนเมอร์ (Chloroprene monomer) ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของคลอโรพรีนหรือ 2-Chloro-1,3-butadiene โมเลกุลของยางคลอโรพรีนสามารถจัดเรียงตัวได้อย่างเป็นระเบียบภายใต้สภาวะที่เหมาะสมยางชนิดนี้จึงสามารถตกผลึกได้เช่นเดียวกับยางธรรมชาติ ดังนั้นยางคลอโรพรีนจึงมีค่าความแข็งแรงตึงสูง (โดยที่ไม่ใส่สารตัวเติม) นอกจากนี้ยังมีความต้านทานต่อการเสียดสีขัดถูที่สูงด้วย



ภาพที่ 2.4 สูตรโครงสร้างของยางคลอโรพรีน [12]

ยางคลอโรพรีนที่อยู่ในรูปของแข็ง แบ่งออกเป็นประเภทใช้งานทั่วไปและประเภทใช้งานพิเศษ ประเภทใช้งานทั่วไป ได้แก่ เกรด G W และ T และประเภทใช้งานพิเศษ ได้แก่ เกรด AC AD AG และ FB เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นต้น ใช้สำหรับงานเฉพาะ เช่น ทำกาวยาง ยางใช้เคลือบ (Coating) และ Sealant โครงสร้างของยางคลอโรพรีนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการพอลิเมอไรเซชัน และมีผลโดยตรงต่อกระบวนการตกผลึกหรือต่อความยืดหยุ่นของยาง ถ้าอุณหภูมิการพอลิเมอไรเซชันสูงขึ้นไปจะได้ยางที่มีโครงสร้างที่สม่ำเสมอ ยางมีโครงสร้างโมเลกุลที่ไม่ปกติ ทำให้อัตราการตกผลึกของยางต่ำลง ในทางตรงกันข้ามยางคลอโรพรีนที่ได้จากการพอลิเมอไรเซชันที่อุณหภูมิต่ำจะยังมีอัตราการตกผลึกสูง ซึ่งสมบัติเช่นนี้เป็นที่ต้องการของการผลิตกาวที่ต้องการความเหนียวติดทนที่ แต่เกรดนี้ไม่เหมาะสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์อื่น ๆ เพราะยางจะแข็งตัวอย่างรวดเร็วและสูญเสียความยืดหยุ่น ดังนั้นยางคลอโรพรีนที่เหมาะสมในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางทั่ว ๆ ไป จึงต้องเป็นเกรดที่ตกผลึกได้น้อย ยางคลอโรพรีนมีสมบัติคล้ายยางธรรมชาติ คือ มีความเหนียวติดกัน (Tack) ที่ดี ทำให้สามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบจากหลายชิ้นส่วนได้ดี ยางคลอโรพรีนยังสามารถไหลเข้ามาเชื่อมกันได้ไม่ก่อให้เกิดปัญหารอยต่อของชิ้นงานในระหว่างการขึ้นรูปในบ่มพิมพ์ เนื่องจากยางคลอโรพรีนเป็น ยางที่มีขี้ เพราะประกอบด้วยอะตอมของคลอรีน ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่มีขี้ พบว่า ยางคลอโรพรีนจะทนต่อการบวมพองในน้ำมันได้ดี

นอกจากนี้อะตอมของคลอรีนยังทำให้ยางคลอโรพรีนมีสมบัติที่ดี ในด้านการทนต่อเปลวไฟ สภาพอากาศ และโอโซน แต่อะตอมของคลอรีนมีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าของยางคลอโรพรีน คือ ทำให้ยางนำไฟฟ้าได้มากขึ้น ยางคลอโรพรีนจึงจัดอยู่ในกลุ่ม Antistatic ไม่ใช่กลุ่มที่เป็นฉนวน ดังนั้นยางคลอโรพรีนจึงไม่สามารถใช้เป็นฉนวนของสายเคเบิลได้ แต่อาจใช้เป็นยางปลอกนอกของสายเคเบิลได้ ยางคลอโรพรีนเกรดที่สามารถตกผลึกได้เล็กน้อยถึงปานกลาง จะถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสมบัติเชิงกลที่ดี ทนต่อการติดไฟ ทนต่อน้ำมัน สภาพอากาศทั่วไป และโอโซน ซึ่งผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้งานในลักษณะดังกล่าว ได้แก่ ยางซีล ท่อยางเสริมแรง ยางพันลูกกลิ้ง สายพานยางสายพานรูปตัววี (V-belt) ยางกันกระแทก (Bearing) ยางบุ (Lining) พื้นรองเท้า และผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้ในงานก่อสร้าง เช่น ยางขอบหน้าต่าง ขอบหลังคา และยางปลอกสายเคเบิล ส่วนยางคลอโร-พรีนเกรดที่ตกผลึกได้มากจะนิยมใช้ในการผลิตกาวยา

2.4 สารเคมีสำหรับยาง (Additives) [13]

สารเคมีสำหรับยางเป็นสารเคมีที่ใช้ผสมลงไปในยาง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์และสมบัติตามต้องการ ยางจะสามารถนำมาใช้งานได้ก็ต่อเมื่อยางและสารเคมีที่ใส่เข้าไปเกิดปฏิกิริยากับยางแล้ว ผ่านการเร่งด้วยความร้อน สารเคมีที่ใช้สำหรับการผลิตวัตถุดิบสำเร็จรูปยางหรือผลิตภัณฑ์ยาง แบ่งได้ตามลักษณะการใช้งานดังนี้

2.4.1 สารทำให้ยางคงรูปหรือสารวัลคาไนซิง (Vulcanizing agents)

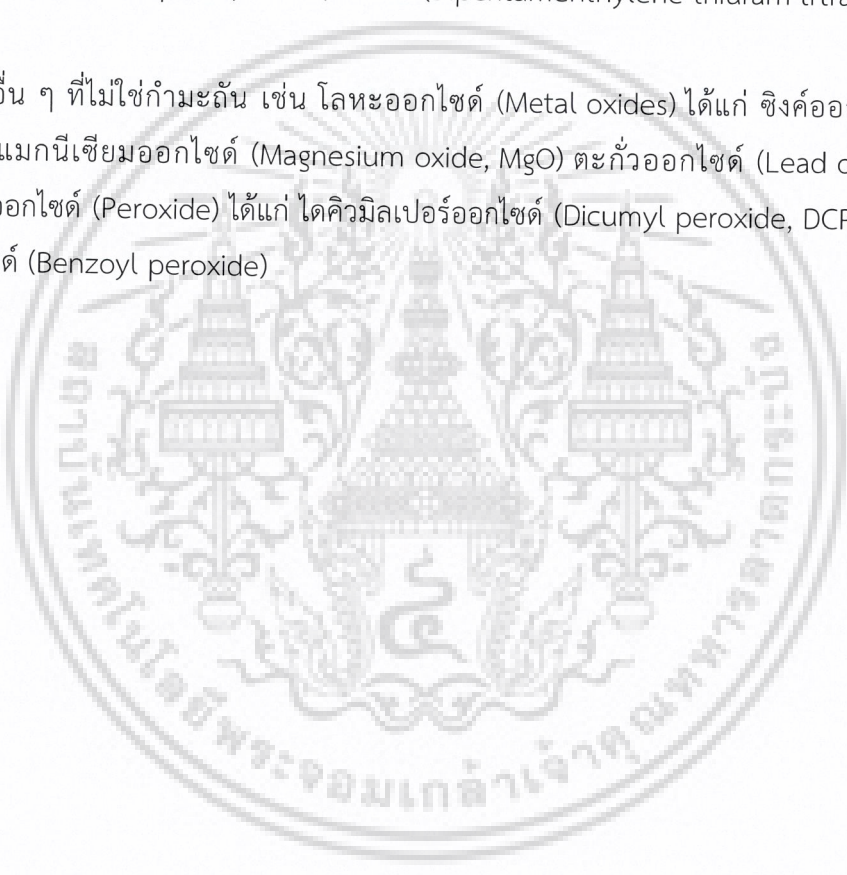
สารทำให้ยางคง

รูปหรือสารวัลคาไนซิง คือ สารที่ก่อให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง (Crosslink) ตรงตำแหน่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา เพื่อการปรับปรุงสมบัติของยางให้ดีขึ้น สารที่ทำให้ยางคงรูป แบ่งได้ 3 ประเภท ดังนี้

1. กำมะถัน (Sulfur, S) และธาตุที่คล้ายกำมะถัน กำมะถันนิยมใช้มากที่สุดถึง 90% ส่วนซีลีเนียม (Selenium) และเทลลูเรียม (Tellurium) สามารถใช้แทนกำมะถันได้ แต่ปฏิกิริยาที่ทำกับยางไม่ดีเท่ากำมะถันและเป็นพิษ

2. สารที่ให้กำมะถัน (Sulfur donor) หมายถึง สารที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ และสลายให้กำมะถันที่อุณหภูมิของการคงรูป ได้แก่ ทีเอ็มทีดี (Tetramethyl thiuram disulphide, TMTD) ดีทีดีเอ็ม (Dimorpholine disulphide, DTDM) ดีพีทีที (Dipentamethylene thiuram trtrasulphide, DPTT)

3. สารอื่น ๆ ที่ไม่ใช่กำมะถัน เช่น โลหะออกไซด์ (Metal oxides) ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide, MgO) ตะกั่วออกไซด์ (Lead oxide, PbO) และสารเปอร์ออกไซด์ (Peroxide) ได้แก่ ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP) เบนซิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide)



2.4.2 สารเร่งปฏิกิริยาอย่างคงรูป (Vulcanization accelerators)

สารเร่งปฏิกิริยาอย่างคงรูป คือ สารที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาคาไนซ์ของยางให้เกิดขึ้นเร็วขึ้น และยังช่วยลดการใช้กำมะถันให้น้อยลงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพสม่ำเสมอมากยิ่งขึ้น สารเร่งที่ดีจะสามารถทำให้ยางคงรูปได้เร็ว มีความว่องในการเร่งการเชื่อมโยงของโมเลกุลยางสูง ละลายได้ดีกับสารเคมีอื่น ๆ ที่ใส่เข้าไปในยางและไม่เป็นอันตรายกับผู้ใช้ สารเร่งจัดเป็นกลุ่มตามลักษณะโครงสร้างทางเคมีได้ 7 ประเภทคือ

1. กลุ่มกัวนิติน (Guanidine) ได้แก่ ดีพีจี (Diphenyl guanidine, DPG) ดีโอทีจี (Di-o-tolyl-guanidine, DOTG)
2. กลุ่มอัลดีไฮด์เอมีน (Aldehyde amine) ได้แก่ เฮกซ์เอ็มที (Hexamethylrnr tetramine, HMT) บีเอ (Butyraldehyde aniline, BA)
3. กลุ่มซัลฟีนามาไมด์ (Sulphennamide) ได้แก่ ซีบีเอส (N-cyclohexyl-2-benzthiazylsulphenamide, CBS) ทีบีบีเอส (N-tert-butyl-2-benzthiazyl sulphenamide, TBBS)
4. กลุ่มไธอาโซล (Thiazole) ได้แก่ เอ็มบีที (2-mercaptobenzthiazole, MBT) เอ็มบีทีเอส (Dibenzthiazyl disulphide, MBTS)
5. กลุ่มไธยูรัม (Thiuram) ได้แก่ ทีเอ็มทีเอ็ม (Tetramethyl thiuram monosulphide, TMTM) ทีเอ็มทีหรือทีเอ็มทีดี (Tetramethyl thiuram disulphide, TMT หรือ TMTD)
6. กลุ่มไดไธโอคาร์บาเมต (Dithiocarbamate) ได้แก่ แอมโมเนียมไดไธโอคาร์บาเมต (Ammonium dithiocarbamate) โซเดียมไดไธโอคาร์บาเมต (Sodium dithiocarbamate)
7. กลุ่มแซนเทต (Xanthate) เป็นสารเร่งที่มีปฏิกิริยาเร็วมาก นิยมใช้ในน้ำยาง

2.4.3 สารกระตุ้นสารเร่งปฏิกิริยาอย่างคงรูป (Accelerator activators)

สารกระตุ้นสารเร่งปฏิกิริยาอย่างคงรูป คือ เป็นสารช่วยเร่งอัตราการวัลคาไนซ์ยางให้เร็วขึ้น โดยการทำให้สารเร่งมีความว่องไวต่อปฏิกิริยา เพื่อจะได้เกิดประสิทธิภาพมากขึ้น จะไปเร่งอัตราการวัลคาไนซ์ยางให้เร็วขึ้นและปรับสมบัติของยางให้ดีขึ้น ทำให้ยางมีค่ามอดุลัส (Modulus) สูงขึ้น สารกระตุ้นมี 2 ประเภท คือ

1. พวกสารอนินทรีย์ ส่วนใหญ่เป็นพวกโลหะออกไซด์ ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide, MgO)
2. พวกอินทรีย์ ที่สำคัญคือ กรดไขมัน เช่น กรดสเตียริก (Stearic acid) กรดลอริก (Lauric acid) เป็นต้น

2.4.4 สารตัวเติม (Fillers)

สารตัวเติม คือ สารที่ใส่ลงไปในยาง เพื่อปรับปรุงสมบัติของยางให้ดีขึ้น หรือเพื่อลดต้นทุนในการผลิต ลดความหนืดตัวของยางดิบ และยังใช้เพื่อการเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ยาง สารตัวเติม แบ่งตามหน้าที่ได้เป็น 3 ชนิด คือ

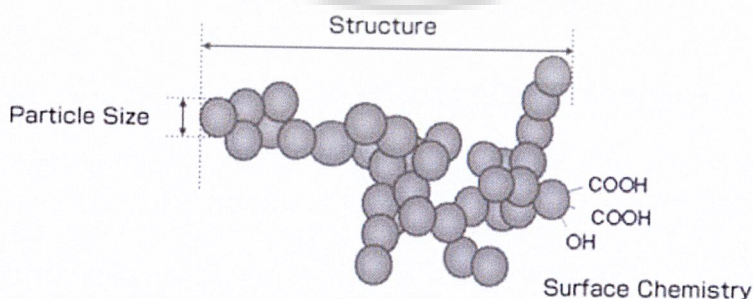
1. สารตัวเติมพวกเสริมความแข็งแรง (Reinforcing filler) เป็นสารตัวเติมที่ใส่เข้าไปในยางแล้วช่วยให้ยางมีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น คือ มีความต้านต่อแรงดึงต่อการสึกหรอ และความต้านต่อการฉีกขาดสูง เป็นต้น สารพวกนี้ ได้แก่ เขม่าดำ (Carbon black) ซิลิกา (Silica) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของยาง และขนาดของสารตัวเติมที่ใช้

1). เขม่าดำ เป็นสารเสริมแรงที่ใช้มากที่สุดใ้ในอุตสาหกรรมยาง องค์ประกอบหลักของเขม่าดำคือ ธาตุคาร์บอน อนุภาคเขม่าดำมีโครงสร้างกิ่งแกรไฟต์ โดยอะตอมของคาร์บอนจะจัดตัวเรียงเป็นชั้น ๆ ขนานกัน (โดยเฉพาะชั้นด้านนอก) บางส่วนเกิดการเลื่อมล้ำเล็กน้อย เขม่าดำที่ใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคปฐมภูมิอยู่ในช่วง 10 – 100 นาโนเมตร การผลิตเขม่าดำแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดหลัก ๆ ตามกรรมวิธีการผลิต ได้แก่

-เฟอร์เนชแบล็ค (Furnace black) เป็นเขม่าดำที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน เขม่าดำชนิดนี้ได้จากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของน้ำมันที่โครงสร้างส่วนใหญ่เป็นวงแหวน (Highly aromatic oils) อนุภาคปฐมภูมิของเฟอร์เนชแบล็คมีขนาดค่อนข้างเล็ก โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ในช่วง 20 – 80 นาโนเมตร

-เทอร์มอลแบล็ค (Thermal black) เป็นผงเขม่าดำที่ได้จากการสลายตัวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 1,300 °C ในภาวะที่ไม่มีอากาศของก๊าซธรรมชาติ เขม่าดำชนิดนี้มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิต่อข้างใหญ่ โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ในช่วง 120 – 500 นาโนเมตร และที่พื้นผิวของเขม่าดำชนิดนี้ไม่มีรูพรุน

-ชาแนลแบล็ค (Channel black) เป็นเขม่าดำที่ได้จากการเผาไหม้บางส่วน (Partial combustion) โดยการผ่านก๊าซธรรมชาติไปยังช่องเปลวไฟ (Burner channel) เขม่าดำที่เกิดขึ้นจะไปเกาะบนฝาเหล็กด้านบน จากนั้นก็ทำการเก็บรวบรวมเขม่าดำที่ได้ อนุภาคปฐมภูมิของชาแนลแบล็คจะมีขนาดเล็กมาก โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ในช่วง 9 – 30 นาโนเมตร



ภาพที่ 2.5 ภาพโครงสร้างของเขม่าดำหรือ Carbon black [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยที่มีต่อสมบัติของเขม่าดำ

- ขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวจำเพาะ อนุภาคปฐมภูมิของเขม่าดำมีรูปร่างเป็นทรงกลม และจะไม่อยู่อย่างโดดเดี่ยว แต่จะถูกหลอมอยู่รวมกันเป็นก้อน (ตามรูปที่ 2.5) เรียกว่า แอกริเกต (Aggregate) เขม่าดำที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมยางทั่วไป มีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิในช่วง 19 – 95 นาโนเมตร โดยทั่วไปเขม่าดำเกรดที่มีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิเล็ก จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ซึ่งจะเสริมแรงแก่ยางได้ดี

- โครงสร้าง จะบ่งบอกถึงลักษณะการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคเขม่าดำ นอกจากการเกาะกันของอนุภาคปฐมภูมิเกิดเป็นแอกริเกต ซึ่งจัดเป็นโครงสร้างปฐมภูมิแล้ว แอกริเกตแต่ละกลุ่มยังสามารถเกาะกลุ่มกันได้อย่างหลวม ๆ ด้วยแรงดึงดูดอย่างอ่อน (แรงแวนเดอร์วาลส์) เกิดเป็นโครงสร้างทุติยภูมิที่เรียกว่า แอกลอเมอเรต (Agglomerate) ซึ่งโครงสร้างแบบนี้จะถูกทำลายได้ด้วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้น ในระหว่างกระบวนการผสมโดยทั่วไป ผงเขม่าดำมีการกระจายตัวของทั้งจำนวนอนุภาค (ต่อ 1 แอกริเกต) และขนาดของแอกริเกตที่กว้างมาก

- สมบัติทางเคมีของพื้นผิว เขม่าดำประกอบด้วยของธาตุคาร์บอนประมาณ 90 – 95% ส่วนองค์ประกอบอื่น ๆ ออกซิเจนและไฮโดรเจน ลักษณะทางเคมีของพื้นผิวเขม่าดำค่อนข้างแตกต่างกันมาก เพราะพื้นผิวของเขม่าดำประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันเคมีมากมาย และการกระจายตัวของหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ บนพื้นผิวแตกต่างกันด้วย หมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวเหล่านี้ไม่เพียงจะมีผลต่อความว่องไวทางปฏิกิริยา (Surface activity) ยังมีผลต่อความเร็วของการคงรูปอีกด้วย การเพิ่มขึ้นของปริมาณออกซิเจนในเขม่าดำ จะทำให้ยางมีค่าระยะเวลาสกรอชที่ยาวขึ้น มีอัตราเร็วในการคงรูปและค่ามอดูลัสที่ต่ำลง

- ความเป็นรูพรุนของอนุภาค พื้นที่ผิวของเขม่าดำจะไม่เรียบ แต่มีลักษณะเป็นรูพรุน การวัดระดับความเป็นรูพรุนของเขม่าดำ สามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบพื้นที่ผิวของเขม่าดำที่ได้จากการคำนวณจากขนาดอนุภาคที่วัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยตั้งสมมติฐานว่าอนุภาคมีลักษณะเป็นรูปทรงกลม และการดูดซับก๊าซไนโตรเจน หรือที่เรียกว่าเทคนิค BET

- การนำไฟฟ้าและความร้อน เขม่าดำจะนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี ค่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามโครงสร้างและพื้นที่ผิวของเขม่าดำที่เพิ่มขึ้น หมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิวโดยเฉพาะหมู่ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ มีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าของเขม่าดำเช่นกัน เพราะได้มีการศึกษาพบว่า การกำจัดหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ โดยการใช้ความร้อนภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย จะทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าลดลงอย่างมาก

2). ซิลิกา เป็นสารตัวเติมมีเสริมแรงได้ดี เนื่องจากซิลิกาช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการของยางให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความต้านทานการฉีกขาด เพิ่มความต้านทานต่อการขีดถู สำหรับการใช้งานซิลิกานิยมใช้ร่วมกับสารคู่ควบ (Coupling agent) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่าง วัสดุภาคเหมาะสมกับยางที่ต้องการสีลัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สารตัวเติมพวกกึ่งเสริมความแข็งแรง (Semi-reinforcing filler) เป็นสารตัวเติมประเภท ที่ใส่เข้าไปในยางแล้ว ช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยางบ้าง เช่น อลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminum silicate) แคลเซียมซิลิเกต (Calcium silicate) คาโอลิน (Kaolin)

3. สารตัวเติมพวกช่วยลดต้นทุนการผลิต (Extending filler) เป็นสารที่ใส่ลงไปเพื่อจุดประสงค์ในการลดต้นทุน แต่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ด้วย โดยทำให้สมบัติแรงดึงลดลง และสมบัติเชิงกลอื่น ๆ เกิดการเปลี่ยนแปลงไป ทำให้กระบวนการผลิตยากหรือง่ายขึ้น สารพวกนี้ ได้แก่ ไซนาเคลย์ (China clays) แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) แบไรท์ (Barytes) และแป้งทัลคัม (Talcum)

2.4.5 สารพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers)

สารพลาสติกไซเซอร์ คือ สารที่เติมลงไปแล้วทำให้ยางอ่อนตัวโดยไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมี เพื่อช่วยให้กระบวนการผลิตง่ายขึ้น เร็วขึ้น และช่วยลดอุณหภูมิการผลิตให้ต่ำลง นอกจากนั้นยังช่วยในการอัดแบบพิมพ์ (Molding) ขณะทำเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป และทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงลดลงด้วย สารช่วยในการแปรรูปยางแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. สารช่วยทำให้ยางนิ่มโดยทางเคมี (Chemical plasticizer) คือสารที่ใส่เข้าไปในยางในปริมาณน้อย จะทำให้ยางนิ่มและเวลาของการบดยาง บางครั้งเรียกว่า เปปติเซอร์ (Peptiser) ได้แก่ ซัลโฟนิกแอซิด (Sulphonic acid) ไซลิวเมอร์แคปแทน (Xylyl mercaptan)

2. สารช่วยทำให้ยางนิ่มทางกายภาพ (Physical plasticizer) เป็นสารที่ใส่เข้าไปแล้ว จะทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่นระหว่างโมเลกุลยาง ทำให้โมเลกุลของยางเคลื่อนไหวได้ง่าย ยางจะนิ่มลงแปรรูปง่ายขึ้น เป็นสารที่ไม่มีปฏิกิริยากับยาง และเป็นสารที่ต้องรวมผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน (Compatible) กับยางและสารอื่น ๆ ได้แก่ น้ำมันปิโตรเลียม (Petroleum oil) น้ำมันเอสเทอร์ (Ester oil)

2.4.6 สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (Protective agents)

ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง เพื่อป้องกันยางเสื่อมสภาพ เพิ่มความทนทานของยางให้ดีขึ้นไปจากเดิม จึงจำเป็นต้องมีสารป้องกันการเสื่อมสภาพ โดยใช้สารแอนติออกซิแดนต์ (Antioxidant) หรือสารแอนติโอโซนันต์ (Antiozonant) ซึ่งสารทั้ง 2 ชนิด จะทำให้อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ยางยาวขึ้น สารแอนติออกซิแดนต์ เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยางเนื่องจากออกซิเจนในอากาศเข้าทำปฏิกิริยากับยาง หรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ได้แก่ สารประกอบเอมีน (Amine) หรืออนุพันธ์ของเอมีน เป็นสารที่มีประสิทธิภาพสูง แต่เมื่อใช้จะทำให้ยางมีสีคล้ำ เปลี่ยนสีหรือตกสี นิยมใช้กับยางที่มีสีดำ เช่น อัลคิลเลทเต็ด ไดฟีนิลเอมีน (Alkylated diphenylamines) อัลคิลเลทเต็ดพารา-ไดฟีนิลเอมีน (alkylated p-phenylenediamines) และสารประกอบฟีนอล (Phenol) หรืออนุพันธ์ของฟีนอล (Substituted phenols) ใช้กับยางสีทั่วไปที่ไม่ใช่สีดำ ไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางตกสี และเปลี่ยนสียาง เช่น อนุพันธ์ของฟีนอล บิสฟีนอล (Bisphenol) สารแอนติโอโซนันต์ (Antiozonant) เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากโอโซน (Ozone, O₃) ได้แก่ พาราฟีนินไดเอมีน (Para-phenylen diamine) และขี้ผึ้งพาราฟิน (Paraffin wax)

2.4.7 สารอื่น ๆ [14]

สารกลุ่มนี้โดยทั่วไปแล้วไม่จำเป็นต้องใช้ในการออกสูตร แต่ในบางกรณีที่ต้องการให้ยาง มีสมบัติพิเศษบางประการจำเป็นต้องมีการเติมสารเคมีบางตัวเข้าช่วย เช่น

1. สารหน่วง (Retarder) จะใช้เมื่อต้องการชะลอไม่ใหยางที่กำลังบดผสมคงรูปเสียก่อน (Scorch) หรือที่เรียกว่า ยางตาย ตัวอย่างของสารหน่วง ได้แก่ กรดเบนโซอิก (Benzoic acid) หรือ กรดซาลิไซลิก (Salicylic acid) เป็นต้น

2. สารทำให้เกิดฟอง (Blowing agent) ใช้สำหรับการทำให้ยางฟูในการทำยางพองน้ำตัวอย่างของสารกลุ่มนี้ ได้แก่ สาร Sodium bicarbonate หรือ Dinitrosopentamethylene tetramine เป็นต้น

3. สารทำให้เกิดสี (Pigments) อาจเป็นสีอินทรีย์ เช่น Cadmium sulfide (ให้สีแดงเข้ม ส้มและเหลือง) Chromium oxide (ให้สีเขียวขุ่น) และ Titanium dioxide (ให้ยางมีสีขาว มีความสว่าง หรือช่วยให้ยางสีต่าง ๆ มีสีที่สดขึ้น) ส่วนสีที่เป็นสีอินทรีย์จะทำให้สีสดใส ทนต่อความร้อนได้ดีกว่า สีอินทรีย์

2.5 กระบวนการผลิต (Processing)

จากยางดิบที่ไม่มีสมบัติเหมาะสมจะนำมาใช้ผลิตภัณฑ์ได้โดยตรง จึงต้องนำมาผสมกับสารเคมีต่าง ๆ เพื่อปรับสมบัติให้ได้ตามความต้องการและเหมาะสมกับสภาพการใช้งานของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ นำยางคอมพาวด์ที่ผสมแล้วมาผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์เซชัน ทำใหยางเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลแบบโครงร่างตาข่าย 3 มิติ (3-D network) หรือการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง โดยกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์จะสามารถสรุปได้ตามนี้ ออกแบบสูตรยาง กำหนดสัดส่วนปริมาณยางต่อสารเคมีต่าง ๆ ที่จะใส่เพื่อเพิ่มสมบัติตามต้องการ นำยางมาผสมกับสารเคมีเป็นยางคอมพาวด์ตามสูตรที่ได้ออกแบบไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.6 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางโดยทั่วไป [14]

2.6 กระบวนการผสมยางกับสารเคมี (Compounding)

การผสมยางกับสารเคมียางเข้าด้วยกันโดยใช้เครื่องผสมซึ่งอาจจะเป็นเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) หรือระบบเปิดชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ภายใต้นามการผสมสารเคมีแล้วจะเรียกว่า ยางคอมพาวด์ (Rubber compound) การผสมยางเป็นอีกขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากต่อสมบัติและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากถ้าสารเคมีที่เติมลงไปในยางกระจายตัว (Distribution) หรือแตกตัว (Dispersion) ได้ไม่ดีจะส่งผลโดยตรงต่อความสม่ำเสมอของคุณภาพผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการใช้กระบวนการผสมที่แตกต่างกัน เช่น การใช้เครื่องผสมคนละชนิดกัน การใช้สภาวะการผสมที่แตกต่างกัน หรือแม้แต่การจัดลำดับการเติมสารเคมีลงไปเครื่องผสมที่แตกต่างกัน จะส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติที่แตกต่างกันด้วย แม้ว่าจะเป็นยางสูตรเดียวกัน ดังนั้นผู้ผลิตจำเป็นต้องมีการตรวจสอบคุณภาพของการผสม โดยนำยางคอมพาวด์ที่ได้จากการผสมแต่ละครั้ง (Batch) ไปทดสอบความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) และสมบัติการคงรูปของยาง (Cure characteristics) เพื่อควบคุมคุณภาพให้คงที่ โดยเครื่องผสม Two-roll mill จะเป็นที่นิยมอย่างมากในอุตสาหกรรม เนื่องจากราคาถูก ใช้งานง่ายจึงมีการนิยมใช้อย่างแพร่หลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การทดสอบสมบัติของยาง

2.7.1 การทดสอบคุณภาพยางดิบ

การทดสอบสมบัติทางกายภาพของยางส่วนใหญ่ ถ้าเป็นยางธรรมชาติจะมีการทดสอบสิ่งเจือปน ความชื้น และสารประกอบบางอย่าง เช่น ไนโตรเจน ผงเถ้า ความอ่อนตัวดัชนีความอ่อนตัวของยาง (Plasticity and plasticity retention index) และค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ส่วนยางสังเคราะห์มักทดสอบค่าความหนืดมูนนี่

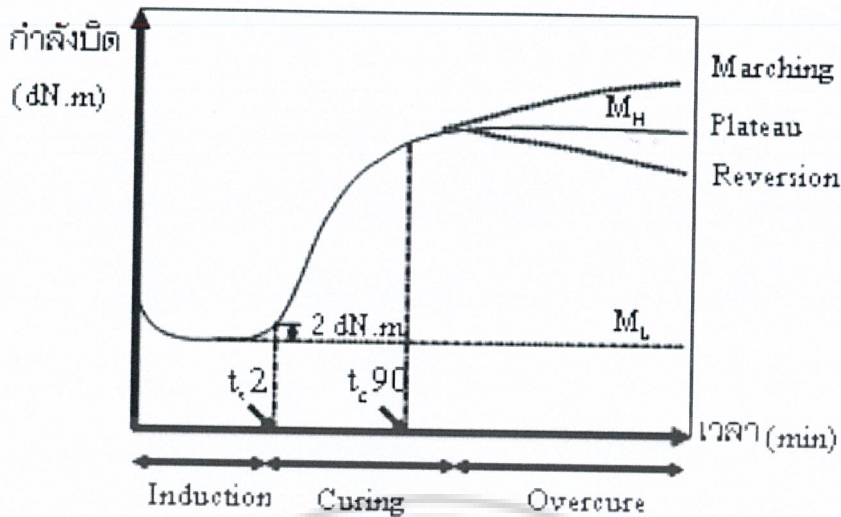
เครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer) [15] หาค่าความหนืดมูนนี่ของยางดิบตามมาตรฐาน ASTM D 1646 และ ISO 289 เป็นเครื่องมือทดสอบสมบัติการไหลหรือความหนืดของยางทุกชนิด ทั้งยางดิบและยางคอมพาวด์ หรือยางที่ผสมสารเติมแต่งแล้ว ภายในห้องใส่ยางจะมีจานโลหะหมุนอยู่ภายใต้อุณหภูมิและความดันตามที่กำหนดไว้ ซึ่งจะทำให้เกิดแรงบิด (Torque) ขึ้น และขับให้สปริงรูปตัวยูเกิดการเคลื่อนที่ ใช้ไมโครมิเตอร์วัดขนาดการเคลื่อนที่ให้ออกมาเป็นมาตรที่เรียกว่า Mooney viscosity เช่น 50 ML 1+4 (100 °C) โดยนำตัวอย่างมารีดให้เป็นแผ่น 2 ชั้น เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 47 มิลลิเมตร จากนั้นนำตัวอย่างวางประกบด้านบนและด้านล่างของจานหมุน (ควรเจาะรูที่แผ่นยางที่ประกบด้านล่างเพื่อใส่แกนของจานหมุน) อาจใช้แผ่นเซลโลเฟนหรือแผ่นพลาสติกบาง 0.25 มิลลิเมตร รองป้องกันตัวอย่างยางเหนียวติดผนังด้านในของห้องทดสอบ ใช้ความเร็วรอบของจานหมุนโรเตอร์เท่ากับ 2 ± 0.02 รอบต่อนาที (ขนาดของจานหมุนที่ใช้มีสองขนาด จานหมุนขนาดใหญ่ (Large rotor, L) และจานหมุนขนาดเล็ก (Small rotor, S)) อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบส่วนใหญ่ใช้ประมาณ 100 ± 0.5 °C ยกเว้นยางบางชนิดนิยมใช้อุณหภูมิทดสอบที่ 125 °C ให้ความร้อนกับยางประมาณ 1 นาที และอ่านค่าความหนืดของยางหลังหมุนผ่านไป 4 นาที

2.7.2 การทดสอบสมบัติในกระบวนการผลิต

สมบัติที่จำเป็น ได้แก่ ความนิ่มและแข็งของยาง ซึ่งแสดงในรูปของค่าความหนืดมูนนี่ กรณีที่ต้องการศึกษาการไหล (Rheology) ต้องใช้เครื่อง Capillary rheometer ในการศึกษาลักษณะการคงรูปของยางจะวัดโดยใช้เครื่อง Oscillating disc rheometers หรือ Moving die rheometer เป็นต้น

1. เครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (Oscillating disc rheometers, ODR) เครื่อง ODR เป็นเครื่องมือที่ได้รับการออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับศึกษาลักษณะการวัลคาไนเซชันของยางโดยตรง ตัวเครื่องประกอบด้วยโรเตอร์ที่เคลื่อนที่อยู่ในช่องว่างระหว่างตายบน และตายล่างเช่นเดียวกับเครื่องมูนนี่วิสโคมิเตอร์โรเตอร์ของเครื่อง ODR มีรูปร่างเป็นรูปโคนคู่ประกบ (Biconical shape) และการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ในระหว่างการทดสอบจะเป็นแบบแกว่ง (ไม่ใช่แบบหมุนเหมือนในกรณีของเครื่องมูนนี่วิสโคมิเตอร์) โดยการแกว่งของโรเตอร์จะเกิดขึ้นเป็นมุมแคบ ๆ (1° หรือ 3°) ด้วยความถี่ 1.67 Hz หรือ 100 รอบต่อนาที เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการทำลายโครงสร้างตาข่าย 3 มิติของยาง วัลคาไนซ์ จากนั้นเครื่องจะบันทึกแรงบิดที่เปลี่ยนไปตามระยะเวลาของการทดสอบซึ่งจะได้กราฟที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.7 กราฟการวัดคาโมดูลัสที่วัดได้จากเครื่อง ODR

จากรูป จะเห็นได้ว่าลักษณะการเชื่อมโยงของยางสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงใหญ่ ๆ คือ

- 1). ช่วงเริ่มต้น (Induction) เมื่อยางได้รับความร้อน ยางก็จะนิ่มลงทำให้แรงบิดลดลงในระยะแรก จนกระทั่งเมื่ออุณหภูมิของยางเริ่มเข้าสู่สมดุล ความหนืดของยางก็จะมีค่าต่ำสุดและจะมีค่าคงที่อยู่นาน จุดนี้เป็นระยะเวลาหนึ่งก่อนที่จะเริ่มเกิดการเชื่อมโยงใช้สัญลักษณ์ว่า M_L
- 2). ช่วงการสุก (Curing) หลังจากที่ยางเริ่มเกิดการเชื่อมโยงความหนืดของยางก็จะเริ่มสูงขึ้น (แรงบิดจึงเริ่มสูงขึ้นตามเวลา) ระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มบิดตายจนถึงเวลาที่ยางเริ่มเกิดการเชื่อมโยง เรียกว่า ระยะเวลาสกอร์ช (Scorch time) และใช้สัญลักษณ์เป็น t_s ในกรณีที่ใช้มุมแกว่งเท่ากับ 1° ค่าระยะเวลาสกอร์ช คือ ระยะเวลาที่ทำให้ค่าแรงบิดสูงกว่าจุดต่ำสุด 1 เดซินิวตัน-เมตร (dN.m) ใช้สัญลักษณ์ว่า t_{s1} แต่ในกรณีที่ใช้มุมแกว่งเท่ากับ 3° ค่าระยะเวลาสกอร์ช คือ ระยะเวลาที่ทำให้ค่าแรงบิดสูงกว่าจุดต่ำสุด 2 เดซินิวตัน-เมตร และใช้สัญลักษณ์ว่า t_{s2} ระยะเวลาสกอร์ชเป็นตัวบ่งชี้ถึงระยะเวลาที่ยางยังคงสามารถไหลขึ้นรูปได้ ณ อุณหภูมินั้น ๆ ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความปลอดภัยในกระบวนการผลิต ตัวแปรสำคัญอีกตัวหนึ่งที่เป็นตัวบ่งชี้ลักษณะของการเชื่อมโยงยาง คือ ระยะเวลาของการเชื่อมโยง (Curing time) โดยทั่วไป ใช้สัญลักษณ์เป็น t_c เมื่อ x คือร้อยละการเพิ่มขึ้นของแรงบิดจากจุดต่ำสุด (M_L) เมื่อเปรียบเทียบกับจุดสูงสุด (M_H) ซึ่งค่า $t_c(90)$ จัดเป็นค่า ระยะเวลาการเชื่อมโยงที่เหมาะสม (Optimum curing time) หมายถึง ระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้ยางเชื่อมโยงไปร้อยละ 90 หรือระยะเวลาที่ทำให้แรงบิดมีค่าเท่ากับค่าแรงบิดต่ำสุดบวกด้วย 90% ของผลต่างระหว่างค่าแรงบิดต่ำสุดและค่าแรงบิดสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจากการเชื่อมโยง ณ จุดนี้จะทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์ที่ดี ส่วนการเชื่อมโยงไปจนถึง 100% ส่วนใหญ่มักจะส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลบางประการของยางด้อยลง $t_c(90)$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$t_c(90) = \text{ระยะเวลาที่ทำให้แรงบิดมีค่าเท่ากับ } ML + (90 (MH - ML) / 100) \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3). ช่วงของการเชื่อมโยงที่มากเกินไป (Overcure) เมื่อปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันเกิดได้สมบูรณ์แล้ว แต่ยังคงทดสอบต่อไปค่าแรงบิดหรือมอดุลัสของยางอาจจะคงที่ตามเวลาเรียกว่า เกิด Plateau แต่ในบางกรณีอาจพบว่าค่ามอดุลัสของยางอาจจะสูงขึ้นไปเรื่อย ๆ เรียกว่า เกิด Marching หรืออาจจะมีค่าต่ำลง เรียกว่า เกิด Reversion ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของยางและสูตรเคมีที่ใช้

2. เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไม่มีจานหมุน (Moving die rheometer, MDR) เป็นเครื่องวัดการเชื่อมโยงชนิดใหม่ที่มีการถ่ายเทอุณหภูมิรวดเร็ว เนื่องจากใช้ตัวอย่างเล็กและบางกว่า เป็นผลให้การเชื่อมโยงได้รวดเร็วกว่า ไม่มีข้อผิดพลาดของการทดสอบเนื่องจากแรงเสียดทานของจานหมุน ซึ่งให้ข้อมูลการทดสอบที่ถูกต้องแม่นยำกว่า ให้ข้อมูลมากกว่า เช่น ค่ามอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus, E'') อัตราการเชื่อมโยง (Cure rate) และ มุมเฟส (Phase angle) หรือ $\tan \delta$

2.7.3 การทดสอบสมบัติของยางคงรูป

ในงานวิจัยได้ทำการทดสอบ ดังนี้

1. การทดสอบความแข็งกด (Hardness)

ความแข็งเป็นสมบัติที่สำคัญที่มักจะใช้ร่วมกับสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงในการกำหนดคุณภาพของยาง ความแข็งเป็นการวัดความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างเฉพาะที่พื้นผิวเท่านั้น หลักการพื้นฐานของการวัดค่าความแข็ง คือ จะนำหัวกดลงไปกดลงบนชิ้นงานทดสอบภายใต้สภาวะที่กำหนด ความลึกของการทะลุทลวงของหัวกด จะแสดงถึงค่าความแข็งของยาง เพราะยางที่มีความแข็งแรงสูงก็จะมีค่าความลึกของการทะลุทลวงต่ำ เครื่องวัดความแข็งที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางมี 2 แบบ คือ เครื่องดูโรมิเตอร์ (Durometer) เช่น แบบ Shore A และแบบเครื่องวัดความแข็งในหน่วยของ IRHD (International Rubber Hardness Degree) เนื่องจากเครื่องดูโรมิเตอร์จะใช้แรงกดของสปริง จึงมีความแม่นยำต่ำกว่าเครื่องวัดความแข็งแบบ IRHD ซึ่งใช้น้ำหนักที่คงที่เป็นตัววัด สำหรับการวัดค่าความแข็งด้วยเครื่องดูโรมิเตอร์ ตามมาตรฐาน ASTM D2240

2. การทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile strength)

จัดเป็นสิ่งสำคัญในการทดสอบแรงดึงของยาง ใช้วัดความสามารถของยางที่จะทนทานต่อแรงดึงยึดออกจากกัน ก่อนที่จะเกิดการฉีกขาด แตกหัก หรือเสียหาย ค่ามอดุลัสแรงดึงจะเป็นค่าที่บอกถึงความแข็ง (Stiffness) ของยาง สามารถหาได้จากความชันของกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curve) โดยการตัดชิ้นงานให้รูปร่างคล้ายดัมเบลล์ (Dumb-bell) โดยใช้ที่จับ (Grips) สองชุด ที่จับข้างหนึ่งจะถูกยึดให้อยู่กับที่ และอีกข้างหนึ่งจะเคลื่อนที่โดยมีเซลล์วัดแรง (Load cells) เป็นตัววัดและควบคุมแรงที่กระทำกับชิ้นงานตัวอย่าง เพื่อให้ชิ้นงานทดสอบเกิดการขาดที่บริเวณตรงกลางของตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. มอดุลัสกดอัด (Compression modulus)

สมบัติการอัดเป็นพฤติกรรมของวัสดุภายใต้แรงอัดในอัตราที่สม่ำเสมอของแรงที่กระทำซึ่งเป็นการกระทำโดยการกดขึ้นงานทดสอบ โดยทดสอบตามมาตรฐาน ISO 7743 Method A การทดสอบสมบัติแรงกดเป็นการทดสอบที่ใช้เปรียบเทียบความแข็งแรงกดของยาง จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการเปลี่ยนรูป



ภาพที่ 2.8 การทดสอบมอดุลัสกดอัด [16]

4. การทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance)

การทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด ตามมาตรฐาน ASTM D624 ใช้วัดความสามารถของยางที่จะทนทานต่อแรงดึงให้ฉีกขาดออกจากกันก่อนที่จะเกิดการฉีกขาดของยาง จึงได้ค่าความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) โดยการตัดชิ้นงานให้รูปร่างคล้ายปีกนก (Right Angle) โดยใช้ที่จับสองชุด ที่จับข้างหนึ่งจะถูกยึดให้อยู่กับที่และอีกข้างหนึ่งจะเคลื่อนที่โดยมีเซลล์วัดแรง เป็นตัววัดและควบคุมแรงที่กระทำกับชิ้นงานตัวอย่าง เพื่อให้ชิ้นงานทดสอบเกิดการขาดที่บริเวณตรงกลางของตัวอย่าง

5. การเร่งการเสื่อมอายุ (Heat aging)

อุณหภูมิที่สูงขึ้น (Elevated temperature) จะทำให้อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของยางเร็วขึ้น และเร่งการเสื่อมสภาพของยางให้เร็วขึ้นด้วย ดังนั้นจึงมีวิธีทดสอบมาตรฐานที่เรียกว่า การเร่งอายุด้วยความร้อน หรืออุณหภูมิสูง (Heat aging) เพื่อประเมินสมบัติของยางเมื่อมีอายุการใช้งานมากขึ้น ซึ่งในการทดสอบจะนำยางไปอบในตู้อบที่มีอากาศไหลเวียนอย่างสม่ำเสมอ หรืออบ ภายใต้บรรยากาศของออกซิเจนที่มีความดันสูงที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยในงานวิจัยนี้ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 7743

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. การยุบตัวเนื่องจากแรงกด (Compression set)

การยุบตัว คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation) ที่เหลืออยู่หลังปล่อยจากความเค้นอัด (Compressive stress) หรือแรงอัดที่ทำให้ขึ้นทดสอบยุบตัว นอกจากจะบอกให้ทราบถึงสถานะการคงรูปของยาง แล้วยังแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการคืนสู่รูปเดิมของขึ้นทดสอบยางนั้น โดยทั่วไปการรายงานค่าการยุบตัว รายงานในหน่วยร้อยละซึ่งบอกให้ทราบถึงปริมาณร้อยละ ซึ่งขึ้นงานทดสอบยางขนาดมาตรฐานไม่สามารถคืนสู่รูปเดิมหลังปล่อยจากแรงอัด ในการทดสอบการยุบตัวทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D395 ใช้ขึ้นทดสอบขนาดมาตรฐานรูปทรงกระบอก ถูกอัดด้วยอุปกรณ์สำหรับอัดภายใต้แรงอัดคงที่ (Constant force) เรียกว่า วิธี A หรือภายใต้การยุบตัวคงที่ (Constant deflection) เรียกว่า วิธี B แต่วิธี B มักได้รับความนิยมมากกว่า เพราะเครื่องมือที่ใช้และวิธีการทดสอบไม่ยุ่งยาก โดยทั่วไปการทดสอบการยุบตัว มักจะทดสอบที่อุณหภูมิสูงเพื่อเร่งการเสื่อมสภาพของยางให้เร็วขึ้น เป็นการประเมินคุณภาพของยางหลังจากใช้งานเป็นระยะเวลาสั้น ๆ ที่อุณหภูมิปกติสถานะที่ใช้ในการทดสอบ เช่น 70 °C หรือ 100 °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง นอกจากนี้การทดสอบการยุบตัวสามารถทำที่อุณหภูมิต่ำ ๆ (Low temperature) ได้เช่นกัน เช่น ที่ -25 °C เพื่อศึกษาการเกิดผลึก (Crystallization) ของโครงสร้างโมเลกุลของยาง ที่อุณหภูมิต่ำโมเลกุลของยางเคลื่อนไหว น้อยลง มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้น ทำใหยางแข็งตึงและยืดหยุ่นน้อยลง การวัดความหนาคืนตัวของขึ้นทดสอบยางจะทำที่อุณหภูมิขณะทดสอบ ซึ่งอุปกรณ์สำหรับใช้วัดความหนา (Dial gauge) จะต้องทำให้เย็นตัวที่อุณหภูมิต่ำก่อน เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้ความร้อนจากอุปกรณ์ที่ใช้ไปทำให้ขึ้นทดสอบยางอุ่นขึ้น ซึ่งจะทำให้ผลการทดสอบผิดพลาดได้ การเพิ่มขึ้นของค่าการยุบตัวที่อุณหภูมิต่ำจะแปรผกผันกับความคงทนต่อความเย็น (Cold resistance) ของขึ้นทดสอบยางนั้น จากรายงานการศึกษาการยุบตัวกับเวลาที่ใช้ทำใหยางคงรูป พบว่าค่าการยุบตัวของยางจะต่ำลงตามเวลาการคงรูปที่นานขึ้น เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพันธะเคมีภายในโครงสร้างโมเลกุลที่มีการเชื่อมโยงของยาง ดังนั้นการให้ค่าการยุบตัวต่ำ สามารถทำได้โดยใหยางคงรูปเกินจุด Over cure การกระทำเช่นนั้นจะส่งผลให้สมบัติทางกายภาพด้านอื่น ๆ เสียไป เช่น ความแข็งแรงตึง ความคงทนต่อการพ่น ร้อยละการยืด ณ จุดขาด เป็นต้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่ายางที่มีสมบัติดี ไม่จำเป็นต้องมีค่าการยุบตัวต่ำเสมอไป ดังนั้นนักเทคโนโลยียางจะต้องควบคุม รักษาความสมดุลของสมบัติต่าง ๆ ของยางให้พอดี เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีคุณภาพเหมาะสมกับการใช้งาน ราคาไม่สูงเกินไป และสามารถแข่งขันในเชิงพาณิชย์ได้

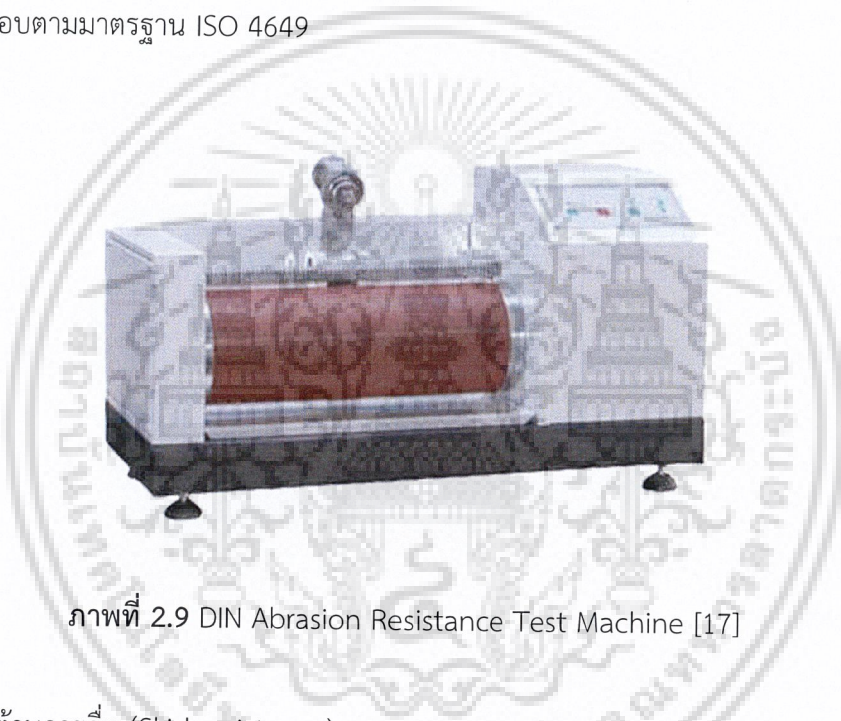
7. การยืดตัวเนื่องจากแรงดึง (Tension set)

ความสามารถของยางที่จะทนทานต่อแรงดึงยืดออกจากกันในระยะคงที่ ในงานวิจัยนี้ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 2285 โดยสถานะการทดสอบจะทำที่อุณหภูมิสูง เพื่อเร่งการเสื่อมสภาพของยางให้เร็วขึ้น เป็นการประเมินคุณภาพของยางหลังจากใช้งานเป็นระยะเวลาสั้น โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ความต้านทานต่อการเสียดสีขัดถู (Abrasion resistance)

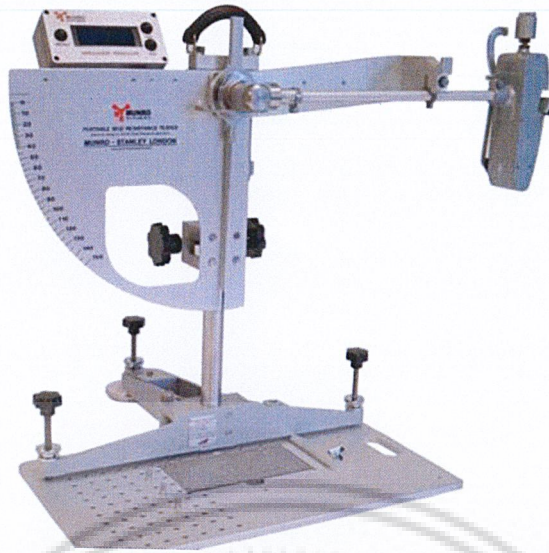
การทดสอบความต้านทานของวัสดุต่อการขัดสีของวัสดุนั้น เมื่อผิวหน้าของวัสดุสัมผัสกับผิวหน้าของวัสดุอื่น ๆ ในขณะที่มีแรงอัดอยู่ด้วย พื้นที่ที่สัมผัสอยู่นั้นจะเพิ่มตามค่าแรงที่ได้รับ ทำให้สัมประสิทธิ์ของความเสียดทานลดลง นอกจากนั้นผิวหน้าที่สัมผัสจริงจะขึ้นอยู่กับลักษณะหรือรูปทรงเรขาคณิตของชิ้นงานตัวอย่างด้วย ในระหว่างการทดสอบความเสียดทาน อาจเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Slip-stick ซึ่งมีส่วนสัมพันธ์กับความเร็วและสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ระหว่างผิวหน้าทั้งสองที่มีการสัมผัสกัน นอกจากนี้เมื่อผิวหน้าของชิ้นงานทดสอบตัวอย่างสัมผัสกับวัสดุอื่น ๆ ในระหว่างการใช้งานและเกิดการเสียดสีกันขึ้น จะทำให้เกิดการสึกหรอของผิวหน้า ดังนั้นการวัดความต้านทานต่อการเสียดสีขัดถู จึงใช้การวัดปริมาตรของวัสดุที่ถูกขัดสีออกไปจากผิวเนื้อชิ้นงานทดสอบ ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ โดยงานวิจัยนี้ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 4649



ภาพที่ 2.9 DIN Abrasion Resistance Test Machine [17]

9. ความต้านการลื่น (Skid resistance)

โดยใช้ British Pendulum Tester (BPT) ตามมาตรฐาน EN 13036-4 ทำงานโดยการปล่อยลูกตุ้มจากความสูงของเครื่องทดสอบ เมื่อลูกตุ้มสัมผัสกับผิวทดสอบจะทำให้สูญเสียพลังงาน ทำให้ลูกตุ้มมีความสูงลดต่ำลง จะทำให้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานได้



ภาพที่ 2.10 British Pendulum Tester (BPT) [18]

10. ความต้านทานต่อโอโซน (Ozone resistance)

ความต้านทานต่อโอโซน คือ ความต้านทานของผลิตภัณฑ์ยางต่อบรรยากาศที่มีโอโซน เมื่อนำยางมายืด โดยทั่วไปโมเลกุลยางจะทำปฏิกิริยากับโอโซน เกิดรอยแตกตั้งฉากกับทิศทางการยืด ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน ISO 1431-1 ความต้านทานต่อโอโซนขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ดังนี้

1). ชนิดของยาง ยางที่มีพันธะคู่ในโครงสร้าง เช่น ยางธรรมชาติเกิดปฏิกิริยากับโอโซนได้อย่างรวดเร็ว ส่วนยางที่มีพันธะคู่ในโครงสร้างน้อย เช่น ยางเอทิลีนโพรพิลีน ยางคลอโรพรีน จะมีความทนทานต่อโอโซนได้ดี

2). ขนาดการยืด เมื่อขนาดการยืดของชิ้นงานทดสอบสูงจะเกิดรอยแตกได้ง่าย

3). ชนิดและปริมาณของสารแอนตี้โอโซนแนนต์ ซึ่งสารแอนตี้โอโซนแนนต์ที่ต่างชนิดกัน ความต้านทานโอโซนที่ไม่เหมือนกัน เช่นเดียวกับยางที่เติมในปริมาณมากทนทานต่อโอโซนได้ดีกว่า

การทดสอบทำได้โดยนำยางคงรูปมาดึงไว้ที่ความเครียดค่าหนึ่ง ในบรรยากาศที่มีความเข้มข้นโอโซน ความชื้นและอุณหภูมิที่กำหนด สังเกตและตรวจสอบรอยแตกที่ผิวยางเป็นช่วง ๆ

11. ความทนทานต่อน้ำมัน (Oil resistance)

ยางที่ทนน้ำมันได้ดีจะต้องเป็นยางที่มีขั้ว เช่น ยางคลอโรพรีน ยางไนไตรล์ ซึ่งมักจะมีความต้านทานในการบวมพองในน้ำมันได้ดี ส่วนยางที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วอยู่ในสายโซ่โมเลกุลของจะทำให้ยางนั้นไม่ทนน้ำมัน ซึ่งการทดสอบการทนน้ำมันเพื่อใช้ในการพัฒนาสูตรยาง สำหรับผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องทนน้ำมันในระหว่างการใช้งาน ในงานวิจัยนี้ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 1817

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. สภาพต้านทานไฟฟ้า (Volume resistivity)

วัสดุฉนวนไฟฟ้า ทำหน้าที่ป้องกันกระแสไฟฟ้าไม่ให้ไหลผ่านตัวหนึ่งไปยังอีกตัวหนึ่ง ฉนวนไฟฟ้าส่วนใหญ่ผลิตมาจากพอลิเมอร์ เนื่องจากวัสดุพอลิเมอร์ส่วนใหญ่เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี แต่ต้องมีการวัดค่าต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) เพื่อจะเลือกวัสดุให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยใช้เครื่องวัดการนำไฟฟ้าต่อเข้ากับขั้วอิเล็กโทรด นำชิ้นงานทดสอบวางระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรในหน่วย $\Omega \cdot m$ ตามมาตรฐาน ISO 14309

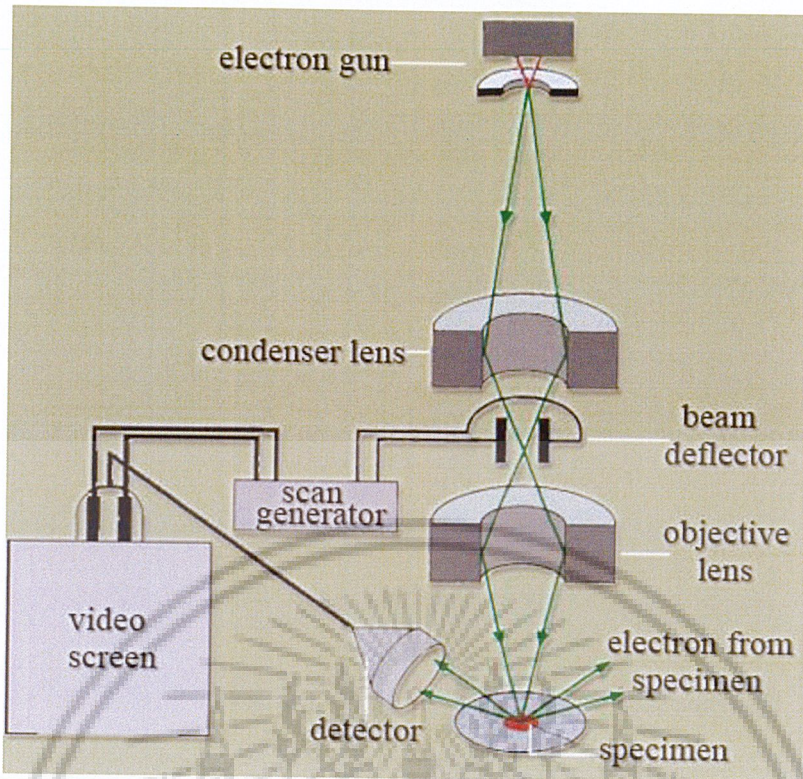


ภาพที่ 2.11 เครื่องทดสอบสภาพต้านทานไฟฟ้า [19]

2.7.4 การทดสอบสัณฐานวิทยา [20]

สำหรับงานวิจัยนี้ทำการทดสอบด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจาก พื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM จะเป็นลักษณะของ 3 มิติ จึงถูกมาใช้ในการศึกษาสัณฐานวิทยาและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบ เช่น ลักษณะการกระจายตัวของสารตัวเติม ลักษณะผิวหน้าตัดของชิ้นงานทดสอบ เป็นต้น หลักการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้ระบบโดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กตามความต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์-ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงาน จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้น ซึ่งส่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกแล้วแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ จากนั้นถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนหน้าจอต่อไป และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอได้เลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.12 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง SEM [20]

2.8 ตัวอย่างผู้ผลิตแผ่นยางปูทางผ่านเสมอรระดับทางรถไฟในต่างประเทศ

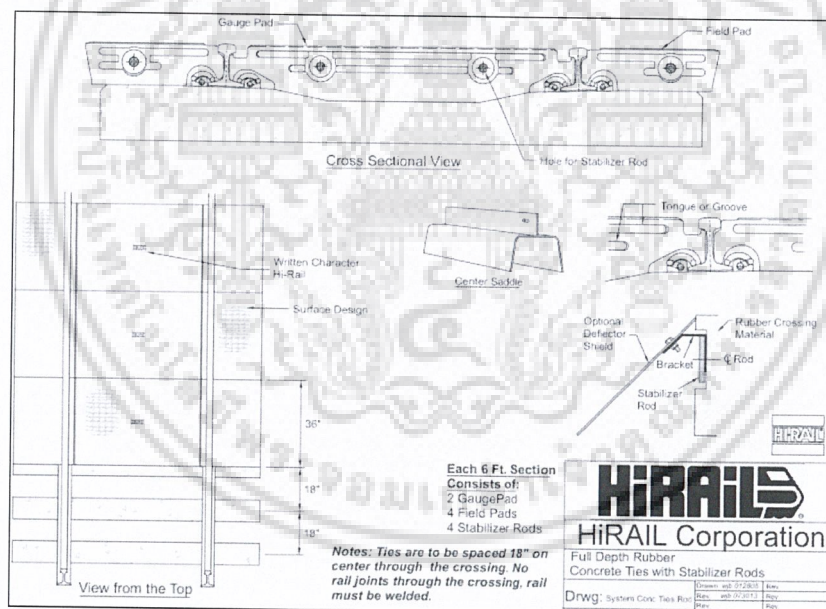
1. บริษัท HiRAIL [21] ของประเทศอเมริกา

ความต้านทานตามการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพหลัก หลังจากผ่านไปนานกว่า 20 วัน ที่ $120\text{ }^{\circ}\text{F} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ดูข้อมูลทางกายภาพ สำหรับการใช้ได้ยาวนานกว่า 4 ปีที่อุณหภูมิปกติ คือ การเปลี่ยนแปลง น้ำหนัก ± 30 ความต้านแรงดึง -50% และความแข็ง ± 15 Shore A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ตารางมาตรฐานแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟของบริษัท HiRAIL

การจำแนกสมบัติ ประเภทอีลาสโตเมอร์ตาม ASTM D2000	เกณฑ์ที่กำหนด	หน่วย	มาตรฐาน
ความแข็งกด	65 ± 5	Shore A	ASTM D2240
ความแข็งแรงดึง	> 12	MPa	ASTM D412
ความหนาแน่น	1.18 ± 0.02	g/cm ³	ASTM D297
ความต้านทานต่อการเสียดสีขัดถู	< 150	mm ³	DIN 53516
ความต้านการกร่อน	> 65	BPN	ASTM E303
ความต้านทานต่อโอโซน	-	-	ASTM D1171
การเร่งการเสื่อมอายุ	-	-	ASTM D573
การยวบตัวเนื่องจากแรงกด (22 ชั่วโมง, 70 °C)	< 20	%	ASTM D395
ความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร	1.3 × 10 ⁷	Ω.cm	ASTM D257
ความเปราะที่อุณหภูมิต่ำ	-105	°F	ASTM D2137



ภาพที่ 2.13 ตัวอย่างแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟของบริษัท HiRAIL [21]

2. บริษัท STRAIL [22] ของประเทศเยอรมนี

แผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟของบริษัท STRAIL มีลักษณะเฉพาะร่องสลักเป็นไปได้ตั้งแต่ 40 มิลลิเมตร ถึง 70 มิลลิเมตร จากช่องต่อลึนต่อร่อง การเชื่อมต่อสกรูเป็นแผงควบคุมทั้งหมดโดยระบบล๊อคที่การจดสิทธิบัตรแล้ว พื้นผิวด้านบนมีโครงสร้างรูปสามเหลี่ยมเพื่อเพิ่มการระบายน้ำ Corundum vulcanized ในพื้นผิวเพื่อปรับปรุงความต้านทานต่อการกร่อน

ความต้านทานการลื่นไถล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

> 90 SRT แบบแห้ง ตามมาตรฐาน DIN EN 13036-4 : 2003

> 56 SRT แบบเปียก ตามมาตรฐาน DIN EN 13036-4 : 2003

การระบายน้ำแวนอนบนพื้นผิว < 1 วินาที



ภาพที่ 2.14 ตัวอย่างแผ่นยางปูทางผ่านเสมอรระดับทางรถไฟของบริษัท STRAIL [22]

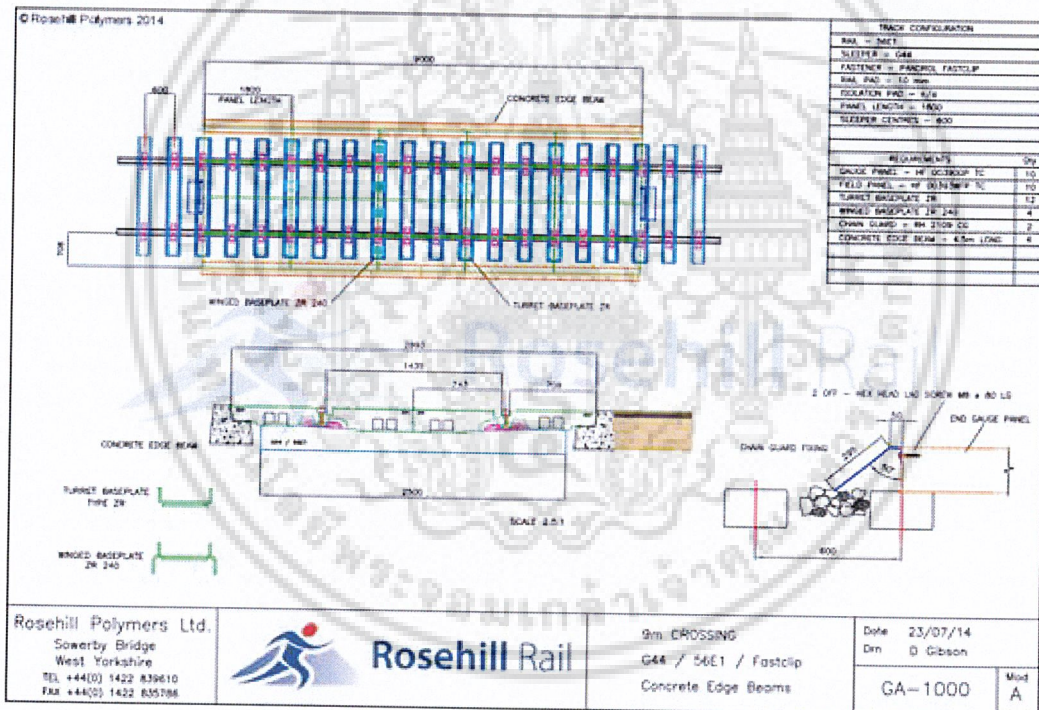
3. บริษัท Trelleborg [23] ประเทศออสเตรเลีย

ออสเตรเลียได้รับการออกแบบและทดสอบแผ่นยางปูทางผ่านเสมอรระดับทางรถไฟ มาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2534 มีการทดสอบนำแผงฟิลด์ถูกโหลดไปที่ 10 ตันเพื่อจำลองรถบรรทุกที่หยุดลงอย่างกะทันหันบนทางแยก มีการบันทึกการโก่ง เมื่อบรรทุก 10 ตัน พบว่ามีการโก่งตัวที่ 1.72 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.15 ตัวอย่างแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟของบริษัท Trelleborg [23]
4. บริษัท Rosehill Rail [24] ประเทศอังกฤษ



ภาพที่ 2.16 ตัวอย่างแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟของบริษัท Rosehill Rail [24]

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Miguel Sol-Sánchez และคณะ [25] ศึกษาการใช้อุปกรณ์ประกอบยึดหุ่นในรางรถไฟ รางรถไฟเสื่อมสภาพทั้งทางเสียงและการสั่นสะเทือน จึงทำการพัฒนาและลดปัญหาที่เกิดขึ้นจากการติดตั้งรางรถไฟ เช่น Rail pads, Under-sleeper pads และ under-ballast mats มีการปรับเปลี่ยนความแข็งแรงของ Railway track เพื่อลดปัญหาเสียงรบกวนและการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการเดินรถไฟ โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rail pads ทำมาจาก ยาง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ยางเทอร์โมพลาสติก (TPE) และ เอทิลีนไวนิลอะซีเตต (EVA) เปรียบเทียบการทดสอบเป็น Rail pads แบบแข็งและแบบนิ่ม แบบแข็งให้ผลดีในการลดพลังงาน มีอายุการใช้งานนาน ลดการสั่นสะเทือนและลดเสียงของล้อรถไฟที่เคลื่อนที่ แบบนิ่มให้ผลดีที่ลดความเสียหายของหมอนรองรางรถไฟ ช่วยลดความเค้นและลดแรงกระแทก

Buddhima Indraratna และคณะ [26] ศึกษาการทดสอบพฤติกรรมของลูกกลิ้งรองรับพื้นเสริมแรงด้วยยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว และศึกษาภาพการประยุกต์ใช้ในรางรถไฟ ทำการทดสอบโดยใช้การสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมซอฟต์แวร์ชื่อว่า Finite Element software ABAQS เพื่อศึกษาและหาปริมาณยางที่จะนำมาใช้ตรวจสอบกลไกการถ่ายเทระหว่างยางรถยนต์กับวัสดุเติมเต็ม (Infill material) เพิ่มยางรถยนต์กับหมอนเสริมแรง (Geotextile reinforcement) เพื่อช่วยลดความเครียดที่ส่งไปยังพื้นและเพิ่มความหนาของพื้นบอลลาสต์ (Subballast) และชั้นเกรด (Subgrade) ยังสามารถช่วยลดความหนาในการออกแบบบอลลาสต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่จำเป็นต้องใช้ชั้นหิน จากการทดสอบด้วยโปรแกรม ทำให้เห็นว่าความเครียดสูงสุดเกิดขึ้นใกล้หมอนรอง ขณะที่ผลของยางและวัสดุประกอบที่ใส่เข้าทำให้แข็งแรงยืดหยุ่นดี

Wahid Ferdous และคณะ [27] ศึกษาหมอนรองรางรถไฟคอมโพสิต และการพัฒนาล่าสุดความเสียหายและแนวโน้มในอนาคต เนื่องจากปัจจุบันประกอบเทคโนโลยีหมอนรถไฟ (Railway sleepers) ทำด้วยวัสดุพลาสติกกรีซไคเคิลซึ่งมีเส้นใยสั้น ๆ มีเส้นใยสูง หรือไม่มีเส้นใย ในขณะที่พลาสติกกรีซไคเคิล หมอนรถไฟมีต้นทุนต่ำ ความเสียหายที่สำคัญในการใช้หมอนรถไฟชนิดนี้ คือ ความแข็งแรงที่จำกัด จึงจำเป็นต้องนำมาทดสอบการใช้งานภายใต้การผลแรงแบบไดนามิกส์ (Dynamics) และความล้า (Fatigue) จะแสดงในสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกัน เช่น รังสี UV, ความชื้น, pH และอุณหภูมิ ก่อนที่จะติดตั้งในรางรถไฟ ปัจจุบันนี้การออกแบบหมอนรถไฟแบบผสมผสานพิจารณาว่าโหลดแบบ Quasi-static ต้องมีการปรับเปลี่ยนเพื่อรวมเอาผลแบบไดนามิกส์มาใช้ เพื่อให้ตรวจสอบเส้นทางรถไฟที่ปลอดภัยและเชื่อถือได้ การศึกษาครั้งนี้ให้เห็นแนวทางที่จะปรับปรุงและพัฒนาหมอนรถไฟคอมโพสิตแบบผสมเส้นใย และความแข็งแรงของหมอนรองพลาสติกกรีซไคเคิลสามารถปรับปรุงได้โดยการเสริมแรงด้วยเส้นใยเสริม ในขณะที่ค่าใช้จ่ายของเส้นใยสูงที่มีอยู่สามารถลดขนาดของวัสดุลงได้ ด้วยการเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุการใช้และปรับปรุงกระบวนการผลิต การเพิ่มประสิทธิภาพของหมอนรองไม่ได้เป็นเพียงข้อดีในแง่ของการลดต้นทุน แต่ยังช่วยเพิ่มเสถียรภาพด้านข้างของรางรถไฟ หลักเกณฑ์การออกแบบสำหรับคอมโพสิตเป็นสิ่งจำเป็น สำหรับการสร้างความสม่ำเสมอ

M. Sol-Scnchez และคณะ [28] ศึกษาเกี่ยวกับการใช้เศษยางในบอลลาสต์ทางรถไฟ จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการใช้ยางเศษ 10% ของเศษ (โดยปริมาตร) สามารถลดการสึกหรอของบอลลาสต์ (Ballast) และในเวลาเดียวกันได้ความจุของชั้นบอลลาสต์ที่จะกระจายพลังงานจะเพิ่มขึ้นและความแข็งแรงจะลดลง นอกจากนี้จากการศึกษาในห้องปฏิบัติการในปัจจุบันพบว่าสามารถลดปริมาณยางแห้งได้ด้วยอนุภาคยาง 10% ใช้เป็นมวลรวมยึดหยุ่น ทำการศึกษาพฤติกรรมและความทนทาน เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลจากการใช้เศษยางพาราที่มีผลต่อบอลลาสต์ได้บรรทุกที่บรรทุกเกินขนาด จากการศึกษาเอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนวิสาหรณการเขางานเพอการศีกษาเขางานนี้ เมื่อผู้เขียนไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

พบว่า การเพิ่มปริมาณเศษยางที่ 10% โดยปริมาตร เป็นปริมาณที่เหมาะสมกับประสิทธิภาพที่แสดงออกจากการใช้งานร่วมกับบัสลาสต์ โดยที่ไม่ต้องติดผลและลดเวลาในการแตกของบัสลาสต์ แต่วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้อาจจะถูกเรียกคืนเนื่องจากความหนาแน่นที่แตกต่างจึงต้องนำมาศึกษาเพิ่มเติม

Yoshitsugu Momoya และ Kazuki Ito [29] ศึกษาการพิสูจน์สมบัติและเอกลักษณ์โครงสร้างทางพิเศษสำหรับรถบรรทุกทุกเกินขนาด ทำการศึกษาลักษณะการเสีรูบของแผ่นคอนกรีตที่ปูผิวทางและพื้นคอนกรีตภายใต้โหลดรถบรรทุกและรถไฟโหลดแบบจำลองใช้ในการทดสอบ (Scale model tests) และการทดสอบแบบเต็มรูปแบบ (Full scale model tests) จากการศึกษาทดสอบพบว่า การทดสอบแบบจำลองแสดงให้เห็นความเค้น (Stress) แนวตั้งตามแนวร่องที่ลาดเอียงอย่างมตะยกลายเป็นร่องขนาดใหญ่ เมื่อรถไฟวิ่งผ่านระหว่างยางกันหมอนรถไฟ ความเค้นแนวตั้งภายใต้แผ่นพื้นคอนกรีตเป็นร่องเล็กกว่าทางเท้ายางมตะย ผลการทดสอบเต็มรูปแบบพบว่าความเครียด (Strain) ตามแนวตั้งจากรถบรรทุกขนาดใหญ่มากกว่าภายใต้การโหลดรถไฟ และเป็นที่ชัดเจนว่าแท่นคอนกรีตเป็นตัววัดที่มีประสิทธิภาพเพื่อลดความเครียดที่ใช้กับ Subgrade

กวิณ สุวรรณกุล [30] ศึกษาสูตรยางที่เหมาะสมในการผลิตยางรองรางรถไฟ ซึ่งเตรียมจากยางผสมระหว่างยางคลอโรพรีน (CR) และยางธรรมชาติ (NR) โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติของยางผสม เช่น อัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณสารตัวเติมเขม่าดำ (CB) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และกำมะถัน (S₈) สมบัติต่าง ๆ ที่ทำการศึกษา ได้แก่ สมบัติเชิงกล ความทนทานต่อน้ำมัน ความทนทานต่อโอโซน สันฐานวิทยา และสมบัติเชิงกลพลวัต จากผลการทดลองปริมาณเขม่าดำ (40 – 70 phr) พบว่ายางคลอโรพรีนที่มีปริมาณเขม่าดำ 60 phr ทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด จากการศึกษาอัตราส่วนของยางผสม CR/NR ในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าค่าความแข็งแรงดึงและระยะการยืด ณ จุดขาดของยางผสม CR/NR ต่ำกว่ายางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติ อย่างไรก็ตามค่า โมดูลัสและความแข็งกดของยางผสม CR/NR จะสูงกว่า ส่วนสมบัติเชิงกลหลังบ่มแรงด้อยลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของยางธรรมชาติ หลังทดสอบโอโซนพบว่ายางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 ไม่เกิดรอยแตกที่ผิวของยาง จากการศึกษาสันฐานวิทยาของยางผสม CR/NR ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) พบว่าการกระจายตัวของวัฏภาคยางผสมดีขึ้นเมื่อเติมเขม่าดำ ความไม่เข้ากันของยางผสม CR/NR ศึกษาจากการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงกลแบบไดนามิก (DMTA) เนื่องจากแสดงค่า T_g ที่ตำแหน่งเดิม เมื่อเพิ่มปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ พบว่าสมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มแรงของยางผสม CR/NR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นเชื่อมโยงสูงขึ้น สมบัติเชิงกลก่อนบ่มแรงเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถัน ส่วนสมบัติเชิงกลหลังบ่มแรงด้อยลง จากการศึกษาสูตรยางผสมที่เหมาะสมสำหรับใช้งานเป็นแผ่นยางรองรางรถไฟ ตามมาตรฐานการรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) คือ ยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 เขม่าดำ 60 phr แมกนีเซียมออกไซด์ 1 phr และกำมะถัน 1 phr ซึ่งมีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์

เบญจพร หนูคล้าย [31] ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุผสมนำไฟฟ้าสามองค์ประกอบจากยางธรรมชาติ โดยมีตัวเติมขนาดนาโน คือ เขม่าดำและท่อนาโนคาร์บอน สำหรับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่อผู้พูดเห็นไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจวัดความดันหรือแรงกด จากการศึกษากระบวนการขึ้นรูปวัสดุผสมสององค์ประกอบจากยางธรรมชาติและผงเขม่าดำ ด้วยวิธีการผสมแบบเปียกและแบบแห้ง พบว่าการขึ้นรูปแบบแห้งส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าที่สูงกว่า เมื่อทดลองเปรียบเทียบระบบวัลคาไนซ์ พบว่าระบบ วัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ (EV) ให้ค่าการยวบตัวอย่างถาวรอันเนื่องมาจากแรงอัดต่ำกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบดั้งเดิม (CV) ซึ่งสมบัติดังกล่าวเหมาะแก่การประยุกต์เป็นตัวตรวจวัดในสภาพของการรับแรงกด ค่าการทนต่อแรงดึงของวัสดุผสมสูงสุด พบว่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเขม่าดำ สภาพการนำไฟฟ้าที่ปรากฏชัด (Percolation threshold) พบที่ปริมาณเขม่าดำ 10 phr ความถี่จากแหล่งจ่ายมีผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุผสมที่ปริมาณเขม่าดำต่ำ แต่ไม่ส่งผลต่อการนำไฟฟ้า เมื่อมีปริมาณเขม่าดำมากกว่า 40 phr การพิจารณาอิทธิพลของความหนาขึ้นงานต่อการนำไฟฟ้า พบว่าขึ้นงานที่บางมีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าขึ้นงานหนาทุก ๆ ปริมาณของตัวเติม การทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างการนำไฟฟ้ากับความเครียดจากการกด พบว่าวัสดุผสมที่ปริมาณเขม่าดำ 50 phr ให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ในลักษณะเชิงเส้นสำหรับช่วงความเครียด 0 – 15% ผลการวิจัยจากวัสดุผสมสององค์ประกอบซึ่งมีตัวเติมเป็นผงเขม่าดำ อาจยังไม่เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจวัด เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างการนำไฟฟ้าและแรงกดไม่อยู่ในลักษณะเชิงเส้น ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาวัสดุผสมสามองค์ประกอบโดยการเติมท่อนาโนคาร์บอนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการนำไปใช้งาน ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าการทนต่อแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาด ของยางผสมเขม่าดำลดลง เมื่อมีการเติมท่อนาโนคาร์บอน ผลการทดสอบค่าความแข็ง ความต้านทานแรงกด และสมบัติการยวบตัวอย่างถาวรอันเนื่องมาจากแรงกดของวัสดุผสมสามองค์ประกอบ เพิ่มขึ้นตามปริมาณของตัวเติม สำหรับการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้กับความเครียดการกด พบว่าวัสดุสามองค์ประกอบที่มีปริมาณเขม่าดำ 50 phr และท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น 7 phr แสดงพฤติกรรมที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์เป็นตัวตรวจวัดความดันมากที่สุด ในแง่การผสมผสานของสมบัติโลหะและต้นทุนวัสดุ

รัฐพงษ์ หนูหมาด [32] ศึกษากระบวนการเชื่อมโยงของพันธะก้ำะถันและการเชื่อมสภาพในยางธรรมชาติ โดยศึกษาความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของฟิล์มยางธรรมชาติด้วยเทคนิคการวัดการวมตัว พบว่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงโมเลกุลเพิ่มขึ้นเมื่อผสมก้ำะถันและสารตัวเร่งในปริมาณที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของการเชื่อมโยง โมเลกุลไม่เพียงแต่จะปรับปรุงสมบัติทางกายภาพเท่านั้น แต่ยังช่วยปรับปรุงสมบัติด้านสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของฟิล์มยางได้ด้วย จากการศึกษาสมบัติความต้านต่อแรงดึงและค่ามอดูลัสของฟิล์มยาง พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของการเชื่อมโยงโมเลกุลเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ซึ่งโครงสร้างของพันธะเชื่อมโยงโมเลกุล และพันธะการเชื่อมสภาพของฟิล์มยาง สามารถศึกษาได้โดยเทคนิคการวัดการดูดกลืนรังสีเอกซ์ในช่วงใกล้ขอบการดูดกลืนรังสีเอกซ์ (XANES) ซึ่งพบว่าจะเกิดรูปแบบของการเชื่อมโยงโมเลกุลแบบโมโน เมื่อใช้สารเร่ง CBS และ MBTS ซึ่งจะเกิดการดูดกลืนพลังงานที่ 2472.3 eV ในขณะที่สารตัวเร่ง TMTD และ ZDEC จะส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลแบบไดและโพลี ซึ่งจะเกิดการดูดกลืนพลังงานที่ 2472 eV และ 2471 eV ตามลำดับ จากการศึกษาสารโอเลฟินน้ำหนักโมเลกุล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่ำ คือ สารสควอลีน ซึ่งมีโครงสร้างเหมือนกับยางธรรมชาติ สามารถที่จะศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างของการเชื่อมโยงโมเลกุลของกำมะถันได้โดยตรง และสามารถศึกษากลไกการเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลด้วยการศึกษา Model Compound Vulcanization (MCV) ซึ่งพบว่าการดูดกลืนรังสีเอกซ์ของ MCV จะเกิดการย้ายตำแหน่งพลังงานจาก 2473 eV สำหรับการเชื่อมโยงพันธะแบบโมโน ไปยังพลังงานการดูดกลืนรังสีเอกซ์ที่ต่ำกว่า สำหรับการเชื่อมโยงแบบโพลี ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาก่อนหน้านี้ จากการศึกษาการเสื่อมสภาพของพันธะเชื่อมโยง ซึ่งสามารถศึกษาได้โดยการบ่มเร่งด้วยไอโซนและสามารถติดตามการเสื่อมสภาพของพันธะได้โดยเทคนิค XANES และจากการศึกษาพบว่าการผสมยางธรรมชาติกับยางไนไตรล์ สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากไอโซน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ยางและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. ยางคลอโรพรีน (Chloroprene rubber, CR) ชื่อทางการค้า Denka, Chloroprene Denka Co., Ltd. สมบัติบางประการของยางคลอโรพรีนที่ใช้ในงานวิจัย แสดงในตารางที่ 3.1
2. ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) ชนิดยางแผ่นรมควันชั้น 2 (RSS-2) Astlett Rubber Inc. สมบัติบางประการของยางธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัย แสดงในตารางที่ 3.2
3. เขม่าดำ (Carbon black) ชนิด N 330, Thai Carbon Black Public Co., Ltd.
4. ซิงก์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) ชนิด Zinc white บริษัท ส.สามพรานเคมีคอล จำกัด
5. แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide, MgO) เกรดการค้า Konoshima Chemical Co., Ltd.
6. กรดสเตียริก (Stearic acid) เกรดยาง P.T. Cisadane Raya Chemicals
7. น้ำมันแนฟทาสิก (Naphthenic oils) เกรดการค้า Nynas AB
8. ฟีนิลโดเมทิลพีนิลีนไดเอมีน (N-phenyl-N'-1,3-dimethylbutyl-p-phenylenediamine, 6 PPD) เกรดการค้า Shanxi Xiangyu Chemical Co., Ltd.
9. เอทิลีน ไทโอยูเรีย (Ethylene thiourea, ETU) เกรดการค้า Kawaguchi Chemical Industry Co., Ltd.
10. ไซโคลเฮกซิลเบนโซไทอาซัลฟีนาไมด์ (N-cyclohexyl-2-benzothiazyl sulphenamide, CBS) เกรดการค้า Puyang Willing Chemicals Co., Ltd.
11. กำมะถัน (Sulfur, S₈) เกรดการค้า บริษัท สหไพศาลอินดัสทรี จำกัด
12. น้ำมันชนิดเกรด SAE 40 ชื่อทางการค้า พีที แมกซ์นิตรอน ดุรา 40 บริษัท พีทีจี เอ็นเนอยี จำกัด (มหาชน) สมบัติบางประการของน้ำมันชนิดเกรด SAE 40 ที่ใช้ในงานวิจัย แสดงในตารางที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของยางคลอโรพรีนที่ใช้ในงานวิจัย

สมบัติ	ค่าที่ได้
ความหนาแน่น (g/cm ³) ที่ 20 °C	1.23
ความหนืดมูนนี่ (ML1+4(100 °C))	48 ± 5

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของยางธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัย

สมบัติ	ค่าที่ได้
% Volatile (by Volume)	< 0.5
ความถ่วงจำเพาะ	0.92
ความหนาแน่น (g/ml)	0.92

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของน้ำมันชนิดเกรด SAE 40 ที่ใช้ในงานวิจัย

สมบัติ	ค่าที่ได้
ค่าความเป็นด่าง (mg KOH/g)	9.6
เถ้าซิลิเกต (% โดยมวล)	1.2
ความหนืด (sq mm/s) ที่ 100 °C	14.4
ดัชนีความหนืด	97
สังกะสี (% โดยมวล)	0.1

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องผสมภายใน (Internal mixer) รุ่น YFM บริษัท ยงฟง แมชชีนเนอร์ จำกัด (บริษัท เอส.เค. โพลีเมอร์ จำกัด)
2. เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) รุ่น ERM-200, Labtech Engineering Co., Ltd.
3. เครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer) รุ่น Shimadzu automatic SMV-201, Japan Science and Technology Agency.
4. เครื่องวัดการเชื่อมโยงของยางแบบไร้งาน (Moving Die Rheometer) รุ่น II F AMP, Nichigo Shoji Co., Ltd.
5. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) รุ่น 20X20X7 โรงงานช่างเจริญ การช่าง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เครื่องตัดตัวอย่างชิ้นงาน รุ่น 6052, Seast Torino italy
7. เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal testing machine) รุ่น QC-536M1, Cometech Testing Machines Co., Ltd.
8. เครื่องทดสอบความแข็งกดแบบชอร์เอ (Hardness tester, shore A) รุ่น GS-719N, Intro Enterprise Co., Ltd.
9. เครื่องชั่งดิจิตอล (Analytical balance) ทศนิยม 2 ตำแหน่ง รุ่น ML3002/01, Mettler Toledo.
10. เครื่องชั่งดิจิตอล (Analytical balance) ทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น ML204/01, Mettler Toledo.
11. ไมโครมิเตอร์ (Dial Thickness Gauge) รุ่น G, Ozaki MFG Co., Ltd.
12. เวอร์เนียคาลิปเปอร์ (Vernier Calipers) รุ่น 530-312T, Japan pattern
13. เครื่องวัดความหนาแน่น (Density kit) รุ่น ML-DNY-43, Mettler Toledo.
14. ตู้อบความร้อน (Hot air oven) รุ่น ED/FD, Binder
15. เครื่องวัดการยุบตัวเนื่องจากแรงกด (Compression set) แบบ B
16. เครื่องวัดความต้านทานต่อการเสียดสีขัดถูแบบ DIN (DIN Abrasion tester) รุ่น TF215, TESTEX Textile Testing Instruments
17. เครื่องวัดความต้านการลื่น (British pendulum tester) รุ่น 89200/RETRO, Munro Instruments Limited
18. ตู้อบโอโซน (Ozone aging tester) รุ่น Yasuda Japan, YASUDA SEIKI SEISAKUSHO, LTD.
19. เครื่องวัดสภาพการต้านไฟฟ้า (Electrodes) รุ่น SME-8310, Hioki
20. เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) รุ่น EVO @MA10, KEYENCE CORPORATION.

3.3 วิธีการทดสอบ

3.3.1 ขั้นตอนการผสมยางและเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ขั้นตอนที่ 1 บดยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีน ด้วยเครื่องผสมภายใน จากนั้นเติมสาร เติม

ต่างต่าง ๆ ตามที่สูตรกำหนด ด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง

ขั้นตอนที่ 2 ทดสอบสมบัติเชื่อมโยงและหาเวลาเชื่อมโยง

ขั้นตอนที่ 3 ชิ้นรูปร่างผสมสูตร

ขั้นตอนที่ 4 ทดสอบสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

การศึกษาสมบัติเชิงกล

- ความแข็งกด

- ความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด และมอดุลัสที่ 100%

อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มอดูลัสกดอัด
- ความต้านทานต่อการฉีกขาด
- การยุบตัวเนื่องจากแรงกด
- การยืดตัวเนื่องจากแรงดึง
- ความต้านทานต่อการเสียดสีขัดถู
- ความต้านทานการลื่น

การศึกษาสมบัติทางกายภาพ

- ความต้านทานต่อโอโซน
- ความทนทานต่อน้ำมัน
- สภาพต้านทานไฟฟ้า

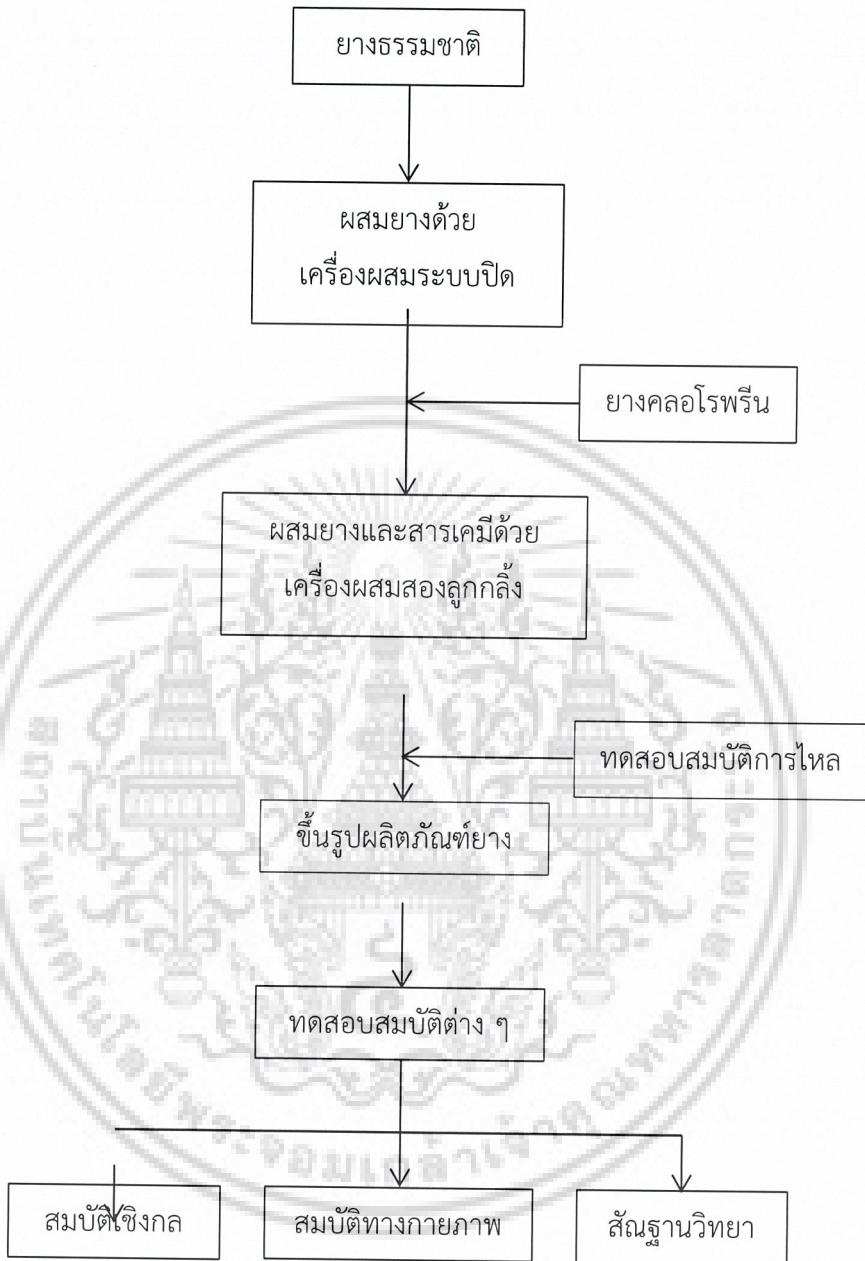
การศึกษาสัณฐานวิทยา

- ภูมิภาคของยางผสม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบสามารถสรุปเป็นแผนผัง ดังนี้



ภาพที่ 3.1 แผนผังการผสมและเตรียมชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ศึกษาสูตรยางและการบดยางผสมสารเคมี

ตารางที่ 3.4 สรุปรูมาตรฐานแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟและสมบัติที่คาดหวัง

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด เทียบมาตรฐานยางรองรางรถไฟ ⁽¹⁾	หน่วย
ความแข็ง	65 – 80	shore A
ก่อนเร่งการเสื่อมอายุ		
- ความต้านแรงดึง	12	MPa
- ความยืดเมื่อขาด	250	%
- มอดุลัสที่ความยืด 100 %	3 – 5	MPa
- มอดุลัสการกดอัด ⁽²⁾	1	MPa
หลังเร่งการเสื่อมอายุ		
- ความแข็ง ⁽²⁾	±5 - ±10	shore A
- ความต้านแรงดึง ไม่น้อยกว่า	10	MPa
- ความต้านแรงดึง เปลี่ยนแปลง ไม่น้อยกว่า	70	%
- ความยืดเมื่อขาด ไม่น้อยกว่า	180	%
- ความยืดเมื่อขาด เปลี่ยนแปลง ไม่น้อยกว่า	60	%
- มอดุลัสที่ความยืด 100 % เปลี่ยนแปลง ไม่น้อยกว่า	40	%
- มอดุลัสการกดอัด เปลี่ยนแปลงไม่เกิน ⁽²⁾	±20	%
การยุบตัวเนื่องจากแรงอัด ไม่เกิน	30	%
ความทนโอโซน	ต้องไม่มีรอยแตก	-
ความทนต่อการขีดสี ปริมาตรสูญเสียต้อง ไม่เกิน ⁽²⁾	400	mm ³
ความยืดตัว ไม่เกิน	25	%
สภาพต้านไฟฟ้าเชิงปริมาตร ไม่น้อยกว่า	100	Ω.m
ความทนทานต่อน้ำมัน	-	%
ค่าแรงเสียดทาน⁽³⁾		
- ทดสอบที่สภาวะแห้ง	80 – 110	-
- ทดสอบที่สภาวะเปียก	55 – 110	-

หมายเหตุ ⁽¹⁾ ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 4688 (2558) กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์
อุตสาหกรรมแผ่นยางรองรางรถไฟ [33]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (2) ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 4829 (2559) กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยางชะลอความเร็ว [34]
- (3) ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 4870 (2559) กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแผ่นยางปูสนามฟุตบอล [35]

การศึกษาสูตรยางของแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟ

เป็นสูตรยางที่ใช้ในการศึกษา โดยพัฒนาสูตรมาจากยางรองรางรถไฟ มีสมบัติทนต่อน้ำมัน ทนทานต่อโอโซน มีความแข็งแรงดึงสูง ด้านทานต่อการฉีกขาด และยุบตัวเนื่องจากแรงกดต่ำ มีองค์ประกอบตามตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษา

องค์ประกอบ	ปริมาณ (phr)
CR	75, 50, 25
NR	25, 50, 75
ZnO	5
MgO	1
Stearic acid	2
Carbon black	40, 50, 60
Napthanic oil	5
6 PPD	1
ETU	1
CBS	0.5
Sulfur	1

หมายเหตุ - ศึกษาอัตราส่วนระหว่างยางคลอโรพรีนต่อยางธรรมชาติ

- ศึกษาผลของการเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติในยางผสมสูตรที่มีปริมาณเคมีค่าที่ต่างกัน

การบดยางและผสมสารเคมี

1. ชั่งยางและสารเคมีตามสูตร ตารางที่ 3.5
2. บดย่อยยางธรรมชาติ ยางคลอโรพรีน และผสม MgO ด้วยเครื่องผสมระบบปิด ที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. จากนั้นเติมเขม่าดำพร้อม ๆ กับเติมน้ำมันแอฟทานิก ตามด้วยกรดสเตียริก และ 6 PPD ตามลำดับที่อุณหภูมิ 135 °C เป็นเวลา 13 นาที
4. นำมาผสมต่อด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้งเติม ZnO ETU และสารเร่งปฏิกิริยาอย่างคงรูป CBS ตามลำดับ ผสมเป็นเวลา 15 นาที
5. จากนั้นเติมกำมะถันผสมเป็นเวลา 5 นาที
6. แล้วรีดเป็นแผ่นหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร ทิ้งยั้งให้เย็นแล้วนำมาเตรียมทดสอบชิ้นงาน

3.4 การทดสอบยางผสมสูตร

สมบัติยางผสมสูตรทดสอบตามมาตรฐาน ดังนี้

3.4.1 ความหนืดมูนี

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D1646 [36]

หาค่าความหนืดมูนี โดยใช้แกนหมุนขนาดใหญ่ที่อุณหภูมิ 100 °C (ML1+4(100 °C)) ทำการตัดชิ้นงานยางที่ได้จากเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง 2 แผ่น หนาประมาณ 1 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4.5 – 5.0 เซนติเมตร (ขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของจานโลหะ) มาทดสอบหาความหนืดมูนี

3.4.2 เวลาเชื่อมโยงของยางผสมสูตร

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D5289 [37]

ตัดยางเป็นแผ่นหนาประมาณ 1 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 เซนติเมตร ทดสอบด้วยเครื่อง MDR ที่อุณหภูมิ 150 °C หาเวลาสกอรัซ (t_{s2}) และเวลาเชื่อมโยง (t_{90}) ของยางผสมสูตรแต่ละสูตร

3.4.3 การเชื่อมโยงยาง

นำยางผสมมาอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C โดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป แม่พิมพ์ที่ใช้มีขนาดความกว้าง 120 มิลลิเมตร ความยาว 120 มิลลิเมตร และความหนา 2.0 ± 0.2 มิลลิเมตร อัดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบที่เวลาเชื่อมโยง t_{90}

3.4.4 ความแข็งกด

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D2240 [38]

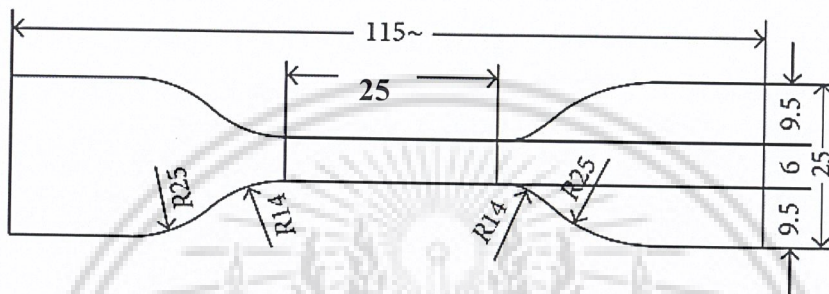
นำชิ้นทดสอบที่เตรียมได้มาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งกดแบบน้ำหนักคงที่ (Dead load hardness tester) ชนิด Shore A ที่อุณหภูมิห้อง สามารถอ่านค่าความแข็งกดได้โดยตรงจากเครื่องทดสอบหลังจากกดเป็นระยะเวลา 30 วินาที ความหนาของชิ้นทดสอบอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร รายงานผลค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบ 10 ครั้งต่อ 1 สูตร โดยทำการทดสอบ 2 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.5 ความแข็งแรงดึง

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D412 [39]

เตรียมชิ้นงานทดสอบสมบัติแรงดึง โดยนำยางคงรูปมาตัดเป็นรูปดัมเบลล์ (Dumbbell shape) ชนิด Die C ที่มีความยาวเกจ (Gauge length) 25 มิลลิเมตร (ดังรูปที่ 3.2) แล้วทำการทดสอบแรงดึง ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงโดยใช้โหลดเซลล์ (Load cell) ขนาด 2 กิโลนิวตัน (kN) อัตราเร็วในแรงดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที หาความแข็งแรงดึง ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด และมอดุลัสที่ 100% ทำการทดสอบ 8 ชิ้นต่อ 1 สูตร



ภาพที่ 3.2 ชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบลล์ [40]

คำจำกัดความและการคำนวณ

1). ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) หมายถึง ความเค้นสูงสุดของชิ้นงานทดสอบที่ได้รับเมื่อให้แรงดึง มีหน่วยเป็นเมกะปาสคาล (MPa)

$$TS = \frac{F}{A}$$

(3.1)

เมื่อ TS คือ ความแข็งแรงดึง (MPa)

F คือ แรงที่ใช้ในการดึงสูงสุดเกิดที่จุดขาด (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบ (m²)

2). ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) หมายถึง ความสามารถของชิ้นงานทดสอบที่สามารถยืดออก เมื่อได้รับแรงดึงจนขาด

$$\% Eb = \left[\frac{(l - l_0)}{l_0} \right] \times 100$$

(3.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ % Eb คือ ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%)

L คือ ความยาวสุดท้าย ณ จุดขาดของชิ้นงานทดสอบ (mm)

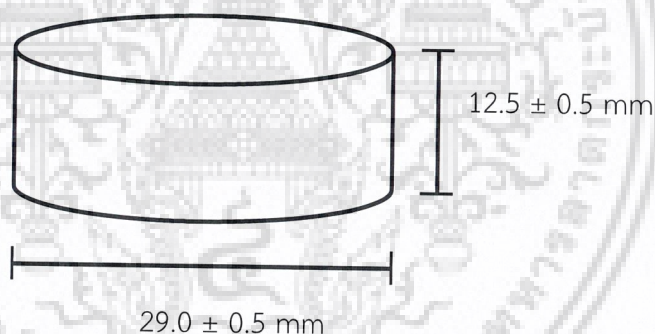
L_0 คือ ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ (mm)

3). มอดุลัสที่ 100% (Modulus at 100%) หมายถึง ค่าความเค้นดึงยืดที่ 100% ของชิ้นงานทดสอบ มีหน่วยเป็นเมกะปาสคาล (MPa)

3.4.6 มอดุลัสกดอัด

มาตรฐานการทดสอบ ISO 7743 Method A [41]

เตรียมชิ้นงานทดสอบอย่างคงรูปมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 29.0 ± 0.5 มิลลิเมตร และความหนา 12.5 ± 0.5 มิลลิเมตร (ดังรูปที่ 3.3) วัดความหนาของชิ้นงานทดสอบ วางชิ้นงานทดสอบระหว่างแผ่นกดของเครื่องทดสอบ อัตราเร็วในการกด 10 มิลลิเมตรต่อนาที กดลงไป 25% ของความหนาชิ้นงานทดสอบแล้วทำการปล่อยแรง ทำการกดซ้ำ 4 ครั้ง บันทึกค่าจากการกดครั้งที่ 4 โดยบันทึกค่าแรงที่ 20% Strain ทำการทดสอบ 3 ชิ้นต่อ 1 สูตร



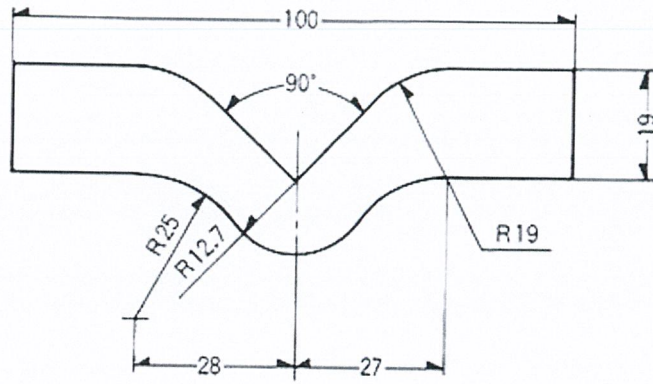
ภาพที่ 3.3 ลักษณะชิ้นงานทดสอบมอดุลัสกดอัด

3.4.7 ความต้านทานต่อการฉีกขาด

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D624 [42]

เตรียมชิ้นงานทดสอบสมบัติความทนทานต่อการฉีกขาด โดยนำยางคงรูปมาตัดเป็นรูปแบบมุม (Angle shape) ชนิด Die C ที่ไม่มีรอยบากตรงมุม (ดังรูปที่ 3.4) แล้วทำการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงโดยใช้โหลดเซลล์ (Load cell) ขนาด 2 กิโลนิวตัน (kN) ที่มีอัตราเร็วในแรงดึง 500 มิลลิลิตรต่อนาที ทำการทดสอบ 8 ชิ้นต่อ 1 สูตร บันทึกค่าแรงดึงที่ได้เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความทนทานต่อการฉีกขาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.4 ชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด [43]

คำจำกัดความและการคำนวณ

ความต้านทานต่อการฉีกขาด หมายถึง ความเค้นสูงสุดของชิ้นงานทดสอบที่ได้รับเมื่อให้แรงดึงจนฉีกขาดออกจากกัน มีหน่วยเป็นนิวตันต่อมิลลิเมตร (N/mm)

$$T_s = \frac{F}{d}$$

(3.3)

เมื่อ T_s คือ ความทนทานต่อการฉีกขาด (N/mm)

F คือ แรงที่ใช้ในการดึงสูงสุดเกิดที่จุดฉีกขาด (N)

d คือ ความหนาของชิ้นงานทดสอบ (mm)

3.4.8 ทดสอบสมบัติหลังเร่งการเสื่อมอายุ

มาตรฐานการทดสอบ ISO 188 [44]

นำชิ้นงานทดสอบที่เตรียมได้จากการตัดชิ้นงานทดสอบความแข็งแรง ความแข็งแรงดึง มอดุลัสกดอัด และความต้านทานต่อการฉีกขาด ไปอบที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง หลังจากนั้น ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการทดสอบ โดยใช้สภาวะเดียวกับการทดสอบสมบัติความแข็งแรงกด ความแข็งแรงดึง มอดุลัสกดอัด และความต้านทานต่อการฉีกขาด ก่อนเร่งการเสื่อมอายุ หาค่าความแข็งแรงกด ความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด มอดุลัสที่ 100% มอดุลัสกดอัด และความต้านทานต่อการฉีกขาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำจำกัดความและการคำนวณ

การเร่งการเสื่อมอายุ หมายถึง การทำให้อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของยางเร็วขึ้น และเร่งการเสื่อมสภาพของยางให้เร็วขึ้น เพื่อประเมินสมบัติของยางเมื่อมีอายุการใช้งานมากขึ้น

$$P = \left[\frac{(A - O)}{O} \right] \times 100 \quad (3.4)$$

เมื่อ P คือ ร้อยละของการเปลี่ยนแปลงสมบัติ

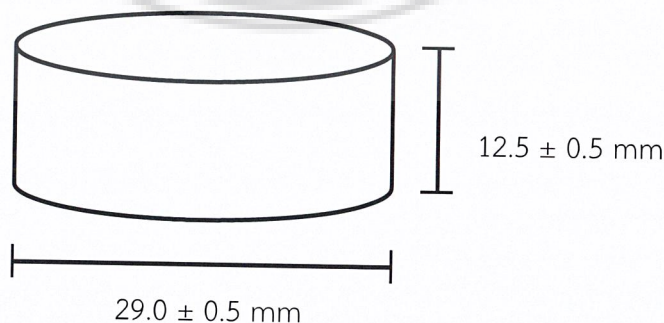
A คือ ค่าของสมบัติหลังบ่มเร่ง

O คือ ค่าของสมบัติก่อนบ่มเร่ง

3.4.9 การยุบตัวเนื่องจากแรงกด

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D395 Method B [45]

เตรียมชิ้นงานทดสอบอย่างคงรูปลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก ความหนา 12.5 ± 0.5 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 29.0 ± 0.5 มิลลิเมตร (ดังรูปที่ 3.5) วัดความหนาของชิ้นงานทดสอบแล้วนำไปวางระหว่างแผ่นเหล็กทั้งสองของอุปกรณ์ สำหรับการทดสอบจะมีแผ่นเหล็กกั้น (Spacer bars) โดยทำการกดอัดในระยะประมาณ 25% ของความหนาของชิ้นงานทดสอบ จากนั้นนำอุปกรณ์ที่มีชิ้นงานทดสอบเข้าไปในตู้อบที่มีอุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง หลังจากครบกำหนดนำชิ้นทดสอบออกจากอุปกรณ์ทดสอบมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 30 นาที วัดความหนาของชิ้นงานทดสอบ โดยทดสอบ 3 ชิ้นต่อ 1 สูตร คำนวณผลดังสมการที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 ลักษณะชิ้นงานทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงกด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณ

$$\% C_B = \left[\frac{(t_0 - t_l)}{(t_0 - t_n)} \right] \times 100$$

(3.5)

เมื่อ % C_B คือ การยุบตัวเนื่องจากแรงกด (%)

t₀ คือ ความหนาของชั้นทดสอบเริ่มต้น (mm)

t_l คือ ความหนาของชั้นทดสอบหลังอบ (mm)

t_n คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นเหล็กกัน (mm)

3.4.10 การยืดตัวเนื่องจากแรงดึง

มาตรฐานการทดสอบ ISO 2285 [46]

นำชั้นทดสอบยางคงรูปที่ลักษณะเป็นรูปดัมเบลล์ เช่นเดียวกับการทดสอบความแข็งแรงดึง โดยนำมาทำสัญลักษณ์ตรงกลาง ต่อมาวัดระยะความยาวเกจก่อนทำการทดสอบ โดยยืดชั้นงานทดสอบให้ยาวขึ้น 50% แล้วนำอุปกรณ์ทดสอบการดึงที่มีชั้นงานทดสอบไปอบที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากครบกำหนดแล้ว นำมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 30 นาที วัดระยะความยาวเกจหลังทดสอบ โดยทดสอบ 3 ชั้นต่อ 1 สูตร คำนวณผลดังสมการที่ 3.6

การคำนวณ

$$T_A = \left[\frac{(L_l - L_0)}{L_0} \right] \times 100$$

(3.6)

เมื่อ T_A คือ การยืดตัวเนื่องจากแรงดึง (%)

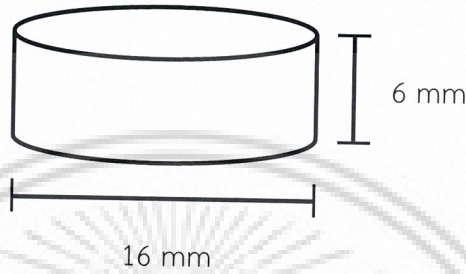
L₀ คือ ความยาวเกจก่อนยืด (mm)

L_l คือ ความยาวเกจหลังยืด (mm)

3.4.11 ความต้านทานต่อการเสียดสีขัดถู

มาตรฐานการทดสอบ ISO 4649 method A [47]

เตรียมชิ้นงานทดสอบอย่างคงรูปมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก โดยมีความหนาไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร (ดังรูปที่ 3.6) ทดสอบโดยใช้ DIN Abrasion tester นำชิ้นงานทดสอบไปสัมผัสกับพื้นผิวแล้วขัดด้วยแรงคงที่ 10 นิวตัน และระยะทางขัดถู 40 เมตร โดยหาน้ำหนักที่สูญเสียบ้าง คำนวณผลดังสมการที่ 3.7



ภาพที่ 3.6 ลักษณะชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อการเสียดสีขัดถู

การคำนวณ

$$\text{Volume loss (A)} = \left[\frac{(M_2 - M_1)}{SG} \right] \times \left[\frac{S_0}{S} \right]$$

(3.7)

เมื่อ A คือ ปริมาตรสูญเสียบ้างจากการขัดถู (mm³)

M₁ คือ ปริมาตรก่อนการขัดถู (g)

M₂ คือ ปริมาตรหลังการขัดถู (g)

SG คือ ความหนาแน่น (g/cm³)

S₀ คือ น้ำหนักการสูญเสียบ้างของยางโดยทฤษฎี (g)

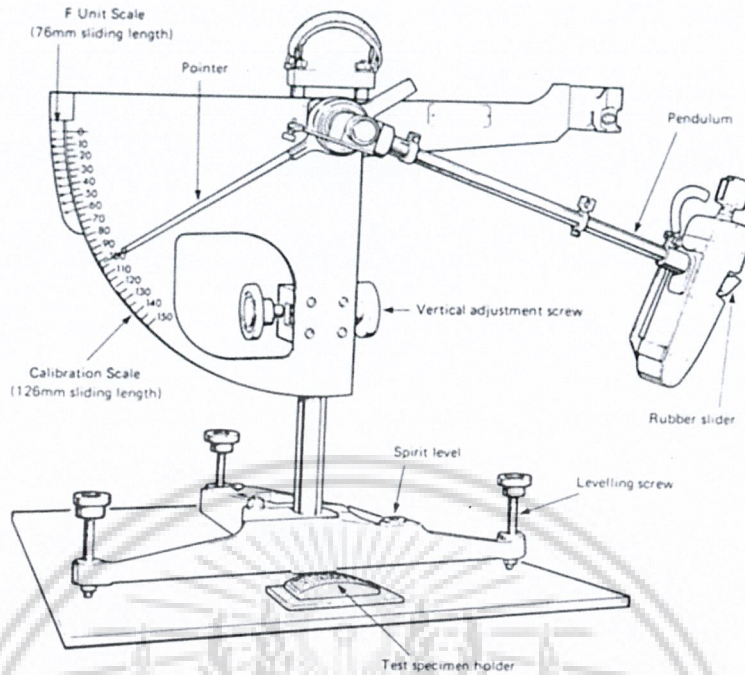
S คือ น้ำหนักการสูญเสียบ้างของยางอ้างอิง (g)

3.4.12 ความต้านการลื่น

มาตรฐานการทดสอบ EN 13036-4 [48]

เตรียมชิ้นงานทดสอบอย่างคงรูปสี่เหลี่ยมที่มีขนาดความกว้าง 200 มิลลิเมตร ความยาว 200 มิลลิเมตร และความหนา 3 มิลลิเมตร ทดสอบโดยใช้ British Pendulum Tester (BPT) (ดังรูปที่ 3.7) ทดสอบที่สภาวะแห้งและทดสอบที่สภาวะเปียก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.7 องค์ประกอบของ British Pendulum Tester (BPT) [49]

วิธีการทดสอบความต้านทานการลื่น [50] ดังนี้

1. ติดตั้งเครื่องมือทดสอบให้ได้ระดับพื้นแข็งด้วยฐานรับขาตั้งบนพื้นเรียบ เพื่อป้องกันการเบี่ยงเบนของระดับระหว่างการปล่อยแขนแกว่งตอนทดสอบ ยกระดับปลายแขนเหวี่ยงให้สูงขึ้นเล็กน้อย โดยไม่สัมผัสกับผิวของชิ้นงานทดสอบ และให้แขนเหวี่ยงแกว่งได้อย่างอิสระ แล้วบันทึกค่าที่อ่านได้ ถ้าค่าที่ได้ไม่เป็นศูนย์ให้ปรับแหวนเสียดทาน แล้วทำการทดสอบซ้ำจนกระทั่งได้ค่าศูนย์
2. ปรับระยะให้ยางบนแขนเหวี่ยงสัมผัสกับชิ้นงานทดสอบอยู่ในช่วง 125 มิลลิเมตร ถึง 127 มิลลิเมตร ยึดความสูงของแขนเหวี่ยงไว้ในตำแหน่งนี้ และตรวจสอบระยะทางการทดสอบอีกครั้ง ดึงแขนเหวี่ยงให้อยู่ในแนว 90° กับชิ้นงานทดสอบ โดยยึดไว้ที่ปุ่มปล่อย
3. ราดน้ำผิวทดสอบด้วยน้ำสะอาดแล้ว ปล่อยแขนเหวี่ยงทดสอบครั้งแรกแต่ไม่บันทึกค่า เมื่อปล่อยแขนเหวี่ยงให้ไปสัมผัสกับชิ้นงานทดสอบตามระยะความยาวที่ตั้งไว้ แล้วแขนเหวี่ยงจะพลิกเข็มชี้ (Lazy pointer) ไปยังตำแหน่งแขนเหวี่ยงที่ไปได้สูงสุดบนสเกล
4. จากนั้นดึงแขนเหวี่ยงกลับไปยึดไว้ที่ปุ่มปล่อยตามเดิม แล้วปล่อยแขนเหวี่ยงอีก 5 ครั้ง บันทึกค่าที่อ่านได้ของการแกว่งในแต่ละครั้ง คำนวณค่าเฉลี่ยจาก 5 ค่าที่ทดสอบ ผลการทดสอบนี้เป็นผลทดสอบแบบเปียก (Wet result)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.13 ความต้านทานต่อโอโซน

มาตรฐานการทดสอบ ISO 1431-1 [51]

เตรียมชิ้นงานทดสอบอย่างคงรูปสี่เหลี่ยมที่มีขนาดความกว้าง 10 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร และความหนา 2.0 ± 0.2 มิลลิเมตร มายืดปลายทั้งสองข้างของชิ้นงานทดสอบให้ยาวเพิ่มขึ้น 20% หลังจากนั้นนำเข้าสู่ตู้อบโอโซนที่มีความเข้มข้นของโอโซน 25 ppm (part per hundred million) ที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นตรวจหารอยแตกที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานทดสอบด้วยแว่นขยายที่มีกำลังขยาย 7 เท่า ขณะที่ชิ้นงานยืด 20% ทดสอบ 3 ชิ้นต่อ 1 สูตร โดยทำการทดสอบ 2 รอบ

3.4.14 ความทนทานต่อน้ำมัน

มาตรฐานการทดสอบ ISO 1817 [52]

เตรียมชิ้นงานทดสอบอย่างคงรูปที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาดมีขนาดความกว้าง 25 มิลลิเมตร ความยาว 40 มิลลิเมตร และความหนา 2.0 ± 0.1 มิลลิเมตร นำไปชั่งน้ำหนักของยางในน้ำ และ ในอากาศ ทำการบันทึกน้ำหนักก่อนแช่น้ำมันไว้ ต่อมาแช่ชิ้นทดสอบในน้ำมันชนิด SAE 40 ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำชิ้นงานทดสอบออกจากน้ำมันมาชั่งด้วยกระดาษทิชชู แล้วชั่งน้ำหนักยางในน้ำ และในอากาศ บันทึกน้ำหนักหลังแช่น้ำมัน โดยทดสอบ 3 ชิ้นต่อ 1 สูตร เพื่อหาร้อยละการบวมตัวของยาง คำนวณผลดังสมการที่ 3.8

การคำนวณ

$$\text{Oil swell (\%)} = \left[\frac{(m_3 - m_4) - (m_1 - m_2)}{(m_1 - m_2)} \right] \times 100$$

(3.8)

เมื่อ oil swell คือ ร้อยละการบวมตัวของยางในน้ำมัน (%)

m_1 คือ น้ำหนักยางก่อนแช่น้ำมันในอากาศ (g)

m_2 คือ น้ำหนักยางก่อนแช่น้ำมันในน้ำ (g)

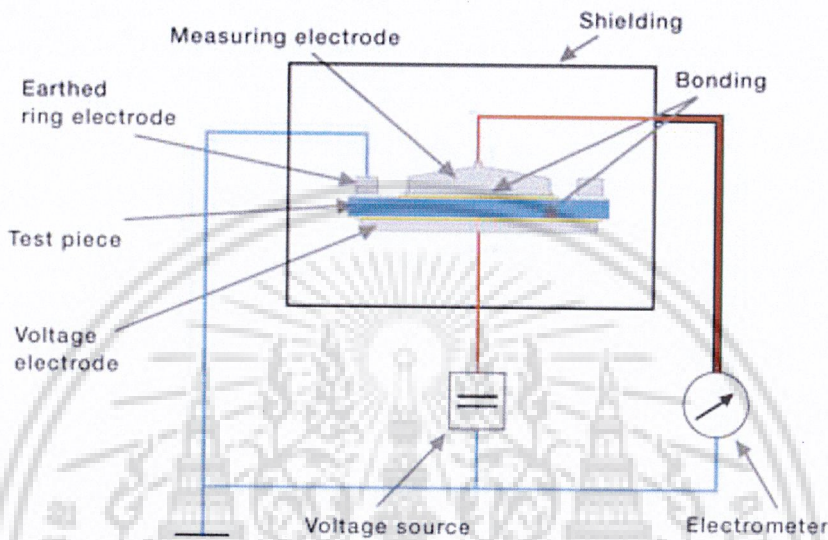
m_3 คือ น้ำหนักยางหลังแช่น้ำมันในอากาศ (g)

m_4 คือ น้ำหนักยางหลังแช่น้ำมันในน้ำ (g)

3.4.15 สภาพต้านทานไฟฟ้า

มาตรฐานการทดสอบ ISO 14309 [53]

เตรียมชิ้นงานทดสอบอย่างคงรูปสี่เหลี่ยมที่มีขนาดความกว้าง 90 มิลลิเมตร ความยาว 90 มิลลิเมตร และความหนา 2 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องวัดการนำไฟฟ้าต่อเข้ากับขั้วอิเล็กโทรด นำชิ้นงานทดสอบวางระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด แล้วทำการทดสอบสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร คำนวณผลดังสมการที่ 3.9



ภาพที่ 3.8 วงจรการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร [54]

คำจำกัดความและการคำนวณ

สภาพต้านไฟฟ้าเชิงปริมาตร คือ ค่าที่คำนวณจากอัตราส่วนของค่าการของค่าการเปลี่ยนแปลง ศักย์ไฟฟ้าแกร์เดียน (Voltage gradient) (ซึ่งคำนวณจากค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้วัด หาค่าความหนาของ ชิ้นงานทดสอบ) กับค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current density) ที่ใช้ทดสอบ มีหน่วยเป็น $\Omega \cdot m$

การคำนวณ

$$P_v = \frac{\pi \times D^2 \times V}{4 \times h \times I_v}$$

(3.9)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ P_v คือ สภาพต้านไฟฟ้าเชิงปริมาตร ($\Omega \cdot m$)
 D คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของขั้วอิเล็กโทรด (m)
 h คือ ความหนาของชิ้นงานทดสอบ (m)
 V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)
 I_v คือ กระแสไฟฟ้า (A)

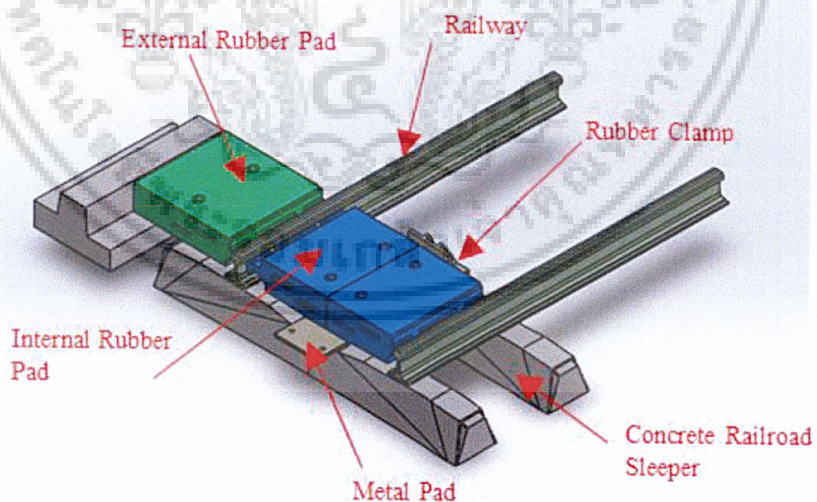
3.4.16 สันฐานวิทยา

เตรียมชิ้นงานทดสอบอย่างคงรูปสี่เหลี่ยมที่มีขนาดความกว้าง 5 มิลลิเมตร ความยาว 10 มิลลิเมตร และความหนา 2 มิลลิเมตร ตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่องด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เป็นการดูลักษณะของชิ้นงานทดสอบ เพื่อดูการกระจายตัวของสารตัวเติมในเนื้อเยื่อ โดยการนำชิ้นงานทดสอบแช่ในไนโตรเจนเหลว หักชิ้นงานขณะแข็งประาะ จากนั้นนำไปเคลือบทองบนชิ้นงาน แล้วทำการถ่ายภาพพื้นที่ตัดขวางของชิ้นงานทดสอบ ที่กำลังขยาย 5000 เท่า และ 10000 เท่า

3.5 การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.5.1 การตั้งค่าคุณสมบัติวัสดุ (Material Properties) ของแบบจำลอง

แบบจำลองสำหรับวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะมีองค์ประกอบที่จำลองจากระบบรางและการติดตั้งจริงของแผ่นยาง



ภาพที่ 3.9 องค์ประกอบของแบบจำลอง

คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์

Material	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio
Structural Steel	460	250	200,000	0.3
Concrete	5	0	40,000	0.18

ตารางที่ 3.7 คุณสมบัติของยางที่ใช้ในการวิเคราะห์

Tensile Strength (MPa)	%Elongation at break	Modulus at 100 %	Poisson's ratio
19.718	513.916	3.8605	0.49

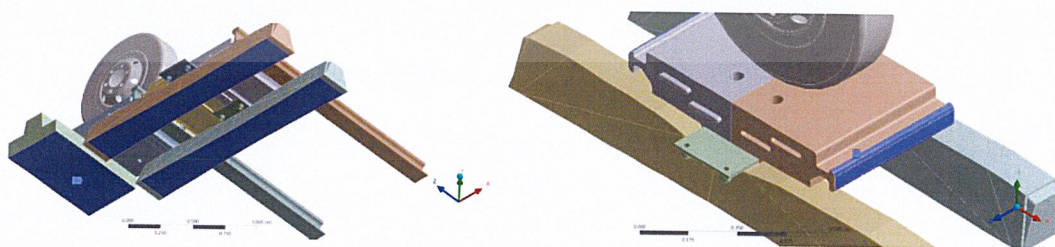
3.5.2 การตั้งค่าจุดสัมผัส (Contacts) ของแบบจำลอง

จุดสัมผัสที่ใช้ในการวิเคราะห์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ ได้แก่

- Suppress contact เป็นการซ่อนสัมผัสใช้กับบริเวณรอยต่อระหว่างยางสองแผ่น เนื่องจากการติดตั้งจะเป็นการวางยางทั้งสองแผ่นโดยไม่มีการยึดหรือติดกาวเข้าด้วยกัน
- Rough contact ใช้กับบริเวณที่ยางสัมผัสกับแผ่นเหล็ก
- Bonded contact ใช้กับบริเวณอื่นๆ นอกเหนือจาก Suppress และ Rough contact

3.5.3 การตั้งค่าสภาวะแวดล้อม (Boundary Condition)

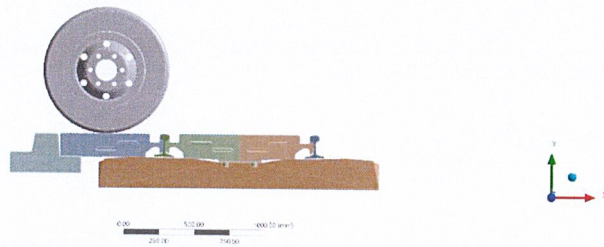
- Fixed Support คือ บริเวณที่ฐานยึดแน่น เมื่อมีแรงกระทำจะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ บริเวณนี้มีอยู่ 3 จุด ได้แก่ จุดที่แผ่นยางสัมผัสกับรางรถไฟ บริเวณฐานของคอนกรีตตัวนอก และ บริเวณฐานของหมอนคอนกรีต



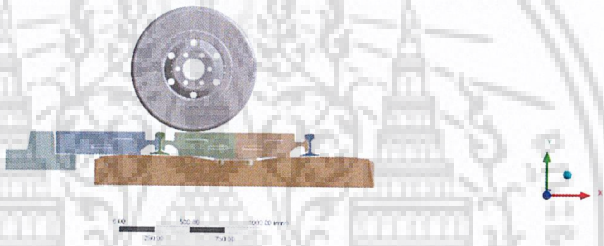
ภาพที่ 3.10 Fixed Support

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

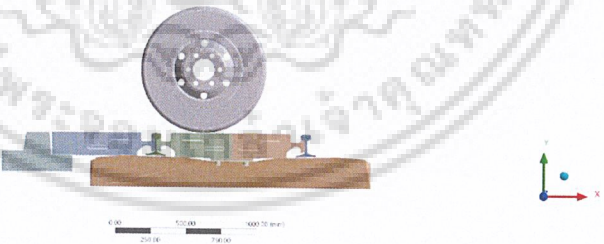
- Force คือ แรงกระทำ ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการจำลองเหตุการณ์ขณะล้อของรถตกลงบนแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟ แรงกระทำเกิดขึ้นเนื่องมาจากน้ำหนักของรถบรรทุกที่ตกลงบนคัมของล้อรถ 1 ล้อ แรงกระทำมีขนาด 22.5 กิโลนิวตัน บริเวณที่ทำการจำลองกดแรงแบ่งออกเป็น 5 จุด ได้แก่



ภาพที่ 3.11 แรงกระทำจุดที่ 1 บริเวณแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟด้านนอก

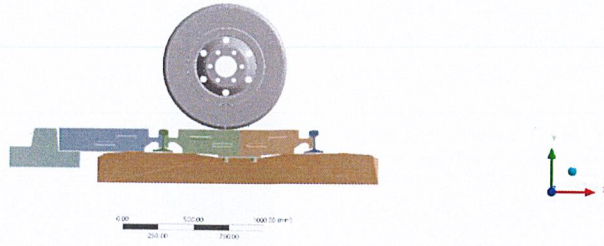


ภาพที่ 3.12 แรงกระทำจุดที่ 2 บริเวณแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวในใกล้กับรางรถไฟ

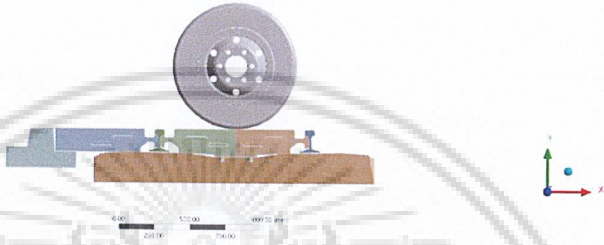


ภาพที่ 3.13 แรงกระทำจุดที่ 3 บริเวณกึ่งกลางแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.14 แรงกระทำจุดที่ 4 บริเวณใกล้กับจุดต่อระหว่างแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน



ภาพที่ 3.15 แรงกระทำจุดที่ 5 บริเวณจุดต่อระหว่างแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน

3.5.4 อัตราส่วนความปลอดภัย (Safety Factor)

คำจำกัดความและการคำนวณ

อัตราส่วนความปลอดภัย คือ อัตราส่วนระหว่างที่แสดงถึงความสามารถในการรับน้ำหนักของระบบ ซึ่งการคำนวณอัตราส่วนความปลอดภัยนั้นจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ

การคำนวณ

- Safety factor ของแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟ

$$SF_{\text{Rubber}} = \frac{\text{Fracture strain (elongation at break)}}{\text{Maximum equivalent strain}} \quad (3.10)$$

- Safety factor ของแผ่นโลหะรองแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟ

$$SF_{\text{Metal pad}} = \frac{\text{yields stress of material}}{\text{Maximum von - mises stress}} \quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Safety factor ของหมอนคอนกรีต

$$SF_{\text{Concrete}} = \frac{\text{Ultimate tensile strenght}}{\text{Maximum pricipal stress}}$$

(3.12)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

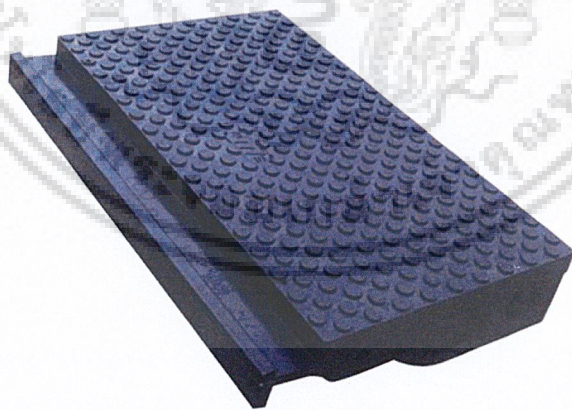
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติของแผ่นยางปูทางผ่านเสมอรระดับทางรถไฟ เป็นการศึกษาสูตรยางซึ่งเตรียมจากการผสมระหว่างยางคลอโรพรีน (CR) และยางธรรมชาติ (NR) ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดขึ้นรูป หลังจากนั้นทดสอบสมบัติต่าง ๆ ที่มีผลต่อยางผสมสูตร เช่น สมบัติเชิงกลก่อนและหลังเร่งการเสื่อมอายุ ซึ่งมีปัจจัยศึกษา ดังนี้

- การศึกษาอัตราส่วนระหว่างยางคลอโรพรีนต่อยางธรรมชาติ (CR/NR ratios)
- การศึกษาผลของการเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติในยางผสมสูตรที่มีปริมาณเขม่าดำที่ต่างกัน (Carbon black loading)

คณะผู้วิจัยเลือกใช้ยางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติ ผสมสารเคมีให้ได้สมบัติและสูตรยาง มาเป็นวัสดุในการทำแผ่นยางปูทางผ่านเสมอรระดับทางรถไฟ (ดังรูปที่ 4.1) เพื่อพัฒนาสูตรแผ่นยางปูทางผ่านเสมอรระดับทางรถไฟให้ได้ตามมาตรฐานการรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) ตามตารางที่ 3.4 หลังจากนั้นหาอัตราส่วนยางผสมที่มียางธรรมชาติในผลิตภัณฑ์ให้ได้มากที่สุด เพื่อลดต้นทุนการผลิตและส่งเสริมการใช้งานยางธรรมชาติในประเทศ คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับยางผสมสูตร เพื่อให้ได้ตามมาตรฐานการรถไฟแห่งประเทศไทย โดยทำการทดสอบศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของตัวอย่างชิ้นงานยางที่เตรียมได้ ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และสัญญาณวิทยา



ภาพที่ 4.1 แผ่นยางปูทางผ่านเสมอรระดับทางรถไฟ [55]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

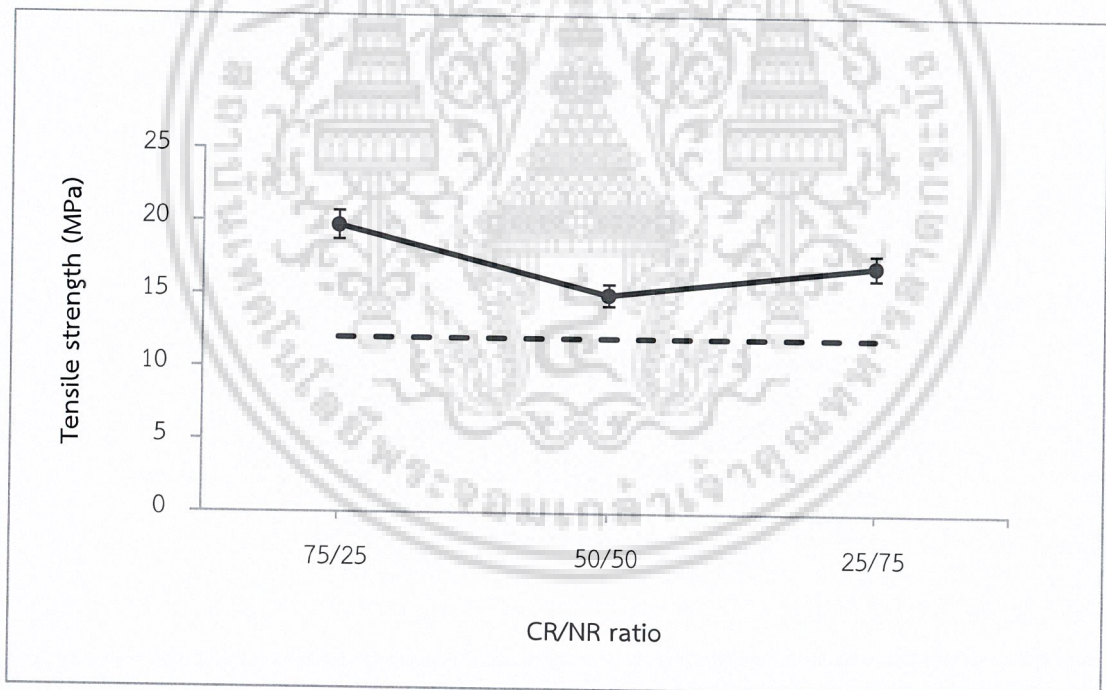
4.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างยางคลอโรพรีนต่อยางธรรมชาติ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมยางได้มีแนวคิดในการพัฒนาต่าง ๆ เช่น การใช้ยางผสม (Rubber blends) ในผลิตภัณฑ์ มีวัตถุประสงค์หลายประการ เช่น เพิ่มสมบัติการใช้งาน ช่วยในกระบวนการแปรรูปให้ง่ายขึ้น และลดต้นทุนการผลิต ซึ่งการใช้ยางชนิดเดียวไม่สามารถที่จะทำให้สมบัติต่าง ๆ ตามต้องการได้ เนื่องจากมีข้อจำกัดในการใช้งานของยางแต่ละประเภทที่แตกต่างกัน จึงได้นำยางธรรมชาติเข้ามาทดแทนยางสังเคราะห์บางส่วน และนอกจากนี้เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติที่ดีของยางแต่ละชนิด

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบผลอัตราส่วนระหว่าง CR/NR ที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และสัญญาณวิทยา โดยใช้ยางผสม CR/NR อัตราส่วนที่ 75/25, 50/50 และ 25/75 (โดยน้ำหนัก) ที่มีปริมาณเขม่าดำ 60 phr

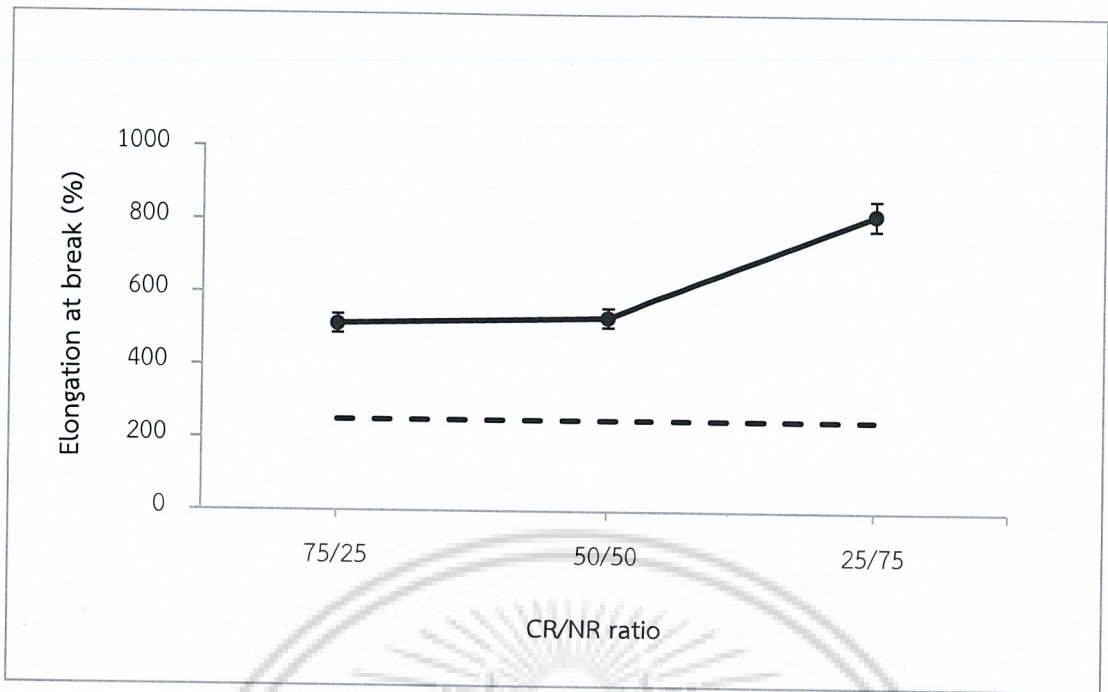
4.1.1 สมบัติเชิงกลก่อนบ่มแรงที่มีอัตราส่วนยางผสม CR/NR ที่ต่างกัน

จากการทดสอบผลของอัตราส่วนยางผสม CR/NR อัตราส่วนที่ 75/25, 50/50 และ 25/75 ที่มีปริมาณเขม่าดำ 60 phr ต่อสมบัติเชิงกลก่อนบ่มแรง แสดงผลดังรูปที่ 4.2 – 4.8

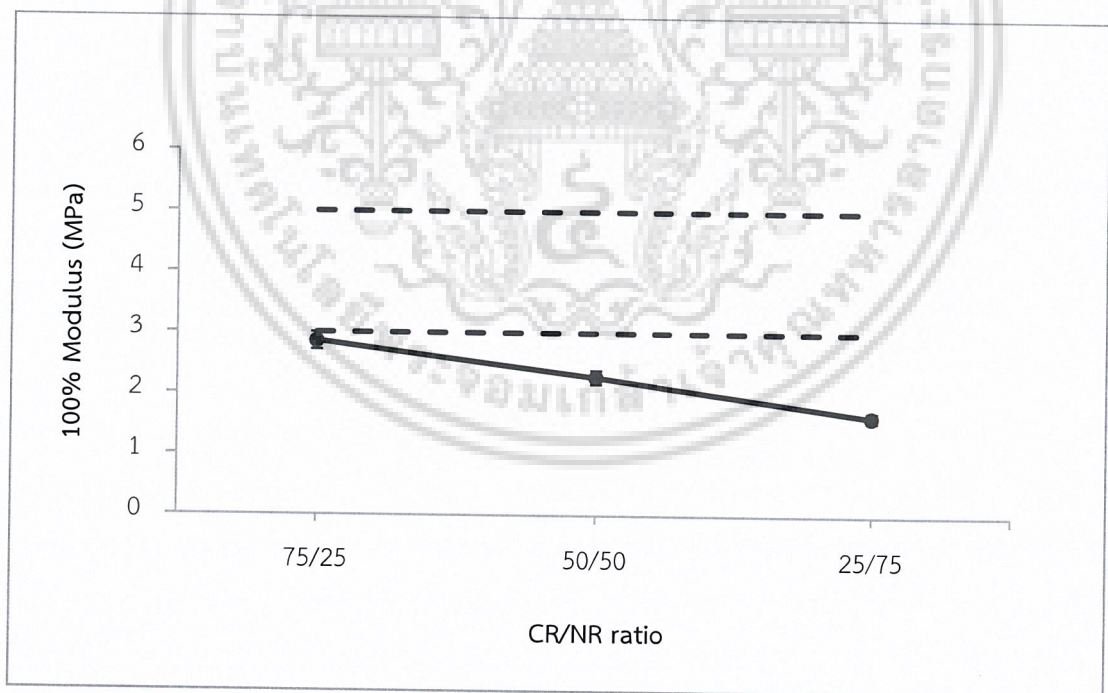


ภาพที่ 4.2 ค่าความแข็งแรงดึง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ รพท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

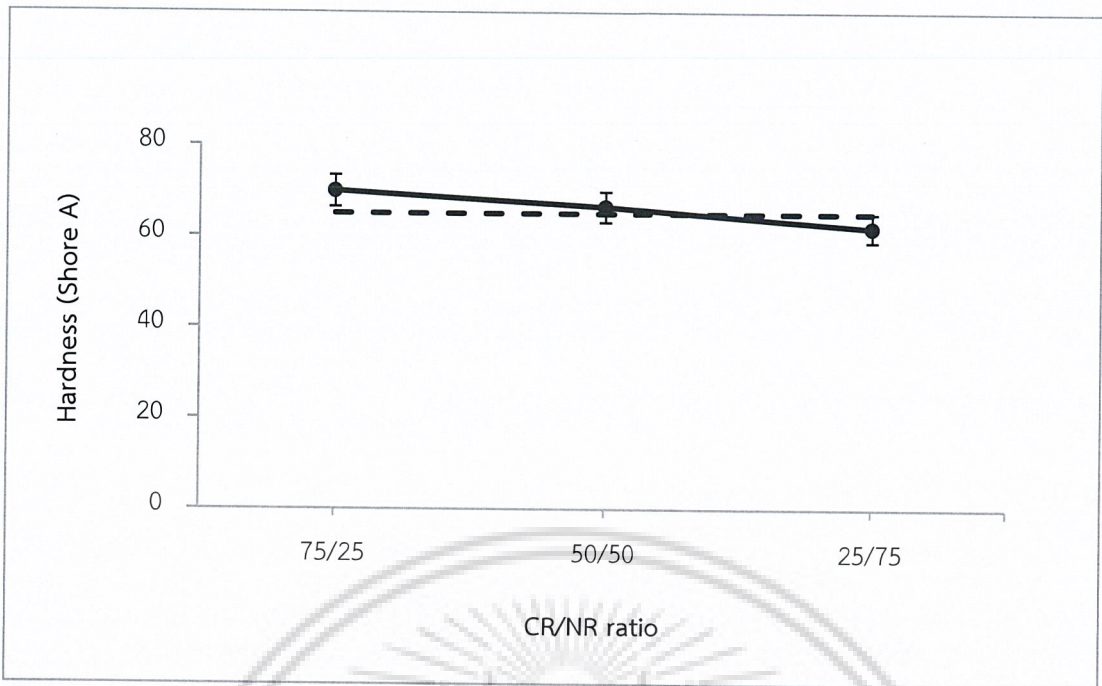


ภาพที่ 4.3 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ รพท.

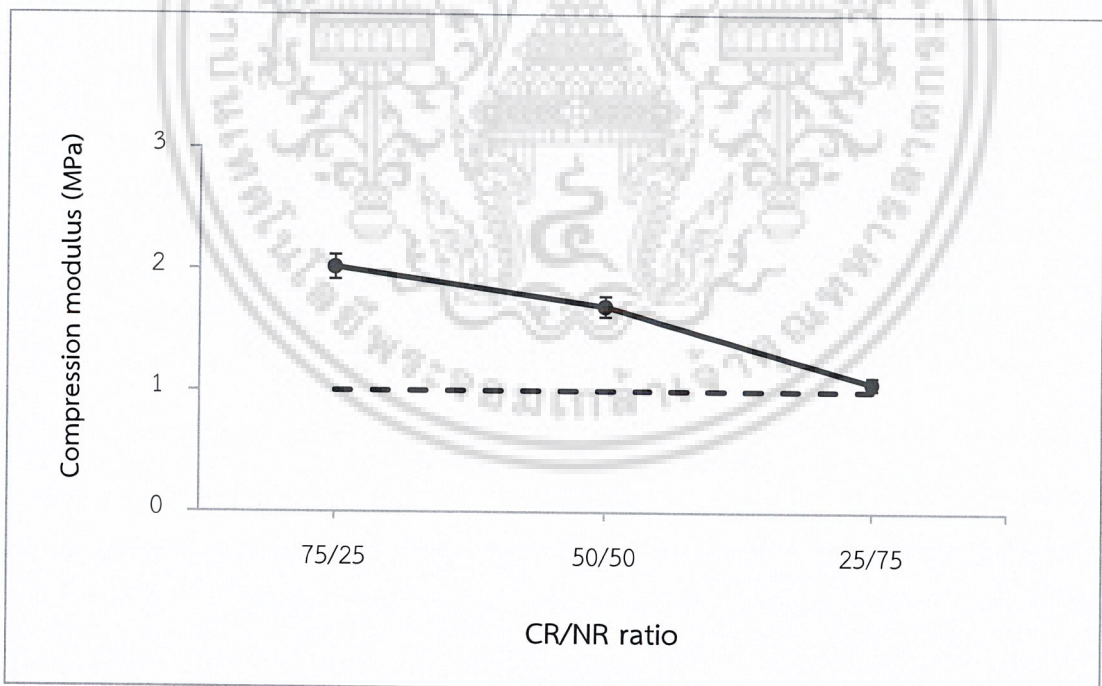


ภาพที่ 4.4 ค่ามอดุลัสที่ 100% แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดตามมาตรฐานของ รพท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

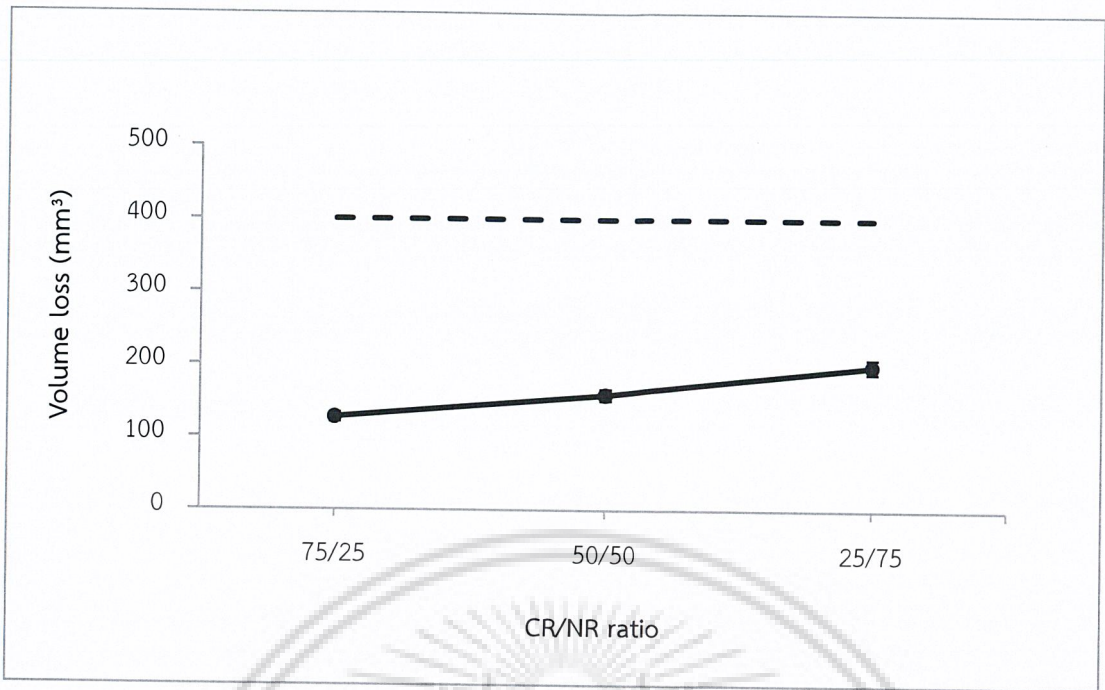


ภาพที่ 4.5 ค่าความแข็งกด แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ รพท.

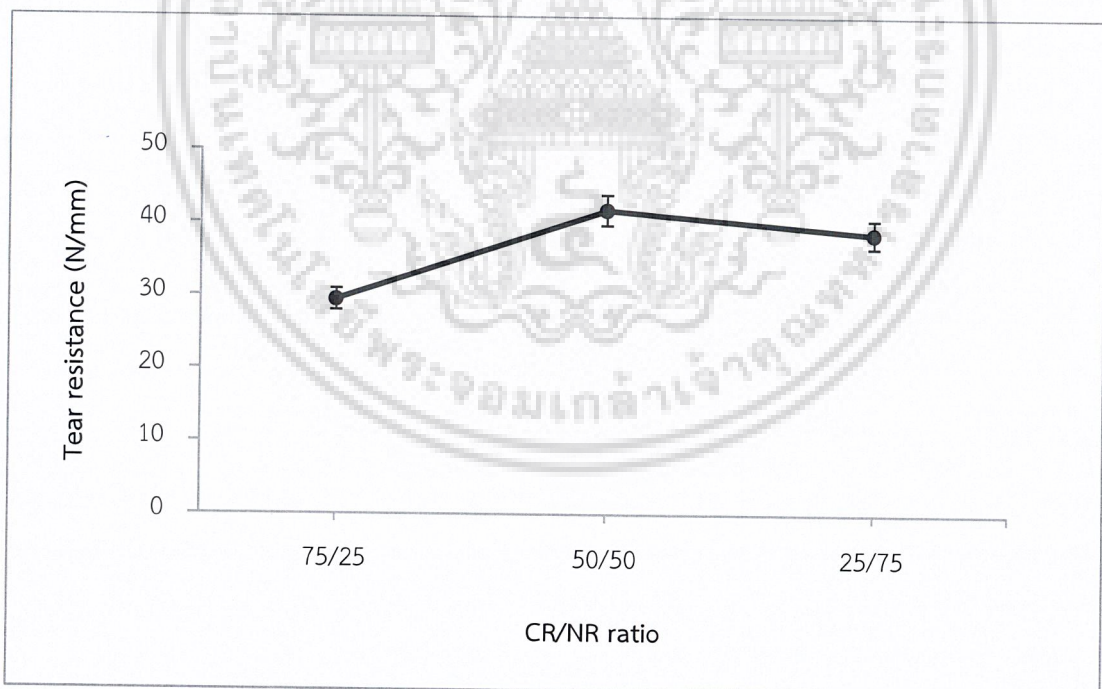


ภาพที่ 4.6 ค่ามอดุลัสกดอัดที่ 20% Strain แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ รพท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.7 ค่าปริมาตรสูญเสียจากการเสียดสีขัดถู แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าสูงสุดตามมาตรฐานของ รพท.



ภาพที่ 4.8 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 แสดงค่าความแข็งแรงดึงก่อนบ่มแรง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 75/25, 50/50 และ 25/75 ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนยางธรรมชาติ ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสม CR/NR มีแนวโน้มลดลง โดยเฉพาะที่อัตราส่วน 50/50 มีค่าต่ำที่สุด เนื่องจากยางผสม CR/NR เป็นยางผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blends) เพราะความเป็นขั้วของยางทั้งสองชนิดที่ต่างกัน ซึ่งยางคลอโรพรีนมีอะตอมของคลอรีน (Cl) ในโครงสร้างจึงทำให้ยางแสดงความเป็นขั้ว (Polar) ส่วนยางธรรมชาตินั้นมีเฉพาะธาตุคาร์บอน (C) และไฮโดรเจน (H) ในโครงสร้างจึงทำให้ยางไม่มีขั้ว (Non-polar) ดังนั้นความแตกต่างของภูมิภาคนี้จึงเป็นจุดต่อของยางผสม ซึ่งมีรอยต่อของ ภูมิภาค (Interface void) ที่ไม่แข็งแรง [30] เมื่อทำทดสอบความแข็งแรงดึง จึงทำให้มีค่าน้อยกว่าอัตราส่วนของยางที่มียางชนิดใดชนิดหนึ่งมากกว่า

จากรูปที่ 4.3 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดก่อนบ่มแรง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 75/25, 50/50 และ 25/75 ตามลำดับ พบว่ายางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วน CR/NR ที่อัตราส่วน 25/75 มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถแตกผลึกได้เมื่อดึงยืด การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัวจะทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ทำให้มีความยืดหยุ่นสูง จึงมีค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่มาก

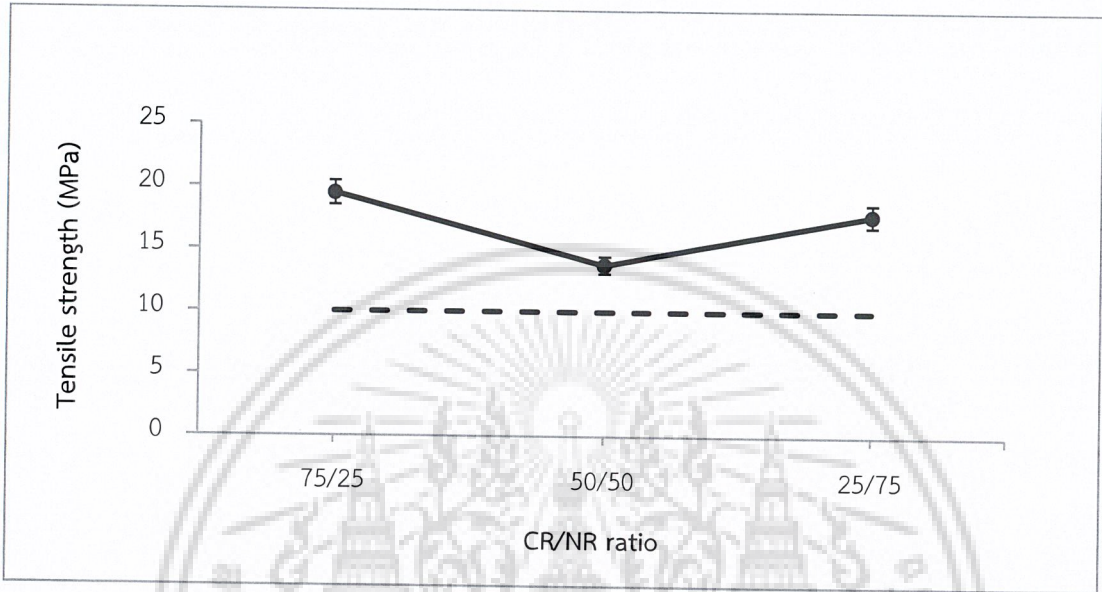
จากรูปที่ 4.4 – 4.6 แสดงค่ามอดูลัสที่ 100% ค่าความแข็งกด และค่ามอดูลัสกดอัดที่ 20% Strain ก่อนบ่มแรง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 75/25, 50/50 และ 25/75 ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มยางคลอโรพรีนสมบัติต่าง ๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางคลอโรพรีนสามารถเชื่อมโยงด้วยออกไซด์ของโลหะ แล้วยังสามารถเชื่อมโยงได้ด้วยกำมะถันอีกด้วย ดังนั้นกำมะถันที่อยู่ในสูตรยางผสม CR/NR จะเพิ่มความหนาแน่นเชื่อมโยงของยางผสม จึงส่งผลให้การเคลื่อนไหวในสายโซ่โมเลกุลเกิดขึ้นได้ยาก ทำให้ยางมีความแข็งแรงขึ้น และในทางกลับกันเมื่อเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติจะทำให้มีค่าลดลง เพราะยางธรรมชาตินั้นสามารถเชื่อมโยงได้ด้วยกำมะถันอย่างเดียว จึงมีความหนาแน่นเชื่อมโยงน้อยกว่า

จากรูปที่ 4.7 แสดงค่าปริมาตรสูญเสียดังกล่าวจากการเสียดสีขัดถู แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 75/25, 50/50 และ 25/75 ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนยางคลอโรพรีน จะทำให้มีปริมาตรสูญเสียดังกล่าวลดลง เนื่องจากยางคลอโรพรีนที่ใช้ในงานวิจัยเป็นเกรดชนิดแข็ง นอกจากนี้โมเลกุลของยางคลอโรพรีนสามารถจัดเรียงตัวได้อย่างเป็นระเบียบภายใต้สภาวะที่เหมาะสม และมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงมากกว่า จึงมีความต้านทานต่อการเสียดสีขัดถูได้ดีกว่ายางธรรมชาติ

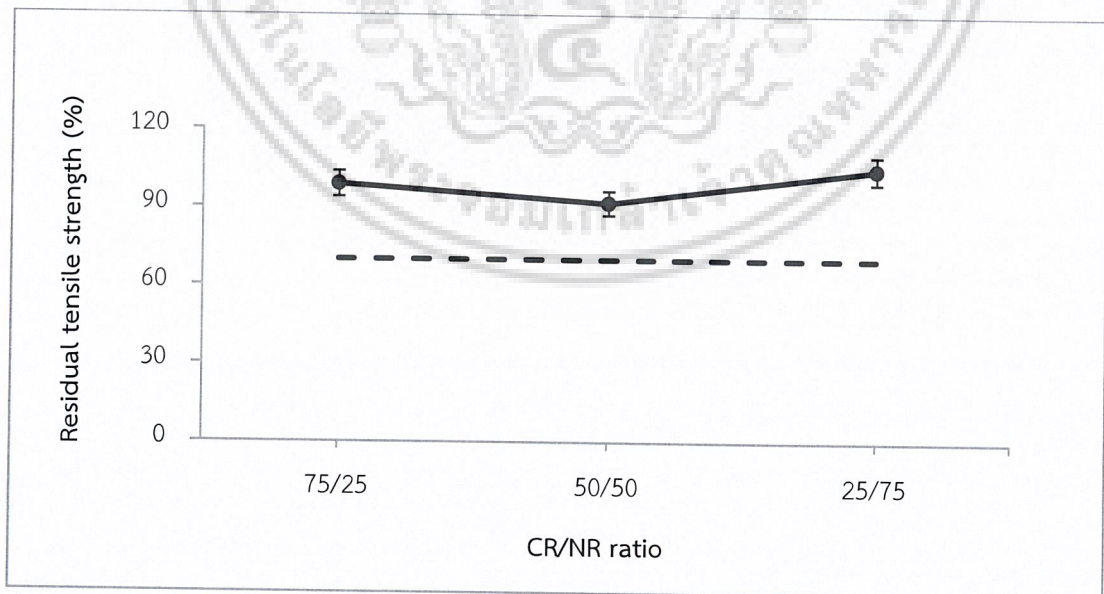
จากรูปที่ 4.8 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดก่อนบ่มแรง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR อัตราส่วนที่ 75/25, 50/50 และ 25/75 ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มยางธรรมชาติ ทำให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางธรรมชาตินั้นมีน้ำหนักโมเลกุลที่สูง และสายโซ่โมเลกุลที่ยาวกว่ายางสังเคราะห์ สายโซ่โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย จึงต้านทานต่อการฉีกขาดสูง

4.1.2 สมบัติเชิงกลหลังบ่มเร่งที่มีอัตราส่วนยางผสม CR/NR ที่ต่างกัน

จากการทดสอบผลของอัตราส่วนยางผสม CR/NR อัตราส่วนที่ 75/25, 50/50 และ 25/75 ที่มีปริมาณเคมีดำ 60 phr ต่อสมบัติเชิงกลหลังบ่มเร่ง ที่อุณหภูมิทดสอบ 70 °C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง แสดงผลดังรูปที่ 4.9 – 4.22

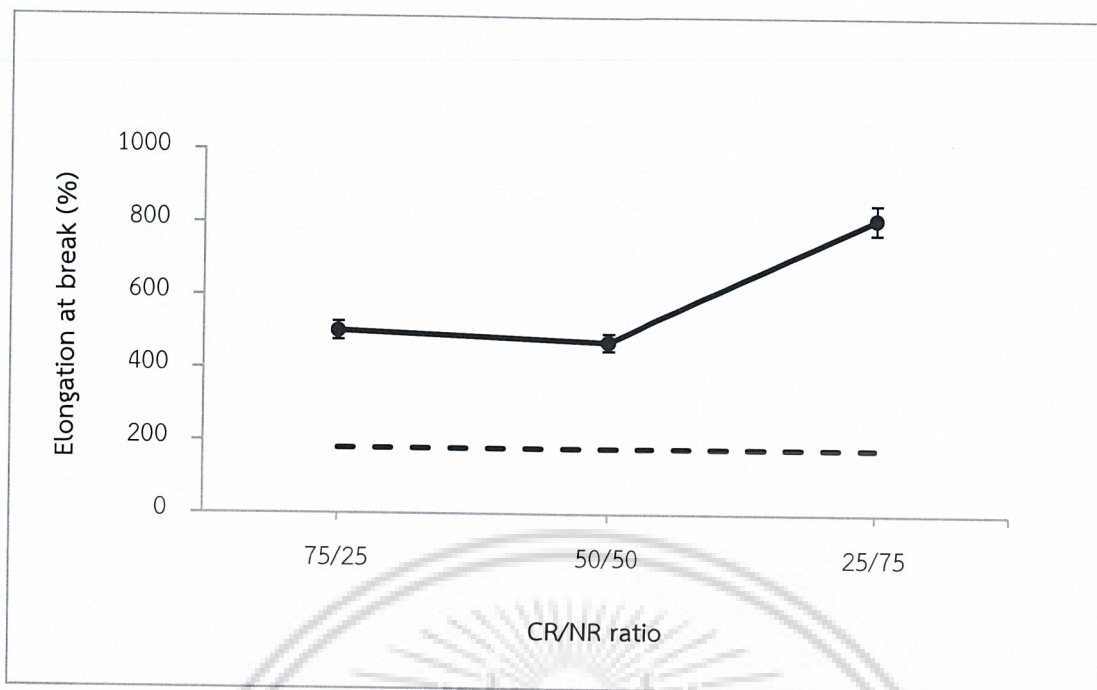


ภาพที่ 4.9 ค่าความแข็งแรงดึงหลังบ่มเร่ง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเคมีดำ 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ รพท.

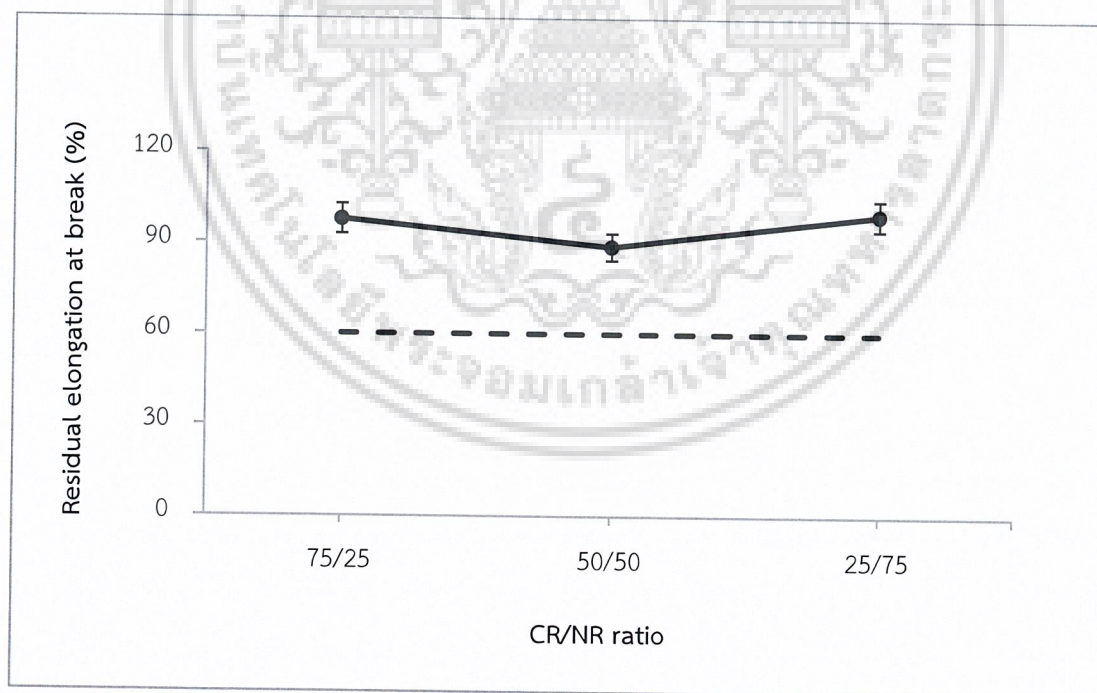


ภาพที่ 4.10 ค่าร้อยละความแข็งแรงดึงที่ยังคงอยู่ แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเคมีดำ 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ รพท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

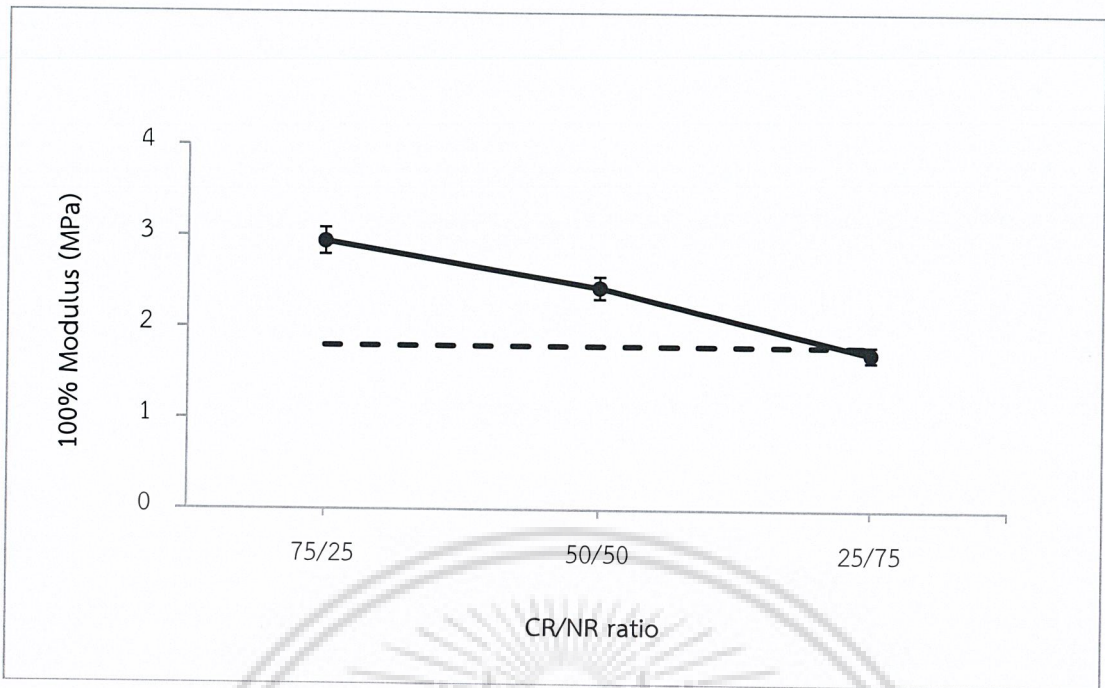


ภาพที่ 4.11 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดหลังบ่มแรง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ รพท.

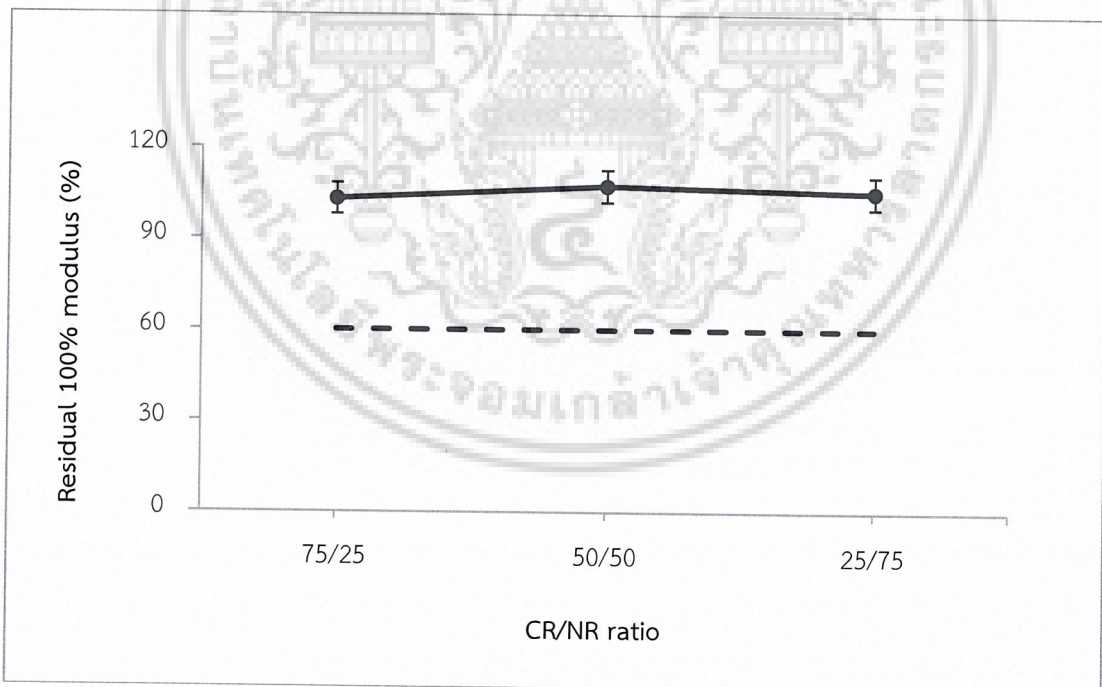


ภาพที่ 4.12 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่ยังคงอยู่ แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ รพท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

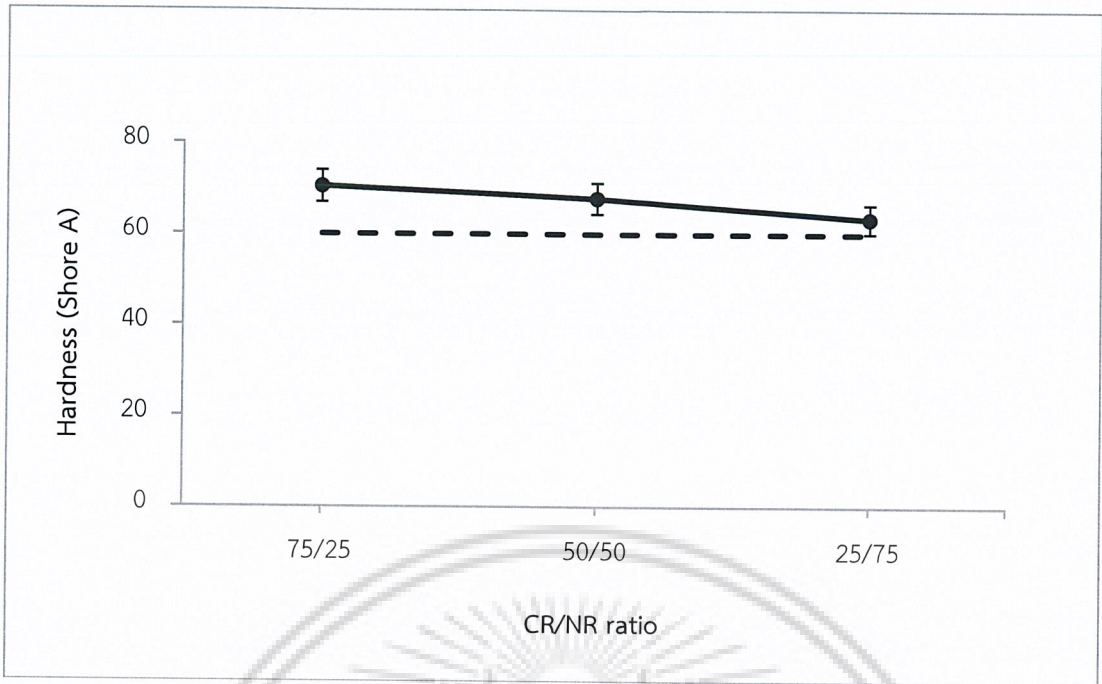


ภาพที่ 4.13 ค่ามอดูลัสที่ 100% หลังบ่มแรง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ รพท.

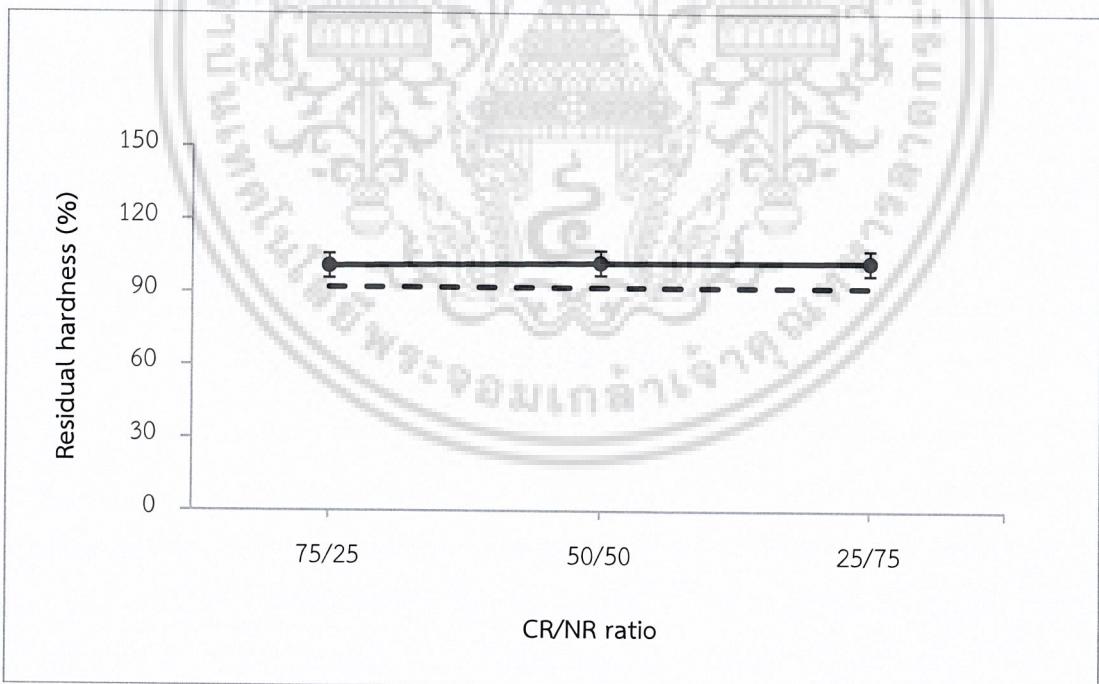


ภาพที่ 4.14 ค่าร้อยละมอดูลัสที่ 100% ที่ยังคงอยู่ แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ รพท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

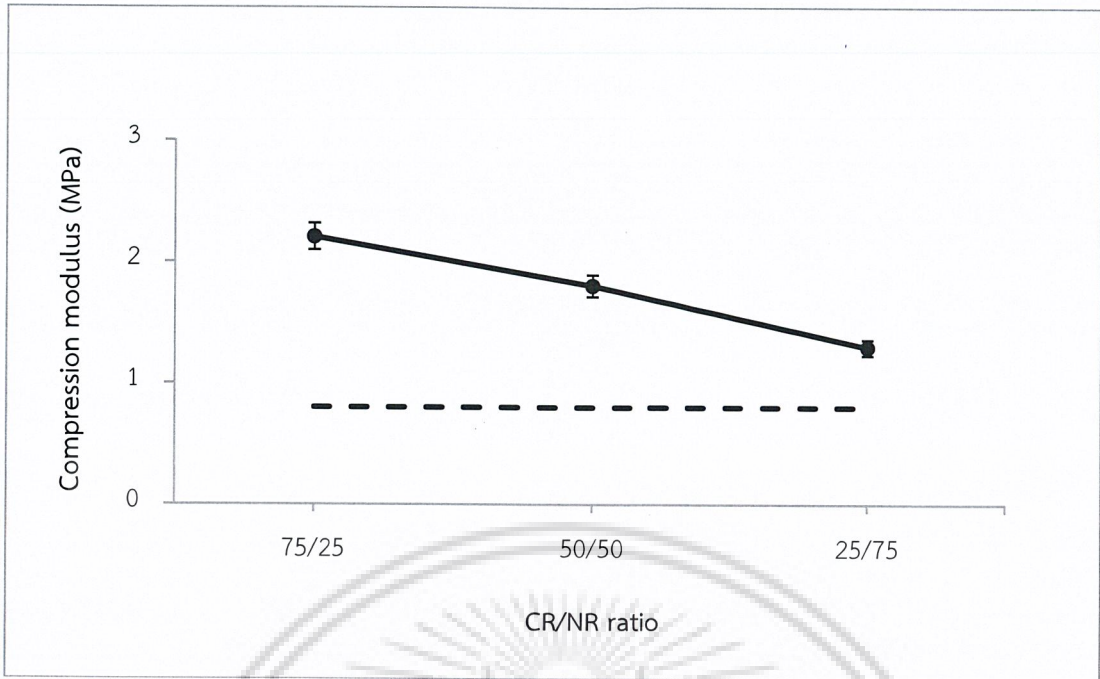


ภาพที่ 4.15 ค่าความแข็งกดหลังบ่มเร่ง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ รพท.

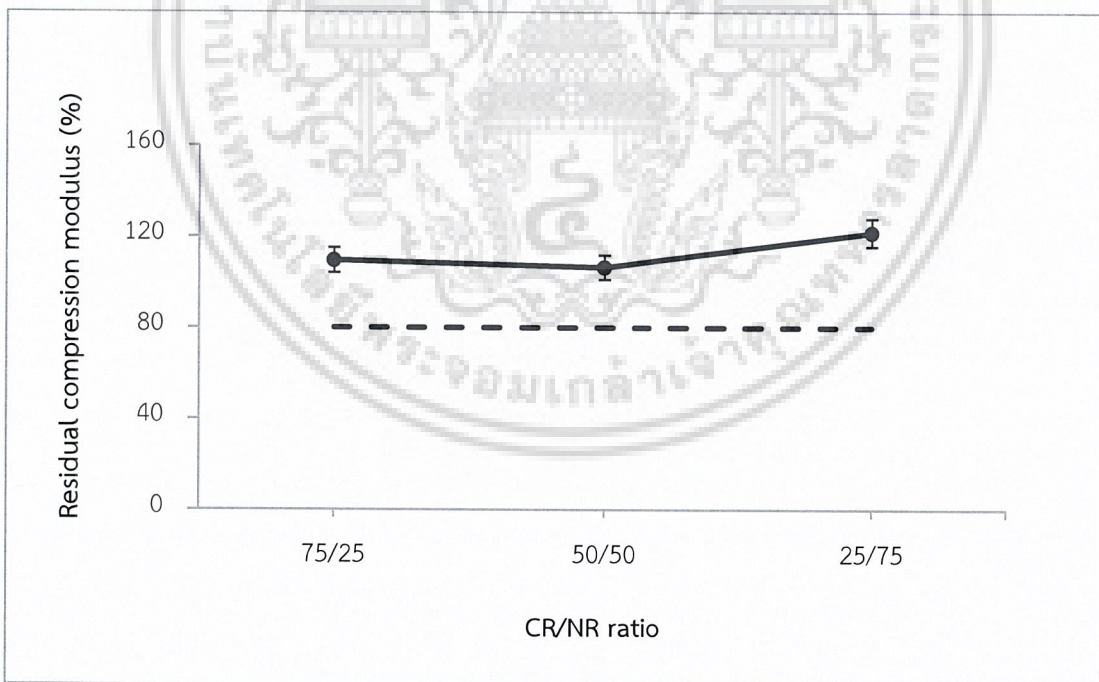


ภาพที่ 4.16 ค่าร้อยละความแข็งกดที่ยังคงอยู่ แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ รพท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

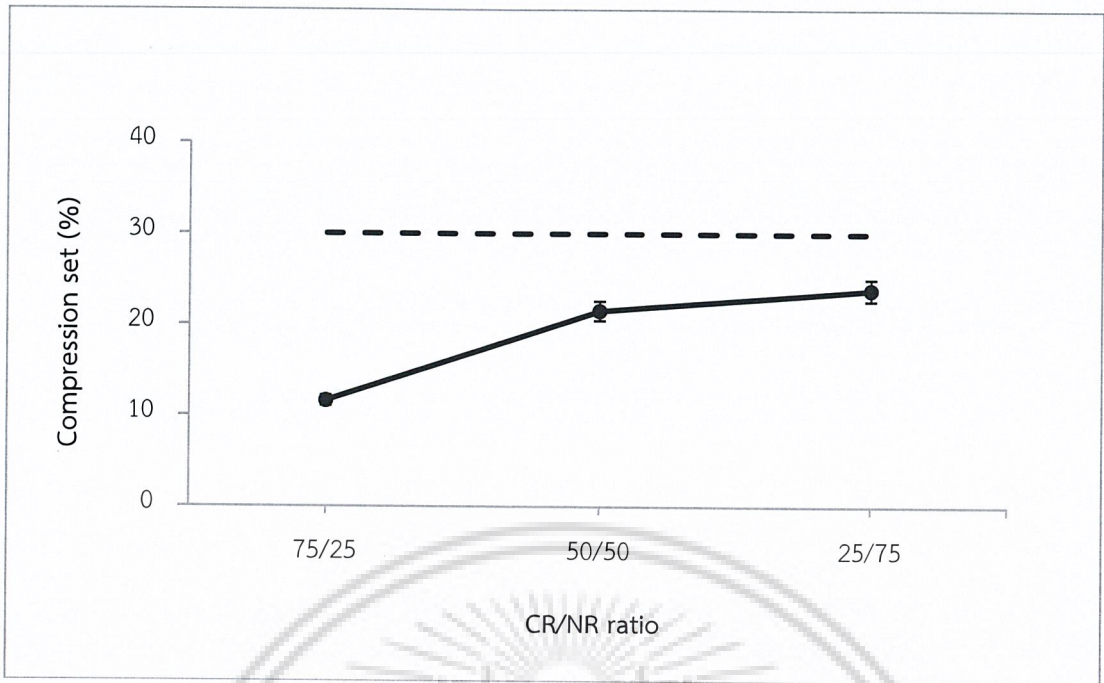


ภาพที่ 4.17 ค่ามอดุลัสกดอัดที่ 20% Strain หลังบ่มแรง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณ เขม่าดำ 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ รพท.

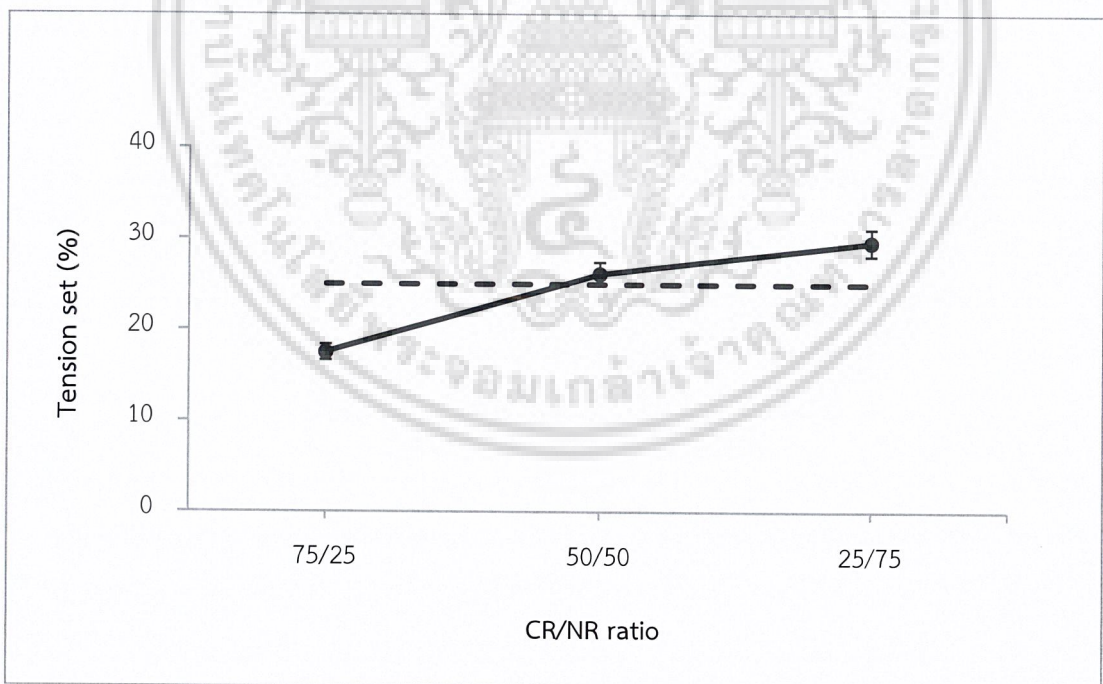


ภาพที่ 4.18 ค่าร้อยละมอดุลัสกดอัดที่ 20% Strain ที่ยังคงอยู่ แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณ เขม่าดำ 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ รพท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

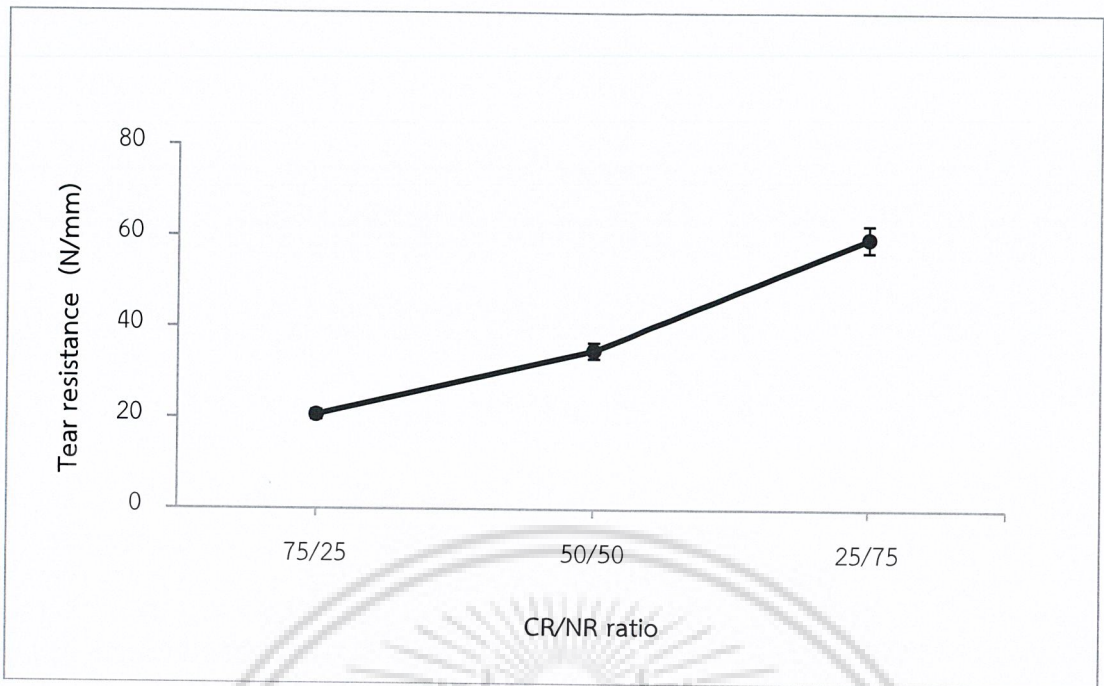


ภาพที่ 4.19 ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกด แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr
เส้นประ (---) แสดงค่าสูงสุดตามมาตรฐานของ รพท.

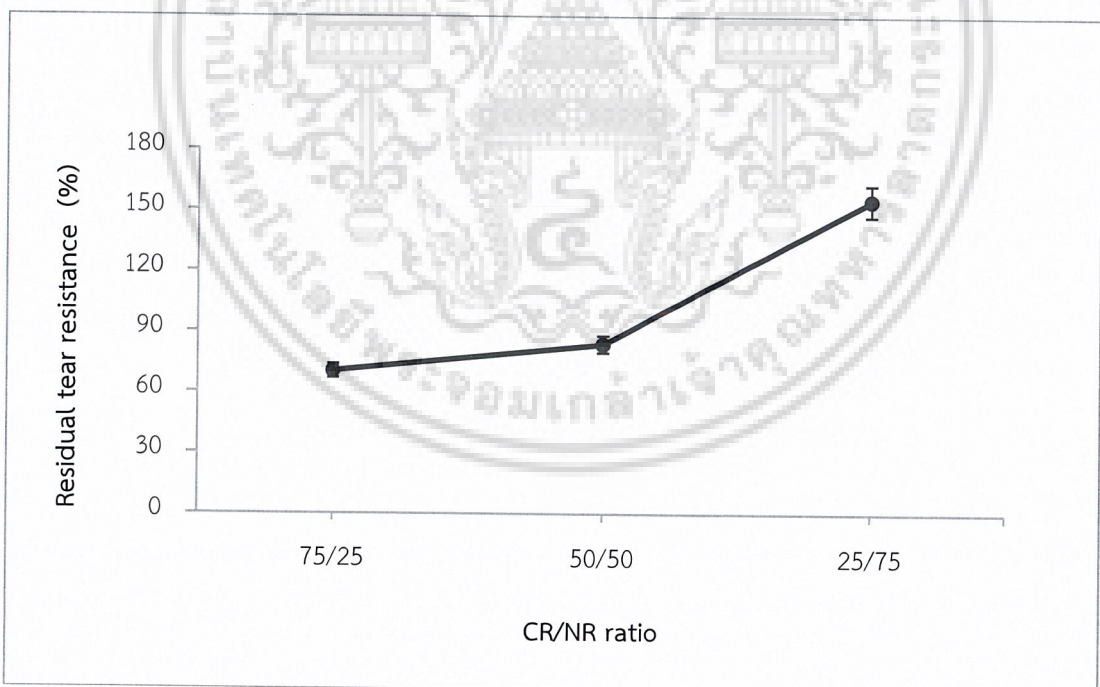


ภาพที่ 4.20 ค่าการยืดตัวเนื่องจากแรงดึง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr
เส้นประ (---) แสดงค่าสูงสุดตามมาตรฐานของ รพท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.21 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดหลังบ่มเร่ง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณ เขม่าดำ 60 phr



ภาพที่ 4.22 ค่าร้อยละความต้านทานต่อการฉีกขาดที่ยังคงอยู่ แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณ เขม่าดำ 60 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 และ 4.11 แสดงค่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืด ณ จุดขาดหลังบ่มเร่ง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR อัตราส่วนที่ 75/25, 50/50 และ 25/75 ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มยางธรรมชาติ ค่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากยางคลอโรพรีนมีอะตอมคลอรีนในโครงสร้าง ช่วยป้องกันการเข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (Shielding effect) ที่ตำแหน่งพันธะคู่และลดความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา ทำให้ยางคลอโรพรีนทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนได้ดี ในขณะที่โครงสร้างของยางธรรมชาติ มีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จึงเสื่อมสภาพได้ง่ายด้วยความร้อน ดังนั้นยางผสม CR/NR ที่มียางธรรมชาติสูง ทำให้สมบัติแรงดึงของยางผสมหลังจากบ่มเร่งมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับค่าร้อยละความแข็งแรงดึงที่ยังคงอยู่ แสดงดังรูปที่ 4.10 ส่วนค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถแตกหักได้เมื่อดึงยืด จึงทำให้มีความยืดหยุ่นสูงมาก เมื่อหลังทำการบ่มเร่งค่าที่ได้จากการทดสอบยังคงมีค่ามาก ซึ่งสอดคล้องกับค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่ยังคงอยู่ แสดงดังรูปที่ 4.12

จากรูปที่ 4.13, 4.15 และ 4.17 แสดงค่ามอดูลัสที่ 100% ค่าความแข็งกด และค่ามอดูลัสกดอัดที่ 20% Strain หลังบ่มเร่ง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR อัตราส่วนที่ 75/25, 50/50 และ 25/75 ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มยางคลอโรพรีนสมบัติต่าง ๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางคลอโรพรีน มีการเสื่อมสภาพแบบเชื่อมโยง เป็นการเสื่อมสภาพแบบเกิดอนุมูลอิสระบนสายโซ่ และเกิดการเชื่อมโยงต่อเป็นพันธะการเชื่อมโยงเพิ่มมากขึ้น เป็นผลทำให้ยางมีความแข็งแรงขึ้น เมื่อบ่มเร่ง ที่อุณหภูมิสูงจะมีการเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับร้อยละค่ามอดูลัสที่ 100% ที่ยังคงอยู่ ค่าร้อยละความแข็งกดที่ยังคงอยู่ และค่าร้อยละมอดูลัสกดอัดที่ 20% Strain ที่ยังคงอยู่ แสดงดังรูปที่ 4.14, 4.16 และ 4.18 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.19 และ 4.20 แสดงค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดและการยืดตัวเนื่องจากแรงดึง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR อัตราส่วนที่ 75/25, 50/50 และ 25/75 ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนยางธรรมชาติ การยุบตัวเนื่องจากแรงกดและการยืดตัวเนื่องจากแรงดึงมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากยางธรรมชาติไม่ทนทานต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้ความสามารถในการคืนตัวไม่ดี หลังการกดหรือการยืดเป็นระยะเวลาานที่อุณหภูมิสูง

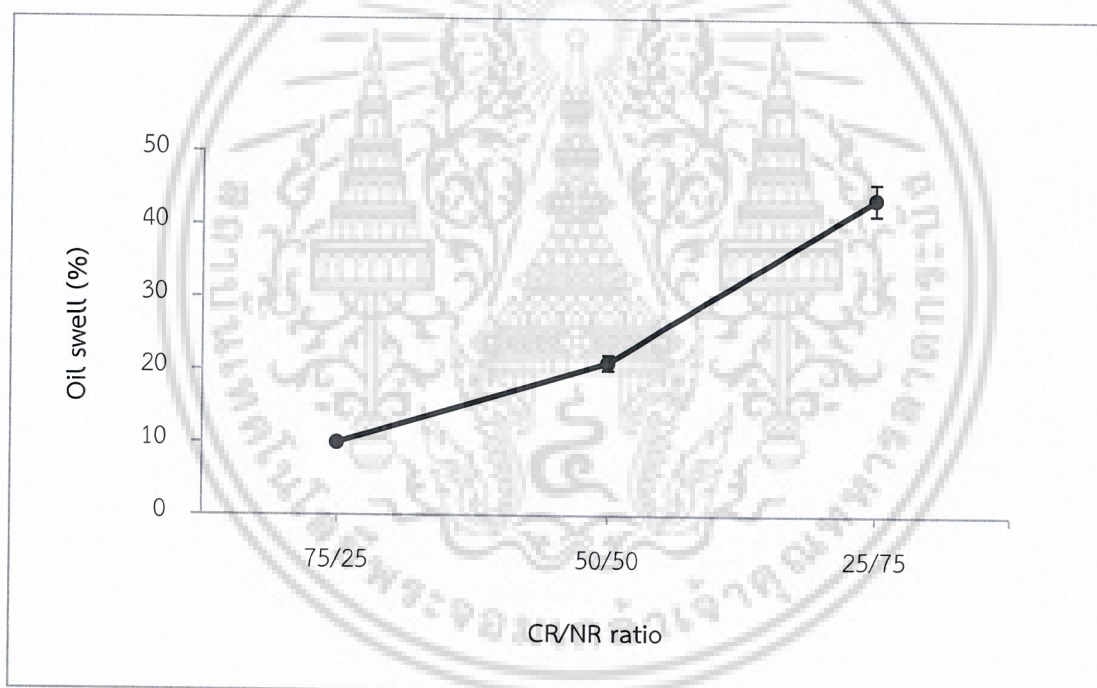
จากรูปที่ 4.21 แสดงค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดหลังบ่มเร่ง แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR อัตราส่วนที่ 75/25, 50/50 และ 25/75 ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนยางธรรมชาติมีค่าสูงขึ้น อาจเกิดจากการเชื่อมโยงที่ยังไม่สมบูรณ์ของยางผสมสูตร เมื่อทำการบ่มเร่งจะทำให้เพิ่มความหนาแน่นของการเชื่อมโยงจึงทำให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับร้อยละความต้านทานต่อการฉีกขาดที่ยังคงอยู่ แสดงดังรูปที่ 4.22

4.1.3 สมบัติทางกายภาพที่มีอัตราส่วนยางผสม CR/NR ที่ต่างกัน

จากการทดสอบผลของอัตราส่วนยางผสม CR/NR อัตราส่วนที่ 75/25, 50/50 และ 25/75 ตามลำดับ ที่มีปริมาณเคมีดำ 60 phr ต่อสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความทนทานต่อน้ำมัน สภาพต้านทานไฟฟ้า และความต้านทานต่อโอโซน แสดงผลดังรูปที่ 4.23 – 4.24

4.1.3.1 ความทนทานต่อน้ำมัน

สำหรับการใช้งานแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟ อาจเจอเกี่ยวกับการสัมผัสน้ำมันจากยานพาหนะต่าง ๆ ที่สัญจรไปมาหรือจากรถไฟที่วิ่งผ่าน ซึ่งเมื่อยางได้สัมผัสน้ำมันจะทำให้เกิดการ ดูดซึมน้ำมัน แล้วจะทำให้เกิดการบวมตัวในน้ำมัน ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางเปลี่ยนแปลงไป งานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดสอบความทนทานต่อน้ำมัน ทดสอบในน้ำมันชนิด SAE 40 ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อทดสอบสมบัติการทนน้ำมันของยางที่จะใช้เป็น แผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟ ดังแสดงในรูปที่ 4.23



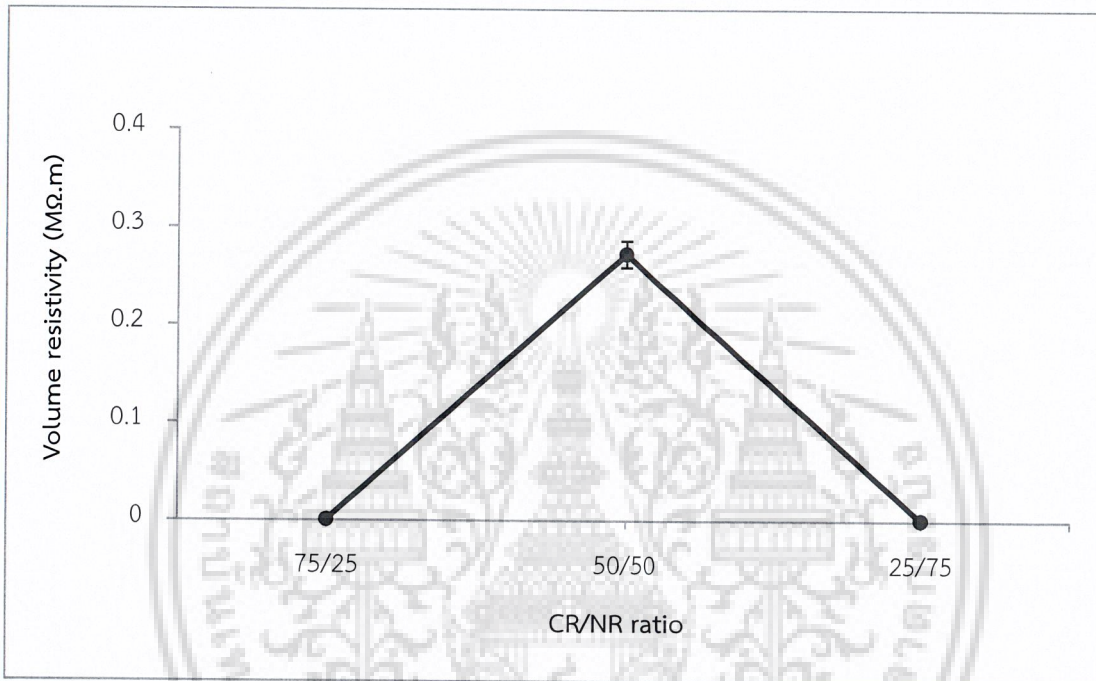
ภาพที่ 4.23 ค่าร้อยละการบวมตัวของยางในน้ำมัน แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเคมีดำ 60 phr

จากรูปที่ 4.23 แสดงค่าร้อยละการบวมตัวของยางในน้ำมัน แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติ ร้อยละการบวมตัวของน้ำมันมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นยางที่ไม่มีขี้ จึงไม่ทนต่อตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ ทำให้เกิดการบวมตัวมากในน้ำมันมาก ส่วนยาง คลอโรพรีนนั้นเป็นยางที่มีขี้ จึงทนต่อตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ของน้ำมัน ทำให้เกิดการบวมตัวได้น้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3.2 สภาพต้านไฟฟ้า

การขนส่งทางรางมีการส่งสัญญาณไฟฟ้า เพื่อเป็นการส่งสัญญาณการเดินรถไฟและเป็นการจัดการจราจรในการเดินรถไฟ ดังนั้นวัสดุที่ต้องอยู่ใกล้บริเวณรางรถไฟ จึงต้องเป็นวัสดุฉนวนไฟฟ้า ซึ่งยางส่วนใหญ่มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า การวัดค่าต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) เพื่อจะเลือกวัสดุที่เหมาะสมกับการใช้งานเป็นแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟ โดยทำการทดสอบสภาพต้านไฟฟ้าเชิงปริมาตรที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 1.00 ± 0.01 V แสดงดังรูปที่ 4.24



ภาพที่ 4.24 ค่าสภาพต้านไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 1.00 ± 0.01 V แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr

จากรูปที่ 4.24 แสดงค่าสภาพความต้านไฟฟ้า แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR พบว่าการเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติไม่ได้ส่งผลต่อการต้านไฟฟ้ามากนัก เพราะส่วนใหญ่แล้วยางมีความต้านทานไฟฟ้าสูง จึงจัดเป็นวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้า ค่าสภาพต้านไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบได้ค่าที่ไม่คงที่และ ไม่เป็นแนวโน้ม อาจเกิดจากการความหนาของชิ้นงานทดสอบที่ไม่เท่ากัน ซึ่งสูตรที่ CR/NR อัตราส่วนที่ 50/50 มีค่าสภาพความต้านไฟฟ้าสูง เนื่องจากมีความหนามากกว่าสูตรอื่น ๆ ความหนาของชิ้นงานที่มากทำให้มีระยะทางการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งกระแสไฟฟ้าจะต้องเคลื่อนที่ผ่านยางที่มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า ทำให้ค่าสภาพความต้านไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3.3 ความต้านทานต่อโอโซน

เนื่องจากการใช้งานจริงของแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟนั้น จะต้องเจอกับสภาพอากาศต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น โอโซน ความร้อน เป็นต้น ซึ่งจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดสอบความทนทานต่อโอโซน ที่ความเข้มข้นของโอโซน 25 pphm ที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.25



(ก) 75/25

(ข) 50/50

(ค) 25/75

ภาพที่ 4.25 รอยแตกขณะยืด 20% จากการทดสอบความต้านทานต่อโอโซน แปรอัตราส่วนยางผสม CR/NR ปริมาณเขม่าดำ 60 phr

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความต้านทานต่อโอโซน

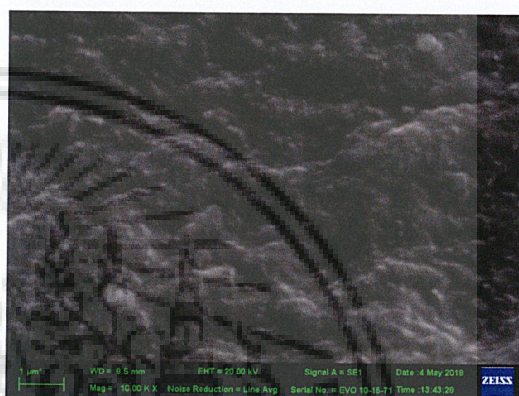
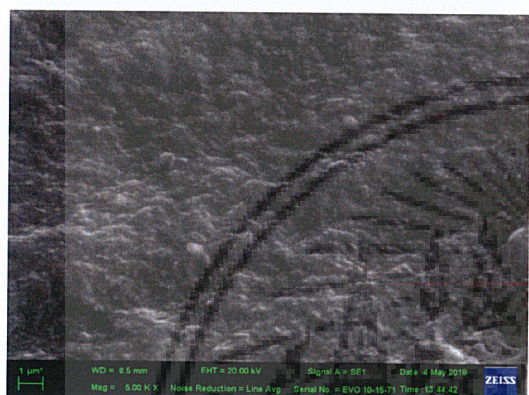
อัตราส่วนยางผสม CR/NR	ผลการทดสอบ
75/25	ไม่มีรอยแตก
50/50	ไม่มีรอยแตก
25/75	เกิดรอยแตกที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า แต่มีขนาดเล็กมาก (น้อยกว่า 0.5 มิลลิเมตร)

จากรูปที่ 4.25 และตารางที่ 4.1 พบว่ายางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 ไม่มีรอยแตกขณะยืด 20% เนื่องจากโครงสร้างของยางคลอโรพรีนมีอะตอมคลอรีน ที่มีค่าอิเล็กโตร-เนกาติวิตี (Electronegativity, EN) ที่สูง และอยู่ใกล้พันธะคู่ จึงช่วยป้องกันการทำปฏิกิริยาจากโอโซน (O_3) และออกซิเจน (O_2) ในบรรยากาศ ส่วนยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 25/75 มีรอยแตก เนื่องจากยางธรรมชาติมีโครงสร้างที่เป็นพันธะคู่ที่ไม่อิ่มตัว จึงว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับโอโซน จึงทำให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดปฏิกิริยาโอโซนเนชัน (Ozonation) เกิดเป็นโครงสร้างของวงแหวนโอโซนไนด์ (Ozonide) ซึ่งทำให้ผิวของยางแข็งและแตกเมื่อถูกดิ่งยึด

4.1.4 การศึกษาสัณฐานวิทยาที่มีอัตราส่วนยางผสม CR/NR ที่ต่างกัน

การศึกษาสัณฐานวิทยาของยางที่มีอัตราส่วนยางผสม CR/NR อัตราส่วนที่ 75/25, 50/50 และ 25/75 ตามลำดับ ที่มีปริมาณเขม่าดำ 60 phr ด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงผลดังรูปที่ 4.26 – 4.28



(ก) กำลังขยาย 5000 เท่า

(ข) กำลังขยาย 10000 เท่า

ภาพที่ 4.26 สัณฐานวิทยาของยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 75/25 ปริมาณเขม่าดำ 60 phr

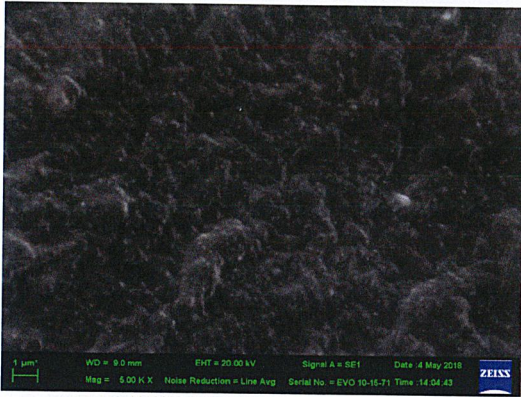


(ก) กำลังขยาย 5000 เท่า

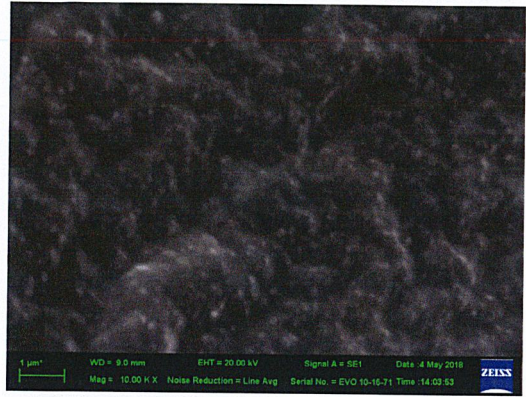
(ข) กำลังขยาย 10000 เท่า

ภาพที่ 4.27 สัณฐานวิทยาของยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 50/50 ปริมาณเขม่าดำ 60 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) กำลังขยาย 5000 เท่า



(ข) กำลังขยาย 10000 เท่า

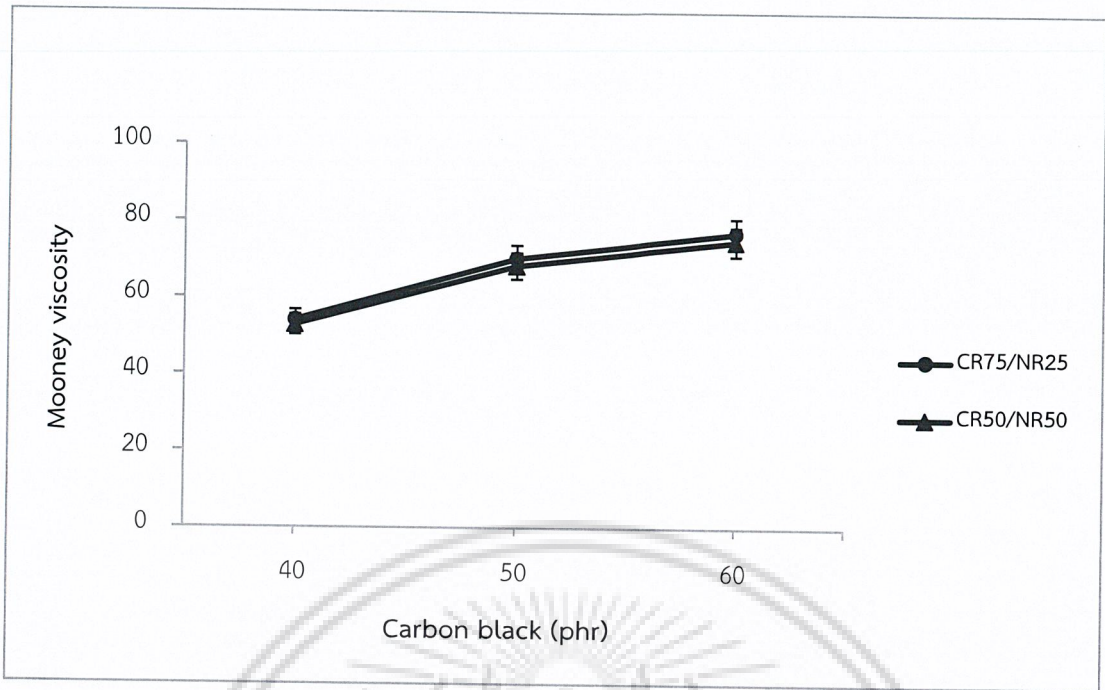
ภาพที่ 4.28 สัณฐานวิทยาของยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 25/75 ปริมาณเขม่าดำ 60 phr

จากรูปที่ 4.26 – 4.28 เป็นการศึกษาสัณฐานวิทยาของยางที่มีอัตราส่วนยางผสม CR/NR อัตราส่วนที่ 75/25, 50/50 และ 25/75 ตามลำดับ ที่มีปริมาณเขม่าดำ 60 phr ที่กำลังขยาย 5000 เท่า และ 10000 เท่า พบว่าเขม่าดำมีการกระจายตัวดี ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลที่ดีของยาง

4.2 การศึกษาผลของการเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติในยางผสมสูตรที่มีปริมาณเขม่าดำที่ต่างกัน

นอกจากการใช้ยางผสมในผลิตภัณฑ์ที่ช่วยในกระบวนการแปรรูป และลดต้นทุนการผลิตแล้ว ปริมาณเขม่าดำยังเป็นสารตัวเติมที่ช่วยลดต้นทุนการผลิต และทำให้สมบัติเชิงกลของยางดีขึ้น ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของปริมาณเขม่าดำชนิดเฟอร์เนส เกรด N330 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 28 – 36 นาโนเมตร โดยทำการศึกษาผลของปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr ในอัตราส่วนยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 (โดยน้ำหนัก)

จากการศึกษาผลของปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr ที่มีผลต่อความเหนียวนี้ของยางคลอโร-พรีน และยางธรรมชาติในอัตราส่วนที่ 75/25 และ 50/50 ผสมกับเขม่าดำที่ยังไม่ผ่านกระบวนการเชื่อมโยง (Unvulcanized rubber black mix) แสดงดังรูปที่ 4.29

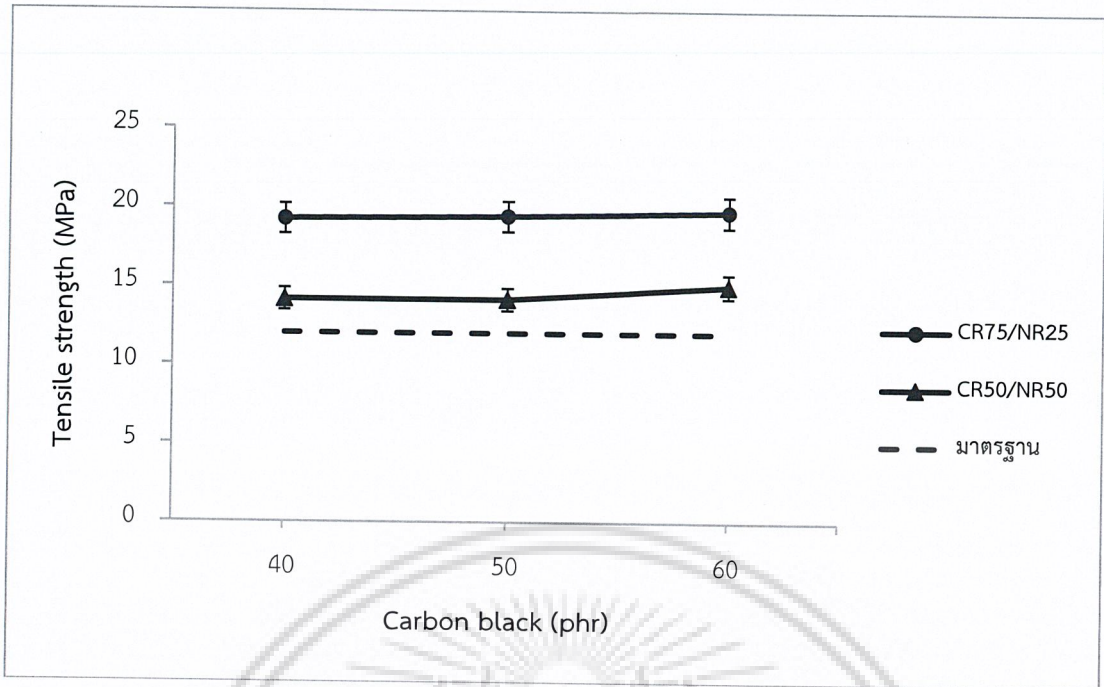


ภาพที่ 4.29 ความหนืดมูนนี่ (ML 1 + 4 (100 °C)) ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr

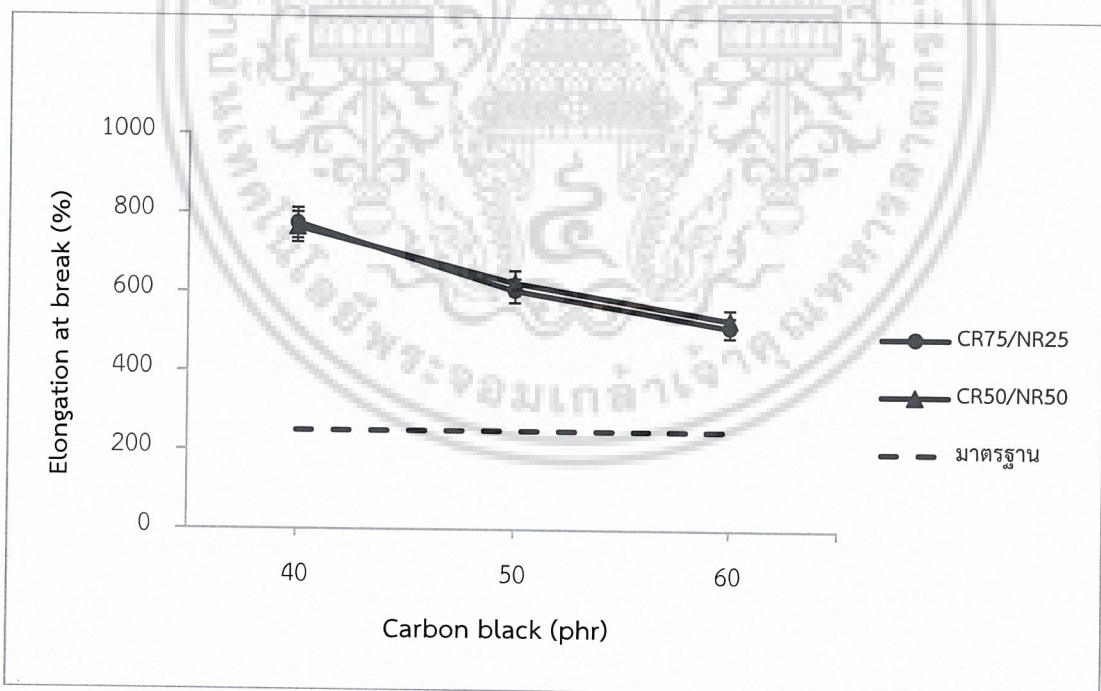
จากรูปที่ 4.29 แสดงค่าความหนืดมูนนี่ของยางผสม CR/NR อัตราส่วนที่ 75/25 และ 50/50 ที่แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr พบว่าความหนืดมูนนี่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ แต่อัตราส่วนของยางผสมไม่มีผลต่อความหนืดมูนนี่นัก เนื่องจากการเกิดยางออกคลู๊ด (Occluded rubber) ทำให้เกิดการยึดเกาะระหว่างเขม่าดำกับสายโซ่โมเลกุลของยางที่ดี หรือยึดเกาะได้มากตามปริมาณเขม่าดำที่เพิ่มขึ้น เมื่อผสมยางกับเขม่าดำที่โครงสร้างมาก จะทำให้มีปริมาณยางแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างโครงสร้างของเขม่าดำ หรือเกิดยางออกคลู๊ดปริมาณมาก มีความหนืดเพิ่มขึ้น ทำให้สมบัติความยืดหยุ่น (Elasticity) ของยางลดลง สามารถขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น

4.2.1 สมบัติเชิงกลก่อนบ่มแรงที่มีอัตราส่วนยางผสม CR/NR และเขม่าดำที่ต่างกัน

จากการทดสอบผลของอัตราส่วนยางผสม CR/NR อัตราส่วนที่ 75/25 และ 50/50 ที่มีปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr ต่อสมบัติเชิงกลก่อนบ่มแรง แสดงผลดังรูปที่ 4.30 – 4.36

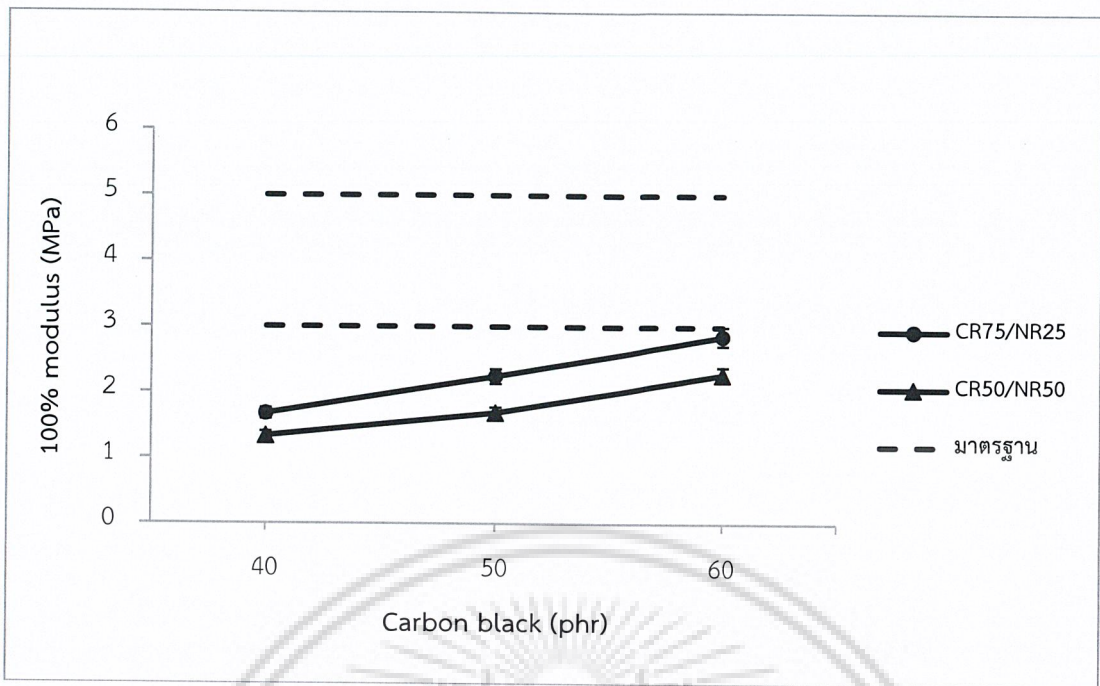


ภาพที่ 4.30 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณ เขม่าดำ 40 – 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ รพท.

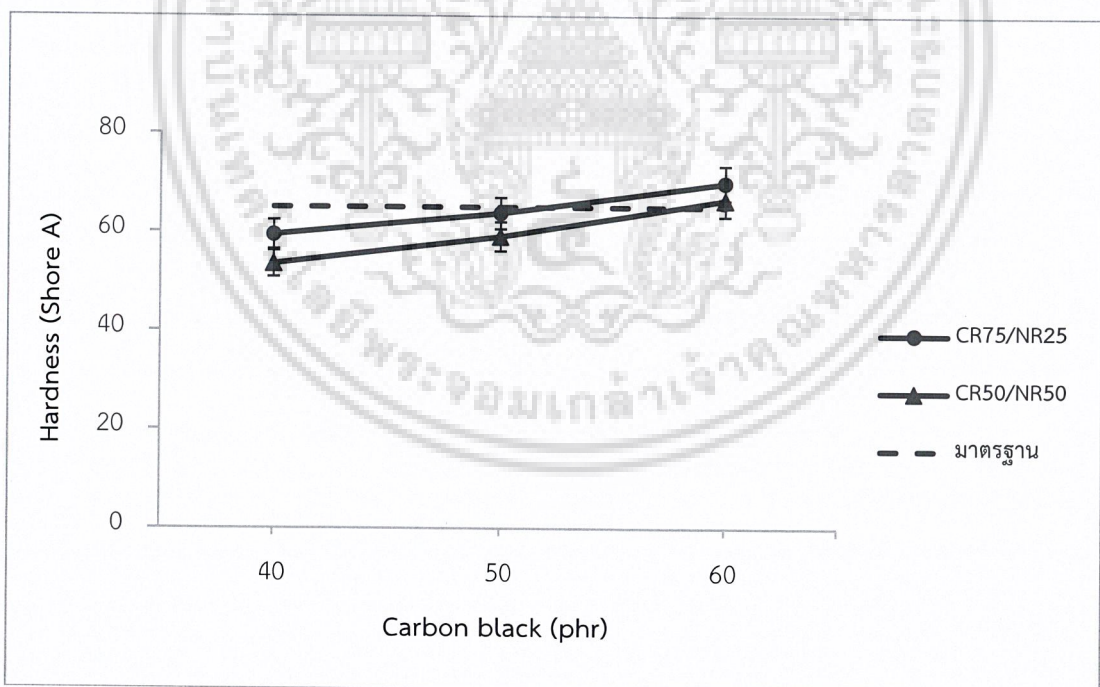


ภาพที่ 4.31 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ รพท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

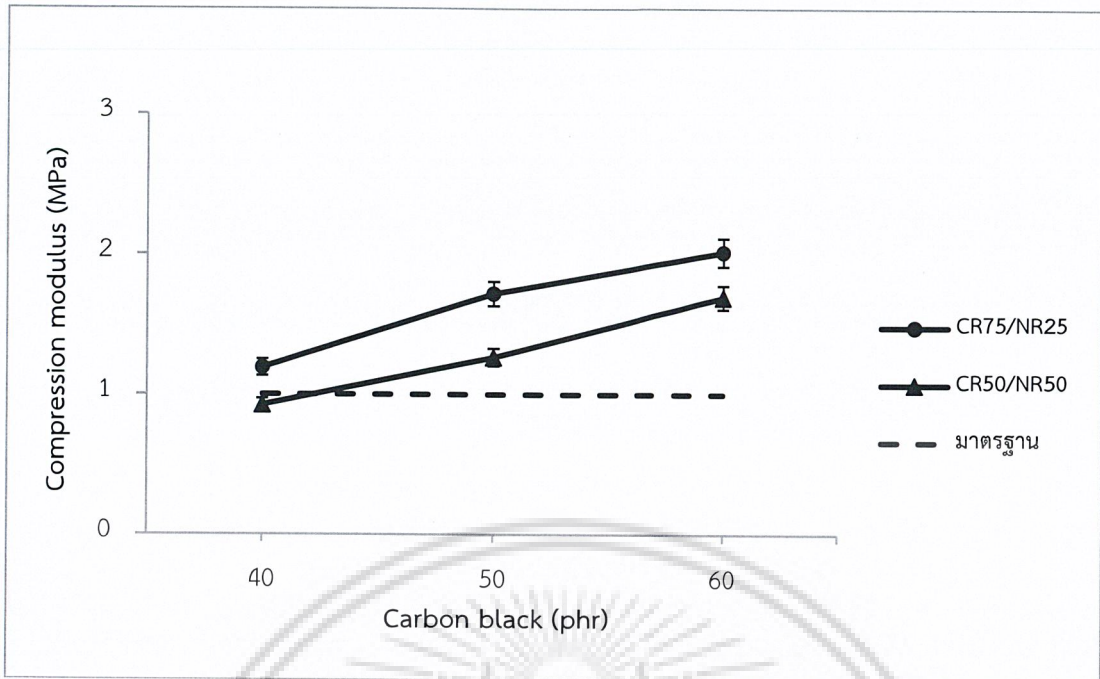


ภาพที่ 4.32 ค่ามอดูลัสที่ 100% ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดตามมาตรฐานของ รพท.

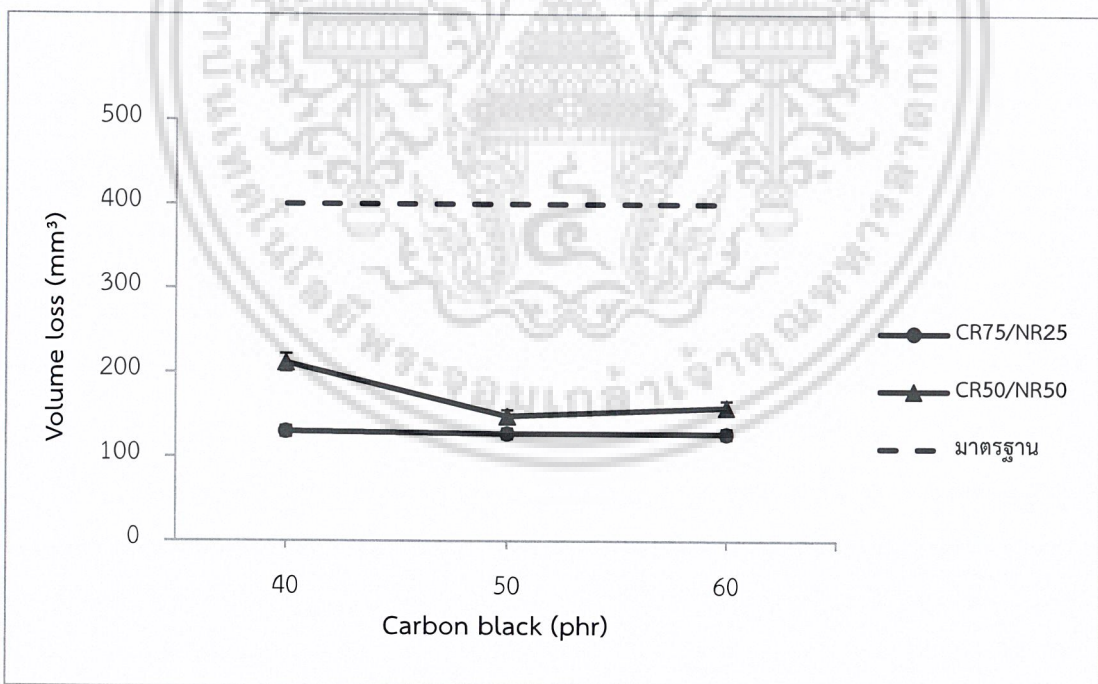


ภาพที่ 4.33 ค่าความแข็งกดของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ รพท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

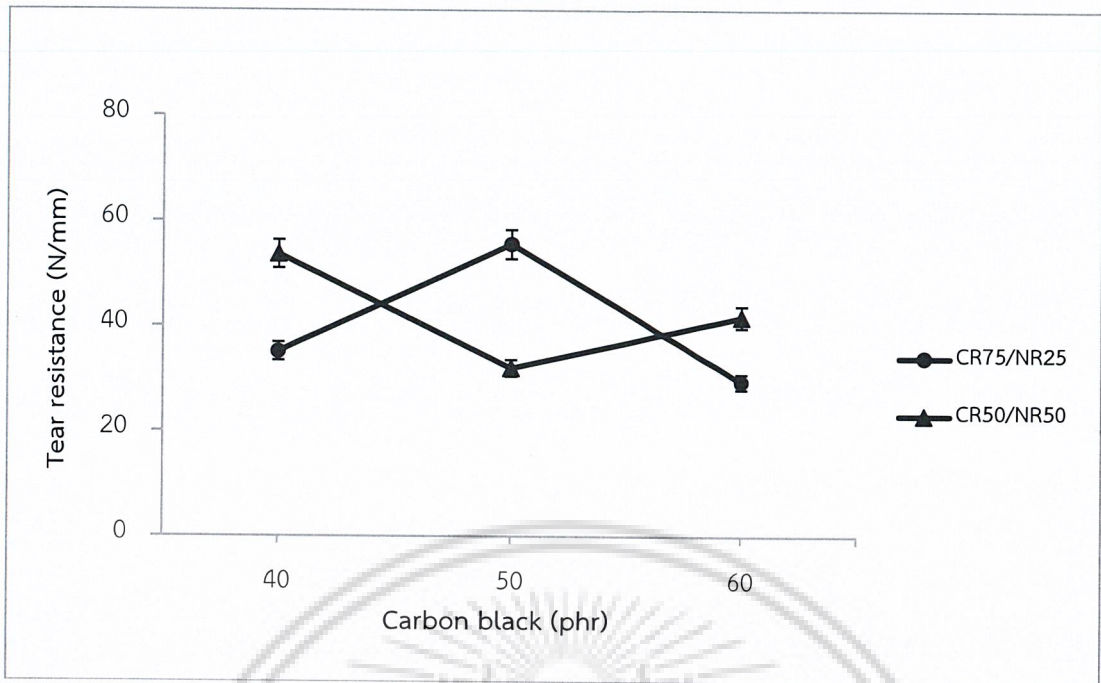


ภาพที่ 4.34 ค่ามอดุลัสกดอัดที่ 20% Strain ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ รพท.



ภาพที่ 4.35 ค่าปริมาตรสูญเสียดจากการเสียดสีขัดถูของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าสูงสุดตามมาตรฐานของ รพท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.36 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr

จากรูปที่ 4.30 และ 4.31 แสดงค่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืด ณ จุดขาด ก่อนบ่มเร่ง ของยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ ความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเขม่าดำเป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรง โดยโมเลกุลยางจะเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างในโครงสร้างเขม่าดำ หรือยึดเกาะระหว่างพื้นผิวทำให้ความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณเขม่าดำที่มากทำให้เกิดความต่อเนื่องของวัฏภาคยางลดลง เมื่อให้แรงดึงแก่ชิ้นงานจึงทำให้ร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานของ รพท. แล้วปรากฏว่าผ่านมาตรฐาน

จากรูปที่ 4.32 – 4.34 แสดงค่ามอดูลัสที่ 100% ค่าความแข็งแรง และค่ามอดูลัสกดอัดที่ 20% Strain ก่อนบ่มเร่ง ของยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr พบว่าเพิ่มปริมาณเขม่าดำสมบัติต่าง ๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเขม่าดำทำให้อันตร-กิริยาระหว่างยางกับเขม่าดำสูงขึ้น โดยยางจะเข้าไปแทรกระหว่างช่องว่างของเขม่าดำมาก ทำให้อย่างมีความแข็งแรงขึ้น และไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ (Non-deformable) ขณะที่รับแรง เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานของ รพท. แล้วปรากฏว่าค่ามอดูลัสที่ 100% ยังไม่ผ่านมาตรฐาน ค่าความแข็งแรงกด ผ่านมาตรฐานเฉพาะสูตรที่มีปริมาณเขม่าดำ 60 phr และมอดูลัสกดอัดที่ 20% Strain ไม่ผ่านมาตรฐานเฉพาะสูตรที่ยางผสม CR/NR อัตราส่วน 50/50 ปริมาณเขม่าดำ 40 phr

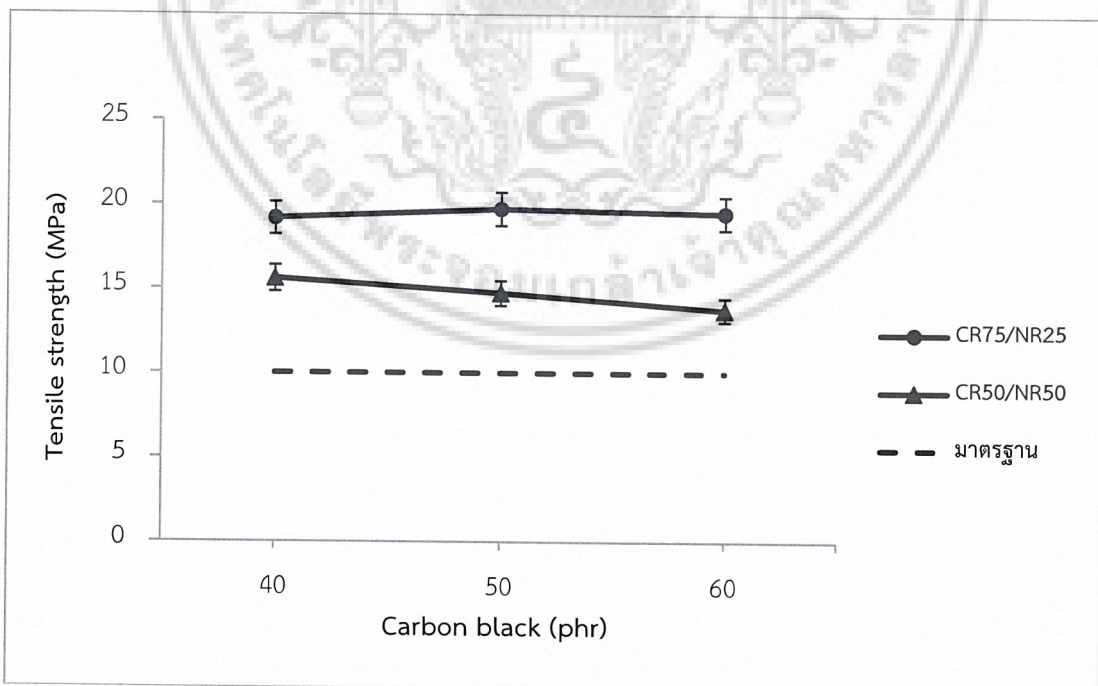
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.35 แสดงค่าปริมาตรสูญเสียจากการเสียดสีขัดถูของยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ ทำให้ปริมาตรสูญเสียมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการกระจายตัวของเขม่าดำที่มากในเนื้อยาง ทำให้มีส่วนของเนื้อยางที่น้อยลง เมื่อทำการทดสอบส่วนที่ถูกขัดถูจะเป็นส่วนที่มีปริมาณเขม่าดำผสมอยู่ ยังมีปริมาณมากทำให้ยางแข็งแรงขึ้น จึงทนต่อการเสียดสีขัดถูขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานของ รพท. แล้วปรากฏว่าผ่านมาตรฐาน

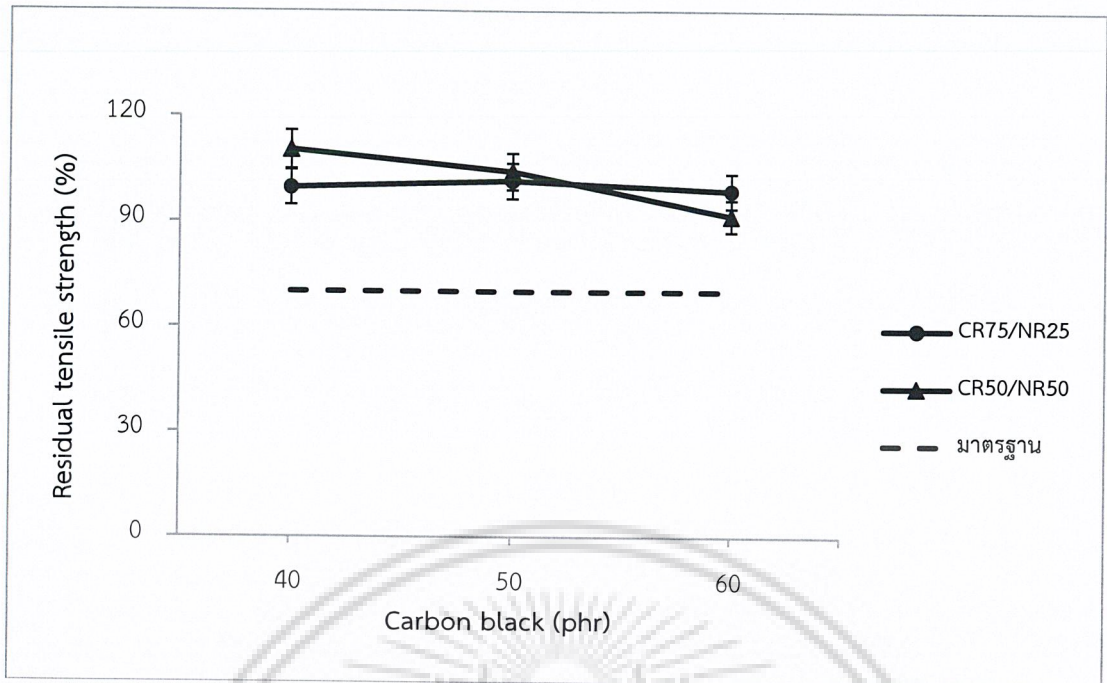
จากรูปที่ 4.36 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr พบว่ามีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ เนื่องจากส่วนของยางเป็นส่วนที่เปลี่ยนแปลงขนาดเมื่อได้รับแรงดึง ในขณะที่เขม่าดำไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Undeformable) เกิดความไม่ต่อเนื่องของวัสดุภาคยาง ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง ส่วนในปริมาณเขม่าดำที่ 50 phr ได้ค่าที่ไม่คงที่และไม่เป็นแนวโน้ม อาจเกิดจากการผสมสารเคมีที่ไม่ดีหรือเกิดจากการขึ้นรูปของผู้วิจัย

4.2.2 สมบัติเชิงกลหลังบ่มแรงที่มีอัตราส่วนยางผสม CR/NR และเขม่าดำที่ต่างกัน

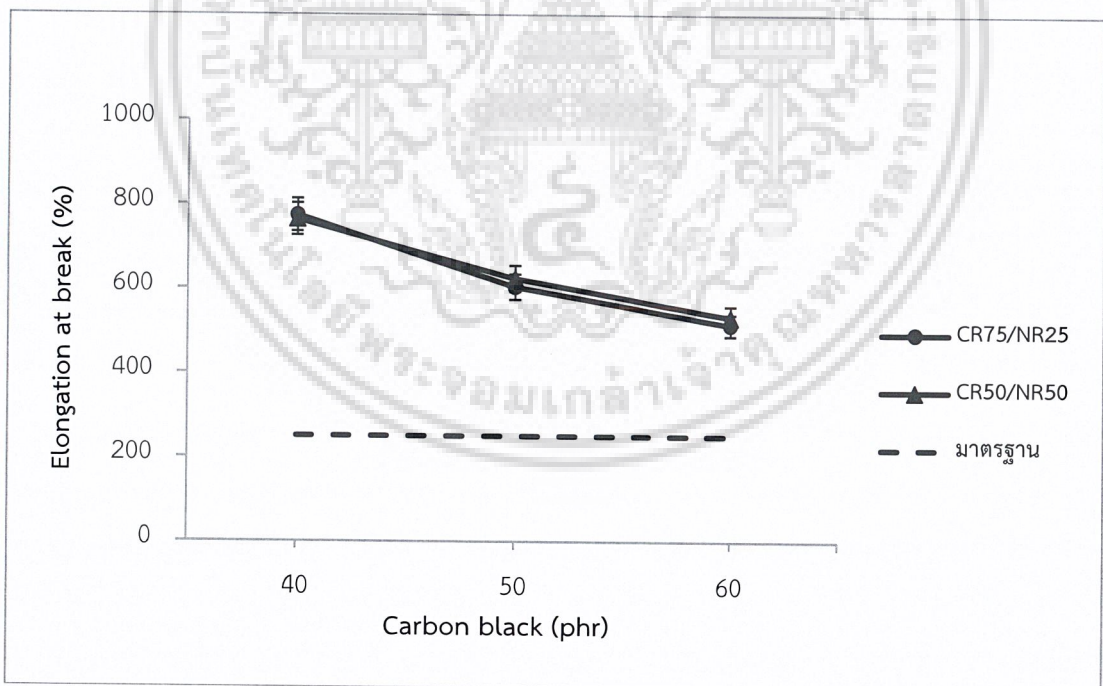
จากการทดสอบผลของอัตราส่วนยางผสม CR/NR อัตราส่วนที่ 75/25 และ 50/50 ที่มีปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr ต่อสมบัติเชิงกลหลังบ่มแรง อุณหภูมิทดสอบ 70 °C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง แสดงผลดังรูปที่ 4.37 – 4.50



ภาพที่ 4.37 ค่าความแข็งแรงดึงหลังบ่มแรงของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ รพท.
เอกสารนี้เป็นเอกสารทงสงวนไว้สาหรับการเชิงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นู่ยู่ให้ใหม่ เเป้เป้บระเษนด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

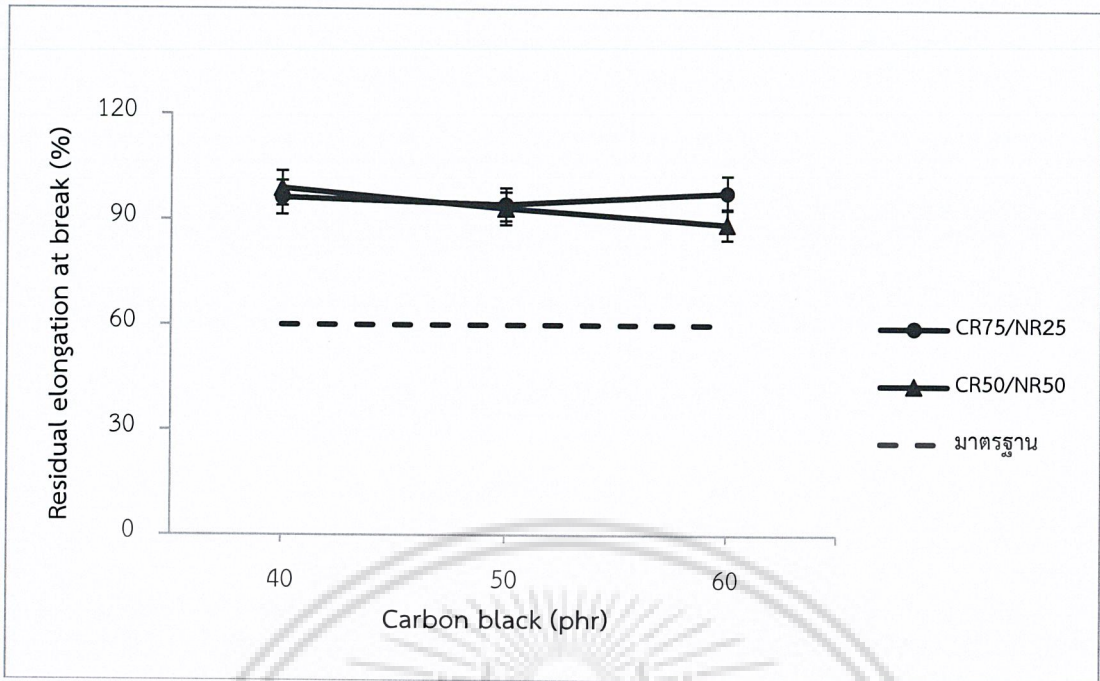


ภาพที่ 4.38 ค่าร้อยละความแข็งแรงดึงที่คงอยู่ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ รพท.

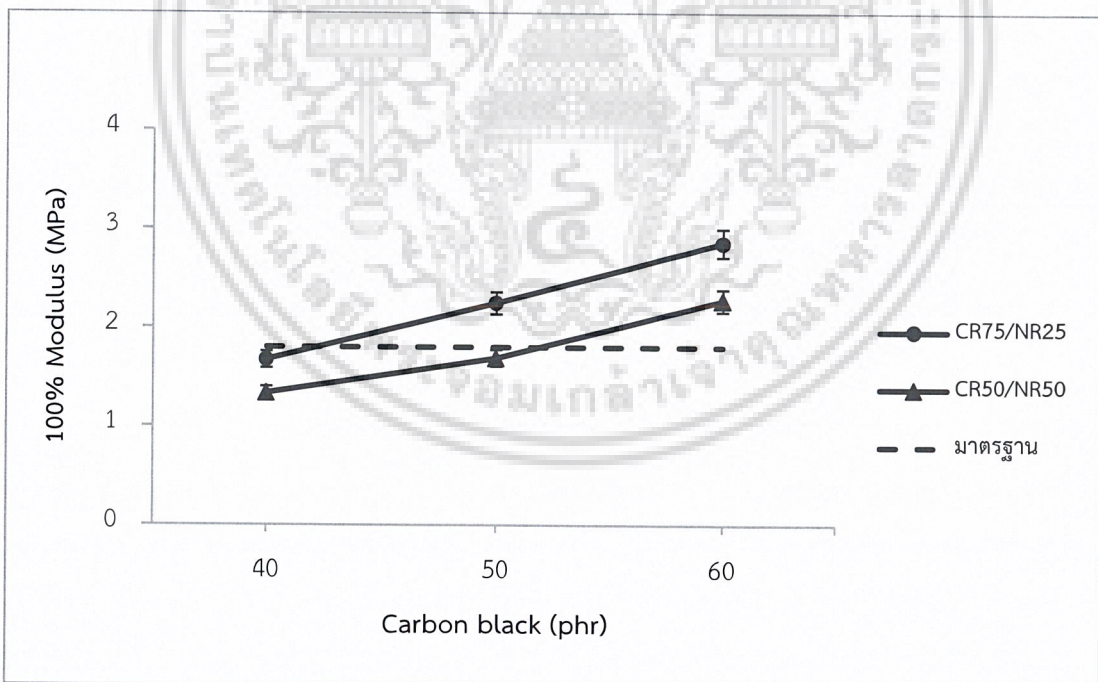


ภาพที่ 4.39 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดหลังบ่มแรงของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ รพท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

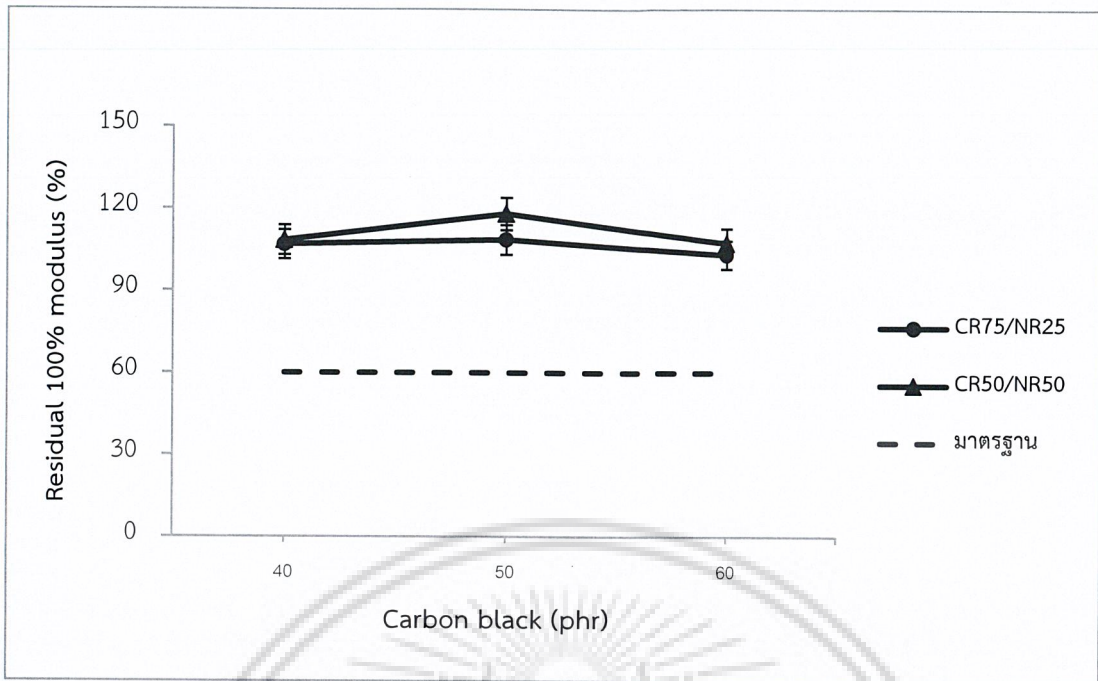


ภาพที่ 4.40 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่คงอยู่ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ รพท.

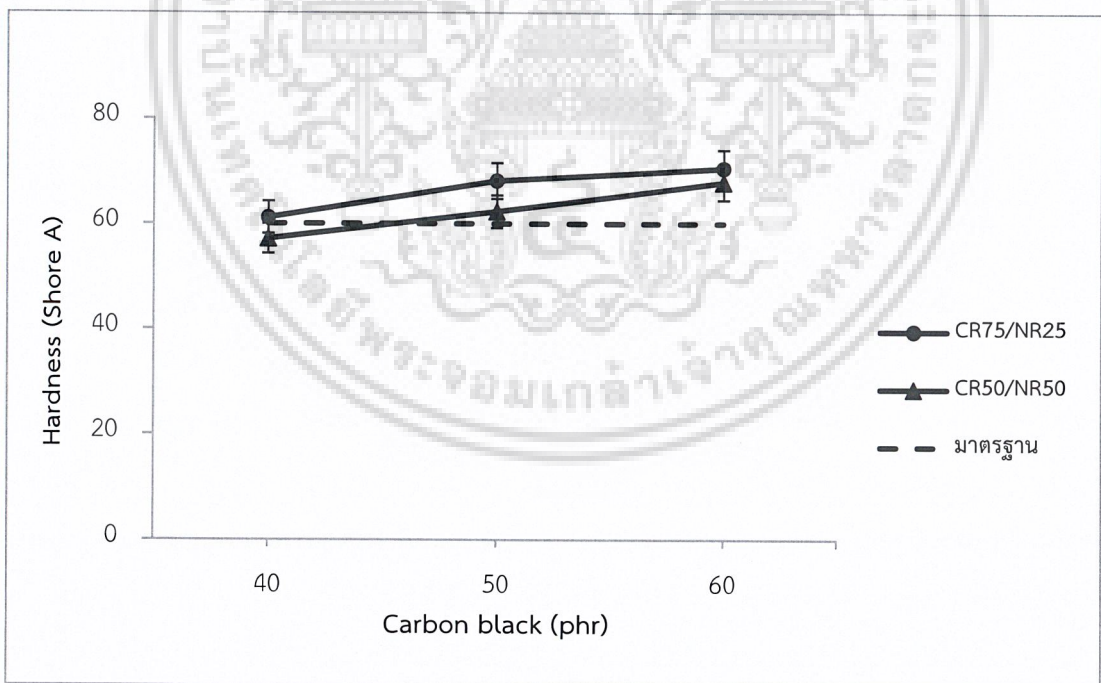


ภาพที่ 4.41 ค่ามอดูลัสที่ 100% หลังบ่มแรงของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ รพท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

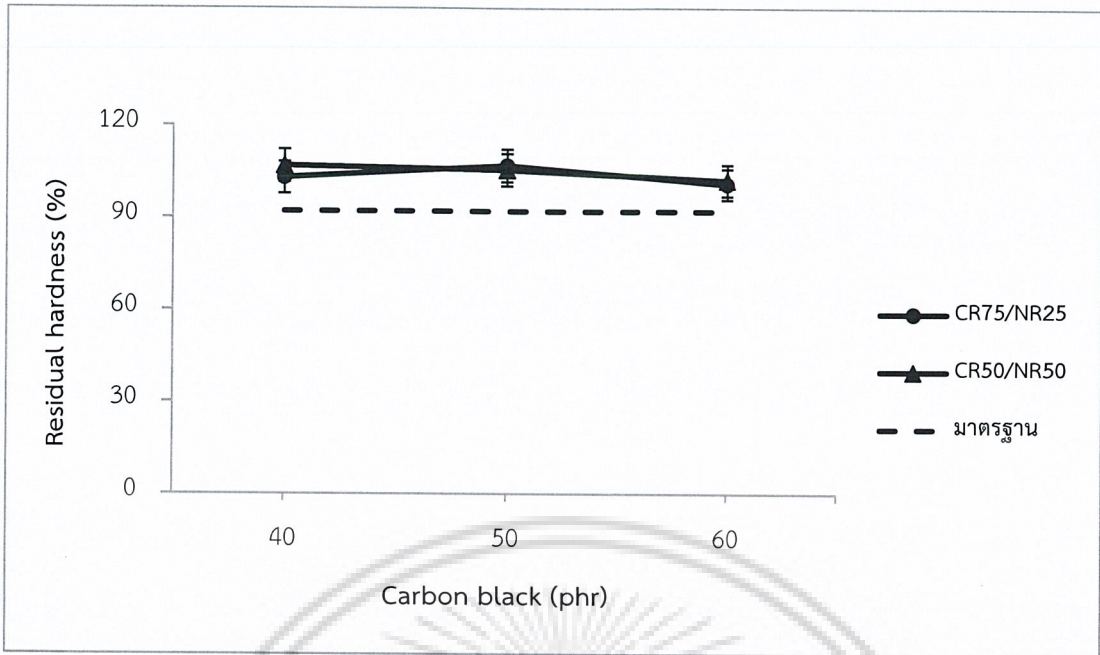


ภาพที่ 4.42 ค่าร้อยละมอดูลัสที่ 100% ที่คงอยู่ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ รพท.

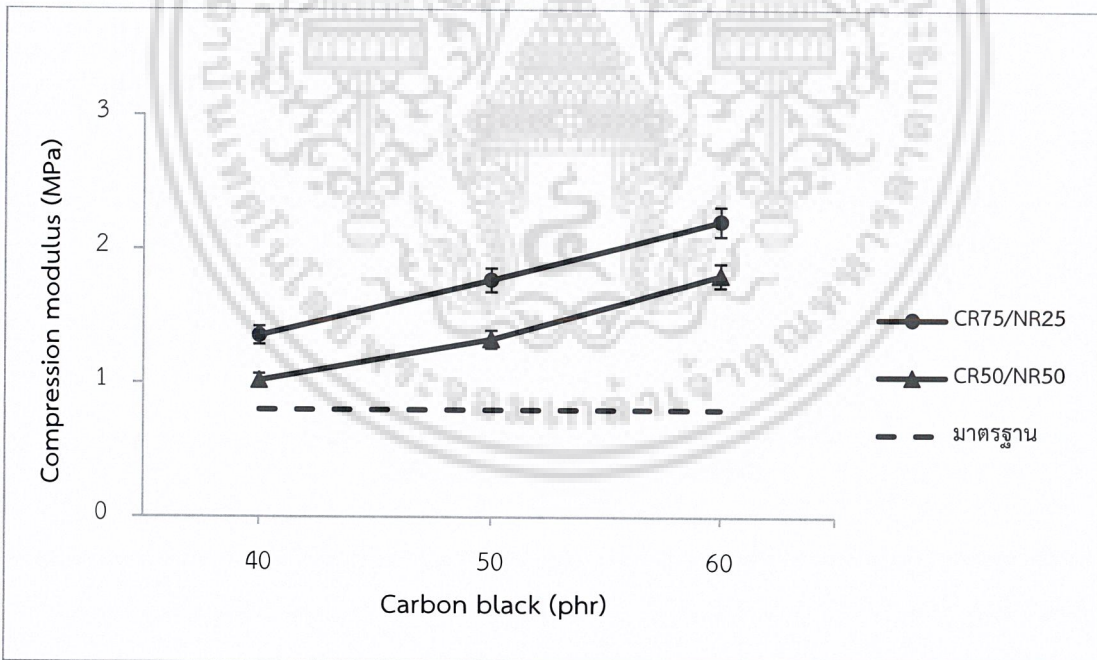


ภาพที่ 4.43 ค่าความแข็งกดหลังบ่มแรงของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ รพท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

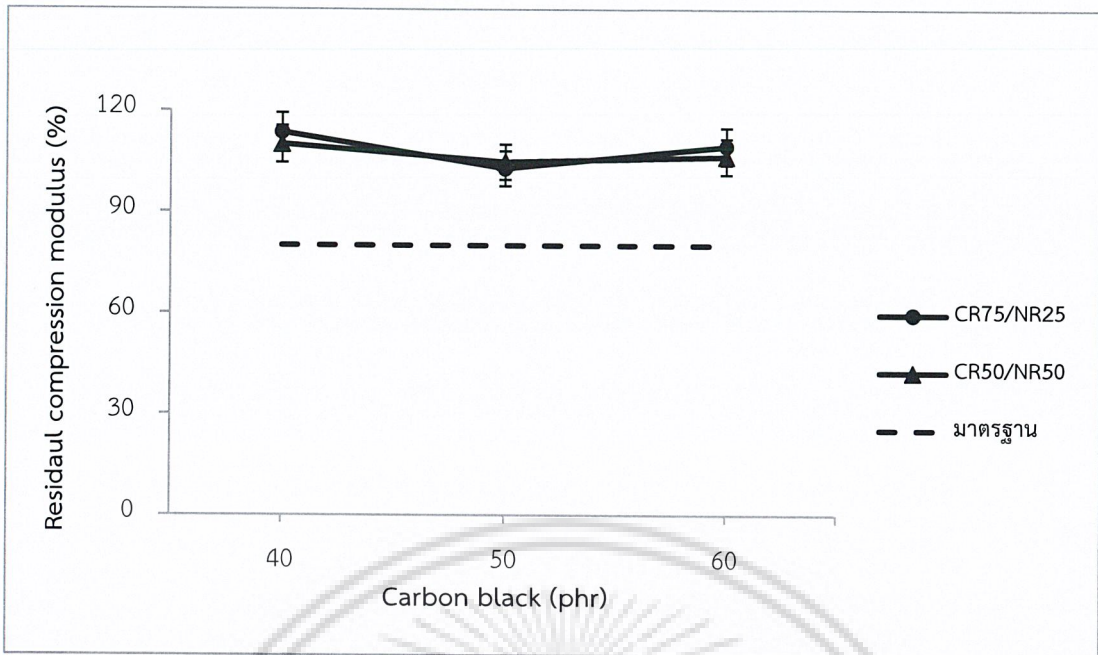


ภาพที่ 4.44 ค่าร้อยละความแข็งกตกที่ยังคงอยู่ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ รพท.

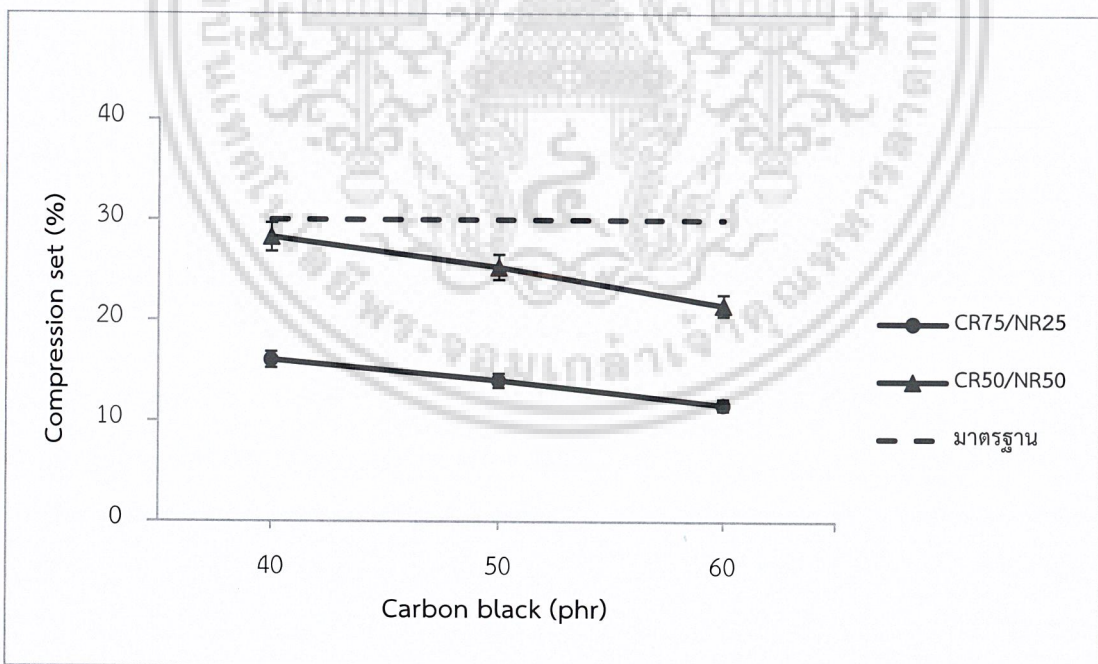


ภาพที่ 4.45 ค่ามอดุลัสกดอัดที่ 20% Strain หลังบ่มแรงของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ รพท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

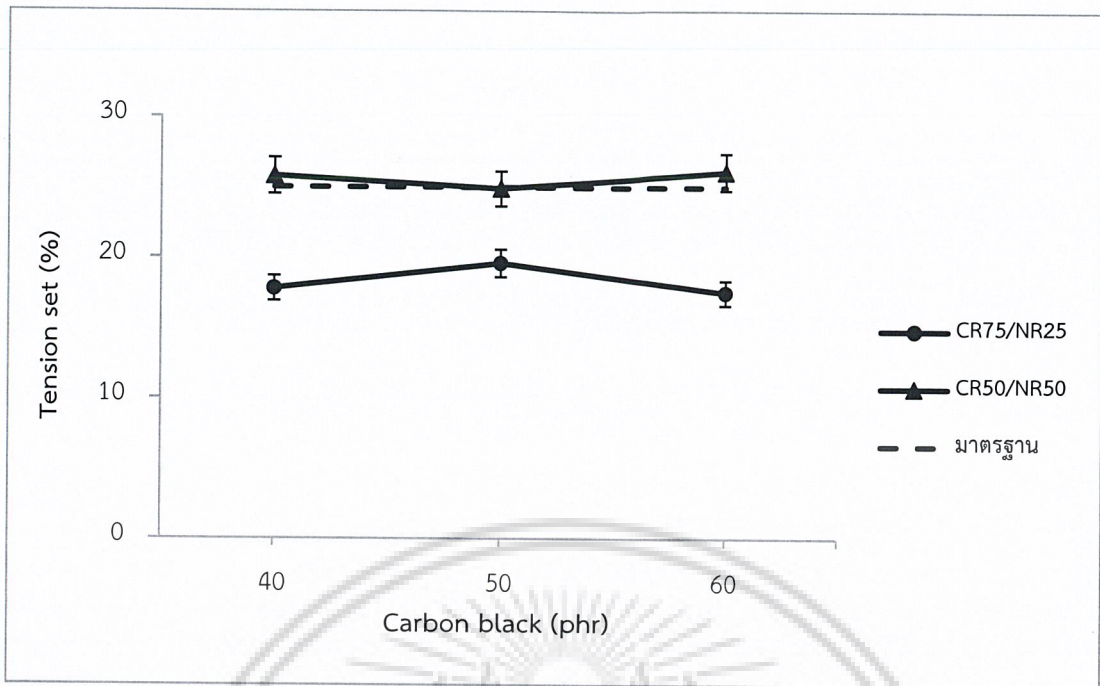


ภาพที่ 4.46 ค่าร้อยละมอดูลัสกดอัดที่ 20% Strain ที่ยังคงอยู่ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าต่ำสุดตามมาตรฐานของ รพท.

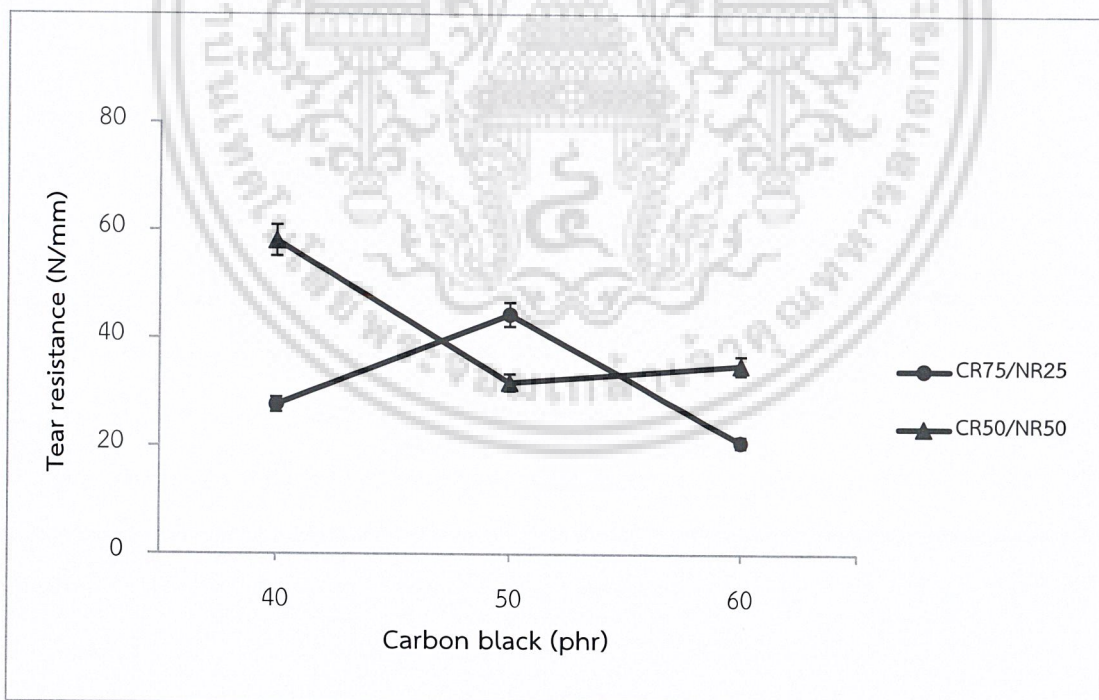


ภาพที่ 4.47 ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าสูงสุดตามมาตรฐานของ รพท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

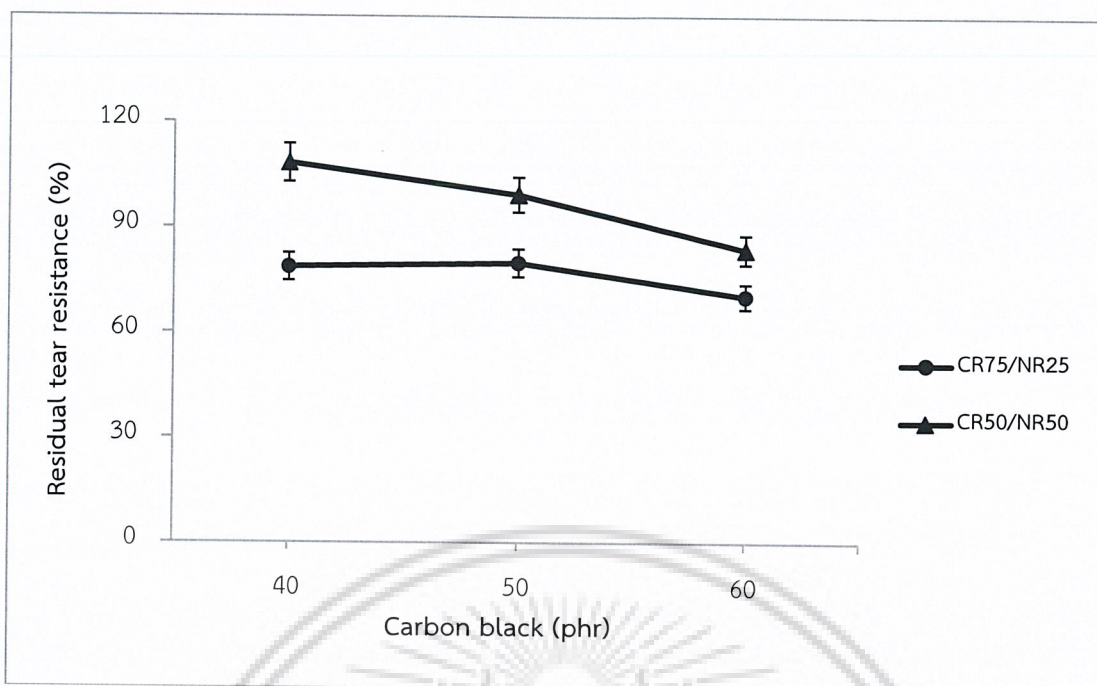


ภาพที่ 4.48 ค่าการยืดตัวเนื่องจากแรงดึงของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr เส้นประ (---) แสดงค่าสูงสุดตามมาตรฐานของ รพท.



ภาพที่ 4.49 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดหลังบ่มแรงของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.50 ค่าร้อยละความต้านทานต่อการฉีกขาดที่ยังคงอยู่ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr

จากรูปที่ 4.37 และ 4.39 แสดงค่าความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืด ณ จุดขาดหลังบ่มเร่ง ของยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr พบว่าเพิ่มปริมาณเขม่าดำมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการให้ความร้อนแก่ยางซึ่งมีปริมาณเขม่าดำมาก ทำให้สายโซ่โมเลกุลขาดได้ง่าย ปริมาณเขม่าดำที่มากทำให้ความเครียดของยางสูง เมื่อให้แรงดึงแก่ชิ้นงานทดสอบตามทฤษฎีการขยายความเครียด (Strain amplification effect) ซึ่งสอดคล้องกับค่าร้อยละความแข็งแรงดึงที่ยังคงอยู่และค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่ยังคงอยู่ แสดงดังรูปที่ 4.38 และ 4.40 เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานของ รพท. แล้วปรากฏว่าผ่านมาตรฐาน

จากรูปที่ 4.41, 4.43 และ 4.45 แสดงค่ามอดูลัสที่ 100% ค่าความแข็งแรง และค่ามอดูลัสกดอัดที่ 20% Strain หลังบ่มเร่ง ของยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณ เขม่าดำ 40 – 60 phr พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำสมบัติต่าง ๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับเขม่าดำมาก ทำให้ยางแข็งขึ้น นอกจากนี้เขม่าดำยังช่วยป้องกันการทะลุผ่านของแสง UV (Ultraviolet light) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของยาง จึงสอดคล้องกับ ร้อยละค่ามอดูลัสที่ 100% ที่ยังคงอยู่ ค่าร้อยละความแข็งแรงที่ยังคงอยู่ และค่าร้อยละมอดูลัสกดอัด ที่ 20% Strain ที่ยังคงอยู่ แสดงดังรูปที่ 4.42, 4.44 และ 4.46 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานของ รพท. แล้วปรากฏว่าค่ามอดูลัสที่ 100% ผ่านมาตรฐานเฉพาะสูตรที่มีปริมาณเขม่าดำ 60 phr และสูตรที่ CR/NR อัตราส่วน 75/25 ปริมาณเขม่าดำ 50 phr ค่าความแข็งแรงกด ผ่านมาตรฐานเฉพาะสูตรที่มีปริมาณเขม่าดำ 50 และ 60 phr และมอดูลัสกดอัดที่ 20% Strain ผ่านมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

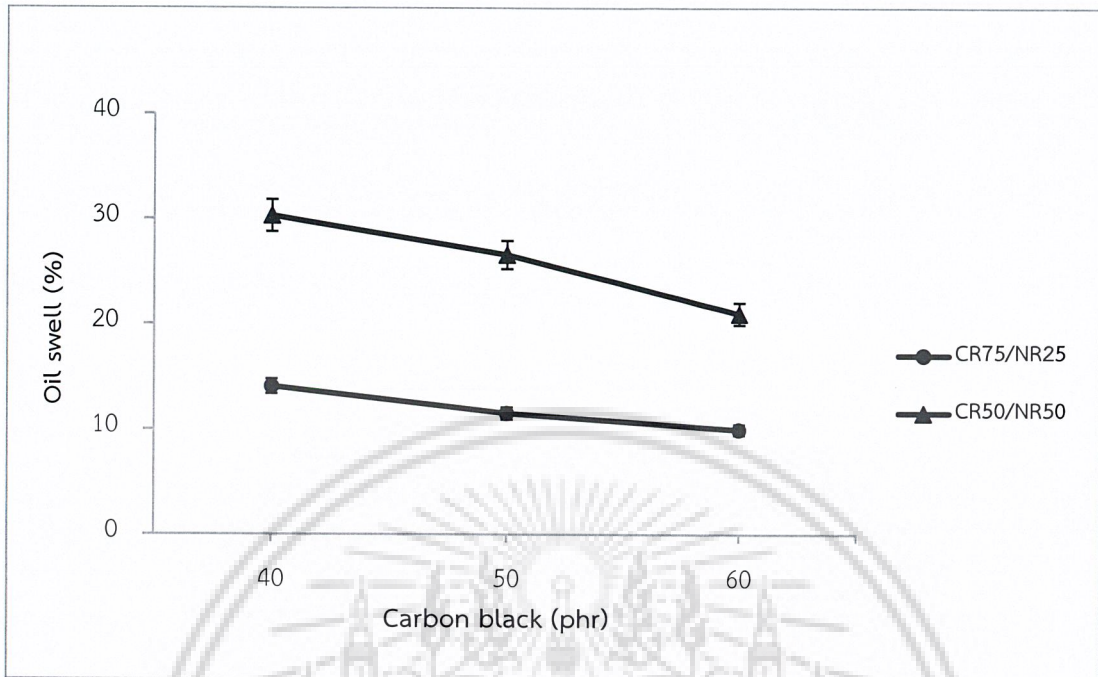
จากรูปที่ 4.47 และ 4.48 แสดงค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกด และค่าการยืดตัวเนื่องจากแรงดึงของยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำการยุบตัวเนื่องจากแรงกดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเขม่าดำทำให้มีเนื้อยางที่น้อยลง เมื่อทำการทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงกด ส่วนที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างจะเป็นส่วนของเนื้อยาง เขม่าดำที่ผสมในเนื้อยางจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ทำให้เมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำมากจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ยาก ส่วนค่าการยืดตัวเนื่องจากแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณเขม่าดำที่มาก ทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่โพลิเมอร์ลดลง ทำให้ค่าการยืดตัวเนื่องจากแรงดึงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานของ รพท. แล้วปรากฏว่าค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดผ่านมาตรฐาน และค่าการยืดตัวเนื่องจากแรงดึงผ่านมาตรฐานเฉพาะสูตรที่ CR/NR ที่อัตราส่วน 75/25

จากรูปที่ 4.49 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดหลังบ่มเร่ง ของยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำสมบัติมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากปริมาณเขม่าดำที่น้อย จะทำให้ยางมีพันธะการเชื่อมโยงมากขึ้น ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ดี และหลังบ่มเร่งมีค่าร้อยละการคงอยู่ที่ลดลง เนื่องจากปริมาณเขม่าดำที่มากในยางจะทำให้ยางขยายมากขึ้น เมื่อทำการทดสอบยางจึงขาดได้ง่าย ซึ่งสอดคล้องกับร้อยละความต้านทานต่อการฉีกขาดที่ยังคงอยู่ แสดงดังรูปที่ 4.50 ส่วนในปริมาณเขม่าดำที่ 50 phr ได้ค่าที่ไม่คงที่และไม่เป็นแนวโน้ม อาจเกิดจากการผสมสารเคมีที่ไม่ดีหรือเกิดจากความผิดพลาดในการขึ้นรูป และการเตรียมชิ้นงานของผู้วิจัย

4.2.3 สมบัติทางกายภาพที่มีอัตราส่วนยางผสม CR/NR และเขม่าดำที่ต่างกัน

จากการทดสอบผลของอัตราส่วนยางผสม CR/NR อัตราส่วนที่ 75/25 และ 50/50 ที่มีปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr ต่อสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความทนทานต่อน้ำมันและสภาพต้านทานไฟฟ้า แสดงผลดังรูปที่ 4.51 – 4.52

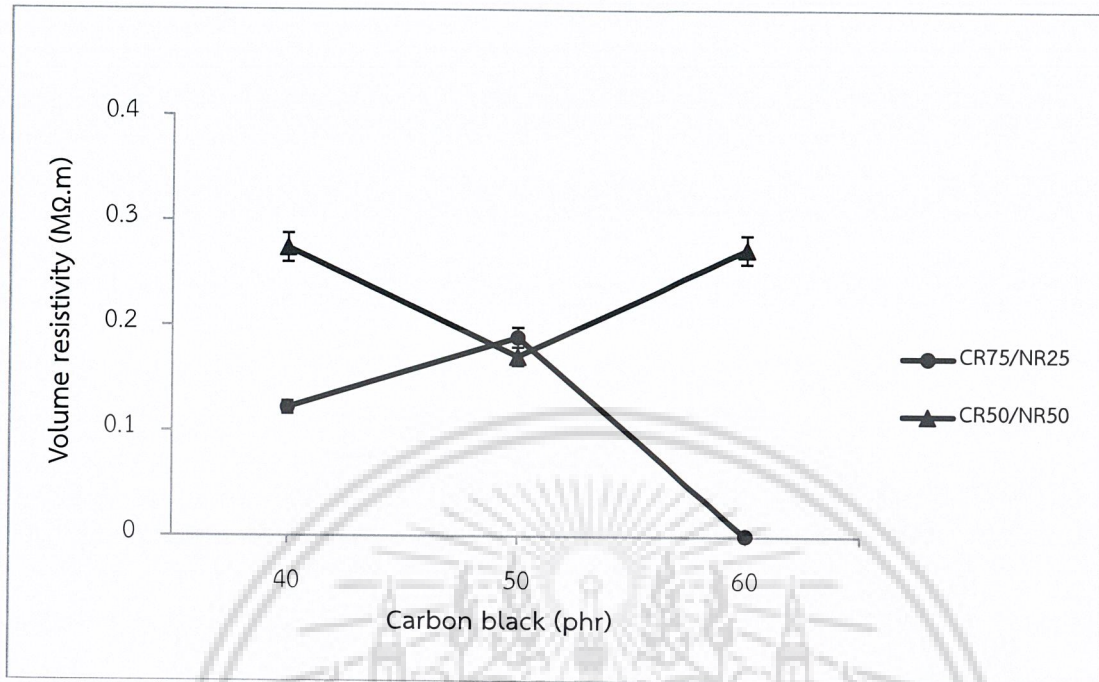
4.2.3.1 ความทนทานต่อน้ำมัน



ภาพที่ 4.51 ค่าร้อยละการบวมตัวของยางในน้ำมัน ในการทดสอบความทนทานต่อน้ำมัน ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr

จากรูปที่ 4.51 แสดงค่าร้อยละการบวมตัวของยางในน้ำมัน ของยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของเขม่าดำ ร้อยละการบวมตัวของน้ำมันมีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของเขม่าดำทำให้ปริมาณเนื้อยางลดลง เพราะยางเป็นส่วนที่บวมตัว จึงทำให้การเพิ่มปริมาณเขม่าดำทำให้ร้อยละการบวมตัวของยางในน้ำมันลดลง

4.2.3.2 สภาพต้านไฟฟ้า



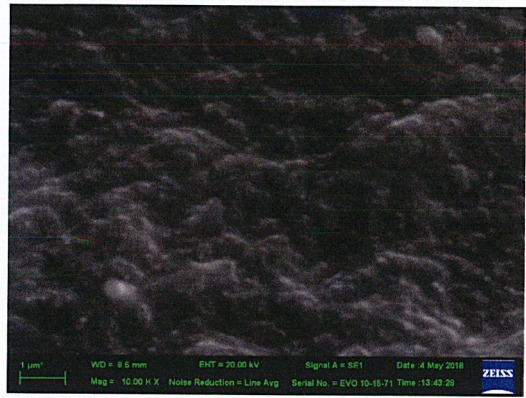
ภาพที่ 4.52 ค่าสภาพต้านไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 1.00 ± 0.01 V ของยางผสม CR/NR อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr

จากรูปที่ 4.52 แสดงค่าสภาพความต้านไฟฟ้าของยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 75/25 และ 50/50 แปรปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr พบว่าการเพิ่มปริมาณเขม่าดำจะทำให้มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเขม่าดำมีความสามารถในการนำไฟฟ้า ค่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มสูงขึ้นตามโครงสร้างและพื้นที่ผิวของเขม่าดำที่เพิ่มขึ้น หมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิวโดยเฉพาะหมู่ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ก็มีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าของเขม่าดำเช่นกัน จากการทดสอบค่าสภาพต้านไฟฟ้าที่ได้ไม่เป็นแนวโน้ม อาจเกิดจากข้อผิดพลาดในการทดลองด้วยจำนวนชิ้นงานทดสอบที่น้อยเกินไป จึงจำเป็นที่จะทำการทดลองซ้ำในอนาคต

4.2.4 การศึกษาสัญญาณวิทยุที่มีอัตราส่วนยางผสม CR/NR และเขม่าดำที่ต่างกัน

จากการทดสอบผลของอัตราส่วนยางผสม CR/NR อัตราส่วนที่ 75/25 และ 50/50 ที่มีปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr ด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงผลดังรูปที่ 4.53 – 4.58

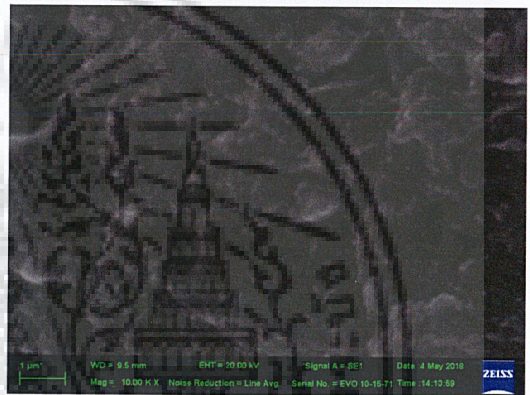
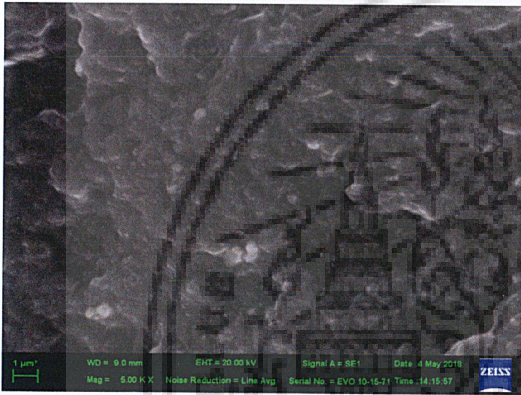
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) กำลังขยาย 5000 เท่า

(ข) กำลังขยาย 10000 เท่า

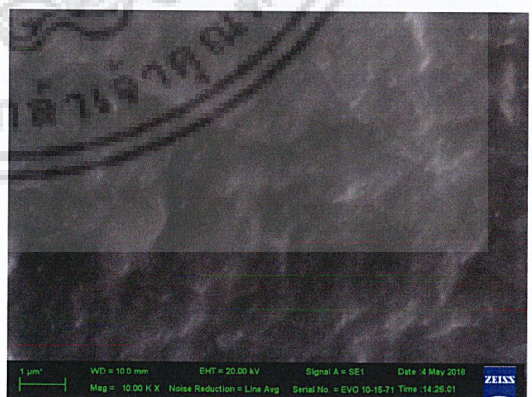
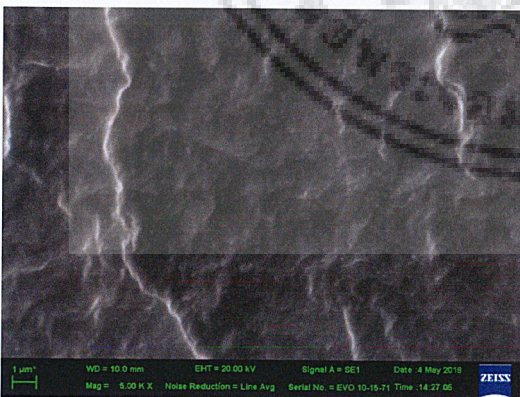
ภาพที่ 4.53 สันฐานวิทยาของยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 75/25 ปริมาณเขม่าดำ 60 phr



(ก) กำลังขยาย 5000 เท่า

(ข) กำลังขยาย 10000 เท่า

ภาพที่ 4.54 สันฐานวิทยาของยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 75/25 ปริมาณเขม่าดำ 50 phr

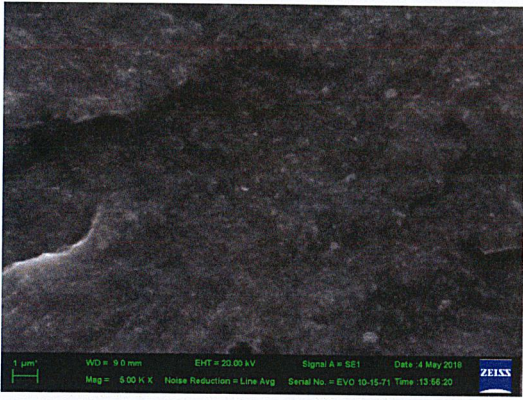


(ก) กำลังขยาย 5000 เท่า

(ข) กำลังขยาย 10000 เท่า

ภาพที่ 4.55 สันฐานวิทยาของยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 75/25 ปริมาณเขม่าดำ 40 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

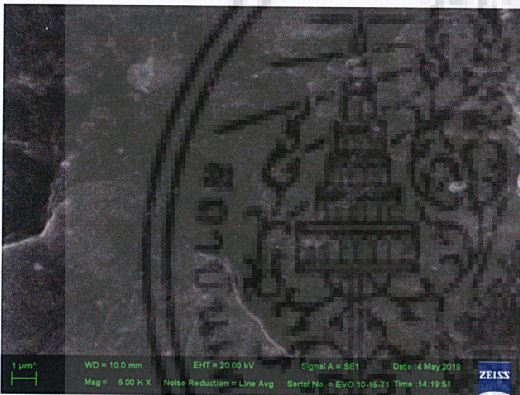


(ก) กำลังขยาย 5000 เท่า



(ข) กำลังขยาย 10000 เท่า

ภาพที่ 4.56 สัณฐานวิทยาของยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 50/50 ปริมาณเขม่าดำ 60 phr

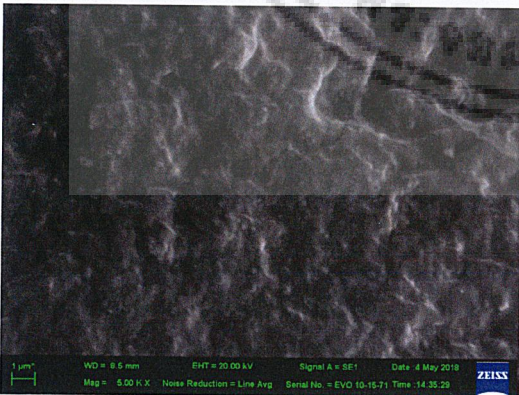


(ก) กำลังขยาย 5000 เท่า



(ข) กำลังขยาย 10000 เท่า

ภาพที่ 4.57 สัณฐานวิทยาของยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 50/50 ปริมาณเขม่าดำ 50 phr



(ก) กำลังขยาย 5000 เท่า



(ข) กำลังขยาย 10000 เท่า

ภาพที่ 4.58 สัณฐานวิทยาของยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 50/50 ปริมาณเขม่าดำ 40 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

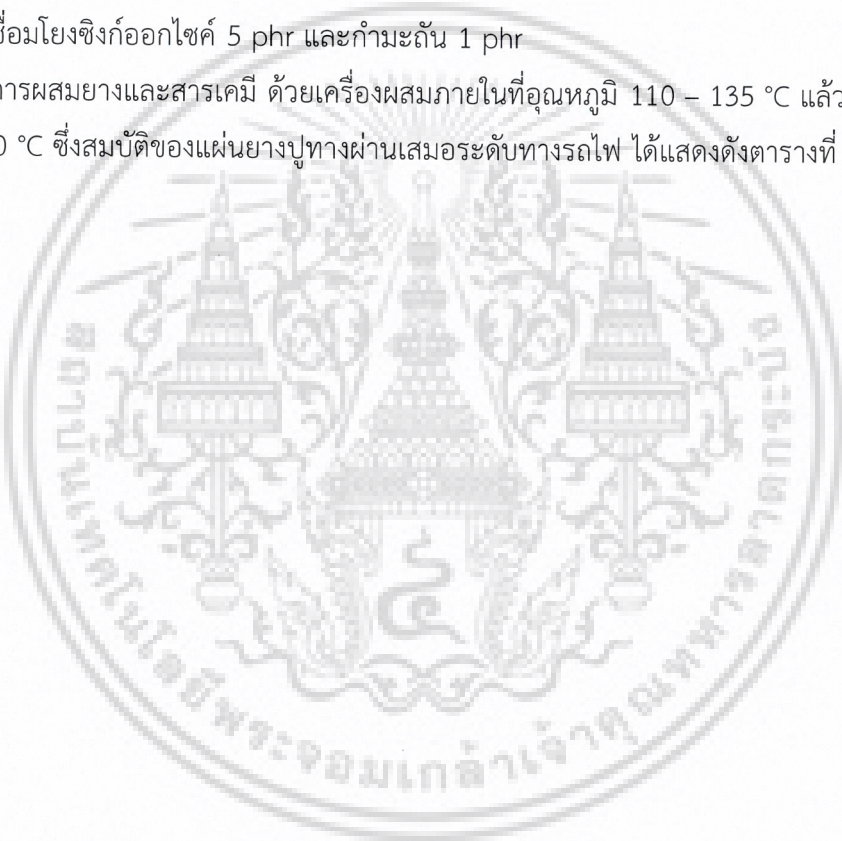
จากรูปที่ 4.53 – 4.58 เป็นการศึกษาสัณฐานวิทยาของยางที่มีอัตราส่วนยางผสม CR/NR อัตราส่วนที่ 75/25 และ 50/50 ที่มีปริมาณเขม่าดำ 40 – 60 phr ที่กำลังขยาย 5000 เท่า และ 10000 เท่า พบว่าเขม่าดำมีการกระจายตัวที่ดีในเนื้อยาง ซึ่งส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ดี

4.3 สรุปสูตรที่เหมาะสมและสมบัติของแผ่นยางปูทางผ่านเสมอรระดับทางรถไฟ

จากการทดลองพบว่า องค์ประกอบยางและสารเคมีที่เหมาะสมในการผลิตแผ่นยางปูทางผ่านเสมอรระดับทางรถไฟ ที่มีทั้งสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมในการใช้งาน คือ

- อัตราส่วนยางผสมสูตร CR/NR ที่อัตราส่วน 75/25
- ปริมาณเขม่าดำที่ 60 phr
- สารเชื่อมโยงซิงก์ออกไซด์ 5 phr และกำมะถัน 1 phr

โดยทำการผสมยางและสารเคมี ด้วยเครื่องผสมภายในที่อุณหภูมิ 110 – 135 °C แล้วทำการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C ซึ่งสมบัติของแผ่นยางปูทางผ่านเสมอรระดับทางรถไฟ ได้แสดงดังตารางที่ 4.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 สมบัติของแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟที่ทดสอบได้

คุณลักษณะ	ค่ามาตรฐาน	ค่าที่ได้	หน่วย
ความแข็งกด	65 – 80	69.93	shore A
ก่อนเร่งการเสื่อมอายุ			
- ความแข็งแรงดึง	12	19.72	MPa
- ความยืดเมื่อขาด	250	513.92	%
- มอดุลัสที่ความยืด 100%	3 – 5	2.86	MPa
- มอดุลัสกดอัด ที่ 20% Strain	1	2.02	MPa
หลังเร่งการเสื่อมอายุ (70 °C / 168 ชม.)			
- ความแข็งกด	±5 - ±10	70.54	shore A
- ความแข็งแรงดึง	10	19.49	MPa
- การเปลี่ยนแปลง ความแข็งแรงดึง ไม่น้อยกว่า	70	98.86	%
- ความยืดเมื่อขาด	180	502.45	%
- การเปลี่ยนแปลง ความยืดเมื่อขาด ไม่น้อยกว่า	60	97.77	%
- การเปลี่ยนแปลง มอดุลัสที่ความยืด 100 % ไม่น้อยกว่า	40	103.15	%
- การเปลี่ยนแปลง มอดุลัสกดอัด ไม่น้อยกว่า	±20	109.49	%
การยุบตัวเนื่องจากแรงกด ไม่เกิน (70 °C / 22 ชม.)	30	11.63	%
ความต้านทานต่อโอโซน (ความเข้มข้นของโอโซน 25 ppm ที่ 40 °C / 72 ชม. ความยืด 20%)	ไม่มีรอยแตก	ไม่มีรอยแตก	-
ความต้านทานต่อการกัดกร่อน ปริมาตรสูญเสียไม่เกิน	400	127.07	mm ³
ความยืดตัว ไม่เกิน (70 °C / 24 ชม. ดึงที่ยืด 50%)	25	17.50	%
คุณลักษณะ	ค่ามาตรฐาน	ค่าที่ได้	หน่วย
สภาพต้านไฟฟ้าเชิงปริมาตร	100	$< 8.61 \times 10^{-4}$	MΩ.m
ความทนทานต่อน้ำมัน	-	9.97	%
ค่าแรงเสียดทาน			
- ทดสอบที่สภาวะแห้ง	80 – 110	52	-
- ทดสอบที่สภาวะเปียก	55 – 110	14	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ในการทำแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟ

วิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบโดยเลือกใช้ยางที่สมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่ง สมบัติทางกายภาพ ที่เหมาะสมกับการใช้งานของแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม มีอัตราส่วนยางผสมสูตรยางคลอโรพรีนต่อยางธรรมชาติ (CR/NR) ที่อัตราส่วน 75/25 และปริมาณเคมีดำที่ 60 phr มีต้นทุน 141.16 บาท/กิโลกรัม ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ต้นทุนวัตถุดิบของแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟที่ทำจากยางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติ

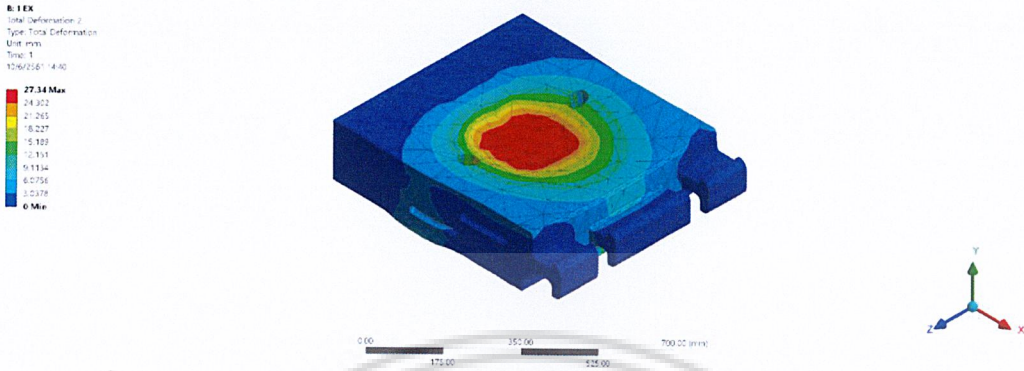
องค์ประกอบ	ปริมาณ (phr)	ราคาต้นทุนวัตถุดิบ (บาท/กิโลกรัม)	ราคา (บาท)
ยางคลอโรพรีน	75	249	105.81
ยางธรรมชาติ	25	62	8.78
ซิงก์ออกไซด์	5	99	2.80
แมกนีเซียมออกไซด์	1	99	0.56
กรดสเตียริก	2	41	0.46
เคมีดำ	60	53	18.02
น้ำมันแอฟทานิก	5	54	1.53
6 PPD	1	123	0.70
ETU	1	336	1.90
CBS	0.5	174	0.49
กำมะถัน	1	18	0.10
รวมราคาต่อ 1 กิโลกรัม			141.16

หมายเหตุ ราคาโดยประมาณ เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2561

4.5 ผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

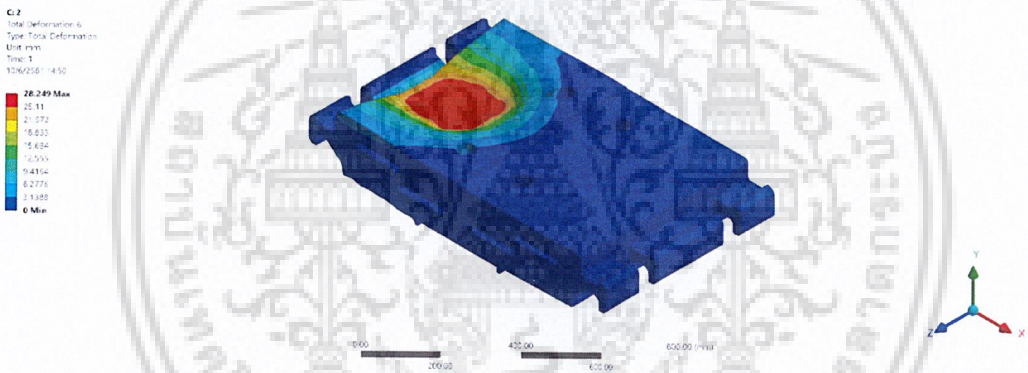
4.5.1 การเสียรูปของแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟ

- จุดที่ 1 มีการยุบตัวของแผ่นยางที่ 27.34 มิลลิเมตร



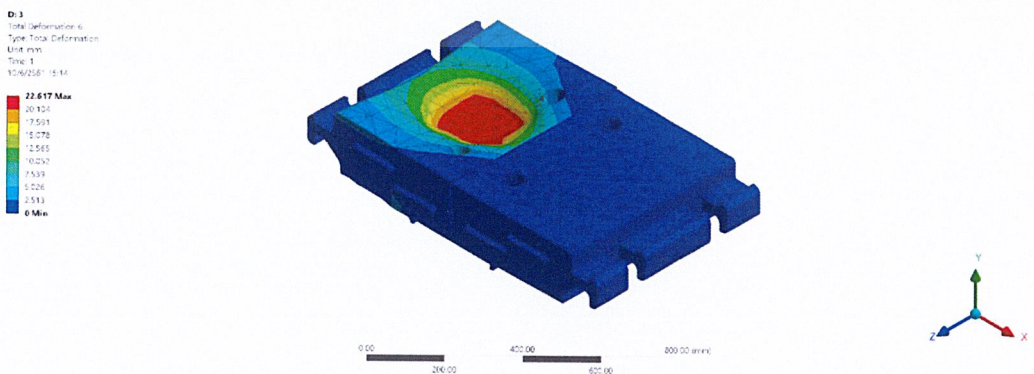
ภาพที่ 4.59 การยุบตัวของแผ่นยาง จุดที่ 1 บริเวณแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวนอก

- จุดที่ 2 มีการยุบตัวของแผ่นยางที่ 28.249 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.60 การยุบตัวของแผ่นยาง จุดที่ 2 บริเวณแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวในใกล้กับรางรถไฟ

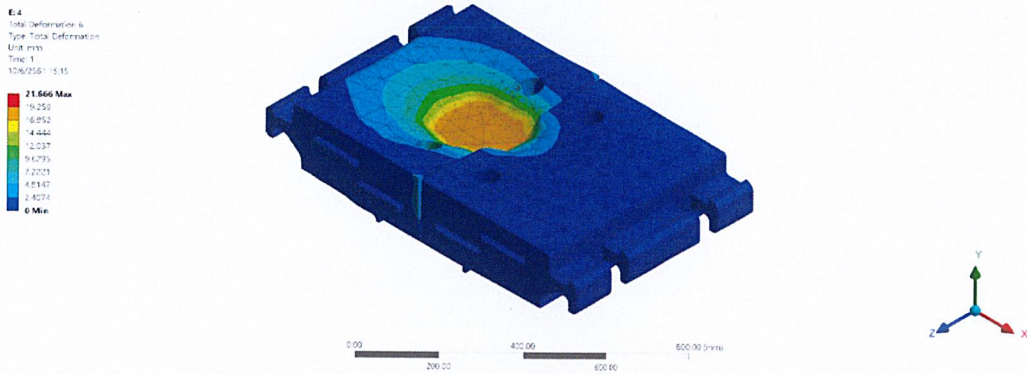
- จุดที่ 3 มีการยุบตัวของแผ่นยางที่ 22.617 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.61 การยุบตัวของแผ่นยาง จุดที่ 3 บริเวณกึ่งกลางแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน

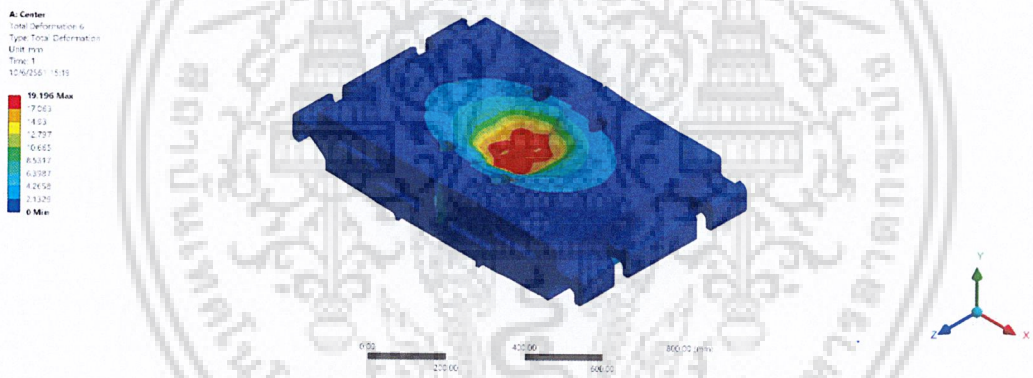
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุดที่ 4 มีการยุบตัวของแผ่นยางที่ 21.666 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.62 การยุบตัวของแผ่นยาง จุดที่ 4 บริเวณใกล้กับจุดต่อระหว่างแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน

- จุดที่ 5 มีการยุบตัวของแผ่นยางที่ 19.196 มิลลิเมตร

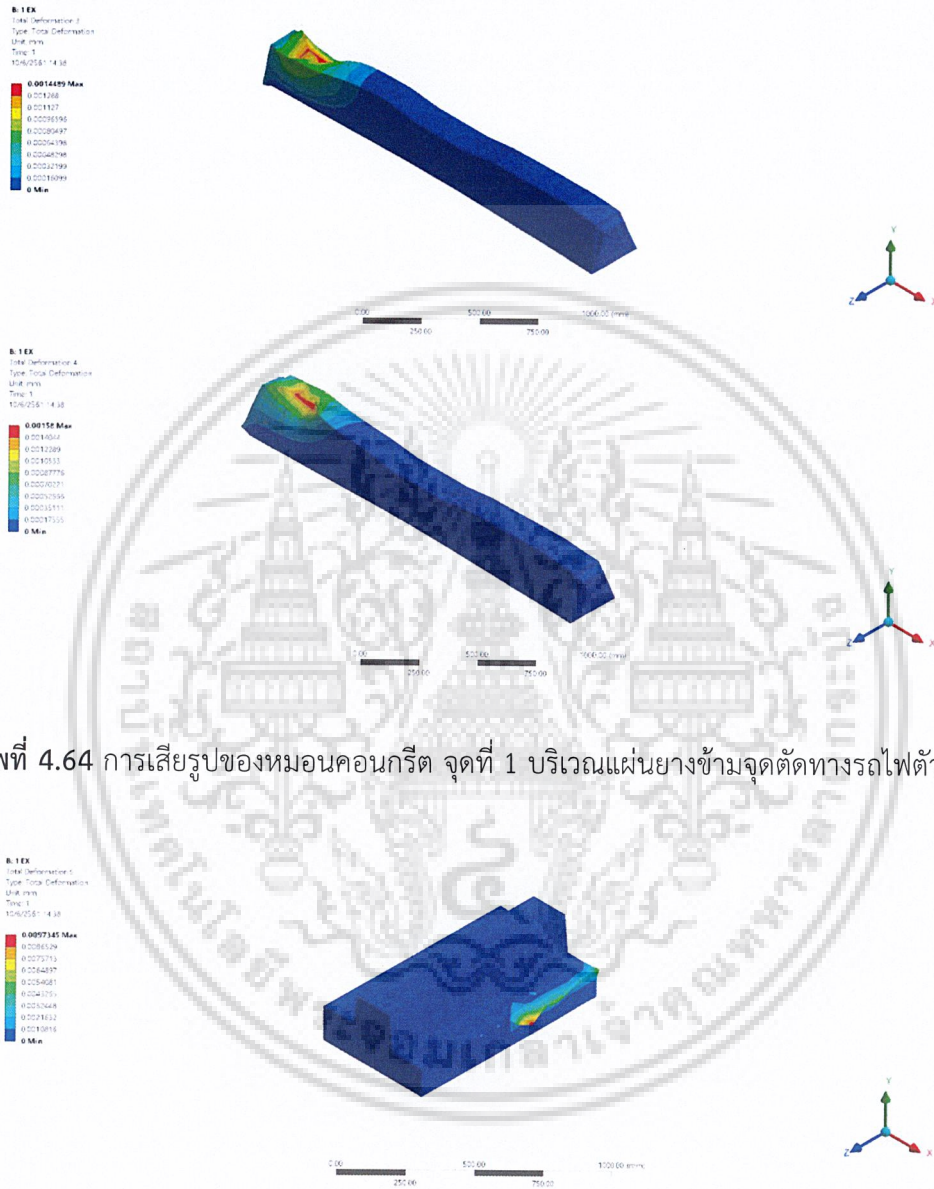


ภาพที่ 4.63 การยุบตัวของแผ่นยาง จุดที่ 5 บริเวณจุดต่อระหว่างแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 การเสีรูปของหมอนคอนกรีต

- จุดที่ 1 มีการเสีรูปของหมอนคอนกรีตที่ 0.00145 มิลลิเมตร และ 0.00158 มิลลิเมตร เพิ่มเติม คอนกรีตตัวนอก เกิดการเสีรูปที่ 0.009735 มิลลิเมตร

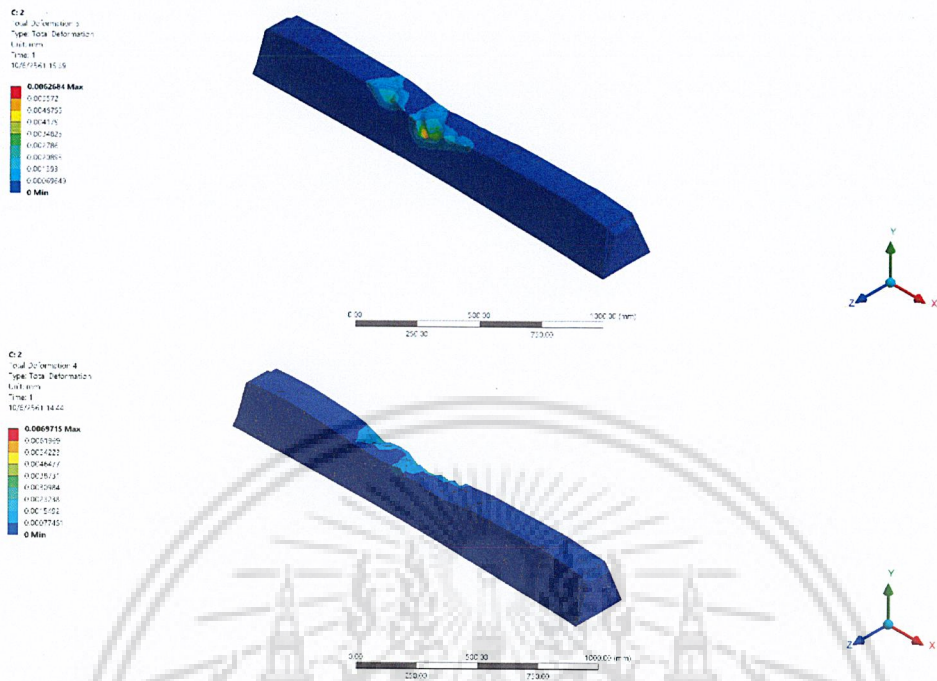


ภาพที่ 4.64 การเสีรูปของหมอนคอนกรีต จุดที่ 1 บริเวณแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวนอก

ภาพที่ 4.65 การเสีรูปของคอนกรีตตัวนอก จุดที่ 1 บริเวณแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุดที่ 2 มีการเสียรูปของหมอนคอนกรีตที่ 0.00627 มิลลิเมตร และ 0.00697 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.66 การเสียรูปของหมอนคอนกรีต จุดที่ 2 บริเวณแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวในใกล้กับรางรถไฟ

- จุดที่ 3 มีการเสียรูปของหมอนคอนกรีตที่ 0.0094 มิลลิเมตร และ 0.0086 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.67 การเสียรูปของหมอนคอนกรีต จุดที่ 3 บริเวณกึ่งกลางแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการแข่งขันเอกรถไฟไทย เมื่อผู้ซื้อได้เห็นและใช้ประโยชน์ในการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุดที่ 4 มีการเสียรูปของหมอนคอนกรีตที่ 0.00967 มิลลิเมตร และ 0.00915 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.68 การเสียรูปของหมอนคอนกรีต จุดที่ 4 บริเวณใกล้กับจุดต่อระหว่างแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน

- จุดที่ 5 มีการเสียรูปของหมอนคอนกรีตที่ 0.0074 มิลลิเมตร และ 0.0071 มิลลิเมตร

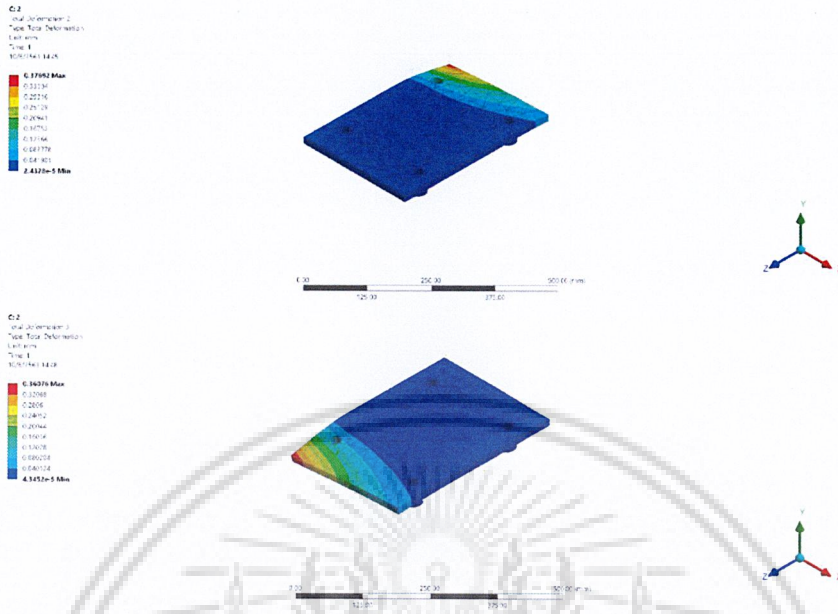


ภาพที่ 4.69 การเสียรูปของหมอนคอนกรีต จุดที่ 5 บริเวณจุดต่อระหว่างแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

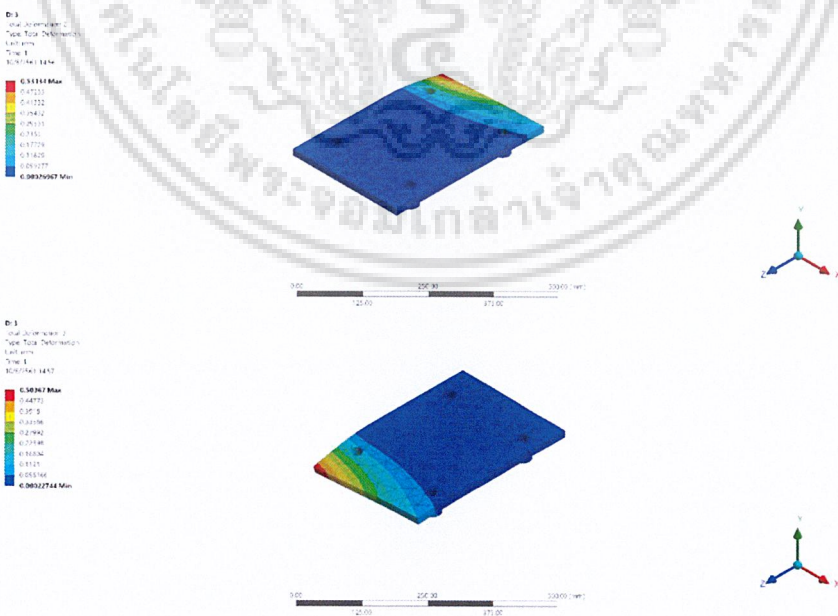
4.5.3 การเสีรูของแผ่นโลหะรองแผ่นยาง

- จุดที่ 2 มีการเสีรูของแผ่นโลหะรองแผ่นยางที่ 0.377 มิลลิเมตร และ 0.361 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.70 การเสีรูของแผ่นโลหะรองแผ่นยาง จุดที่ 2 บริเวณแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟในตัวในใกล้กับรางรถไฟ

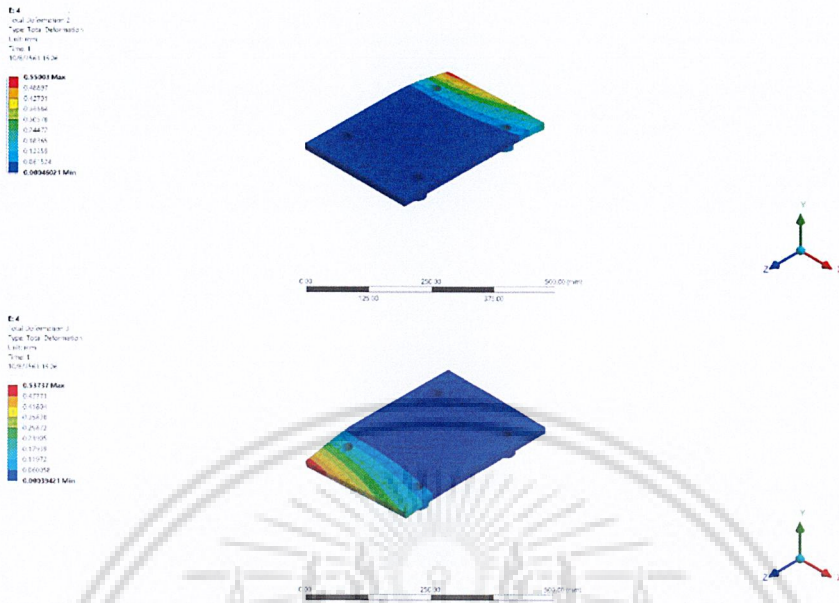
- จุดที่ 3 มีการเสีรูของแผ่นโลหะรองแผ่นยางที่ 0.531 มิลลิเมตร และ 0.504 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.71 การเสีรูของแผ่นโลหะรองแผ่นยาง จุดที่ 3 บริเวณกึ่งกลางแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟในตัวใน

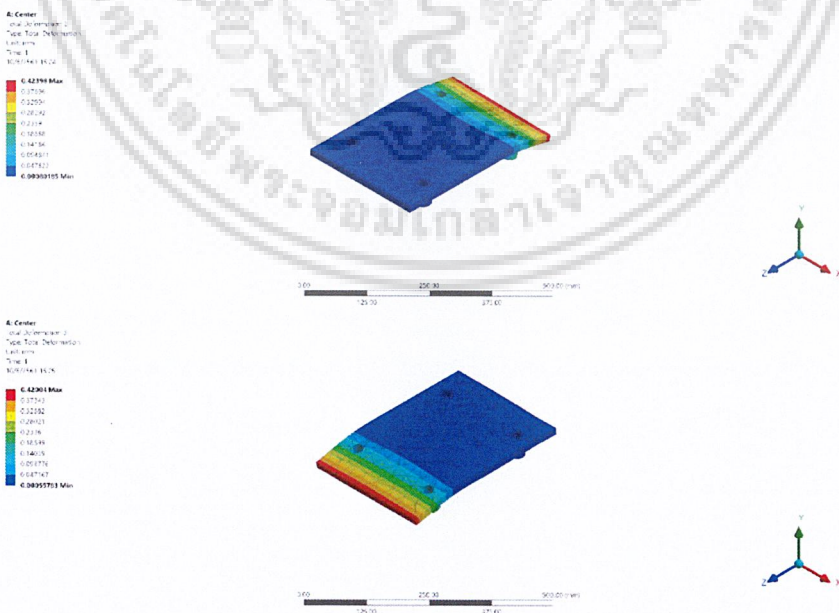
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุดที่ 4 มีการเสียรูปของแผ่นโลหะรองแผ่นยางที่ 0.55 มิลลิเมตร และ 0.54 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.72 การเสียรูปของแผ่นโลหะรองแผ่นยาง จุดที่ 4 บริเวณใกล้กับจุดต่อระหว่างแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน

- จุดที่ 5 มีการเสียรูปของแผ่นโลหะรองแผ่นยางที่ 0.424 มิลลิเมตร และ 0.420 มิลลิเมตร



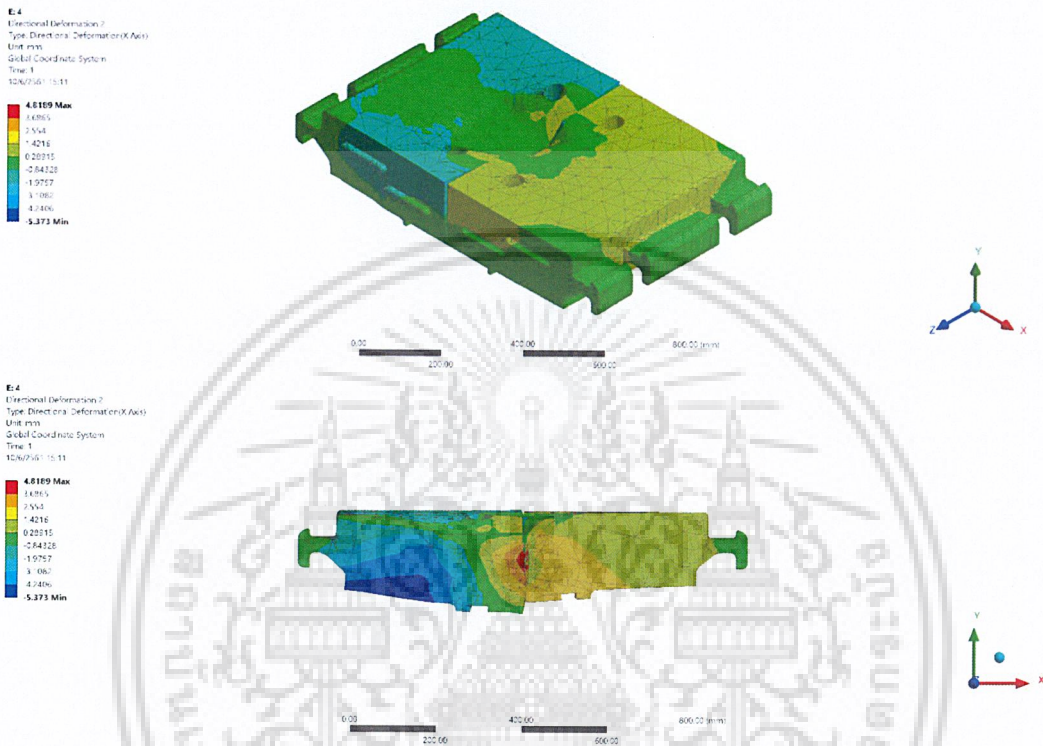
ภาพที่ 4.73 การเสียรูปของแผ่นโลหะรองแผ่นยาง จุดที่ 5 บริเวณจุดต่อระหว่างแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.4 การเสีรูปร่างของแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟแบบอื่นๆ (การเสีรูปร่างในแนวแกน X)

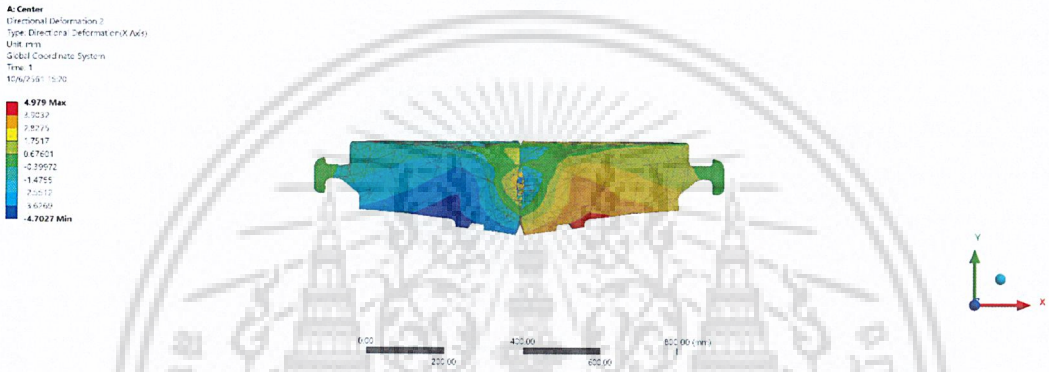
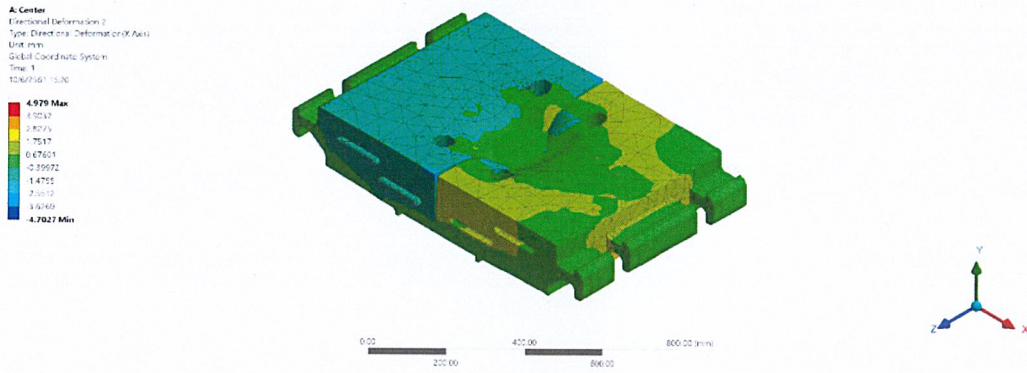
เนื่องจากการติดตั้งแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวในทั้ง 2 ตัวโดยไม่มีกรยึดติดใดๆระหว่างแผ่นทำให้เกิดการเสีรูปร่างแบบแยกตัวออกจากกันบริเวณจุดต่อเมื่อได้รับแรงกด 22.5 กิโลนิวตัน

- จุดที่ 4 มีการแยกตัวของของแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวในแผ่นที่ 5.373 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.74 การแยกตัวของของแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน จุดที่ 4 บริเวณใกล้กับจุดต่อระหว่างแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน

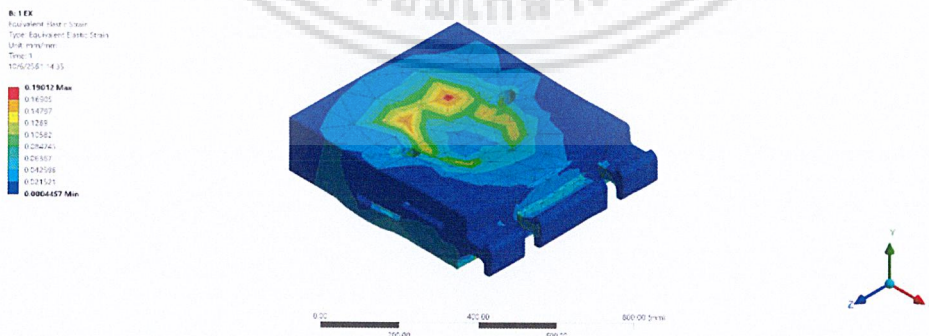
- จุดที่ 5 มีการแยกตัวของของแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวในแผ่นที่ 4.979 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.75 การแยกตัวของของแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน จุดที่ 5 บริเวณจุดต่อระหว่างแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน

4.5.5 Equivalent strain ของแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟ

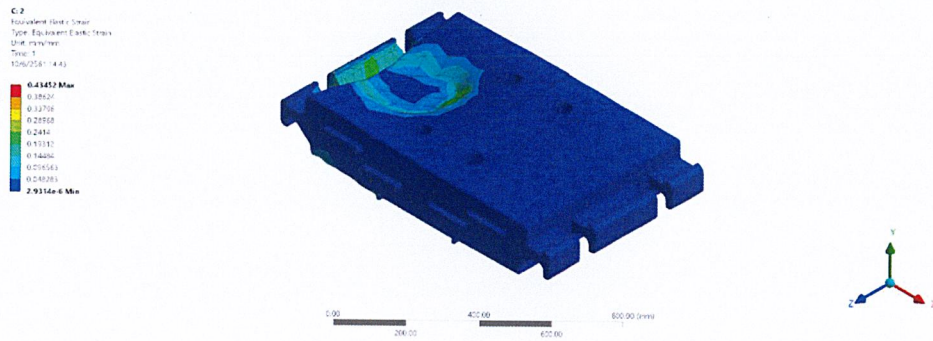
- จุดที่ 1 Equivalent strain มีค่า 0.19 มิลลิเมตร/มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.76 Equivalent strain ของแผ่นยาง จุดที่ 1 บริเวณแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวนอก

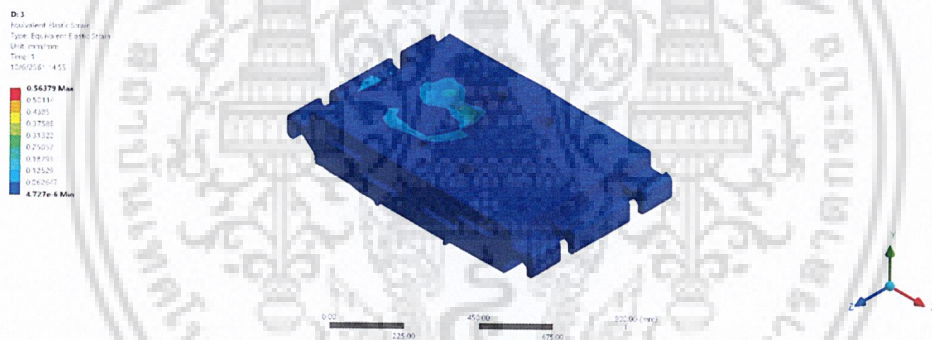
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุดที่ 2 Equivalent strain มีค่า 0.435 มิลลิเมตร/มิลลิเมตร



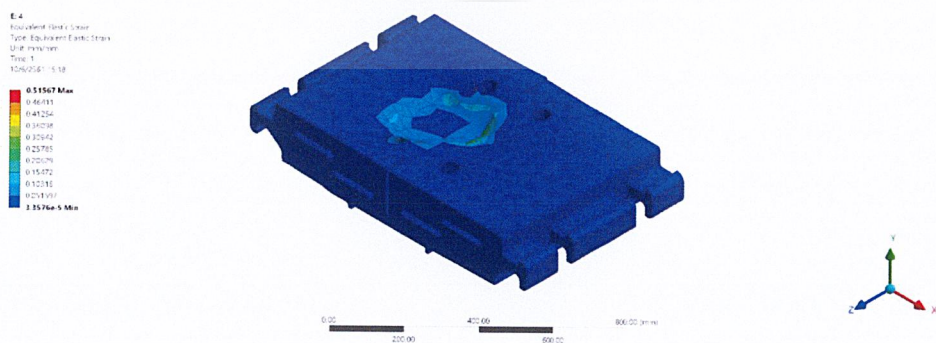
ภาพที่ 4.77 Equivalent strain ของแผ่นยาง จุดที่ 2 บริเวณแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวในใกล้กับรางรถไฟ

- จุดที่ 3 Equivalent strain มีค่า 0.564 มิลลิเมตร/มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.78 Equivalent strain ของแผ่นยาง จุดที่ 3 บริเวณกึ่งกลางแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน

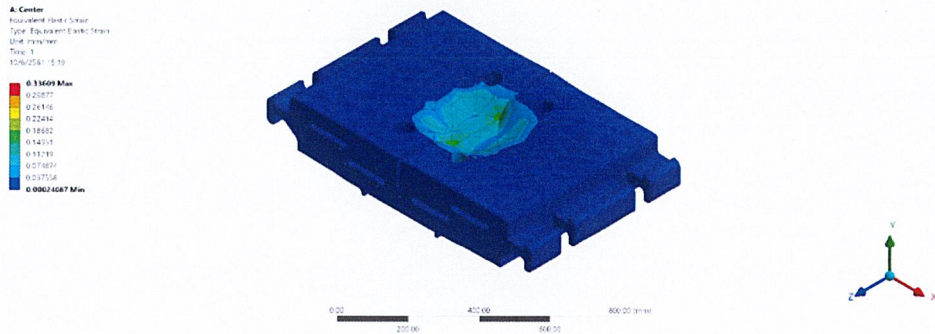
- จุดที่ 4 Equivalent strain มีค่า 0.516 มิลลิเมตร/มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.79 Equivalent strain ของแผ่นยาง จุดที่ 4 บริเวณใกล้กับจุดต่อระหว่างแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

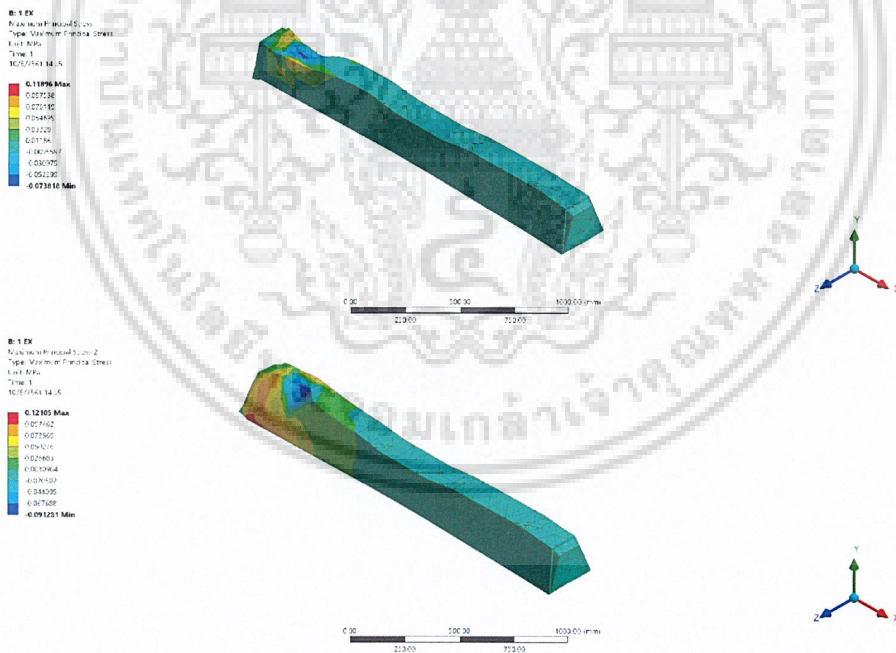
- จุดที่ 5 Equivalent strain มีค่า 0.336 มิลลิเมตร/มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.80 Equivalent strain ของแผ่นยาง จุดที่ 5 บริเวณจุดต่อระหว่างแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟ
 ตัวใน

4.5.6 Maximum principle stress ของหมอนคอนกรีต

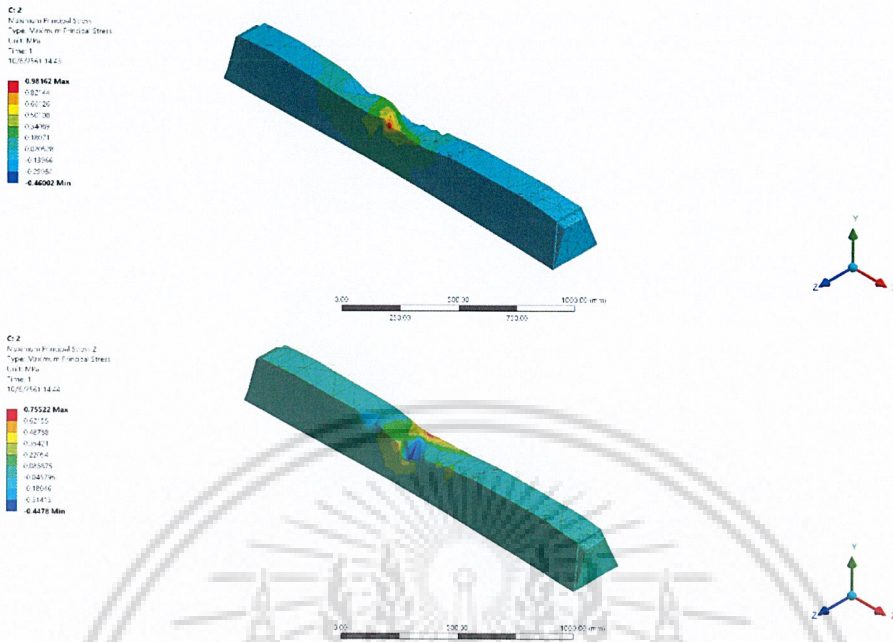
- จุดที่ 1 Maximum principle stress มีค่า 0.119 เมกะปาสคาล และ 0.121 เมกะปาสคาล



ภาพที่ 4.81 Maximum principle stress ของหมอนคอนกรีต จุดที่ 1 บริเวณแผ่นยางข้ามจุดตัดทาง
 รถไฟตัวนอก

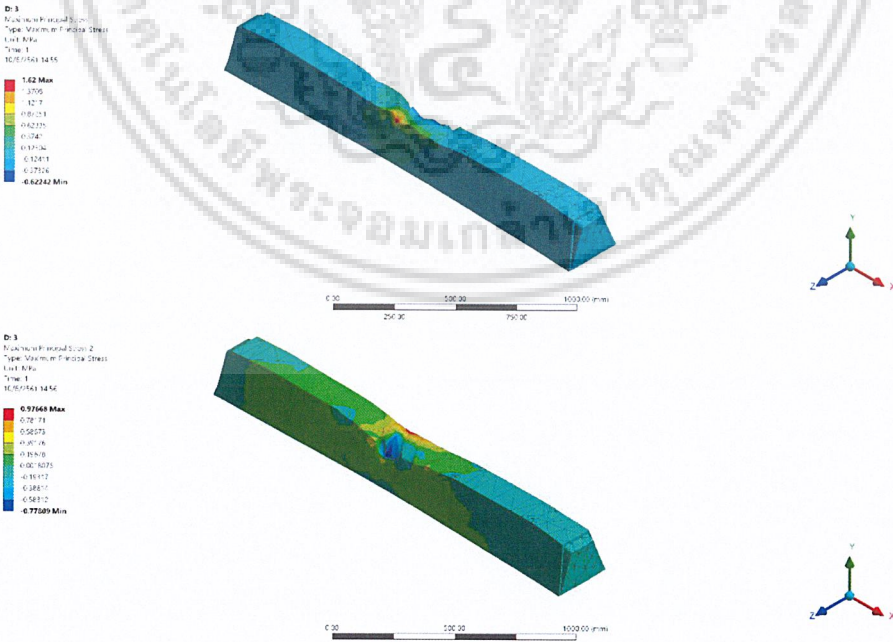
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุดที่ 2 Maximum principle stress มีค่า 0.982 เมกะปาสคาล และ 0.755 เมกะปาสคาล



ภาพที่ 4.82 Maximum principle stress ของหมอนคอนกรีต จุดที่ 2 บริเวณแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวในใกล้กับรางรถไฟ

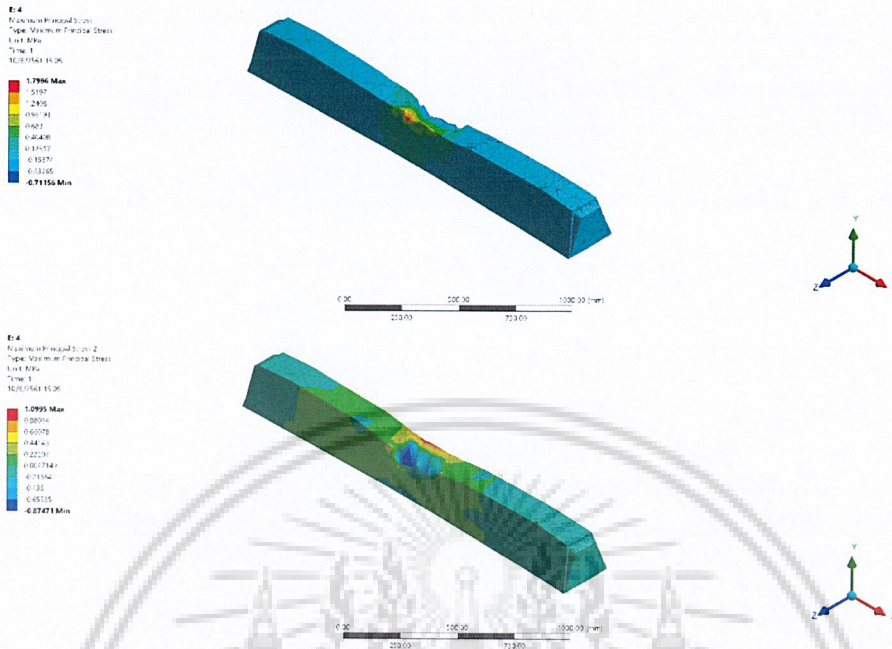
- จุดที่ 3 Maximum principle stress มีค่า 1.62 เมกะปาสคาล และ 0.977 เมกะปาสคาล



ภาพที่ 4.83 Maximum principle stress ของหมอนคอนกรีต จุดที่ 3 บริเวณกึ่งกลางแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุดที่ 4 Maximum principle stress มีค่า 1.799 เมกะปาสคาล และ 1.099 เมกะปาสคาล



ภาพที่ 4.84 Maximum principle stress ของหมอนคอนกรีต จุดที่ 4 บริเวณใกล้กับจุดต่อระหว่างแผ่น
 ยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน

- จุดที่ 5 Maximum principle stress มีค่า 1.34 เมกะปาสคาล และ 1.175 เมกะปาสคาล

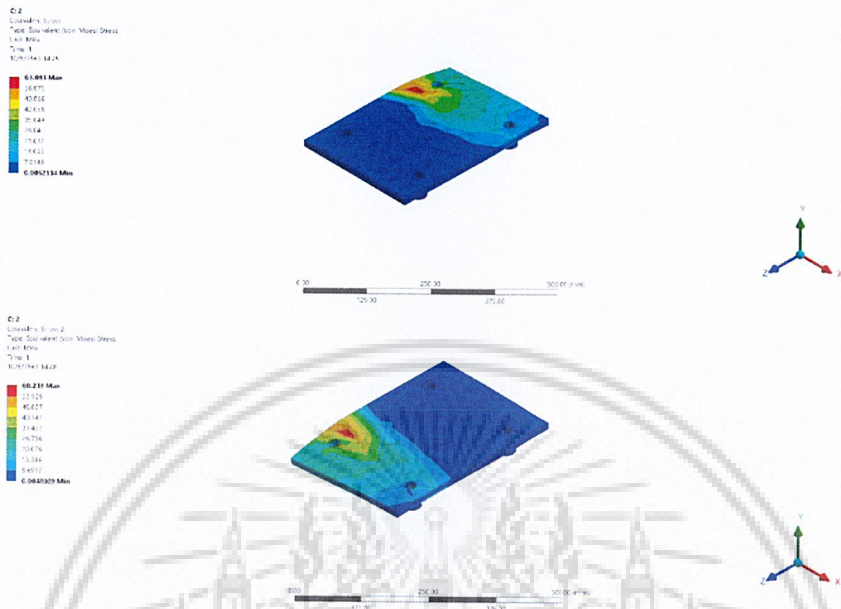


ภาพที่ 4.85 Maximum principle stress ของหมอนคอนกรีต จุดที่ 5 บริเวณจุดต่อระหว่างแผ่นยาง
 ข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

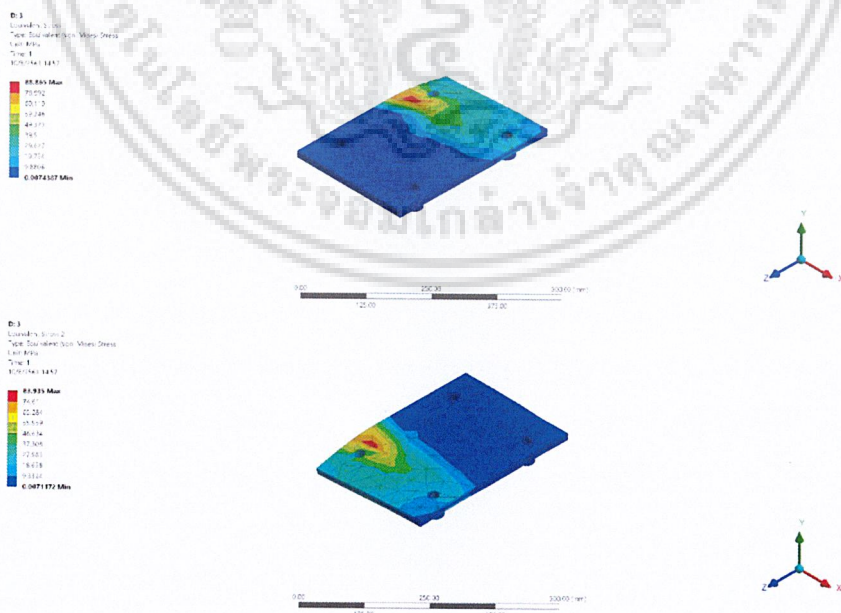
4.5.7 Maximum von-mises stress ของแผ่นโลหะรองยาง

- จุดที่ 2 Maximum von-mises stress มีค่า 62.083 เมกะปาสคาล และ 60.218 เมกะปาสคาล



ภาพที่ 4.86 Maximum von-mises stress ของแผ่นโลหะรองแผ่นยาง จุดที่ 2 บริเวณแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวในใกล้กับรางรถไฟ

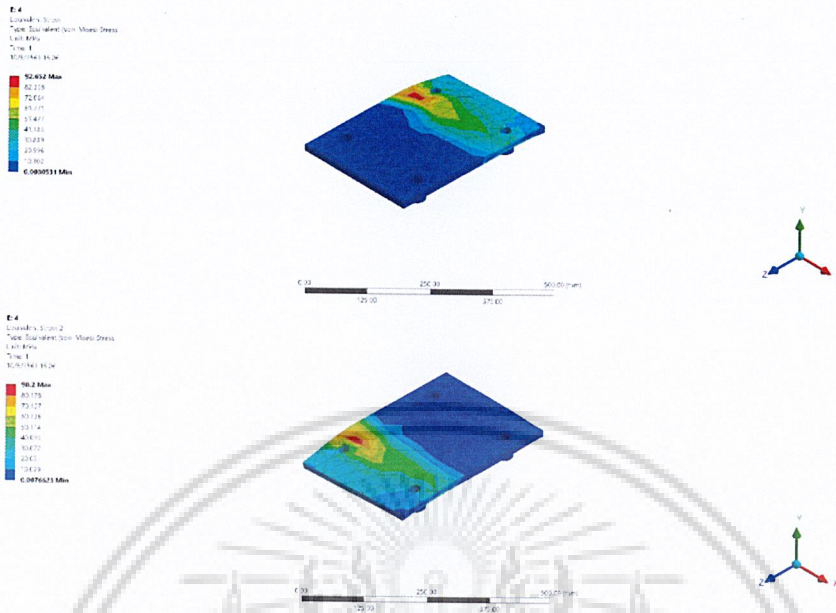
- จุดที่ 3 Maximum von-mises stress มีค่า 88.865 เมกะปาสคาล และ 83.935 เมกะปาสคาล



ภาพที่ 4.87 Maximum von-mises stress ของแผ่นโลหะรองแผ่นยาง จุดที่ 3 บริเวณกึ่งกลางแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน

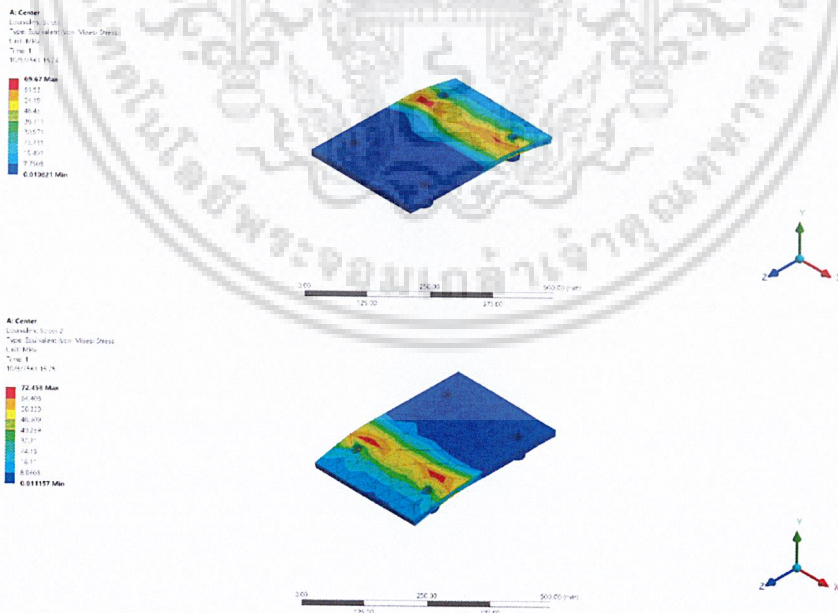
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุดที่ 4 Maximum von-mises stress มีค่า 92.652 เมกะปาสคาล และ 90.20 เมกะปาสคาล



ภาพที่ 4.88 Maximum von-mises stress ของแผ่นโลหะรองแผ่นยาง จุดที่ 4 บริเวณใกล้กับจุดต่อระหว่างแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน

- จุดที่ 5 Maximum von-mises stress มีค่า 69.67 เมกะปาสคาล และ 72.458 เมกะปาสคาล



ภาพที่ 4.89 Maximum von-mises stress ของแผ่นโลหะรองแผ่นยาง จุดที่ 5 บริเวณจุดต่อระหว่างแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ การศึกษาอัตราส่วนระหว่างยางคลอโรพรีนต่อยางธรรมชาติ การศึกษาผลของการเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติในยางผสมสูตรที่มีปริมาณเขม่าดำที่ต่างกัน ที่มีผลต่อสมบัติของแผ่นยางปูทางผ่านเสมอรระดับทางรถไฟ พบว่าสูตรยางที่เหมาะสมและมีสมบัติโดยรวมที่ผ่านมาตรฐานการรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) แสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปสูตรเบื้องต้นในการทำแผ่นยางปูทางผ่านเสมอรระดับทางรถไฟ

องค์ประกอบ	ปริมาณ (phr)
ยางคลอโรพรีน	75
ยางธรรมชาติ	25
ซิงก์ออกไซด์	5
แมกนีเซียมออกไซด์	1
กรดสเตียริก	2
เขม่าดำ	60
น้ำมันแนฟทานิก	5
6 PPD	1
ETU	1
CBS	0.5
กำมะถัน	1

จากตารางที่ 5.1 สรุปสูตรเบื้องต้นในการผลิตเป็นแผ่นยางปูทางผ่านเสมอรระดับทางรถไฟ คือ สูตรที่อัตราส่วนของยางคลอโรพรีน (CR) ต่อยางธรรมชาติ (NR) ที่อัตราส่วน 75/25 ปริมาณเขม่าดำ 60 phr ซึ่งมีสมบัติโดยรวมผ่านมาตรฐานการรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) แสดงดังตารางที่ 4.2 จากการศึกษปัจจัยต่าง ๆ พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนยางธรรมชาติทำให้มีค่าร้อยละ ณ จุดขาดและความต้านทานต่อการฉีกขาดที่ดี และยางคลอโรพรีนนั้นมีสมบัติที่ทนต่อน้ำมัน โอโซน ความร้อน นอกจากนี้ยังมีค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดที่ต่ำ มีค่ามอดุลัสกดอัด และต้านทานการขีดถูที่สูง จึงเหมาะสมในการผลิตเป็นแผ่นยางปูทางผ่านเสมอรระดับทางรถไฟ ซึ่งในการใช้งานจริงแผ่นยางปูทางผ่านเสมอรระดับทางรถไฟต้องเจอกับสภาพอากาศต่าง ๆ รวมทั้งน้ำมันจากยานพาหนะต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สัณฐานไปมาผ่านแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟ และรับแรงกดอัดจากยานพาหนะที่สัณฐานผ่าน การเพิ่มปริมาณเขม่าดำทำให้ค่ามอดูลัสที่ 100% และค่าความแข็งแรงกดมีค่าสูง ซึ่งทำให้ยางมีความแข็ง ไม่สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้ในขณะที่รับแรง จึงทำให้ยางเป็นวัสดุที่เปลี่ยนรูปได้ยาก นอกจากนี้ยังช่วยในเรื่องการเสื่อมสภาพของยางจากความร้อน

ความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์เมื่อทำการเปรียบเทียบมาตรฐานแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟ ที่ได้จากงานวิจัยกับบริษัท HiRAIL [21] ของประเทศอเมริกา ตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 5.2 การเปรียบเทียบมาตรฐานของแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟที่ได้จากงานวิจัยกับผู้ผลิตเชิงพาณิชย์ของบริษัท HiRAIL

การจำแนกสมบัติ	เกณฑ์ที่กำหนดจากผู้ผลิต	ค่าที่ได้จากงานวิจัย	หน่วย
ความแข็งกด	65 ± 5	69.93	Shore A
ความแข็งแรงดึง	> 12	19.72	MPa
ความหนาแน่น	1.18 ± 0.02	1.34	g/cm^3
ความต้านทานต่อการเสียดสีขัดถู	< 150	127.07	mm^3
ความต้านทานการลื่น	> 65	52	BPN
ความต้านทานต่อโอโซน	-	ไม่มีรอยแตก	-
การยุบตัวเนื่องจากแรงกด	< 20	11.63	%
ความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร	1.3×10^7	8.61×10^4	$\Omega \cdot \text{cm}$

จากตารางที่ 5.2 จะเห็นได้ว่าสมบัติโดยรวมที่ได้จากงานวิจัยผ่านมาตรฐานเกณฑ์กำหนดจากบริษัทผู้ผลิตเชิงพาณิชย์ ซึ่งแสดงถึงความเป็นไปได้ที่จะสามารถผลิตแผ่นยางปูทางผ่านเสมอระดับทางรถไฟในเชิงพาณิชย์ที่ได้จากงานวิจัยนี้

ตารางที่ 5.3 ตารางสรุปผลการวิเคราะห์ขนาดการเสียรูปของแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จุดรับแรงกระทำ	การเสียรูปของแผ่นยาง (mm)					การเสียรูปของแผ่นโลหะ (mm)		การเสียรูปของหมอนคอนกรีต (mm)	
	การเสียรูปโดยรวม	การเสียรูปในแกน Y		การเสียรูปในแกน X		การเสียรูปของแผ่นโลหะ (mm)		การเสียรูปของหมอนคอนกรีต (mm)	
		แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2	แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2	แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2	หมอนที่ 1	หมอนที่ 2
จุดที่ 1	27.340	-	-	-	-	-	-	0.00145	0.00158
จุดที่ 2	28.249	28.229	0.189	-	-	0.3769	0.3608	0.00697	0.00627
จุดที่ 3	22.617	22.614	0.300	-	-	0.5313	0.5037	0.00943	0.00959
จุดที่ 4	21.666	19.142	21.654	5.373	2.554	0.5500	0.5374	0.00967	0.00915
จุดที่ 5	19.196	19.185	18.920	4.703	4.979	0.4239	0.4200	0.00739	0.00711

ตารางที่ 5.4 ตารางสรุปค่าความปลอดภัยของแบบจำลอง

จุดรับแรงกระทำ		จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	
Rubber Pad	Equivalent strain	0.190	0.435	0.564	0.516	0.336	
	Safety Factor	27.031	11.827	9.115	9.966	15.291	
Metal Pad	Maximum von-mises stress	แผ่นที่ 1	-	63.08	88.87	92.65	69.67
		แผ่นที่ 2	-	60.22	83.94	90.20	72.46
	Safety Factor	แผ่นที่ 1	-	3.963	2.813	2.698	3.588
		แผ่นที่ 2	-	4.152	2.978	2.772	3.450
Concrete	Principal stress	หมอนที่ 1	0.1190	0.9816	1.6200	1.7986	1.3400
		หมอนที่ 2	0.1211	0.7552	0.9767	1.0995	1.1749
	Safety Factor	หมอนที่ 1	42.031	5.094	3.086	2.780	3.731
		หมอนที่ 2	41.305	6.621	5.119	4.548	4.256

จากตารางที่ 5.3 เมื่อนำผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของการกดแรงกระทำทั้ง 5 จุดมาเปรียบเทียบ พบว่าที่บริเวณ จุดที่ 2 ใกล้กับรางรถไฟเกิดการยุบตัวลงมากที่สุด สาเหตุเพราะบริเวณนี้เป็นบริเวณที่อยู่ห่างจากแผ่นโลหะรองยางมากที่สุด เนื่องจากมีแผ่นโลหะมารองรับได้แผ่นยางไว้ ดังนั้นหากไม่มีแผ่นโลหะ อาจเกิดการยุบตัวหรือแยกตัวของแผ่นยางสองแผ่นมากขึ้น บริเวณจุดที่ 1 แผ่นยางตัวนอกมีการยุบตัวใกล้เคียงกับจุดที่ 2 เนื่องจากยางตัวนอกนั้นมีความยาวที่มากกว่าแผ่นยางตัวใน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้เมื่อรับแรงกดจึงเกิดการยุบตัวมาก การยุบตัวของแผ่นยางที่เกิดขึ้นอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้และสามารถคืนตัวกลับสู่สภาพเดิมได้เมื่อนำแรงกระทำออกไป แผ่นโลหะที่เสียรูปไปนั้นความเค้น (Stress) ที่เกิดขึ้นมีค่าไม่เกินจุดคราก (Yield point) ของวัสดุ กล่าวคือยังสามารถกลับคืนสู่รูปเดิมได้เมื่อนำแรงกระทำออกไป ความเสียหายบริเวณหมอนคอนกรีตนั้นเกิดขึ้นเนื่องจากการกระทบกับแผ่นโลหะที่เสียรูป แต่การเสียรูปที่เกิดเพียงเล็กน้อยประมาณ 0.001 – 0.009 มิลลิเมตรเท่านั้น เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 5.4 ค่าความปลอดภัยที่น้อยที่สุด มีค่า 2.698 อยู่ที่แผ่นโลหะรองยางข้ามจุดตัดทางรถไฟตัวใน กล่าวคือแบบจำลองนี้สามารถรับแรงได้อีก 2.7 เท่าของแรงกระทำ จึงจะเกิดการเสียหายอย่างถาวร

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. บางผลผลิตไม่เป็นตามแผน เนื่องจากเป็นโครงการต่อเนื่อง 2 ปี แต่ได้รับการจัดสรรงบประมาณเฉพาะ ปีที่ 1
2. เพิ่มปริมาณยางธรรมชาติ โดยที่สมบัติผ่านเกณฑ์ที่อ้างอิงถึงมาตรฐาน
3. ศึกษาสารตัวเติมที่ช่วยเสริมแรงชนิดที่ไม่นำไฟฟ้ามาใช้ในการผสมกับยาง เพื่อเพิ่มสภาพต้านไฟฟ้าในแก๊วยาง
4. ทดสอบผสมยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่น โดยที่สมบัติผ่านเกณฑ์ที่อ้างอิงถึงมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6 สรุปผลผลิตงานวิจัย

ผลงาน	จำนวนที่คาดว่าจะได้	จำนวนที่ได้จริง	หมายเหตุ
1. ข้อมูลการวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Finite element) สำหรับวัสดุทางผ่านรถไฟที่ทำจากยางพารา และแผ่นคอนกรีต	4 ชุดข้อมูล	4 ชุดข้อมูล	-
2. สูตรยาง (Rubber formula) ที่มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟ	2 สูตร	2 สูตร	-
3. แม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูปยางผสมสูตรเป็นชิ้นงานแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟ	3 ชุด	3 ชุด	-
4. เผยแพร่บทความวิชาการ	2 ฉบับ	2 ฉบับ	-
5. เผยแพร่องค์ความรู้	1 ครั้ง	1 ครั้ง	-
6. จัดการประชุมเจ้าหน้าที่จากหน่วยงานการรถไฟแห่งประเทศไทย	1 ครั้ง	1 ครั้ง	-
7. ผลิตภัณฑ์ที่มีการออกแบบร่วมกับการคำนวณทางวิศวกรรม โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Finite Element ที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟ	3 ชุด	1 ชุด	ไม่เป็นไปตามแผนเนื่องจากเป็นโครงการต่อเนื่อง 2 ปี แต่ได้รับการจัดสรรงบประมาณเฉพาะปีที่ 1
8. ชิ้นงานแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟที่ผลิตจากยางพารา	3 ชุด	1 ชุด	
9. ข้อมูลการทดสอบการใช้งานจริงของแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟที่ผลิตจากยางพาราเปรียบเทียบกับแผ่นคอนกรีตเชิงพาณิชย์ที่ใช้ในปัจจุบัน	12 เดือน	-	
10. นวัตกรรมแผ่นยางข้ามจุดตัดทางรถไฟที่ผลิตจากยางพารา	1 อนุสิทธิบัตร	อยู่ในระหว่างยื่นคำขอ	คาดว่าจะได้ประมาณ ธ.ค. 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 6.1 ตัวอย่างแม่พิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 6.2 ตัวอย่างชิ้นงานยางรองรางรถไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] เกษตรก้าวไกล. 2560. นายกฯ แจง “6 แนวทางแก้ปัญหาที่ยั่งยืน”. [Online]. Available : <https://www.kasetkaoklai.com/home/2017/11/6-แนวทางแก้ปัญหาที่ยั่งยืน/>.
- [2] บริษัท วัชรพล จำกัด. 2560. 3 มาตรการช่วยราคายางสดดุดตอ. [Online]. Available : <https://www.thairath.co.th/content/1151493>.
- [3] การรถไฟแห่งประเทศไทย. 2560. ประวัติการรถไฟแห่งประเทศไทย. [Online]. Available : <http://www.railway.co.th/main/profile/history.html>.
- [4] บริษัท เอสซีจี โลจิสติกส์ แมเนจเม้นท์ จำกัด. 2559. การขนส่งทางรถไฟและแผนพัฒนาของไทยในอนาคต. [Online]. Available : <https://www.scglogistics.co.th/blog/detail/87>
- [5] บริษัท ไทยทองเอ็นจิเนียริ่ง จำกัด. 2558. ยุทธศาสตร์คมนาคม รถไฟทางคู่. [Online]. Available : http://www.thaitong.co.th/news_detail.php?id=4.
- [6] สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร (สนข.). 2560. การศึกษาความเหมาะสมและการออกแบบเบื้องต้นระบบรถไฟรางคู่เพื่อการขนส่ง และจัดการโลจิสติกส์ (ระยะที่ 1). [Online]. Available : http://58.181.223.131/mech_cen/MEC/data/14072010.pdf.
- [7] Illinois.gov. 2017. Grade Crossing Search. [Online]. Available : <https://www.icc.illinois.gov/railroad/crossing.aspx?dotId=299038A>.
- [8] James R. Loumiet & Associates, Inc. 2011. Highway-Rail Grade Crossings and Grade Crossing Expert. [Online]. Available : <http://www.jrla.net/Crossings.html>.
- [9] อิทธิพล แจ่มชัด. 2559. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [10] Matador rubber. 2015. “Rubber Chemistry.” [Online]. Available : http://laroverket.com/wp-content/uploads/2015/03/rubber_chemistry.pdf
- [11] สุวดี ก้องพารากุล. 2556. เทคโนโลยีการดัดแปรยางธรรมชาติและการ. [Online]. Available : http://scijournal.kku.ac.th/files/Vol_41_No_3_P_567-581.pdf
- [12] Chemical Retrieval on the Web (CROW). 2015. CR – POLYCHLOROPRENE (NEOPRENE). [Online]. Available : <http://polymerdatabase.com/Elastomers/Chloroprene.html>
- [13] Nanorubberchem. 2557. โครงสร้างเขม่าดำ. [Online]. Available : <http://www.nanorubberchem.com/page/2/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] พงษ์ธร แซ่อู๋. 2558. กระบวนการผลิตยาง. [Online]. Available : <http://www.rubbercenter.org/files/process.pdf>.
- [15] คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ KMUTT. 2550. **Mooney Viscometer**. [Online]. Available : <https://www.kmutt.ac.th/pprof/Teaching%20documents/MTT%20651/Mooney%20viscometer.pdf>
- [16] Illinois Tool Works Inc. 2550. **ASTM D575-91 วิธีทดสอบ A ของสมบัติทางด้านแรงอัดของยาง**. [Online]. Available : <http://www.instron.co.th/th-th/testing-solutions/by-test-type/compression/astm-d575-91>
- [17] Dongguan Liyi Environmental Technology Co., Ltd. 2014. **Elastic Material Plastic Testing Equipment DIN Abrasion Resistance Test Machine**. [Online]. Available : <http://www.liyi-tech.com/sale-5446841-elastic-material-plastic-testing-equipment-din-abrasion-resistance-test-machine.html>
- [18] Munro Instruments. 2017. **British Pendulum Test**. [Online]. Available : <http://munroinstruments.com/product-category/skid-resistance-occupational-health/intelligent-pendulum/>
- [19] Intertek Plastics Technology Laboratories. 2007. **Surface Resistivity Volume Resistivity**. [Online]. Available : http://www.ptli.com/testlopedia/tests/surface-volume_res-d257.asp
- [20] สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาระบบการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2560. **Electron microscope กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน**. [Online]. Available : <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>
- [21] Hirail Corporation. 2017. **HiRAIL Rubber Grade Crossing**. [Online]. Available : <http://hirail.com/hirail-rubber-grade-crossing/>
- [22] Strail. 2010. **Level crossing system for biggest demands**. [Online]. Available : http://www.strail.de/uploads/tx_agndownloads/1_2010_04_STRAIL_Seitenanordnung_01.pdf.
- [23] Trelleborg. 2016. **Rail Level Crossings**. [Online]. Available : https://www.trelleborg.com/engineered-products/~/_media/engineered-products/tepa/tepa--rubber--rail--crossing--product--brochure.pdf.
- [24] Rosehill Rail. 2015. **Rosehill Level Crossing Systems Technical Specifications**. [Online]. Available : http://www.rosehillpolymers.com/files/2614/3654/7909/Rosehill_Crossings_Technical_Document_ISSUE_01.pdf.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [25] Miguel Sol-Sánchez, Fernando Moreno-Navarro and M Carmen Rubio-Gámez. 2015. "The use of elastic elements in railway tracks: A state of the art review." *Construction and Building Materials*. 75 : 293–305.
- [26] Buddhima Indraratna, Qideng Sun and Jim Grant. 2017. "Behaviour of subballast reinforced with used tyre and potential application in rail tracks." *Transportation Geotechnics*. 12 : 26-36.
- [27] Wahid Ferdous, Allan Manalo, Gerard Van Erp, Thiru Aravinthan, Sakdirat Kaewunruen and Alex Remennikov. 2015. "Composite railway sleepers – Recent developments, challenges and future prospects." *Composite Structures*. 134 : 158-168.
- [28] M. Sol-Sánchez, N.H. Thom, F. Moreno-Navarro, M.C. Rubio-Gámez and G.D. Airey. 2015. "A study into the use of crumb rubber in railway ballast." *Construction and Building Materials*. 75 : 19-24.
- [29] Yoshitsugu Momoya and Kazuki Ito. 2016. "Deformation Characteristics of Track Structures for Level Crossings Subjected to Heavy Forklift Load." *Procedia Engineering*. 143 : 1085–1092.
- [30] กวิน สุวรรณกุล. 2548. "การพัฒนาแผ่นยางรองรางรถไฟจากยางคลอโรพรีนผสม." วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [31] เบญจพร หนูคล้าย. 2551. "วัสดุผสมสามองค์ประกอบทำจากยางธรรมชาติและสารตัวเติม นาโน เป็นตัวตรวจรู้ทางอิเล็กทรอนิกส์." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [32] รัฐพงษ์ หนูหมาด. 2552. "การศึกษาพันธะเชื่อมโยงและการเสื่อมสภาพของฟิล์มยางโดยเทคนิค การวัดการดูดกลืนรังสีเอกซ์." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [33] กระทรวงอุตสาหกรรม. 2558. กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแผ่นยางรองรางรถไฟ. ประเทศไทย. มอก. 2667 - 2558.
- [34] กระทรวงอุตสาหกรรม. 2559. กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยางชะลอความเร็ว. ประเทศไทย. มอก. 2726 - 2559.
- [35] กระทรวงอุตสาหกรรม. 2559. กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแผ่นปูสนามฟุตบอล. ประเทศไทย. มอก. 2739 - 2559.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [36] American Society for Testing and Materials (ASTM). 2015. **Standard Test Methods for Rubber-Viscosity, Stress Relaxation, and Pre-Vulcanization Characteristics (Mooney Viscometer)**. Philadelphia. D1646-15.
- [37] American Society for Testing and Materials (ASTM). 2017. **Standard Test Method for Rubber Property-Vulcanization Using Rotorless Cure Meters**. Philadelphia. D5289-17.
- [38] American Society for Testing and Materials (ASTM). 2015. **Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness**. Philadelphia. D2240-15.
- [39] American Society for Testing and Materials (ASTM). 2016. **Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers-Tension**. Philadelphia. D412-16.
- [40] ResearchGate GmbH. 2015. **Testing dumbbell shape (a) ASTM D-412 type C and (b) hybrid GFRP**. [Online]. Available : https://www.researchgate.net/figure/283955082_Testing-dumbbell-shape-a-ASTM-D-412-type-C-and-b-hybrid-GFRP.
- [41] International Organization for Standardization (ISO). 2017. **Rubber, vulcanized or thermoplastic-Determination of compression stress-strain properties**. Switzerland. ISO 7743.
- [42] American Society for Testing and Materials (ASTM). 2012. **Standard Test Method for Tear Strength of Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers**. Philadelphia. D624-00 (Reapproved 2012).
- [43] DUMBBELL CO., LTD. 2014. **Super Dumbbell Cutters Available [Extracted] List of Corresponding Standards**. [Online]. Available : http://www.dumbbell.co.jp/english/super_dumbbell01
- [44] International Organization for Standardization (ISO). 2011. **Rubber, vulcanized or thermoplastic-Accelerated ageing and heat resistance tests**. Switzerland. ISO 188.
- [45] American Society for Testing and Materials (ASTM). 2016. **Standard Test Methods for Rubber Property-Compression Set**. Philadelphia. D395-16.
- [46] International Organization for Standardization (ISO). 2013. **Rubber, vulcanized or thermoplastic-Determination of tension set under constant elongation, and of tension set, elongation and creep under constant tensile load**. Switzerland. ISO 2285.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [47] International Organization for Standardization (ISO). 2017. Rubber, vulcanized or thermoplastic-Determination of abrasion resistance using a rotating cylindrical drum device. Switzerland. ISO 4649.
- [48] European Standard (EN). 2011. Road and airfield surface characteristics - Test methods - Part 4: Method for measurement of slip/skid resistance of a surface: The pendulum test. Belgium. EN 13036-4.
- [49] Civil Engineers PK. 2018. Exp 5 Skid Resistance. [Online]. Available : <https://civilengineerspk.com/transportation-engineering-experiments/exp-5-skid-resistance/>
- [50] กระทรวงอุตสาหกรรม. 2558. กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมพื้นสังเคราะห์. ประเทศไทย. มอก. 2683 - 2558.
- [51] International Organization for Standardization (ISO). 2012. Rubber, vulcanized or thermoplastic-Resistance to ozone cracking-Part 1: Static and dynamic strain testing. Switzerland. ISO 1431-1.
- [52] International Organization for Standardization (ISO). 2015. Rubber, vulcanized or thermoplastic-Determination of the effect of liquids. Switzerland. ISO 1817.
- [53] International Organization for Standardization (ISO). 2011. Rubber, vulcanized or Thermoplastic-Determination of volume and/or surface resistivity. Switzerland. ISO 14309.
- [54] UL International Thermoplastics Testing Center (UL TTC). 2011. VOLUME RESISTIVITY. [Online]. Available : <https://www.ul TTC.com/en/solutions/test-methods/electrical/volume-resistivity.html>
- [55] DealMarkaz.pk. 2018. Safe and Efficient Railway Rubber Crossing Plate. [Online]. Available : <https://dealmarkaz.pk/business-industrialagriculture/constructionmaterial/safe-and-efficient-railway-rubber-crossing-plate-i39413>
- [56] สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง. 2560. ความเสียหายของผิวทางหรือความต้านทานการลื่นไถลของผิวทาง. [Online]. Available : <http://www.doh.go.th/doh/th/details/standard3.html>

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การทดสอบความต้านการลื่น

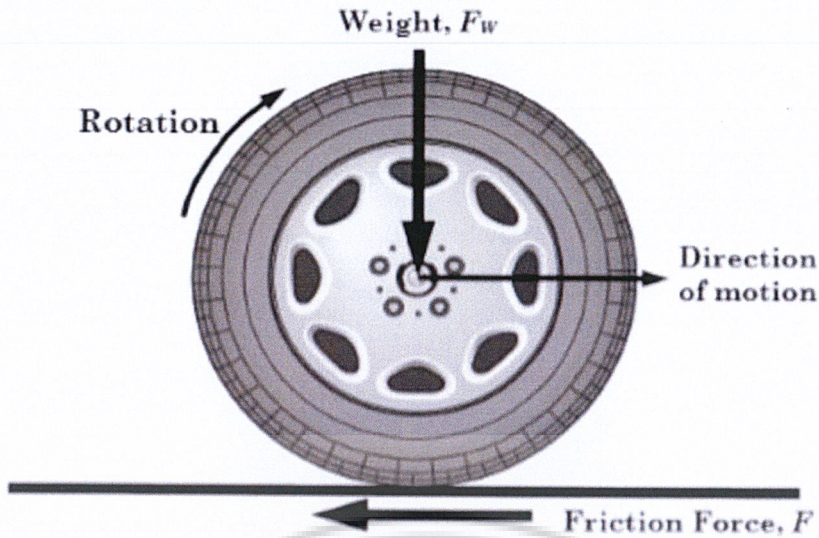
ค่าความเสียดทาน คือ แรงต้านทานบริเวณผิวสัมผัสระหว่างล้อและผิวทาง หรือแรงต้านไม่ให้ล้อลื่นไถลไปตามพื้นผิวของถนน โดยเลือกสูตรยางที่มีสมบัติโดยรวมผ่านมาตรฐานการรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) ได้แก่ ยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 75/25 ปริมาณเขม่าดำ 50 – 60 phr และยางผสม CR/NR ที่อัตราส่วน 50/50 ปริมาณเขม่าดำ 60 phr ทดสอบโดยใช้ British Pendulum Tester (BPT) ตามมาตรฐาน EN 13036-4 ทำงานโดยการปล่อยลูกตุ้มจากความสูงของเครื่องทดสอบ เมื่อลูกตุ้มสัมผัสกับผิวทดสอบจะทำให้สูญเสียพลังงาน ทำให้ลูกตุ้มมีความสูงลดต่ำลง จะทำให้สามารถหาค่าความเสียดทานได้ ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบค่าแรงเสียดทาน

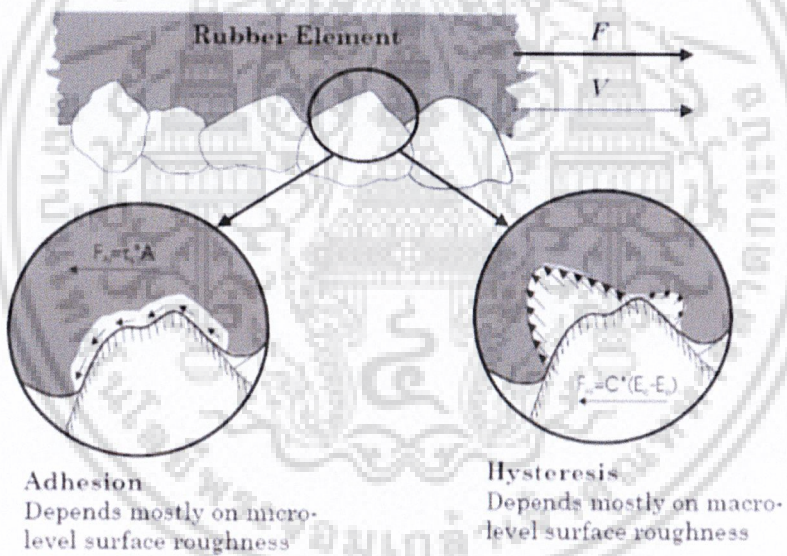
สูตรยาง	ค่าแรงเสียดทาน	
	สถานะแห้ง	สถานะเปียก
CR75/NR25 เขม่าดำ 60 phr	52	14
CR50/NR50 เขม่าดำ 60 phr	59	14
CR75/NR25 เขม่าดำ 50 phr	67	15

จากตารางที่ ก.1 พบว่าค่าเมื่อเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติ ทำให้ค่าแรงเสียดทานเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นผิวของยางแต่ละชนิดมีความผิดไม่เท่ากัน มีความขรุขระของพื้นผิวที่ไม่เท่ากัน ซึ่งยางธรรมชาติมีสายโซ่โมเลกุลที่ยาวกว่ายางคลอโรพรีน เมื่อทำการทดสอบความต้านการลื่น โดยใช้ยางมาตรฐานในการอยู่กับชิ้นงานทดสอบ เพื่อวัดค่าแรงเสียดทาน ยางธรรมชาติสามารถเคลื่อนตัวได้ดีกว่า ส่งผลให้มีค่าแรงเสียดทานมากกว่า และการลดปริมาณเขม่าดำทำให้ค่าแรงเสียดทานเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณเขม่าดำที่น้อยทำให้มีปริมาณเนื้อยางมาก เมื่อทำการทดสอบยางจะเกิดการยึดติดกับยางมาตรฐานที่ใช้ในการอยู่กับชิ้นงานได้ดีกว่า ทำให้มีค่าแรงเสียดทานมาก โดยมีแรง Adhesion เป็นแรงเสียดทานที่เกิดจากการเชื่อมหรือหน่วงจากวัสดุขนาดเล็กกับยางยานพาหนะ โดยค่าของแรง Adhesion จะแปรผันตรงกับแรงเฉือนและขนาดพื้นที่ที่สัมผัส ซึ่งส่วนใหญ่จะขึ้นกับลักษณะ พื้นผิวละเอียด (Micro-Texture) และแรง Hysteresis เป็นองค์ประกอบหลักของแรงเสียดทาน ซึ่งเกิดจากการสูญเสียพลังงาน เนื่องจากการเปลี่ยนรูปร่างของยางเมื่อยางบีบอัดกับพื้นผิวทางการกระจายความเครียดทำให้เกิดการเปลี่ยนรูป ซึ่งพลังงานนี้จะถูกเก็บไว้ภายในยาง พลังงานส่วนหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นแรงเสียดทานเพื่อช่วยหยุดการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ในขณะที่ส่วนอื่นๆ จะสูญเสียไปในรูปแบบของความร้อน ซึ่งแรง Hysteresis จะขึ้นกับลักษณะพื้นผิวหยาบ (Macro-Texture)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

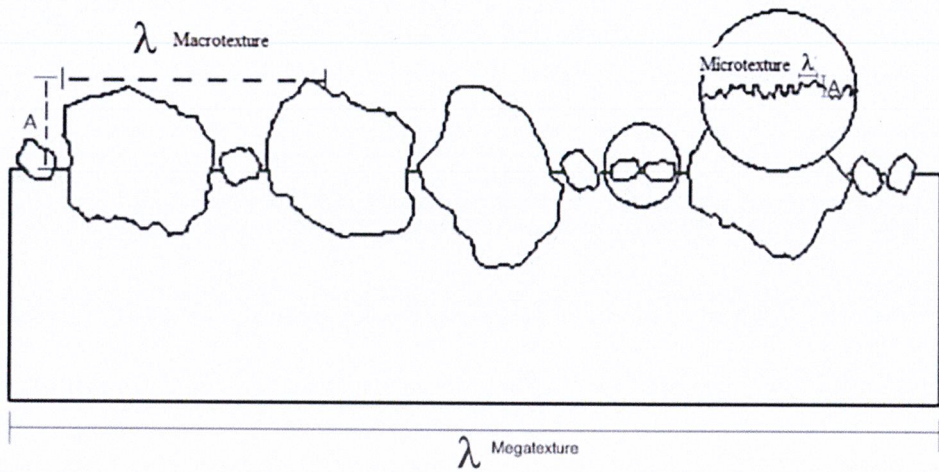


ภาพที่ ก.1 การเกิดแรงเสียดทานระหว่างล้อยางกับผิวทาง [56]



ภาพที่ ก.2 องค์ประกอบของแรงที่ส่งผลต่อค่าความเสียดทาน [56]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ก.3 ลักษณะพื้นผิวที่ส่งผลต่อค่าความเสียดทาน [56]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย

งบบุคลากร :

ค่าจ้างผู้ช่วยวิจัย	335,600.00 บาท
---------------------	----------------

งบดำเนินการ :

ค่าใช้สอย	703,733.08 บาท
-----------	----------------

ค่าวัสดุ	1,200,976.02 บาท
----------	------------------

งบลงทุน :

ค่าแม่พิมพ์ External	984,400.00 บาท
----------------------	----------------

ค่าแม่พิมพ์ Internal	834,600.00 บาท
----------------------	----------------

รวม	4,059,309.10 บาท
-----	------------------



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-นามสกุล รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด (Assoc.Prof.Dr.Ittipol Jangchud)
 วันเดือนปีเกิด 11 มิถุนายน 2510
 สัญชาติ ไทย เชื้อชาติ ไทย ศาสนา พุทธ เพศ ชาย
 ที่อยู่ปัจจุบัน 186/307 หมู่ 10 ซอยรามคำแหง 190/1 (หมู่บ้านพาร์คเวย์ชา
 เลย์) ถนนรามคำแหง เขตมีนบุรี กรุงเทพฯ 10510
 โทรศัพท์ 02-3298000 ต่อ 6230 มือถือ 081-3493585
 โทรสาร 02-3298428
 E-mail ittipol@live.com, ittipol.ja@kmitl.ac.th
 Homepage <http://www.kmitl.ac.th/~kjittipo/index.htm>



ประวัติการศึกษา

	คุณวุฒิ	ปี พ.ศ. ที่จบ	ชื่อสถานศึกษาและประเทศ
ปริญญาตรี	วท.บ. (เคมีอุตสาหกรรม-เกียรตินิยม)	2531	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปริญญาโท	M.S. (Polymer Science)	2534	The University of Akron, USA
ปริญญาเอก	Ph.D. (Polymer Science)	2539	The University of Akron, USA

ประวัติการทำงาน

2539 – ปัจจุบัน อาจารย์ประจำ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า
 คุณทหารลาดกระบัง (สจล.)

ตำแหน่งปัจจุบัน

- ตำแหน่งทางวิชาการ รองศาสตราจารย์ระดับ 9
- ตำแหน่งบริหาร คณบดี คณะวิทยาศาสตร์ สจล. (ตุลาคม 2560 - ปัจจุบัน)

รางวัล/ผลงานดีเด่น

- เมธีส่งเสริมนวัตกรรม (Innovation Ambassador) 2552 โดยสำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ
(สนช.)
- เมธีส่งเสริมนวัตกรรม (Innovation Ambassador) 2549 โดยสำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ
(สนช.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โล่เชิดชูเกียรติ ผู้สร้างชื่อเสียงให้กับสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) 2549
- โล่เชิดชูเกียรติ ผู้สร้างชื่อเสียงให้กับคณะวิทยาศาสตร์ สจล. 2550
- ประกาศนียบัตร “Best iTAP Partnership Award” โดยสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) 2550

ประสบการณ์การทำงาน

- 2559 – 2560 รองอธิการบดี ฝ่ายวิจัยและนวัตกรรม สจล.
- 2560 – ปัจจุบัน อุปนายก สมาคมศิษย์เก่าคณะวิทยาศาสตร์ สจล.
- 2557 – 2559 หัวหน้าภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สจล.
- 2550 – 2552 รักษาการผู้อำนวยการศูนย์ศึกษานานาชาติ คณะวิทยาศาสตร์ สจล.
- 2537 – 2551 หัวหน้าสาขาพอลิเมอร์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สจล.
- 2549 – 2559 นายกสมาคมศิษย์เก่าคณะวิทยาศาสตร์ สจล.
- 2548 – ปัจจุบัน คณะกรรมการบริหาร - สมาคมโพลีเมอร์แห่งประเทศไทย
- 2546 – ปัจจุบัน กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ, Rubber Research and Technology Unit, MTEC
- 2539 – 2559 กรรมการบริหารสมาคมศิษย์เก่าสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 2546 – 2549 กรรมการบริหาร สมาคมเคมีแห่งประเทศไทย (Chemistry Society of Thailand)
- 2542 รักษาการหัวหน้าภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สจล.
- 2539 – 2544 รองคณบดีฝ่ายบัณฑิตศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ สจล.
- 2547 – 2551 รองคณบดีฝ่ายวิชาการ บัณฑิตวิทยาลัย สจล.

ประวัติการรับทุน

- 2532 – 2534 ทุน STDB (Science and Technology Development Board) ศึกษาระดับปริญญาโท – วท.ม. วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
- 2534 – 2539 ทุนรัฐบาลไทย กพ. (กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี) ศึกษาระดับ M.S.-Ph.D. สาขา Polymer Science (Polymer Composites) ณ The University of Akron, Ohio, USA
- 2535 – 2539 ทุนผู้ช่วยวิจัย (Research Assistantship) Department of Polymer Science, The University of Akron, USA
- 2538 Visiting Scientist, Max-Planck-Institut for Polymerforschung, Mainz, Germany

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัย

- พลาสติกชนิดย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมแป้งดัดแปร (Biodegradable plastics made from blends of modified starch)
- ท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์ (Porous pipe made from polymers and ground rubber tire (GRT))
- ไม้เทียม WPC -ไม้คอมโพสิตเส้นใยธรรมชาติ (Artificial wood from natural fiber composites)
- ไม้เทียมคอนกรีต (Wood-cement board (WCB) from natural fibers)
- ยางมะตอยชนิดปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์ (Polymer modified asphalt (PMA) - Modification of anionic asphalt emulsion by NR and SBR)
- ยางทำความสะอาดแม่พิมพ์สำหรับอุตสาหกรรมยาง (Rubber cleaning compounds for industrial applications)
- เส้นใยพอลิเมอร์ขนาดนาโนจากเทคนิคปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต (Electro-spinning polymer nanofibers)

ผลงานวิจัย (บางส่วน)

1. Santi Tungprapa, **Ittipol Jangchud**, and Pitt Supaphol, "Release Characteristics of Four Model Drugs from Drug-Loaded Electrospun Cellulose Acetate Fiber Mats" Polymer, **48** (2007) 5030-5041 (JIF = 2.773)
2. **Ittipol Jangchud**, Wonravee Loaha-o-domchok and Krisri Duangpatra, "Modification of Anionic Asphalt Emulsion by NR/SBR Latex", Proceedings of The 1st Thailand-Japan Rubber Symposium, August 20-24, 2007, Chonburi, Thailand
3. Santi Tungprapa, Tanarinthorn Puangparn, Monchawan Weerasombut, **Ittipol Jangchud**, Porntiva Fakum, Somsak Semongkhon, Chidchanok Meechaisue, and Pitt Supaphol, "Electrospun Cellulose Acetate Fibers: Effect of Solvent System on Morphology and Fiber Diameters," Cellulose, **14** (2007) 563-575 (JIF = 1.539)
4. Watadta Ritcharoen, Yaowaporn Thaiying, Yupa Saejeng, **Ittipol Jangchud**, Ratthapol Rangkupan, Chidchanok Meechaisue, Pitt Supaphol, "Electrospun dextran fibrous membranes", Cellulose **15** (2008) 435-444
5. Atcharaporn Rattanamane, **Ittipol Jangchud**, and Pichai Chuakewong, "Biodegradable Plastic Film from Blends of Ecoflex® and Modified Starch for Agricultural Applications", ", Proceedings of the 5th Thailand Materials and Technology Conference (MSAT-5), September 16-19, 2008, Bangkok, Thailand
6. **Ittipol Jangchud** and Doungporn Claypatch, "Biodegradable Plastic Films made from Blends of Polybutylene Succinate (PBS) and Modified Tapioca Starches", Proceeding of 7th International

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Symposium on Advanced Materials in Asia-Pacific and JAIST International Symposium on Nano Technology 2010, September 30- October 1, 2010, Ishikawa, Japan,

7. อธิพิพล แจ้จั้ง, สุกัญญา โคตรมา, นุชนาฏ ณ ระนอง “การประยุกต์ใช้ยางธรรมชาติที่คงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์ในอุตสาหกรรมยาง”, ยางพารา พค. 2553
8. กนกอร แสงสุวรรณ, วรธรรม อุ่นจิตติชัย, อธิพิพล แจ้จั้ง “การปรับปรุงสมบัติไม้พลาสติกคอมโพสิตที่เตรียมจากพอลิพรอพิลีนผสมเส้นใยมะพร้าว” การประชุมทางวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 11 มหาวิทยาลัยขอนแก่น วันที่ 12 กุมภาพันธ์ พค.2553
9. ขวัญใจ พูลสวัสดิ์, อธิพิพล แจ้จั้ง, ชลลดา ฤตวิรุฬห์, ปราณี ภิญโญชีพ, “อิทธิพลของความหนืดที่มีต่อสมบัติของยางธรรมชาติชนิดเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากยางธรรมชาติและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ” การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36 (วทท 36) ศูนย์นครสวรรค์และการประชุมไบเทค กรุงเทพฯ วันที่ 26-28 ตุลาคม พค.2553
10. กมลวรรณ ยงค์มัลย์วงศ์ และอธิพิพล แจ้จั้ง, “การปรับปรุงสมบัติการต้านการขัดถูของยางธรรมชาติด้วยการผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น: ผลของสารช่วยผสม”, การประชุมวิชาการครั้งที่ 9 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, 6-7 ธันวาคม พค.2555
11. อุไร จันทรหนองสรวง และอธิพิพล แจ้จั้ง “การศึกษาฟิล์มพลาสติกชีวภาพพีบีเอสผสมแป้งดัดแปรที่เตรียมจากเทคนิคอัดรีตด้วยสลิคตา”, การประชุมวิชาการครั้งที่ 9 มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, 6-7 ธันวาคม พค.2555
12. เดชาธร ฉันทักษ์ และ อธิพิพล แจ้จั้ง, “การศึกษาเก้าแกลบดำ เพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในยางไนไตรล์”, การประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาศาสตร์วิจัย ครั้งที่ 6, วันที่ 20-21 มีนาคม 2557 มหาวิทยาลัยบูรพา, ชลบุรี, หน้า 55-62
13. นิติวุฒิ บุญหนุน, วรธรรม อุ่นจิตติชัย และ อธิพิพล แจ้จั้ง, “การศึกษาคอมโพสิตชีวภาพชนิดย่อยสลายได้จากพอลิบิวทิลีนซกซ์อินเตผสมเส้นใยทะเลลายปาล์มเปล่า” การประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาศาสตร์วิจัย ครั้งที่ 6, วันที่ 20-21 มีนาคม 2557 มหาวิทยาลัยบูรพา, ชลบุรี, หน้า 63-69
14. Watthana Klairutsamee, Pimsiraya Vichaidit, Sunisa Mongconkaew, Apinya Tientumachart, Pitt Supaphol and Ittipol Jangchud, "Preparation of Multilayers Poly (Lactic Acid) and Poly (Butylene Succinate) as Non-Woven Mat by Electrospinning Technique", IUPAC World Polymer Congress (MACRO 2014) Proceeding., July 6–11, 2014, Chiang Mai, Thailand, pp.101-103
15. Watthana Klairutsamee, Pitt Supaphol, **Ittipol Jangchud**, "Improved Morphology of Ultrafine Electrospun Poly (Butylene Succinate) Fibers by Using Alkyl Ammonium Ethyl Sulfate", IUPAC World Polymer Congress (MACRO 2014) Proceeding., July 6–11, 2014, Chiang Mai, Thailand, pp.107-109
16. Sudaporn Saksasitorn and **Ittipol Jangchud**. “Study of Vegetable Tanned Leather Flour as Bio-fillers for NR : Effects of Wax Treatment” PACCON 2015 Proceedings. Amari Watergate Hotel Bangkok, Thailand, January 21 – 23, 2015, pp.420-423
17. Pattareeya Uasawangporn and **Ittipol Jangchud**. "Study of Vegetable Oils as Bioadditives for Natural Rubber". PETROMAT and PPC SYM 2015 proceedings. Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, April 21, 2015, pp.531-537

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18. Watthana Klairutsamee, Pitt Supaphol, **Ittipol Jangchud**, “Electrospinnability of poly(butylene succinate): Effects of solvents and organic salt on the fiber size and morphology”, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol 132, Issue 43, pp.12628-12639 (Impact factor 1.64)
19. Supunnapang Raksawong and **Ittipol Jangchud**, “New Bioadditives from Modified Cashew Nut Shell Liquid (CNSL) for Natural Rubber”, The proceeding of The International Polymer Conference of Thailand (PCT-6), June 30-July 1, Bangkok, Thailand, pp. 283-287, 2016.
20. Suthida Chamcheun, Banjong Boonchom and **Ittipol Jangchud**, “Study of Novel Flame Retardant from Mussel Shell Waste for Wood Plastic Composites (WPCs)”, The proceeding of The International Polymer Conference of Thailand (PCT-6), June 30-July 1, Bangkok, Thailand, pp. 288—293, 2016.
21. Nattchunya Damrongwongsawang and **Ittipol Jangchud**, “Comparative study of bio-plasticizers and conventional plasticizers affecting PVC properties” The proceeding of The International Polymer Conference of Thailand (PCT-6), June 30-July 1, Bangkok, Thailand, pp. 332-336, 2016.
22. Pattawee Pinitkul, Boonharn Ou-udomying, and **Ittipol Jangchud**, “Study of Porous Pipes made from GRT/NR/ Reclaimed Rubber Reinforced with Waste Tire Fibers for Agricultural Applications”, The proceeding of The International Polymer Conference of Thailand (PCT-8), June 14-15, 2018, Bangkok, Thailand, pp. 192-196, 2018.

Updated กรกฎาคม 2561