



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของโฟมยางธรรมชาติผสมวัสดุ
คาร์บอนที่ได้จากกระบวนการเชิงเคมีความร้อนจากเปลือกทุเรียน

Mechanical properties and morphology of natural rubber foam
composite with carbon produced by durian bark via thermo-chemical
conversion process

จัดทำโดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พลวัฒน์ เจริญธรรมจรชัย

สังกัด สำนักงานการศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

รายงานฉบับสมบูรณ์นี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยแบบบูรณาการ (นักวิจัยรุ่นใหม่)

งบประมาณเงินกองทุนวิจัยและพัฒนา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๖๒

มหาวิทยาลัยบูรพา

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากการวิจัยแบบบูรณาการ (นักวิจัยรุ่นใหม่) งบประมาณ
เงินกองทุนวิจัยและพัฒนา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๖๒ มหาวิทยาลัยบูรพา

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่อำนวยความสะดวกในเรื่องสถานที่
และเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พลวัฒน์ เจริญธรรมจรชัย

กุมภาพันธ์ 2564

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของอนุภาคคาร์บอนที่ได้จากการสังเคราะห์จากเปลือกทุเรียนด้วยกระบวนการเชิงเคมีความร้อนต่อคุณสมบัติของโพลีเอทิลีน โดยอนุภาคคาร์บอนดังกล่าวเมื่อสังเคราะห์แล้วจะนำไปวัดขนาดอนุภาคและรูปร่าง รวมถึงค่าการกระจายตัวของอนุภาค จากการศึกษาพบว่าอนุภาคมีลักษณะทางสัณฐานวิทยาเป็นแผ่น มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 32.45 ไมโครเมตร และค่าการกระจายตัวของอนุภาคมีขนาดเล็กประมาณ 21 – 40 ไมโครเมตร เมื่อนำอนุภาคคาร์บอนดังกล่าวไปผสมกับโพลีเอทิลีน พบว่าปริมาณการใส่อนุภาคที่มากขึ้นจะส่งผลให้พฤติกรรมการเชื่อมขวางโมเลกุลของโพลีเอทิลีนเกิดได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ขนาดของพองอากาศภายในมีขนาดเล็กและค่าความหนาแน่นซึ่งแสดงถึงปริมาณพองอากาศที่อยู่ภายในมีค่าลดลง เนื่องจากการเชื่อมขวางโมเลกุลที่เกิดเร็วขึ้นทำให้พองอากาศถูกกักเก็บไว้ในเนื้อเยื่อ แต่คุณสมบัติทางกลดีขึ้น เนื่องจากอนุภาคคาร์บอนเป็นสารเสริมแรง นอกจากนี้อัตราการขยายตัวทางความร้อนของโพลีเอทิลีนมีค่าลดต่ำลง เนื่องจากคุณสมบัติการนำความร้อนของอนุภาคคาร์บอนที่เติมลงไป ส่วนค่าการนำความร้อนของโพลีเอทิลีนไม่เปลี่ยนแปลงแม้ว่าจะเติมอนุภาคคาร์บอนเพิ่มขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติการเป็นฉนวนทางความร้อนของอากาศภายในเนื้อเยื่อมีมากขึ้น นอกจากนี้พบว่าอนุภาคดังกล่าวสามารถนำไปใช้แทนเขม่าดำที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางได้ เนื่องจากคุณสมบัติของโพลีเอทิลีนที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ: โพลีเอทิลีน, อนุภาคคาร์บอน, เปลือกทุเรียน, สมบัติเชิงกล, สมบัติทางความร้อน

Abstract

This research focused on effect of carbon content synthesized from durian bark via thermo-chemical process on foam formation, cure kinetics, mechanical and thermal properties of natural rubber (NRF) / carbon composites. The synthesized carbon exhibited platelet - like structure with average particle size around 32.45 micrometers. Moreover, the particle size distribution almost showed the small particle size around 21 - 40 micrometers. Although the result revealed that the high amount of synthesized carbon affected the fast cure kinetics of sulfur vulcanization reaction resulting in small bubble size in natural rubber foam matrix with low bulk density, the mechanical properties of NRF / carbon composites increased due to the reinforcing character of carbon materials. Furthermore, the coefficient of thermal expansion also reduced at high carbon content because of high thermal conductivity of carbon while the thermal conductivity of NRF / carbon composites did not change because the low bulk density of rubber foam referring to high gas bubble which was the high thermal insulation properties could obliterate the thermal conductivity of synthesized carbon. In addition, the result of NRF composite with synthesized carbon from durian bark could be used as the carbon filler instead of carbon black in rubber industries caused by the high performance of reinforcing effect of synthesized carbon.

Keywords: Natural rubber foam, Carbon, Durian bark, Mechanical properties, Thermal properties

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ข
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัยและพัฒนา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม	3
2.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber : NR)	3
2.2 ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชัน	4
2.3 สารเชื่อมขวางโมเลกุล	5
2.4 ลักษณะการวัลคาไนซ์ (cure characteristics)	5
2.5 สารตัวเร่งปฏิกิริยา (accelerators)	7
2.6 การสลายตัวด้วยความร้อนของสารก่อโฟม	9
2.7 ผลกระทบของชนิดอนุภาคคาร์บอน	12
2.8 อิทธิพลของความดันและอุณหภูมิต่อพฤติกรรมการบ่ม สันฐานวิทยา และสมบัติเชิงกลของโฟมยางธรรมชาติ	13
บทที่ 3 ระเบียบวิธีการดำเนินการวิจัย	14

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง	16
4.1 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคคาร์บอนที่ได้จากการสังเคราะห์จากเปลือกทุเรียน	16
4.2 พฤติกรรมการบ่มของโพลีเมอร์ธรรมชาติที่ปรับปริมาณอนุภาคคาร์บอนจากเปลือกทุเรียน	17
4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ธรรมชาติที่ปรับปริมาณอนุภาคคาร์บอนจากเปลือกทุเรียน	19
4.4 สมบัติเชิงกลของโพลีเมอร์ธรรมชาติที่ปรับปริมาณอนุภาคคาร์บอนจากเปลือกทุเรียน	21
4.5 สมบัติเชิงความร้อนของโพลีเมอร์ธรรมชาติที่ปรับปริมาณอนุภาคคาร์บอนจากเปลือกทุเรียน	22
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	24
5.1 สรุปผลการทดลอง	24
5.2 ข้อเสนอแนะ	24
บรรณานุกรม	25
ภาคผนวก	29
ก. ตัวอย่างการคำนวณ	30
ข. ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง Universal testing machine	31

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย ในการทำการวิจัย 16 เดือน	14
4.1 แสดงขนาดฟองอากาศและความหนาแน่นของโฟมยางธรรมชาติที่ทำการปรับปริมาณ คาร์บอนจากเปลือกทุเรียน	20
4.2 แสดงค่าสมบัติเชิงกลของโฟมยางธรรมชาติที่ปรับปริมาณคาร์บอนจากเปลือกทุเรียน	21
4.3 แสดงค่าสมบัติเชิงความร้อนของโฟมยางธรรมชาติที่ปรับปริมาณคาร์บอนจากเปลือกทุเรียน	22

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ	3
2.2	ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชัน	4
2.3	การเกิดการเชื่อมขวางโมเลกุลในยางด้วยกำมะถัน	5
2.4	ลักษณะของการเชื่อมขวางโมเลกุลของยางด้วยเครื่อง Moving die rheometer	6
2.5	โครงสร้างทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา กลุ่ม Sulfenamide	8
4.1	กราฟแสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคคาร์บอน (Size distribution) จากการสังเคราะห์เชิงเคมีความร้อนของเปลือกทุเรียน	16
4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดกับเวลาที่ปรับปริมาณอนุภาคคาร์บอน จากเปลือกทุเรียน	17
4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Degree of cure กับ Cure rate	18
4.4	ภาพจากกล้อง Digital Microscope : (A) NRF (B) NRF-CDB1 (C) NRF-CDB2 (D) NRF-CDB3 (E) NRF-CDB4 (F) NRF-CDB5	19

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันเขตพื้นที่ภาคตะวันออกของประเทศไทยเป็นศูนย์กลางอุตสาหกรรมและการเกษตรที่สำคัญสำหรับกิจกรรมทางการเกษตรของภาคตะวันออกจะมีวัสดุเหลือทิ้งทางธรรมชาติที่ได้จากการบริโภค รวมไปถึงที่ใช้ในการแปรรูปในทางอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก ในงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยต้องการที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวและช่วยเหลือเกษตรกร โดยมีความสนใจในการนำเปลือกทุเรียน ซึ่งเป็นวัสดุอินทรีย์ทางธรรมชาติที่มีปริมาณมากในเขตพื้นที่ภาคตะวันออกมาผลิตเป็นวัสดุคาร์บอนและนำมาใช้ทดแทนเขม่าดำซึ่งเป็นสารเสริมแรงในอุตสาหกรรมยางธรรมชาติ โดยในปัจจุบันพบว่า ประเทศไทยเป็นผู้ส่งออกยางธรรมชาติไปขายยังต่างประเทศในรูปของยางแผ่นเป็นจำนวนมาก ถือได้ว่าเป็นผู้ส่งออกรายใหญ่รายหนึ่งของโลก แต่เกษตรกรและผู้ส่งออกกลับทำกำไรจากผลผลิตจากยางธรรมชาติได้ไม่มากนัก ทั้งนี้เนื่องมาจากราคายางธรรมชาติในรูปของน้ำยางและยางแผ่นที่เป็นวัตถุดิบป้อนเข้าสู่กระบวนการของอุตสาหกรรมยางนั้นค่อนข้างต่ำ เนื่องจากถูกกดราคาจากบริษัทผู้ผลิตที่นำยางธรรมชาติไปใช้เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ แต่บริษัทเหล่านั้นซึ่งเป็นบริษัทต่างชาติกลับทำกำไรจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากยางธรรมชาติได้มากกว่าส่วนต่างทางธุรกิจ นอกจากนี้ สำหรับบริษัทหรือผู้ประกอบการอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดเล็กที่ผู้ประกอบการเป็นคนไทย หากต้องการประกอบธุรกิจในอุตสาหกรรมดังกล่าวก็ต้องซื้อเทคโนโลยีและสูตรการผลิตจากต่างประเทศ เนื่องจากในประเทศไทย ยังมีผู้มีความรู้ความสามารถในการออกสูตรผสมของยางเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมดังกล่าวจำนวนน้อยมาก ทำให้ไม่สามารถขายผลิตภัณฑ์ในราคาที่สามารถแข่งขันกับบริษัทขนาดใหญ่ของต่างชาติซึ่งมีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีและนวัตกรรมเป็นของตนเองได้ ส่งผลให้ประเทศไทยไม่สามารถผ่านพ้นกับดักรายได้ปานกลางทางเศรษฐกิจได้ เพื่อให้เกษตรกรไทย และอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ที่เป็นของคนไทยในประเทศไทยได้รับผลประโยชน์จากการแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้อย่างเป็นรูปธรรม คณะผู้วิจัยมีความเห็นว่า หากเราสามารถพัฒนาเทคโนโลยีและนวัตกรรมเป็นของตนเองได้ และทำการผลิตเพื่อใช้และส่งออกผลิตภัณฑ์ที่เป็นเทคโนโลยีดังกล่าวของเราเองก็จะสามารถแก้ไขปัญหาราคายางธรรมชาติและปัญหาทางด้านราคาที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากผู้ผลิตรายใหญ่จากต่างประเทศได้ ทั้งนี้โครงการและแนวคิดดังกล่าวจะประสบความสำเร็จเป็นรูปธรรมได้จะต้องมีแรงสนับสนุนจากภาครัฐและได้รับความร่วมมือจากภาครัฐและเอกชนของประเทศไทย เพื่อขับเคลื่อนเทคโนโลยีผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติของประเทศให้เป็นที่ยอมรับจากทั้งในและต่างประเทศต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาสูตรโพลิเมอร์ยางธรรมชาติที่ผสมวัสดุคาร์บอนจากเปลือกทุเรียนที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์เชิงเคมีความร้อน เพื่อให้มีคุณสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน

1.3 ขอบเขตของการวิจัยและพัฒนา

1.3.1 ศึกษาพฤติกรรมและการเกิดโพลีเมอร์อย่างธรรมชาติและ การเชื่อมขวางโมเลกุลของโพลีเมอร์อย่างธรรมชาติด้วยกัมมะถัน

1.3.2. ศึกษาลักษณะโครงสร้างของโพรงอากาศภายในโพลีเมอร์อย่างธรรมชาติซึ่งมีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมและการเกิดโพลีเมอร์และการเชื่อมขวางโมเลกุลของโพลีเมอร์ นอกจากนี้คุณสมบัติดังกล่าวยังส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลที่ได้

1.3.3. ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของโพลีเมอร์อย่างธรรมชาติที่ได้รับการพัฒนาสูตรขึ้นมาจาก การใช้วัสดุคาร์บอนที่สังเคราะห์ขึ้น เพื่อพัฒนาและปรับปรุงสูตรใหม่สามารถใช้งานได้เทียบเท่าการใช้เขม่าดำเป็นสารเสริมแรง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1. ได้ทราบถึงกระบวนการควบคุมการเกิดโพลีเมอร์อย่างธรรมชาติเมื่อทำการผสมอนุภาคคาร์บอนที่ได้จากการสังเคราะห์เชิงเคมีความร้อน

1.4.2. ได้ทราบถึงคุณสมบัติทางสัณฐานวิทยาและคุณสมบัติต่างๆของโพลีเมอร์อย่างธรรมชาติเมื่อผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยการกดอัดด้วยความร้อน

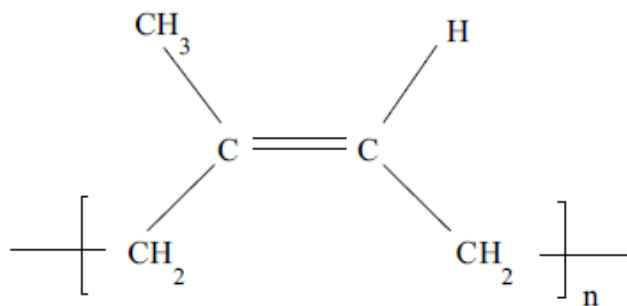
บทที่ 2

ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม

2.1 ยางธรรมชาติ (natural rubber : NR)

ยางธรรมชาติมีสมบัติเด่น คือ มีความยืดหยุ่นสูง (elasticity) ทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำ มีความทนต่อแรงดึง (tensile strength) สูง มีความทนต่อการฉีกขาด (tear strength) สูง มีสมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) ที่ดี มีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำระหว่างการใช้งาน มีความต้านทานต่อการล้าตัว (fatigue resistance) ที่สูง มีความต้านทานต่อการขัดถูสูง (abrasion resistance) ยางธรรมชาติจัดเป็นยางอเนกประสงค์ที่สามารถนำไปใช้ในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย เช่น ถูมือ ยางรัดของ ท่อ ยางล้อรถบรรทุก ยางล้อรถยก ยางล้อเครื่องบิน หรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิต ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น สำหรับข้อดีของยางธรรมชาติ ได้แก่ ไม่ทนต่อโอโซน ความร้อน แสงแดด น้ำมัน ละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน โทลูอินและสารเคมีอื่น ๆ [1,2]

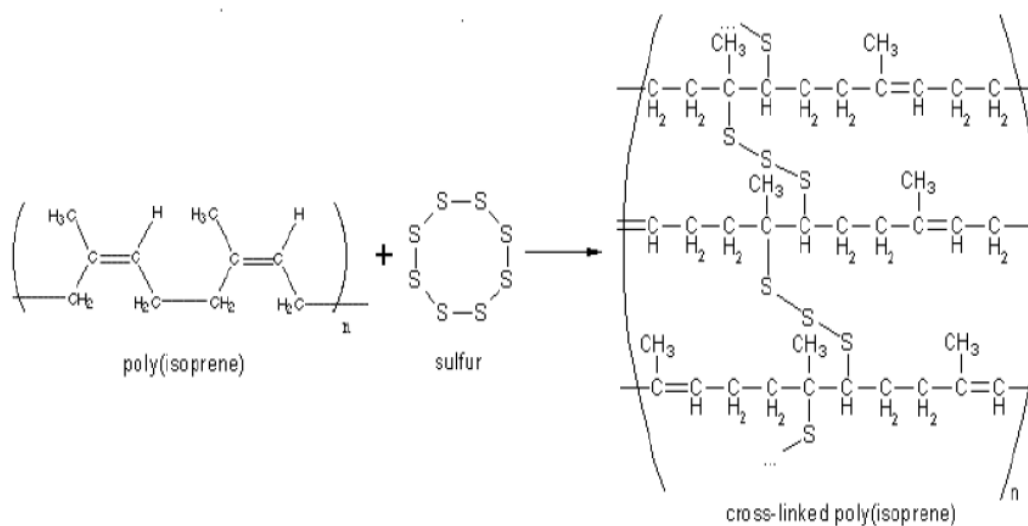
อย่างไรก็ตามยางธรรมชาติมีข้อจำกัดในการใช้งานเนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ต่ำและลักษณะทางกายภาพไม่เสถียรขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ด้วยเหตุนี้จึงมีการผสมยางกับสารเคมีต่าง ๆ เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำและสารตัวเร่งต่าง ๆ จะทำให้คุณสมบัติยางดีขึ้น



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ [3]

2.2 ปฏิกริยวัลคาไนซ์เซชัน

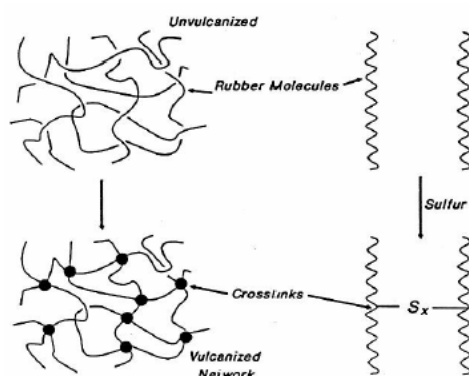
ในกระบวนการเกิดปฏิกริยวัลคาไนซ์เซชัน การให้ความร้อนเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะทำให้ยางเกิดการเชื่อมขวางโมเลกุลที่แข็งแรงได้ จึงจำเป็นต้องเพิ่มสารเคมีบางอย่างในกระบวนการผสมเพื่อเร่งและเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดปฏิกริยาการเชื่อมขวางโมเลกุล สารกระตุ้นที่ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดปฏิกริยวัลคาไนซ์เซชัน คือ zinc oxide (ZnO) ส่วน steric acid จะช่วยทำให้สารเคมีตัวอื่น ๆ กระจายตัวได้ดีในเนื้อยางมากขึ้น นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกริยาเป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการเร่งปฏิกริยวัลคาไนซ์เซชันของการเกิดการเชื่อมขวางโมเลกุลในยาง ในอุตสาหกรรมมีตัวเร่งปฏิกริยาจำนวนมากที่สามารถใช้ในการเกิดปฏิกริยวัลคาไนซ์เซชัน ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกริยากลุ่มปฐมภูมิประกอบไปด้วย thiazoles, sulfenamide และตัวเร่งปฏิกริยากลุ่มทุติยภูมิประกอบด้วย guanidines, thiurams, dithiocarbamates และ dithiophosphates โดยทั่วไปตัวเร่งปฏิกริยากลุ่มทุติยภูมิจะใช้ร่วมกับตัวเร่งปฏิกริยากลุ่มปฐมภูมิเพื่อเพิ่มอัตราของการเกิดปฏิกริยวัลคาไนซ์เซชัน เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกันของตัวเร่งปฏิกริยา ความเร็วในการเกิดปฏิกริยาและกลไกทางเคมีที่แตกต่างกัน จึงจำเป็นต้องเลือกตัวเร่งที่เหมาะสมในการทำงาน โดยในงานวิจัยนี้ใช้กลุ่มตัวเร่งปฏิกริยาชนิด Sulfenamide เพราะ สารตัวเร่งปฏิกริยาในกลุ่มนี้ทำให้ยางมีระยะเวลาสกรอตที่ยาวขึ้น แต่ให้อัตราเร็วในการวัลคาไนซ์หรือการเชื่อมขวางโมเลกุลสูงและให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูง [4,5,6]



รูปที่ 2.2 ปฏิกริยวัลคาไนซ์เซชัน [5,6]

2.3 สารเชื่อมขวางโมเลกุล

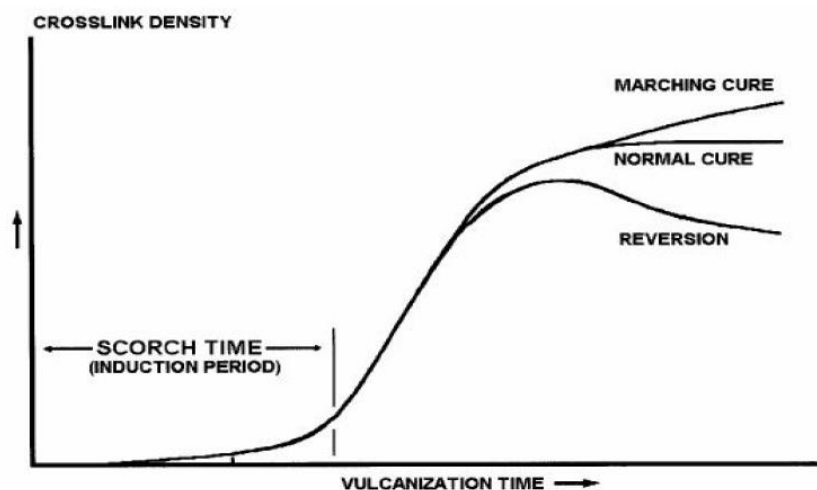
สารเชื่อมขวางโมเลกุล คือ สารที่ทำให้โมเลกุลยางเกิดการเชื่อมโยงกันเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติ ผ่านปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่า ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชัน ยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีความยืดหยุ่นสูง และมีสมบัติที่เสถียรไม่เปลี่ยนแปลงรูปร่าง ตามอุณหภูมิมากนัก สารที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ กำมะถัน



รูปที่ 2.3 การเกิดการเชื่อมขวางโมเลกุลในยางด้วยกำมะถัน [7]

2.4 ลักษณะการวัลคาไนซ์ (cure characteristics)

นอกจากสมบัติการไหลแล้ว ลักษณะการวัลคาไนซ์ เช่น ระยะเวลาสกอ์ต (scorch time) และระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ (curing time) ก็จัดเป็นสมบัติสำคัญของยางที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิต เพราะถ้ายางเกิดการเชื่อมขวางโมเลกุลที่เร็วเกินไปหรือมีระยะเวลาสกอ์ตที่สั้นเกินไปอาจก่อให้เกิดปัญหาในระหว่างการขึ้นรูปได้ เช่น ยางไหลได้ไม่เต็มแม่พิมพ์ เป็นต้น ดังนั้น ในการออกสูตรเคมียาง จึงต้องออกสูตรผสมให้มีระยะเวลาสกอ์ตที่ยาวเพียงพอที่จะไม่ก่อให้เกิดปัญหาในกระบวนการผลิต และควรมีระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ที่สั้นเพื่อทำให้ต้นทุนการผลิตลดลงและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ยิ่งไปกว่านั้น การทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางยังเป็นหนึ่งในขั้นตอนของการควบคุมคุณภาพในกระบวนการผลิตอีกด้วย เช่น หากมีการชั่งน้ำหนักของสารเคมีในกลุ่มที่ทำให้ยางวัลคาไนซ์ผิดหรือขั้นตอนการใส่สารเคมีไม่เป็นลำดับขั้น ก็จะส่งผลทำให้ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางผิดปกติได้ จึงต้องใช้เครื่องมือในการทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยาง คือ เครื่องวัดการสูกของยาง (Moving die rheometer) [2,3,8,9]



รูปที่ 2.4 ลักษณะของการเชื่อมขวางโมเลกุลของยางด้วยเครื่อง Moving die rheometer (MDR) [9]

จากรูปที่ 2.4 แสดงลักษณะของการเชื่อมขวางโมเลกุลหรือการคงรูปยางโดยการให้อุณหภูมิคงที่สามารถแบ่งกระบวนการเชื่อมขวางโมเลกุลของยางออกเป็น 3 ช่วง ระยะเวลาแรก คือ ระยะเวลาสกอร์ต (scorch time) เป็นช่วงที่องค์ประกอบยางเริ่มทำปฏิกิริยากัน ในขั้นนี้จะไม่เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางหรือถ้าเกิดขึ้นก็มีน้อยมาก ระยะเวลาที่สอง คือ ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ (curing time) ระยะเวลานี้จะเกิดพันธะเชื่อมขวางโมเลกุลภายในยาง ส่วนระยะสุดท้าย คือ ระยะเวลาหลังจากเกิดการวัลคาไนซ์อย่างสมบูรณ์ (post curing time) ซึ่งสามารถจำแนกได้ออกเป็น 3 ลักษณะ ได้แก่ ค่าแรงบิดของยางขนานไปกับแกน X เรียกว่า normal cure หมายถึง เมื่อเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์แล้วหลังจากนั้นไม่มีการเกิดปฏิกิริยาใด ๆ ส่งผลให้ค่าแรงบิดหรือค่าอัตราการเชื่อมขวางโมเลกุลคงที่ ในกรณีค่าแรงบิดของยางมีค่าสูงขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งเรียกรวมการเกิดนี้ว่า marching cure หมายถึง การที่ยางเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางโมเลกุลที่สมบูรณ์แล้ว แต่ยังมีให้อุณหภูมิต่อไป ส่งผลให้ค่าแรงบิดหรือค่าอัตราการเชื่อมขวางโมเลกุลสูงขึ้นและกรณีที่ค่าแรงบิดของยางลดต่ำลง เรียกว่า reversion หมายถึง เกิดจากผลของอุณหภูมิไปทำการตัดพันธะการเชื่อมขวางโมเลกุลที่สมบูรณ์แล้วก่อนหน้านี้ ส่งผลให้ค่าแรงบิดหรือค่าอัตราการเชื่อมขวางโมเลกุลต่ำลง ซึ่งรูปร่างของกราฟที่ได้ขึ้นขึ้นขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมีที่ใช้ในการผสมยาง อุณหภูมิที่ใช้และกระบวนการขึ้นรูปยาง [10]

2.5 สารตัวเร่งปฏิกิริยา (accelerators)

สารตัวเร่งปฏิกิริยา คือ สารเคมีที่เติมลงไปในยางปริมาณเล็กน้อยเพื่อเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาให้ยางวัลคาไนซ์ให้เร็วขึ้น ทำให้ลดเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ลง และทำให้ยางวัลคาไนซ์มีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางโมเลกุล และมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ปัจจุบันสามารถแบ่งกลุ่มของสารตัวเร่งปฏิกิริยาออกได้เป็นหลายกลุ่ม ดังนี้

2.5.1 เมอร์แคปโต (mercapto)

สารตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มนี้ใช้ได้กับยางแทบทุกประเภท ทำให้ยางมีระยะเวลาสกรอตสั้นและมีอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ปานกลาง ยางวัลคาไนซ์ที่ได้จะมีสมบัติเชิงกลที่ดีและมีความทนทานต่อความร้อนสูง

2.5.2 เบนโซไทอะโซลซัลฟิनाไมด์ (benzothiazole sulfenamide)

สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ทำให้ยางมีระยะเวลาสกรอตที่ยาวขึ้น แต่ให้อัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ที่สูงและให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูง ดังนั้น ยางวัลคาไนซ์ที่ได้จึงมีความแข็งแรงสูง มีความยืดหยุ่นดี และมีความต้านทานต่อการล้าตัวสูง สารกลุ่ม Sulfenamide ได้แก่ CBS, TBBS, DCBS, MBS

2.5.3 ไดไทโอคาร์บาเมต (dithiocarbamates)

สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้มีประสิทธิภาพสูงมากในการเร่งอัตราเร็วของการวัลคาไนซ์ ทำให้ยางมีระยะเวลาสกรอตสั้นและเกิดการเสื่อมสภาพได้ง่ายเมื่อได้รับการวัลคาไนซ์นานเกินไป ยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นสูงมาก และไม่ทำให้สีของยางเปลี่ยนแปลงไป จึงสามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ได้อย่างหลากหลาย รวมถึงผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในงานทางการแพทย์ เภสัชกรรม หรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับอาหาร

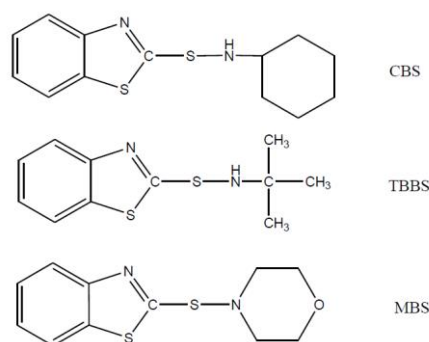
2.5.4 ไทยูแรม (thiurams)

สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มไทยูแรมมีประสิทธิภาพในการเร่งอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ที่สูงมากในขณะให้ระยะเวลาสกรอตที่ยาวกว่าสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มไดไทโอคาร์บาเมตเล็กน้อย

2.5.5 กัวนิดีน (guanidines)

สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้มีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำจึงไม่นิยมนำไปใช้เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาปฐมภูมิ แต่จะนำไปใช้เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาทุติยภูมิร่วมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาปฐมภูมิในกลุ่มอื่น ๆ ส่วนใหญ่

มักใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิดหรือมากกว่า เพื่อให้สารตัวเร่ง ปฏิกิริยาทั้งสองชนิดทำงานแบบเสริมกัน (synergistic effect) ซึ่งจะส่งผลทำให้ยางมีอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์สูงขึ้น เรียกสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณมากกว่าว่า “สารตัวเร่งปฏิกิริยาปฐมภูมิ (primary accelerator)” และเรียกสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณน้อยกว่าว่า “สารตัวเร่งปฏิกิริยาทุติยภูมิ (secondary accelerator)” ส่วนตัวเร่งที่ใช้ในงานวิจัยใช้ชนิดตัวเร่งในกลุ่ม Sulfenamide [2,4,11]



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่ม Sulfenamide [11]

2.5.6 อิทธิพลของสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่ม sulfenamide และปัจจัยอื่น ๆ ต่อจลนศาสตร์การบ่มและคุณสมบัติของโพลียางธรรมชาติ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่ม sulfenamide ต่อจลนศาสตร์การบ่มและคุณสมบัติของโพลียางธรรมชาติ ซึ่งแบ่งได้ 3 ชนิด ดังนี้ โมโพลิโนโรโอเบนโซโธอะโซลซัลฟิनाไมด์ (MBS) บิวทิลเบนโซโธอะโซลซัลฟิनाไมด์ (TBBS) และ ไฮโคลเฮกซิลเบนโซโธอะโซลซัลฟิनाไมด์ (CBS) ที่ 2.5 phr แต่ตัว CBS จะแบ่งเป็นที่ 2.5 กับ 2.775 phr เพื่อใช้เปรียบเทียบจำนวนโมลที่เข้าทำปฏิกิริยาที่เท่ากันของสารตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น เตรียมยางธรรมชาติเพื่อผสมกับสารเคมีและสารในกลุ่ม sulfenamide หลังจากการผสมเสร็จนำไปทดสอบด้วยเครื่อง moving die rheometer เพื่อดูการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางโมเลกุล (Cure time) และระยะเวลาสกอร์ต (Scorch time) โดยใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ผลที่ได้คือ ตัว CBS ที่ 2.5 phr มีอัตราการเกิดการเชื่อมขวางโมเลกุล (Cure time) และ ระยะเวลาสกอร์ต (Scorch time) ที่เร็วที่สุด สันฐานวิทยาของโพลียางธรรมชาติถูกตรวจสอบโดยเครื่อง SEM เพื่อดูขนาดพองและโครงสร้างภายในของโพลียางธรรมชาติกับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่ม Sulfenamide ขนาดพองใน NRF/MBS2.5 มีขนาดใหญ่ เพราะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันที่ช้าที่สุด จึงทำให้พองอากาศมีระยะเวลายาวนานในการขยายและกระจายตัวในเนื้อยาง ส่วน NRF/TBBS และ NRF/CBS ขนาดพองอากาศมีเส้นผ่านศูนย์กลางพองอากาศ

ใกล้เคียงกันจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันที่รวดเร็วทำให้เกิดฟองขนาดเล็กเนื่องจากการขยายตัวของฟองในระยะเวลาที่สั้น สมบัติเชิงกลทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM) กับการทดสอบ Compression set จากการทดสอบการบีบอัดเพื่อดูความยืดหยุ่นภายใต้แรงกดอัด ซึ่งตัว NRF/MBS2.5 จะมีค่าต่ำที่สุดเนื่องจากมีความหนาแน่นต่ำและค่า Cell density ที่ต่ำ ซึ่งส่งผลให้ค่า Tensile มากที่สุดอีกด้วย นอกจากนี้เมื่อทดสอบสมบัติทางความร้อนพบว่า NRF/TBBS2.5, NRF/CBS2.5 และ NRF/CBS2.775 มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่า NRF/MBS2.5 เล็กน้อยเนื่องจากความหนาแน่นของ Cell density ที่สูงและปริมาณฟองอากาศที่มาก ซึ่งฟองอากาศจะเป็นฉนวนส่งผลให้มีค่าการนำความร้อนต่ำ นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของระบบ NRF/CBS นั้นต่ำกว่าชนิด Sulfenamides อื่น ๆ ซึ่งเกิดจากความหนาแน่นของฟองอากาศ (Cell density) สูงและขนาดฟองเล็ก จึงสรุปได้ว่าชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่ม Sulfenamides ตัวเร่งปฏิกิริยา CBS เหมาะสำหรับการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันที่ดี เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาที่รวดเร็ว มีค่าความเค้นที่ต่ำ สมบัติการนำความร้อนที่ดีและสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ต่ำและมีสมบัติการคงรูปจากการกดอัดที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับระบบ NRF อื่น ๆ [11,12] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาอิทธิพลของปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำที่มีผลต่อพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ของยางโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มซัลฟิनाไมด์ชนิด MBS โดยทำให้ตัวอย่างสูตรยางมีความชื้นในปริมาณที่แตกต่างกัน จากนั้นจึงทำการหาปริมาณน้ำในชิ้นงานตัวอย่างและทำการทดสอบสมบัติการเชื่อมขวางโมเลกุล พบว่าระยะเวลาสกอร์ต (Scorch time) เกิดก่อนกำหนด ปริมาณความชื้นและน้ำในยางมีผลต่อการเชื่อมขวางโมเลกุล สารตัวเร่งปฏิกิริยา MBS จะเข้าไปช่วยยับยั้งการชะลอการเริ่มการเชื่อมขวางโมเลกุลก่อนกำหนด [13]

สำหรับในงานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มซัลฟิनाไมด์ชนิด TBBS เนื่องจากมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางโมเลกุลที่ใกล้เคียงกับ CBS แต่สารเคมีดังกล่าวเป็นอันตรายต่อสุขภาพน้อยกว่าเนื่องจาก CBS เมื่อเกิดปฏิกิริยาแล้วสามารถแตกตัวเป็นสารก่อมะเร็งบางชนิดได้

2.6 การสลายตัวด้วยความร้อนของสารก่อโฟม

การสลายตัวด้วยความร้อนของสารก่อโฟมซึ่งเป็นปฏิกิริยาสำคัญในการผลิตยางโฟมในระหว่างการบีบอัดด้วยความร้อนของสารประกอบยางธรรมชาติในแม่พิมพ์ สารก่อโฟมมีหลายประเภทที่ใช้ในอุตสาหกรรม ได้แก่ โซเดียมไบคาร์บอเนต 4,4-oxydibenzenesulfonyl hydrazide (OBSH), p-toluenesulfonyl semicarbazide, 5-phenyl tetrazole, dinitroso pentamethylene tetramine โดยสารก่อโฟมที่ถูก

นำมาใช้อย่างแพร่หลาย คือ azodicarbonamide เนื่องจากราคาต่ำและอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนต่ำ [2,3,5,14]

2.6.1 ผลของปริมาณสารก่อโฟมต่อสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อน

ผลกระทบของสารก่อโฟมพิจารณาจากการใส่สารก่อโฟมชนิด azodicarbonamide ที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 0, 3, 4, 5 และ 6 phr โดยเมื่อสังเกตลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมยางธรรมชาติเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) นั้นจะสามารถบอกขนาดของฟองอากาศภายในเนื้อยาง โดยการผสมสารก่อโฟมที่ 3 phr จะมีขนาดของฟองอากาศใหญ่ที่สุด เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางโมเลกุลที่ช้าและมีเวลาในการขยายตัวนานที่สุด ในงานวิจัยนี้พบว่าสารก่อโฟมชนิด azodicarbonamide สามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมขวางโมเลกุลของยางได้ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวทางความร้อนมีสารเคมีในกลุ่มของเอมีน ซึ่งสามารถช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางโมเลกุลในปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันด้วยกำมะถันได้ เมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อโฟมขึ้นจะพบว่าขนาดของฟองมีขนาดเล็กลงเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางโมเลกุลเร็วขึ้นและเมื่อปริมาณของสารก่อโฟมเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่า bulk density ลดลง เมื่อค่า bulk density มีค่าลดลงจะส่งผลให้การขยายตัวได้มากขึ้น นอกจากนี้อัตราการขยายตัวทางความร้อนของโฟมยางธรรมชาติ (thermal expansion coefficient) จะยิ่งเพิ่มขึ้น การทดสอบสมบัติเชิงกลด้วย impact test เมื่อปริมาณของสารก่อโฟมเพิ่มขึ้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะสลายตัวมากขึ้นส่งผลให้ขนาดเซลล์เฉลี่ยมีขนาดเล็กลงและเพิ่มจำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตร สิ่งนี้ทำให้เกิดความหนาแน่นของโฟมลดลงและลดความหนาแน่นของการเชื่อมขวางเล็กน้อยซึ่งจะลดความสามารถของโฟมในการดูดซับพลังงานจากแรงกระแทก [14,15]

2.6.2 ผลของอุณหภูมิต่อฟองอากาศและปริมาณสารก่อโฟมที่มีผลต่อคุณสมบัติการวัลคาไนซ์ สมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของโฟมยางธรรมชาติ

ทำการศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของสารก่อโฟมต่อลักษณะการวัลคาไนซ์ สมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของโฟมยางธรรมชาติ โดยทำการวิจัยสารก่อโฟมชนิด OBSH โดยจะพิจารณาการใส่ปริมาณสารก่อโฟมที่ต่างกัน คือ 0,3,6,9 phr อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบที่ 150 กับ 160 องศาเซลเซียส โดยลักษณะการวัลคาไนซ์ของ OBSH ค่าแรงบิดต่ำสุด (ML) มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการขึ้นรูป ที่ปริมาณ OBSH ที่สูงขึ้นค่าแรงบิดต่ำสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มปริมาณ OBSH จนถึงปริมาณที่ 6 phr และลดลงที่ 9 phr อาจมีผลมาจากอนุภาคของ OBSH ไปทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิวภายในเนื้อยาง ค่าแรงบิดสูงสุด (MH) แสดงถึงค่าแรงเฉือนของยาง ผลการทดสอบค่าแรงบิดสูงสุดจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ เนื่องจากความเข้มข้นที่

เพิ่มขึ้นทำให้เกิดฟองอากาศภายในเนื้อเยื่อที่มากขึ้นส่งผลต่อแรงเฉือนของยางทำให้แรงบิดลดลง การเชื่อมขวางโมเลกุล (Cure time) และระยะเวลาสกอร์ต (Scorch time) มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากรยังทำการเพิ่มปริมาณ OBSH ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางที่เร็วขึ้น การทดสอบสมบัติเชิงกลโดยทำการทดสอบความแข็ง (Hardness) ค่าที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ OBSH เนื่องจากปริมาณฟองอากาศเพิ่มมากขึ้นในเนื้อเยื่อจากการเพิ่มปริมาณ OBSH สำหรับอุณหภูมิที่ใช้ก็มีผลต่อค่าความแข็ง (hardness) การใช้อุณหภูมิที่ 150 องศาเซลเซียส ค่าความแข็ง (hardness) ที่ได้จะมีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้สูงขึ้นส่งผลให้ฟองอากาศขยายตัวได้มากขึ้นในเนื้อเยื่อ และอาจมีจำนวนฟองอากาศเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งฟองอากาศที่มากขึ้นอาจจะรวมกันหรือสัมผัสกันก่อให้เกิดฟองที่มีขนาดใหญ่จึงส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ ส่วนค่าการคืนตัวของยางลดลง เพราะฟองภายในเนื้อเยื่อเกิดการแตกหรือฉีกขาดจึงทำให้ค่าการคืนตัวลดลง ลักษณะสัญญาณวิทยาจะเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณ OBSH และอุณหภูมิส่งผลทำให้มีฟองอากาศมากขึ้นภายในเนื้อเยื่อ [16,17]

2.6.3 อิทธิพลของสารก่อโฟมต่อสมบัติของโพลียาเอทิลีนที่ใส่สารสกัดน้ำมันเป็นสารตัวเติม

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารก่อโฟมต่อสมบัติของโพลียาเอทิลีนที่ใส่สารสกัดน้ำมันเป็นสารตัวเติมในปริมาณ 30 phr ใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปที่ 150 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาสารก่อโฟมในงานวิจัยนี้ใช้สารก่อโฟม 2 ชนิด ได้แก่ อะโซไดคาร์บอไนต์ (ADC) และออกซีบิสเบนซีนซัลโฟนิลไฮดราไซด์ (OBSH) ที่ปริมาณ 0, 2, 4, 6, 8, และ 10 phr พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อโฟมส่งผลให้เวลาในการคงรูปโพลียาเอทิลีนเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารก่อโฟมทั้งสองชนิดเกิดการสลายตัวทำให้เกิดรูพรุนภายในยาง เมื่อมีรูพรุนมากจึงทำให้ความร้อนถ่ายเทผ่านเซลล์โพลีเมอร์ได้ช้าจึงทำให้ยางสุกช้า ความหนาแน่นของโพลียาเอทิลีนลดลง การใช้สารก่อโฟม OBSH โพลียาเอทิลีนจะมีความแข็งลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อโฟม ในขณะที่การใช้สารก่อโฟมชนิด ADC โพลียาเอทิลีนจะมีความแข็งต่ำสุดที่การใช้สารก่อโฟม 2 phr หลังจากนั้นการเพิ่มปริมาณ ADC ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งและพบว่า OBSH ให้โพลียาเอทิลีนที่มีจำนวนและความสม่ำเสมอของรูพรุนมากกว่า ADC จากงานวิจัยนี้ทำให้ทราบว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใส่สารก่อโฟมสองชนิด ได้แก่ OBSH และ ADC พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อโฟมในกรณีที่ใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปและคงรูปที่ 150 องศาเซลเซียส สารก่อโฟมที่เหมาะสม ได้แก่ OBSH เนื่องจากที่อุณหภูมิดังกล่าว OBSH แตกตัวได้ดีกว่าและให้โพลียาเอทิลีนที่มีจำนวนและความสม่ำเสมอของรูพรุนมากกว่าการใช้ ADC [18]

สำหรับในงานวิจัยนี้เลือกใช้สารก่อโพรโมซินิด azodicarbonamide เนื่องจากมีความสามารถในการแตกตัวและกระจายตัวได้ดีภายในเนื้อเยื่อใกล้เคียงกับ OBSH แต่สารก่อโพรโมซินิด azodicarbonamide มีราคาที่ถูกกว่าและหาได้ง่ายในท้องตลาดจึงเลือกใช้ในการดำเนินงานวิจัย

2.7 ผลกระทบของชนิดอนุภาคคาร์บอน

จากการทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับชนิดอนุภาคคาร์บอนและการเพิ่มปริมาณคาร์บอน พบว่าชนิดและปริมาณคาร์บอนส่งผลต่อสมบัติพฤติกรรมการบ่ม ลักษณะสัณฐานวิทยาของโพรโมซินิดที่ได้ และสมบัติเชิงกลอย่างมีนัยสำคัญ โดยผลของการเพิ่มปริมาณเขม่าดำส่งผลให้ค่าแรงบิดสูงขึ้น เนื่องจากการเชื่อมขวางที่แข็งแรงขึ้นและตัวเขม่าดำนำความร้อนได้ดี นอกจากนี้ลักษณะสัณฐานวิทยาชี้ให้เห็นว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของขนาดพองอากาศเล็กลง ปริมาณพองอากาศลดลงด้วย เนื่องจากค่าแรงบิดกับอัตราเร็วในการเชื่อมขวางโมเลกุลที่สูงขึ้น เส้นผ่าศูนย์กลางของขนาดพองอากาศที่เล็กลงและปริมาณพองอากาศลดลงส่งผลให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น สังเกตได้จากการทดสอบต้านทานแรงดึง ค่าต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณเขม่าดำ แต่ในทางกลับกันระยะยืดจะลดลงเนื่องจากสัดส่วนความยืดหยุ่นของยางที่ลดลงภายในเนื้อโพรโมซินิด และค่าต้านทานแรงดักก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับ [19,21,26] นอกจากนี้มีงานวิจัยอีกเรื่องที่ทำการศึกษาผลของอนุภาคคาร์บอนชนิดกราฟีนในเชิงของปริมาณกราฟีน และการปรับพื้นผิวของกราฟีนด้วย Cyclohexenediamine พบว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณกราฟีนส่งผลให้อัตราการเชื่อมขวางโมเลกุลเพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันตัวกราฟีนที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวมีอัตราการเชื่อมขวางโมเลกุลลดลง เนื่องจากเอมีนใน Cyclohexenediamine สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่อยู่บนผิวของตัวกราฟีนที่ยังเหลืออยู่จากกระบวนการสังเคราะห์ได้ ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่สามารถทำปฏิกิริยากับกำมะถันลดน้อยลง ผลของการเพิ่มปริมาณกราฟีนส่งผลให้ค่าแรงบิดสูงขึ้นเนื่องจากการเชื่อมขวางที่แข็งแรงขึ้น ลักษณะทางสัณฐานวิทยาชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณอนุภาคกราฟีนส่งผลให้เส้นผ่าศูนย์กลางของขนาดพองอากาศเล็กลง ปริมาณพองอากาศลดลง เนื่องจากความหนืดของเนื้อเยื่อที่สูงขึ้น เส้นผ่าศูนย์กลางของขนาดพองอากาศที่เล็กลงและปริมาณพองอากาศลดลงส่งผลให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น สังเกตได้จากการทดสอบต้านทานแรงดึง ค่าต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณกราฟีน ส่วนการปรับปรุงพื้นผิวกราฟีนส่งผลให้สมบัติเชิงกลสูงขึ้นมากกว่าตัวกราฟีนที่ยังไม่ได้ทำการปรับปรุงพื้นผิว ในขณะที่ระยะยืดของกราฟีนที่ยังไม่ได้ทำการปรับปรุงพื้นผิวกับกราฟีนที่ปรับปรุงพื้นผิวแล้วมีค่าใกล้เคียงกัน [29]

2.8 อิทธิพลของความดันและอุณหภูมิต่อพฤติกรรมการบ่ม สัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงกลของโพลีเอทิลีน

ธรรมชาติ

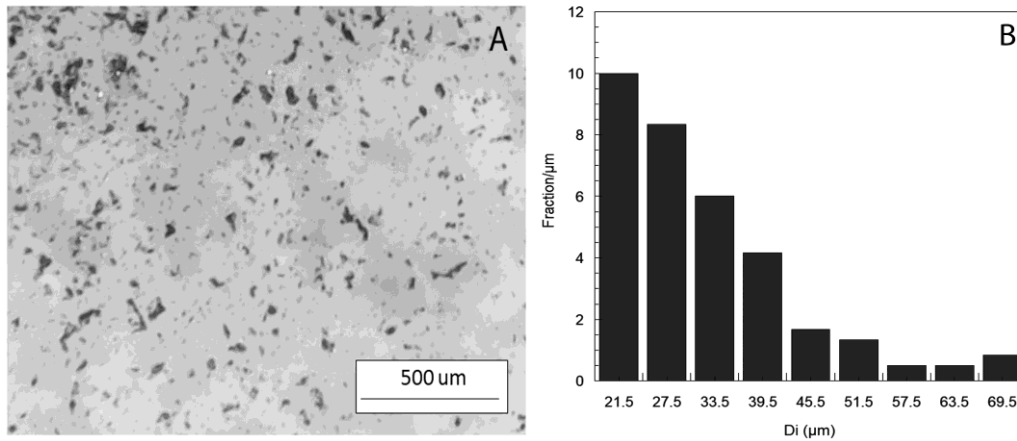
ผลของการเพิ่มความดันส่งผลให้ความหนาแน่นของโพลีเอทิลีนเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ปริมาณฟองอากาศภายในเนื้อเยื่อลดลง เนื่องจากการเพิ่มความดันทำให้เกิดการเชื่อมขวางโมเลกุลที่เร็วขึ้น ส่งผลให้เกิดการยับยั้งการเกิดฟองอากาศ ปริมาณฟองอากาศที่ลดลงส่งผลให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น สังเกตได้จากการทดสอบต้านทานแรงดึง ค่าต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อเพิ่มความดัน แต่ในทางกลับกันระยะยืดจะลดลง เนื่องจากยางสูญเสียความเป็นออสติกและมีพื้นที่รับแรงที่น้อยลง การทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยวิธีการต้านทานแรงกด ค่าต้านทานแรงกดก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับ [20,22] ผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นลดลง เนื่องจากเกิดได้ 2 ปัจจัย คือ ความหนืดของยางลดลงทำให้ยางไหลได้ดีขึ้น ส่งผลให้ฟองอากาศหรือก๊าซภายในเนื้อเยื่อมีเวลาในการเกิดฟองได้นานขึ้นจากผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ปริมาณฟองอากาศภายในเนื้อเยื่อเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันปริมาณฟองอากาศที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดต่ำลง สังเกตได้จากการทดสอบต้านทานแรงดึง ค่าต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อการเพิ่มอุณหภูมิ การทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยวิธีการต้านทานแรงกด ค่าต้านทานแรงกดก็มีแนวโน้มลดลงตามลำดับ [23,24,25]

<p>2. ทดสอบสมบัติทางสัณฐานวิทยา และสมบัติทางกายภาพ เช่น การหาขนาดของฟองอากาศที่อยู่ภายในเนื้อเยื่อ การหาความหนาแน่นและปริมาณโพรงอากาศที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อที่มีความสัมพันธ์กับกระบวนการเกิดโฟมยาง</p>																		
<p>3. ทดสอบสมบัติเชิงกลและความร้อน เชื่อมโยงสมบัติที่ได้ต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาและพฤติกรรม การเกิดโฟมในโฟมยางธรรมชาติ โดยพิจารณาจากจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาที่ได้จากการศึกษา</p>																		
<p>4. สรุปผลและตีพิมพ์เผยแพร่ งานวิจัย</p>																		

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคคาร์บอนที่ได้จากการสังเคราะห์จากเปลือกทุเรียน

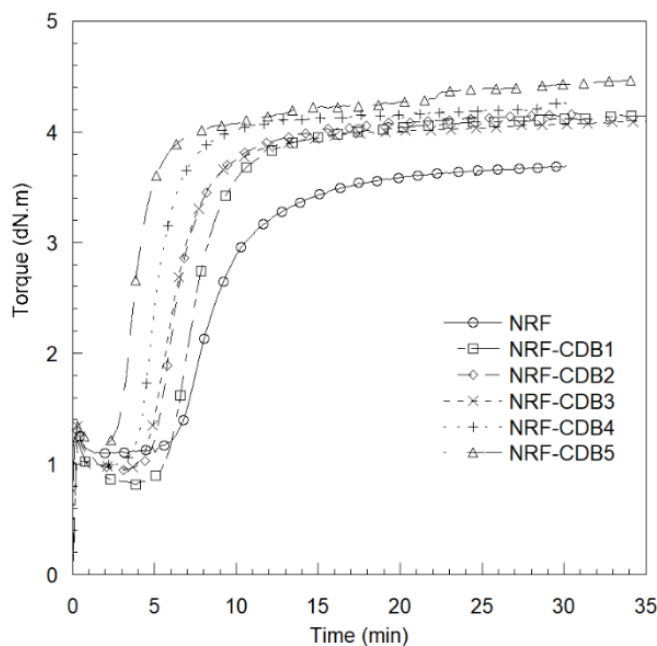


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคคาร์บอน (Size distribution) จากการสังเคราะห์เชิงเคมีความร้อนของเปลือกทุเรียน

จากการนำอนุภาคคาร์บอนที่ได้จากเปลือกทุเรียนมาทำการวิเคราะห์เพื่อหาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอน กลุ่มตัวอย่างที่ใช้มีปริมาณอนุภาคคาร์บอนที่ใช้นามากกว่า 200 อนุภาคซึ่งได้จากการถ่ายภาพโดยใช้กล้องดิจิทัลไมโครสโคป พบว่า อนุภาคที่ได้มีลักษณะเชิงสัณฐานวิทยาเป็นแผ่น คล้ายกับอนุภาคกราฟต์และมีขนาดเล็กมาก โดยขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า มีค่ากลาง (\bar{X}) อยู่ที่ 32.45 ไมโครเมตร และค่าการกระจายตัวของอนุภาคในรูปที่ 4.1B แสดงให้เห็นว่าอนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดเล็กประมาณ 21 – 40 ไมโครเมตร ซึ่งการที่อนุภาคคาร์บอนที่ได้จากการสังเคราะห์มีขนาดเล็กจะทำให้คุณสมบัติการเสริมแรงทางกลมีคุณสมบัติที่ดีตามไปด้วย

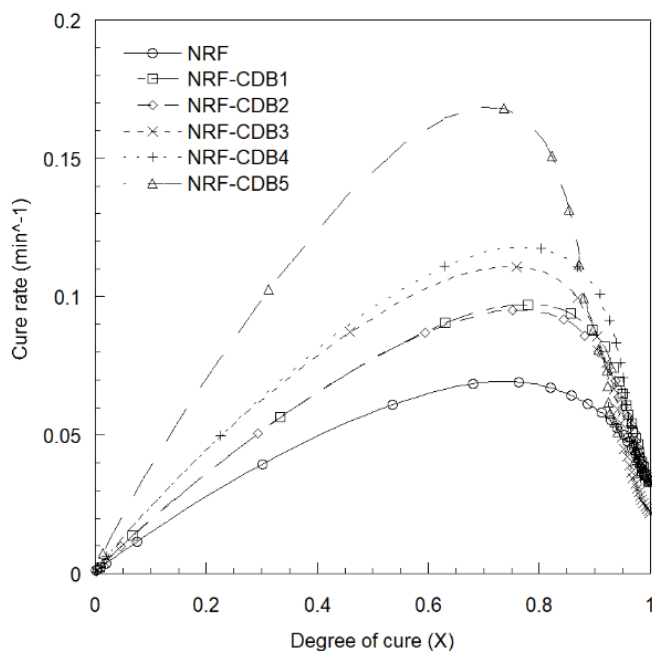
4.2 พฤติกรรมการบ่มของโพลีเมอร์ชนิดที่ปรับปริมาณอนุภาคคาร์บอนจากเปลือกทุเรียน

การวิเคราะห์ลักษณะการเชื่อมขวางโมเลกุลด้วยเครื่อง Moving die rheometer (MDR)



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดกับเวลาที่ปรับปริมาณอนุภาคคาร์บอนจากเปลือกทุเรียน

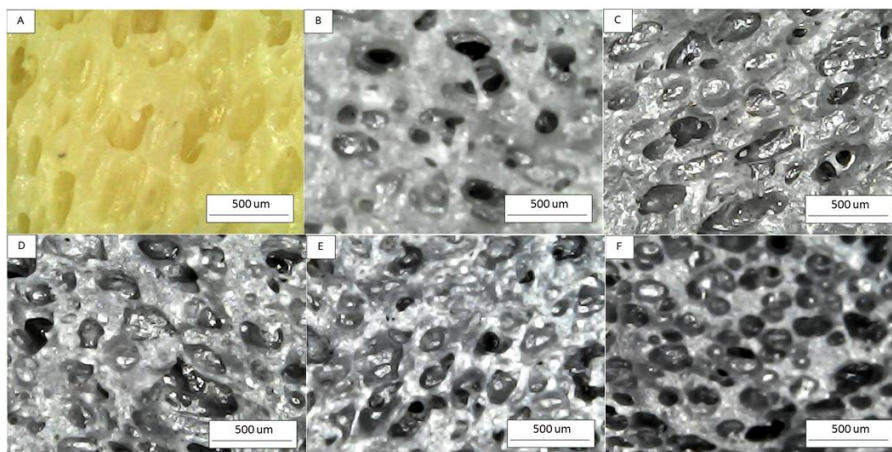
จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า NRF มีค่าแรงบิดอยู่ที่ 3.69 (dN.m), NRF-CDB1 มีค่าแรงบิดอยู่ที่ 3.9 (dN.m), NRF-CDB2 มีค่าแรงบิดอยู่ที่ 4.16 (dN.m), NRF-CDB3 มีค่าแรงบิดอยู่ที่ 4.18 (dN.m), NRF-CDB4 มีค่าแรงบิดอยู่ที่ 4.2 (dN.m) และ NRF-CDB5 มีค่าแรงบิดอยู่ที่ 4.27 (dN.m) ตามลำดับ โดยค่าแรงบิดจะขึ้นซึ่งขึ้นถึงความแข็งแรงของโพลีเมอร์ชนิดที่ได้หลังจากการเกิดปฏิกิริยา จากการทดสอบจะเห็นได้ว่าค่าแรงบิดมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อทำการเพิ่มปริมาณอนุภาคคาร์บอนจากเปลือกทุเรียน เนื่องจากอนุภาคคาร์บอนจากเปลือกทุเรียนเป็นสารเสริมแรง ทำให้เกิดการเชื่อมขวางที่แข็งแรงขึ้นภายในเนื้อยาง ส่งผลให้ค่าแรงบิดสูงขึ้น ทำให้ตัวอย่างแข็งแรงมากขึ้น หลังจากนั้นได้นำค่าการทดสอบการสุกของยางในช่วงที่เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางโมเลกุล (ช่วง cure time) มาวิเคราะห์อัตราเร็วในการเชื่อมขวางโมเลกุลดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Degree of cure กับ Cure rate ที่ปรับปริมาณอนุภาคคาร์บอนจากเปลือกทุเรียน

จากรูปที่ 4.3 พบว่า การปรับปริมาณอนุภาคคาร์บอนจากเปลือกทุเรียนตั้งแต่ 0-5 phr อัตราการเชื่อมขวางโมเลกุลมีแนวโน้มสูงขึ้นตามลำดับ เนื่องจากอนุภาคคาร์บอนจากเปลือกทุเรียนเป็นวัสดุที่นำความร้อนทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางโมเลกุลเกิดได้เร็วจากการส่งผ่านความร้อนจากอนุภาคคาร์บอนไปยังเนื้อยางในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปได้ดี ซึ่งการเชื่อมขวางที่เร็วขึ้นภายในโพลีเมอร์ยางธรรมชาติ สามารถใช้บ่งชี้ถึงลักษณะสัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ยางธรรมชาติ ใช้ในการทำนายขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศและความหนาแน่นของฟองอากาศหรือก๊าซที่กระจายภายในเนื้อยางได้

4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของโฟมยางธรรมชาติที่ปรับปริมาณอนุภาคคาร์บอนจากเปลือกทุเรียน



รูปที่ 4.4 ภาพจากกล้อง Digital Microscope : (A) NRF (B) NRF-CDB1 (C) NRF-CDB2 (D) NRF-CDB3 (E) NRF-CDB4 (F) NRF-CDB5

จากรูปที่ 4.4 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของโฟมยางธรรมชาติ จากกล้อง Digital Microscope ภาพ (A) NRF (B) NRF-CDB1 (C) NRF-CDB2 (D) NRF-CDB3 (E) NRF-CDB4 และ (F) NRF-CDB5 จากลักษณะสัณฐานวิทยา จะสังเกตได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณอนุภาคคาร์บอนจากเปลือกทุเรียน ฟองอากาศมีแนวโน้มเล็กลงและมีปริมาณฟองอากาศจำนวนมากขึ้นภายในเนื้อยาง ซึ่งสามารถสรุปขนาดอนุภาคและความหนาแน่นของโฟมยางธรรมชาติได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดฟองอากาศและความหนาแน่นของโพลีเอทิลีนที่ทำการปรับปริมาณคาร์บอนจากเปลือกทุเรียน

Sample name	Bubble size (μm)	Bulk density (g/cm^3)
NRF	123.47	0.67
NRF-CDB1	70.96	0.66
NRF-CDB2	65.94	0.66
NRF-CDB3	64.38	0.64
NRF-CDB4	51.79	0.62
NRF-CDB5	46.88	0.61

จากตารางที่ 4.1 แสดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความหนาแน่นของโพลีเอทิลีนที่ทำการปรับปริมาณคาร์บอนจากเปลือกทุเรียน ซึ่งจะสัมพันธ์กันกับลักษณะสัณฐานวิทยาของโพลีเอทิลีน โดย NRF มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศใหญ่ที่สุด มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศ 123.47 (μm) ความหนาแน่น 0.67 (g/cm^3), NRF-CDB1 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศ 70.96 (μm) ความหนาแน่น 0.66 (g/cm^3), NRF-CDB2 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศ 65.94 (μm), ความหนาแน่น 0.66 (g/cm^3), NRF-CDB3 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศ 64.38 (μm) ความหนาแน่น 0.64 (g/cm^3), NRF-CDB4 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศ 51.79 (μm) ความหนาแน่น 0.62 (g/cm^3) และ NRF-CDB5 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศ 46.88 (μm) ความหนาแน่น 0.61 (g/cm^3), จากผลการทดสอบที่ได้จะสังเกตได้ว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศมีขนาดเล็กลงตามลำดับ เนื่องจาก อัตราการเชื่อมขวางโมเลกุลจะเกิดเร็วขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนจากเปลือกทุเรียน ซึ่งอัตราการเชื่อมขวางที่เร็วขึ้น ส่งผลให้ก๊าซภายในเนื้อโพลีเอทิลีนมีการขยายตัวได้น้อยลง ในส่วนของความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลงเมื่อทำการเพิ่มปริมาณคาร์บอนจากเปลือกทุเรียน ซึ่งเกิดจากอัตราการเชื่อมขวางโมเลกุลที่เร็วขึ้นทำให้ฟองอากาศมีเวลาไม่มากพอในการแพร่ออกจากเนื้ออย่างขณะขึ้นรูป ส่งผลให้มีปริมาณฟองอากาศภายในเนื้ออย่างเพิ่มมากขึ้น

4.4 สมบัติเชิงกลของโฟมยางธรรมชาติที่ปรับปริมาณอนุภาคคาร์บอนจากเปลือกทุเรียน

การวิเคราะห์การต้านทานแรงดึงด้วยเครื่อง Universal testing machine

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าสมบัติเชิงกลของโฟมยางธรรมชาติที่ปรับปริมาณคาร์บอนจากเปลือกทุเรียน

Sample name	Bubble size (μm)	Bulk density (g/cm^3)	Tensile strength at break (Mpa)	Elongation at break (%)	Young modulus (N/m^2)
NRF	123.47	0.67	19.11	2325.4	0.0023
NRF-CDB1	70.96	0.66	11.75	1950.86	0.0025
NRF-CDB2	65.94	0.66	13.98	2120.68	0.0028
NRF-CDB3	64.38	0.64	17.28	2294.17	0.0029
NRF-CDB4	51.79	0.62	17.38	2044.42	0.0033
NRF-CDB5	46.88	0.61	18.02	2493.92	0.0035

จากตารางที่ 4.2 จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า NRF มีค่าความต้านทานต่อแรงดึง ณ จุดขาด 19.11 (MPa) ระยะเวลาการยืดตัว 2325.46 (%strain), NRF-CDB1 มีค่าความต้านทานต่อแรงดึง ณ จุดขาด 11.75 (MPa) ระยะเวลาการยืดตัว 1950.86 (%strain), NRF-CDB2 มีค่าความต้านทานต่อแรงดึง ณ จุดขาด 13.98 (MPa) ระยะเวลาการยืดตัว 2120.68 (strain), NRF-CDB3 มีค่าความต้านทานต่อแรงดึง ณ จุดขาด 17.28 (MPa) ระยะเวลาการยืดตัว 2294.17 (%strain), NRF-CDB4 มีค่าความต้านทานต่อแรงดึง ณ จุดขาด 17.38 (MPa) ระยะเวลาการยืดตัว 2044.42 (%strain) และ NRF-CDB5 มีค่าความต้านทานต่อแรงดึง ณ จุดขาด 18.02 (MPa) ระยะเวลาการยืดตัว 2493.92 (%strain) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า NRF มีค่าต้านทานแรงดึง ณ จุดขาด กับระยะเวลาการยืดตัวที่สูงที่สุด เนื่องจากไม่มีการใส่เสริมแรงใด ทำให้แสดงลักษณะของความเป็นอีลาสติคสูง รวมทั้งยังมีผนังเซลล์ที่หนาจึงส่งผลให้มีความเหนียวและแข็งแรง ในขณะที่การใส่สารเสริมแรงคาร์บอนที่สังเคราะห์จากเปลือกทุเรียนในระยะแรกจะมีค่าต้านทานแรงดึง ณ จุดขาด กับระยะเวลาการยืดตัวที่ต่ำและจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของอนุภาคคาร์บอนที่สังเคราะห์จากเปลือกทุเรียน นอกจากนี้ยังพบว่าการใส่อนุภาคคาร์บอนที่

สังเคราะห์จากเปลือกทุเรียนเพิ่มขึ้นทำให้ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคคาร์บอนเป็นสารเสริมแรงในเฟสยางดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

4.5 สมบัติเชิงความร้อนของโพลีเมอร์ที่ปรับปริมาณอนุภาคคาร์บอนจากเปลือกทุเรียน

การวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเครื่อง Thermal Constant analyzer (TCA) และ Thermomechanical Analysis (TMA)

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าสมบัติเชิงความร้อนของโพลีเมอร์ที่ปรับปริมาณคาร์บอนจากเปลือกทุเรียน

Sample name	Bubble size (μm)	Bulk density (g/cm^3)	Thermal expansion coefficient (ppm/K)	Thermal conductivity (W/m.K)
NRF	123.47	0.67	272.16	0.1026
NRF-CDB1	70.96	0.66	263.76	0.0982
NRF-CDB2	65.94	0.66	254.94	0.1016
NRF-CDB3	64.38	0.64	248.19	0.0971
NRF-CDB4	51.79	0.62	220.78	0.1071
NRF-CDB5	46.88	0.61	246.72	0.1068

จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงาน NRF มีค่า 272.16 (ppm/K), ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงาน NRF-CDB1 มีค่า 263.76 (ppm/K), ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงาน NRF-CDB2 มีค่า 254.94 (ppm/K), ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงาน NRF-CDB3 มีค่า 248.19 (ppm/K), ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงาน NRF-CDB4 มีค่า 220.78 (ppm/K) และ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงาน NRF-CDB5 มีค่า 246.72 (ppm/K) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศและปริมาณฟองอากาศภายในเนื้อยาง เนื่องจากก๊าซหรือฟองอากาศเป็นปัจจัยที่สำคัญเมื่อมีการให้ความร้อนกับชิ้นงาน หากภายในชิ้นงานมีจำนวนฟองอากาศจำนวนมากหรือมี

ฟองอากาศขนาดใหญ่จะมีอัตราการขยายตัวทางความร้อนสูง เนื่องจากก๊าซภายในโฟมยางธรรมชาติเกิดการขยายตัว จากผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเส้นผ่าศูนย์กลางที่ลดลง

ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของโฟมยางธรรมชาติจากตารางที่ 4.3 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของชิ้นงานโฟมยางธรรมชาติ (NRF) มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน 0.1026 (W/m.K), NRF-CDB1 มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน 0.0982 (W/m.K), NRF-CDB2 มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน 0.1016 (W/m.K), NRF-CDB3 มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน 0.0971 (W/m.K), NRF-CDB4 มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน 0.1071 (W/m.K) และ NRF-CDB5 มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน 0.1068 (W/m.K) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของโฟมยางธรรมชาติที่ปรับปริมาณของคาร์บอนจากเปลือกทุเรียนตั้งแต่ 0-5 phr มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศมีขนาดใกล้เคียงกัน

นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติทั้งทางกลและความร้อนของโฟมยางธรรมชาติที่ผสมอนุภาคเขม่าดำที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง (เกรด N 330) ที่สัดส่วน 3 phr เทียบกับการนำอนุภาคที่สังเคราะห์จากเปลือกทุเรียนที่สัดส่วนเดียวกัน เพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ของการนำเอาอนุภาคคาร์บอนดังกล่าวมาใช้งานแทนการใช้อนุภาคเขม่าดำ พบว่า สามารถนำมาใช้งานแทนได้ในกรณีการนำมาใช้สำหรับการเป็นสารเสริมแรงในโฟมยางธรรมชาติ เนื่องจากมีคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติเชิงความร้อนที่ใกล้เคียงกัน [28]

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการวิจัยพบว่า สารเสริมแรงอนุภาคคาร์บอนที่สังเคราะห์จากเปลือกทุเรียนมีสมบัติต่าง ๆ ใกล้เคียงกับเขม่าดำจึงสามารถนำมาใช้งานทดแทนเขม่าดำที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางได้ เนื่องจากค่าแรงบิดที่ได้มีค่าที่สูงและการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางที่เร็วใกล้เคียงกัน ทำให้ขนาดพองอากาศภายในเนื้อยางเหมาะสมส่งผลให้ค่าสมบัติเชิงกลที่สูง นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนที่สังเคราะห์จากเปลือกทุเรียนสมบัติในด้านต่าง ๆ มีแนวโน้มดีขึ้น จากผลการทดลองที่ได้จึงสรุปได้ว่าชนิดของอนุภาคคาร์บอนจากเปลือกทุเรียน สามารถนำมาใช้ทดแทนอนุภาคเขม่าดำที่ใช้ในอุตสาหกรรมสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์โฟมยางธรรมชาติได้ในอนาคต

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรปรับสภาพพื้นผิวของอนุภาคคาร์บอนดังกล่าวก่อนการนำมาใช้งาน เพื่อให้อนุภาคสามารถกระจายตัวอยู่ในเนื้อยางได้ดีขึ้น ซึ่งจะเพิ่มคุณสมบัติทางกลของโฟมยางธรรมชาติได้มากขึ้น

5.2.2 การเลือกชิ้นงานทดสอบหรือนำไปส่งทดสอบควรเลือกที่เหมาะสมและมีขนาดที่ตรงตามมาตรฐานการทดสอบ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง

บรรณานุกรม

- [1] สถาพร ว่างฉาย, ชาญยุทธ โกลิตะวงษ์, & อริสรา ชัยกิตติรัตน์. (2011). การ วิเคราะห์การเกิดความร้อน ในยางคงรูปที่มีสารตัวเติมภายใต้สภาวะการเสีรูปแบบวงรอบโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. *Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, 21(1), 14-21.
- [2] เทคโนโลยีการผลิตยางคอมพาวด์. Retrieved 12 October 2019. Online From: <http://rubber.oie.go.th/box/Article/25239>.
- [3] De, S. K., & White, J. R. (Eds.). (2001). *Rubber technologist's handbook*. Ismithers Rapra Publishing.
- [4] เครื่องหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยาง. Retrieved 12 October 2019. Online From : http://www.dss.go.th/images/st-article/pep_11_2549_seekrubber.pdf
- [5] นายพลวัฒน์ เจริญธรรมชัย. ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดซัลฟิनाไมด์ สารก่อโฟม และกราฟีนต่อการเกิด และสมบัติของโฟมยางธรรมชาติ. *วิทยานิพนธ์ปีการศึกษา 2558 ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย*.
- [6] Garcia, A. M. (2007). Evaluation of scrap tire-derived porous rubber tubing as a green membrane for sustainable water filtration (ECOL-Mem process).
- [7] Coran, A. Y. (1964). Vulcanization. Part VI. A model and treatment for scorch delay kinetics. *Rubber Chemistry and Technology*, 37(3), 689-697.
- [8] Coran, A. Y. (2003). Chemistry of the vulcanization and protection of elastomers: a review of the achievements. *Journal of Applied Polymer Science*, 87(1), 24-30.
- [9] Coran, A. Y. (2003). Chemistry of the vulcanization and protection of elastomers: a review of the achievements. *Journal of Applied Polymer Science*, 87(1), 24-30.
- [10] โฉมศรี ศิริวงศ์ และ สุธาสินี บุญเชียงใหม่. (2018). ภาพรวมของกระบวนการคงรูปยางด้วยกำมะถัน. *Journal of KKU Science*. 46(1) 1-13.

- [11] Charoeythornkhajhornchai, P., Samthong, C., & Somwangthanaroj, A. (2017). Influence of sulfenamide accelerators on cure kinetics and properties of natural rubber foam. *Journal of Applied Polymer Science*, 134(19), 1-8.
- [12] Gradwell, M. H. S., & McGill, W. J. (1994). The thermal decomposition of sulfenamide accelerators. *Journal of applied polymer science*, 51(1), 169-176.
- [13] Butler, J., & Freakley, P. K. (1992). Effect of humidity and water content on the cure behavior of a natural-rubber accelerated sulfur compound. *Rubber chemistry and technology*, 65(2), 374-384.
- [14] Charoeythornkhajhornchai, P., Samthong, C., Boonkerd, K., & Somwangthanaroj, A. (2016). Effect of azodicarbonamide on microstructure, cure kinetics and physical properties of natural rubber foam. *Journal of Cellular Plastics*, 53(3), 287-303.
- [15] Najib, N. N., Ariff, Z. M., Manan, N. A., Bakar, A. A., & Sipaut, C. S. (2009). Effect of blowing agent concentration on cell morphology and impact properties of natural rubber foam. *Journal of Physical Science*, 20(1), 13-25.
- [16] Pechurai, W., Muansupan, T., & Seawlee, P. (2014). Effect of foaming temperature and blowing agent content on cure characteristics, mechanical and morphological properties of natural rubber foams. *Advanced Materials Research*, 844, 454-457.
- [17] Ariff, Z. M., Zakaria, Z., Tay, L. H., & Lee, S. Y. (2008). Effect of foaming temperature and rubber grades on properties of natural rubber foams. *Journal of applied polymer science*, 107(4), 2531-2538.
- [18] Moonchai, D., Juntamui, P., & Ruankum, R. (2016). Effect of Defatted Rice Bran, Calcium Carbonate and Clay on Properties of Cellular Natural Rubber. *Science, Engineering and Health Studies. Silpakorn University science and technology journal*, 10(4), 10-14.

- [19] Bashir, M. A., Iqbal, N., Shahid, M., & Ahmed, R. (2014). Structural, viscoelastic, and vulcanization study of sponge ethylene–propylene–diene monomer composites with various carbon black loadings. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(1), 1- 7.
- [20] Kim, J. H., Choi, K. C., & Yoon, J. M. (2006). The foaming characteristics and physical properties of natural rubber foams: effects of carbon black content and foaming pressure. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 12(5), 795-801.
- [21] Bashir, M. A., Shahid, M., Alvi, R. A., & Yahya, A. G. (2012). Effect of carbon black on curing behavior, mechanical properties and viscoelastic behavior of natural sponge rubber-based nano-composites. *Key Engineering Materials*, 510, 532-539.
- [22] Vahidifar, A., Esmizadeh, E., Rostami, E., Nouri Khorasani, S., & Rodrigue, D. (2019). Morphological, rheological, and mechanical properties of hybrid elastomeric foams based on natural rubber, nanoclay, andnanocarbon black. *Polymer Composites*, 40(11), 4289-4299.
- [23] Kim, J. H., Koh, J. S., Choi, K. C., Yoon, J. M., & Kim, S. Y. (2007). Effects of foaming temperature and carbon black content on the cure characteristics and mechanical properties of natural rubber foams. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 13(2), 198-205.
- [24] Lee, E. K., & Choi, S. Y. (2007). Preparation and characterization of natural rubber foams : Effects of foaming temperature and carbon black content. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 24(6), 1070-1075.
- [25] Zhang, B. S., Lv, X. F., Zhang, Z. X., Liu, Y., Kim, J. K., & Xin, Z. X. (2010). Effect of carbon black content on microcellular structure and physical properties of chlorinated polyethylene rubber foams. *Materials & Design*, 31(6), 3106-3110.

- [26] Vahidifar, A., Nouri Khorasani, S., Park, C. B., Naguib, H. E., & Khonakdar, H. A. (2016). Fabrication and characterization of closed-cell rubber foams based on natural rubber/carbon black by one-step foam processing. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55(8), 2407-2416.
- [27] Charoeythornkhajhornchai, P., Samthong, C., & Somwangthanaroj, A. (2018). Effect of graphene treated with cyclohexyl diamine by diazonium reaction on cure kinetics, mechanical, thermal, and physical properties of natural rubber/graphene nanocomposite foam. *Polymer Composites*, 40(S2), E1766-E1776.
- [28] Charoeythornkhajhornchai, P., Khamloet, W. and Nungjumnong, P. (2020). Effect of carbon allotropes on foam formation, cure characteristics, mechanical and thermal properties of NRF/carbon composites. *Journal of Cellular Plastics*.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณ

1. วิธีการคำนวณหาค่า Degree of cure

$$\text{จากสูตร Degree of cure} = \frac{T_t - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}$$

$$T_t = \text{ค่าแรงบิตที่เวลาใด ๆ}$$

$$T_{\max} = \text{ค่าแรงบิตสูงสุด}$$

$$T_{\min} = \text{ค่าแรงบิตต่ำสุด}$$

ยกตัวอย่างการคำนวณ Degree of cure จากตัวอย่างชนิดอนุภาคคาร์บอนจากเขม่าดำ โดยค่าแรงบิตที่เวลาใด ๆ มีค่าเท่ากับ 0.996 ค่าแรงบิตสูงสุด มีค่ากับ 4.261 ค่าแรงบิตต่ำสุด มีค่าเท่ากับ 0.991

จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ สามารถนำไปคำนวณหาค่า Degree of cure ดังนี้

$$\text{Degree of cure} = \frac{0.996 - 0.991}{4.261 - 0.991}$$

$$\text{Degree of cure} = 0.001529$$

2. วิธีการคำนวณหาค่า Cure rate

$$\text{จากสูตร Cure rate} = \frac{\text{Degree of cure}}{\Delta t}$$

ยกตัวอย่างการคำนวณ Cure rate จากตัวอย่าง ชนิดอนุภาคคาร์บอนจากเขม่าดำ โดยค่า Degree of cure มีค่าเท่ากับ 0.001529 ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงเวลา มีค่ากับ 1.921 นาที

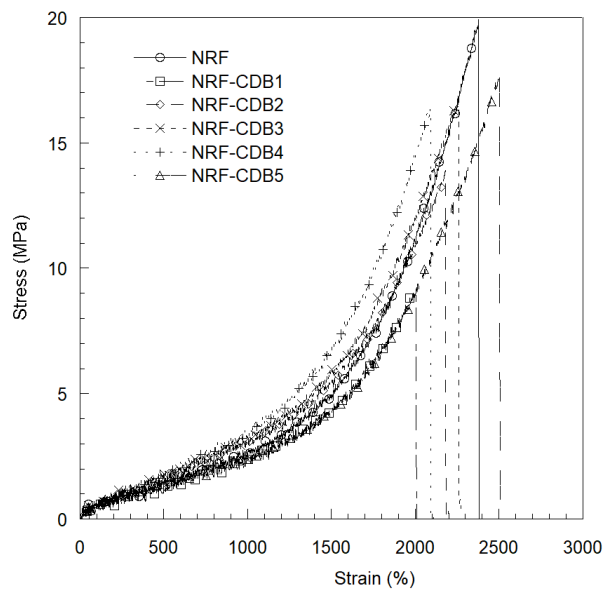
จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ สามารถนำไปคำนวณหาค่า Cure rate ดังนี้

$$\text{Cure rate} = \frac{0.001529}{1.921}$$

$$\text{Cure rate} = 0.000796 \text{ min}^{-1}$$

ภาคผนวก ข


ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง Universal testing machine




รูปที่ ข.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ที่ปรับปริมาณคาร์บอนจากเปลือกทุเรียน

ตารางแสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงกลจากการปรับปริมาณคาร์บอนจากเปลือกทุเรียนที่ 0-5 phr


ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบด้านทานแรงดึงของชิ้นงานโฟมยางธรรมชาติ

Sample Name	Test data	Tensile strength at break (MPa)	Elongation at break (%)	Specimen Failure
NRF	1	18.44	2,327.89	
	2	19.87	2,296.77	
	3	19.02	2,351.55	
AVERAGE	-	19.11	2,325.40	
SD	-	0.719235705	27.47452881	


ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบด้านทานแรงดึงของชิ้นงานโฝมยางธรรมชาติ

Sample Name	Test data	Tensile strength at break (MPa)	Elongation at break (%)	Specimen Failure
NRF-CDB1	1	10.64	2017.04	
	2	15.44	1834.91	
	3	9.17	2000.64	
AVERAGE	-	11.75	1950.863333	
SD	-	3.27906999	100.7527748	


ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบด้านทานแรงดึงของชิ้นงานโฝมยางธรรมชาติ

Sample Name	Test data	Tensile strength at break (MPa)	Elongation at break (%)	Specimen Failure
NRF-CDB2	1	13.91	2180.03	
	2	14.54	2166.34	
	3	13.49	2108.64	
AVERAGE	-	13.98	2151.67	
SD	-	0.52848841	37.88851673	


ตารางที่ ข.4 ผลการทดสอบด้านทานแรงดึงของชิ้นงานโฝมยางธรรมชาติ

Sample Name	Test data	Tensile strength at break (MPa)	Elongation at break (%)	Specimen Failure
NRF-CDB3	1	16.28	2264.7	
	2	16.86	2257.71	
	3	18.71	2360.11	
AVERAGE	-	17.28333333	2294.173333	
SD	-	1.269107298	57.20968479	

ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบด้านทานแรงดึงของชิ้นงานโฝมยางธรรมชาติ

Sample Name	Test data	Tensile strength at break (MPa)	Elongation at break (%)	Specimen Failure
NRF-CDB4	1	20.39	2079.79	
	2	15.32	1967.24	
	3	16.44	2086.25	
AVERAGE	-	17.38333333	2044.426667	
SD	-	2.663387567	66.92360595	

ตารางที่ ข.6 ผลการทดสอบด้านทานแรงดึงของชิ้นงานโฝมยางธรรมชาติ

Sample Name	Test data	Tensile strength at break (MPa)	Elongation at break (%)	Specimen Failure
NRF-CDB5	1	17.92	2516.86	
	2	17.86	2504.04	
	3	18.29	2460.86	
AVERAGE	-	18.02333333	2493.92	
SD	-	0.232880513	29.33957737	