



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “ผล gel content ของยางธรรมชาติต่อพฤติกรรมการแปร
รูปและสมบัติทางกายภาพของยางคงรูป”

Effect of gel content of natural rubber on processing
behaviors and physical properties of vulcanized rubber

โดย รศ. ดร.จิตต์ลัดดา ตักดาภิพาณิชย์

เมษายน พ.ศ.2555

สัญญาเลขที่ RDG5350021

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “ผล gel content ของยางธรรมชาติต่อพฤติกรรมการแปร
รูปและสมบัติทางกายภาพของยางคงรูป”

Effect of gel content of natural rubber on processing
behaviors and physical properties of vulcanized rubber

ผู้วิจัย รศ. ดร.จิตต์ลัดดา ศักดาภิพาณิชย์

สังกัด ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยมหิดล ถนนพระราม 6

แขวงทุ่งพญาไท กรุงเทพฯ ๑๐๔๐๐

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยฯ ขอกราบขอบพระคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยตามสัญญาโครงการเลขที่ **RDG5350021** รวมทั้งคณะกรรมการและผู้ทรงคุณวุฒิที่ได้คัดเลือกให้ได้รับทุนพัฒนานักวิจัยประจำปี 2553 นี้ และสุดท้ายขอขอบคุณ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล และสถาบันวิจัยชีววิทยาศาสตร์โมเลกุล มหาวิทยาลัยมหิดล ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำการวิจัย และทุกท่านที่มีส่วนร่วมในความสำเร็จของโครงการวิจัยนี้

คณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

รศ.ดร.จิตต์ลัดดา ศักดาภิพาณิชย์

หัวหน้าโครงการวิจัย

Abstract

The present work attempts to develop suitable methodology for determination gel content of natural rubber (NR) from *H. brasiliensis* tree and preparation rubber sample at various amounts of gel content in order to investigate effect of gel content on processability and physical properties besides the values indicated in the standard rubber. Moreover, effect of gel content on properties of vulcanizates was also studied in this work i.e. 1. static stress and strain properties such as hardness, tensile and tear tests 2. dynamic stress and strain properties such as rebound resilience, friction and wear, abrasion, fatigue, and resistance to ageing and weathering.

The results observed from the experiment showed that the development of methodology for determination gel content with rapidity and high accuracy was carried out by using the concentration and temperature at 0.1% w/v, 50°C for dissolving the rubber in the presence of shaking at 2 and 5h, followed by centrifugation at 8,000 rpm for 30 min. It was proved that the concentration, temperature, and time of dissolving affecting on the gel content.

Furthermore, gel content of STR 5L increased with increasing time of accelerated storage hardening. The gel contents were 2.43, 2.83, 3.57, 6.76, and 12.42% at 0, 6, 12, 24, and 48h, respectively. It was found that the gel content at 0 and 6 h were not much different. The P_0 and Mooney viscosity of rubber increased with increasing gel content. This may be due to the fact that the rubber molecules are difficult to relocate because of the interaction between rubber molecules. The gel content at 2.43, 2.83, 3.57, and 6.76% showed the same physical properties for unblended as well as blended with SBR rubber excepted for the properties of rubber which was incubated at 48h of accelerated storage hardening atmosphere. Some physical properties such as tensile strength, elongation at break, and tear strength were dropped. This suggested that some networks were broken down by thermal from the long time of incubation and the gel interrupt distribution of rubber chemical and filler which influence on inhomogeneties of networks leading to the deterioration of properties. However, the gel content plays a role on properties of unvulcanized rubber and vulcanized rubber at high gel content only, especially 12.4% of gel content and effect of gel content on the properties of unblended and blended with SBR rubber showed the same tendency.

Keywords: natural rubber, gel content, physical properties

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการหาวิธีการที่เหมาะสมในการวัดค่าเจลของตัวอย่างยางธรรมชาติจากต้นยาง *H. brasiliensis* และทำการเตรียมยางให้มีเจลปริมาณที่ต่างๆกันเพื่อที่จะศึกษาผลของปริมาณเจลต่อสมบัติของยาง ทั้งทางด้าน processability และ physical properties นอกเหนือจากค่าที่ระบุในมาตรฐาน และศึกษาผลของ gel content ต่อสมบัติของยางหลังการคงรูป เช่น สมบัติความเค้นและความเครียดสถิต (static stress and strain properties) ได้แก่ การทดสอบความแข็ง (hardness) แรงดึงหรือเทนไซล์ความเค้น/ความเครียด (tensile stress/strain) การทดสอบการฉีกขาด (tear tests) สมบัติความเค้นและความเครียดพลวัต (dynamic stress and strain properties) ได้แก่ การกระด้ง (rebound resilience) การเสียดทานและการสึกหรอ (friction and wear) ได้แก่ การขัดสี (abrasion) การล้าตัว (fatigue) และความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพและต่อบรรยากาศ (resistance to ageing and weathering)

จากการทดลองพบว่าสามารถพัฒนาวิธีการหาค่าเจลได้ถูกต้องและรวดเร็วยิ่งขึ้นโดยการใช้ความเข้มข้นในการละลายยางที่ 0.1% w/v และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50°C ในขณะที่ละลายและมีการเขย่าที่ ชั่วโมงที่ 2.5 และ 5 และทำการเก็บเจลด้วยวิธีการเซนตริฟิวจ์ที่ความเร็วรอบ 8,000 rpm เป็นเวลา 30 นาที และพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการหาค่าเจลคือ ความเข้มข้น อุณหภูมิ และระยะเวลาของการละลาย

นอกจากนี้พบว่าปริมาณเจลในยางธรรมชาติ (STR 5L) จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเร่ง (Storage hardening) นั่นคือค่าเจลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จาก 2.43 2.83 3.57 6.76 และ 12.42 เปอร์เซนต์ตามเวลาของการเร่งยางที่เพิ่มขึ้น 0, 6, 12, 24 และ 48 ชั่วโมงตามลำดับและจะเห็นว่าเวลาการบ่มเจลที่ 0 และ 6 ชั่วโมงไม่ได้ทำให้ยางมีค่าเจลที่ต่างกัน และพบว่าปริมาณเจลที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ทั้งค่า P_0 และค่า Mooney viscosity ของยางสูงขึ้นซึ่งเชื่อว่าการเกิดจากการที่โมเลกุลยางเคลื่อนที่ได้น้อยลงเนื่องจากการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางมากขึ้น ในด้านของสมบัติเชิงกล (Physical properties) พบว่าปริมาณเจลที่ต่างกันคือ 2.43 2.83 3.57 และ 6.76 เปอร์เซนต์ไม่ได้ส่งผลให้ยางมีสมบัติเชิงกลแตกต่างกันแต่อย่างใดทั้งในกรณีของสูตรยางที่ผสมและไม่ผสมกับยางเอสปีอาร์ ยกเว้นสมบัติเชิงกลของยางที่ทำการบ่มเจลเป็นเวลาถึง 48 ชั่วโมงซึ่งมีผลทำให้สมบัติเชิงกลบางอย่างเช่น Tensile strength Elongation at break และ Tear strength ต่ำกว่ายางตัวอื่นๆซึ่งเชื่อว่าการเกิดจากการผ่านความร้อนในการบ่มเจลงานกว่ายางตัวอื่นจึงทำให้สายโซ่โมเลกุลบางส่วนโดนทำลายและส่วนของเจลดังกล่าวจะไปขัดขวางการกระจายตัวของสารเคมีและสารตัวเติมในยางซึ่งส่งผลให้โครงสร้างมีความไม่สม่ำเสมอ ทำให้ยางดังกล่าวมีสมบัติเชิงกลต่ำกว่ายางตัวอื่นๆ อย่างไรก็ตามพบว่าส่วนของปริมาณเจลที่ต่างกันในยางธรรมชาติจะส่งผลต่อสมบัติยางดิบก่อนการผสมมากกว่ายางคงรูป และจะมีผลกับยางคงรูปอย่างมีนัยสำคัญ เฉพาะค่าของเจลที่ต่างกับตัวอื่นค่อนข้างสูง เช่นยางที่มีเจล 12.42 เปอร์เซนต์ และพบว่าผลของปริมาณเจลในยางธรรมชาติที่ผสมและไม่ผสมยางเอสปีอาร์ให้ผลการทดลองที่มีแนวโน้มเป็นไปในทางเดียวกัน

คำสำคัญ: ยางธรรมชาติ, ปริมาณเจล (gel content), สมบัติทางกายภาพ

เอกสารปกปิด ห้ามเผยแพร่ก่อนได้รับอนุญาต

สัญญาเลขที่ RDG5350021

Project Code: RDG5350021

Project Title: ผล gel content ของยางธรรมชาติต่อพฤติกรรมการแปรรูป และสมบัติทางกายภาพของยางคงรูป

Investigator: รศ. ดร.จิตต์ลัดดา ศักดาภิธานิชย์
หน่วยงาน ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยมหิดล ถนนพระราม 6
แขวงทุ่งพญาไท กรุงเทพฯ ๑ 10400

E-mail Address: scjtp@mahidol.ac.th

Project Period: 22 months

RDG5350021 “งานวิจัยยังไม่เสร็จสมบูรณ์ โปรดอย่านำไปใช้อ้างอิง”

แบบสรุปย่อรายงานสำหรับผู้บริหาร (Executive Summary)

ชื่อโครงการ ผล gel content ของยางธรรมชาติต่อพฤติกรรมการแปรรูปและสมบัติทางกายภาพของยางคงรูป

Effect of gel content of natural rubber on processing behaviors and physical properties of vulcanized rubber

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด และที่อยู่

ชื่อ-สกุล รศ. ดร. จิตต์ศักดิ์ ศักดาภิพาณิชย์

หน่วยงาน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

ที่อยู่ สถาบันวิทยาศาสตร์ชีวโมเลกุล มหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาเขตศาลายา ถนนพุทธมณฑลสาย 4 เขตพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170

โทรศัพท์ 02-8893116 / 0846628999

โทรสาร 02-8893116 **E-mail** scjtp@mahidol.ac.th, jstpuk@gmail.com

นักศึกษา/ผู้ร่วมวิจัย นางสาวดวงฤทัย ศรีนุ่น

งบประมาณทั้งโครงการ 964,500 บาท

ระยะเวลาดำเนินการ 23 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน 2553 ถึงวันที่ 30 เมษายน 2555

ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญ

ประเทศอินโดนีเซียซึ่งเป็นผู้ผลิตยางแท่ง (TSR; Technically Specified Rubber) รายใหญ่ของโลกได้เสนอขอปรับปรุงมาตรฐาน ISO2000:2003 “Rubber raw natural-guidelines for the specification of technically specified rubber (TSR)” โดยเพิ่มยางแท่งเกรดที่มีค่ามูนีวีส์คอสิตีต่ำ (Low Mooney Viscosity) เป็นเกรด “LoV” และมีการเสนอเพิ่มข้อกำหนดและวิธีตรวจหาปริมาณ (%) “gel content” สำหรับยางเกรด LoV ซึ่งจากเดิมมีการกำหนด ข้อกำหนดต่างๆ ตามที่ได้มีการระบุในมาตรฐานนี้ที่ผ่านมา ได้แก่ค่า Dirt, Ash, Nitrogen, Volatile Matter, Initial Plasticity (P_0), PRI (Plasticity Retention Index), Mooney Viscosity และ Lovibond Colour เหล่านี้ล้วนมีข้อมูลทางวิชาการสนับสนุนความสำคัญต่อ Processability และ Physical Properties ของยางคงรูป ซึ่งผู้ใช้และผู้ผลิตทราบกันดี ส่วนกรณีค่า gel content ที่มีการเสนอข้อกำหนด และวิธีการตรวจหา สำหรับยางเกรดใหม่นี้ยังไม่มีข้อมูลทางวิชาการสนับสนุนว่ามีความสำคัญต่อยางดิบ, processability และ physical properties ของยางคงรูปแล้วอย่างไรบ้าง

วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาความสัมพันธ์ของ Gel content ต่อพฤติกรรมการแปรรูป (Processing Behaviors) ของยางผสมสารเคมี (Compound rubber) และสมบัติทางกายภาพของยางคงรูป
2. เพื่อหาปริมาณ Gel content ที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อพฤติกรรมการแปรรูปและสมบัติทางกายภาพของยางคงรูป

ผลการดำเนินงาน

จากการการดำเนินงานแบ่งเป็นสองส่วนใหญ่ๆคือ 1. การหาวิธีที่เหมาะสมในการหาค่าเจล 2. ผลของเจลต่อสมบัติของยางธรรมชาติ ในส่วนแรกนั้นเริ่มจากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าเจล ซึ่งได้แก่ ความเข้มข้นของการเตรียมสารละลายยาง ระยะเวลาในการละลายยาง และอุณหภูมิในการละลายยาง ซึ่งจากการทดลองในส่วนนี้ได้ทำการแยกส่วนเจลออกจากสารละลายด้วยการเซนตริฟิวจ์ซึ่งพบว่าความเร็วรอบที่ใช้นั้นส่งผลต่อค่าเจลด้วยเช่นกัน ในส่วนของการศึกษาผลของเจลต่อสมบัติของยางธรรมชาตินั้น ได้ทำการเตรียมยางให้ได้มีค่าเจลปริมาณต่างๆ โดยการเร่งในบรรยากาศของ P_2O_5 หลังจากนั้นศึกษาถึงสมบัติต่อพฤติกรรมการแปรรูปพบว่าปริมาณเจลส่งผลต่อการแปรรูปของยางธรรมชาติโดยค่า P_0 และค่า Mooney viscosity นั้นสูงขึ้นเมื่อปริมาณเจลมากขึ้น เมื่อศึกษาถึงสมบัติทางกายภาพของยางคงรูปพบว่าสมบัติไม่เปลี่ยนแปลงในกรณีที่เจลต่ำแต่จะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติตั้งแต่ค่าเจลที่ประมาณ 12% ซึ่งได้แก่ค่า Tensile strength Elongation at break และ Tear strength ที่ต่ำลง คาดว่าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางโมเลกุลส่งผลต่อความเข้ากันของสารเคมียางนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงทางสมบัติของยาง

สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองพบว่าสามารถพัฒนาวิธีการหาค่าเจลได้ถูกต้องและรวดเร็วยิ่งขึ้นโดยการใช้ความเข้มข้นต่ำในการละลายยางพร้อมทั้งให้ความร้อนขณะละลาย และแยกส่วนเจลโดยการเซนตริฟิวจ์ซึ่งวิธีดังกล่าวนี้สามารถปฏิบัติได้ภายใน 1 วันซึ่งถือว่าเป็นวิธีที่รวดเร็วและสามารถปฏิบัติได้จริงในแง่อุตสาหกรรมที่ต้องการความรวดเร็ว และจากการทดลองผลของเจลต่อสมบัติของยางธรรมชาตินั้นพบว่าปริมาณเจลมีความสำคัญในแง่ของการแปรรูปอย่างชัดเจนและจากการศึกษาต่อสมบัติของยางคงรูปพบว่าค่าเจลที่ประมาณ 12% ทำให้ยางมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติที่ต่ำลงซึ่งได้แก่ค่า Tensile strength Elongation at break และ Tear strength จากข้อมูลดังกล่าวนี้จึงได้ข้อสรุปว่าค่าเจลนั้นมีผลต่อสมบัติของยางธรรมชาตินอกเหนือจากค่าอื่นๆที่ระบุในค่ามาตรฐานซึ่งอุตสาหกรรมการผลิตยางแท่งควรให้ความสำคัญในการกำหนดและควบคุมค่าเจล

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะวิจัยเพิ่มเติม และวิธีการที่ควรพัฒนาต่อยอดสู่ภาคปฏิบัติจริง

จากการวิจัยในครั้งนี้ได้นำเสนอวิธีการหาค่าเจลที่ได้ค่าที่ยอมรับได้และมีความรวดเร็วซึ่งเป็นที่ต้องการในทางอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามในแง่การปฏิบัติจริงยังคงต้องหาปัจจัยแวดล้อมที่เหมาะสมเพื่อปรับให้เข้ากับอุตสาหกรรม เช่น ลดความคลาดเคลื่อนจากทักษะเฉพาะบุคคลของผู้ปฏิบัติ การใช้เครื่องมือที่ไม่ซับซ้อนหรือมีพร้อมอยู่แล้วในโรงงาน เป็นต้น ในแง่ของการศึกษาผลของเจลต่อสมบัติของยางธรรมชาตินั้น จากองค์ความรู้ที่ได้จากทดลองซึ่งพบว่าค่าเจลนั้นส่งผลต่อสมบัติของยางธรรมชาติเมื่อยางธรรมชาติ(ยางแท่ง) มีเจลที่ค่อนข้างสูง (ประมาณ 12%) นั้นนำไปสู่การต่อยอดในกระบวนการผลิตยางธรรมชาติหรือการควบคุมยางธรรมชาติไม่ให้มีค่าเจลเริ่มต้นที่สูงและคงที่เมื่อเก็บไว้เป็นระยะเวลานาน ซึ่งอาจนำไปสู่การคิดค้นสารเคมีตัวใหม่ที่ใช้ในการควบคุมค่าเจลนอกเหนือจากสาร Hydroxylamine ที่มีรายงานว่าสามารถลดและควบคุมค่าเจลของยางธรรมชาติได้ แต่เป็นสารที่มีความระคายเคืองและเป็นพิษ ดังนั้นจึงมีความสำคัญในการการวิจัยต่อยอดโดยการบูรณาการความรู้เรื่องผลของเจลต่อสมบัติของยางธรรมชาติและการศึกษาในเชิงลึกถึงองค์ประกอบของเจล สาเหตุของการเกิดเจล อันจะนำไปสู่การเข้าใจซึ่งจะทำให้สามารถควบคุมการยับยั้งกระบวนการเกิดเจลหรือเลือกใช้สารเคมีที่คุณสมบัติยับยั้งและควบคุมการเกิดเจลได้

ผลงานวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

การนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการทั้งไทยและต่างประเทศและการตีพิมพ์ผลงานลงในวารสารนานาชาติ

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
(โครงการวิจัยขนาดใหญ่เรื่องยางพารา ประจำปี 2554)

สัญญาเลขที่ RDG 5350021

รายงานความก้าวหน้าของโครงการในรอบ 18 เดือน

รายงานในช่วงตั้งแต่ 31 พฤษภาคม 2554 – 30 เมษายน 2555

ชื่อโครงการ ผล gel content ของยางธรรมชาติต่อพฤติกรรมการแปรรูปและสมบัติทางกายภาพของยางคงรูป

ชื่อ-สกุล รศ. ดร. จิตต์ลัดดา ศักดาภิพาณิชย์

หน่วยงาน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

ที่อยู่ สถาบันวิทยาศาสตร์ชีวโมเลกุล มหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาเขตศาลายา ถนนพุทธมณฑลสาย 4 เขตพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170

โทรศัพท์ 02-8893116 / 0816182043

โทรสาร 02-8893116

E-mail scitp@mahidol.ac.th

งบประมาณ 964,500 บาท

สัญญาเลขที่ RDG5350021

โครงการผล gel content ของยางธรรมชาติต่อพฤติกรรมการแปรรูปและสมบัติทางกายภาพของยางคงรูป
สรุปรายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 2

.....

ส่วนที่ 1 ข้อมูลโครงการ

ชื่อโครงการ ผล gel content ของยางธรรมชาติต่อพฤติกรรมการแปรรูปและสมบัติทางกายภาพของยางคงรูป

สัญญาโครงการเลขที่ RDG 5350021

ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุนวิจัย ดร.จิตต์ลัดดา ศักดาภิพาณิชย์

โครงการเริ่มเมื่อวันที่ 1 มิถุนายน 2553

รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ ..4.. รวมเวลาที่ทำวิจัยทั้งสิ้น ..22.. เดือน

ส่วนที่ 2 รายงานกระบวนการทำวิจัย

1. ในรอบ 6 เดือนที่ผ่านมาท่านได้

- ☐ ติดต่อทางโทรศัพท์/โทรสารกับ user.....ครั้ง
- ☐ ประชุมร่วมกับ user.....ครั้ง เมื่อวันที่.....
- ☐ ไปพบ user ณ.สถานที่.....ครั้ง เมื่อวันที่
- ✓ ติดต่อ สกว.หรือ สปว. ...5...ครั้ง
- ✓ ประชุมทีมวิจัย..20..ครั้ง เป็นเรื่อง ☐ ทบทวน / ✓ วางแผนงาน ...5.. ครั้ง
 - ✓ หาหรือปัญหาการทำวิจัย ...5.. ครั้ง
 - ✓ วิเคราะห์ผล....5.. ครั้ง
 - ✓ มอบหมายงาน ...3.. ครั้ง
 - ✓ การจัดหาจัดจ้าง...2... ครั้ง

2. ในรอบ 6 เดือน ที่ผ่านมามีได้ติดตามข้อมูลงานวิจัยโดย

- ✓ บันทึกการทำวิจัย (สมุดเล่มดำ) จำนวน...14... หน้า
- ✓ อ่าน paper ที่เกี่ยวข้อง...22...ชิ้น
- ✓ ค้นข้อมูลทาง internet ..25.. ครั้ง

3. ในกรณีที่มึ้นักศึกษาบัณฑิตศึกษาหรือผู้ช่วยวิจัยในโครงการ ในรอบ 6 เดือนที่ผ่านมาท่านได้

- ✓ ให้นักศึกษานำเสนอความก้าวหน้า ...5... ครั้ง
- ✓ ประชุมกับนักศึกษา/ผู้ช่วยวิจัยหรือนักศึกษาขอพบเพื่อหาหรือการทำวิจัย..10..ครั้ง
- ☐ ตรวจแก้ผลงานวิจัยที่ทำโดยนักศึกษา หรือผู้ช่วยวิจัยครั้ง

บทนำ

ประเทศอินโดนีเซียซึ่งเป็นผู้ผลิตยางแท่ง (TSR; Technically Specified Rubber) รายใหญ่ของโลกได้เสนอขอปรับปรุงมาตรฐาน ISO2000:2003 “Rubber raw natural-guidelines for the specification of technically specified rubber (TSR)” โดยเพิ่มยางแท่งเกรดที่มีค่ามูนีนีวีสคอสิตีต่ำ (Low Mooney Viscosity) เป็นเกรด “LoV” และมีการเสนอเพิ่มข้อกำหนดและวิธีตรวจหาปริมาณ (%) “gel content” สำหรับยางเกรด LoV ซึ่งจากเดิมมีการกำหนด ข้อกำหนดต่างๆ ตามที่ได้มีการระบุในมาตรฐานนี้ที่ผ่านมา ได้แก่ค่า Dirt, Ash, Nitrogen, Volatile Matter, Initial Plasticity (P_0), PRI (Plasticity Retention Index), Mooney Viscosity และ Lovibond Colour เหล่านี้ล้วนมีข้อมูลทางวิชาการสนับสนุนความสำคัญต่อ Processability และ Physical Properties ของยางคงรูป ซึ่งผู้ใช้และผู้ผลิตทราบกันดี ส่วนกรณีค่า gel content ที่มีการเสนอข้อกำหนด และวิธีการตรวจหา สำหรับยางเกรดใหม่นี้ยังไม่มีข้อมูลทางวิชาการสนับสนุนว่ามีความสำคัญต่อยางดิบ, processability และ physical properties ของยางคงรูปแล้วอย่างไรบ้าง

จากการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเรื่อง gel ของยางธรรมชาติของคณะผู้วิจัยพบว่า ยางธรรมชาติจากต้นยาง *H. brasiliensis* ประกอบไปด้วยส่วนของ rubber hydrocarbon ประมาณ 94% และส่วนของส่วนที่ไม่ใช่ยาง ประมาณ 6% เช่น โปรตีน ไขมัน น้ำตาล ซึ่งส่วนที่ไม่ใช่ยางเหล่านี้ได้ถูกศึกษาและพบว่าเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติที่โดดเด่น ยางธรรมชาติในส่วน rubber hydrocarbon ประกอบด้วย สายโซ่ยาวแบบกิ่งก้านของโพลิเมอร์ (long-chain branched polymer) และส่วนของ gel fraction ^[1] ซึ่งโครงสร้างพื้นฐานของยางธรรมชาติประกอบไปด้วย สายโซ่ยาวของ *cis*-1,4 isoprene ที่มี 2 unit ของ *trans*-1,4 isoprene เชื่อมที่ปลายด้านเริ่มต้น หรือ ω -terminal ซึ่งเป็น unidentified functional group เชื่อมอยู่กับโปรตีน ส่วนปลายด้านสิ้นสุดหรือ α -terminal ประกอบด้วย mono- หรือ di-phosphate ที่เชื่อมต่อกับฟอสโฟลิปิด จากโครงสร้างนี้เองทำให้โมเลกุลของยางธรรมชาติเป็นสายโซ่ยาวแบบกิ่งก้านสาขา หรือเกิด gel ขึ้น จากการรวมกลุ่มกันของ โปรตีน หรือฟอสโฟลิปิด ที่หมู่ปลายทั้งสองด้านด้วย H-bonding ^[2,3] โปรตีนหรือไขมันนั้นสามารถถูกกำจัดได้ด้วยวิธีทาง physical, enzymatic และ chemical treatment เช่น การ re-precipitation จาก สารละลาย toluene ใน methanol และทำการ centrifugation ต่อ สามารถกำจัดโปรตีนและไขมันได้ การสกัดยางแห้งด้วย acetone เป็นวิธีที่สามารถกำจัดไขมันชนิดอิสระออกจากยางธรรมชาติ การใช้เอนไซม์ Protease/surfactant สามารถกำจัดโปรตีนและ allergens ส่วนใหญ่ออกได้ การกำจัดไขมันในยางธรรมชาติด้วยวิธีทางเคมีทำได้โดยการทำปฏิกิริยา transesterification ด้วย NaOCH_3 และ การทำปฏิกิริยา saponification ด้วย KOH/isopropanol ใน สารละลาย toluene ซึ่งวิธีที่กล่าวนี้จะไปทำลาย ester linkage ในไขมัน ^[4,5] นอกจากนั้นข้อมูลจากการทำ selective decomposition ของไขมัน ด้วย lipase, phosphatase, และ phospholipases A_2 , B, C, และ D ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการยืนยันโครงสร้างของ gel การปราศจากโปรตีนและไขมันในยางธรรมชาตินั้นพบว่าส่งผลกระทบต่อ

ต่อการทำลายจุดเชื่อมต่อของโครงสร้างร่างแห (branch points) และส่งผลให้ค่า gel content ลดต่ำลง^[5,6] ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าไขมันและโปรตีนในยางธรรมชาติมีส่วนสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการเกิด gel ในยางธรรมชาติ

จากข้อมูลที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นทำให้สามารถแบ่งส่วนของ gel fraction ได้เป็น 2 ประเภทคือ

(1) สามารถละลายได้เมื่อผ่านการ treatment ด้วย protease, toluene ที่ประกอบด้วย polar solvent และการทำปฏิกิริยา transesterification เรียกว่า soft-gel และ

(2) ไม่สามารถละลายได้เมื่อผ่านการ treatment หรือ ปฏิกิริยาในข้อ 1 เรียกว่า hard-gel [7] ซึ่ง hard-gel นั้นเกิดภายในต้นยาง *Heavea* ที่ไม่ได้ถูกกรีดเป็นเวลานานซึ่งน้ำยางของต้นยางที่ไม่ได้ถูกกรีดเป็นเวลานานนั้นจะมีส่วนของ gel fraction ที่เกิดจาก radical crosslinking ในต้นยาง [8] ในทางตรงกันข้ามสารเคมีที่เติมลงในน้ำยางธรรมชาติ เช่น TMTD ที่ใช้เป็นสารป้องกันการบูดเน่า และ $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ที่ใช้เป็นสารตกตะกอนของ Mg^{2+} ถูกพบว่าเป็นสาเหตุของการเกิด hard-gel ด้วยเช่นกัน [9,10] ตัวอย่างเช่น ค่า gel content ที่เหลือประมาณ 3% หลังจากการทำปฏิกิริยา deproteinization ของ HA-latex ตามด้วยการทำปฏิกิริยา transesterification เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการเตรียม HA-latex

ยางธรรมชาติในรูปแบบยางแห้งนั้นพบว่าเมื่อเก็บไว้เป็นระยะเวลานานจะมีการแข็งขึ้นเรียกการเกิดปรากฏการณ์นี้ว่า Storage hardening ซึ่งมีผลต่อ processibility เช่น ค่า mooney viscosity และค่า plasticity ของยางธรรมชาติ เชื่อว่าการเกิดปรากฏการณ์นี้เกิดจากปฏิกิริยาของ functional group ในยางเช่น aldehyde, epoxide, และ lactone หรือเรียกว่า abnormal group ทำปฏิกิริยากับโปรตีน ซึ่งยังไม่มีหลักฐานที่แน่นอนที่สนับสนุนสมมุติฐานดังกล่าว จากการทดลองในปัจจุบันพบว่าปรากฏการณ์ storage hardening นั้นจะเกิดภายใต้สภาวะที่มีความร้อนสูงและมีความชื้นต่ำ และปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้ก็คือ ฟอสโฟลิปิด โดยพบว่ายางที่ผ่านปฏิกิริยา transesterification นั้นไม่เกิดปรากฏการณ์ storage hardening ในขณะที่โปรตีนนั้นไม่ใช่ปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้เนื่องจากพบว่ายางที่ผ่านปฏิกิริยา deproteinization นั้นยังคงเกิดปรากฏการณ์ storage hardening อยู่ ดังนั้นสมมุติฐานที่ว่าเกิด storage hardening นั้นเกิดจาก หมู่ abnormal group ในยางทำปฏิกิริยากับโปรตีนจึงไม่ถูกต้อง ซึ่งการเกิดปรากฏการณ์ storage hardening นี้ทำให้มีค่า gel content ที่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการเก็บมากขึ้น^[11]

ยางธรรมชาติที่ผลิตเป็นยางแท่งในเกรด STR-XL, STR-5L, และ STR-CV60 เมื่อเก็บไว้เป็นระยะเวลา 14 สัปดาห์ มีค่า gel content 9.9, 12.5, และ 5.5% ตามลำดับ หลังจากนั้นนำตัวอย่างยางเหล่านั้นมาละลายใน toluene ที่มี 2% ethanol พบว่าค่า gel content ลดลงเหลือ 7.8, 7.0, และ 4.6% ตามลำดับ และหลังจากทำปฏิกิริยา transesterification พบว่ามีค่า gel content เป็น 0% ซึ่งเป็นหลักฐานที่ว่า gel fraction ที่เกิดขึ้นนั้นมาจาก H-bonding และจากการทดลองยังพบว่า ค่า gel content นั้นเพิ่มขึ้นไปในทางเดียวกันกับค่า mooney

viscosity และ ค่า initial plasticity (P_0) คือ เมื่อระยะเวลาในการเก็บยางมากขึ้นจะมีค่า gel content, mooney viscosity และ P_0 สูงขึ้น ซึ่งค่า gel content ที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลต่อ processability ของยางธรรมชาติ^[12] และจากการทดลองผลของฟอสโฟลิปิดและโปรตีนต่อการเกิด gel และผลกระทบต่อค่า physical properties ในสภาวะเร่งให้เกิด storage hardening พบว่า ยางธรรมชาติที่ปราศจากฟอสโฟลิปิด นั้นมีค่า gel content, Mooney viscosity, P_0 ที่ค่อนข้างคงที่ถึงแม้เพิ่มระยะเวลาในการเร่งให้เกิด storage hardening และยังพบว่ามีค่า physical properties เช่น tensile strength และค่า elongation at break ที่ค่อนข้างคงที่เช่นเดียวกัน ในขณะที่ยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการทำปฏิกิริยาใดๆและยางธรรมชาติชนิดปราศจากโปรตีน มีค่า gel content, Mooney viscosity, P_0 ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเร่งให้เกิด storage hardening และมีการเปลี่ยนแปลงของค่า physical properties คือ ค่า tensile strength โดยมีค่าเพิ่มมากขึ้น^[13]

ซึ่งจากผลดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่า ค่า gel content นั้นอาจมีความสัมพันธ์กับ processability และ physical properties ของยางธรรมชาติ นอกเหนือจากค่าระบุในมาตรฐานได้แก่ค่า dirt, ash, nitrogen, volatile matter, initial plasticity (P_0), plasticity retention index (PRI), Mooney viscosity และ lovibond colour แต่ยังไม่มีการหาความสัมพันธ์ที่แน่นอนว่าปริมาณ gel content เท่าไรที่จะส่งผลต่อค่า processability หรือ physical properties หรือ ผลกระทบของ gel content ของยางธรรมชาติมีผลต่อการผสม เช่น การเข้ากันของสารเคมีต่างๆ ที่ใช้ในการผสมยาง หรือการเข้ากันกับสารเสริมแรง (reinforcing filler) เช่น carbon black หรือ silica ผลกระทบของ gel content ต่อสมบัติหรือระยะเวลาการขึ้นรูปหรือไม่ทั้งในระบบการขึ้นรูปด้วย sulphur และ peroxide และผลของ gel content ต่อสมบัติของยางดิบหลังการคงรูป เช่น สมบัติความเค้นและความเครียดสถิต (static stress and strain properties) ได้แก่ การทดสอบความแข็ง (hardness) แรงดึงหรือเทนไซล์ความเค้น/ความเครียด (tensile stress/strain) การทดสอบการฉีกขาด (tear tests) สมบัติความเค้นและความเครียดพลวัต (dynamic stress and strain properties) ได้แก่ การกระด้าง (rebound resilience) การเสียดทานและการสึกหรอ (friction and wear) ได้แก่ การขัดสี (abrasion) การคืบ การคลายตัวและการเซตตัว (creep, relaxation, and set) การล้าตัว (fatigue) และความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพและต่อบรรยากาศ (resistance to ageing and weathering) ซึ่งจำเป็นต่อการศึกษาวิจัยเพื่อให้ได้ข้อมูลทางวิชาการที่สนับสนุนว่าค่า gel content มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตและสมบัติทางกายภาพของยางคงรูป และมีความจำเป็นหรือไม่ที่จะระบุค่า gel content เป็นค่ามาตรฐานนอกเหนือจากค่าอื่นๆที่เคยระบุมา

ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาวิจัยเพื่อให้ได้ข้อมูลทางวิชาการในการให้ความเห็นในการปรับปรุงมาตรฐานที่อ้างอิงข้างต้น

วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาความสัมพันธ์ของ Gel content ต่อพฤติกรรมการแปรรูป (Processing Behaviors) ของยางผสมสารเคมี (Compound rubber) และสมบัติทางกายภาพของยางคงรูป
2. เพื่อหาปริมาณ Gel content ที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อพฤติกรรมการแปรรูปและสมบัติทางกายภาพของยางคงรูป

ตอนที่ 1 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการวัดค่า gel content

1.1 วิธีการทดลอง

1.1.1 การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างยางแท่งเกรด STR 5L ความหนืดมูนนี้เริ่มต้น 50 นำไปผ่านการเร่งให้เกิดปรากฏการณ์ storage hardening โดยเก็บในบรรยากาศที่มี P_2O_5 ที่ อุณหภูมิ $60^{\circ}C$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

1.1.2 วิธีการหาค่าเจลโดยกรองผ่านตะแกรงลวด

ก. ตัดตัวอย่างยางเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (น้ำหนัก 0.03, 0.06, 0.1, 0.05 g) จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักก่อนการแช่ในตัวทำละลายโทลูอีนให้เป็นน้ำหนัก W_0

ข. นำตัวอย่างมาแช่ในตัวทำละลายโทลูอีน 30 ml โดยปรับเป็นความเข้มข้นต่างๆ (0.1, 0.2, 0.33, 0.5% w/v) เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของการละลายยาง และที่อุณหภูมิต่างๆคือ 30, 40, 50, 60, $70^{\circ}C$ เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อค่าเจล

ค. เก็บตัวอย่างยางที่แช่ในตัวทำละลายที่เวลาต่างๆคือ 2, 4, 6, 8, 10 ชั่วโมง และ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 วัน เพื่อศึกษาผลของระยะเวลา จากนั้นนำเอาตัวอย่างมากรองด้วยตะแกรงลวดขนาด 100 mesh โดยให้ น้ำหนักของตะแกรงลวดก่อนกรองเป็น น้ำหนัก W_2

ง. นำตะแกรงลวดที่กรองตัวอย่างไปทำการอบที่อุณหภูมิ $70^{\circ}C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำไปชั่งน้ำหนักให้เป็นน้ำหนัก W_1

จ. คำนวณค่าเจลจากสมการ $\text{gel content} = [(W_2 - W_1)/W_0] \times 100$

1.1.3 วิธีการหาค่าเจลโดยวิธีการเซนตริฟิวจ์

ก. ตัดตัวอย่างยางเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (น้ำหนัก 0.03, 0.06, 0.1, 0.05 g) จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักก่อนการแช่ในตัวทำละลายโทลูอีนให้เป็นน้ำหนัก W_0

ข. นำตัวอย่างมาแช่ในตัวทำละลายโทลูอีน 30 ml โดยปรับเป็นความเข้มข้นต่างๆ (0.1, 0.2, 0.33, 0.5% w/v) ที่อุณหภูมิ $30^{\circ}C$

ค. เก็บตัวอย่างยางที่แช่ในตัวทำละลายที่เวลาต่างๆกันโดยการนำไปเซนตริฟิวซ์ที่ความเร็วรอบ 13,000 rpm ($\sim 203,000 \text{ N/kg}$) เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นแยกเอาส่วนที่ละลายออก จับตัวส่วนที่ไม่ละลายด้วย methanol เพื่อให้เก็บรวบรวมเจลได้ง่ายและยังทำให้เจลที่อบนั้นแห้งเร็วขึ้น เนื่องจาก methanol เป็น non solvent ของยางทำให้เจลที่เก็บได้มีลักษณะแข็งและทำให้กำจัดโทลูอินที่อยู่ในเจลออกไป

ง. นำส่วนที่จับตัวได้ไปทำการอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักให้เป็นน้ำหนัก W_1 (ตรวจสอบว่าเจลแห้งโดยการชั่งและเก็บใน desiccator 24 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งซ้ำพบว่าน้ำหนักคงที่)

จ. คำนวณค่าเจลจากสมการ $\text{gel content} = [W_1/W_0] \times 100$

1.2 ผลการทดลอง

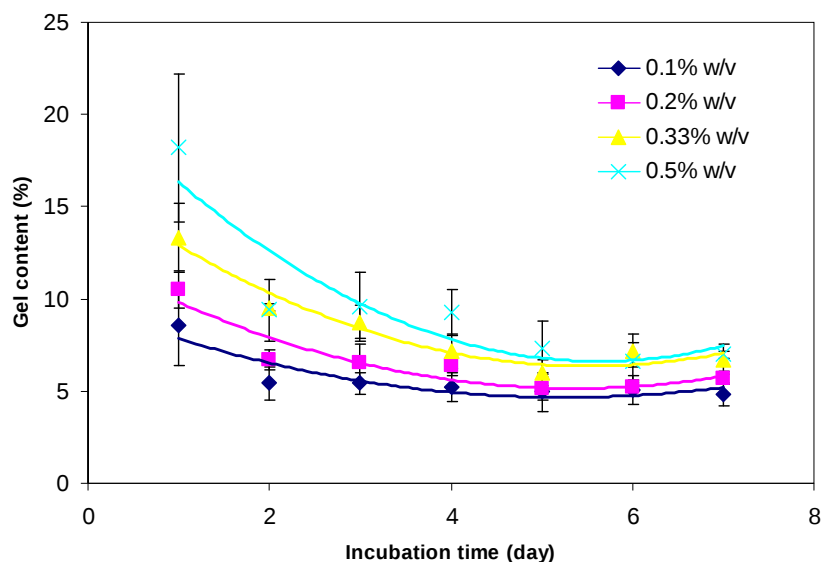
1.2.1 ผลของวิธีการเก็บเจลระหว่างวิธีการกรองด้วยตะแกรงลวดและวิธีเซนตริฟิวซ์ต่อปริมาณเจล ตารางที่ 1 เปรียบเทียบค่าเจลระหว่างวิธีการกรองด้วยตะแกรงลวดและวิธีเซนตริฟิวซ์ที่ความเข้มข้นของการละลายต่างๆ เป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิ 30°C

ความเข้มข้น (% w/v)	Gel content (%)	
	วิธีเซนตริฟิวซ์	วิธีการกรองด้วยตะแกรงลวด
0.1	5.02 ± 0.95	5.39 ± 0.60
0.2	5.84 ± 0.22	5.71 ± 0.37
0.33	6.03 ± 0.24	6.00 ± 0.70
0.5	7.08 ± 0.40	6.99 ± 0.19

จากการทดลองเมื่อนำเอายางมาละลายในสารละลายโทลูอินที่ความเข้มข้นต่างๆคือ 0.1, 0.2, 0.33, และ 0.5% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 1 สัปดาห์ แล้วทำการแยกเก็บเจลด้วยวิธีการกรองด้วยตะแกรงลวดและการเซนตริฟิวซ์ พบว่าทั้งสองวิธีนี้ให้ค่าเจลที่ใกล้เคียงกัน ดังที่แสดงให้เห็นในตารางที่ 1 ที่ความเข้มข้นของการละลายยาง 0.1, 0.2, 0.33 และ 0.5 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีปริมาณเจลประมาณ 5, 6, 6 และ 7 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการแยกเจลด้วยวิธีทั้งสองไม่มีผลต่อปริมาณ เจลอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามพบว่าปริมาณเจลเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความเข้มข้นของการละลายยางเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นเล็กน้อยของปริมาณเจลอ้างเกิดจากความสามารถในการละลายที่ลดลงเมื่อความเข้มข้นของการละลายยางเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาต่อไปถึงผลของความเข้มข้นของการละลายยาง ระยะเวลา และอุณหภูมิ ต่อการวัดปริมาณเจลโดยใช้วิธีการเก็บเจลด้วยตะแกรงลวดซึ่งจากการทดลองนี้สรุปได้ว่าเป็นวิธีที่ให้ปริมาณค่าเจลที่

ใกล้เคียงกับวิธีเซนตริฟิวจ์แต่มีความสะดวกและรวดเร็วกว่าโดยไม่ต้องการเครื่องมือที่ราคาสูงอย่างเครื่องเซนตริฟิวจ์

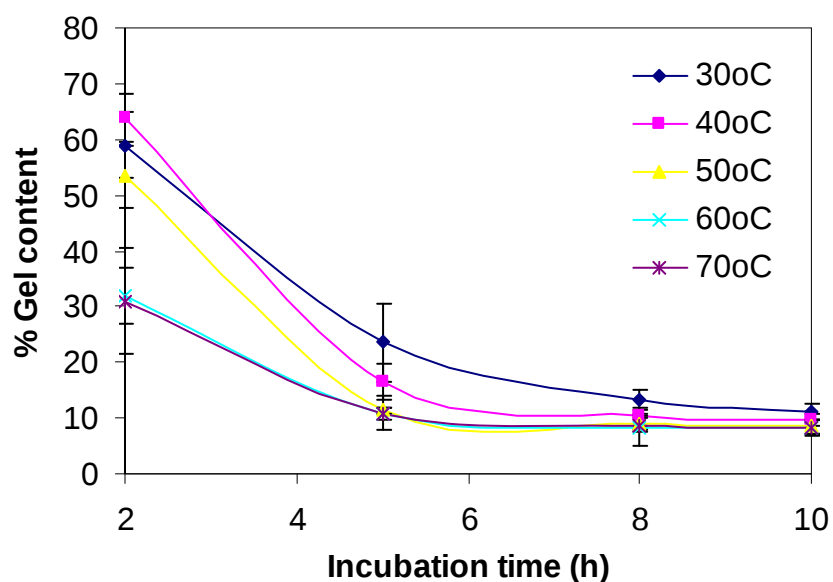
1.2.2 ผลของความเข้มข้นของการละลายและระยะเวลาต่อปริมาณเจล



รูปที่ 1 ปริมาณเจลที่ความเข้มข้นของการละลายและระยะเวลาต่างๆที่เก็บด้วยตะแกรงลวด

รูปที่ 1 แสดงปริมาณเจลที่ความเข้มข้นของการละลายและระยะเวลาต่างๆที่เก็บเจลด้วยวิธีเก็บด้วยตะแกรงลวดพบว่า ปริมาณเจลมีปริมาณลดลงเมื่อความเข้มข้นของการละลายลดลง จาก 0.5, 0.33, 0.2, 0.1% w/v ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการละลายมากขึ้นจะพบว่าปริมาณเจลในแต่ละความเข้มข้นของการละลายมีแนวโน้มที่ลดลงเช่นเดียวกัน ปริมาณที่มากในความเข้มข้นของการละลายที่สูงและระยะเวลาในการละลายที่สั้นนั้น อาจไม่ใช่ปริมาณเจลที่ถูกต้องซึ่งอาจเป็นส่วนที่ยังละลายได้ไม่เต็มที่ ความลดเข้มข้นให้ต่ำลงและเพิ่มระยะเวลาในการละลายให้ยาวนานนั้นเป็นการเพิ่มความสามารถในการละลายจึงทำให้มีปริมาณเจลที่ต่ำลง ซึ่งในการวิเคราะห์ปริมาณเจลนั้นควรจะเป็นปริมาณเจลที่เข้าสู่สมดุลคือต่ำและคงที่แม้เพิ่มระยะเวลาในการละลาย เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของการละลายต่ำที่ 0.1% w/v พบว่าปริมาณเจลมีแนวโน้มเข้าสู่สมดุลได้รวดเร็วกว่าที่ความเข้มข้นของการละลายที่สูงกว่า ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าความเข้มข้นของการละลายมีผลต่อการหาปริมาณเจลซึ่งที่ความเข้มข้นของการละลายต่ำนั้นทำให้ได้ค่าเจลที่เข้าสู่สมดุลได้รวดเร็วกว่าซึ่งจะทำให้ใช้เวลาในการหาค่าเจลที่สั้นกว่าที่ความเข้มข้นของการละลายสูง

1.2.3 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาต่อปริมาณเจล



รูปที่ 2 ปริมาณเจลที่ความร้อนและระยะเวลาต่างๆที่เก็บด้วยตะแกรงลวด

จากการให้ความร้อนเพื่อช่วยให้การละลายของยางเพิ่มมากขึ้นพบว่า เมื่อให้ความร้อนสูงมากขึ้นคือ 30°C, 40°C, 50°C, 60°C, และ 70°C จะมีปริมาณที่ลดลงตามลำดับ ที่ทุกๆอุณหภูมิพบว่าที่ชั่วโมงที่ 5 ของการละลายจะพบว่ามีค่าเจลที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่ที่อุณหภูมิในช่วง 30°C ถึง 40°C นั้นพบว่าปริมาณเจลมีแนวโน้มที่จะลดลงอีกเมื่อเพิ่มระยะเวลาเพิ่มมากขึ้น แต่ในช่วงอุณหภูมิที่ 50°C ถึง 70°C นั้น พบว่าค่าเจลมีปริมาณคงที่ตั้งแต่ ชั่วโมงที่ 5 ไปจนถึง ชั่วโมงที่ 10 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการให้ความร้อนช่วยให้การละลายของยางดีขึ้นทำให้เจลเข้าสู่สมดุลได้รวดเร็วมากขึ้น ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการให้ความร้อนในการหาค่าเจลนั้นเป็นวิธีที่ช่วยให้หาค่าเจลได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ตอนที่ 2 ตรวจสอบวิธีการหาเจลตามวิธีของประเทศอินโดนีเซีย

2.1 วิธีการทดลอง

2.1.1 การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างยางเป็นยางแท่ง TSR ที่ได้รับจากประเทศอินโดนีเซียจำนวน 2 ชุดคือ ชุด I และชุด II ซึ่งในแต่ละชุดนั้นแบ่งเป็น 3 ตัวอย่างที่มีค่าเจลต่ำ เจลปานกลาง และเจลสูง เป็น I_1 , I_2 , I_3 และ II_1 , II_2 , II_3 ซึ่งตัวเลขที่กำกับนั้นตัวเลขมากแสดงถึงการมีเจลมาก โดยหาค่าเจลของตัวอย่าง ชุด I ก่อน และหาค่าเจลของตัวอย่างในชุด II ในอีก 7 วันให้หลัง

2.1.2 การหาค่าเจลตามวิธี CD 2000 Annex A

ก. ใช้กรรไกรตัดตัวอย่างยางประมาณ 0.2 g ให้เป็นน้ำหนัก m_0 ใส่ในหลอดเซนทรีฟิวส์ที่ก่อนหน้านี้

นำไปทำการอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เก็บไว้ใน desiccator ชั่งน้ำหนักหลอดให้เป็น m_1

ข. ตวงโทลูอิน 60 cm^3 ลงในหลอดเซนทรีฟิวส์ตั้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 16-20 ชั่วโมงโดยไม่มีการเขย่า

ที่อุณหภูมิ $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$

ค. หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปทำการเซนทรีฟิวส์ที่ความเร็วรอบ 16,000 rpm เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ง. ทำการเปิดส่วนที่ละลายออกด้วยความระมัดระวังไม่ให้ส่วนที่ไม่ละลายที่ตกตะกอนอยู่ติดมาด้วย

จ. เก็บหลอดเซนทรีฟิวส์ไว้ก่อน 30 นาทีก่อนอบเพื่อให้สารละลายระเหยป้องกันการ flashing ในขณะที่

ที่อบ จากนั้นนำหลอดเซนทรีฟิวส์ไปอบที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ฉ. นำหลอดเซนทรีฟิวส์ออกมาตั้งพักไว้ให้เย็นใน desiccator เป็นเวลา 30 นาที

ช. ชั่งน้ำหนักหลอดเซนทรีฟิวส์ให้เป็นน้ำหนัก m_2 คำนวณค่า gel content จากสมการ

$$\text{gel content} = [(m_2 - m_1)/m_0] \times 100$$

2.1.3 การหาค่าเจลตามวิธี WD 2000 Annex A

ก. ใช้กรรไกรตัดตัวอย่างยางประมาณ 0.1 g ให้เป็นน้ำหนัก m_0 ใส่ในหลอดเซนทรีฟิวส์ที่ก่อนหน้านี้

นำไปทำการอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เก็บไว้ใน desiccator

ข. ตวงโทลูอิน 30 cm^3 ลงในหลอดเซนทรีฟิวส์ปิดฝาให้แน่นเขย่าด้วยมือเล็กน้อย ตั้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 16-20 ชั่วโมงโดยไม่มีการเขย่า ที่อุณหภูมิ $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$

ค. หลังจากนั้นเขย่าหลอดเซนตริฟิวอย่างแรงด้วยมือเพื่อให้กระจายส่วนที่ตกตะกอนอยู่ที่ก้นหลอด ปรับน้ำหนักหลอดให้เท่ากันด้วยโทลูอินจากนั้นนำตัวอย่างไปทำการเซนตริฟิวด้วยความเร็วรอบ 16,000 rpm ($\sim 31,224G$) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ง. ทำการเปิดส่วนที่ละลายออกด้วยความระมัดระวังไม่ให้ส่วนที่ไม่ละลายที่ตกตะกอนอยู่ติดมาด้วย

จ. ใช้ Spatula ลอกส่วนที่ไม่ละลายที่ตกตะกอนอยู่ที่ก้นหลอดย้ายลงในภาชนะที่สะอาดที่ชั่งไว้ก่อนแล้วให้เป็นน้ำหนัก m_1

ฉ. นำภาชนะนั้นตั้งทิ้งไว้ก่อน 30 นาทีก่อนอบเพื่อให้สารละลายระเหยป้องกันการ flashing ในขณะที่อบ จากนั้นนำภาชนะที่บรรจุเจลไปอบที่อุณหภูมิ $110^\circ C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำภาชนะนั้นออกมาตั้งพักไว้ให้เย็นใน desiccator เป็นเวลา 30 นาที

ช. ชั่งน้ำหนักภาชนะนั้นให้เป็นน้ำหนัก m_2 คำนวณค่า gel content จากสมการ

$$\text{gel content} = [(m_2 - m_1)/m_0] \times 100$$

2.1.4 วิธีการหาค่าเจลโดยวิธีการเซนตริฟิว (Control method)

ก. ตัดตัวอย่างยางเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า น้ำหนักประมาณ 0.03 g ให้เป็นน้ำหนัก W_0 จากนั้นแช่ในตัวทำละลายโทลูอินประมาณ 30 cm^3 โดยเก็บโดยปราศจากจากเขย่าและแสง เป็นเวลา 1 สัปดาห์

ข. นำตัวอย่างยางไปเซนตริฟิวด้วยความเร็วรอบ 13,000 rpm ($\sim 20,714G$) เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นแยกเอาส่วนที่ละลายออก จับตัวส่วนที่ไม่ละลายด้วย methanol

ค. นำส่วนที่จับตัวได้ไปทำการอบที่อุณหภูมิ $70^\circ C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักให้เป็นน้ำหนัก W_1

จ. คำนวณค่าเจลจากสมการ $\text{gel content} = [W_1/W_0] \times 100$

2.2 ผลการทดลอง

2.2.1 ผลการหาค่าเจลตามวิธี *CD 2000 Annex A*

ตารางที่ 2 ปริมาณเจลจากการหาตามวิธี *CD 2000 Annex A* method และ Control method

Sample		sample I.1	sample I.2	sample I.3	sample II.1	sample II.2	sample II.3
Gel content (%)	<i>CD 2000 Annex A</i>	44.36	44.53	46.87	48.09	47.23	53.47
	Method	±2.11	±0.41	±3.23	±0.75	±2.33	±2.23
	Control method	~0	3.70 ±0.14	12.39 ±1.81	~0	3.95 ±0.44	11.59 ±0.83

จากการหาค่าเจลด้วยวิธีของประเทสอินโดนีเซียตามวิธี *CD 2000 Annex A* ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ตัวอย่างจากประเทสอินโดนีเซียซึ่งทางประเทสอินโดนีเซียระบุว่าตัวอย่างนั้นมีปริมาณเจล 3 ระดับคือ น้อย ปานกลาง และมาก ซึ่งมีตัวเลขกำกับคือ 1, 2, และ 3 ตามลำดับ มีจำนวน 2 ชุดคือ ชุด I และ ชุด II พบว่า การใช้วิธี *CD 2000 Annex A* นั้นให้ค่า % เจลที่สูงมากกว่า 40 ในทั้งสองชุดตัวอย่าง และยังมีค่าที่ใกล้เคียงกันในทุกตัวอย่างซึ่งไม่สามารถแบ่งระดับเจลตามที่กล่าวอ้างได้ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่วิธีนี้ใช้ความเข้มข้นของการละลายที่สูงคือประมาณ 0.33% w/v และระยะเวลา 16 ชั่วโมงในการละลายนั้นไม่เพียงพอที่จะทำให้ยางละลายจึงทำให้มีค่าเจลที่สูงมากกว่าปกติแม้ในตัวอย่างที่ระบุว่า มี เจลน้อยก็ยังพบว่า มีค่าเจลที่สูง แต่เมื่อทำการทดลองเปรียบเทียบโดยใช้วิธี control method ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการหาค่าเจลที่มีการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการมากมายนั้นพบว่า ค่าเจลในทั้งชุดตัวอย่างที่ I และ II นั้นมีแนวโน้มที่มีค่าเจล น้อย ปานกลาง และมาก ตามตัวเลขที่ได้ระบุไว้ ซึ่งวิธีนี้มีความเข้มข้นที่ใช้ละลายยางน้อยประมาณ 0.1% w/v และมีระยะเวลาในการละลายที่ยาวนานประมาณ 1 สัปดาห์ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าวิธี *CD 2000 Annex A* นั้นยังไม่มี ความเหมาะสมที่จะนำมาใช้วิเคราะห์ค่าเจล อันเนื่องมาจาก ความเข้มข้นของการละลายยางและระยะเวลาการละลายที่ไม่เหมาะสม

2.2.2 ผลการหาค่าเจลตามวิธี *WD 2000 Annex A*

ตารางที่ 3 ปริมาณเจลจากการหาตามวิธี *WD 2000 Annex A* method และ Control method

Sample		sample I.1	sample I.2	sample I.3	sample II.1	sample II.2	sample II.3
Gel content (%)	<i>WD 2000 Annex A</i>	3.46	6.99	13.48	2.71	5.92	14.41
	Method	±0.40	±0.20	±0.05	±0.42	±0.22	±0.66
	Control method	~0	3.70 ±0.14	12.39 ±1.81	~0	3.95 ±0.44	11.59 ±0.83

จากผลการหาปริมาณเจลจากการใช้วิธี *CD 2000 Annex A* นั้นได้ผลที่ไม่ดีเท่าที่ควร ประเทศอินโดนีเซียจึงได้ปรับปรุงวิธีการหาค่าเจลโดยปรับปรุงเป็นวิธี *WD 2000 Annex A* ซึ่งวิธีการใกล้เคียงกับวิธีเดิม แต่ได้เพิ่มขั้นตอนการเขย่าด้วยมืออย่างแรงก่อนการนำไปเซนตริฟิวส์ จากการทดลองพบว่าค่าเจลที่ได้จากวิธีนี้นั้นมีค่าเจลที่สูงกว่าวิธี control method เล็กน้อยแต่อย่างไรก็ตามค่าเจลที่ได้นั้น มีแนวโน้มที่เป็นไปตามที่อินโดนีเซียระบุคือ ได้ค่าเจลน้อย ปานกลาง และสูง ในทั้งสองชุดตัวอย่าง ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่า การเขย่าด้วยมืออย่างแรงนั้นเป็นการเพิ่มจากแรงภายนอกทำให้การละลายของยางดีมากขึ้นส่งผลให้การหาค่าเจลมีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่วิธี *WD 2000 Annex A* นั้นยังมีข้อเสียก็คือ ใช้การเซนตริฟิวส์ที่ความเร็วรอบที่สูงมากคือ 16,000 rpm เป็นระยะเวลาถึง 2 ชั่วโมงซึ่งถือว่านานมากพอสมควร อาจเป็นข้อจำกัดในการทำในบางห้องปฏิบัติการที่ไม่มีเครื่องเซนตริฟิวส์ที่ความเร็วรอบสูงเพียงพอ ดังนั้นจึงควรมีวิธีที่ดีกว่าที่สามารถหาค่าเจลได้ผลใกล้เคียงกันแต่สามารถได้ผลรวดเร็วกว่าและใช้เครื่องมือที่ห้องปฏิบัติการส่วนใหญ่มี

ตอนที่ 3 พัฒนาและปรับปรุงวิธีการหาค่าเจลเพื่อให้ได้ความถูกต้องและรวดเร็ว

3.1 วิธีการทดลอง

3.1.1 การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างยางเป็นยางแท่ง TSR ที่ได้รับจากประเทศอินโดนีเซียจำนวน ชุด I ซึ่งในแต่ละชุดนั้นแบ่งเป็น 3 ตัวอย่างที่มีค่าเจลต่ำ เจลปานกลาง และเจลสูง เป็น I_1 , I_2 , I_3 ซึ่งตัวเลขที่กำกับนั้นตัวเลขมากแสดงถึงการมีเจลมาก

3.1.2 วิธีการหาเจลแบบให้ความร้อนและกรองด้วยตะแกรงลวด

ก. ตวงโทลูอิน 30 cm³ ใส่ลงในหลอดเซนตริฟิวจ์ปิดฝาให้แน่น จากนั้นนำไปตั้งใน water bath จนอุณหภูมิในหลอดคงที่ที่ 50°C

ข. ตัดตัวอย่างยางด้วยกรรไกรน้ำหนักประมาณ 0.03 g ให้เป็นน้ำหนัก W_0 จากนั้นนำตัวอย่างยางใส่ลงในหลอดเซนตริฟิวจ์ปิดให้แน่นตั้งไว้ใน water bath ที่ 50°C ตั้งทิ้งไว้โดยไม่มีการเขย่า

ค. เมื่อครบ 2.5 ชั่วโมง นำหลอดเซนตริฟิวจ์มาเขย่าด้วยมืออย่างแรง เพื่อกระจายส่วนที่ตกตะกอนที่ก้นหลอด จากนั้นตั้งหลอดเซนตริฟิวจ์ใน water bath อีก 2.5 ชั่วโมงจนครบ 5 ชั่วโมง

ง. เขย่าหลอดเซนตริฟิวจ์อีกครั้งด้วยมืออย่างแรงเพื่อให้ส่วนที่ไม่ละลายกระจายให้ทั่ว จากนั้น กรองตัวอย่างผ่านตะแกรงลวดขนาด 400 mesh ที่ก้นหน้ามีการอบให้แห้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วชั่งให้เป็นน้ำหนัก W_1

จ. นำตะแกรงลวดที่ผ่านการกรองไปตั้งทิ้งไว้ให้สารละลายระเหยออกไป จากนั้นอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นจากนั้นนำไปชั่งให้เป็นน้ำหนัก W_2

ช. คำนวณค่าเจลจากสมการ $\text{gel content} = [(W_2 - W_1)/W_0] \times 100$

3.1.3 วิธีการหาเจลแบบให้ความร้อนและทำการเซนตริฟิวจ์

ก. ตวงโทลูอิน 30 cm³ ใส่ลงในหลอดเซนตริฟิวจ์ปิดฝาให้แน่น จากนั้นนำไปตั้งใน water bath จนอุณหภูมิในหลอดคงที่ที่ 50°C

ข. ตัดตัวอย่างยางด้วยกรรไกรน้ำหนักประมาณ 0.03 g ให้เป็นน้ำหนัก W_0 จากนั้นนำตัวอย่างยางใส่ลงในหลอดเซนตริฟิวจ์ปิดให้แน่นตั้งไว้ใน water bath ที่ 50°C ตั้งทิ้งไว้โดยไม่มีการเขย่า

ค. เมื่อครบ 2.5 ชั่วโมง นำหลอดเซนตริฟิวจ์มาเขย่าด้วยมืออย่างแรง เพื่อกระจายส่วนที่ตกตะกอนที่ก้นหลอด จากนั้นตั้งหลอดเซนตริฟิวจ์ใน water bath อีก 2.5 ชั่วโมงจนครบ 5 ชั่วโมง

ง. เขย่าหลอดเซนตริฟิวจ์อีกครั้งด้วยมืออย่างแรงเพื่อให้ส่วนที่ไม่ละลายกระจายให้ทั่ว จากนั้น นำไปเซนตริฟิวจ์ที่ความเร็วรอบ 8,000 rpm ($\sim 7847G$) เป็นเวลา 30 นาที

จ. แยกส่วนที่ละลายออกด้วยความระมัดระวังไม่ให้ส่วนที่ไม่ละลายที่ตกตะกอนอยู่ใต้หลอดหลุดออกมาด้วย จากนั้นทำการลอกเจลที่ตกตะกอนอยู่ใต้หลอดโดยการกลิ้งด้วยโทลูอินบริสุทธิ์ถ่ายลงในภาชนะที่สะอาดและแห้งที่ชั่งน้ำหนักไว้ก่อนหน้านี้เป็นน้ำหนัก W_1

ช. ตั้งภาชนะให้โทลูอินระเหยก่อนนำไปอบที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงตั้งทิ้งไว้ให้เย็น ชั่งน้ำหนักให้เป็นน้ำหนัก W_2 คำนวณค่าเจลจากสมการ $\text{gel content} = [(W_2 - W_1)/W_0] \times 100$

3.2 ผลการทดลอง

3.2.1 การปรับปรุงการหาค่าเจลโดยใช้ความเข้มข้นของการละลายยางดำและให้ความร้อนโดยปราศจากการเขย่า

ตารางที่ 4 ค่าเจลที่ได้จากวิธีการพัฒนาด้วยวิธีเซนตริฟิวจ์และกรองด้วยตะแกรงลวดโดยไม่มีการเขย่าเปรียบเทียบกับวิธี *WD 2000 Annex A* และ Control method

Method	Gel content (%)		
	I ₁	I ₂	I ₃
กรองด้วยตะแกรงลวด	1.30 ±0.53	38.40 ±1.38	49.52 ±2.31
เซนตริฟิวจ์*	1.43 ±0.20	37.50 ±0.75	52.15 ±0.28
<i>WD 2000 Annex A</i>	3.46 ±0.40	6.99 ±0.20	13.48 ±0.05
Control method	~0	3.70 ±0.14	12.39 ±1.81

* เซนตริฟิวจ์ที่ความเร็วรอบ 13,000 rpm (~20,714G) 30 นาที

จากการทดลองในส่วนแรกที่มีผลต่อการวัดค่าเจลนั้นพบว่า การใช้ความเข้มข้นของการละลายยางดำและให้ความร้อนในขณะละลายยางนั้นส่งผลทำให้ได้เจลที่เข้าสู่สมดุลได้รวดเร็วขึ้น ดังนั้นในการพัฒนาการหาวิธีการวัดค่าเจลแบบใหม่นั้นจึงได้เลือกใช้การละลายที่ความเข้มข้นต่ำคือ 0.1% w/v และให้อุณหภูมิขณะละลายที่ 50°C โดยใช้เวลาการละลาย 5 ชั่วโมงโดยไม่มีการเขย่าและเก็บเจลด้วยวิธีการกรองด้วยตะแกรงลวด และเซนตริฟิวจ์ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า ค่าเจลที่ได้จากวิธีการกรองด้วยตะแกรงลวดและเซนตริฟิวจ์นั้นมีค่าใกล้เคียงกันและเป็นไปตามแนวโน้มที่ประเทศอินโดนีเซียระบุคือ น้อย กลาง และมาก ตามตัวอย่าง I₁, I₂, I₃ ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับ วิธี *WD 2000 Annex A* และ Control method พบว่าค่าเจลของ ตัวอย่าง I₂ และ I₃ ของ วิธีการกรองด้วยตะแกรงลวด และเซนตริฟิวจ์นั้นสูงกว่า วิธี *WD 2000 Annex A* และ Control method อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเมื่อสังเกตขณะทำการละลายยางพบว่าก่อนการเก็บเจลด้วยวิธีการกรองด้วยตะแกรงลวดและเซนตริฟิวจ์พบยางที่ไม่ละลายติดอยู่ที่ก้นหลอดซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจน ทำให้ได้ข้อ

สันนิษฐานว่า ในกรณีที่ตัวอย่างที่มีปริมาณเจลมากอย่างตัวอย่างที่ I_2 และ I_3 นั้นยางอาจจะละลายได้ไม่เต็มที่ ทำให้ได้ค่าเจลที่สูงกว่าความเป็นจริง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบแล้ววิธีที่พัฒนาใหม่ทั้งสองวิธีนั้นใช้เวลาการละลายเพียง 5 ชั่วโมงเพื่อให้ได้การวิเคราะห์ที่รวดเร็วซึ่งอาจไม่เพียงพอต่อการละลายคั่งนั้นเพื่อปรับปรุงให้ได้ค่าเจลที่ถูกต้องและยังคงความรวดเร็วอยู่จึงได้มีการศึกษาผลของการแช่ซึ่งเป็นการเพิ่มแรงภายนอกให้ยางละลายได้เพิ่มมากขึ้นซึ่งได้ทำการศึกษาในหัวข้อถัดไป

3.2.2 การปรับปรุงการหาค่าเจลโดยใช้ความเข้มข้นของการละลายยางต่ำและให้ความร้อนโดยเพิ่มการแช่

ตารางที่ 5 ค่าเจลที่ได้จากวิธีการพัฒนาด้วยวิธีเซนตริฟิวส์และกรองด้วยตะแกรงลวดโดยไม่มีการแช่เปรียบเทียบกับวิธี *WD 2000 Annex A* และ Control method

Method	Gel content (%)		
	I_1	I_2	I_3
กรองด้วยตะแกรงลวด	1.22 ±0.53	1.77 ±1.38	1.34 ±2.31
เซนตริฟิวส์*	2.55 ±0.17	5.92 ±0.79	11.92 ±2.19
<i>WD 2000 Annex A</i>	3.46 ±0.40	6.99 ±0.20	13.48 ±0.05
Control method	~0	3.70 ±0.14	12.39 ±1.81

* เซนตริฟิวส์ที่ความเร็วรอบ 13,000 rpm (~20,714G) 30 นาที

เมื่อเพิ่มการแช่ในชั่วโมงที่ 2.5 และแช่อีกครั้งเมื่อครบ 5 ชั่วโมง พบว่าค่าเจลที่ได้จากวิธีเซนตริฟิวส์และกรองด้วยตะแกรงลวดที่พัฒนาใหม่นั้น มีค่าเจลที่ลดลงจากเดิมที่ไม่แช่ แต่ในกรณีของการเก็บเจลด้วยวิธีการกรองด้วยตะแกรงลวดนั้นพบว่าค่า %เจล ประมาณ 1 ซึ่งมีค่าน้อยเกือบจะเท่ากันในทุกตัวอย่าง ผลการทดลองนี้ไม่เป็นไปตามแนวโน้มที่ควรจะเป็น ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้อาจเกิดจาก ในการที่แช่นั้นทำให้เจลแตกออกเป็นอนุภาคเล็กๆซึ่งอาจติดตามภาชนะที่ใส่ก่อนขั้นตอนการกรอง หรืออนุภาคนั้นอาจเล็กจน

สามารถลอดผ่านตะแกรงขนาด 400 mesh ไปได้ จึงทำให้มีค่าเจลที่น้อยกว่าปกติ แต่ในกรณีของวิธีการเก็บเจลด้วยการเซนตริฟิวซ์กลับพบว่า มีค่าเจลที่ใกล้เคียงกันกับวิธี *WD 2000 Annex A* และ *Control method* ซึ่งคาดว่าวิธีการเซนตริฟิวซ์นี้สามารถรวมเอาอนุภาคเจลเล็กๆ หลังการเขย่าให้ตกตะกอนกลับลงมาทำให้หาค่าเจลได้เป็นไปตามแนวโน้มที่ควรได้ ดังนั้นการเก็บเจลด้วยวิธีการเซนตริฟิวซ์จึงเหมาะกับการพัฒนาการหาค่าเจลแบบใหม่มากกว่า ซึ่งการเซนตริฟิวซ์ด้วยความเร็วที่สูงนั้นให้ผลที่ดีแต่ยังมีข้อจำกัดที่อาจทำไม่ได้ในบางห้องปฏิบัติการที่ไม่มีเครื่องเซนตริฟิวซ์ความเร็วสูง ดังนั้นในขั้นตอนต่อไปจึงได้ศึกษาผลของความเร็วรอบของการเซนตริฟิวซ์เพื่อพัฒนาให้ได้วิธีที่เหมาะสมยิ่งขึ้น

3.2.3 ผลของความเร็วรอบของการเซนตริฟิวซ์ต่อค่าเจลที่หาได้จากวิธีการหาค่าเจลที่พัฒนาขึ้นใหม่

ตารางที่ 6 ค่าเจลที่ได้จากวิธีการพัฒนาด้วยวิธีเซนตริฟิวซ์ที่ความเร็วรอบต่างๆเปรียบเทียบกับวิธี *WD 2000 Annex A* และ *Control method*

Method	Gel content (%)		
	I ₁	I ₂	I ₃
เซนตริฟิวซ์ที่ความเร็วรอบ 5,000 rpm 30 นาที (~ 3,061G)	1.82 ±0.11	3.31 ±0.57	5.20 ±0.87
เซนตริฟิวซ์ที่ความเร็วรอบ 8,000 rpm 30 นาที (~ 7,847G)	2.86 ±0.47	4.15 ±0.21	10.75 ±0.96
เซนตริฟิวซ์ที่ความเร็วรอบ 13,000 rpm 30 นาที (~ 20,714G)	2.55 ±0.17	5.92 ±0.79	11.92 ±2.19
<i>WD 2000 Annex A</i>	3.46 ±0.40	6.99 ±0.20	13.48 ±0.05
Control method	~0	3.70 ±0.14	12.39 ±1.81

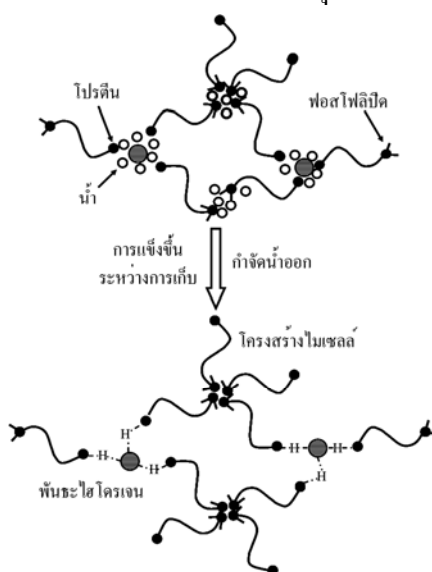
การหาค่าเจลที่ได้จากวิธีการที่พัฒนาใหม่โดยการศึกษาการเก็บเจลที่เก็บด้วยวิธีเซนตริฟิวจ์ที่ทำการเซนตริฟิวจ์ที่ความเร็วรอบต่างๆ พบว่าเมื่อลดความเร็วรอบลงมาที่ 5,000 rpm นั้นค่าเจลยังคงแนวโน้มที่มีค่าเจล น้อย ปานกลาง และมาก แต่เมื่อเทียบกับที่ความเร็วรอบ 1,3000 rpm วิธี *WD 2000 Annex A* และ Control method พบว่ามีค่าเจลที่น้อยกว่า อาจเกิดจากการที่ความเร็วรอบที่ 5,000 rpm นั้นอาจยังไม่เพียงพอต่อการทำให้อนุภาคเจลที่กระจายอยู่นั้นตกตะกอนลงมาได้ทำให้เก็บเจลไม่ได้ทั้งหมด แต่เมื่อเพิ่มความเร็วรอบเป็น 8,000 rpm พบว่าค่าเจลที่ได้ก็นั้นใกล้เคียงกับที่ความเร็วรอบที่ 13,000 rpm, วิธี *WD 2000 Annex A* และ Control method ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วรอบ 8,000 rpm เป็นเวลา 30 นาทีนั้นก็เพียงพอต่อการตกตะกอนอนุภาคเจล ซึ่งดีกว่าวิธี *WD 2000 Annex A* ในแง่ของการใช้ความเร็วรอบที่ต่ำกว่า 10,000 rpm ซึ่งเครื่องมือหาได้ง่ายกว่ากรณีที่ใช้ความเร็วรอบที่สูง และใช้เวลาการเซนตริฟิวจ์ที่สั้นกว่าโดยใช้เพียง 30 นาทีเท่านั้น

ตอนที่ 4 ผลของปริมาณเจลต่อพฤติกรรมแปรรูป (processability) ของยางดิบ

4.1 วิธีการทดลอง

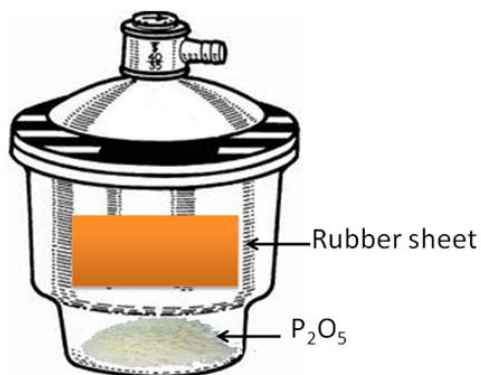
4.1.1 การเตรียมตัวอย่างยางให้มีปริมาณเจลต่างกัน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเร่งยางให้เกิดเจลหรือเร่งให้เกิดการแข็งตัวของยางโดยใช้ฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (Phosphorus pentoxide, P_2O_5)^[11] ซึ่งปรากฏการณ์นี้ถูกอธิบายไว้ว่าเมื่อกำจัดน้ำออกไปจากยางโดยใช้สารดูดความชื้นหรือ P_2O_5 โปรตีนและฟอสโฟลิปิดที่ตำแหน่งด้านปลายโมเลกุลของยางจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างกัน โดยที่ฟอสโฟลิปิดจะเกิดการเชื่อมโยงผ่านโครงสร้างไมเซลล์^[5-6] และในส่วนของโปรตีนจะเกิดผ่านพันธะไฮโดรเจนทำให้เกิดการเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง^[14] ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การเกิดโครงสร้างร่างแหของยางธรรมชาติหลังการเก็บเก็บภายใต้สภาวะเร่ง^[14]

กระบวนการเตรียมยางให้มีปริมาณเจลต่างกัณดังกล่าวเริ่มต้นโดยการนำยางแท่งเกรด STR 5L (ความหนืดมุนนี้ 60 ± 2) ไปเก็บภายใต้บรรยากาศของ P_2O_5 ที่อุณหภูมิ $60^\circ C$ โดยใช้เวลาต่างๆกันคือ 0, 6, 12, 24, และ 48 ชั่วโมง ซึ่งตัวอย่างยางดังกล่าวจะผ่านการอัดรีดด้วยเครื่องรีดยางแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) เป็นจำนวน 10 รอบเพื่อควบคุมความหนาของยางให้สม่ำเสมอก่อนที่จะนำมาทำการเร่งการเกิดเจล



Stored at $60^\circ C$ for 0, 6, 12, 24 and 48 hours

รูปที่ 4.2 วิธีการเร่งยางให้เกิดเจล (storage hardening) โดยเก็บภายใต้บรรยากาศที่มี P_2O_5 ที่อุณหภูมิ $60^\circ C$ เป็นเวลาต่างๆกัน

4.1.2 การหาปริมาณเจล

การหาค่าเจลในตอนที 4 จะเลือกใช้วิธีการหาปริมาณเจล 3 วิธีที่ให้ผลของปริมาณเจลในแต่ละตัวอย่างใกล้เคียงกัน โดยพิจารณาจากผลการทดลองในตอนที 3 นั่นคือใช้ Method A (Control method), Method B (*WD 2000 Annex A*), และ Method C (การปรับปรุงการหาค่าเจลโดยใช้ความเข้มข้นของการละลายยางต่ำและให้ความร้อนกับยางและเพิ่มการเขย่าที่เวลา 2.5 และ 5 ชั่วโมง)

4.2 ผลการทดลอง

4.2.1 ผลของการเร่งเจล (Storage hardening) ที่เวลาต่างกัน

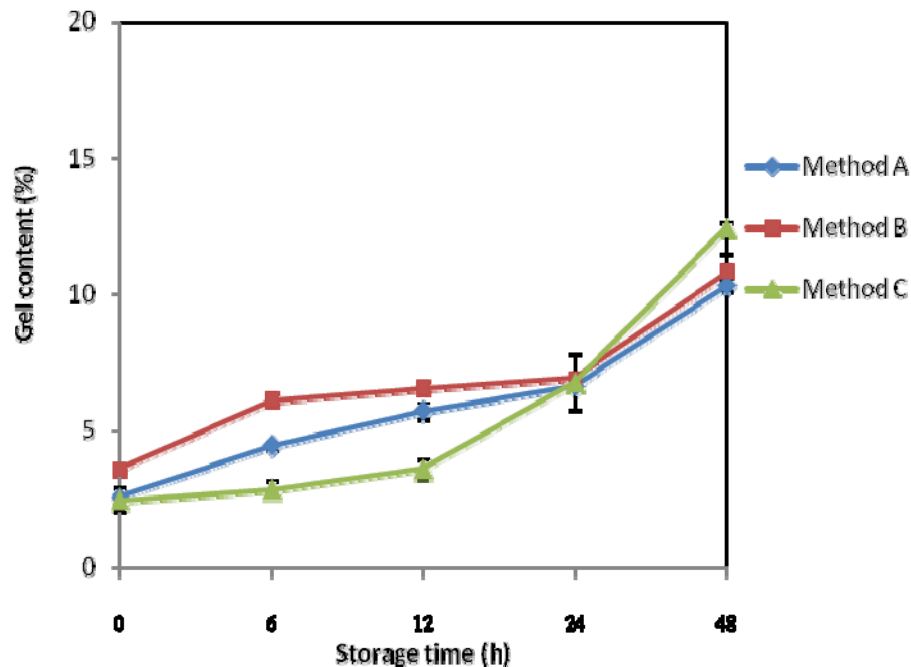
ตารางที่ 7 ปริมาณเจลของยางที่ได้จากการเร่งโดยเก็บในบรรยากาศที่มี P_2O_5 ที่อุณหภูมิ $60^\circ C$ เป็นเวลาต่าง ๆ กัน โดยใช้วิธีในการวัดเจลที่ต่างกัน 3 วิธี

เวลาที่ใช้ในการเร่งเจล (ชม.)	ปริมาณเจล (%)		
	Method A	Method B	Method C
0	2.56 ± 0.36	3.58 ± 0.1	2.43 ± 0.41
6	4.43 ± 0.14	6.10 ± 0.06	2.83 ± 0.31
12	5.70 ± 0.28	6.53 ± 0.20	3.57 ± 0.35
24	6.60 ± 0.18	6.90 ± 0.07	6.76 ± 1.03
48	10.31 ± 0.16	10.78 ± 0.68	12.42 ± 0.23

Method A = Control method

Method B = *WD 2000 Annex A*

Method C = การปรับปรุงการหาค่าเจลโดยใช้ความเข้มข้นของการละลายยางต่ำและให้ความร้อนโดยเพิ่มการเขย่าเป็นเวลา 2.5 และ 5 ชั่วโมง



รูปที่ 4.3 ปริมาณเจลที่ได้จากการวัดค่าจากทั้ง 3 วิธี ของยางที่ผ่านการเร่งให้เกิด Storage hardening ที่เวลาต่าง ๆ กัน

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าตัวอย่างยางเดียวกันจะให้ค่าเจลจากทั้ง 3 วิธีที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าการพัฒนาวิธีการหาค่าเจลแบบใหม่โดยให้ความร้อนและเพิ่มการเขย่าแล้วทำการเซนตริฟิวจ์ (Method C) สามารถที่จะนำมาประยุกต์หาค่าเจลของยางได้ โดยจะให้ค่าเจลในปริมาณที่ใกล้เคียงกับ Control method และ WD 2000 Annex A ซึ่ง Method A ยังมีข้อด้อยในเรื่องของเวลาส่วน Method B ยังมีข้อด้อยในเรื่องของความเร็วยกในการเซนตริฟิวจ์ที่สูง (1,600 rpm) เป็นระยะเวลาถึง 2 ชั่วโมง ซึ่งได้อธิบายอย่างละเอียดไปแล้วในตอนที่ 2 และ ตอนที่ 3 นอกจากนี้จะเห็นได้ว่า ค่าเจลของยางจากทั้ง 3 วิธีจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามเวลาที่ใช้ในการเร่งยาง (Storage hardening) จาก 0, 6, 12, 24 และ 48 ชั่วโมง

4.2.2 ผลของปริมาณเจลต่อสมบัติของยาง

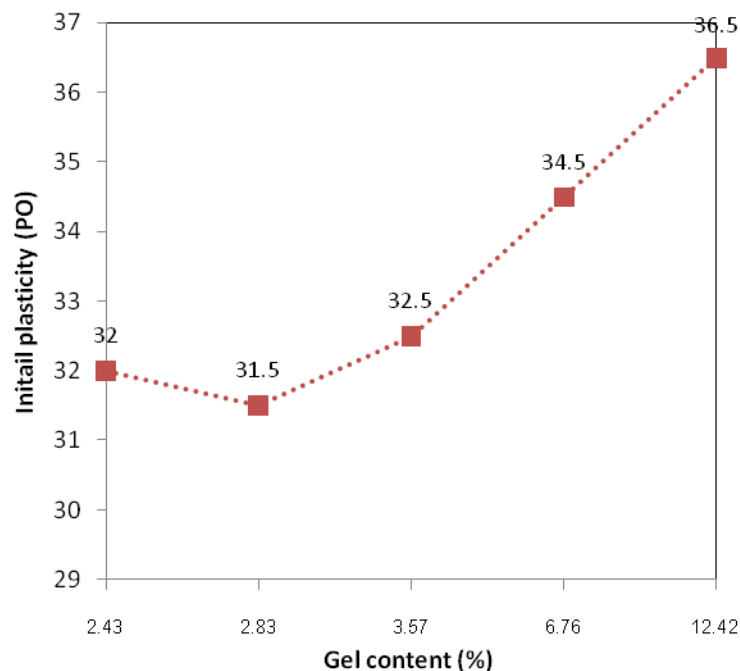
4.2.2.1 สมบัติพื้นฐานของยาง เช่น ปริมาณสิ่งสกปรก ปริมาณสิ่งระเหย ปริมาณเถ้า สี และปริมาณไนโตรเจนเป็นสมบัติพื้นฐานของยางดิบ ซึ่งเป็นตัวแปรควบคุมของยางที่ใช้ในการทดลองสมบัติดังกล่าวแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 สมบัติพื้นฐานของยางธรรมชาติ (STR 5L) ตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมยางที่มีปริมาณเจลต่างกัน

เวลาที่ใช้ในการเร่งเจล (ชม.)	ปริมาณสิ่งสกปรก (% โดยน้ำหนัก)	ปริมาณสิ่งระเหย (% โดยน้ำหนัก)	ปริมาณเถ้า (% โดยน้ำหนัก)	สี	ปริมาณไนโตรเจน (% โดยน้ำหนัก)
0	0.007	0.44	0.48	5.0	0.47
6	0.013	0.40	0.45	4.0	0.40
12	0.011	0.40	0.49	3.5	0.39
24	0.037	0.40	0.47	3.5	0.41
48	0.009	0.42	0.50	3.5	0.36

4.2.2.2 ค่าความอ่อนตัวเริ่มแรก (Initial plasticity; P_0)

ค่า P_0 (Initial plasticity) หมายถึงค่า plasticity ของยางเริ่มต้นเป็นค่าที่ใช้วัดความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางโดยใช้เทคนิคแบบกด ค่า P_0 สูงแสดงถึงยางที่มีขนาดโมเลกุลสูงด้วย จากผลการทดลองจะเห็นว่าปริมาณเจลที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ในการเร่งจะส่งผลให้ค่า P_0 ของยางสูงขึ้นตามไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.4 ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณเจลที่เพิ่มขึ้นจะทำให้โมเลกุลยางเกิดการเชื่อมโยงกันจนทำให้เกิดกลุ่มโมเลกุลยางที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

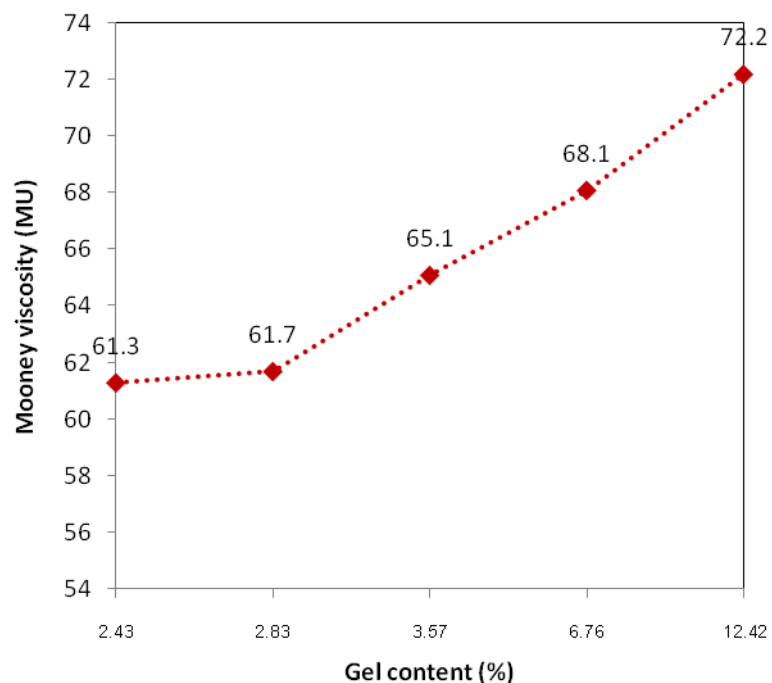


รูปที่ 4.4 ผลของปริมาณเจลต่างๆต่อค่าความอ่อนตัวเริ่มต้น (Initial plasticity) ของยาง

4.2.2.3 ค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity)

เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางโดยใช้เทคนิคแบบหมุนโดยใช้เครื่องที่เรียกกันทั่วไปว่า “เครื่องมูนนี่วิสโคมิเตอร์” (Mooney viscometer) ค่าความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางที่วัดได้จากเครื่องมือประเภทนี้จะแสดงในรูปของความหนืด กล่าวคือยางที่มีความหนืดสูงก็จะมีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างต่ำ ในทำนองกลับกัน ยางที่มีความหนืดต่ำก็จะมีสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูง ด้วยเหตุนี้ยางที่มีความหนืดต่ำจึงไหลได้ง่ายทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้โดยง่าย

งานวิจัยนี้วัดค่าความหนืดมูนนี่ตามมาตรฐาน ASTM D 1646-87 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5 ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณเจลที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเร่ง (Storage hardening) จะส่งผลให้ค่าความหนืดมูนนี่ของยางสูงขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณเจลที่เพิ่มขึ้นคือการที่โมเลกุลยางเกิดการเชื่อมโยงกันมากขึ้นทำให้โมเลกุลยางไหลได้ยากยิ่งขึ้น



รูปที่ 4.5 ผลของปริมาณเจลต่างๆต่อค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ของยาง

ตอนที่ 5 ผลของปริมาณเจลดต่อสมบัติทางด้านทางกายภาพ (physical properties) ของยาง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณเจลดที่ต่างกันในยางธรรมชาติต่อคุณสมบัติทางด้าน physical properties ซึ่งเป็นสมบัติของยางคงรูป (ยางหลังจากการผสมสารเคมีและเชื่อมโยงโมเลกุล) สมบัติเหล่านี้ได้แก่ ความแข็ง (hardness) ความทนทานต่อแรงดึงหรือเทนไซล์ความเค้น/ความเครียด (tensile stress/strain) การทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) สมบัติการกระด้งกระดอน (rebound resilience) ความทนทานต่อการขัดถู (abrasion) การเซตตัว (compression set) การล้าตัว (fatigue) และความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพและต่อบรรยากาศ (resistance to ageing and weathering)

5.1 การทดลองและผลการทดลอง

5.1.1 การผสมยางเพื่อเตรียมยางคอมปาวด์* (Mixing)

สูตรผสมยางในงานวิจัยนี้มี 2 สูตรด้วยกันคือสูตรที่ผสมยางธรรมชาติกับยางยางสไตรีนบิวทาไดอินหรือยางเอสปีอาร์ (SBR) และสูตรที่ไม่ผสมกับยางเอสปีอาร์ เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณเจลดในยางธรรมชาติต่อสมบัติของยางทั้งสองสูตร

ตารางที่ 5.1 สูตรสารเคมีที่ใช้ในการบดผสมยาง

สารเคมี	ปริมาณ (ส่วนโดยน้ำหนัก)	
	สูตรไม่ผสม SBR (Un-blend)	สูตรผสม SBR (Blend)
ยางธรรมชาติ (NR)	100	60
ยาง SBR เกรด 1502	0	40
เขม่าดำเกรด N-550	45	45
ซิงค์ออกไซด์	5	5
กรดสเตียริก	1.5	1.5
**TBBS	1	1
***DTDM	1	1
****6PPD	1	1
กำมะถัน	3.25	3.25

- * ยางผสมสารเคมี
- ** สารตัวเร่ง N-tert-butyl-2-benzothiazolesulfenamide
- *** สารตัวเร่ง 4, 4'-Dithiodimorpholine
- **** สาร anti-oxidant N-(1, 3-Dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamine

เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการคงรูปในระหว่างการผสมจึงทำการผสมยางแบบ 2 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เป็นการผสมยางกับสารตัวเติม สารป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (anti-oxidant) และสารกระตุ้นปฏิกิริยาการคงรูปโดยใช้เครื่องผสมแบบปิด (Brabender plasticorder) หลังจากนั้นนำยางคอมปาวด์ที่ได้มาผึ่งให้เย็นก่อนที่จะทำการผสมต่อไปในขั้นตอนที่ 2

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการนำยางคอมปาวด์จากขั้นตอนที่ 1 มาผสมกับสารเชื่อมโยงโมเลกุลยาง (sulfur) และสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปโดยใช้เครื่องผสมแบบเปิด (Two-roll mil) ดังรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 5.2 ซึ่งใช้เวลาในการผสมทั้งสิ้น 17 นาที โดยมีลำดับการเติมสารเคมีก่อนหลังดังรายละเอียดในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ลำดับในการผสมสารเคมี

สารเคมี	ลำดับในการผสม (นาทีที่)
ขั้นตอนที่ 1 (Brabender plasticorder)	
ยางธรรมชาติ และ/หรือเอสปีอาร์	0-3
เขม่าดำ (เกรด N 550)	3-8
6PPD	8-9
ซิงค์ออกไซด์+กรดสเตียริก	9-11
ขั้นตอนที่ 2 (Two-roll mill)	
ยางคอมปาวด์จากขั้นตอนที่ 1	0-2
Sulfur + TBBS+DTDM	2-5

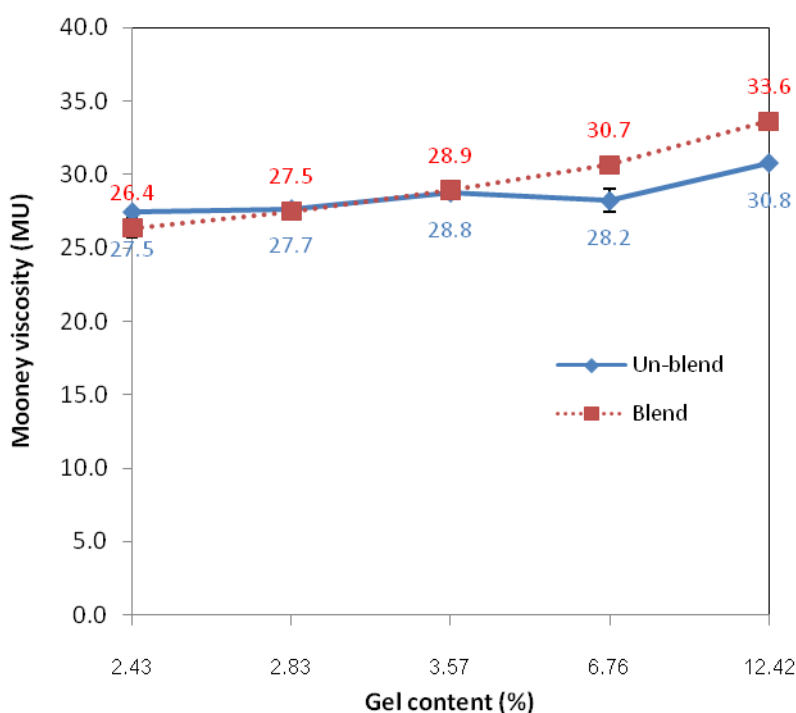
สภาวะที่ใช้ในการผสม

- Brabender plasticorder: อุณหภูมิ 50°C , ความเร็วรอบ 50 rpm, ปริมาตรห้องผสมประมาณ 0.4 ลิตร
- Two-roll mill: อุณหภูมิ 50°C

5.1.2 การวัดความหนืดมูนนี่ของยาง (Mooney viscosity)

การหาค่าความหนืดมูนนี่ในงานวิจัยนี้ใช้มาตรฐาน ASTM D 1646-87 โดยใช้เครื่อง Mooney viscometer อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบคือ 100°C เวลาอุ่นยาง 1 นาที และเวลาทดสอบ 4 นาที โดยตัวอย่างยางที่ใช้เป็นชั้นทดสอบประกอบด้วยยาง 2 ชั้นน้ำหนักรวมกันประมาณ 25 กรัม

จากผลการทดลองซึ่งแสดงในรูปที่ 5.1 สามารถอธิบายได้ว่าค่าเจลที่ต่างกันของยางธรรมชาติ คือ 2.43 2.83 3.57 และ 6.76 เปอร์เซ็นต์ไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความหนืดมูนนี่ของยางคอมปาวด์ ทั้งสูตรที่ผสมและไม่ผสมยางเอสปีอาร์ ยกเว้นกรณีของยางที่มีปริมาณเจล 12.42 เปอร์เซ็นต์ซึ่งส่งผลให้ยางคอมปาวด์มีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น 7.2 และ 3.3 หน่วย ของทั้งสูตรยางที่ผสมและไม่ผสมยางเอสปีอาร์ตามลำดับ และจะเห็นว่าค่าความหนืดมูนนี่ของยางคอมปาวด์มีค่าต่ำกว่าค่าความหนืดของยางดิบ (แสดงด้วยรูปที่ 4.5) ที่ยังไม่ผสมสารเคมี เนื่องจากแรงเฉือนและความร้อนในระหว่างการผสมทำให้โมเลกุลของยางถูกตัดจนสั้นลงซึ่งสามารถไหลได้ง่ายขึ้นจึงเป็นสาเหตุให้ยางคอมปาวด์มีความหนืดน้อยลง

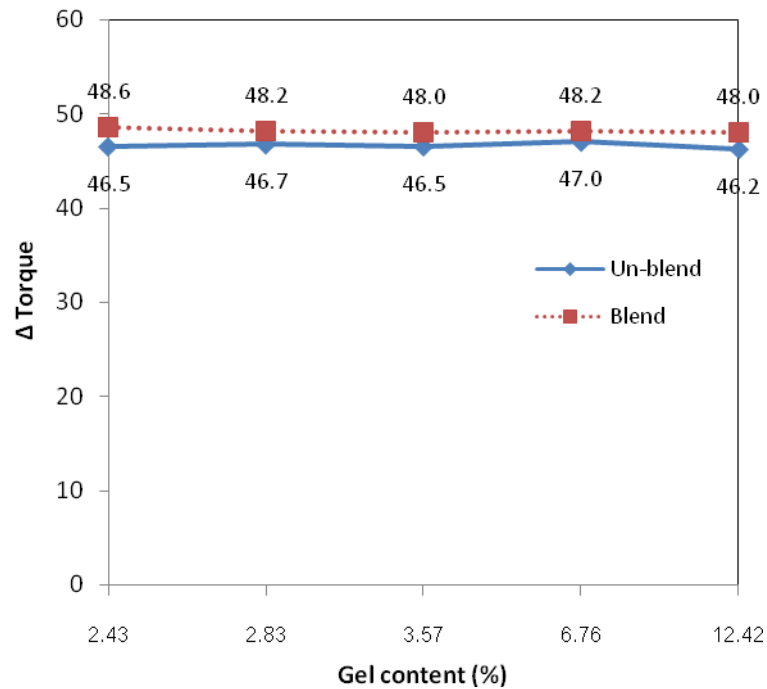


รูปที่ 5.1 ผลของปริมาณเจลต่อค่าความหนืดมูนนี่ของยางธรรมชาติที่มีปริมาณเจลต่างกันทั้งกรณีที่ไม่ผสม (Un-blend) และผสม (Blend) ยางเอสปีอาร์

5.1.3 พฤติกรรมการคงรูปของยาง (cure characteristic)

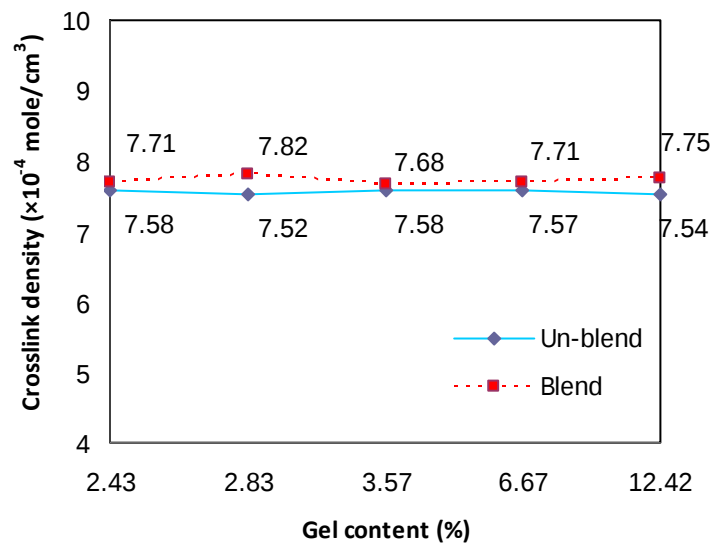
การศึกษาพฤติกรรมการคงรูปของยางในงานวิจัยนี้ทดสอบโดยใช้เทคนิคที่เรียกว่า Oscillating Disc Rheometer (ODR) ตามมาตรฐาน ASTM D 2084-95 ที่อุณหภูมิ 160°C จากผลการทดลองพบว่าปริมาณเจลของยางธรรมชาติที่แตกต่างกันดังกล่าวไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อพฤติกรรมการคงรูปของยางไม่ว่าจะเป็นค่าแรงบิดหรือทอร์ก (Torque) Crosslink density เวลาที่ยางไหลได้ก่อนการคงรูป (scorch time) และเวลาที่ใช้ในการคงรูป (cure time) ดังแสดงในรูป 5.2 5.3 5.4 และ 5.5 ตามลำดับ ผลต่างระหว่างค่าทอร์กสูงสุดและค่าทอร์กต่ำสุดของยางคงรูป MH-ML หรือผลต่างของแรงบิด (delta torque, ΔT) ของเครื่อง rheometer (ODR) เป็นความสัมพันธ์โดยตรงกับการเกิดพันธะระหว่างสายโซ่โมเลกุลยางและการเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับอนุภาคสารตัวเติม จากผลการทดลองของซึ่งแสดงในรูป 5.2 พบว่าปริมาณเจลที่เพิ่มขึ้นจาก 2.43-12.42% ไม่ได้ส่งผลต่อปริมาณการเชื่อมโยงโมเลกุลของยางคงรูป นั่นคือยางทุกตัวมีค่า ΔT ที่ใกล้เคียงกัน และจากการวัดค่า Crosslink density พบว่า ทั้งในกรณียางธรรมชาติผสมและไม่ผสมยาง SBR นั้นพบว่ามีค่าไม่เปลี่ยนแปลงแม้ปริมาณของเจลเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณเจลไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยาการเกิดโครงสร้างและปริมาณโครงสร้างที่เกิดขึ้น เช่นเดียวกับผลของเวลาที่ยางใช้ในการไหลก่อนการคงรูป (scorch time) และเวลาที่ใช้ในการคงรูป (cure time) ดังแสดงด้วยรูป 5.3 และ 5.4 นั่นคือค่าเจลที่ต่างกันไม่ได้ส่งผลต่อพฤติกรรมการคงรูปของยาง

1. แรงบิด (Torque)



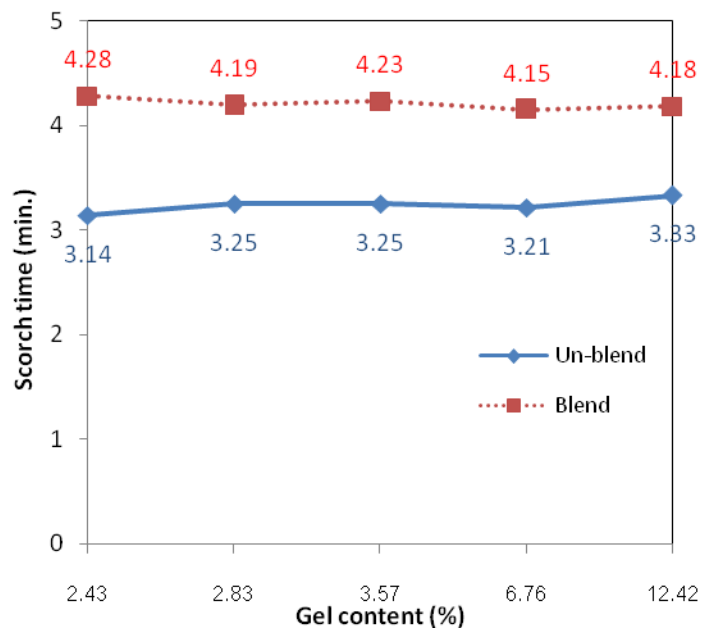
รูป 5.2 ผลของปริมาณเจลต่อค่า Delta torque ของยางธรรมชาติที่มีปริมาณเจลต่างกันทั้งกรณีที่ไม่ผสม (Un-blend) และผสม (Blend) ยางเอสปีอาร์

2. Crosslink density



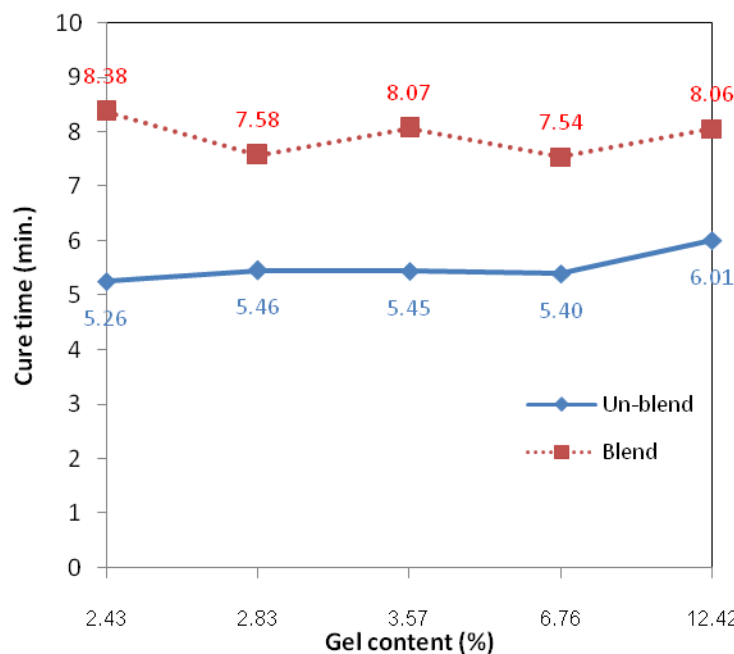
รูป 5.3 ผลของปริมาณเจลต่อ Crosslink density ของยางธรรมชาติที่มีปริมาณเจลต่างกันทั้งกรณีที่ไม่ผสม (Un-blend) และผสม (Blend) ยางเอสปีอาร์

3. เวลาที่ใช้ในการไหลก่อนการคงรูป (Scorch time)



รูป 5.4 ผลของปริมาณเจลต่อเวลาที่ใช้ไหลก่อนการคงรูป (Scorch time) ของยางธรรมชาติที่มีปริมาณเจลต่างกันทั้งกรณีที่ไม่ผสม (Un-blend) และผสม (Blend) ยางเอสปีอาร์

4. เวลาที่ใช้ในการคงรูป (Cure time)



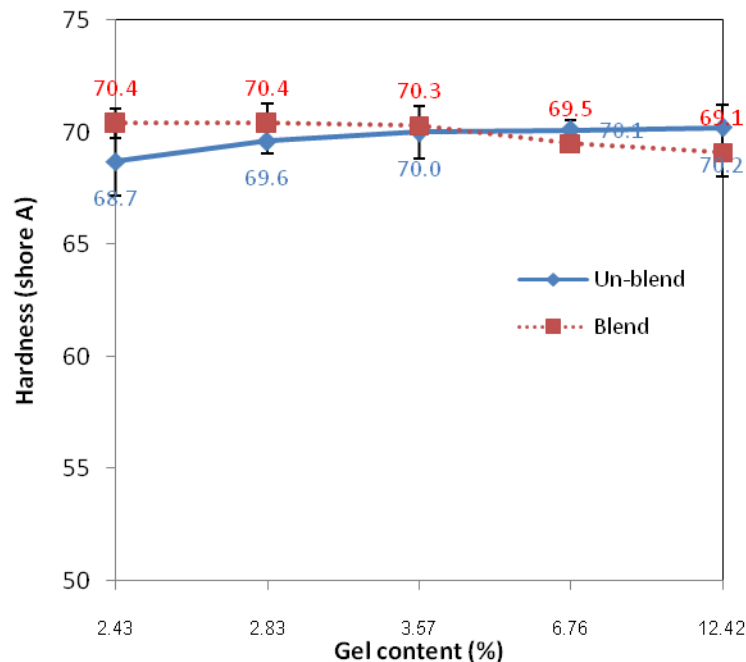
รูป 5.5 ผลของปริมาณเจลต่อเวลาที่ใช้ในการคงรูป (scorch time) ของยางธรรมชาติที่มีปริมาณเจลต่างกันทั้งกรณีที่ไม่ผสม (Un-blend) และผสม (Blend) ยางเอสปีอาร์

5.1.4 ผลของปริมาณเจลในยางธรรมชาติต่อสมบัติทางกายภาพของยางคงรูป (Physical properties)

ในงานวิจัยนี้เตรียมยางคงรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกที่อุณหภูมิ 160°C ความดัน 15 MPa ด้วยเวลาที่ได้จากการทดสอบหาเวลาคงรูปยางที่ 90% (Tc 90) โดยใช้เครื่อง ODR ดังกล่าวข้างต้น หลังยางคงรูปที่ได้นำไปเตรียมเป็นชิ้นทดสอบสมบัติเชิงกล ดังนี้

1. ความแข็ง (Shore A Hardness)

ความแข็งของยางหมายถึงความต้านทานของพื้นผิวต่อการทะลุทะลวง (Penetration) ของตัวกด (indenter) ที่มีขนาดเฉพาะภายใต้แรงกดที่กำหนด จากการวัดค่าความแข็งด้วยเครื่องวัด Shore Durometer พบว่าปริมาณเจลที่ต่างกันดังกล่าวของยางธรรมชาติไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งของยางคงรูป ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 5.6



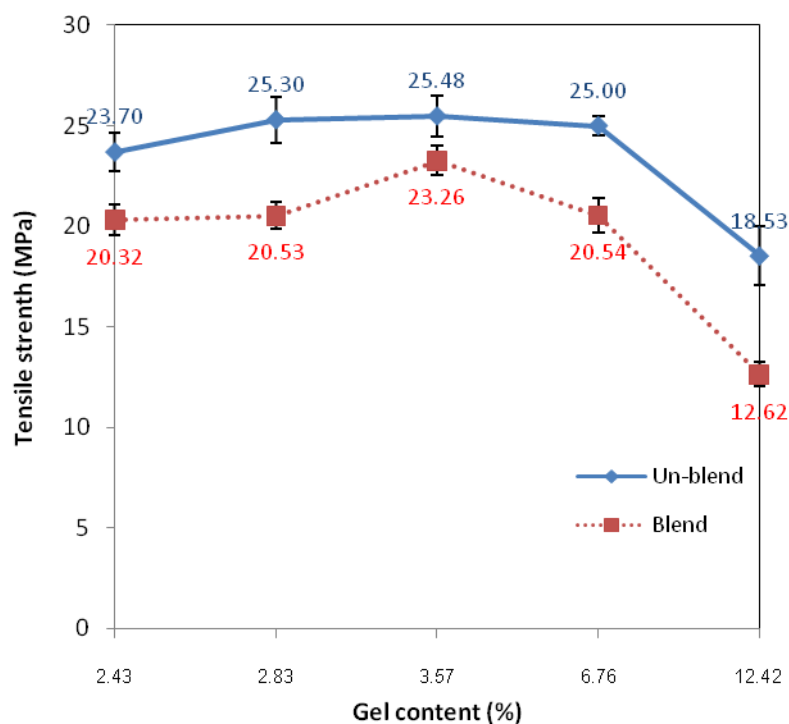
รูป 5.6 ผลของปริมาณเจลต่อค่าความแข็ง (hardness) ของยางธรรมชาติที่มีปริมาณเจลต่างกันทั้งกรณีที่ไม่ผสม (Un-blend) และผสม (Blend) ยางเอสปีอาร์

2. สมบัติแรงดึง (Tensile properties)

สมบัติแรงดึงได้แก่ ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) การยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) และ โมดูลัส (modulus) ซึ่งสมบัติต่างๆเหล่านี้สามารถวัดได้โดยการดึงชิ้นทดสอบมาตรฐานรูปคัมเบลล์

ที่อัตราการดึงคงที่ (constant crosshead speed) ด้วยเครื่องทดสอบที่เรียกว่า “Universal testing machine” ค่าที่วัดได้จากการทดสอบจะเป็นค่าแรงดึง (tension force) ที่แปรผันตามระยะการดึง (deformation)

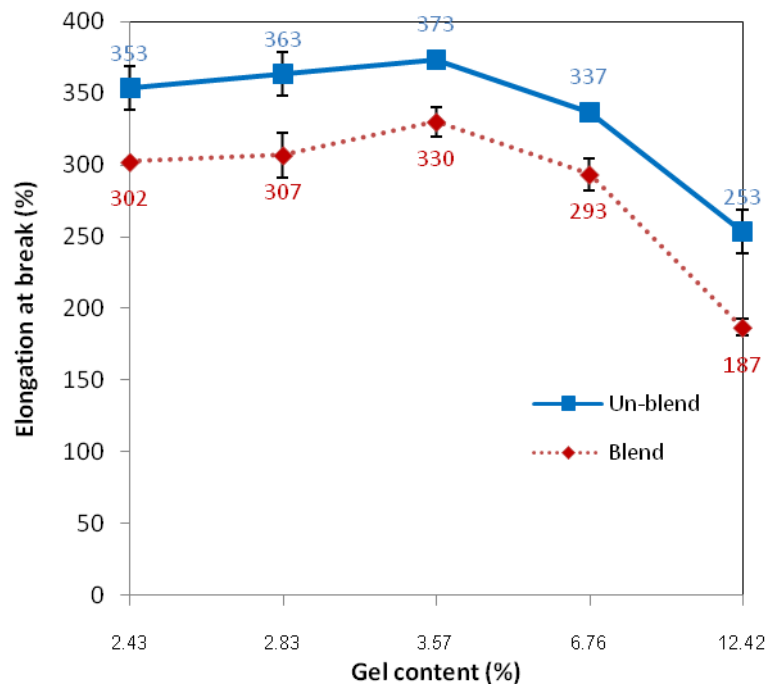
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบสมบัติแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D 412-98 โดยใช้เครื่อง Instron 5566 ความเร็วในการดึงขึ้นทดสอบ 500 มิลลิเมตรต่อนาที จากผลการทดลองซึ่งแสดงในรูป 5.7 จะเห็นว่าปริมาณเจลที่ต่างกันคือ 2.43 2.83 3.57 และ 6.76 เปอร์เซ็นต์ไม่ได้มีผลต่อค่า tensile strength นั่นคือยางดังกล่าวมีค่า tensile strength ที่ใกล้เคียงกัน ยกเว้นกรณีของยางที่มีค่าเจล 12.42 เปอร์เซ็นต์ ที่มีแนวโน้มของค่า tensile strength ลดลงอย่างเห็นได้ชัดทั้งกรณีของยางที่ผสมและไม่ผสมกับยาง SBR สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เกิดจากส่วนของเจลที่มีมากถึง 12.42 เปอร์เซ็นต์ส่งผลให้สารเคมียางรวมทั้งสารตัวเติมกระจายตัวในยางได้ไม่ดี จึงส่งผลให้ความสามารถในการส่งผ่านแรงระหว่างโมเลกุลยางและสารตัวเติมเกิดขึ้นได้ไม่ดี ทำให้ขึ้นทดสอบยางดังกล่าวมีค่า tensile strength ต่ำกว่ายางตัวอื่น



รูป 5.7 ผลของปริมาณเจลต่อค่า Tensile strength ของยางธรรมชาติที่มีปริมาณเจลต่างกันทั้งกรณีที่ไม่ผสม (Un-blend) และผสม (Blend) ยางเอสปีอาร์

เช่นเดียวกับค่าความสามารถในการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) ของขึ้นทดสอบซึ่งค่าความเค้น ณ จุดนี้ก็คือค่าความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) นั่นเอง จากผลการทดลองซึ่งแสดงด้วยรูป 5.7 จะ

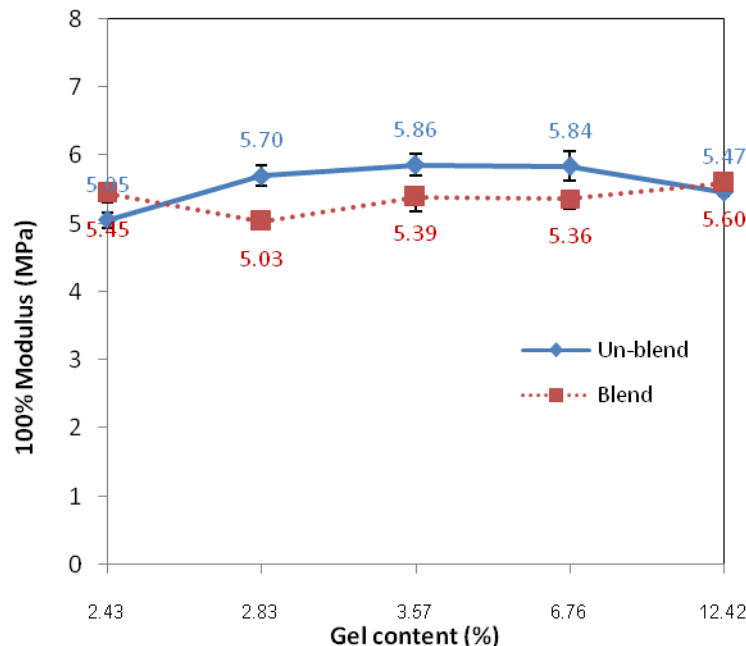
เห็นว่าค่าเจลที่ 2.43 2.83 3.57 และ 6.76 เปอร์เซ็นต์ไม่ได้ส่งผลต่อค่า Elongation at break ยกเว้นยางที่มีเจล 12.42 เปอร์เซ็นต์จะเห็นว่าค่า Elongation at break ลดลงอย่างเห็นได้ชัดทั้งกรณีของยางที่ผสมและไม่ผสมยางเอสปีอาร์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกันกับผลของค่า tensile strength โดยเกิดจากความสามารถในการส่งผ่านแรงระหว่างโมเลกุลยางและสารตัวเติมในชิ้นงาน



รูป 5.8 ผลของปริมาณเจลต่อค่า Elongation at break ของยางธรรมชาติที่มีปริมาณเจลต่างกันทั้งกรณีที่ไม่ผสม (Un-blend) และผสม (Blend) ยางเอสปีอาร์

สมบัติแรงดึงอีกอย่างที่สามารถบ่งชี้ถึงความแข็งแรง (stiffness) และระดับการเชื่อมโยงของยางคือ โมดูลัส สำหรับยางแล้วค่าโมดูลัสจะหมายถึงความเค้น (ในหน่วย MPa) ที่ต้องใช้ในการยืดยางให้ได้ค่าการยืดตัวตามที่กำหนดไว้ (โดยทั่วไปจะกำหนดการยืดตัวไว้ที่ 100% และ 300%) เช่น หากยางมีค่า 100% โมดูลัส (M_{100}) เท่ากับ 5 MPa กล่าวคือค่าโมดูลัสจะสะท้อนให้เห็นถึงความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางนั่นเอง

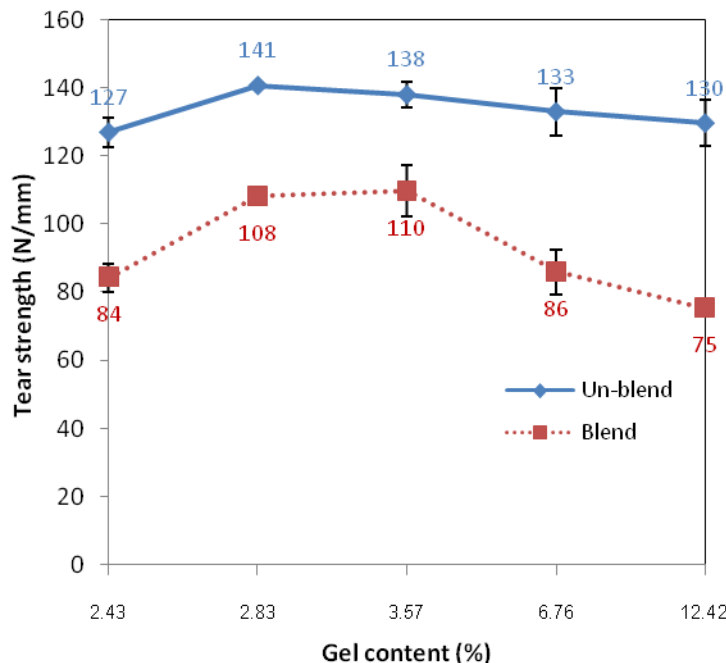
จากผลการทดลองวัดค่าโมดูลัสของการยืดตัวที่ 100% ของยางที่มีปริมาณเจลต่างๆกันซึ่งแสดงดังรูป 5.9 สามารถเห็นได้ชัดเจนว่าค่าเจลที่ต่างกันดังกล่าวนี้ไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าโมดูลัสที่การยืดตัว 100%



รูป 5.9 ผลของปริมาณเจลต่อค่า 100% Modulus ของยางธรรมชาติที่มีปริมาณเจลต่างกันทั้งกรณีที่ไม่ผสม (Un-blend) และผสม (Blend) ยางเอสปีอาร์

3. สมบัติการทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength)

ค่าความทนทานต่อการฉีกขาดคือแรงที่มากที่สุดต่อหนึ่งหน่วยความหนาที่ต้องใช้ในการฉีกตัวอย่างออกเป็น 2 ส่วน มีหน่วยเป็นนิวตันต่อมิลลิเมตร (N/mm) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบสมบัติการทนทานต่อการฉีกขาดตามมาตรฐาน ASTM D 624-98 โดยใช้เครื่อง Instron 5566 ความเร็วในการดึงขึ้นทดสอบ 500 มิลลิเมตรต่อนาที จากผลการทดลองซึ่งแสดงด้วยรูป 5.10 จะเห็นว่าในกรณีของสูตรยางธรรมชาติที่ผสมยางเอสปีอาร์ ค่าเจล 2.43 2.83 3.57 และ 6.76 เปอร์เซ็นต์ไม่ได้ส่งผลต่อค่า Tear strength ยกเว้นกรณีของยางที่มีปริมาณเจล 12.42 เปอร์เซ็นต์ที่ส่งผลให้ค่า Tear strength ลดลงเช่นเดียวกับกรณีของค่า Tensile strength และค่า Elongation at break ซึ่งเกิดจากส่วนของเจลที่มีมากกว่ายางตัวอื่นๆส่งผลให้สารตัวเติมกระจายในยางได้ไม่ดีซึ่งจะส่งผลต่อความสามารถในการส่งผ่านแรงของชิ้นทดสอบทำให้ชิ้นทดสอบยางคงรูปดังกล่าวมีค่า tear strength ที่ต่ำกว่ายางตัวอื่น



รูปที่ 5.10 ผลของปริมาณเจลต่อค่า Tear strength ของยางธรรมชาติที่มีปริมาณเจลต่างกันทั้งกรณีที่ไม่ผสม (Un-blend) และผสม (Blend) ยางเอสปีอาร์

4. ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ (Ageing resistance)

ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพต่อบรรยากาศนั้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 395 โดยทำการบ่มเร่งยางที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมงในตู้อบเร่งแบบ gear oven หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึงที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับสมบัติของยางก่อนทำการบ่มเร่ง

จากผลการทดลองซึ่งแสดงด้วยตาราง 5.1 พบว่าค่าความทนต่อแรงดึงและค่าการยืดตัว ณ จุดขาดหลังจากการบ่มเร่งของยางที่ผสมและไม่ผสมกับยางเอสปีอาร์มีแนวโน้มลดลงทุกค่าเจล เนื่องจากความร้อนที่ใช้ในการบ่มเร่งยางไปทำลายสายโซ่โมเลกุลยาง (เกิด chain scission) ทำให้โมเลกุลยางมีขนาดเล็กลง ซึ่งส่งผลให้ยางดังกล่าวมีค่าความทนทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดตัว ณ จุดขาดน้อยลง และจากตารางจะเห็นว่ายางที่มีปริมาณเจล 12.42 เปอร์เซ็นต์มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของความทนต่อแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับยางตัวอื่น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากยางดังกล่าวมีการผ่านความร้อนในขั้นตอนของการบ่มเร่งเจตนานานกว่ายางตัวอื่นๆซึ่งเมื่อโดนความร้อนอีกครั้งจากการผสมและการบ่มเร่งด้วยความร้อนหลังการคงรูปจึงทำให้โมเลกุลยางดังกล่าวไม่ได้ถูกทำลายไปกว่าเดิมมากนักจึงทำให้การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความร้อนของ Tensile strength และ Elongation at break เกิดขึ้นน้อย ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการทนต่อการถูกออกซิไดซ์ที่ดีกว่ายางตัวอื่น ส่วนค่าโมดูลัสของการยืดตัวที่ 100% พบว่ามีค่ามากกว่ายางที่ยัง

ไม่ผ่านการบ่มเร่ง เนื่องจากเมื่อยางได้รับความร้อนสายโซ่โมเลกุลยางจะขาด หรือพันธะเชื่อมโยงแบบ polysulfidic สลายเกิดเป็นพันธะใหม่ที่ใช้ก้ำมะถันต่อพันธะน้อยลง ทำให้เกิดพันธะการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5.1 แสดงการทนต่อแรงดึงหลังการบ่มเร่งของยางธรรมชาติที่มีปริมาณเจลดต่างกัน

ปริมาณเจลด	Tensile Strength (MPa)		100% Modulus (MPa)		Elongation at break (%)	
	หลังบ่มเร่ง	% การเปลี่ยนแปลง	หลังบ่มเร่ง	% การเปลี่ยนแปลง	หลังบ่มเร่ง	% การเปลี่ยนแปลง
Un-blend*						
2.43	20.23 ± 0.21	-3.47	6.41 ± 0.44	1.36	267 ± 5.77	-87
2.83	21.29 ± 0.03	-4.01	6.51 ± 0.06	0.80	280 ± 0.00	-83
3.57	22.63 ± 1.46	-2.85	7.11 ± 0.16	1.25	287 ± 15.28	-87
6.76	21.56 ± 1.68	-3.45	6.84 ± 0.52	1.00	277 ± 15.28	-60
12.42	17.5 ± 0.78	-1.03	7.02 ± 0.16	1.55	213 ± 5.77	-40
Blend**						
2.43	17.31 ± 0.61	-3.01	7.93 ± 0.21	2.48	190 ± 10.00	-112
2.83	15.67 ± 0.25	-4.86	8.42 ± 0.23	3.39	167 ± 5.77	-140
3.57	17.47 ± 0.64	-5.79	8.43 ± 0.05	3.04	180 ± 10.00	-150
6.76	17.58 ± 0.19	-2.96	8.53 ± 0.06	3.17	187 ± 5.77	-107
12.42	13.50 ± 1.47	0.88	8.15 ± 0.15	2.56	153 ± 15.28	-33

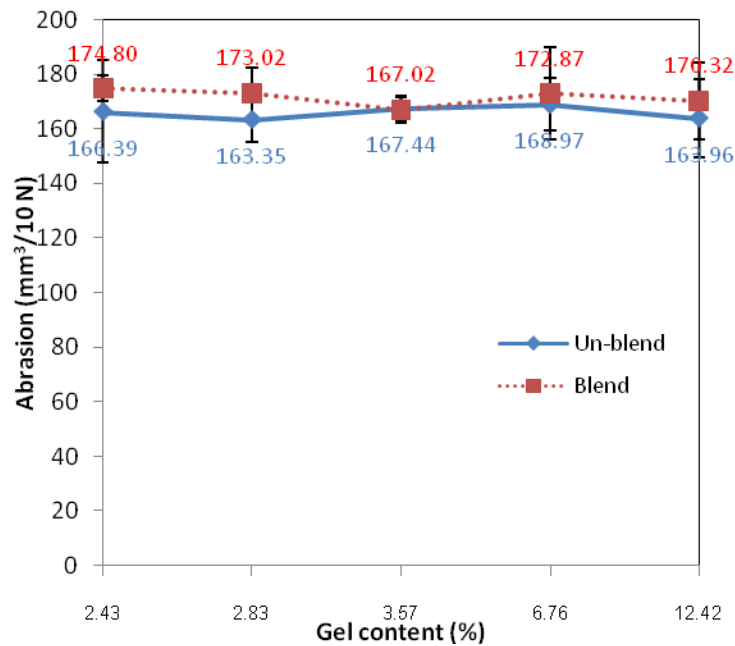
*ยางธรรมชาติสูตรที่ไม่ผสมยางเอสปีอาร์

**ยางธรรมชาติสูตรที่ผสมยางเอสปีอาร์

5. ความต้านทานต่อการการสึกหรอ (Abrasion resistance)

ความต้านทานต่อการการสึกหรอของยางหมายถึงความต้านทานของยางต่อการการสึกหรอเมื่อยางต้องสัมผัสกับพื้นผิวขรุขระที่เคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา การทดสอบดังกล่าวขึ้นทดสอบมาตรฐานจะถูกกด (ด้วยค่าแรงกดเฉพาะ) ลงบนพื้นผิวขรุขระที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ระบุไว้ในมาตรฐานการทดสอบ งานวิจัยนี้ทดสอบตามมาตรฐาน DIN 53516 โดยตัวอย่างยางจะถูกเตรียมเป็นชิ้นทดสอบรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ถูกกดด้วยแรงกดคงที่ที่ 10 นิวตันให้ไปสัมผัสกับพื้นผิวขรุขระคอร์ันดัม (Corundum) ที่พันอยู่รอบลูกกลิ้งที่หมุนอยู่ด้วยอัตราเร็ว 40 ± 1 รอบต่อวินาที ในระหว่างการทดสอบชิ้นทดสอบจะถูกบังคับให้เคลื่อนที่ตามแนวราบ (จากซ้ายไปขวา) ด้วยอัตราเร็ว 4.2 มิลลิเมตรต่อรอบการหมุนของลูกกลิ้ง จากนั้นทำการวัดน้ำหนักของชิ้นทดสอบ

ที่สูญเสียไปหลังจากที่ยางถูกขัดถูเป็นระยะทาง 40 เมตรหรือประมาณ 84 รอบการหมุนของลูกกลิ้ง ผลจากการทดสอบแสดงดังรูป 5.11 จากผลการทดลองพบว่าปริมาณเจลของยางธรรมชาติที่ต่างกันไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความทนทานต่อการสึกหรอทั้งกรณีของยางธรรมชาติที่ผสมและไม่ผสมกับยางเอสปีอาร์ดังรูป 5.10

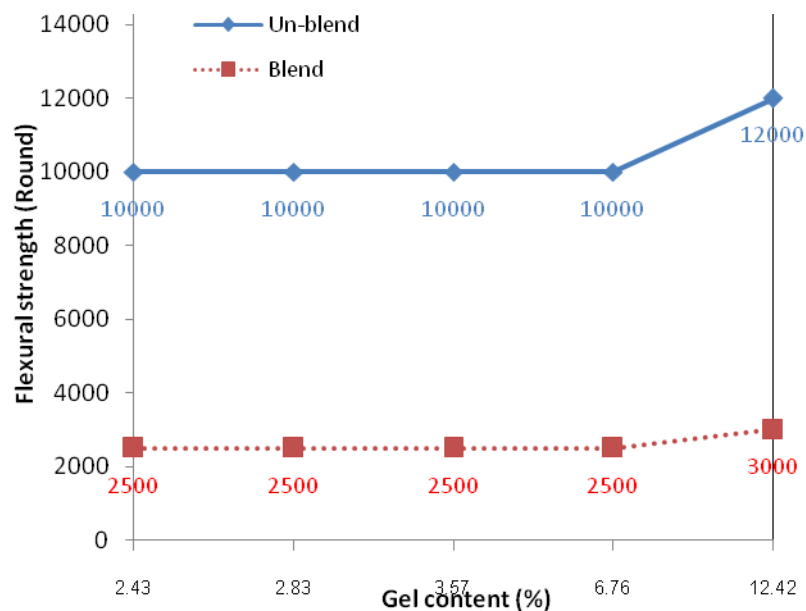


รูป 5.11 ผลของปริมาณเจลต่อค่าความทนทานต่อการขัดถูของยางธรรมชาติที่มีปริมาณเจลต่างกันทั้งกรณีที่ไม่ผสม (Un-blend) และผสม (Blend) ยางเอสปีอาร์

6. ความต้านทานต่อการหักงอ (Flexural strength)

การวัดความต้านทานต่อการหักงอเป็นการวัดจำนวนรอบของการปรากฏรอยแตกเมื่อทดสอบยางตามมาตรฐาน ASTM D 430 ด้วยเครื่องเค้นแม่เหล็ก (De Mattia flexing machine) ซึ่งทดสอบมีขนาดกว้าง 20 มิลลิเมตร หนา 6.3 มิลลิเมตร ยาว 152 มิลลิเมตรตรงกลางแผ่นมีร่องครึ่งวงกลมรัศมี 2.38 มิลลิเมตร

จากผลการทดลองซึ่งแสดงด้วยรูปที่ 5.12 พบว่ารอยแตกจะเกิดขึ้นได้เร็วในกรณีของยางที่มีปริมาณเจล 2.43 2.83 และ 3.57 และ 6.76 ซึ่งยางทั้งสี่ตัวนี้เกิดรอยแตกที่จำนวนรอบ 10000 รอบเท่ากันในกรณีของยางที่ไม่ผสมยางเอสปีอาร์ ส่วนยางที่ผสมกับยางเอสปีอาร์จะเกิดรอยแตกที่จำนวนรอบ 25000 รอบและจะเห็นว่ายางที่มีปริมาณเจล 12.42 เปอร์เซ็นต์จะเกิดรอยแตกช้ากว่ายางตัวอื่นนั่นคือ 1200 รอบในกรณีของยางไม่ผสมเอสปีอาร์และ 3000 รอบในกรณีของยางผสมเอสปีอาร์

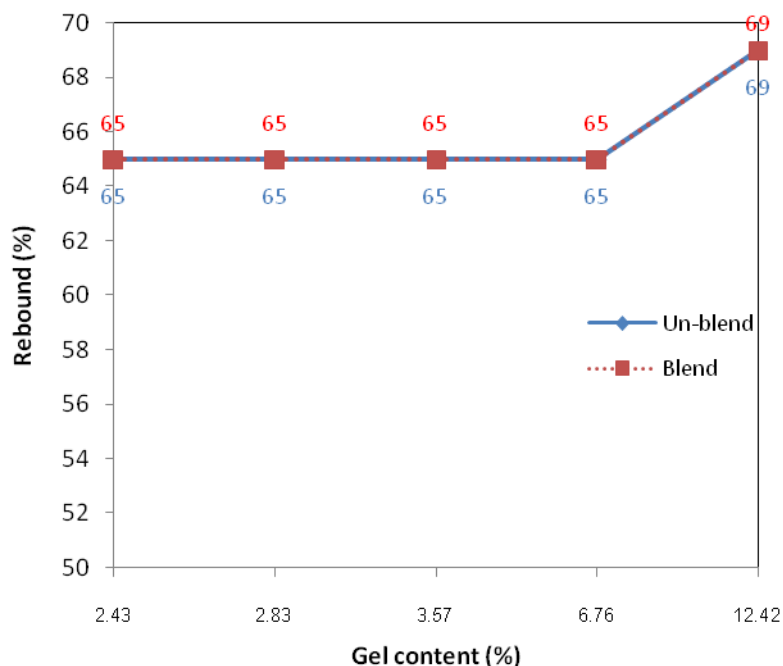


รูป 5.12 ผลของปริมาณเจลต่อค่า Flexural resistance ของยางธรรมชาติที่มีปริมาณเจลต่างกันทั้งกรณีที่ไม่ผสม (Un-blend) และผสม (Blend) ยางเอสปีอาร์

7. การทดสอบการกระด้างกระดอน (Rebound resilience)

การกระด้างกระดอนเป็นสมบัติที่บ่งชี้ถึงความสามารถของยางที่จะกลับคืนสู่รูปร่างเดิมอย่างรวดเร็ว ภายหลังจากที่ยางได้รับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างชั่วคราว การทดสอบสมบัติการกระด้างตัวในแนวดิ่งทดสอบโดยใช้เครื่อง Resilometer ตามมาตรฐาน ASTM D-2632 ชิ้นงานต้องมีความหนาอย่างน้อย 12.5 มิลลิเมตร ทดสอบโดยการปล่อยให้หัว Hammer ตกลงมากระทบกับชิ้นงานแล้วกระด้างขึ้นกลับให้อ่านค่าจุดที่กระด้างขึ้นนั้น

จากผลการทดสอบการกระด้างกระดอนซึ่งแสดงในรูปที่ 5.13 พบว่ายางที่มีเจล 2.43 2.83 3.57 และ 6.76 เปอร์เซนต์มีค่าการกระด้างกระดอน 65% เท่ากันทั้งในกรณีของยางที่ไม่ผสมและผสมกับยางเอสปีอาร์ ยกเว้นยางที่มีปริมาณเจล 12.42% ของทั้งสองสูตรการผสมที่จะให้ค่าการกระด้างกระดอนที่ 69% เพราะยางดังกล่าวมีส่วนของความเป็นอีลาสติคมากกว่ายางตัวอื่นๆ

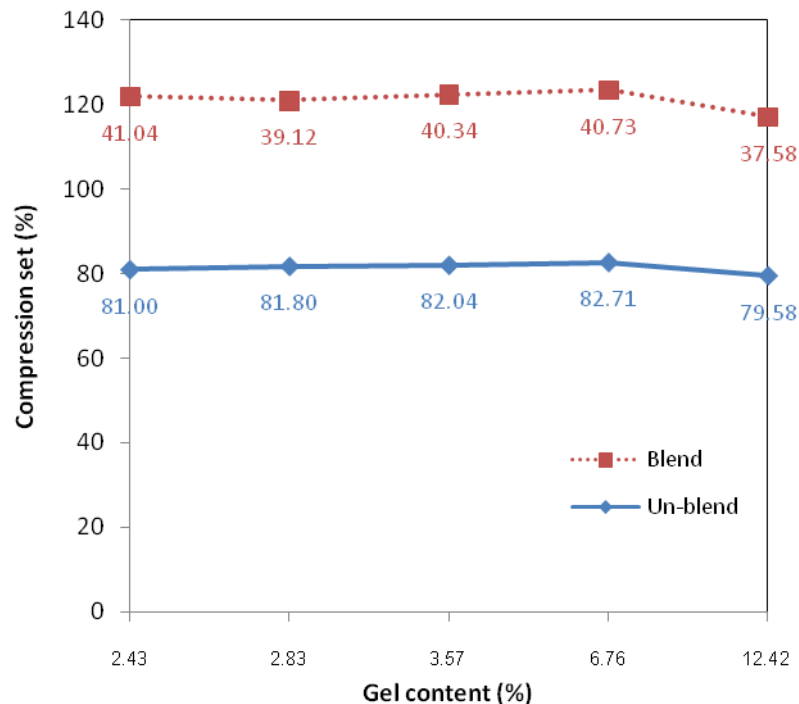


รูป 5.13 ผลของปริมาณเจลต่อค่า Rebound ของยางธรรมชาติที่มีปริมาณเจลต่างกันทั้งกรณีที่ไม่ผสม (Un-blend) และผสม (Blend) ยางเอสปีอาร์

8. การเซทตัว (Compression set)

คือการวัดรูปร่างและมิติของยางที่ได้กลับคืนมาหลังจากนำแรงกดออกไป ซึ่งจะบอกถึง ความสามารถในการรักษาสมบัติความยืดหยุ่นหลังจากยางได้รับแรงกดเป็นระยะเวลาหนึ่งคำนวณเป็นร้อยละของปริมาณที่ไม่สามารถกลับคืนรูปร่างเดิมได้ ซึ่งในงานนี้ทดสอบโดยใช้มาตรฐาน ASTM D 395 ขั้นตอนทดสอบมีลักษณะเป็นแท่งกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 29.0 ± 0.5 มม. หนา 12.5 ± 0.5 มม. อัดให้ผิดรูป 25% ของความหนาอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดแล้วนำยางออกจากแผ่นอัดทันที ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาทีบนพื้นที่ไม่นำความร้อนแล้วจึงวัดความหนารายงานผลในรูปของเปอร์เซ็นต์ของความหนาเดิม

จากรูป 5.14 พบว่าปริมาณยางที่มีเจลต่างกันของยางทั้งที่ไม่ผสมและผสมยางเอสปีอาร์มีค่าความสามารถในการคืนตัวที่ใกล้เคียงกันซึ่งแสดงว่าปริมาณยางที่มีเจลตั้งต้นต่างกันไม่ได้มีผลต่อค่าการคืนตัวของยางทั้งสองสูตรการผสม



รูป 5.14 ผลของปริมาณเจลต่อค่า Compression set ของยางธรรมชาติที่มีปริมาณเจลต่างกันทั้งกรณีที่ไม่ผสม (Un-blend) และผสม (Blend) ยางเอสบีอาร์

ตอนที่ 6 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าสามารถพัฒนาวิธีการหาค่าเจลได้ถูกต้องและรวดเร็วขึ้นโดยใช้ความเข้มข้นในการละลายยางที่ต่ำ คือที่ 0.1% w/v โดยให้ความร้อนที่ อุณหภูมิ 50°C ในขณะที่ละลายและมีการเขย่าที่ชั่วโมงที่ 2.5 และ 5 และทำการเก็บเจลด้วยวิธีการเซนตริฟิวจ์ที่ความเร็วรอบ 8,000 rpm เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งจากวิธีการทั้งหมดนี้ทำให้ได้ค่าเจลที่ใกล้เคียงกับวิธี *WD 2000 Annex A* และ Control method แต่มีข้อดีคือใช้ระยะเวลาที่สั้นกว่ามากซึ่งสามารถหาค่าเจลได้ภายใน 1 วันและยังใช้การเซนตริฟิวจ์ที่ความเร็วรอบที่ต่ำกว่าใช้เวลาสั้นกว่าทำให้สิ้นเปลืองพลังงานน้อยกว่าและลดข้อจำกัดในด้านของเครื่องมือทำให้สามารถทำได้ในห้องปฏิบัติการส่วนใหญ่ได้ดังนั้นวิธีการที่พัฒนาใหม่นี้จึงเป็นวิธีที่ดีวิธีหนึ่งที่สามารถนำไปใช้ในการหาค่าเจลที่ได้ความถูกต้อง รวดเร็วและพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการหาค่าเจลคือ ความเข้มข้นของการละลายยาง อุณหภูมิ และระยะเวลาของการละลาย

นอกจากนี้พบว่าปริมาณเจลในยางธรรมชาติ (STR 5L) จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเร่ง (Storage hardening) นั่นคือค่าเจลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจาก 2.43 3.57 6.76 และ 12.42 เปอร์เซ็นต์ตามเวลาของการเร่งยางที่เพิ่มขึ้น 0, 6, 12, 24 และ 48 ชั่วโมงตามลำดับและจะเห็นว่าเวลาการบ่มเจลที่ 0 แล 6 ชั่วโมงไม่ได้ทำให้ยางมีค่าเจลที่ต่างกัน จากการนำยางที่มีปริมาณเจลที่ต่างกันดังกล่าวไปหาค่าความอ่อนตัวเริ่มต้น (P_0) และค่า

ความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ซึ่งเป็นค่าเริ่มต้นที่บ่งบอกถึงสมบัติในการแปรรูปของยาง (Processability) สามารถสรุปได้ว่าปริมาณเจลที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้โมเลกุลยางเคลื่อนที่ได้ช้าลงเนื่องจากเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ทั้งค่า P_0 และค่า Mooney viscosity ของยางสูงขึ้น ในด้านของสมบัติเชิงกล (Physical properties) พบว่าปริมาณเจลที่ต่างกันคือ 2.43 2.83 3.57 6.76 เปอร์เซนต์ไม่ได้ส่งผลให้ยางมีสมบัติเชิงกลแตกต่างกันแต่อย่างใดทั้งในกรณีของสูตรยางที่ผสมและไม่ผสมกับยางเอสปีอาร์ ยกเว้นสมบัติเชิงกลของยางที่ทำการบ่มเจลเป็นเวลาถึง 48 ชั่วโมงซึ่งพบว่ายางดังกล่าวจะมีสมบัติเชิงกลบางอย่างเช่น Tensile strength Elongation at break และ Tear strength ต่ำกว่ายางตัวอื่นๆซึ่งเชื่อว่าการผ่านความร้อนในการบ่มเจลดานกว่ายางตัวอื่นจึงทำให้สายโซ่โมเลกุลบางส่วนโดนทำลายและส่วนของเจلدังกล่าวจะไปขัดขวางการกระจายตัวของสารเคมีและสารตัวเติมในยางซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการส่งผ่านแรงกระทำในชิ้นงานเกิดขึ้นได้ไม่ดี ทำให้ยางดังกล่าวมีสมบัติเชิงกลต่ำกว่ายางตัวอื่นๆ อย่างไรก็ตามพบว่าส่วนของปริมาณเจลที่ต่างกันยางธรรมชาติจะมีผลอย่างมากต่อยางดิบก่อนการผสม และจะมีผลกับยางคงรูปอย่างมีนัยสำคัญ เฉพาะค่าของเจลที่ต่างกับตัวอื่นก่อนข้างเยอะเช่นยางที่มีเจล 12.42 เปอร์เซนต์จากการบ่มเจลที่ 48 ชั่วโมงเป็นยางตัวที่เริ่มมีสมบัติเชิงกลเปลี่ยนไปจากยางตัวอื่น และพบว่าผลของปริมาณเจลในยางธรรมชาติทั้งที่ผสมและไม่ผสมยางเอสปีอาร์ให้ผลการทดลองที่มีแนวโน้มเป็นไปในทางเดียวกัน

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Eng, A.H. Kawahara, S. AND Tanaka, Y., *Rubber Chem. Technol.* **67**, 159-168 (1994)
- [2] Tanaka, Y., *Rubber Chem. Technol.*, **74**, 355-375 (2001)
- [3] Tarachiwin, L. Sakdapipanich, J.T. AND Tanaka, Y., *Kautsch Gummi Kunst.* **3**, 115 (2005)
- [4] Eng, A.H. Ejiri, S. Kawahara, S. AND Tanaka, Y., *J. Appl. Polym. Sci. Appl. Polym. Symp.*, **53**, 5-14 (1994)
- [5] Tarachiwin, L. Sakdapipanich, J. Ute, K. Kitayama, T. AND Tanaka, Y., *Biomacromolecules*, **6**, 1851-1857 (2005)
- [6] Tarachiwin, L. Sakdapipanich, J. Ute, K. Kitayama, T. AND Tanaka, Y., *Biomacromolecules*, **6**, 1858-1863 (2005)
- [7] Tangpakdee, J. AND Tanaka, Y., *Rubb. Chem. Technol.*, **70**, 707-713 (1997)
- [8] Sakdapipanich, J.T. Tanaka, Y. Jacob.J.L. AND D'Auzac, J., *Rubb. Chem. Technol.*, **72**, 229-307 (1999)
- [9] Tarachiwin, L. Sakdapipanich, J.T. AND Tanaka, Y., *Rubber Chem. Technol.*, **76**, 1177-1184 (2003)

- [10] Tarachiwin, L. Sakdapipanich, J.T. AND Tanaka, Y., *Rubber Chem. Technol.*, **76**, 1185-1193 (2003)
- [11] Yunyongwattanakorn, J. Tanaka, Y. kawahara, S. Klinklai, W. AND Sakdapipanich, J.T., *Rubb. Chem. Technol.*, **76**, 1228-1240 (2003)
- [12] Yunyongwattanakorn, J. AND Sakdapipanich, J.T., *Rubb. Chem. Technol.*, **79**, 72-81 (2006)
- [13] Amnuaypornsi, S. Nimpai boon, A. AND Sakdapipanich, J., *Kautsch Gummi Kunst.* **3**, 88-92 (2009)
- [14] Mekkiengkrai, D., Sakdapipanich, J.T., Tanaka Y., *Rubber Chem. Technol.*, **79**, 366 (2006).
- [15] ดร.พงษ์ธร แซ่ฮ้อย. รศ.ดร. ชاکริต สิริสิงห. 2550. กระบวนการผลิตและทดสอบยาง. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค).
- [16] รศ.ดร. จิตต์ศักดิ์ ศักดาภิพาณิชย์. 2553. เทคโนโลยียางธรรมชาติ. บริษัทเทคโนโลยี คอมมิวนิเคชั่นส์ จำกัด.

ลงนาม.....

รศ.จิตต์ศักดิ์ ศักดาภิพาณิชย์

หัวหน้าโครงการ