

การใช้ถ้ำลอยเป็นสารตัวเติมในยางรถชนิดที่ใช้ความเร็วต่ำ



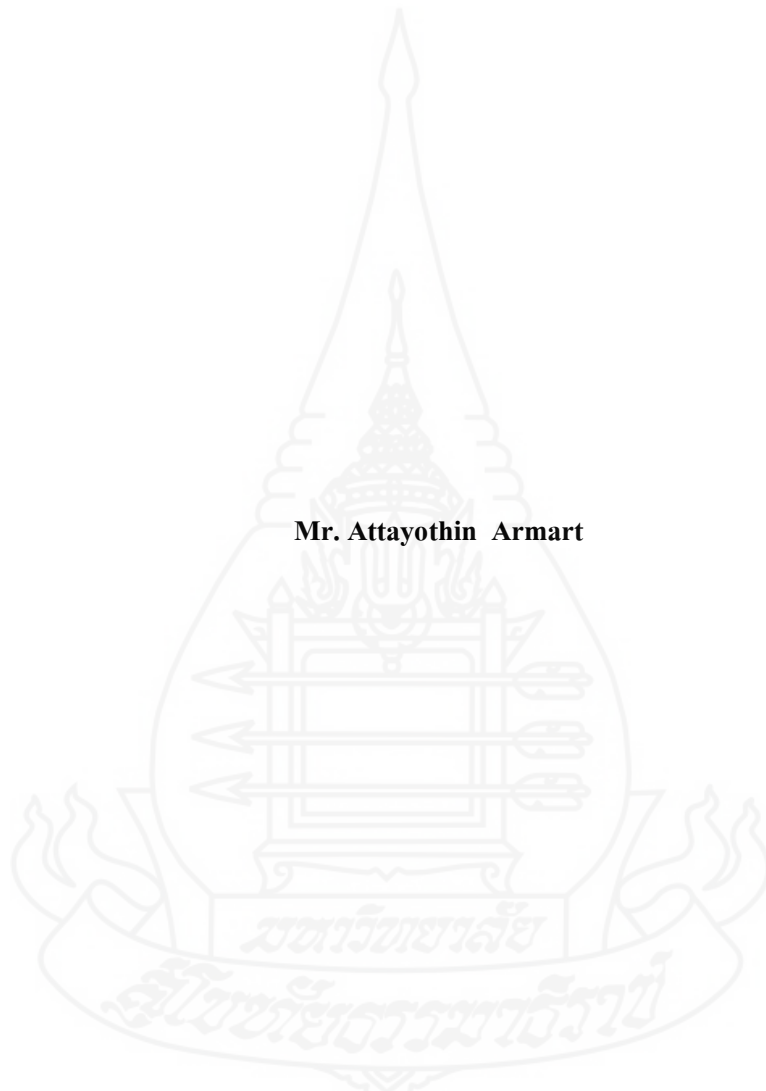
นายอติโยชิน อามาศย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
วิชาเอกการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรม สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

พ.ศ. 2563

Using Fly Ash as Filler in Low-Speed Vehicle Tyre Production

Mr. Attayothin Armart



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for
the Degree of Master of Science in Industrial Environment Management

School of Health Science

Sukhothai Thammathirat Open University

2020

ชื่อวิทยานิพนธ์ การใช้ถั่วลอายเป็นสารตัวเติมในยางรถชนิดที่ใช้ความเร็วต่ำ

ผู้วิจัย นายอัครโยธิน อามาตย์ รหัสนักศึกษา 2575001041

ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรม)

อาจารย์ที่ปรึกษา (1) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริรัตน์ สุวณิชช์เจริญ (2) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรสวรรค์ ศรีสวัสดิ์
ปีการศึกษา 2563

บทคัดย่อ

การวิจัยเชิงทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) ศึกษาสมบัติของยางคอมปาวด์เมื่อใช้ถั่วลอายเป็นสารตัวเติมแทนเขม่าดำและดินขาว (2) เปรียบเทียบสมบัติของยางคอมปาวด์ที่ใช้ถั่วลอายเป็นสารตัวเติมแทนเขม่าดำและดินขาวกับยางรถชนิดที่ใช้ความเร็วต่ำ และ (3) วิเคราะห์ต้นทุนการใช้ถั่วลอายเป็นสารตัวเติมในการผลิตยางล้อรถชนิดที่ใช้ความเร็วต่ำ

ในการทดลองได้ออกแบบสูตรยางคอมปาวด์โดยใช้ถั่วลอายเป็นสารตัวเติมทดแทนเขม่าดำและดินขาว ดังนี้ สูตรต้นแบบใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติมจำนวน 50 ส่วนในร้อยละของยาง (พีเอชอาร์) สูตรทดลองชุดที่ 1 ใช้ดินขาวทดแทนเขม่าดำในสัดส่วน 5, 10 และ 15 พีเอชอาร์ สูตรทดลองชุดที่ 2 ใช้ถั่วลอภัยทดแทนเขม่าดำในสัดส่วน 5, 10 และ 15 พีเอชอาร์ และสูตรทดลองชุดที่ 3 ใช้ดินขาว 10 พีเอชอาร์ ร่วมกับถั่วลอภัย 5, 10 และ 15 พีเอชอาร์ ตามลำดับ จากนั้นทำการทดสอบสมบัติของยางคอมปาวด์สูตรทดลองเปรียบเทียบกับสูตรต้นแบบและยางรถชนิดที่ใช้ความเร็วต่ำ สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลคือ การทดสอบครัสกาล วอลลิส

ผลการศึกษาพบว่า (1) ยางคอมปาวด์ที่มีค่าเฉลี่ยโมดูลัส และค่าความต้านทานแรงฉีกขาด แตกต่างจากสูตรต้นแบบ ได้แก่ สูตรการทดลองชุดที่ 2 ที่ใช้ถั่วลอภัย 15 พีเอชอาร์ และสูตรการทดลองชุดที่ 3 ที่ใช้ดินขาว 10 พีเอชอาร์ ร่วมกับถั่วลอภัย 10 และ 15 พีเอชอาร์ ($p\text{-value} < 0.05$) ยางคอมปาวด์สูตรที่มีค่าความเค้นแตกต่างจากสูตรต้นแบบ ได้แก่ สูตรการทดลองชุดที่ 3 ที่ใช้ดินขาว 10 พีเอชอาร์ ร่วมกับถั่วลอภัย 15 พีเอชอาร์ ($p\text{-value} < 0.05$) สำหรับสมบัติการยึดตัว พบว่า สูตรต้นแบบไม่แตกต่างกับสูตรทดลองทุกสูตร ($p\text{-value} < 0.05$) (2) เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของยางคอมปาวด์สูตรทดลองกับยางรถชนิดที่ใช้ความเร็วต่ำ พบว่า สูตรทดลองชุดที่ 2 ที่ใช้ถั่วลอภัยแทนเขม่าดำในสัดส่วน 5, 10 และ 15 พีเอชอาร์ และสูตรทดลองชุดที่ 3 ที่ใช้ถั่วลอภัย 5 พีเอชอาร์ ร่วมกับดินขาว 10 พีเอชอาร์ เป็นสูตรที่เหมาะสมสำหรับการผลิตยางรถเทอร์เลอร์ชนิดเบา (ที่ 1) และ (3) เมื่อวิเคราะห์ราคาวัตถุดิบในการผลิตยางรถยนต์ พบว่า การนำถั่วลอภัยไปใช้เป็นสารตัวเติมทดแทนเขม่าดำ ในสัดส่วน 15 พีเอชอาร์ สามารถลดต้นทุนได้ถึงร้อยละ 5.73 และถั่วสามารถนำถั่วลอภัยปริมาณ 12 ตัน มาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนเขม่าดำได้ทั้งหมด ก็จะลดต้นทุนวัตถุดิบได้กว่า 300,000 บาทต่อปี

คำสำคัญ ถั่วลอภัย เขม่าดำ สารตัวเติม ยางรถชนิดที่ใช้ความเร็วต่ำ ยางคอมปาวด์

Thesis title: Using Fly Ash as Filler in Low-Speed Vehicle Tyre Production

Researcher: Mr. Attayothin Armart; **ID:** 2575001041;

Degree: Master of Science (Industrial Environment Management);

Thesis advisors: (1) Dr. Sirirat Suwanidcharoen, Assistant Professor; (2) Dr. Ponsawat Srisawat, Assistant Professor; **Academic year:** 2020

Abstract

The purposes of this experimental study were: (1) to study the properties of rubber compound when using fly ash as a filler instead of carbon black and kaolin; (2) to compare the properties of the rubber compound that used fly ash as a filler instead of carbon black and kaolin; and (3) to determine the cost of using fly ash as a filler, all in the manufacture of low-speed vehicle (LSV) tyres.

In the experiment, the rubber compound formulation was designed by using fly ash as a filler substituting carbon black and kaolin. The prototype formula used carbon black as a filler, 50 parts per hundred rubber (phr). The experimental formulas had 3 sets: Set 1, using kaolin as a substitute for carbon black in proportions of 5, 10 and 15 phr; Set 2, using fly ash to replace carbon black at proportions of 5, 10 and 15 phr; and Set 3, using kaolin 10 phr in combination with fly ash 5, 10 and 15 phr, respectively. The rubber compounds were analyzed to compare the properties of experimental formulas with prototype formula and LSV tyres. Data analysis was based on descriptive statistic and the Kruskal Wallis test.

The results showed that: (1) The rubber compounds that had different mean modulus and tensile strength, compared with the prototype formula were Set 2 using 15 phr fly ash and Set 3 using 10 phr kaolin in combination with 10 and 15 phr fly ash (p -value < 0.05). The rubber compound with a different stress value, compared with the prototype formula, was Set 3 using 10 phr kaolin in combination with 15 phr fly ash (p -value < 0.05). Concerning elongation properties, all three sets did not exhibit any differences, compared with the prototype formula (p -value < 0.05); (2) Comparing the properties of experimental rubber compounds with those used in LSV tyre, it was found that Set 2, using 5, 10 and 15 phr fly ash, and Set 3, using 10 phr kaolin together with 5 phr fly ash, were suitable for producing light trailer tyres (T1); (3) In an analysis of raw materials costs for tyre production, it was found that using 15 phr fly ash as a substitute for carbon black could cut the cost by 5.73%. When using 12 tons of fly ash for such purpose each year, the raw material cost could be reduced by more than 300,000 baht annually.

Keywords: Fly ash, Carbon black, Filler, Low-speed vehicle tyre, Rubber compound

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิริรัตน์ สุวณิชย์เจริญ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรสวรรค์ ศรีสวัสดิ์ ซึ่งได้สละเวลาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาและให้คำแนะนำต่างๆ ตลอดจนช่วยแก้ไขรูปเล่มให้สมบูรณ์และให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์และข้าพเจ้าขอขอบพระคุณท่านคณะกรรมการสอบ ซึ่งประกอบด้วย ประธานกรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉันททิพ สกุลขมฤทัย กรรมการในการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิริรัตน์ สุวณิชย์เจริญ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรสวรรค์ ศรีสวัสดิ์ ที่ให้คำแนะนำต่างๆ ทำให้งานวิจัยนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณฝ่ายบริหารและเพื่อนๆ บริษัทสวิช-วัน คอร์ปอเรชั่น จำกัด และ บริษัท ดิสโตน อินเทอร์เน็ตเนชั่นแนล จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านข้อมูล วัสดุ และเครื่องมือในการทดลอง และทดสอบ และขอขอบคุณ ศูนย์พัฒนาและวิเคราะห์ สมบัติของวัสดุ (ศพว.) สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ที่ทำการวิเคราะห์ และทดสอบสมบัติของถ้ำลอยและดินขาว เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบในงานวิจัย

ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้ จะเป็นประโยชน์ สำหรับผู้ที่สนใจ ตลอดจนผู้ประกอบการด้านอุตสาหกรรมยาง เพื่อนำไปประยุกต์พัฒนา ใช้งานและต่อยอด ในส่วนของอุตสาหกรรมยางรถยนต์ที่ใช้ความเร็วต่ำต่อไป

อัตโยธิน อามาตย์

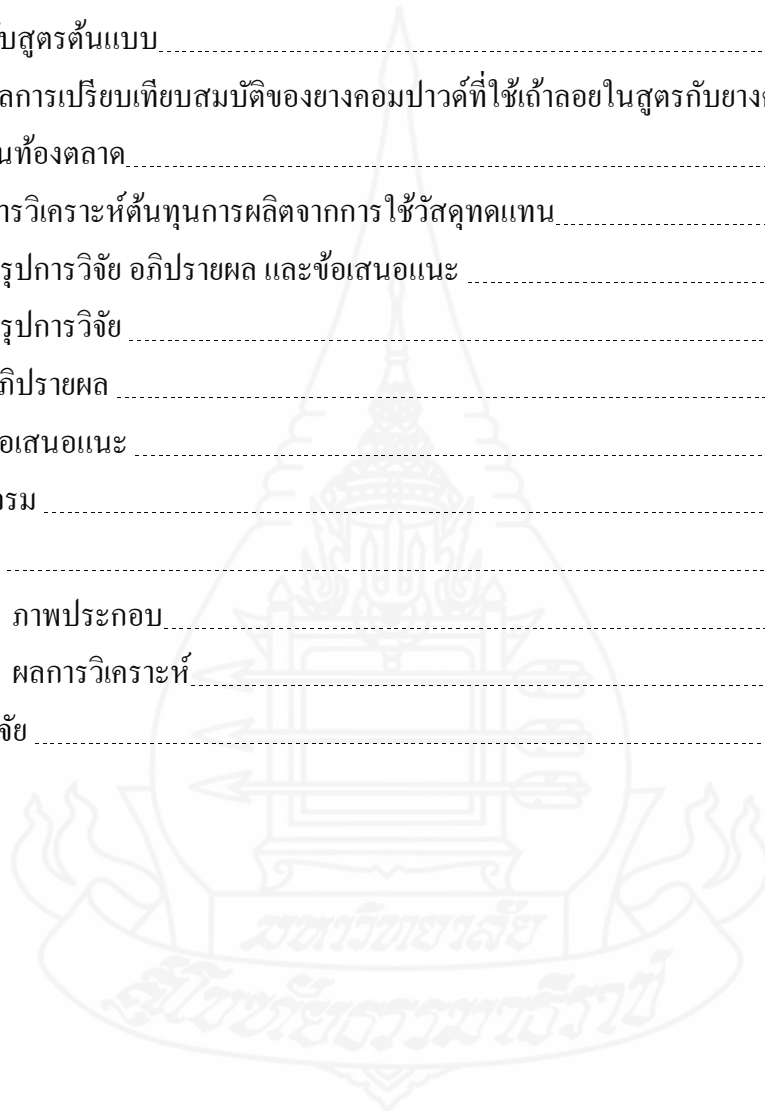
กุมภาพันธ์ 2564

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์การวิจัย	2
ขอบเขตการวิจัย	2
นิยามศัพท์เฉพาะ	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
กรอบแนวคิดการวิจัย	4
บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	5
ขงรชชนิดที่ใช้ความเร็วต่ำ	5
ผลิตภัณฑ์ยาง	6
สารตัวเติม	14
กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางและการขึ้นรูป	21
การทดสอบสมบัติยางคอมปาวด์	24
อันตรายของเก้าอี้หนังต่อสุขภาพ	26
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	29
รูปแบบการวิจัย	29
อุปกรณ์ เครื่องมือ/ สารเคมี ที่ใช้ในการศึกษา	29
วิธีการทดลอง	30
การวิเคราะห์ข้อมูล	33
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	34
ผลการวิเคราะห์สมบัติและองค์ประกอบของเก้าอี้หนังและดินขาว	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ผลการทดสอบสมบัติของยางคอมปาวด์.....	36
ผลการทดลองเปรียบเทียบการใช้ ดินขาว ถ้ำลอย เป็นสารตัวเติม ในยางคอมปาวด์ กับสูตรต้นแบบ.....	42
ผลการเปรียบเทียบสมบัติของยางคอมปาวด์ที่ใช้ถ้ำลอยในสูตรกับยางคอมปาวด์ ในท้องตลาด.....	46
การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตจากการใช้วัสดุทดแทน.....	53
บทที่ 5 สรุปการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	55
สรุปการวิจัย	55
อภิปรายผล	57
ข้อเสนอแนะ	59
บรรณานุกรม	61
ภาคผนวก	65
ก ภาพประกอบ.....	66
ข ผลการวิเคราะห์.....	73
ประวัติผู้วิจัย	100



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางสด	12
ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างยางสังเคราะห์และผลิตภัณฑ์จากยางสังเคราะห์ต่างๆ	14
ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพของถ่านหิน class F และ class C	19
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของสูตรต้นแบบ	31
ตารางที่ 3.2 สัดส่วนการใช้สารตัวเติม เขม่าดำ ดินขาว และถั่วลอ่ย	32
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความชื้นการดูดซับน้ำมันจากค้างตะแกรง และการกระจายตัวของอนุภาค ของถั่วลอ่ยและดินขาว	34
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของถั่วลอ่ย และ ดินขาวในรูปของสารประกอบ	35
ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของถั่วลอ่ย และ ดินขาว ในรูปของธาตุบริสุทธิ์	35
ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนืดมูนี้ของสูตรยางคอมปาวด์จากการทดสอบ	36
ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าการคงรูปของยาง	38
ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสมบัติความแข็ง (shore A hardness) ของยาง ..	40
ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยโมดูลัส (Modulus 300) ระหว่างสูตรยางคอมปาวด์สูตรต้นแบบและสูตรทดลอง	42
ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงฉีกขาด (Tear Strength) ระหว่างสูตรยางคอมปาวด์สูตรต้นแบบและสูตรทดลอง	43
ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยการยืดตัว (elongation at break) ระหว่างสูตรยางคอมปาวด์สูตรต้นแบบและสูตรทดลอง	44
ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยความเค้น (Stress) ระหว่างสูตรยางคอมปาวด์สูตรมาตรฐานและสูตรทดลอง	45
ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบสมบัติของยางที่ทดสอบกับยางคอมปาวด์สูตร T1 (สูตรยางสำหรับล้อรถเทอร์เลอร์ชนิดเบา)	46
ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบสมบัติของยางที่ทดสอบกับยางคอมปาวด์สูตร T2 (สูตรยางสำหรับล้อรถเทอร์เลอร์ชนิดหนัก)	47
ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบสมบัติของยางที่ทดสอบกับยางคอมปาวด์สูตร T3 (สูตรยางสำหรับล้อรถเกษตร)	48

ญ

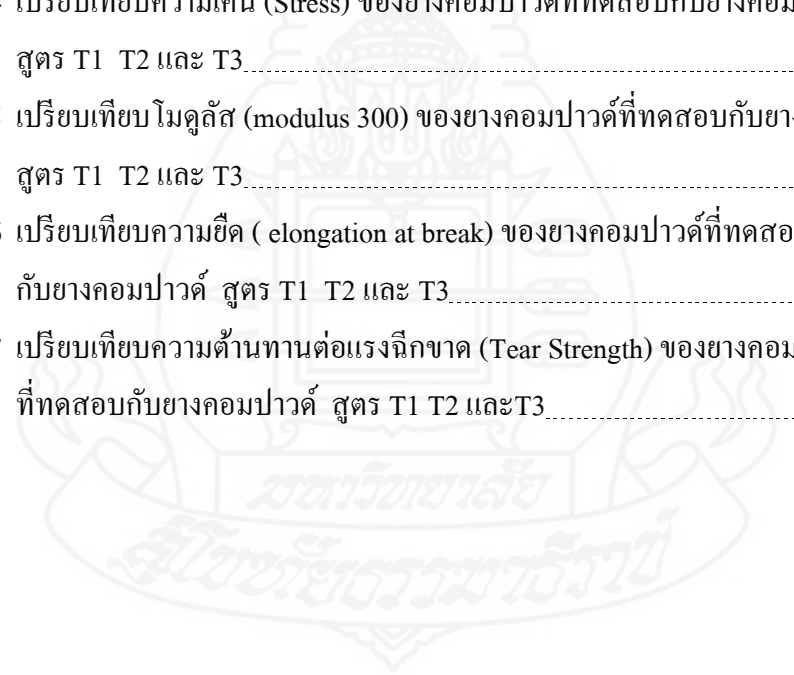
สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ 4.14 ต้นทุนการผลิตยางคอมปาวด์.....	หน้า 53
---	------------



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1.1 กรอบแนวคิดการวิจัย.....	4
ภาพที่ 2.1 ส่วนประกอบ และชนิดยางธรรมชาติ.....	11
ภาพที่ 2.2 กระบวนการเผาถ่านหินและดักจับเถ้าลอยด้วยระบบ ดักอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต.....	18
ภาพที่ 2.3 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง.....	23
ภาพที่ 2.4 ผลกระทบของเถ้าลอยต่อระบบทางเดินหายใจ.....	27
ภาพที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยความหนืดมูนนี่ของสูตรยางคอมปาวด์จากการทดสอบ (mooney viscosity)...	37
ภาพที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยการคงรูป(Cure Characteristics T90) ค่าเฉลี่ยเวลาเริ่มคงรูป (Scorch Time,TS2).....	39
ภาพที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยความแข็ง (shore A hardness) ของยางจากการทดสอบ.....	41
ภาพที่ 4.4 เปรียบเทียบความเค้น (Stress) ของยางคอมปาวด์ที่ทดสอบกับยางคอมปาวด์ สูตร T1 T2 และ T3.....	49
ภาพที่ 4.5 เปรียบเทียบ โมดูลัส (modulus 300) ของยางคอมปาวด์ที่ทดสอบกับยางคอมปาวด์ สูตร T1 T2 และ T3.....	50
ภาพที่ 4.6 เปรียบเทียบความยืด (elongation at break) ของยางคอมปาวด์ที่ทดสอบ กับยางคอมปาวด์ สูตร T1 T2 และ T3.....	51
ภาพที่ 4.7 เปรียบเทียบความต้านทานต่อแรงฉีกขาด (Tear Strength) ของยางคอมปาวด์ ที่ทดสอบกับยางคอมปาวด์ สูตร T1 T2 และT3.....	52



บทที่ 1

บทนำ

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เถ้าลอย (fly ash หรือ pulverized fuel ash) ถือเป็นผลพลอยได้ จากกระบวนการเผาถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง ปัจจุบันประเทศไทยมีการนำถ่านหินมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นจำนวนมาก ซึ่งรวมกันแล้วมีปริมาณมากกว่า 34 ล้านตัน โดยแบ่งเป็นถ่านหินที่ผลิตจากแหล่งในประเทศเกือบ 20 ล้านตัน (มากกว่าร้อยละ 90 เป็นถ่านหินที่ผลิตจากแหล่งแม่เมาะของ การไฟฟ้าฝ่ายผลิต ส่วนอีกไม่ถึงร้อยละ 10 เป็นถ่านหินจากเหมืองเอกชนในประเทศ) และเป็นถ่านหินนำเข้าจากต่างประเทศมากกว่า 14 ล้านตัน กล่าวสรุปโดยภาพรวมของปริมาณการใช้ถ่านหินในอุตสาหกรรมต่างๆ ของประเทศไทย อุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้ามีการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงมากที่สุดคิดเป็นสัดส่วนประมาณร้อยละ 75 ของปริมาณการใช้ถ่านหินทั้งหมด อุตสาหกรรมซีเมนต์คิดเป็นสัดส่วนประมาณร้อยละ 18-20 อุตสาหกรรมที่ใช้หม้อน้ำ (boiler) เช่น กระดาษ ไฟเบอร์ อาหาร โลหะ ฯลฯ คิดเป็นสัดส่วนไม่เกินร้อยละ 5 ส่วนอุตสาหกรรมอื่นๆ คิดเป็นสัดส่วนประมาณร้อยละ 1 ของปริมาณถ่านหินที่ใช้ทั้งหมด (จิณฉัตร วงศ์อำมาตย์ และคณะ, 2557) ถ่านหินหรือเถ้าลอย เกิดจากการเผาถ่านหิน จะถูกลมพัดพาออกมาตามลมร้อนออกไปสู่ปล่องควัน จากนั้นถ้าถูกดักจับด้วยเครื่องดักอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator) รวบรวมสะสมเถ้า เพื่อเก็บไว้ในพื้นที่จัดเก็บซึ่งเถ้าลอยมีสัดส่วนประมาณร้อยละ 1 และเถ้าหนัก ร้อยละ 10-12 จากการเผาไหม้ (อภิสิทธิ์ โฆษิตชัยยงค์ และคณะ, 2553) จากการศึกษาสมบัติและส่วนประกอบของเถ้าลอยพบว่ามีส่วนประกอบใกล้เคียงกับเขม่าดำ (carbon black) และดินขาว (china clay) ที่ใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมผลิตยางรถยนต์ใช้ความเร็วต่ำเช่นยางรถแทรกเตอร์ และ ยางรถเกษตร เถ้าลอยมีการแบ่งคลาส (class) ขึ้นกับประเภทของถ่านหิน โรงงานผลิตยางรถยนต์บางแห่งมีการใช้ถ่านหินประเภท ซับบิทูมินัส (sub-bituminous) เป็นถ่านหินคลาสซี (class C) องค์ประกอบหลักทางเคมีคือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3) และ เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ซึ่งมีออกไซด์เหล่านี้ร้อยละ 50-70 โดยน้ำหนัก (จิณฉัตร วงศ์อำมาตย์ และคณะ, 2557)

สารตัวเติมเสริมแรงที่นิยมใช้ในการผลิตยางรถยนต์ใช้ความเร็วต่ำได้แก่ เขม่าดำและซิลิกา และสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรง หรือกึ่งเสริมแรง ได้แก่ ดินขาว ทัลคัม แคลเซียมคาร์บอเนต ฯลฯ

จากสมบัติและองค์ประกอบหลักทางเคมีของถั่วลันเตา ที่มีองค์ประกอบบางอย่างคล้ายกับที่พบใน เมมบ้า และในดินขาว เช่นซิลิกอนไดออกไซด์ เป็นไปได้ว่าสามารถที่จะนำมาใช้ทดแทน เมมบ้า และ ดินขาว เพื่อเป็นสารตัวเติมกึ่งเสริมแรงได้ เพื่อลดต้นทุนการจัดการถั่วลันเตาของบริษัท และลดต้นทุนใน สูตรการผลิตยางคอมปาวด์ในอุตสาหกรรมการผลิตยางรถที่ใช้ความเร็วต่ำ เช่นยางรถยก ยางรถแทรกเตอร์ ยางรถเกศตร เป็นต้น

จากข้อมูลข้างต้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดว่าในอุตสาหกรรมยางที่ใช้สารตัวเติมชนิดเสริมแรง หรือกึ่งเสริมแรงของยางคือเมมบ้าและดินขาวที่คุณภาพสูงซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศ เป็นไปได้ว่า น่าจะลดสัดส่วนผสมลงได้และใช้ถั่วลันเตาเป็นสารทดแทน การศึกษาสมบัติของยางรถชนิดใช้ ความเร็วต่ำ เมื่อใช้ถั่วลันเตาผสมเป็นสารตัวเติมทดแทนเมมบ้า ดินขาว เปรียบเทียบกับสารตัวเติมที่ ใช้ในปัจจุบันเพื่อเป็นข้อมูลให้กับผู้ที่สนใจ ผู้ประกอบการนำไปศึกษาต่อยอดเพื่อการผลิตยางรถ ชนิดที่ใช้ความเร็วต่ำที่มีคุณภาพในราคาที่ถูกลง ตลอดจนการใช้ประโยชน์ของถั่วลันเตาได้อย่าง หลากหลายและลดปัญหาการกำจัดถั่วลันเตาในอนาคตต่อไป

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

- 2.1 ศึกษาสมบัติของยางคอมปาวด์ เมื่อใช้ถั่วลันเตาเป็นสารตัวเติม แทนเมมบ้าและดินขาว
- 2.2 เปรียบเทียบสมบัติของยางที่ใช้ถั่วลันเตาเป็นสารตัวเติมแทนเมมบ้าและดินขาวกับ ยางรถชนิดที่ใช้ความเร็วต่ำ
- 2.3 วิเคราะห์ต้นทุนการใช้ถั่วลันเตาเป็นสารตัวเติมในการผลิตยางล้อรถชนิดที่ใช้ ความเร็วต่ำ

3. ขอบเขตการวิจัย

ทำการศึกษาสมบัติของยางรถชนิดที่ใช้ความเร็วต่ำ เช่น ยางรถแทรกเตอร์ และยางรถ เกศตร เมื่อใช้ถั่วลันเตาผสมเป็นสารตัวเติม ทดแทนเมมบ้า และดินขาว และเปรียบเทียบ การผสม ของถั่วลันเตาในยางรถแทรกเตอร์ และยางรถเกศตร ที่มีอยู่โดยทั่วไปในท้องตลาด ในโรงงานอุตสาหกรรม แห่งหนึ่งในจังหวัดนครปฐม ระหว่าง เดือน พฤศจิกายน 2559 ถึง เดือน เมษายน 2560

4. นิยามศัพท์เฉพาะ

4.1 สมบัติของยาง หมายถึง สมบัติของยางรถยนต์ใช้ความเร็วต่ำเมื่อใช้ถ้ำลอยผสม เป็นสารตัวเติม ทดแทนเขม่าดำ ดินขาว ประกอบไปด้วย ค่าความหนืดมูนิ ความคงรูปของยาง ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงฉีกขาด และความแข็งแรง

4.2 ถ้ำลอย หมายถึง ถ้ำจากการเผาถ่านหินจากบอยเลอร์ โดยใช้เครื่องมัลติไซโคลน (multicyclone precipitator) คักจับ ของบริษัทแห่งหนึ่งในจังหวัดนครปฐม โดยใช้ถ่านหินสับบิทูมินัส จากบริษัทเอเชีย กรีน เป็นเชื้อเพลิง

4.3 ยางรถยนต์ใช้ความเร็วต่ำ หมายถึง ยางรถที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมหรือยางรถที่ไม่ใช้ในการขับเคลื่อนโดยตรง เช่น ยางรถแทรกเตอร์ ยางรถที่ใช้ในงานเกษตร ยางรถยกในโรงงาน เป็นต้น

4.4 ยางคอมปาวด์ หมายถึง ยางที่มีการผสมสารตัวเติมและสารเพิ่มสมบัติอื่นๆเพื่อการนำไปสร้างยาง ก่อนนำไปอบขึ้นรูปเป็นชิ้นงานหรือเป็นยางรถสำเร็จรูปพร้อมใช้งาน

4.5 สารตัวเติม หมายถึง สารที่เติมลงไปในยางเพื่อให้สมบัติดีขึ้น หรือเพื่อเติมลงไปเพื่อลดการใช้เนื้อยางลงเพื่อลดต้นทุนด้านวัตถุดิบเช่น ถ้ำลอย เขม่าดำ และดินขาว

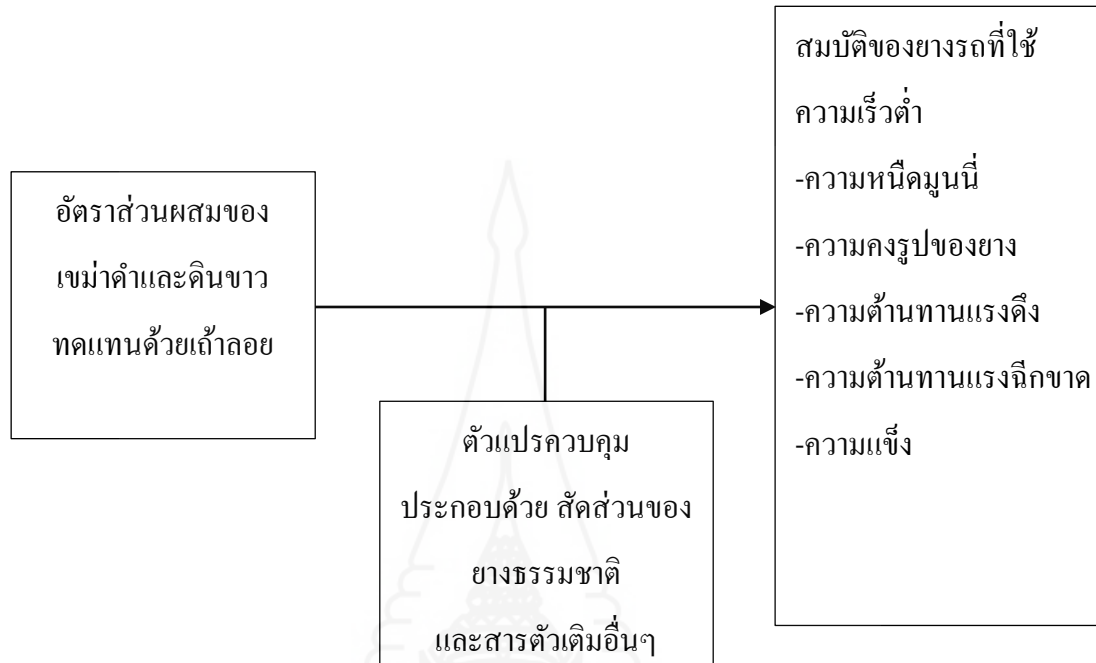
4.6 phr (part per hundred of rubber) หมายถึง หน่วยในการคำนวณสัดส่วนของส่วนผสมของสูตรการผลิตคอมปาวด์ ต่อยาง 100 ส่วน

4.7 สูตรยางรถยนต์ใช้ความเร็วต่ำ T1 หมายถึง ยางรถแทรกเตอร์ชนิดเบา **T2** หมายถึง ยางรถแทรกเตอร์ชนิดหนัก **T3** หมายถึง ยางรถที่ใช้กับรถที่ใช้ทางด้านเกษตรกรรม

5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การศึกษาในครั้งนี้จะทำให้ทราบถึงสมบัติของคอมปาวด์ของยางรถยนต์ใช้ความเร็วต่ำเมื่อใช้ถ้ำลอย เป็นสารตัวเติมและผลการเปรียบเทียบของการเติมถ้ำลอยเพื่อการนำไปใช้ในการผลิตยางรถอุตสาหกรรม กับยางคอมปาวด์ของยางรถที่ไม่ใช้ความเร็วที่มีใช้ทั่วไปในท้องตลาด ในเบื้องต้นซึ่งจะเป็นประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรมในอนาคตหากมีการนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อผลิตยางรถยนต์ใช้ความเร็วต่ำ เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการผลิต และจะลดปัญหาการจัดการถ้ำลอยที่เกิดขึ้น โรงงานอุตสาหกรรม ตลอดจนลดการปล่อยอนุภาคขนาดเล็กที่เป็นมลภาวะออกสู่ สภาวะแวดล้อม

6. กรอบแนวคิดการวิจัย



ภาพที่ 1.1 กรอบแนวคิดการวิจัย

การศึกษาการใช้เถ้าลอยเป็นสารตัวเติมในการผลิตยางรถชนิดที่ใช้ความเร็วต่ำโดยใช้เถ้าลอยผสมเป็นสารตัวเติม ทดแทนเหม้าดำ และทดแทนดินขาว ทำการทดสอบสมบัติของสูตรทดลองที่ใช้ตัวเติม เหม้าดำ และดินขาวกับสัดส่วนการใช้เถ้าลอย 5 10 15 phr เปรียบเทียบกับยางรถชนิดที่ใช้ความเร็วต่ำ

ตัวแปรต้น คือ อัตราส่วนผสมของ เหม้าดำ ดินขาว และ เถ้าลอย

ตัวแปรตาม คือ สมบัติเชิงกลของยางคอมปาวด์ (compound)

ตัวแปรควบคุมสัดส่วนผสมของยางธรรมชาติ และสารตัวเติมอื่นๆ

บทที่ 2

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาสมบัติของยางรถชนิดที่ใช้ความเร็วต่ำ เมื่อใช้ถ้ำลอย เป็นสารตัวเติมและ เปรียบเทียบสมบัติของยางรถชนิดที่ใช้ความเร็วต่ำ ที่ใช้ถ้ำลอย 5 10 15 phr เป็น สารตัวเติมกับยางรถเทอร์ลเลอร์ ยางรถเกษตร ที่มีอยู่โดยทั่วไปในท้องตลาด ขอบเขตของการศึกษา วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

1. ยางรถชนิดที่ใช้ความเร็วต่ำ
2. ผลึกภัณฑ์ยาง
3. สารตัวเติม
4. กระบวนการผลิตผลึกภัณฑ์ยางและการขึ้นรูป
5. การทดสอบสมบัติยางคอมปาวด์
6. อันตรายของถ้ำถ่านหินต่อสุขภาพ
7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ยางรถชนิดที่ใช้ความเร็วต่ำ

ยางรถชนิดที่ใช้ความเร็วต่ำ ทำหน้าที่รองรับน้ำหนักรถใช้ในการขับเคลื่อนให้รถไปได้ อย่างนุ่มนวลและปลอดภัยโดยใช้ความเร็วต่ำหรือไม่ใช้ในการขับเคลื่อนโดยตรง โดยปกติสัดส่วน และวัตถุดิบในการผลิตยางรถขึ้นอยู่กับประเภทของการนำยางรถไปใช้งาน ซึ่งถ้าใช้งานกับรถที่ใช้ ความเร็วในการขับเคลื่อนมักจะมีส่วนผสมของสารตัวเติมที่เน้นเสริมแรงซึ่งจะเป็นประเภทเขม่าดำ และซิลิกาเป็นหลัก ส่วนรถชนิดที่ใช้ความเร็วต่ำ เช่นรถยก(fork lift) รถเทอร์ลเลอร์และรถที่ใช้ใน การเกษตร มักจะเติมสารตัวเติมอื่นๆ ที่มีสมบัติกึ่งเสริมแรงหรือไม่เสริมแรง ทดแทนเขม่าดำ เพื่อ ลดต้นทุนในการผลิตยางประเภทดังกล่าว เช่น ดินขาว ถ้ำลอย หรือถ้ำจากการเผาเศษยางที่หมักคายเป็นต้น

1.1 ประเภทของยางรถที่ใช้ความเร็วต่ำ แบ่งเป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่

1.1.1 ยางรถใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น รถฟอร์คลิฟท์ หรือรถยก

1.1.2 ยางรถใช้ในการเกษตร เช่น รถแทรกเตอร์ รถไถ รถเกี่ยวข้าว

1.1.3 ยางรถที่ใช้ฟองหรือลากกับหัวรถบรรทุก เช่น เทลเลอร์ของรถบรรทุก รถฟอง รถลาก

โดยองค์ประกอบวัตถุดิบหลักของยางรถที่ใช้ความเร็วต่ำ จะมีส่วนประกอบของเขม่าดำไม่สูงเท่ากับที่ใช้ผลิตยางรถยนต์หรือรถบรรทุก เนื่องจากยางรถในกลุ่มนี้ไม่ต้องมีความนุ่มนวลในการขับขี่แต่ต้องการความแข็งแรงทนทานและรองรับน้ำหนักที่สูงได้ บริษัทผู้ผลิตยางจึงเติมสารตัวเติมชนิดอื่นเพื่อเพิ่มความแข็งของยางและลดต้นทุนในการผลิตทดแทนการใช้เขม่าดำที่มีราคาสูงเช่น ดินขาว และเถ้าที่ได้จากการเผาขี้เถ้าหรือขี้เถ้าจากโรงงานผลิตไฟฟ้า เป็นต้น สำหรับสัดส่วนของสารตัวเติมของยางแต่ละประเภทขึ้นอยู่กับชนิดหรือประเภทของยางรถของแต่ละบริษัทผู้ผลิตยางนั้นๆภายใต้มาตรฐานอุตสาหกรรม

เทคโนโลยีที่ใช้ ในการผลิตยางแต่ละชนิดแตกต่างกันไป แต่โดยทั่วไปแล้วยางจะมีโครงสร้าง 3 แบบ ได้แก่ โครงสร้างที่เป็นผ้าใบ (bias tyre) โครงสร้างที่เป็นเรเดียล (radial tyre) และยางตัน คุณภาพของยางหรือสมบัติต่างๆ ยังขึ้นกับลักษณะของการใช้งานของยางแต่ละประเภทด้วย เช่นยางรถยนต์ ที่วิ่งบนถนนหลวง จะต้องมีสมบัติ การยึดเกาะถนน ริดน้ำได้ดี สภาพเนื้อยางมีความยืดหยุ่น เยียบ นุ่มนวล ความสามารถในการรับน้ำหนัก เพิ่มสมรรถนะในการวิ่งของรถ เสริมสร้างความปลอดภัย ประหยัดน้ำมัน มีความคงทน และมีอายุการใช้งานนาน ส่วนยางรถที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ใช้ในฟาร์มเกษตรกรรม ต้องการมีความแข็ง รับน้ำหนักได้ดีทนการสึกหรอ อายุการใช้งานยาวนาน ไม่ต้องมีความนุ่มนวลมากนัก เป็นต้น

ดังนั้นวัตถุดิบที่เลือกใช้ในการผลิตยางรถจึงมีการใช้สัดส่วนในการผสมที่แตกต่างกันไป ผู้ศึกษาเลือกในการใช้เถ้าลอยเป็นวัตถุดิบชนิดตัวเติมกึ่งเสริมแรงทดแทนการใช้ เขม่าดำ และดินขาว ในยางรถที่ใช้ความเร็วต่ำ ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เทลเลอร์บนถนนและใช้ทางการเกษตร เช่น รถเทลเลอร์ รถไถ รถตัดดิน เป็นต้น ซึ่งไม่เน้นใช้ความเร็วแต่สมบัติของยางต้องการ ความแข็งแรง การรับน้ำหนัก และความคงทน เป็นต้น

2. ผลลัพธ์ที่ย่าง

2.1 ยางคอมปาวด์ (rubber compound)

ยางคอมปาวด์ คือ ยางที่มีการผสมสารเคมีต่างๆ เช่น สารวัลคาไนซ์ สารตัวเร่งปฏิกิริยา สารตัวเติม เป็นต้น พร้อมทั้งจะนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นยางล้อ ถูมือยาง ถูยางอนามัย ยางรองคอสะพาน ท่อยาง ยางรัด เป็นต้น

2.1.1 ส่วนประกอบ

1) ยางธรรมชาติ (*Natural Rubber; NR*) ยางสังเคราะห์ (*Synthetic Rubber; SR*)

2) สารวัลคาไนซ์ (*vulcanizing agent*) เป็นสารที่ก่อให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง (*crosslink*) ตรงตำแหน่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา เพื่อการปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางให้ดีขึ้น ปฏิกิริยาที่เกิดเรียกว่าการคงรูป หรือการวัลคาไนซ์ สารที่ทำให้ยางคงรูปแบ่งเป็น 3 พวกคือ

(1) กำมะถัน (*Sulfur*) และธาตุที่คล้ายกำมะถัน

(2) สารที่ให้กำมะถัน (*Sulfur donor*) หมายถึงสารที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบและสลายให้กำมะถันที่อุณหภูมิของการคงรูปได้แก่ ทีเอ็มทีดี (*Tetramethyl Thiuram Disulphide; TMTD*) ดีพีทีที (*Dipentamethylene Thiuram Tetrasulphide; DPTT*) เป็นต้น

(3) สารอื่นๆ ที่ไม่ใช่กำมะถัน เช่น โลหะออกไซด์ (*metallic oxides*) สารเปอร์ออกไซด์ (*peroxide*) เป็นต้น

3) สารตัวเร่งปฏิกิริยา (*accelerator*) ในการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ ถ้าใช้สารทำให้ยางคงรูปเพียงอย่างเดียวเช่นกำมะถัน จะทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ช้ามาก ต้องใช้กำมะถันปริมาณมาก และการวัลคาไนซ์ใช้เวลานานที่อุณหภูมิสูงแต่ถ้าใช้สารเร่งจะช่วยลดเวลา ลดอุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ และยังเป็น การช่วยปรับปรุงสมบัติให้กับผลิตภัณฑ์ ในการลดเวลาวัลคาไนซ์ยางปกติจะขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสารที่ใช้ การใช้สารเร่งสามารถแบ่งได้ 3 ระบบคือ

(1) ระบบการใช้สารเร่งเพียงชนิดเดียว (*primary accelerator*)

(2) ระบบการใช้สารเร่งตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป เพื่อช่วยเสริมและปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ ที่มีคุณภาพดีกว่า การใช้ระบบสารใดสารหนึ่งเพียงอย่างเดียว

(3) ระบบการใช้สารเร่งที่มีปฏิกิริยาช้า (*delayed action accelerator*) สารประเภทนี้จะไม่เกิดปฏิกิริยาขณะกระบวนการก่อนการวัลคาไนซ์ เพื่อป้องกันปัญหาการเกิดการวัลคาไนซ์ก่อนเวลา

4) สารกระตุ้นปฏิกิริยา (*activator*) เป็นสารที่ช่วยเร่งอัตราการวัลคาไนซ์ให้เร็วขึ้น เพื่อจะได้เกิดประสิทธิภาพมากขึ้น ปรับปรุงคุณสมบัติผลิตภัณฑ์ให้ดียิ่งขึ้น โดยทำให้ยางมีการยึดตัวที่สูงขึ้น ชนิดของสารกระตุ้น แบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

(1) พวกอนินทรีย์ เช่น โลหะออกไซด์ เช่น ซิงค์ออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ เป็นต้น

(2) พวกอินทรีย์ ที่นิยมใช้คือกรดไขมัน เช่น กรดสเตียริก (*stearic acid*) เป็นต้น

5) สารตัวเติม (fillers) หมายถึงสารอื่นๆ ที่ไม่ใช่ยาง ที่ใส่ลงไปในยาง เพื่อลดต้นทุนในการผลิต หรือเพื่อปรับปรุงสมบัติของยางให้ดีขึ้น เช่นเขม่าดำ ซิลิกา แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น วัตถุประสงค์ของการเติมสารตัวเติม เพื่อลดต้นทุน เปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของยาง ช่วยในขบวนการผลิต ลดการพองตัวของยางในน้ำมัน การนำทางไฟฟ้า และเพิ่มอายุการใช้งานของยาง เป็นต้น

(1) ชนิดของสารตัวเติมแบ่งตามการผลิตได้ 5 ชนิด ประกอบด้วย

ก. สารตัวเติมที่มีตามธรรมชาติ หรือผลพลอยได้จากธรรมชาติแล้ว นำมาบดให้ละเอียดเช่น แคลเซียมคาร์บอเนตจากหินปูน เปลือกหอย ซอล์ค แคลเซียมและแมกนีเซียมซิลิเกต จากแป้งทัลคัม

ข. สารตัวเติมตามธรรมชาติที่ร่อนแยกความละเอียดเช่น คาโอลิน

ค. สารตัวเติมที่ได้จากวิธีการตกตะกอนเช่น แคลเซียมคาร์บอเนต อะลูมิเนียมซิลิเกต เป็นต้น

ง. สารตัวเติมในรูปของผงฝุ่น เช่น เขม่าดำ โลหะออกไซด์ เช่น ซิงค์ออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์

จ. สารตัวเติมประเภทที่มีการทำปฏิกิริยาที่ผิว (surface modified products) เป็นผลิตภัณฑ์ที่นำสารตัวเติมมาทำปฏิกิริยาที่ผิว เพื่อให้สารตัวเติมนั้นเกาะติดแน่นกับยาง ซึ่งจะช่วยให้ยางมีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต แป้งทัลคัม ซิลิกาที่ทำปฏิกิริยาที่ผิวหรือฉาบผิว

(2) ชนิดของสารตัวเติมแบ่งตามลักษณะทางกายภาพได้ 3 ประเภทดังนี้

ก. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเม็ด (particulated filler) ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต เขม่าดำ โดยแบ่งตามหน้าที่ได้ 3 ชนิด ดังนี้

ก) สารตัวเติมเสริมความแข็งแรง (reinforcing filler) เป็นสารตัวเติมที่ทำให้สมบัติทางกายภาพของยางดีขึ้น คือมีความต้านทานต่อแรงดึง การสึกหรอ และการฉีกขาด ส่วนใหญ่จะมีอนุภาคขนาดประมาณ $180-600 \text{ \AA}$ เช่นเขม่าดำ และซิลิกา

ข) สารตัวเติมกึ่งเสริมความแข็งแรง (semi-reinforcing filler) เป็นสารตัวเติมประเภทที่เสริมความแข็งแรงกับยางบ้าง สารเหล่านี้จะมีอนุภาคปานกลาง เช่น อะลูมิเนียมซิลิเกต แคลเซียมซิลิเกต และ คาโอลิน เป็นต้น

ค) สารตัวเติมช่วยลดต้นทุนในการผลิต (diluent filler) สารตัวเติมประเภทนี้ไม่เสริมประสิทธิภาพความแข็งแรงให้กับยาง มีราคาถูก มีอนุภาคขนาดใหญ่ ตั้งแต่ 10000 Å^๐ ขึ้นไป เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต แป้งทัลคัม เป็นต้น

ข. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเส้นใย (fibrous filler) เช่น แอสเบสตอส และผงเยื่อไม้ เป็นต้น

ค. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเรซิน (resinous filler) เช่น high styrene resin และ henoric resin เป็นต้น

6) สารทำให้ยางนิ่มและสารช่วยในกระบวนการผลิต (plasticizers and processing aids) เป็นสารที่ใส่เข้าไปในยางเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น และเพิ่มความสามารถในการทำงาน หน้าที่ของสารช่วยให้ยางนิ่มประกอบด้วย ช่วยในการแปรรูปยาง เปลี่ยนแปลงสมบัติของยาง ลดต้นทุน การใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ และลดพลังงานในการแปรรูปยาง เป็นต้น

7) สารอื่นๆ เช่น สี (pigments) สารทำให้เกิดฟอง (blowing agents) และสารหน่วงการติดไฟ (flame retardants) ไม่ถือว่าเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องใส่สำหรับยางทั่วไป แต่บางครั้งจะใส่ลงไปในยางเมื่อมีความต้องการให้ผลิตภัณฑ์ยางมีสมบัติพิเศษบางประการเช่นสารที่ทำให้เกิดสี สารที่ทำให้เกิดฟอง และสารหน่วงการติดไฟ เป็นต้น

2.1.2 การทดสอบสมบัติของยางคอมปาวด์

สมบัติการไหล พฤติกรรมการคงรูป และสมบัติเชิงกลของยางคอมปาวด์จะทำการทดสอบได้ดังต่อไปนี้

1) การทดสอบความหนืดมูนนี่ (mooney viscosity) เป็นการทดสอบความสามารถในการไหลหรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางคอมปาวด์ ยางที่มีความหนืดต่ำจะไหลได้ง่าย ทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้โดยง่าย การวัดค่าความหนืดมูนนี่สามารถทำได้โดยใช้เครื่องมือนี้วิสโคมิเตอร์ (mooney viscometer)

2) ทดสอบพฤติกรรมคงรูปของยาง (cure characteristics) เป็นสมบัติสำคัญของยางคอมปาวด์ที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิต เพราะถ้ายางเกิดการวัลคาไนซ์ (คงรูป) เร็วเกินไปก็อาจจะก่อให้เกิดปัญหาในระหว่างไหลขึ้นรูป เช่น ยางไหลได้ไม่เต็มแม่พิมพ์จึงต้องออกสูตรให้ยางคอมปาวด์มีระยะเวลาที่พอเหมาะการทดสอบความคงรูป เป็นหนึ่งในขั้นตอนของการควบคุมคุณภาพในกระบวนการผลิตยาง เช่นหากมีการชั่งน้ำหนักของสารเคมี ในกลุ่มที่ทำให้เกิดยางคงรูปผิดก็อาจจะทำให้คุณภาพของยางไม่เป็นไปตามมาตรฐาน

3) ทดสอบความต้านทานแรงดึง (tensile properties) คือการทดสอบแรงที่มากกระทำในลักษณะการกดอัด (compressive) และแนวแรงตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ ทำให้

วัสดุออกแรงต้านทานเพื่อไม่ให้เกิดการแตกหักมีวัตถุประสงค์เพื่อวัดสมบัติความต้านทานของวัสดุ ต่อแรงดึง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการออกแบบ และการเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน ในการทดสอบจะเป็นการใช้แรงดึง ที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอถึงขั้นงานให้ยืดออกและขาดในที่สุด วิธีการทดสอบนั้น จะนำตัวอย่างที่จะทดสอบมาดึงอย่างช้าๆ แล้วบันทึกค่าของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นไว้ แล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ ขึ้นทดสอบมีขนาดและรูปร่างต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุนั้นๆ มาตรฐานต่างๆ ของการทดสอบ เช่น มาตรฐานของ ASTM (American Society of Testing and Materials) BS (British Standards) JIS (Japanese Industrial Standards) หรือแม้แต่ มอก. (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย) ได้กำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบไว้ ทั้งนี้เพื่อให้ผลของการทดสอบเชื่อถือได้ พร้อมกับกำหนดความเร็วในการเพิ่มแรงกระทำเอาไว้ด้วยการทดสอบความต้านทานแรงดึงจะปรากฏค่าทดสอบ 3 ค่า ประกอบด้วย ค่าโมดูลัส ค่า elongation at break และ ค่าความเค้น (stress)

(1) ค่าโมดูลัส หมายถึงค่าสูงสุดที่ทำให้วัสดุยังอยู่ในสภาวะยืดหยุ่นและคืนรูปเดิมได้ จิตจำกัดสภาพยืดหยุ่นนี้เป็นสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุ มีประโยชน์มากในด้านวิศวกรรม วัสดุที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูง เป็นวัสดุที่สามารถทนต่อแรงภายนอกได้มาก หรือทำให้เปลี่ยนรูปร่างได้ยากนั่นเอง

(2) ค่า elongation at break หมายถึง ระยะยืดตัวสูงสุดของวัสดุก่อนที่จะขาดออกจากกัน

(3) ค่าความเค้น หมายถึงแรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรง ภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำต่อวัตถุจะมีแรงภายในเกิดขึ้น ในเนื้อของวัตถุ ต่อต้านเอาไว้ แรงภายในนี้ คือ แรงยึดเหนี่ยวกันระหว่างเนื้อกับวัตถุ หรือเรียกว่า เมื่อวัตถุถูกดึงให้ขาดออกจากกันก็จะมีแรงปฏิกิริยาโต้ตอบต่อแรงภายนอกที่มากระทำ

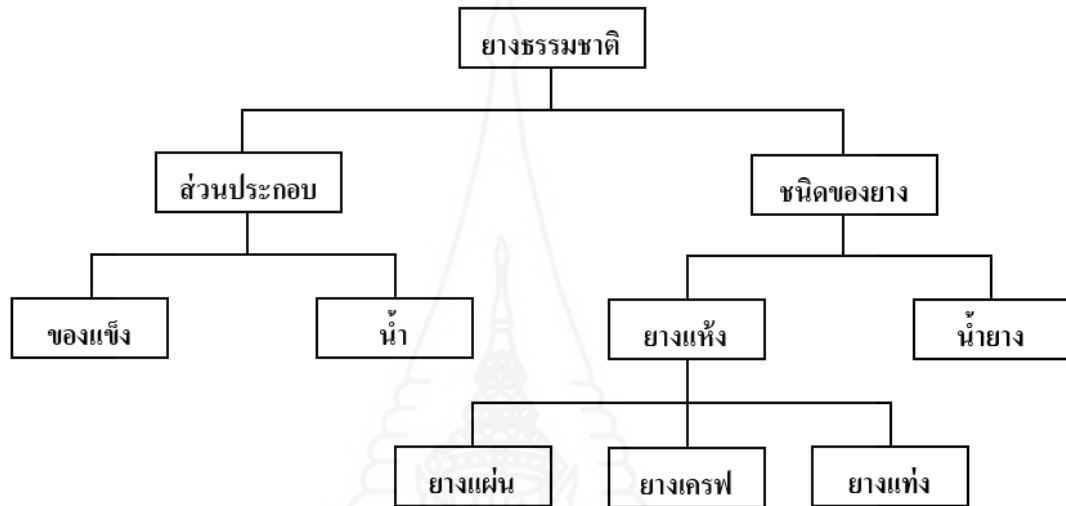
4) ทดสอบความต้านทานแรงฉีกขาด (tear strength) เป็นการวัดหาขนาดแรงสูงสุดที่สามารถฉีกชิ้นงานให้ขาดออกจากกัน มักจะใช้ในการตรวจสอบควบคุมคุณภาพ หรือเปรียบเทียบหาตำแหน่ง ที่มีความเป็นไปได้ว่ามีโอกาสที่จะฉีกขาด โดยความต้านทานการฉีกขาดนี้มีหน่วยเป็นขนาดของแรงกระทำ ณ จุดฉีกขาดเช่น นิวตัน เป็นต้น

5) ทดสอบความแข็ง (shore A hardness) หมายถึง การทดสอบการต้านทานการเปลี่ยนรูป (deformation) ของวัสดุโดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ต่างๆ จะใช้วิธีการทดสอบความแข็งแบบ Shore ซึ่งจะใช้หัวกด กดลงบนพื้นผิวของชิ้นทดสอบความต้านทานต่อการเกิดรอยกดของพื้นผิวสามารถอ่านค่าได้จากเครื่อง Shore durometer ค่าที่อ่านได้จะอยู่ในช่วงค่าความแข็ง 0-100 วัสดุที่

อ่านค่าได้สูงแสดงว่ามีความแข็งมาก หรือมีความต้านทานต่อการเกิดรอยขีดได้สูง การแสดงหน่วยความแข็ง มีหน่วยเป็น Shore A

2.2 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber; NR)

ยางธรรมชาติ มีส่วนประกอบและชนิดของยางธรรมชาติ ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ส่วนประกอบ และชนิดยางธรรมชาติ

ที่มา: การยางแห่งประเทศไทย (2560)

2.2.1 ส่วนประกอบของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติจากต้นยางพารามีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวหรือสีครีม โดยมีอนุภาคยาง แขนงลอยอยู่ในตัวกลางที่เป็นน้ำ อนุภาคยางมีรูปร่างกลมหรือรูปลูกแก้ว มีขนาด 0.05 - 5 ไมครอน ความหนาแน่น 0.975 - 0.980 กรัม/มิลลิลิตร มีความเป็นกรด - ด่างประมาณ 6.5 - 7.0 ผิวของอนุภาคยางมีเยื่อหุ้ม (membrane) ที่ประกอบด้วยไขมันและโปรตีน โดยแต่ละอนุภาคมีอนุโมลลของโปรตีนอยู่รอบนอกทำให้เกิดแรงผลักระหว่างอนุภาคยางซึ่งมีผลให้น้ำยางสามารถคงสภาพเป็นของเหลวได้ตั้งนั้นเมื่อมีการทำลายเยื่อหุ้มอนุภาคหรือมีการสะเทินอนุโมลลทำให้อนุภาคยางที่แขวนลอยอยู่ในตัวกลางเกิดการรวมตัวจับกันเป็นก้อน

2.2.2 การแบ่งชนิดของยางธรรมชาติ

โดยทั่วไปยางธรรมชาติสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1) **น้ำยาง** น้ำยางสดที่เกษตรกรได้จากต้นยางพบว่ามีส่วนประกอบมากเกินไปไม่สะดวกที่จะนำไปผลิตเป็นสินค้าและอาจสิ้นเปลืองในการขนส่งน้ำยาง ดังนั้นจึงต้องนำน้ำยางไปผ่านกรรมวิธีการปั่นเหวี่ยง (centrifugation) เพื่อแยกน้ำในน้ำยางออกให้ได้น้ำยางที่มีปริมาณเนื้อยางเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 30% เป็นประมาณ 60% โดยน้ำหนัก น้ำยางที่ทำให้เนื้อยางเพิ่มขึ้นนี้เรียกว่าน้ำยางข้น (concentrated latex) แต่องค์ประกอบในน้ำยางพบว่ามีสารอินทรีย์ต่างๆ หลายชนิดเช่น โพรตีนและฟอสโฟไลปิด (phospholipid) ผสมอยู่ในเนื้อยางปริมาณเล็กน้อย สารอินทรีย์เหล่านี้จะถูกย่อยสลายด้วยเชื้อจุลินทรีย์บางชนิดเกิดเป็น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน หรือสารประกอบในโตรเจนบางชนิดได้ น้ำยางจึงสามารถบูดเน่าทำให้มีกลิ่นเหม็น จึงต้องเติมแอมโมเนียเพื่อให้สามารถเก็บไว้ได้นานขึ้น โดยส่วนประกอบของน้ำยางสด แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางสด

ส่วนประกอบ	ร้อยละ (โดยน้ำหนัก)
สารที่เป็นของแข็งทั้งหมด	36
เนื้อยางแห้ง	33
สารกลุ่มโปรตีนและไขมัน	1 - 1.2
สารกลุ่มคาร์โบไฮเดรต	1
เถ้า	≤ 1
น้ำ	64

2) **ยางแห้ง** เกิดจากการนำน้ำยางสดมาเติมสารที่มีฤทธิ์เป็นกรด ที่นิยมใช้ เช่น กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก กรดซัลฟูริก หรือน้ำหมักที่เกษตรกรทำขึ้นมาใช้เอง เพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นก้อนของแข็งแล้วแยกตัวจากน้ำ แล้วก็ทำการไล่หรือกำจัดความชื้นออกจากเนื้อยางเพื่อลดการเกิดเชื้อรา ชนิดยางแห้งมีหลายรูปแบบ ได้แก่

(1) ยางพาราแบบแผ่น (rubber sheet)

ได้จากการนำน้ำยางมาเติมลงในตะกวดแล้วเติมน้ำเพื่อเจือจางน้ำยางให้มีปริมาณเนื้อยางแห้งเหลือ 12-16 เปอร์เซ็นต์ แล้วเติมกรดเพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นก้อนแล้วแยกออกจากน้ำ อนุภาคของน้ำยางจะเริ่มเป็นก้อนเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ประมาณ 4.8 - 5.1 เรียกจุดนี้ว่า ไอโซอิเล็กทริก (isoelectric point) หลังจากนั้นจึงนำยางไปรีดให้เป็นยางแผ่นด้วย

เครื่องรีดยางแบบ 2 ลูกกลิ้ง หลังจากนั้นนำยางไปล้างน้ำแล้วจึงทำให้ยางแห้ง การทำให้ยางแห้งที่นิยมมี 2 วิธี ดังนี้

ก. นำไปผึ่งตากแดดหรืออบในโรงเรือนที่มีอากาศอากาศร้อนเพื่อไล่น้ำหรือความชื้นที่ยังหลงเหลืออยู่ ยางแผ่นที่ได้เรียกว่า ยางแผ่นไม่รมควัน (Air Dried sheet; ADS)

ข. นำไปอบรมควันในโรงเรือนอุณหภูมิประมาณ 60-70 องศาเซลเซียส ใช้เวลาอบประมาณ 2-3 วัน ซึ่งยางที่ได้เรียกว่ายางแผ่นรมควัน (Ribbed Smoked Sheet; RSS)

(2) ยางเครฟ (crepe rubber)

ยางเครฟเป็นยางที่ได้จากการนำเศษยาง จากการกรีดยางหรือเศษจากยางแผ่นรมควัน เป็นต้น แล้วนำไปรีดในเครื่องเครฟ (creping machine) พร้อมทั้งใช้น้ำทำความสะอาดเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกต่างๆ ออกไปจากยางในระหว่างการรีดจากนั้นจึงนำยางแผ่นไปผึ่งให้แห้งจะได้ยางเครฟพร้อมนำไปใช้งาน

(3) ยางแท่ง (technically classified rubber)

การผลิตยางแท่ง โดยการนำน้ำยางหรือแผ่นยางทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเกรดของยางแท่งที่ต้องการผลิต ยางแท่งที่นิยมใช้กันมากคือยางแท่งเอสทีอาร์ 20 (STR 20) เป็นยางแท่งชนิดที่มีการผลิตมากที่สุด โดยผลิตจากการผสมขี้ยาง และยางแผ่นเข้าด้วยกัน แล้วนำเข้ากระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง 100 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงนำยางแท่งที่แห้งไปชั่งน้ำหนักประมาณ 33.33 กิโลกรัม แล้วอัดเป็นแท่งในเครื่องอัด และบรรจุลงถุงพอลิเอทิลีน เพื่อตรวจสอบคุณภาพและจัดส่งให้โรงงานอุตสาหกรรมต่อไป ยางแท่ง STR 20 เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตยางล้อรถยนต์ หรือเป็นส่วนประกอบในโมลด์ (mold) เพื่อผลิตส่วนประกอบของรถยนต์ และสินค้าอื่นๆ เช่น ยางขอบประตู ยางขอบหน้าต่าง ยางรองคอสะพาน

2.3 ยางสังเคราะห์ (synthetic rubber; SR)

ยางสังเคราะห์ผลิตขึ้นมาเพื่อแทนที่ยางธรรมชาติที่มีข้อด้อยหลัก คือ ไม่ทนต่อโอโซน ความร้อน แสงแดด น้ำมัน และสารเคมี สามารถแบ่งออกได้เป็นหลายชนิดตามชนิดของโมโนเมอร์ที่เข้ามาทำปฏิกิริยากัน ตัวอย่างยางสังเคราะห์และผลิตภัณฑ์จากยางสังเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างยางสังเคราะห์และผลิตภัณฑ์จากยางสังเคราะห์ต่างๆ

ชนิดของยาง	ผลิตภัณฑ์
ยางไอโซพรีน (IR)	จุกนม และอุปกรณ์การแพทย์บางชนิด
ยางสไตรีนบิวตาไดอิน	สายพาน พื้นรองเท้า ยางรถยนต์ท่อยาง ยางฉนวนหุ้มสายไฟ
ยางไนไตรล์ (NBR)	ประเก็น ยางโอริง ยางซีล ยางเชื่อมข้อต่อ สายพานลำเลียง รองเท้าบูท
ยางคลอโรพรีน (CR)	ยางซีล ท่อยางเสริมแรง ยางพันลูกกลิ้ง สายพานยาง ยางกันกระแทก ยางปูพื้นรองเท้า
ยางบิวไทล์ (IIR)	ยางในรถยนต์ จุกปิดขวดยา ยางกันสะเทือนต่างๆ ปลอดภัย สายเคเบิล
ยางบิวตาไดอิน (BR)	พื้นรองเท้า สายพานลำเลียง สายพานส่งกำลัง
ยางเอธิลีนโพรไดอิน (EPDM)	ยางขอบหน้าต่าง แกมยางรถยนต์ ท่อยางหมอน้ำรถยนต์ ท่อยาง เครื่องซักผ้า สายพานลำเลียง แผ่นยางกันน้ำ
ยางซิลิโคน (silicone)	ชิ้นส่วนยานอวกาศ เครื่องบิน ยางโอริง หน้ากากออกซิเจน

ที่มา: สถาบันวิจัยยางมหิดล (2550)

3. สารตัวเติม

สารตัวเติม คือ องค์กรประกอบที่เติมเข้าไปในยางเพื่อจุดประสงค์หลายอย่าง เช่น เสริมแรงให้ยาง มีสมบัติ เชิงกลที่ดีขึ้น เพื่อให้ยางคอมปาวด์มีสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิต หรือเพื่อลดต้นทุน สัดส่วนการเติมสารตัวเติมเขม่าดำ และ ดินขาว ประมาณ 30 ถึง 35 ส่วนต่อยางร้อยละร้อยส่วน(part per hundred rubber) ฯลฯ สารตัวเติมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกตามประสิทธิภาพของการเสริมแรง สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเม็ด ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต เขม่าดำ โดยแบ่งตามหน้าที่ได้ 3 ชนิด ดังนี้

ชนิดที่ 1 สารตัวเติมเสริมความแข็งแรง เป็นสารตัวเติมที่ทำให้สมบัติทางกายภาพของยางดีขึ้น คือมีความต้านทานต่อแรงดึง ต่อการสึกหรอ และต่อการฉีกขาด ส่วนใหญ่จะมีอนุภาคขนาดประมาณ 180-600 Å° เช่น เขม่าดำ และซิลิกา

ชนิดที่ 2 สารตัวเติมที่เสริมความแข็งแรง เป็นสารตัวเติมประเภทที่เสริมความแข็งแรงกับยางบ้าง สารเหล่านี้จะมีอนุภาคปานกลาง เช่นอะลูมิเนียมซิลิเกต แคลเซียมซิลิเกต และ คาโอลิน เป็นต้น

ชนิดที่ 3 สารตัวเติมที่ช่วยลดต้นทุนในการผลิต สารตัวเติมประเภทนี้ไม่เสริมประสิทธิภาพความแข็งแรงให้กับยาง มีราคาถูก มีอนุภาคขนาดใหญ่ ตั้งแต่ 10000 Å ขึ้นไป เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต แป้งทาลค์ม เป็นต้น

สมบัติทั่วไปของสารตัวเติมที่ใช้ในยาง 1) ขนาดอนุภาคเล็ก 2) ไม่มีสารทำให้ยางเสื่อม 3) ราคาถูก 4) ผสมเข้ากับยางได้ง่าย 5) ไม่มีผลต่อการวัลคาไนซ์ของยาง 6) ทำให้สมบัติของยางดีขึ้น 7) ไม่เปลี่ยนสีของยาง 8) ยึดแน่นไม่หลุดออกจากยาง

3.1 สารตัวเติมพวกเสริมความแข็งแรง ประกอบด้วย

3.1.1 เขม่าดำ (carbon black)

เขม่าดำเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง มีหลายเกรด โดยแต่ละเกรดจะมีสมบัติพื้นฐานโดยเฉพาะขนาดของอนุภาคปฐมภูมิ พื้นที่ผิว และโครงสร้างที่แตกต่างกัน ดังนั้น เขม่าดำแต่ละเกรดจึงมีความสามารถในการเสริมแรงในยางได้ไม่เท่ากัน การเลือกใช้เกรดของเขม่าดำให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิตและชนิดของผลิตภัณฑ์จึงเป็นเรื่องที่สำคัญ

1) สมบัติของเขม่าดำขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ 5 ประการดังนี้คือ

(1) ขนาดของอนุภาค (particle size) โดยทั่วไปแล้วเขม่าดำที่มีอนุภาคเล็ก จะทำให้ยางที่ผสมจะมีความแข็งแรงมากขึ้น ความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น ความต้านทานต่อการสึกหรอสูงขึ้น แต่การผสมเข้าไปในยางต้องใช้เวลาาน

(2) โครงสร้างของเขม่าดำ (structure) หมายถึงการจัดตัวระหว่างอนุภาคของเขม่าดำ ให้มีรูปโครงสร้าง ถ้าเขม่าดำมีการจัดตัวต่อกันเป็นเส้นสายมาก แสดงว่าโครงสร้างสูง ถ้าการจัดตัวไม่ต่อกันหรือต่อกันน้อย แสดงว่ามีโครงสร้างต่ำ

(3) ลักษณะผิว เขม่าที่มีสมบัติในการเสริมประสิทธิภาพต่ำ เช่น thermal black จะมีการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมเรียงขนานอย่างเป็นระเบียบ เขม่าที่มีสมบัติในการเสริมประสิทธิภาพสูง จะมีการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมไม่เป็นระเบียบ และยังเขม่าดำมีขนาดอนุภาคเล็กยิ่งขึ้น การจัดเรียงตัวของคาร์บอนก็ยังไม่เป็นระเบียบมากขึ้น

(4) สมบัติทางเคมีของผิว channel black จะมีออกซิเจนอยู่ที่ผิวสูงจะมีค่า pH เป็นกรด ส่วน furnace black จะมีปริมาณออกซิเจนอยู่ที่ผิวน้อยกว่า 1% จะมีค่า pH เป็นกลางหรือเป็นด่าง ซึ่งความเป็นกรดหรือเป็นด่างของเขม่าดำจะมีผลต่อการสุกของยางในระบบการวัลคา

ในซ้ออื่นๆ เช่น การใช้กำมะถันในการวัลคาไนซ์ ยางที่ใช้เขม่าดำที่มีค่า pH เป็นด่าง จะวัลคาไนซ์เร็วกว่ายางที่ใช้เขม่าดำที่มีฤทธิ์เป็นกรด

(5) ความเป็นรูพรุน การเป็นรูพรุนมากหรือน้อยในเขม่าดำจะมีผลต่ออัตราการสุกของยาง เพราะรูพรุนนี้จะดูดสารตัวเร่งเข้าไป ซึ่งทำให้ยางสุกได้ช้าลง เขม่าดำที่มีรูพรุนมากจะมีจำนวนอนุภาคมากกว่าเขม่าดำที่มีรูพรุนน้อย ดังนั้นถ้าใช้เขม่าดำจำนวนเท่าๆ กันโดยน้ำหนักใส่ลงไปยาง เขม่าดำที่มีรูพรุนมากจะทำให้ยางมีความหนืดสูงกว่า การนำไฟฟ้าดีกว่า เขม่าดำที่มีรูพรุนน้อย เนื่องจากมีจำนวนอนุภาคมากกว่านั่นเอง

2) โครงสร้าง ส่วนประกอบและสมบัติทางเคมีของเขม่าดำ (N330)

Iodine Absorption Number	82 g/kg	ASTM	D1510
Oil Absorption No.CM3/100g.	102	ASTM	D2414
Tint Strength	104 %	ASTM	D3265
Pour Density	23.5 lb/ft ³	ASTM	D1513
Fines Content			
Bulk Shipments	3.0 %	ASTM	D1508
Bag Shipments	5.0 %		
Sieve Residue,ppm			
No.325 mesh	300	ASTM	D1514
N0.35 mesh	0		
Heating Loss%			
Bulk Shipments	1.0	ASTM	D1509
Bag Shipments	1.0		

Annual Book of ASTM Standard ,Vol.09.01

ขนาดอนุภาคนั้นจะมีผลอย่างมากต่อสมบัติของเขม่าดำ รองลงมาคือโครงสร้างและความเป็นรูพรุน ส่วนลักษณะผิวทางฟิสิกส์และเคมีจะมีน้อย

3.1.2 ซิลิกา (silica)

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมอีกชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมยาง โดยเฉพาะในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความโปร่งแสงและมีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ยางพื้นรองเท้า เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากบนพื้นผิวของซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิล (หมู่-OH) หรือ หมู่ไฮดรอกซิลอยู่ในปริมาณมาก ทำให้มีความเป็นขี้ผึ้ง ซิลิกาจึงแตกตัวและเข้ากับ

ยางที่ไม่มีขี้ผึ้งได้ยาก นอกจากนี้ หมู่ไซลานอลดดังกล่าวยังสามารถดูดซับสารกระตุ้นปฏิกิริยา ทำให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์ได้ช้าลงและมีระดับของการวัลคาไนซ์ต่ำลง ดังนั้นจึงต้องแก้ปัญหาด้วยการเติมสารเคมีที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ง่ายกับหมู่ไซลานอล เช่น ไดเอทิลีนไกลคอล (DEG) โพลีเอทิลีนไกลคอล (PEG) ไทโรเอทาโนลามีน (triethanolamine) หรือเฮกซะเมทิลีนเททระมีน (Hexamethylene Tetramine; HEXA) รวมถึงการเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เช่น DPG หรือ DOTG ลงไปในสูตรเคมียางด้วย นอกจากนี้ ยังต้องมีการเติมสารเคมีที่เรียกว่า สารคู่ควบไซเลน (silane coupling agent) ลงไปเพื่อเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกา ทำให้ซิลิกาแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ง่ายยิ่งขึ้น กระบวนการผลิตเป็นไปได้อย่างง่ายขึ้น และยางวัลคาไนซ์มีสมบัติเชิงกลและพลวัตดีขึ้น ตัวอย่างของสารคู่ควบไซเลนที่ใช้กันมาก ได้แก่ ไทโรเอทอกซีไซลิล โพรพิล เททระซัลไฟด์ (bis-(3-triethoxysilylpropyl)-tetrasulfide; Si-69) เมอร์แคปโตโพรพิล ไทโรเอทอกซีไซเลน (mercaptopropyl-trimethoxysilane; A-189) ไทโอไซยานาโตโพรพิล ไทโรเอทอกซีไซเลน (3-thiocyanatopropyl-triethoxysilane; Si-264) เป็นต้น

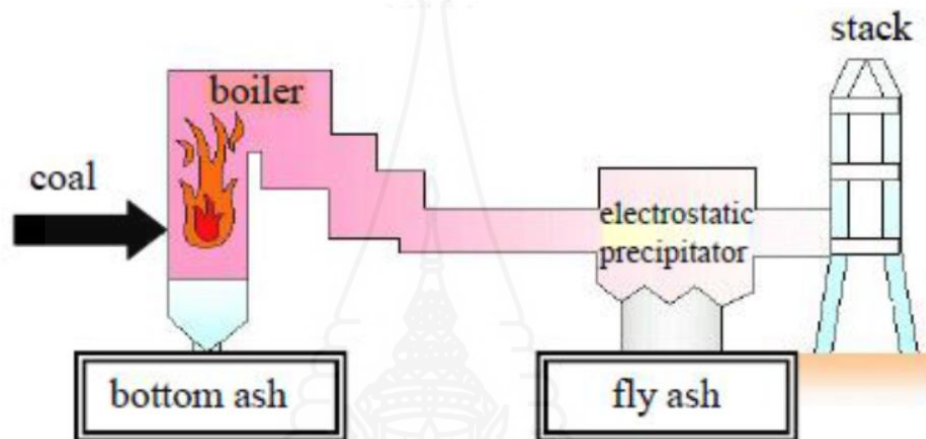
1) อิทธิพลของการใช้ซิลิกากับยาง

เนื่องจาก ซิลิกามีขนาดเล็กพื้นที่ผิวมาก ขณะผสมยางจะเกิดความร้อนสูง อาจทำให้ยางเกิดการแข็งตัวได้ง่าย ต้องทำด้วยความระมัดระวังอย่าผสมให้นานเกินไป และขณะผสมให้ใส่ยางกับซิลิกาท่อนั้น อย่าใส่สารเคมีอื่นลงไป เพราะทำให้ผสมได้ยาก เมื่อผสมเสร็จตั้งทิ้งไว้ 1 คืน แล้วจึงค่อยใส่สารเคมีอื่นลงไป ความเป็นกรดของซิลิกาทำให้ยาง อยู่สภาวะคงตัวได้ช้าลง เนื่องจากมีการดูดสารตัวเร่งเกิดขึ้นที่ผิวของซิลิกา สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มสารตัวเร่ง หรือใส่สารประเภทที่เป็นตัวลดประสิทธิภาพ (deactivator) ซึ่ง ได้แก่ สารประเภทอะมีนและอัลกอฮอล์ ทำให้ยางแข็ง ปกติการที่มีซิลิกาจะทำให้ความแข็งของยางที่ยังไม่วัลคาไนซ์มีค่าสูงขึ้น ทำให้แปรรูปยาก เนื่องจากผิวของซิลิกาเป็นสารอนินทรีย์ ทำให้มีแรงยึดกับยางไม่ดีนักทำให้มีผลต่อความต้านทานต่อการสึกหรอ และ โมดูลัสของยาง แต่ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางที่ใช้ซิลิกาจะสูงกว่ายางที่ใช้ เชม่าค่ามาก ซึ่งจากสมบัติที่กล่าวมาสามารถแก้ไขได้โดยใช้สารประกอบไซเลน (Silane) ซึ่งทำหน้าที่เป็น Coupling Agent หรือ Bridging Agent ซึ่งช่วยในการยึดเกาะระหว่างสารตัวเดิมกับยางได้ดีขึ้น ดังนั้นจะทำให้สมบัติดีขึ้นด้วยไซเลนมีสูตรทั่วไป RI-Si-(OR)₃-RI วิธีใช้ไซเลนทำโดยผสมสารตัวเดิมกับไซเลนแล้วจึงค่อยผสมกับยาง หรืออาจเอาไซเลนใส่เข้าไปในยางขณะผสมกับสารตัวเดิมก็ได้

3.2 สารตัวเติมพวกกึ่งเสริมความแข็งแรง

3.2.1 เถ้าลอยจากถ่านหิน

เถ้าลอย เป็นอนุภาคของแข็งซึ่งลอยอยู่ในก๊าซ ที่เกิดจากการเผาไหม้และลอยออกมาจากหม้อไอน้ำพร้อมกับก๊าซอื่นๆ เถ้าลอยส่วนใหญ่จะถูกดักจับด้วยเครื่องดักทางกล (mechanical collectors) หรือเครื่องดักอนุภาคไฟฟ้าสถิต ซึ่งอนุภาคขนาดเล็กของเถ้าลอยจะถูกดักจับก่อนปล่อยอากาศหรือไอที่เหลือสู่สภาวะแวดล้อมภายนอก กระบวนการที่ทำให้เกิดเถ้าลอย ดังแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 กระบวนการเผาถ่านหินและดักจับเถ้าลอยด้วยระบบ ดักอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต
ที่มา: Hasegawa M, Furukawa S, Asana M. (2007)

การเผาไหม้ถ่านหินจะก่อให้เกิดไอระเหย ดังนี้

- 1) เถ้าหนัก (bottom ash) เป็นอนุภาคของเถ้าเกาะรวมตัวกันจนหนักพอและตกลงมาด้านล่างของหม้อไอน้ำ มีอนุภาคใหญ่กว่าเถ้าลอย มีผิวหยาบกว่า ลักษณะสีเทาดำ
- 2) ไอระเหย (volatile matter) เป็นส่วนของถ่านหินที่ระเหยออกระหว่างการเผาไหม้ ใบบางส่วนจะถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ และบางส่วนจะควบแน่นแล้วไปเกาะบนผิวของเถ้าลอยซึ่งจะถูกดักจับที่เครื่องดักจับเถ้าลอยปริมาณของไอที่เกิดจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ ตลอดจนความเข้มข้นและสมบัติต่างๆ ในถ่านหินนั้น
- 3) เถ้าลอย จะมีปริมาณประมาณร้อยละ 1 ของปริมาณเถ้าทั้งหมด และมีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5-100 ไมครอน มีสีน้ำตาลอ่อนถึงสีดำ ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนในถ่านหิน

องค์ประกอบหลักทางเคมีของถ่านหิน คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2), อะลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) อัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดจะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ สภาพแวดล้อมขณะเผา และชนิดของถ่านหินที่ใช้เผา ด้วยเหตุผลนี้ ASTM C618 จึงได้แยกประเภทของถ่านหินไว้ 2 ชนิด คือ class C และ class F โดย class F มีปริมาณ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก และ class C จะมีปริมาณของออกไซด์ดังกล่าว ระหว่างร้อยละ 50-70 โดยน้ำหนัก

ส่วนใหญ่แล้วถ่านหินลิกไนต์ (lignite) สับบิทูมินัส (sub-bituminus) เมื่อเผาแล้วจะให้ถ่านหิน class C ส่วนถ่านหินชนิดแอนทราไซต์ (anthracite) บิทูมินัส (bituminus) จะให้ถ่านหิน class F สำหรับโรงผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นวัตถุดิบในการให้ความร้อน แต่ถ่านหินที่ได้มีทั้ง class F และ class C การที่ถ่านหินจากแหล่งเดียวกัน แต่สามารถพบถ่านหินได้ทั้ง class F หรือ class C เป็นเรื่องปกติเพราะถ่านหินเป็นวัสดุธรรมชาติมีเนื้อไม่สม่ำเสมอ สมบัติทางกายภาพและทางเคมีย่อมเปลี่ยนแปลงไป แต่โดยสรุปก็คือถ่านหินที่ได้เป็น class F หรือ class C ต่างก็มีสมบัติใกล้เคียงกับ เขม่าดำ และ ดินขาวรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพของถ่านหิน class F และ class C

สมบัติ	ASTM C168 (%)	
	class F	class C
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	70	50
SO_3	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้	6.0	6.0
อัลคาไลน์ในรูปของ Na_2O	1.5	

ที่มา: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2559)

3.3 สารตัวเติมพวกช่วยลดต้นทุนในการผลิต หรือสารตัวเติมไม่เสริมแรง (Non-reinforcing filler)

เป็นสารราคาถูก อนุภาคขนาดใหญ่ มีขนาดตั้งแต่ 10,000 (Å) อังสตรอม ขึ้นไป เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ดินขาว

3.3.1 ดินขาว (china clay) ที่ใช้ในยางจะแบ่งเป็น 6 พวก ใหญ่ๆ คือ

1) ดินขาวชนิดละเอียด (*soft clay*) ขนาดอนุภาคส่วนใหญ่ต่ำกว่า 2 ไมครอน มีสีขาวกว่าชนิดหยาบ ใช้เป็นสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพ ราคาถูก ทำให้ยางมีโมดูลัสสูง ความต้านทานต่อแรงดึงสูง ความต้านทานต่อการสึกหรอดี ค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง ทำให้ยางที่ไม่วัลคาไนซ์มีความหนืดสูง นิยมใช้มากเพราะราคาถูก การใช้งานส่วนใหญ่ ใช้ในการทำสายพานลำเลียง ประเก็น ท่อยาง ยางรองเท้า ตุ๊กตา ที่นิยมนที่สุดคือ ทำพื้นรองเท้า ส้นรองเท้า เป็นต้น

2) ดินขาวชนิดหยาบ (*hard clay*) ขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 2 ไมครอน มีสีขาวหม่น เป็นสารกึ่งเสริมประสิทธิภาพ มีราคาถูกให้สมบัติ ด้าน โมดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง ความหนืดของยางที่ไม่วัลคาไนซ์ต่ำกว่ายางที่ใช้ดินขาวชนิดละเอียด

3) ดินขาวให้ความร้อน (*calcined clay*) เป็นดินขาวชนิดละเอียดที่นำไปให้ความร้อน เป็นสารตัวเติมชนิดเสริมประสิทธิภาพ ที่มีสีขาว ให้ยางที่มีความแข็ง ความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าดินขาวชนิดละเอียดธรรมดา จะใช้ในงานที่ต้องการเน้นสมบัติด้านความต้านทานไฟฟ้า

4) ดินขาวเคลือบสารเคมี (*treated clay*) เป็นดินขาวชนิดพิเศษชนิดละเอียด ที่ทำการเคลือบผิวด้วยสารเคมีเช่น เคลือบด้วยอะมีน เคลือบด้วยไซเลน เป็นต้น

5) ดินขาวเคลือบด้วยอะมีน (*amine treated clay*) จะให้สีขาวหม่นและมีสมบัติในการเสริมประสิทธิภาพสูงกว่าดินขาวชนิดละเอียดธรรมดา ใช้ทำผลิตภัณฑ์ยางทางเชิงกลที่มีคุณภาพสูง

6) ดินขาวเคลือบด้วยไซเลน (*silane treated clay*) ทำให้สารตัวเติมยึดติดกับยางได้แน่น ส่งผลให้ยางมีโมดูลัสสูง ความต้านทานต่อการสึกหรอสูง (compression set) ความหนืดมูนี้และมีความร้อนสะสมต่ำ

3.3.2 โครงสร้าง ส่วนประกอบและสมบัติทางเคมีของดินขาว

Physical Properties Moisture	1.0% max.
Brightness	78+/-2 (ISO brightness)
Finer than 325 Mesh	99.99 %
Oil absorption	34+/- 3gm/100gm

pH 20% Solid		6.2+/-1
Physical Form		Powder
Chemical Analysis (%)		
Silica	(SiO ₂)	65.0-70.0
Alumina	(Al ₂ O ₃)	17.0-20.0
Ferric Oxide	(Fe ₂ O ₃)	< 1.60
Titania	(TiO ₂)	0.10
Soda	(Na ₂ O)	3.30
Potash	(K ₂ O)	4.20
Magnesia	(MgO)	1.66
Calcium Oxide	(CaO)	0.07

4. กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางและการขึ้นรูป

4.1 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้ คือ

4.1.1 การออกแบบสูตรยาง (*compounding design*) เป็นขั้นตอนการเตรียมสูตรยางตามส่วนผสมของแต่ละสูตรซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญต่อคุณภาพและต้นทุนของผลิตภัณฑ์

4.1.2 การผสม (*mixing*) เมื่อได้สูตรยางที่เหมาะสมแล้ว ทำการบดผสมสารเคมีต่างๆ ให้เข้ากับเนื้อยาง โดยบดในเครื่องบดระบบปิด (*internal mixer*) ขั้นตอนนี้ยางจะถูกทำให้ نرم โดยโมเลกุลของยางถูกทำให้ฉีกขาดด้วยแรงเฉือนจากเครื่องบด ซึ่งจะใช้เวลาในการบดนานเพียงใดขึ้นอยู่กับความหนืดเริ่มต้นของยาง ปกติอุณหภูมิของการบดควรต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันยางเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน

4.1.3 การรีดยางให้เป็นแผ่น (*sheeting on two-roll mill*) โดยใช้เครื่อง โม่บดและปรับความหนาแน่นยางให้เหมาะสมสำหรับการนำไปทดสอบและขึ้นรูป

4.1.4 การขึ้นรูปยาง (*forming*) โดยใช้แม่พิมพ์ขึ้นรูปยาง พร้อมๆ กับการเกิดปฏิกิริยา คงรูปโดยอาศัยความร้อนและแรงอัด แม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูปมีหลายแบบได้แก่ แบบอัด (*compress mould*) และแบบฉีด (*transfer mould*)

4.1.5 การทำใหยางคงรูปหรือทำใหยางสุก (*vulcanization*) คือการทำใหยางเกิดปฏิกิริยา เชื่อมโยงระหว่างสายโมเลกุล หรือที่เรียกกันว่า ปฏิกิริยาคัลคาไนซ์เซชัน ทำใหยางเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพ

จากค่อนข้างอ่อน ไปเป็นยางที่มีความยืดหยุ่นดีและแข็งแรง มีสมบัติเชิงกลที่เสถียรและไม่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมากนัก

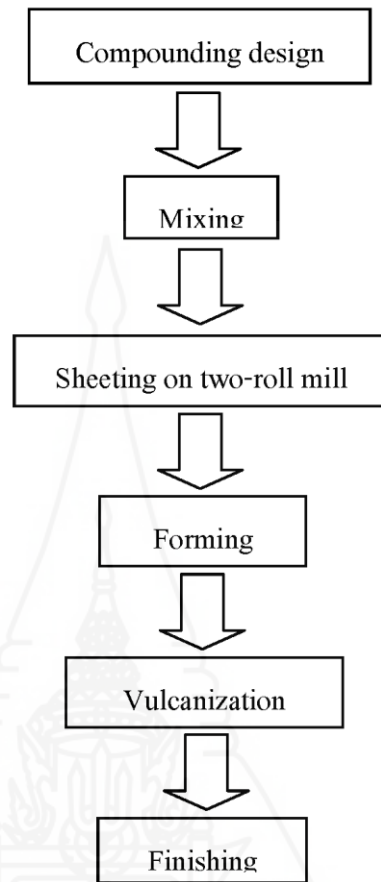
1) ลักษณะการที่ยางสุกหรือวัลคาไนซ์

เมื่อนำยางคอมปาวด์มาทำให้ร้อนสารเคมีที่อยู่ในยางจะเริ่มต้นเกิดปฏิกิริยา ในตอนเริ่มต้นนี้สารเคมีจะเริ่มเกิดการแตกตัวหรือทำปฏิกิริยากันเองช่วงนี้จะใช้เวลาช้าหรือเร็ว ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและชนิดของสารเคมีที่ใช้โดยทั่วไปถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นระยะเวลาดังกล่าวจะสั้นลง ช่วงเริ่มต้นก่อนที่สารเคมีจะเข้าทำปฏิกิริยากับยาง (Induction time) เวลาต่อมาสารเคมีก็จะเข้าทำปฏิกิริยากับยางก่อให้เกิดการ เชื่อมต่อของพันธะ ทำให้โมดูลัสของยางสูงขึ้นและยางแข็งขึ้น ระยะเวลาที่ยางเกิดการแข็งตัว (scorch time) เมื่อยางเกิดการแข็งตัวแล้วยางจะแปรรูปไปได้ยาก เมื่อยางทำปฏิกิริยาต่อยางก็จะแข็งขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งสารเคมีทำปฏิกิริยากับยางหมดยางก็จะแข็งสูงสุดระยะเวลาดังกล่าวเรียกว่า ยางสุก 100% (100% cure time) แต่หากปล่อยให้เกิดการวัลคาไนซ์ จนถึง 100% อาจใช้เวลานานเกินไปทำให้สมบัติอื่นๆ อาจต่ำลง

ดังนั้นโดยทั่วไปจะทำการทดสอบเพียง 90% (95% cure time) ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่เหมาะสม (optimum cure) ยางที่ได้รับความร้อนไม่ถึง 90 % เรียกว่าเกิดยางไม่สุก (under cure) จะทำให้ยางมีสมบัติที่ไม่ดี แต่ถ้าหากปล่อยให้ได้รับความร้อนมากกว่า 100% เรียกว่าเกิดการสุกเกินค่าที่เหมาะสม หรือยางไหม้ (over cure) คือถ้ายางนึ่มลงทำให้โมดูลัสลดลงเรียกว่าเกิด reversion แต่ถ้ายางแข็งขึ้นเรียกว่าเกิด marching modulus ยางคอมปาวด์บางชนิดเกิดยางนึ่มลง ได้ง่ายเรียกว่ายางนั้นมีลักษณะเป็น peaky cure แต่ยางที่สามารถรักษาโมดูลัสไม่ให้ตกลงไปได้นานถึงแม้ว่าจะเกิน 100% cure แล้วยางคอมปาวด์นั้นเรียกว่าเป็นยางที่มี flat cure หรือ plateau cure

4.1.6 กระบวนการนำยางไปใช้ประโยชน์ (finishing) เป็นกระบวนการสุดท้ายของการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่ผู้ผลิตจะนำผลิตภัณฑ์ยางไปใช้ในกระบวนการผลิตอื่นตามคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ยางต่อไป

รายละเอียดขั้นตอนกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง ดังแสดงในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง

ที่มา: พงษ์ธร แซ่อู๋ (2558)

4.2 กระบวนการผลิตยางรถอุตสาหกรรม

กระบวนการผลิตยางรถอุตสาหกรรม มี 7 ขั้นตอน (บริษัทดีส โตน, 2560) ดังนี้

4.2.1 การผสมยาง (banbury mixing) เครื่องผสมยางเป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการผลิต ยางดิบ (ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์) และสารเคมีจะถูกนำไปผสมกันภายในห้องผสมที่มีการควบคุม อุณหภูมิ ความดัน และเวลาตามที่สูตรกำหนดไว้ ทั้งนี้เพื่อให้ได้ยางที่มีสมบัติทั้งทางด้านกายภาพและเคมีตามต้องการ สูตรที่ใช้ในการผสมจะแตกต่างกันไปตามหน้าที่ของส่วนประกอบที่จะนำไปผลิต

4.2.2 การบดยาง (milling) ยางที่ได้จากขั้นตอนการผสมยาง (banbury mixing) จะถูกนำมาผ่านเครื่องบด เพื่อให้ได้ยางที่เป็นแผ่นยาวๆ โดยอาศัยแรงกดของการหมุนลูกกลิ้ง 2 ตัว ที่มีทิศทางการหมุนและความเร็วที่แตกต่างกัน

4.2.3 การกดอัด และการฉาบผ้าใบ (extruding and calendering) หลังจากผ่านขั้นตอนการบดขย้าง (milling) ขย้างก็จะถูกนำมาสู่ขั้นตอนการกดอัดให้เรียบ โดยใช้เครื่องฉาบผ้าใบ (calender machine)

4.2.4 การขึ้นรูปร่าง (component assembly) การขึ้นรูปร่างต้องใช้กระบวนการที่อาศัยเครื่องจักรอัด โนมัติที่ใช้เทคโนโลยีขั้นสูง เครื่องจักรนี้จะประกอบด้วยล้อหมุน (rotating drum) ซึ่งจะเป็นส่วนที่ใช้ในการขึ้นรูปร่าง และส่วนที่เป็นตัวบ่อนขย้างให้กับเครื่องสร้างขย้าง)

4.2.5 การสร้างขย้าง (building) เครื่องสร้างขย้าง (tyre building machine) นับว่าเป็นเครื่องที่มีความสำคัญมากในขบวนการผลิตขย้าง เพราะใช้ในการประกอบส่วนต่างๆ ของขย้างที่กล่อมมาแล้วในข้างต้น ให้เป็นโครงขย้างดิบ (green tyre) เครื่องสร้างขย้างได้รับการออกแบบให้เหมาะสมและทันสมัยอยู่เสมอ ทั้งนี้เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต ส่วนประกอบต่างๆ ของขย้างจะถูกนำมาประกอบกันเข้าตามลำดับทีละชั้น ตรงตำแหน่งต่างๆ ที่ได้มีการออกแบบไว้อย่างเที่ยงตรง เพื่อให้ได้ขนาดและคุณภาพของขย้างตามต้องการ

4.2.6 การอบขย้าง และขบวนการวัลคาไนซ์ (curing and vulcanizing) ในขั้นตอนนี้พนักงานจะเป็นผู้นำโครงขย้างดิบ เข้าสู่เครื่องอบขย้าง (curing press) ซึ่งการอบขย้าง และขบวนการวัลคาไนซ์ จะทำให้ขย้างที่เหนียวและมีความยืดหยุ่นมากเกินไป เปลี่ยนเป็นขย้างที่มีความแข็งแรงลดความยืดหยุ่นให้น้อยลง และให้มีความทนทานมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ในการอบขย้างจะต้องมีการควบคุมเวลา อุณหภูมิ ความดัน และการไหลของน้ำร้อนให้พอเหมาะที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ที่สมบูรณ์

4.2.7 การตรวจสอบ (inspection and finishing) ขย้างที่อบเสร็จแล้วทุกชนิดจะต้องผ่านการตรวจสอบทุกเส้น ก่อนที่จะส่งเข้าคลังสินค้าและส่งลูกค้าต่อไป การตรวจสอบจะครอบคลุมถึงรูปลักษณะและตำหนิต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับตัวขย้าง รวมทั้งทำการคัดแยกส่วนที่เป็นขย้างเสียออกไป

5. การทดสอบสมบัติขย้างคอมปาวด์

5.1 ความหนืดมูนนี่ (moony viscosity)

ความหนืดมูนนี่เป็นหนึ่งในสมบัติที่สำคัญที่สุดของขย้างคอมปาวด์ที่ต้องตรวจสอบ เพราะเป็นสมบัติที่บ่งชี้ความสามารถในการไหลหรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของขย้างคอมปาวด์ ขย้างที่มีความหนืดต่ำจะไหลได้ง่ายทำให้ กระบวนการผลิตเป็นไปได้โดยง่ายด้วยเช่นกัน การวัดค่าความหนืดมูนนี่สามารถทำได้โดยใช้เครื่องทดสอบที่เรียกว่า เครื่องมูนนี่วิสโคมิเตอร์ (mooney

viscometer) ซึ่งประกอบด้วยโรเตอร์ที่วางอยู่ใน ช่องว่างระหว่างคาย 2 อัน คือ คายบน (upper die) และคายล่าง (lower die) โดยโรเตอร์มี 2 ขนาดให้เลือกใช้ ตามระดับความหนืดของยาง

5.2 ลักษณะการวัลคาไนซ์ (cure characteristics) นอกจากสมบัติการไหลแล้วลักษณะการวัลคาไนซ์เช่น ระยะเวลาการแข็งตัว (scorch time) และระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ (curing time) ก็จัดเป็นสมบัติสำคัญของยางคอมปาวด์ที่ส่งผลกระทบต่อ กระบวนการผลิต เพราะถ้ายางเกิดการวัลคาไนซ์เร็วเกินไปหรือมีระยะเวลาแข็งตัวที่สั้นเกินไปก็อาจก่อให้เกิดปัญหาในระหว่างการไหลขึ้นรูปได้ เช่น ยางไหลได้ไม่เต็มแม่พิมพ์ ดังนั้นในการ ออกสูตรเคมียาง จึงต้องออกสูตรให้ยางคอมปาวด์มีระยะเวลาแข็งตัวที่ยาวเพียงพอที่จะไม่ก่อให้เกิดปัญหาในกระบวนการผลิต และยางคอมปาวด์ควรมีระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ที่สั้น เพื่อให้ต้นทุนการผลิตลดลงและเพิ่มผลผลิตการผลิต การทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางยังเป็นหนึ่งในขั้นตอนของการ ควบคุมคุณภาพในกระบวนการผลิต เช่น หากมีการชั่งน้ำหนัก ของสารเคมีในกลุ่มที่ทำให้ ยางวัลคาไนซ์ผิด หรืออาจเติมสารเคมีดังกล่าวผิดขั้นตอนก็จะส่งผลทำให้ลักษณะการวัลคาไนซ์ ของยางผิดปกติดได้ ปัจจุบันเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางมี 3 ชนิด ได้แก่ เครื่องมูนนี่วิสโคมิเตอร์(mooney viscometer) เครื่องรี โอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (Oscilating Disc Rheometer, ODR) และเครื่องรี โอมิเตอร์แบบคายนเคลื่อนที่ (Moving Die Rheometer, MDR)

5.3 ความแข็งชอร์ (shore hardness) การทดสอบแบบ shore durometer ใช้หัวกดชุบแข็งสปริงที่ได้ปรับค่าอย่างถูกต้อง ความลึกของหัวกด และแผ่นกด หัวกดจะถูกติดตั้งตรงกลางของฐานกด และมีระยะยึดตัว 2.2 มม. จากผิวของฐาน ตำแหน่งระยะยึดตัวเต็มที่จะมีขีดแสดงค่าศูนย์ เมื่อหัวกดถูกกดจนกระทั่งแถบติดผิวหน้าฐานกด ตัวบ่งชี้แสดงค่า 100 ดังนั้นทุกๆ จุดของ ชอร์ มีค่าเท่ากับระยะกด 0.0025 มิลลิเมตร

การทดสอบความแข็งส่วนมาก วัดด้วยการทดสอบ shore durometer หรือการทดสอบความแข็งรีอคเวลล์ ทั้งสองวิธีวัดความต้านทานต่อรอยกด ทั้งสองสเกลให้ค่าความแข็งตามหลักการไม่เกี่ยวข้องกับสมบัติและคุณลักษณะพื้นฐาน ความแข็ง ชอร์ A หรือ D เป็นวิธีที่นิยมใช้สำหรับยางชอร์ A ใช้สำหรับยางอ่อน ในขณะที่ ชอร์ D ใช้สำหรับยางที่แข็งกว่า ความแข็ง ชอร์ A คือค่าความแข็งสัมพัทธ์ ของวัสดุยืดหยุ่น เช่น ยาง หรือพลาสติกอ่อน เนื่องจากความยืดหยุ่นของยางและพลาสติก การอ่านค่าจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นเวลาการกดบางครั้งจะถูกรายงานร่วมกับค่าความแข็ง

5.4 สมบัติความต้านทานแรงดึง (tensile property)

สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงนิยมใช้ในการควบคุมคุณภาพของยาง สำหรับการทดสอบจะประกอบไปด้วย ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) การยืดตัว ณ จุดขาด (elongation

at break) และ โมดูลัส (modulus) มาตรฐานที่ใช้ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงได้แก่ ASTM D 412 เป็นต้น

สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงสามารถวัดได้โดยการดึงขึ้นทดสอบมาตรฐานขนาดด้วยอัตราเร็วในการดึงคงที่ โดยใช้เครื่อง tensile testing machine รูปแบบของขึ้นทดสอบเป็นแบบรูปคัมเบล

การคำนวณค่า tensile parameters ต่างๆ

ความเค้น (tensile stress) = แรง (N)/พื้นที่หน้าตัดบริเวณตรงกลาง (m²). N/m²

ความเครียด (tensile strain) = ระยะยืด/ระยะความยาว gauge เริ่มต้น

การยืดตัว (elongation) = ระยะการยืด mm

ความแกร่ง (tensile modulus) = Stress/strain (MPa)

5.5 ความต้านทานแรงฉีกขาด (tear strength)

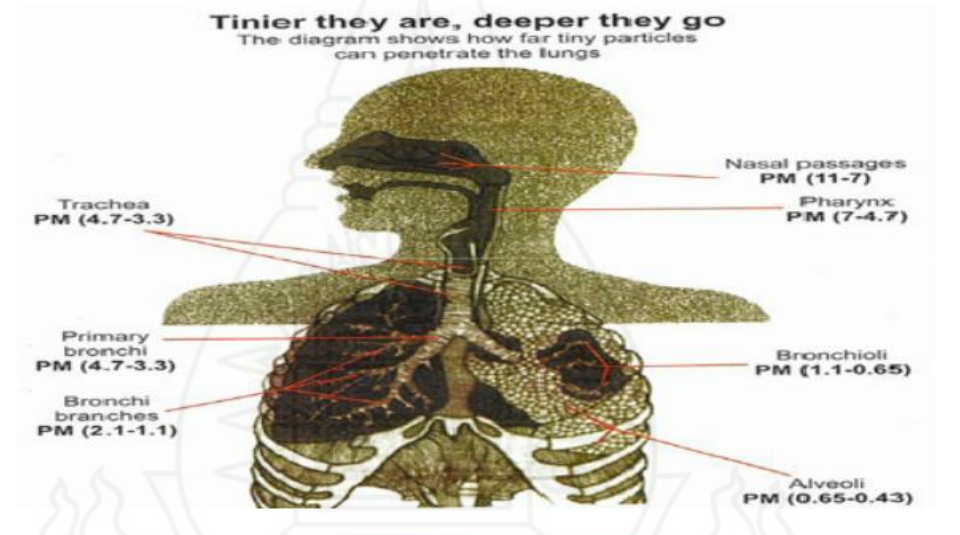
ความต้านทานต่อแรงฉีกขาด เป็นการทดสอบค่างานเฉลี่ยที่ใช้ในการฉีกพลาสติกหรือยางที่มีรอยบากไว้แล้ว มีหน่วยเป็นกรัมแรง x เมตร หรือ นิวตัน x เมตร (gram-force x meter หรือ newton x meter เขียนย่อ gf.m หรือ N.m) การทดสอบนี้มีความสำคัญต่อการควบคุมคุณภาพของยางคอมปาวด์ เพราะเป็นการทดสอบ ความแข็งแรงในพันธะของ อีลาสโตเมอร์ (elastomer) ตามแนวนอน ชิ้นงานทดสอบจะถูกจับยึดและจัดศูนย์ให้ส่วนขาของชิ้นงานทดสอบอยู่ในปากจับในลักษณะที่แนวแกนหลักตรงกับเส้นในจินตนาการที่เชื่อมระหว่างจุดกึ่งกลางของอุปกรณ์จับยึด จากนั้นถึงให้ชิ้นงานแยกออกจากกันด้วยอัตราการเคลื่อนที่ที่คงที่ ค่าของแรงจะถูกบันทึกในระหว่างที่เกิดการฉีกขาดจนสิ้นสุดระยะความยาวในส่วนที่ไม่ได้สร้างรอยตัดไว้ของชิ้นงานทดสอบ ค่าของแรงเฉลี่ยที่ใช้ในการฉีกชิ้นงานให้ขาดตลอดระยะความยาวจะถูกใช้ในการคำนวณความต้านทานต่อแรงฉีกขาดของวัสดุ

6. อันตรายของเถ้าถ่านหินต่อสุขภาพ

เถ้าถ่านหินมีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในแต่ละปีมาช้านานจนถึงปัจจุบัน ถ้าไม่มีการจัดการที่ดีหรือนำไปใช้ประโยชน์อย่างเพียงพอก็จะเป็นปัจจัยซ้ำเติมการเกิดปัญหาอนุภาคขนาดเล็ก (particle) ในบรรยากาศอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ประชากรมากกว่าล้านคนทั่วโลก เป็นโรคหอบหืด โรคระบบทางเดินหายใจ หัวใจวาย ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการรักษาตัวในโรงพยาบาล หรือเข้ารับอาจต้องหยุดงาน ส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจและสังคม อย่างประเมินค่าไม่ได้ ดังนั้นการศึกษาหาวิธีการในการจัดการโดยการนำเถ้าถ่านหินไปใช้ประโยชน์

อย่างจริงจังต้องมีการดำเนินการจากทุกภาคส่วนที่เกี่ยวข้อง ถ้าวัดจากถ่านหิน จัดเป็นสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุไม่ใช่แล้ว ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว พ.ศ. 2548 มีรหัสของเสีย คือ 10 01 02 HM เป็นของเสียที่ต้องมีการวิเคราะห์ความเป็นพิษก่อนส่งไปกำจัดหรือจัดการที่ถูกต้องและเหมาะสม ถ้าวัดจากถ่านหินบางแหล่งอาจมีองค์ประกอบบางอย่างหรือโลหะหนักที่มีความเป็นพิษ สะสมอยู่ขึ้นกับแหล่งที่มาเช่น สารหนู (As) และ โครเมียม (Cr) นอกจากนี้ถ้าวัดยังเป็นฝุ่นผงที่มีอนุภาคขนาดเล็ก ที่สามารถฟุ้งกระจายได้ ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ ที่ส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ ถ้าทิ้งหรือฝังดินอาจก่อให้เกิดปัญหาต่อคุณภาพของดิน และแหล่งน้ำใต้ดินได้

อนุภาคขนาดเล็กจะสามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้ดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 ผลกระทบของถ้าวัดต่อระบบทางเดินหายใจ

ที่มา: Akash Dwivedi and Manish Jain (2014)

7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศิรินทร ทองแสง (2548) ทำการศึกษาเรื่อง สมบัติเชิงกลของยางคอมปาวด์เมื่อเติมถ้าวัดลงไป ผลการศึกษาพบว่า การเติมถ้าวัดลงในยางคอมปาวด์ปริมาณ 0-90 ส่วนในร้อยส่วนของยางธรรมชาติ พบว่าโมดูลัสของวัสดุยางธรรมชาติ ณ 100 เปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณถ้าวัดสูงขึ้นและพบว่า ณ ปริมาณถ้าวัด 40 phr ยังให้ค่าความแข็งแรง ณ 100 เปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงกว่าซิลิกา จากการที่วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติกับถ้าวัดมีความแข็งแรงมากขึ้น

เมื่อมีปริมาณเถ้าลอยมากขึ้นจึงส่งผลต่อความสามารถการยึดตัวลดลงตามไปด้วย แต่ค่าความทนแรงดึง ณ จุดขาดกลับมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงว่า สัดส่วนของเถ้าลอยในยางธรรมชาติมีผลต่อค่าความทนแรงดึง ณ จุดขาด ส่วนค่าความแข็งนั้น เมื่อมีปริมาณเถ้าลอยมากขึ้นค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

อภิสิทธิ์ โหมยิตชัยยงค์ (2553) ทำการศึกษาการใช้ประโยชน์จากอนุภาคเถ้าลอย เพื่อทำหน้าที่เป็นสารลดต้นทุนสำหรับผลิตภัณฑ์พอลิเอทิลีนที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการแม่พิมพ์หมุนเหวี่ยง ผลการศึกษาพบว่าการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยในวัสดุผสมส่งผลให้ ค่าความทนแรงดึงสูงสุด ระยะยึดตัวที่จุดขาด และสมบัติเชิงกลค่าโมดูลัส สูงขึ้นเล็กน้อย

ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ (2546) ทำการศึกษาเรื่อง สัดส่วนที่เหมาะสมในการเติมเถ้าลอยในยางคอมพาวด์ที่ใช้กับยางธรรมชาติ ผลการศึกษาพบว่าการเติมเถ้าลอย คือ 2.0 และ 4.0 ส่วนต่อเนื้อยาง 100 ส่วน สัดส่วนนี้จะไม่ทำให้สมบัติด้าน แรงดึง (tensile strength) เปลี่ยนแปลงไป

Ren, Xianjie, ren (2016) ทำการศึกษาการใช้สารตัวเติมเถ้าลอยในยางสังเคราะห์ ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ผลการศึกษาพบว่า อนุภาคเถ้าลอยขนาด 3 ไมครอน เมื่อผสมกับ เขม่าดำและยางสังเคราะห์ จะทำให้สมบัติ tensile strength สูงขึ้น และระยะเวลาของยางสุก (cure time) เพิ่มขึ้น

วิภาวี พัฒนกุล (2554) ทำการศึกษานอนุภาคเถ้าลอย ขนาดต่างๆ ผลการศึกษาพบว่า สารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะช่วยเสริมประสิทธิภาพให้กับยางที่ไม่สามารถตกผลึกได้มีผลทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น 9 หรือ 10 เท่าตัวแต่สารตัวเติมชนิดเดียวกันนี้ จะเสริมความต้านทานต่อแรงดึงให้กับยางที่ตกผลึกได้เพียงร้อยละ 10 เท่านั้น

นิริศดา น้อยน้ำ (2554) การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีครั้งที่ 9 “วิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์เพื่อสุขภาพ” ทำการศึกษาเรื่อง ผลของปริมาณเถ้าลอยต่อความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบ เถ้าลอย/พอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน โดยนำเถ้าลอยปริมาณร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักผสมกับพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนนำมาอัดขึ้นรูปร้อน เป็นวัสดุเชิงประกอบเถ้าลอย/พอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน ผลการศึกษา พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าลอยช่วยปรับปรุงความแข็งและความต้านทานต่อการสึกหรอของยาง

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

1. รูปแบบการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงทดลองเพื่อศึกษาสมบัติของยางเมื่อใช้ถั่วลอมผสมเป็นสารตัวเติมทดแทนเขม่าดำและ ดินขาว เปรียบเทียบกับยางที่ใช้สำหรับผลิตยางรถชนิดที่ใช้ความเร็วต่ำ เช่น รถเทอร์เลอร์ และรถเกษตร

2. อุปกรณ์ เครื่องมือ/ สารเคมี ที่ใช้ในการศึกษา

2.1 อุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

- 2.1.1 เครื่องผสมยาง internal mixer Model YI XIANG JI CK400A (China)
- 2.1.2 เครื่องอัดรีดยาง two-roll mill Model DXS160 (China)
- 2.1.3 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล tensometer Model EKTRON TEK TS 2000 (U.S.A.)
- 2.1.4 เครื่องทดสอบความหนืด mooney viscometer Model EKTRON TEK EKT 2001M(U.S.A.)
- 2.1.5 เครื่องทดสอบความแข็ง hardness tester shore durometer Model 716
- 2.1.6 เครื่องทดสอบสมบัติความคงรูป rheometer cure characteristics Model EKTRON TEK EKT 2000

2.2 สารเคมี ที่ใช้ในการศึกษา

- 2.2.1 ยางธรรมชาติ ที่ใช้ทดลองคือ ยางแท่ง STR 20
- 2.2.2 สารตัวเติมชนิดเสริมแรง ได้แก่ เขม่าดำ N-330 (lot No. 16093B6) ของบริษัท Shanxi Yongdong China ถั่วลอม ใช้ตัวอย่างจากเครื่องมัลติไซโคลน จากการเผาถ่านหินของโรงงานที่ทำการทดลอง และ ดินขาว ใช้ตัวอย่างที่ผลิต จากบริษัท L-Eternal (Lot.No. 692115)
- 2.2.3 ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide) ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้น เป็นผงละเอียดสีขาวเกรดที่ใช้สำหรับอุตสาหกรรมยาง จัดจำหน่ายโดย Univenture Public

2.2.4 สารกระตุ้น (N-Cyclohexi-2-Benzo Thiazone; CBTS) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่ง มีลักษณะเป็นเม็ดสีขาว เกรดสำหรับอุตสาหกรรมยาง จัดจำหน่ายโดยบริษัท กิจไพบูลย์เคมี

2.2.5 กำมะถัน (sulphur) ทำหน้าที่เป็นสารวัลคาไนซ์ เกรดสำหรับอุตสาหกรรมยาง ลักษณะเป็นผงสีเหลือง ผลิตโดยบริษัท สยามเคมีจำกัด

2.2.6 กรดสเตียริก (stearic acid) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่ง ลักษณะเป็นเกล็ดสีขาว อมเหลือง เป็นเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง จำหน่ายโดยบริษัท กิจไพบูลย์เคมีจำกัด

2.2.7 สารแอนติออกซิแดนซ์ (N-(1,3 Dimethyl Butyl)N-Phenylene Diamine; 6PPD) ทำหน้าที่เป็นสารป้องกันการออกซิไดซ์จากอากาศ ลักษณะเป็นเม็ดสีน้ำตาลดำ เป็นเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางผลิตโดยบริษัท Bayer

3. วิธีการทดลอง

3.1 ศึกษาข้อมูล โครงสร้าง ส่วนประกอบและ สมบัติทางเคมีของ เชม่าดำและดินขาว เปรียบเทียบกับ เถ้าลอย

3.2 ออกแบบสูตรการทดลอง โดยลดสัดส่วนการใช้ เชม่าดำ จากสูตรปรกติลง 3 ระดับ คือ 5,10,15 phr ทดแทนด้วย ดินขาว และ เถ้าลอย โดยอ้างอิงสูตรตามการศึกษาของ ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ 2546

3.3 เตรียมผสมยางธรรมชาติและส่วนผสม 1 นำหนักตามสูตรที่กำหนด ตามตารางที่ 3.1 และ 3.2 และเตรียม เครื่องผสม (internal mixer) และเตรียมเครื่องอัดรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง (two-roll mill)

3.4 การเตรียมคอมปาวด์

ใส่ยางธรรมชาติ สารเติมแต่ง และสารเคมีลงในเครื่องผสมระบบปิดและเติม เชม่าดำ ดินขาว และ เถ้าลอย ตามอัตราส่วนผสมตามตารางที่ 3.1 และ 3.2

ในระหว่างที่เปิดเครื่องผสมประมาณ 1 นาที เติม สารตัวเติมและ antioxidant ผสม ให้เข้ากันรักษาอุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส 15 นาที แล้วนำไปทำให้เย็นที่ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เติม stearic acid ,zinc oxide , CBTS และ กำมะถัน ลงในเครื่องผสมและรักษาอุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส 15 นาที ทิ้งไว้ให้เย็น นำไปนวดอัดรีดที่เครื่องอัดรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง ประมาณ 5 นาที จะได้ยางคอมปาวด์ ที่คงรูป พร้อมเตรียมเป็นชิ้นงานเพื่อนำไปทดสอบสมบัติ โดยทดสอบชิ้นงานละ 3 ซ้ำ แล้วนำมาคำนวณค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบ

3.5 การทดสอบสมบัติยางคอมปาวด์

ยางคอมปาวด์ที่เตรียมได้จากข้อ 3.4 จะนำมาทดสอบสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

3.5.1 ทดสอบความต้านทานแรงดึง (tensile properties) วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ISO 37-1994(E) ใช้เครื่องทดสอบรุ่น EKTRON TEK TS 2000 (U.S.A.) ความเร็วในการดึงขึ้นงานทดสอบ 500 มิลลิเมตรต่อนาที เพื่อทำการทดสอบหาค่าโมดูลัสที่จุดยืดตัว 300% ค่าความเค้น (stress) และจุดยืดก่อนขาด (elongation at break) แล้วหาค่าเฉลี่ยของขึ้นทดสอบ 3 ตัวอย่าง

3.5.2 ทดสอบความต้านทานแรงฉีกขาด (tear strength) ตามมาตรฐาน ISO 34 angle test piece) ด้วยเครื่องทดสอบ tensile test machine รุ่น 1 EKTRON TEK TS 2000 (U.S.A.) ใช้ความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที ค่าต้านทานแรงฉีกขาดคือค่าแรงดึงสูงสุดที่ทำให้ยางฉีกขาด ต่อความหนาของขึ้นตัวอย่าง (มีหน่วยเป็น N/mm)

3.5.3 ทดสอบความแข็ง (shore A hardness) ใช้เครื่อง Shore Durometer (Model 716) ของบริษัท The Shore Instrument & Manufacturing Co., NY, USA. ตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยการวัดจะรายงานค่าความแข็ง (hardness number) ตามระยะเวลากด (indentation time) 15 วินาที และบันทึกค่ากลาง (median) จากค่าที่วัดได้ทั้งหมด 3 ค่า

3.5.4 การหาวเวลาที่ใช้ในการคงรูปของยาง โดยใช้เครื่อง Rheometer Cure Characteristics Model EKTRON TEK EKT 2000 โดยใช้ตัวอย่าง 5 มิลลิกรัม ทดสอบที่ 160 องศาเซลเซียส 30 นาที เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Heat Flow กับเวลา $T_{90/0.9} = \text{Cure Time}$

3.5.5 ทดสอบความหนืดมูนนี่ เพื่อทดสอบความสามารถในการไหลหรือความหนืด โดยนำตัวอย่างยางที่ผ่านการรีดให้เป็นแผ่นเรียบร้อยแล้วมาประมาณ 27 ± 3 กรัม ทำเป็นแผ่นให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 47 มิลลิเมตร ทดสอบด้วยเครื่อง mooney viscometer Mooney Model EKTRON TEK EKT 2001M (U.S.A.)

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของสูตรต้นแบบ

ลำดับ	ทำหน้าที่	ชื่อวัตถุดิบ	phr (part per hundred rubber)
1	Rubber	STR 20	100
2	Reinforcing filler	Carbonblack	50
3	Activator	Zinc oxide	3
4	Activator	N-cyclohexi-2-benzothiazone	1.6
5	Vulcanizer	Sulphur	1.4
6	Activator	Stearic acid	2

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

ลำดับ	ทำหน้าที่	ชื่อวัตถุเติม	phr (part per hundred rubber)
7	Antioxidant and antiozonant	6-PPD	1
รวม			159

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนการใช้สารตัวเติม เขม่าดำ คินขาว และถั่วลอ

สูตรที่	เขม่าดำ (phr)	คินขาว (phr)	ถั่วลอ (phr)
1	50	0	0
2	45	5	0
3	40	10	0
4	35	15	0
5	45	0	5
6	40	0	10
7	35	0	15
8	35	10	5
9	30	10	10
10	25	10	15

หมายเหตุ อ้างอิงสูตรการทดลองจากฉรภรคฤทธิ สมบัติสมภพ (2546)

3.6 เปรียบเทียบสมบัติของยางสูตรทดลองกับยางคอมปาวด์ ที่ใช้สำหรับผลิตยางรถเทอร์เลอร์ชนิดเบา (T1) รถเทอร์เลอร์ชนิดหนัก (T2) และรถเกษตร(T3)ที่เป็นสูตรที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตยางรถที่ทำการวิจัย

สมบัติของยางที่เปรียบเทียบ

3.6.1 ความต้านทานแรงดึง (tensile properties)

3.6.2 ความต้านทานแรงฉีกขาด (tear strength)

3.6.3 ความแข็ง (shore A hardness)

4. การวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 การวิเคราะห์ข้อมูล ทำการทดสอบเปรียบเทียบความแตกต่างของสมบัติของยางคอมปาวด์สูตรทดลองกับยางคอมปาวด์สูตรต้นแบบ โดยใช้สถิติ непараметрик (Non parametric) (Kruskal Wallis Test) ทดสอบสมบัติโมดูลัส ค่า elongation at break และ ค่าความต้านทานแรงฉีกขาด (tear strength)

4.2 วิเคราะห์ข้อมูล โดยพิจารณาสมบัติของยางคอมปาวด์ที่ใช้ เหม่าดำและดินขาวกับสัดส่วนการใช้ เถ้าลอย 5, 10 และ 15 phr เปรียบเทียบกับยางคอมปาวด์สำหรับรถชนิดที่ใช้ความเร็วต่ำที่มีอยู่โดยทั่วไปในท้องตลาด (ยางรถแทรกเตอร์ชนิดเบา ยางรถแทรกเตอร์ชนิดหนักและ ยางรถเกษตร)



บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

1. ผลการวิเคราะห์สมบัติและองค์ประกอบของเถ้าลอยและดินขาว

ทำการเก็บตัวอย่างเถ้าลอยจากเครื่องมัลติไซโคลน เครื่องดักจับฝุ่นจากหม้อน้ำของ บริษัทแห่งหนึ่งในจังหวัดนครปฐม ที่มีการใช้ใช้ถ่านหินจากบริษัทเอเชีย กรีน เป็นเชื้อเพลิงและ เก็บตัวอย่างดินขาวจากระบวนการผลิตจริง ผลิตจากบริษัทแอลอีเทอร์นอล จำกัด เลขที่ลอต 692115 ส่งทดสอบที่ฝ่ายนวัตกรรมวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย เมื่อวันที่ 28 ธันวาคม 2559 ตามคำขอที่ ทว.049/60 เพื่อทำการทดสอบสมบัติเบื้องต้นคือ ความชื้น การดูดซับน้ำมัน กากค้ำตะแกรง และการกระจายตัวของอนุภาค

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความชื้น การดูดซับน้ำมัน กากค้ำตะแกรง และการกระจายตัวของอนุภาค ของเถ้าลอยและดินขาว

การทดสอบ	เถ้าลอย	ดินขาว
ความชื้น (ร้อยละ)	0.0938	0.1661
การดูดซับน้ำมัน (กรัม/100กรัม)	80.88	46.30
กากค้ำตะแกรง (ร้อยละ)		
ค้ำ 325 mesh	48.84	0
ค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาค (ไมครอน)	32.94	5.11

จากตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยและดินขาวพบว่า ค่าความชื้นของเถ้าลอย (0.0938) มีค่าต่ำกว่าดินขาว (0.1661) เถ้าลอยจะดูดซับน้ำมันมากกว่า ดินขาว และพบว่าขนาดอนุภาคของเถ้าลอย (32.94 ไมครอน) ใหญ่กว่าอนุภาคของดินขาว (5.11 ไมครอน) ทำให้กากค้ำตะกอนของเถ้าลอยมีการตกค้ำมากกว่าดินขาว

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอย และ ดินขาวในรูปของสารประกอบ

ชื่อตัวอย่าง	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						
	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
แก้วลอย	1.73	1.61	29.7	49.6	2.74	1.60	13.1
ดินขาว	-	1.24	27.1	64.6	4.88	-	2.22

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอย และ ดินขาว ในรูปของธาตุบริสุทธิ์

ชื่อตัวอย่าง	ธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						
	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
แก้วลอย	1.62	1.23	19.88	29.35	2.88	1.45	11.45
ดินขาว	-	0.91	17.45	36.71	4.92	-	1.89

จากตารางที่ 4.2 และ 4.3 เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอยและดินขาว ในรูปของสารประกอบและ ธาตุบริสุทธิ์ พบว่า แก้วลอยมีองค์ประกอบของสารประกอบ SiO₂ ในปริมาณ 49.6% โดยน้ำหนัก ส่วน ดินขาวพบมี SiO₂ 64.6 % โดยน้ำหนัก และองค์ประกอบในรูปของธาตุบริสุทธิ์พบว่าแก้วลอยมีองค์ประกอบของ Si ในปริมาณ 29.35 % โดยน้ำหนัก และ ดินขาวพบมี Si ในปริมาณ 36.71 % โดยน้ำหนัก ซึ่งในอุตสาหกรรมผลิตยางรถยนต์มีการใช้ซิลิกาผสมในยางคอมปาวด์ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและลดแรงเสียดทาน

2. ผลการทดสอบสมบัติของยางคอมปาวด์

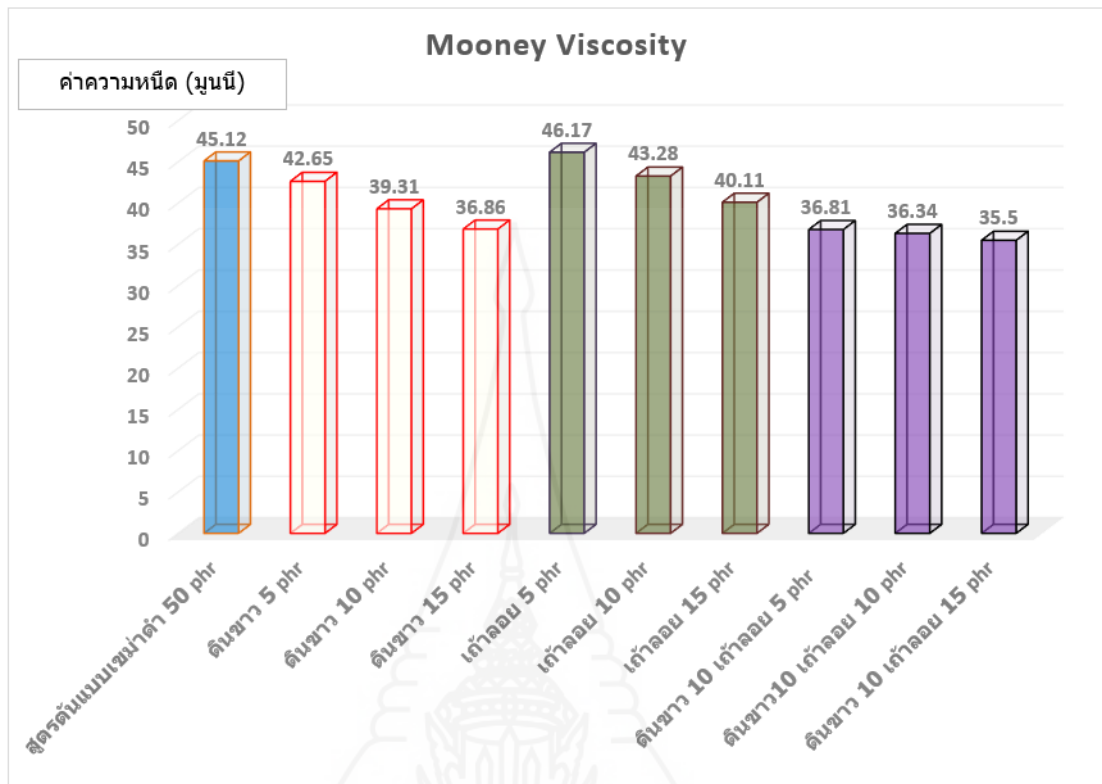
ดำเนินการเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบคุณสมบัติของยางคอมปาวด์ ประกอบด้วย ค่า ความหนืดมูนนี่ สมบัติการคงรูปของยาง ความแข็ง ความต้านทานแรงดึง และความต้านทานแรงฉีกขาด ซึ่งผลการทดสอบสมบัติและการเปรียบเทียบผลการทดลอง เปรียบเทียบ การใช้สัดส่วนผสมของ เขม่าดำ ดินขาว และแก้วลอย นำเสนอตามลำดับดังนี้

2.1 ความหนืดมุนี

เมื่อเตรียมตัวอย่างคอมปาวด์ตามสัดส่วนผสมการใช้เขม่าดำ ดินขาว และถั่วลอชตามสูตรทดลองแล้วนำตัวอย่างไปทดสอบค่าความหนืดมุนี ได้ผลการทดสอบสมบัติตามตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนืดมุนีของสูตรยางคอมปาวด์จากการทดสอบ

สูตรทดลอง	ส่วนผสมคอมปาวด์ (ส่วนในร้อยละของยาง, phr)			ค่าความหนืด มุนี	
	เขม่าดำ	ดินขาว	ถั่วลอช	ค่าเฉลี่ย	SD
สูตรต้นแบบเขม่าดำ 50 phr	50	0	0	45.12	0.007
ดินขาว 5 phr	45	5	0	42.65	0.021
ดินขาว 10 phr	40	10	0	39.31	0.021
ดินขาว 15 phr	35	15	0	36.86	0.318
ถั่วลอช 5 phr	45	0	5	46.17	0.969
ถั่วลอช 10 phr	40	0	10	43.28	0.156
ถั่วลอช 15 phr	35	0	15	40.11	0.028
ดินขาว 10 ถั่วลอช 5 phr	35	10	5	36.81	0.042
ดินขาว 10 ถั่วลอช 10 phr	30	10	10	36.34	0.085
ดินขาว 10 ถั่วลอช 15 phr	25	10	15	35.5	0.049



ภาพที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยความหนืดมูนนี่ของสูตรยางคอมปาวด์จากการทดสอบ (mooney viscosity)

ตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.1 พบว่าสูตรต้นแบบได้ค่าความหนืด 45.12 มูนนี่ เมื่อเติมดินขาวทดแทนเขม่าดำปริมาณมากขึ้นและสัดส่วนของเขม่าดำลดลง พบว่าค่าความหนืดของยางคอมปาวด์ลดลง เนื่องจากดินขาวเป็นสารตัวเติมชนิดที่ไม่เสริมแรง จึงไม่เกิดแรงอันตรกิริยา (interaction force) ระหว่างยางคอมปาวด์กับดินขาว (พวงษ์ธร แซ่ฮุย 2548) ทำให้ไม่เกิดการขัดขวางการไหลของยาง ความหนืดจึงลดลงเมื่อเติมดินขาวปริมาณมากขึ้น ซึ่งการเติมเก้าลอมปริมาณมากขึ้นและลดสัดส่วนการใช้เขม่าดำลง ผลการทดลองก็ไปในทิศทางเดียวกัน

เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างดินขาวกับเก้าลอมพบว่าค่าความหนืดของยางคอมปาวด์ ที่เติมเก้าลอมมีค่ามากกว่าที่เติมดินขาว เนื่องจากขนาดอนุภาคของเก้าลอมมีขนาดใหญ่กว่าดินขาว มีโอกาสที่จะขัดขวางการไหล ทำให้ไหลยากขึ้น และอาจเป็นไปได้ว่าโครงสร้างของเก้าลอมมีรูพรุนมากกว่า จากผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำมันของเก้าลอมสูงกว่าดินขาว และจากการผสมดินขาวและเก้าลอมเพื่อทดแทนการใช้เขม่าดำพบว่ามิผลให้ความหนืดเปลี่ยนแปลงแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีเบื้องต้น

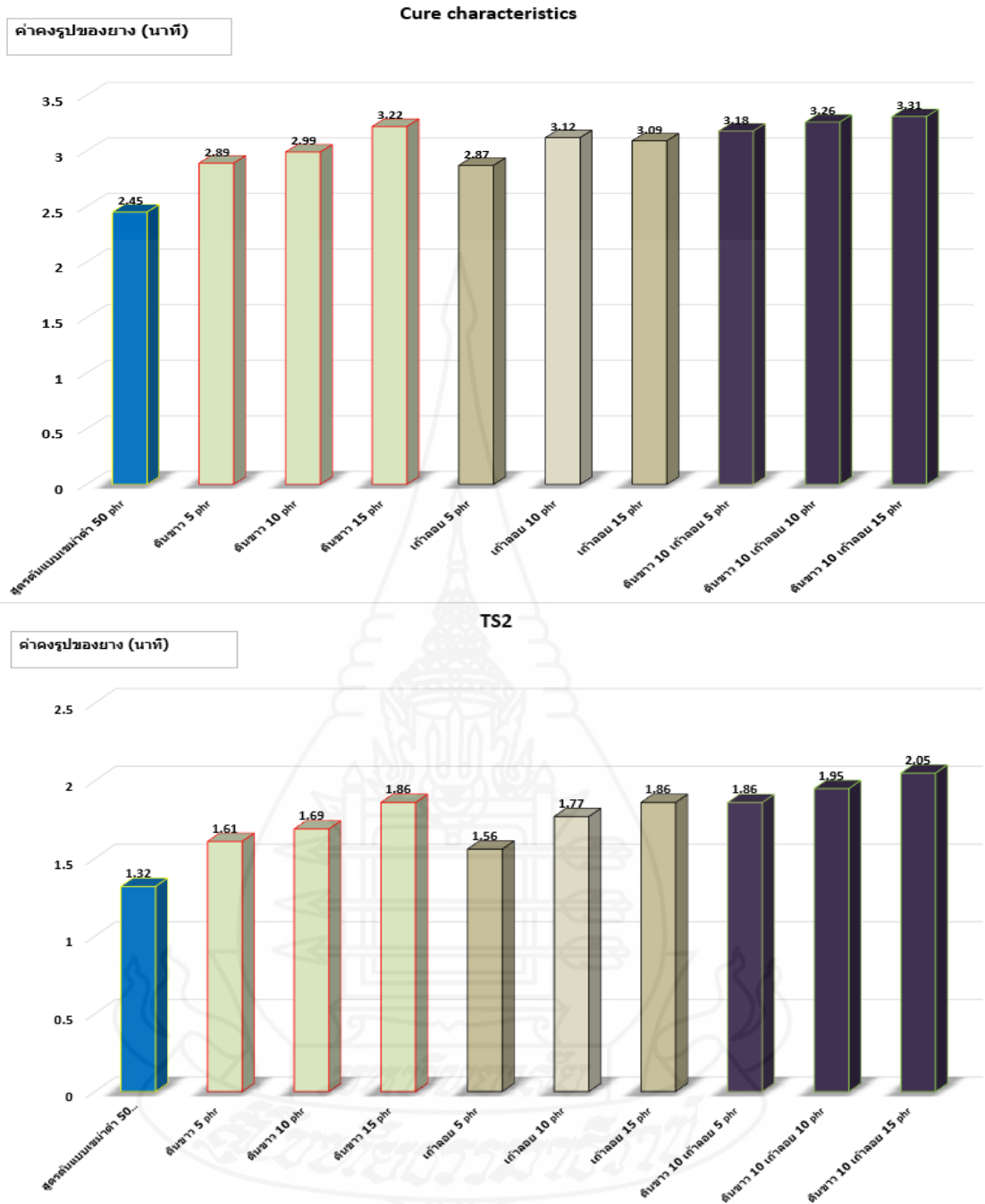
จากสูตรคอมปาวด์ต้นแบบมีความหนืดมูนนี้ที่สูงกว่าการเติมดินขาวและเถ้าลอยทดแทนเขม่าดำ ทำให้ในกระบวนการผลิตยางคอมปาวด์ในขั้นตอนการผสมยางและสารตัวเติม (mixing) มอเตอร์จะมีการใช้พลังงานในการผสมที่สูงกว่า ดังนั้นการใช้ดินขาวและเถ้าลอยผสมเป็นสารตัวเติมทดแทนเขม่าดำซึ่งทำให้มีค่าความหนืดมูนนี้ที่ลดลงจะช่วยลดการใช้พลังงานลงเป็นการอนุรักษ์พลังงานได้อีกด้วย

2.2 ค่าการคงรูป และเวลาเริ่มคงรูป

เมื่อเตรียมตัวอย่างคอมปาวด์ตามสัดส่วนผสมการใช้เขม่าดำ ดินขาว และเถ้าลอยตามสูตรทดลองแล้วนำตัวอย่างไปทดสอบค่าการคงรูปและเวลาเริ่มคงรูป ได้ผลการทดสอบสมบัติตามตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าการคงรูปของยาง

สูตรทดลอง	ส่วนผสมคอมปาวด์ (ส่วนในร้อยละของยาง, phr)			ค่าการคงรูป (Cure Characteristics, TS2, T90) (นาที)		
	เขม่าดำ	ดินขาว	เถ้าลอย	ค่าเฉลี่ย TS2	ค่าเฉลี่ย T90	SD T90
สูตรต้นแบบเขม่าดำ 50 phr	50	0	0	1.32	2.45	0.057
ดินขาว 5 phr	45	5	0	1.61	2.89	0.000
ดินขาว 10 phr	40	10	0	1.69	2.99	0.078
ดินขาว 15 phr	35	15	0	1.86	3.22	0.042
เถ้าลอย 5 phr	45	0	5	1.56	2.87	0.021
เถ้าลอย 10 phr	40	0	10	1.77	3.12	0.78
เถ้าลอย 15 phr	35	0	15	1.86	3.09	0.000
ดินขาว 10 เถ้าลอย 5 phr	35	10	5	1.86	3.18	0.007
ดินขาว 10 เถ้าลอย 10 phr	30	10	10	1.95	3.26	0.007
ดินขาว 10 เถ้าลอย 15 phr	25	10	15	2.05	3.31	0.014



ภาพที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยการคงรูป(Cure Characteristics T90) ค่าเฉลี่ยเวลาเริ่มคงรูป (Scorch Time,TS2)

จากตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.2 พบว่าสูตรต้นแบบได้ค่าความคงรูป 2.45 นาที ค่าของเวลาเริ่มคงรูป 1.32 นาที เมื่อเติมดินขาวทดแทนเขม่าดำปริมาณมากขึ้นและสัดส่วนของเขม่าดำลดลง พบว่าค่าความคงรูปและเวลาเริ่มคงรูป ของยางคอมปาวด์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากดินขาวมีซิลิกาไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบ ซึ่งซิลิกา มีคุณสมบัติในการดูดซับสารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ระยะเวลาความคงรูปเวลาเริ่มคงรูปยาวนานขึ้นเมื่อเติมดินขาวปริมาณมากขึ้น ซึ่งการเติมถั่วลอ

ปริมาณมากขึ้นและลดสัดส่วนการใช้เข็มดำลง ผลการทดลองก็ไปในทิศทางเดียวกัน เพราะจากการวิเคราะห์พบว่าถ้ำลอยก็มี ซิลิกา ไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบเช่นกัน

เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างดินขาวกับถ้ำลอยพบว่าค่าความคงรูป เวลาเริ่มคงรูป ของยางคอมปาวด์ ที่เติมถ้ำลอยมีค่ายาวนานขึ้นซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีเบื้องต้น

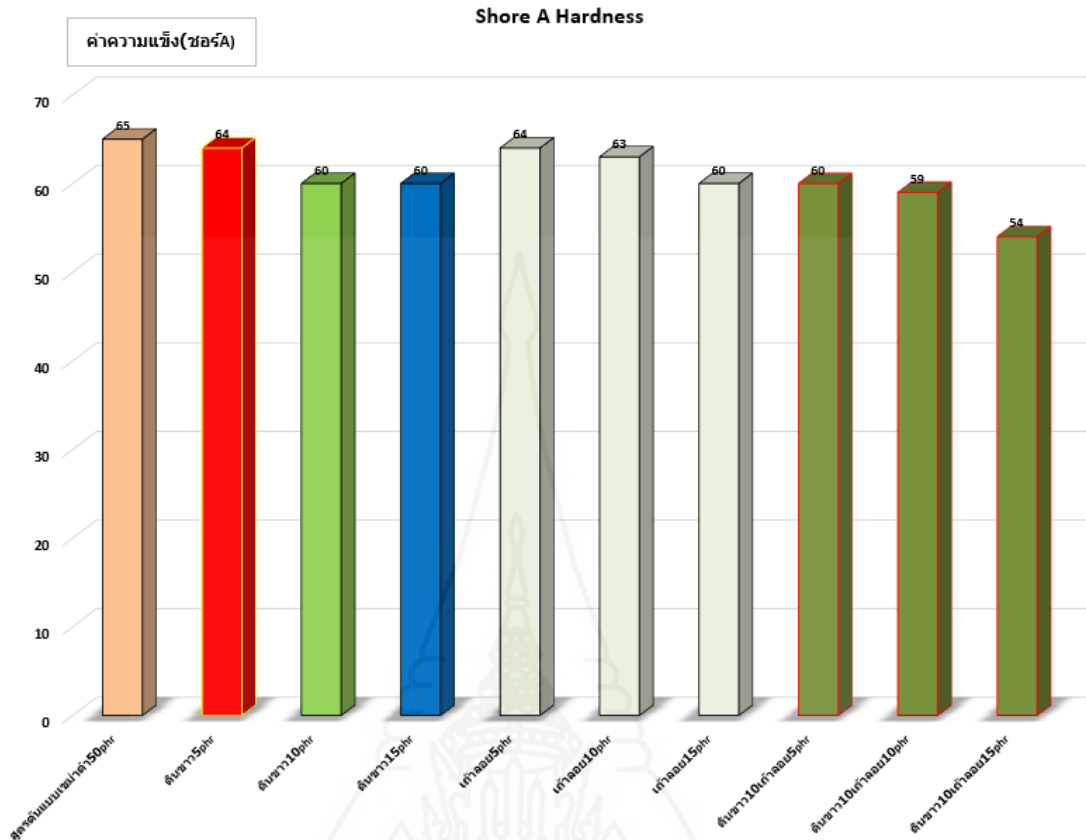
ในกระบวนการผลิตยางรถชนิดที่ใช้ความเร็วต่ำเช่นยางรถเทอร์เลอร์ยางรถเกษตร ในการสร้างยางและขึ้นรูปยาง ลักษณะของยางมีความหนา การยืดระยะเวลาคงรูป และเวลาเริ่มคงรูป มีผลดีต่อคุณภาพในการผลิตยางเพราะจะช่วยให้ระยะเวลาในการเก็บสต็อกยางคอมปาวด์ได้นานขึ้น และช่วยลดของเสียในกระบวนการที่เกิดจากการระยะเวลาของยางสุกหรือความคงรูปของยางหรือการเซตตัวใน โมลขึ้นรูปชิ้นงานที่เร็วเกินไป

2.3 ความแข็ง

เมื่อเตรียมตัวอย่างคอมปาวด์ตามสัดส่วนผสมการใช้เข็มดำ ดินขาว และถ้ำลอยตามสูตรทดลองแล้วนำตัวอย่างไปทดสอบค่าความแข็ง ได้ผลการทดสอบสมบัติตามตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสมบัติความแข็ง (shore A hardness) ของยาง

สูตรทดลอง	ปริมาณที่เติมในส่วนผสมคอมปาวด์ (ส่วนในร้อยส่วนของยาง,phr)			ความแข็ง (Shore A Hardness) (Shore A)	
	เข็มดำ	ดินขาว	ถ้ำลอย	ค่าเฉลี่ย	SD
สูตรต้นแบบเข็มดำ50 phr	50	0	0	65	1.0
ดินขาว 5 phr	45	5	0	64	1.0
ดินขาว 10 phr	40	10	0	60	1.0
ดินขาว 15 phr	35	15	0	60	1.0
ถ้ำลอย 5 phr	45	0	5	64	1.0
ถ้ำลอย 10 phr	40	0	10	63	1.0
ถ้ำลอย 15 phr	35	0	15	60	1.0
ดินขาว 10 ถ้ำลอย 5 phr	35	10	5	60	1.0
ดินขาว 10 ถ้ำลอย 10 phr	30	10	10	59	1.0
ดินขาว 10 ถ้ำลอย 15 phr	25	10	15	54	1.0



ภาพที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยความแข็ง (shore A hardness) ของยางจากการทดสอบ

จากตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.3 พบว่าสูตรต้นแบบได้ค่าความแข็ง 65 ชอร์A เมื่อเติมดินขาวทดแทนเขม่าดำปริมาณมากขึ้นและสัดส่วนของเขม่าดำลดลง พบว่าค่าความแข็งของยางคอมปาวด์ลดลง เนื่องจากดินขาวเป็นสารตัวเติมชนิดที่ไม่เสริมแรงและมีอนุภาคใหญ่กว่าเขม่าดำขนาดอนุภาคยิ่งเล็กทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น (นรา เทื่อใหม่ 2552) ซึ่งการเติมเถ้าลอยปริมาณมากขึ้นและลดสัดส่วนการใช้เขม่าดำลง ผลการทดลองก็ไปในทิศทางเดียวกันเพราะเถ้าลอยมีอนุภาคขนาดใหญ่และไม่สม่ำเสมอ

เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างดินขาวกับเถ้าลอยพบว่าค่าความแข็งของยางคอมปาวด์ ที่เติมเถ้าลอยมีค่าใกล้เคียงกับที่เติมดินขาว

3. ผลการทดลองเปรียบเทียบการใช้ ดินขาว เถ้าลอย เป็นสารตัวเติม ในยางคอมปาวด์ กับสูตรต้นแบบ

ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของสมบัติต่างๆ ของสูตรต้นแบบและสูตรทดลอง สมบัติที่เปรียบเทียบได้แก่ ค่าการต้านทานแรงดึง โมดูลัส ความต้านทานแรงฉีกขาด ค่าการยืดตัว และความเค้น โดยใช้สถิติอนพารามетริก ทดสอบด้วยสถิติ Kruskal Wallis Test โดยสูตรต้นแบบ กำหนดเป็นสูตรที่ 1 และสัดส่วนการใช้ เหม่ดำ ดินขาว และเถ้าลอย ที่ลดสัดส่วนการเติมตามตารางที่ 3.2 ตั้งแต่สูตรที่ 2 ถึงสูตรที่10 ตามลำดับ

3.1 ค่าเฉลี่ยโมดูลัส

ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยโมดูลัส ของสูตรต้นแบบ และสูตรทดลอง สูตรที่ 5 ถึงสูตรที่ 10 ตามตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยโมดูลัส (Modulus 300) ระหว่างสูตรยางคอมปาวด์ สูตรต้นแบบและสูตรทดลอง

สูตรต้นแบบ		สูตรทดลอง		p-value
สูตรที่	ค่าเฉลี่ยโมดูลัส ค่าเฉลี่ย (SD)	สูตรที่	ค่าเฉลี่ยโมดูลัส ค่าเฉลี่ย (SD)	
1	14.24 (0.46)	2	13.19 (0.52)	1.000
		3	12.06 (0.29)	1.000
		4	11.42 (0.54)	0.332
		5	13.88 (0.26)	1.000
		6	11.65 (0.33)	1.000
		7	10.76 (0.40)	0.021
		8	11.26 (0.21)	0.231
		9	8.91 (0.12)	0.001
		10	7.44 (0.13)	< 0.001

หมายเหตุ: ทดสอบด้วยสถิติ Kruskal Wallis Test (Non parametric test)

จากตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโมดูลัส (Modulus 300) ระหว่างสูตรยางคอมปาวด์ต้นแบบและสูตรทดลอง โดยใช้สถิติ Kruskal Wallis Test พบว่า ค่าโมดูลัส 300 ของสูตรยางต้นแบบแตกต่างจากสูตรยางคอมปาวด์สูตรที่ 7, 9 และ 10 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ p-value เท่ากับ 0.021 0.001 และน้อยกว่า 0.001 ตามลำดับ

สำหรับ ค่าเฉลี่ยโมดูลัส (Modulus 300) ของสูตรยางคอมปาวด์สูตรอื่นๆ แตกต่างจากสูตรต้นแบบอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ (p-value > 0.05)

3.2 ความต้านทานแรงฉีกขาด

ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างค่าความต้านทานแรงฉีกขาด ของสูตรต้นแบบและสูตรทดลอง สูตรที่ 5 ถึงสูตรที่ 10 ตามตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงฉีกขาด (Tear Strength) ระหว่างสูตรยางคอมปาวด์สูตรต้นแบบและสูตรทดลอง

สูตรต้นแบบ		สูตรทดลอง		p-value
สูตรที่	ความต้านทานแรงฉีกขาด ค่าเฉลี่ย (SD)	สูตรที่	ความต้านทานแรงฉีกขาด ค่าเฉลี่ย (SD)	
1	98.50 (5.24)	2	95.50 (3.36)	1.000
		3	87.41 (4.90)	1.000
		4	79.72 (4.38)	0.812
		5	88.63 (5.73)	1.000
		6	80.33 (5.56)	0.812
		7	66.71 (6.06)	0.003
		8	79.54 (4.48)	0.722
		9	68.24 (5.58)	0.008
		10	61.39 (3.15)	< 0.001

หมายเหตุ: ทดสอบด้วยสถิติ Kruskal Wallis Test (Non parametric test)

จากตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงฉีกขาด ระหว่างสูตรยางคอมปาวด์ต้นแบบและสูตรทดลอง โดยใช้สถิติ Kruskal Wallis test พบว่า ค่าความ

ต้านทานแรงฉีกขาดของสูตรยางต้นแบบแตกต่างจากสูตรยางคอมปาวด์สูตรที่ 7, 9 และ 10 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ p-value เท่ากับ 0.003 0.008 และน้อยกว่า 0.001 ตามลำดับ

สำหรับ ค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงฉีกขาด ของสูตรยางคอมปาวด์สูตรอื่นๆ แตกต่างจากสูตรต้นแบบอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ (p-value > 0.05)

3.3 ค่าเฉลี่ยการยืดตัว

ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างค่าการยืดตัว ของสูตรต้นแบบ และสูตรทดลอง สูตรที่ 5 ถึงสูตรที่10 ตามตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยการยืดตัว (elongation at break) ระหว่างสูตรยางคอมปาวด์สูตรต้นแบบและสูตรทดลอง

สูตรต้นแบบ		สูตรทดลอง		p-value
สูตรที่	ค่าเฉลี่ยการยืดตัว ค่าเฉลี่ย (SD)	สูตรที่	ค่าเฉลี่ยการยืดตัว ค่าเฉลี่ย (SD)	
1	468.63 (4.95)	2	473.39 (10.79)	1.000
		3	477.29 (22.42)	1.000
		4	470.23 (24.01)	1.000
		5	434.06 (13.70)	0.264
		6	437.97 (11.87)	1.000
		7	418.60 (19.75)	0.075
		8	449.69 (14.23)	1.000
		9	470.72 (11.01)	1.000
		10	454.81 (8.23)	1.000

หมายเหตุ: ทดสอบด้วยสถิติ Kruskal Wallis Test (Non parametric test)

จากตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยการยืดตัว ระหว่างสูตรยางคอมปาวด์มาตรฐานและสูตรทดลอง โดยใช้สถิติ Kruskal Wallis Test พบว่า การยืดตัว ของสูตรยางมาตรฐาน แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติกับสูตรยางคอมปาวด์ทุกสูตร (p-value > 0.05)

3.4 ความเค้น

ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างค่าความเค้น ของสูตรต้นแบบ และสูตรทดลอง สูตรที่ 5 ถึงสูตรที่ 10 ตามตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยความเค้น (Stress) ระหว่างสูตรยางคอมปาวด์สูตร มาตรฐานและสูตรทดลอง

สูตรต้นแบบ		สูตรทดลอง		p-value
สูตรที่	ค่าเฉลี่ยความเค้น ค่าเฉลี่ย (SD)	สูตรที่	ค่าเฉลี่ยความเค้น ค่าเฉลี่ย (SD)	
1	25.61(0.52)	2	25.03 (0.34)	1.000
		3	24.26 (1.42)	1.000
		4	23.50 (0.96)	1.000
		5	22.85 (0.41)	1.000
		6	20.46 (0.75)	0.164
		7	17.95 (0.95)	0.002
		8	21.02 (1.36)	0.416
		9	19.45 (0.59)	0.017
		10	15.63 (0.45)	1.000

หมายเหตุ: ทดสอบด้วยสถิติ Kruskal Wallis Test (Non parametric test)

จากตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความเค้น ระหว่างสูตร ยางคอมปาวด์มาตรฐานและสูตรทดลอง โดยใช้สถิติ Kruskal Wallis Test พบว่า สูตรที่ 7 และ 9 แตกต่างจากสูตรมาตรฐานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $p\text{-value} = 0.002$ และ 0.017 ตามลำดับ

สำหรับ ค่าเฉลี่ยความเค้น ของสูตรยางคอมปาวด์อื่นๆ แตกต่างจากสูตรมาตรฐาน อย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\text{-value} > 0.05$)

4. ผลการเปรียบเทียบสมบัติของยางคอมปาวด์ที่ใช้เถ้าลอยในสูตรกับยางคอมปาวด์ในท้องตลาด

ดำเนินการเปรียบเทียบคุณสมบัติ เฉพาะในสูตรทดลองที่มีการใช้เถ้าลอยเป็นสารตัวเติม คือสูตรทดลอง ที่ 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 (สัดส่วนการเติมเถ้าลอยตามที่ระบุ ในตารางที่ 3.2)

4.1 การเปรียบเทียบตามประเภทของยาง

ทำการเปรียบเทียบสมบัติของคอมปาวด์สูตรทดลองที่ 5 ถึงสูตรที่ 10 ซึ่งใช้เถ้าลอย และใช้ดินขาวร่วมกับเถ้าลอยเป็นสารตัวเติม กับยางรถที่ใช้ความเร็วต่ำ ที่มีการผลิตทั่วไปในตลาด ยางรถยนต์ ซึ่งมีการใช้ดินขาวเป็นสารตัวเติม ในการทดลองเปรียบเทียบนี้ เปรียบเทียบสมบัติกับสูตรยาง

ยางสำหรับล้อรถเทอร์เลอร์ชนิดเบา (T1)

ยางสำหรับล้อรถเทอร์เลอร์ชนิดหนัก (T2)

ยางรถเกษตร (T3)

4.1.1 ยางสำหรับล้อรถเทอร์เลอร์ชนิดเบา (T1)

นำผลการทดสอบสมบัติของยางคอมปาวด์สูตรที่ 5 ถึงสูตรที่ 10 เปรียบเทียบกับสมบัติมาตรฐานของยางรถเทอร์เลอร์ชนิดเบา ตามที่ระบุในตาราง ที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบสมบัติของยางที่ทดสอบกับยางคอมปาวด์สูตร T1 (สูตรยางสำหรับล้อรถเทอร์เลอร์ชนิดเบา)

สูตรที่	Tensile Strength (17 min. , MPa)	Modulus 300 (9.2-11.6 ,MPa)	elongation at break (400 min. , %)	Tear Strength (55 min. , MPa)	Hardness Shore (58-68 ,Shore A)
5	22.85	13.88	434.06	88.63	64
6	20.46	11.66	439.97	80.33	63
7	17.95	10.76	418.6	66.71	60
8	21.02	11.26	449.69	79.54	60
9	19.45	8.91	470.72	68.24	59
10	15.63	7.44	454.81	61.39	54

จากตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบสมบัติของยางคอมปาวด์ที่ทดสอบกับยางคอมปาวด์สูตร T1 ซึ่งเป็นยางคอมปาวด์ที่ใช้สำหรับรถแทรกเตอร์ชนิดเบา พบว่าสูตรยางคอมปาวด์ที่ 6, 7 และ 8 ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของยางคอมปาวด์สูตร T1 ทุกสมบัติ ส่วนสูตรที่ 5 ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ของยาง T1 ทุกรายการรายการยกเว้นค่า Modulus 300 ที่ผลจากการทดสอบมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐาน

4.1.2 ยางสำหรับล้อรถแทรกเตอร์ชนิดหนัก (T2)

นำผลการทดสอบสมบัติของยางคอมปาวด์สูตรที่ 5 ถึงสูตรที่ 10 เปรียบเทียบกับสมบัติมาตรฐานของยางรถแทรกเตอร์ชนิดหนัก ตามที่ระบุในตาราง ที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบสมบัติของยางที่ทดสอบกับยางคอมปาวด์สูตร T2
(สูตรยางสำหรับล้อรถแทรกเตอร์ชนิดหนัก)

สูตรที่	Tensile Strength (20 min. , MPa)	Modulus 300 (7.3-9.3 , MPa)	elongation at break (500 min. , %)	Tear Strength (60 min. , MPa)	Hardness Shore (53-63, Shore A)
5	22.85	13.88	434.06	88.63	64
6	20.46	11.66	439.97	80.33	63
7	17.95	10.76	418.6	66.71	60
8	21.02	11.26	449.69	79.54	60
9	19.45	8.91	470.72	68.24	59
10	15.63	7.44	454.81	61.39	54

จากตารางที่ 4.12 การเปรียบเทียบสมบัติของยางคอมปาวด์ที่ทดสอบในภาพรวมกับยางคอมปาวด์สูตร T2 ซึ่งเป็นยางคอมปาวด์ที่ใช้สำหรับรถแทรกเตอร์ชนิดหนัก พบว่าไม่มียางคอมปาวด์ที่ทดสอบสูตรใดเลยที่มีสมบัติเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานของยางคอมปาวด์สูตร T2 ทั้งหมดทุกรายการ

4.1.3 ยางสำหรับล้อรถเกษตร (T3)

นำผลการทดสอบสมบัติของยางคอมปาวด์สูตรที่ 5 ถึงสูตรที่ 10 เปรียบเทียบกับสมบัติมาตรฐานของยางล้อรถเกษตร ตามที่ระบุในตาราง ที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบสมบัติของยางที่ทดสอบกับยางคอมปาวด์สูตร T3
(สูตรยางสำหรับล้อรถเกษตร)

สูตรที่	Tensile Strength (22 min. , MPa)	Modulus 300 (11.2-13.8 , MPa)	elongation at break (450 min. , %)	Tear Strength (70 min. , MPa)	Hardness Shore A (57-67 , Shore A)
5	22.85	13.88	434.06	88.63	64
6	20.46	11.66	439.97	80.33	63
7	17.95	10.76	418.6	66.71	60
8	21.02	11.26	449.69	79.54	60
9	19.45	8.91	470.72	68.24	59
10	15.63	7.44	454.81	61.39	54

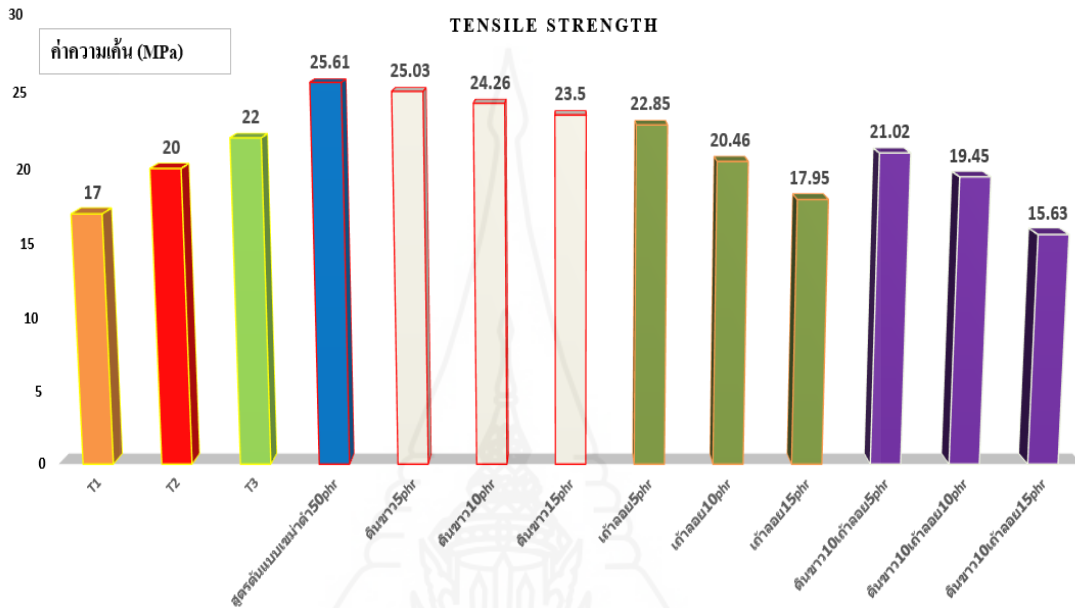
จากตารางที่ 4.13 การเปรียบเทียบสมบัติของยางคอมปาวด์ที่ทดสอบในภาพรวมกับยางคอมปาวด์สูตร T3 ซึ่งเป็นยางคอมปาวด์ที่ใช้สำหรับยางรถเกษตรพบว่าสูตรยางคอมปาวด์ที่ 5 และ 8 ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของยางคอมปาวด์สูตร T3 สี่รายการ ซึ่งพบเพียงสมบัติ Eb % ที่สูตรที่ 5 ไม่ผ่านมาตรฐาน และสมบัติ tensile strength ที่สูตรที่ 8 ไม่ผ่านมาตรฐาน ซึ่งสมบัติด้าน tensile สามารถปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้นได้โดยการใช้ส่วนผสมสารตัวเติมประเภทเถ้าลอยที่อนุภาคเล็กลง ส่วนสูตรที่ 9 และ 10 ไม่ผ่านมาตรฐานยางล้อรถเกษตรทุกรายการ ซึ่งเป็นสูตรที่ใช้ ดินขาว ร่วมกับเถ้าลอย รวมกัน 20 phr และ 25 phr ตามลำดับ

4.2 การเปรียบเทียบตามสมบัติเชิงกลของสูตรต้นแบบและสูตรทดลอง

เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของทุกสูตรทดลอง กับสูตรมาตรฐานของยางล้อรถที่ใช้ความเร็วต่ำทั้ง 3 สูตร เนื่องจากสมบัติเชิงกล เป็นสมบัติที่ส่งผลต่อความปลอดภัยของผู้ใช้งานและนิยมใช้ในการควบคุมคุณภาพของยางล้อรถ

4.2.1 ความเค้น

เมื่อนำผลการทดสอบค่าความเค้นของสูตรต้นแบบ และสูตรทดลองทุกสูตร มาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของ ยางล้อรถที่ใช้ความเร็วต่ำทั้ง 3 สูตร ตามที่แสดงในภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 เปรียบเทียบความเค้น (Stress) ของยางคอมปาวด์ที่ทดสอบกับยางคอมปาวด์ สูตร T1 T2 และ T3

จากภาพที่ 4.4 จากการทดลองพบว่าสูตรต้นแบบได้ค่าความเค้น 25.61 Mpa เมื่อเติมดินขาวทดแทนเขม่าดำปริมาณมากขึ้นและสัดส่วนของเขม่าดำลดลง พบว่าค่าความเค้นของยางคอมปาวด์ลดลง เนื่องจากดินขาวเป็นสารตัวเติมชนิดที่ไม่เสริมแรงและมีอนุภาคใหญ่กว่าเขม่าดำ ขนาดอนุภาคยังมีขนาดใหญ่ทำให้ความเค้น ลดลงเนื่องจากการเกาะกันของโครงสร้างไม่สม่ำเสมอหรือเกิดการยึดเกาะกันของสายโซ่ไม่แน่น (นรา เทื่อใหม่, 2552) ซึ่งการเติมถั่วลอมปริมาณมากขึ้นและลดสัดส่วนการใช้เขม่าดำลง ผลการทดลองก็ไปในทิศทางเดียวกันเพราะถั่วลอมมีอนุภาคขนาดใหญ่และไม่สม่ำเสมอ

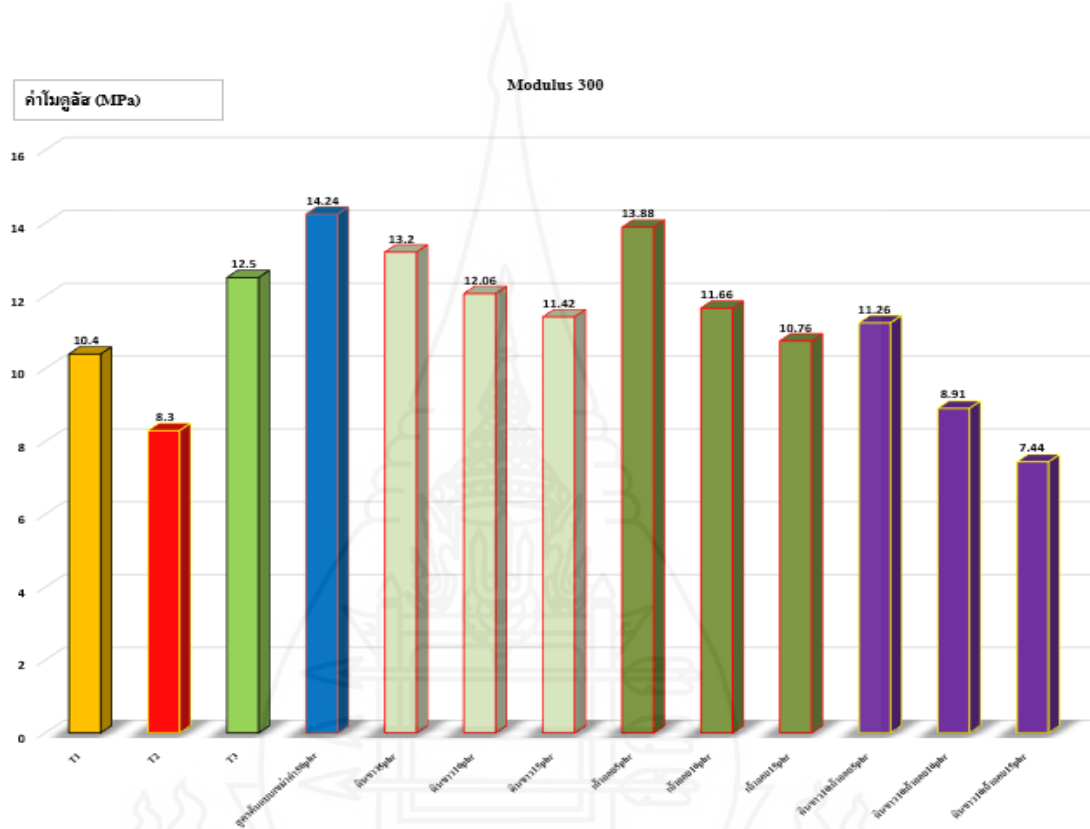
เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างดินขาวกับถั่วลอมพบว่าค่าความเค้นของยางคอมปาวด์ ที่เติมถั่วลอมมีค่าต่ำกว่าที่เติมดินขาว เพราะอนุภาคของถั่วลอมที่ทดลองใหญ่กว่าอนุภาคของดินขาว

พิจารณาเปรียบเทียบกับการนำไปใช้ในการผลิตยางรถยนต์ที่ใช้ความเร็วต่ำ ทั้งยางรถเทอร์เลอร์ชนิดเบา (T1) ยางรถเทอร์เลอร์ชนิดหนัก (T2) และยางรถที่ใช้ในการเกษตร (T3)

พบว่าความเค้นผ่านมาตรฐาน ยกเว้นสูตรที่ 10 ที่ผสมดินขาว 10 phr กับถั่วลอถย 15 phr ที่ให้ค่าความเค้นต่ำกว่ายางรถยนต์ที่ใช้ความเร็วต่ำทั้ง 3 สูตร

4.2.2 ค่าโมดูลัส

เมื่อนำผลการทดสอบค่าโมดูลัสของสูตรต้นแบบ และสูตรทดลองทุกสูตร มาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของ ยางล้อรถที่ใช้ความเร็วต่ำทั้ง 3 สูตร ตามที่แสดงในภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 เปรียบเทียบโมดูลัส (modulus 300) ของยางคอมปาวด์ที่ทดสอบกับยางคอมปาวด์สูตร T1 T2 และ T3

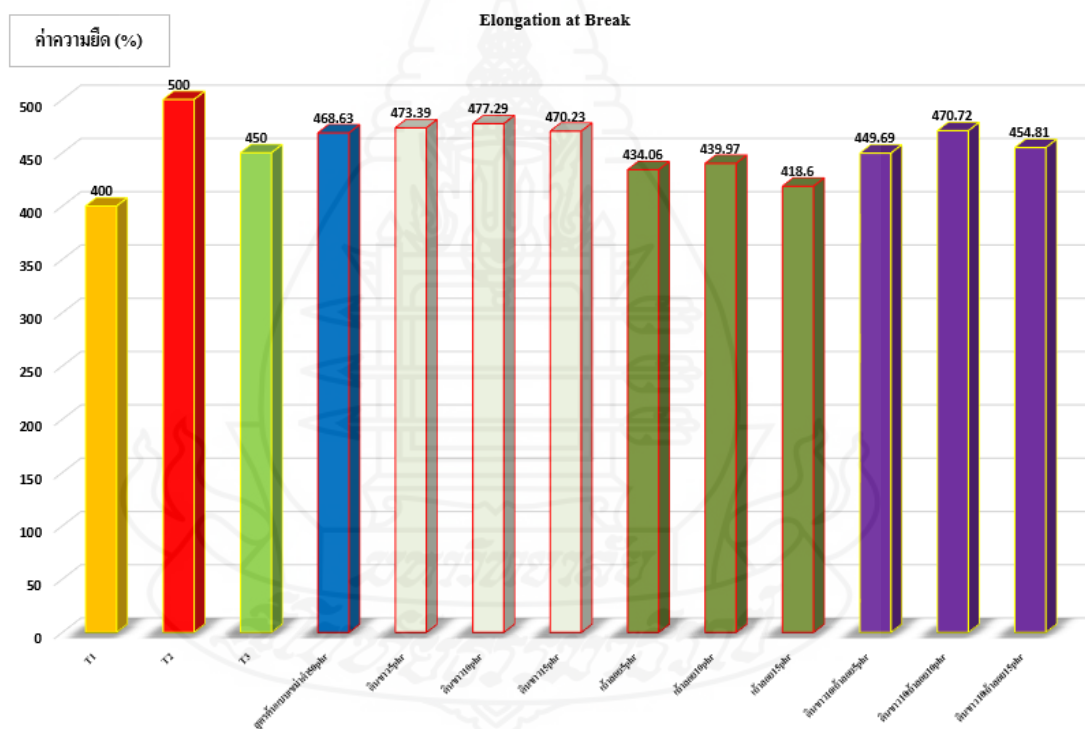
จากภาพที่ 4.5 จากการทดลองพบว่าสูตรต้นแบบได้ค่าโมดูลัส 14.24 MPa เมื่อเติมดินขาวทดแทนเขม่าดำปริมาณมากขึ้นและสัดส่วนของเขม่าดำลดลง พบว่าค่าโมดูลัสของยางคอมปาวด์ลดลง เนื่องจากดินขาวเป็นสารตัวเติมชนิดที่ไม่เสริมแรงและมีอนุภาคใหญ่กว่าเขม่าดำ ขนาดอนุภาคยังมีขนาดใหญ่ทำให้โมดูลัสลดลงเนื่องจากการเกาะกันของโครงสร้างไม่สม่ำเสมอหรือเกิดการยึดเกาะกันของสายโซ่ไม่แน่น (นรา เทื่อใหม่, 2552) ซึ่งการเติมถั่วลอถยปริมาณมากขึ้นและลดสัดส่วนการใช้เขม่าดำลง ผลการทดลองก็ไปในทิศทางเดียวกันเพราะถั่วลอถยมีอนุภาคขนาดใหญ่และไม่สม่ำเสมอ

เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างดินขาวกับเถ้าลอยพบว่าค่า โมดูลัสของยางคอมปาวด์ ที่เติมเถ้าลอยมีค่าต่ำกว่าที่เติมดินขาว เพราะอนุภาคของเถ้าลอยที่ทดลองใหญ่กว่าอนุภาคของดินขาว

พิจารณาเปรียบเทียบกับ การนำไปใช้ในการผลิตยางรถยนต์ที่ใช้ความเร็วต่ำ ทั้งยางรถมอเตอร์ไซด์ (T1) ยางรถมอเตอร์ไซด์หนัก (T2) และยางรถที่ใช้ในการเกษตร (T3) พบว่าโมดูลัสผ่านมาตรฐาน ทุกสูตรยกเว้นสูตรที่ 10 ที่ผสมดินขาว 10 phr กับเถ้าลอย 15 phr ที่ให้ค่าโมดูลัสต่ำกว่า ยางรถยนต์ที่ใช้ความเร็วต่ำทั้ง 3 สูตร

4.2.3 ความยืด

เมื่อนำผลการทดสอบค่าความยืดของสูตรต้นแบบ และสูตรทดลองทุกสูตร มาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของ ยางล้อรถที่ใช้ความเร็วต่ำทั้ง 3 สูตร ตามที่แสดงในภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 เปรียบเทียบความยืด (elongation at break) ของยางคอมปาวด์ที่ทดสอบกับยางคอมปาวด์สูตร T1 T2 และ T3

จากภาพที่ 4.6 พบว่าสูตรต้นแบบได้ค่าความยืด 468.6% เมื่อเติมดินขาวทดแทนเขม่าดำปริมาณมากขึ้นและสัดส่วนของเขม่าดำลดลง พบว่าค่าสมบัติความยืดของยางคอมปาวด์

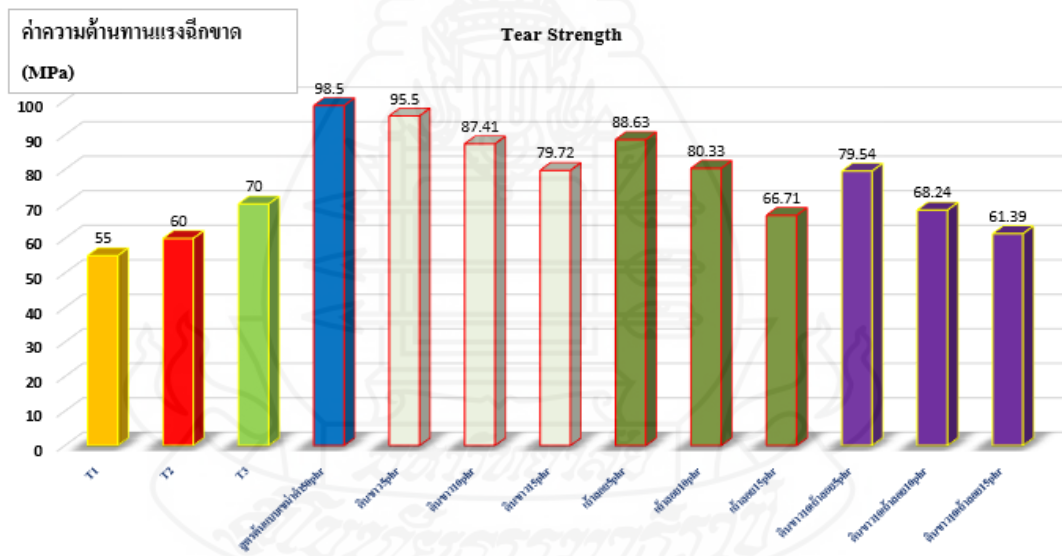
ใกล้เคียงกัน ซึ่งการเติมเถ้าลอยปริมาณมากขึ้นและลดสัดส่วนการใช้เเขม่าดำลง ผลการทดลองก็ไปในทิศทางเดียวกัน

เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างดินขาวกับเถ้าลอยพบว่าค่าสมบัติความยืดของยางคอมปาวด์ ที่เติมเถ้าลอยมีค่าต่ำกว่าที่เติมดินขาวเล็กน้อย เพราะอนุภาคของเถ้าลอยที่ทดลองใหญ่กว่าอนุภาคของดินขาว

พิจารณาเปรียบเทียบกับกรณีนำไปใช้ในการผลิตยางรถยนต์ที่ใช้ความเร็วต่ำ ทั้งยางรถแทรกเตอร์ชนิดเบา (T1) ยางรถแทรกเตอร์ชนิดหนัก (T2) และยางรถที่ใช้ในการเกษตร (T3) พบว่าสมบัติความยืดผ่านมาตรฐาน ทุกสูตร

4.2.4 ความต้านทานแรงฉีกขาด

เมื่อนำผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงฉีกขาดของสูตรต้นแบบ และสูตรทดลองทุกสูตร มาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของ ยางล้อรถที่ใช้ความเร็วต่ำทั้ง 3 สูตร ตามที่แสดงในภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 เปรียบเทียบความต้านทานต่อแรงฉีกขาด (Tear Strength) ของยางคอมปาวด์ที่ทดสอบกับยางคอมปาวด์ สูตร T1 T2 และ T3

จากภาพที่ 4.7 พบว่าสูตรต้นแบบได้ค่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาด 98.5 MPa เมื่อเติมดินขาวทดแทนเเขม่าดำปริมาณมากขึ้นและสัดส่วนของเเขม่าดำลดลง พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาด ของยางคอมปาวด์ลดลง เนื่องจากดินขาวเป็นสารตัวเติมชนิดที่ไม่เสริมแรงและมีอนุภาคใหญ่กว่าเเขม่าดำ ขนาดอนุภาคยังมีขนาดใหญ่ทำให้ความต้านทานต่อแรงฉีกขาด ลดลง

เนื่องจากการเกาะกันของโครงสร้างไม่สม่ำเสมอหรือเกิดการยึดเกาะกันของสายโซ่ไม่แน่น (นรา เทื่อใหม่, 2552) ซึ่งการเติมถั่วลอมปริมาณมากขึ้นและลดสัดส่วนการใช้ขี้เถ้าค่าง ผลการทดลองก็ไปในทิศทางเดียวกันเพราะถั่วลอมมีอนุภาคขนาดใหญ่และไม่สม่ำเสมอ

เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างดินขาวกับถั่วลอมพบว่าค่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาด ของยางคอมปาวด์ ที่เติมถั่วลอมมีค่าต่ำกว่าที่เติมดินขาว เพราะอนุภาคของถั่วลอมที่ทดลองใหญ่กว่าอนุภาคของดินขาว

พิจารณาเปรียบเทียบกับกรนำไปใช้ในการผลิตยางรถยนต์ที่ใช้ความเร็วต่ำ ทั้งยางรถมอเตอร์ไซด์เบ (T1) ยางรถมอเตอร์ไซด์หนัก (T2) และยางรถที่ใช้ในการเกษตร (T3) พบว่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาด ผ่านมาตรฐาน ทุกสูตร

5. การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตจากการใช้วัสดุทดแทน

การวิเคราะห์หาต้นทุนในการผลิตเพื่อต้องการทราบต้นทุนที่แน่นอนในการใช้วัสดุทดแทน และการหาจำนวนเงินที่สามารถลดต้นทุนการผลิต ตลอดจน ลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดถั่วลอมสรุปได้ดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ต้นทุนการผลิตยางคอมปาวด์

ลำดับ	ชื่อวัตถุดิบ	ราคา/กิโลกรัม (บาท)	สัดส่วน ที่ผสม (phr/kg)	ต้นทุน วัตถุดิบ (บาท)	ราคาอ้างอิง (ปี2561)
1	STR 20	44	100	4,400	สมาคมยางพาราไทย
2	Carbonblack	25	50	1,250	Alibaba.com
3	Zinc oxide	158	3	474	Alibaba.com
4	N-cyclohexi-2-benzothiazone	165	1.6	264	Alibaba.com
5	Sulphur	20	1.4	28	Alibaba.com
6	Stearic acid	33	2	66	Alibaba.com
7	6-PPD	66	1	66	Alibaba.com
	รวม		159	6,548	

การคำนวณสูตรลดต้นทุน กรณีลดการใช้เขม่าดำ ลง 15 phr โดยทดแทนด้วย เถ้าลอย	
กำหนดให้ยางล้อรถยนต์ 1 เส้น ใช้ยางคอมปาวด์ ประมาณ 50 กิโลกรัม	
ยางคอมปาวด์ 159 กิโลกรัม ผลิตยางรถเกستر ได้ $159/50 = 3$ เส้น	
ต้นทุนผลิตยางคอมปาวด์	$6,548/3 = 2,183$ บาท /เส้น
กรณีลดการใช้ เขม่าดำ ลง 15 phr ทดแทนด้วยเถ้าลอย	
ทำให้ใช้เขม่าดำในการผลิต 35 กิโลกรัม x 25 บาท = 875 บาท	
ต้นทุนผลิตยางคอมปาวด์	$6,173/3 = 2,058$ บาท /เส้น
ดังนั้นต้นทุนผลิตยางคอมปาวด์ลดลง	$2,183 - 2,058 = 125$ บาท/เส้น
คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ยาง ราคา	$2,183$ บาท/เส้น ลดต้นทุน 125 บาท
ถ้ายางราคา	100 ลดต้นทุนได้ $(125 \times 100) / 2,183$
ลดต้นทุนได้	5.73 %

จากข้อมูลปี 2559 สถานประกอบการมีปริมาณเถ้าลอย 12 ตันต่อปี ถ้าสามารถนำมาปรับปรุงคุณภาพ เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบ ทดแทนเขม่าดำ ได้ทั้งหมด สามารถที่จะทำให้สถานประกอบการลดต้นทุนด้านวัตถุดิบ 12,000 กิโลกรัม x 25 ได้เท่ากับ 300,000 บาทต่อปี หรือนำไปชดเชย เป็นการลดค่าใช้จ่ายในการจัดการวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว และยังลดมลภาวะจากเถ้าถ่านหินที่จะส่งผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมได้อีกด้วย



บทที่ 5

สรุปการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

1. สรุปการวิจัย

จากการศึกษาคุณสมบัติของดินขาว และเถ้าลอย พร้อมทั้งได้ทดสอบคุณสมบัติของยางคอมปาวด์ สูตรต้นแบบ และสูตรทดลอง ที่มีการเติมดินขาว และเถ้าลอย สัดส่วนต่างๆ ได้ผลสรุปเป็นข้อๆ ดังนี้

1.1 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยและดินขาว พบว่าค่าความความชื้นของเถ้าลอยมีค่าต่ำกว่าดินขาว เถ้าลอยจะดูดซับน้ำมันมากกว่าดินขาว และพบว่าขนาดอนุภาคของเถ้าลอยใหญ่กว่าอนุภาคของดินขาวทำให้กาก้างตะกอนของเถ้าลอยมีการตกค้างมากกว่าดินขาว เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยและดินขาวในรูปของสารประกอบและธาตุบริสุทธิ์ พบว่า เถ้าลอยมีองค์ประกอบของสารประกอบ SiO_2 และ Si ในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกับในดินขาว ซึ่งในอุตสาหกรรมผลิตยางรถยนต์มีการใช้ซิลิกาผสมในยางคอมปาวด์ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและสมบัติในการลดแรงเสียดทาน เมื่อผสมเถ้าลอยด้วยสัดส่วน 5, 10 และ 15 phr และคงสัดส่วนของดินขาวที่ 10 phr จะพบว่า ความหนืดมูนนี้ และความแข็ง -ของยางเปลี่ยนแปลงและมีแนวโน้มลดลงเพราะ ดินขาวและเถ้าลอยเป็นสารตัวเติมชนิดที่ไม่เสริมแรง จึงไม่เกิดแรงอันตรกิริยา (interaction force) ระหว่างยางคอมปาวด์กับดินขาว (พงษ์ธร แซ่ฮุย, 2548) ทำให้ไม่เกิดการขัดขวางการไหลของยาง ความหนืดจึงลดลงเมื่อเติมดินขาวปริมาณมากขึ้น ในส่วนของการเติมเถ้าลอยปริมาณมากขึ้นและลดสัดส่วนการใช้เขม่าดำลง ผลการทดลองพบว่า ค่าความหนืดมูนนี้และความแข็งก็เป็นไปในทิศทางเดียวกัน แต่ค่าการคงรูปของยาง เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากดินขาวมีซิลิกาไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบ ซึ่งซิลิกา มีคุณสมบัติในการดูดซับสารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ระยะเวลาความคงรูปเวลาเมื่อเริ่มคงรูปยาวนานขึ้นเมื่อเติมดินขาวปริมาณมากขึ้น ซึ่งการเติมเถ้าลอยปริมาณมากขึ้นและลดสัดส่วนการใช้เขม่าดำลง ผลการทดลองก็ไปในทิศทางเดียวกัน เพราะจากผลการวิเคราะห์พบว่าเถ้าลอยก็มี ซิลิกาไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบเช่นกัน

1.2 ผลการเปรียบเทียบความแตกต่าง การใช้ ถั่วลอ่ย และ ดินขาว เป็นสารตัวเติม ในยางคอมปาวด์ กับสูตรต้นแบบโดยใช้สถิติทดสอบ

การศึกษาครั้งนี้ ทำการทดสอบเปรียบเทียบความแตกต่างของ สมบัติของยางคอมปาวด์ที่ทดสอบกับยางคอมปาวด์ต้นแบบ โดยใช้สถิติพารามเมตริก (Kruskal Wallis Test)

ผลการศึกษาพบว่าค่าเฉลี่ยโมดูลัส 300 ระหว่างสูตรยางคอมปาวด์ต้นแบบแตกต่างจากสูตรสูตรที่ 7 (p-value = 0.021) 9 (p-value = 0.001) และ 10 (p-value <0.001) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงว่าการใช้ดินขาวคงที่ที่ 10 phr เมื่อเติมถั่วลอ่ย 10 และ 15 phr มีผลทำให้ค่าโมดูลัสลดลง ซึ่งเกิดจากอนุภาคของถั่วลอ่ยที่มีขนาดใหญ่กว่าดินขาวทำให้โมเลกุลของยางยึดเหนี่ยวกันลดลง สำหรับค่าเฉลี่ยโมดูลัสของสูตรยางคอมปาวด์สูตรอื่นๆ แตกต่างจากสูตรต้นแบบอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อวิเคราะห์ความต้านทานแรงฉีกขาด พบว่า ค่าความต้านทานแรงฉีกขาดของสูตรยางต้นแบบแตกต่างจากสูตรยางคอมปาวด์สูตรที่ 7 (p-value = 0.003) 9 (p-value = 0.008) และ 10 (p-value <0.001) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงว่าการใช้ดินขาวคงที่ที่ 10 phr เมื่อเติมถั่วลอ่ย 10 phr มีผลทำให้ค่าความเค้น เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติมถั่วลอ่ยเป็น 15 phr ค่า ความต้านทานแรงฉีกขาด จะลดลง สำหรับค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงฉีกขาด ของสูตรยางคอมปาวด์สูตรอื่นๆ แตกต่างจากสูตรต้นแบบอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ในส่วนของการยึดตัว พบว่า สูตรยางต้นแบบ แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติกับสูตรยางคอมปาวด์ทุกสูตร (p-value >0.05) และค่าความเค้น ระหว่างสูตรยางคอมปาวด์ต้นแบบและสูตรทดลอง พบว่า สูตรที่ 7 และ 9 แตกต่างจากสูตรต้นแบบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ p-value = 0.002 และ 0.017 ตามลำดับ แสดงว่าการใช้ดินขาวคงที่ที่ 10 phr เมื่อเติมถั่วลอ่ย 10 phr มีผลทำให้ค่า ความเค้น เพิ่มขึ้น สำหรับ ค่าเฉลี่ยความเค้น ของสูตรยางคอมปาวด์อื่นๆ แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติกับสูตรยางต้นแบบ (p-value >0.05)

1.3 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสมบัติของยางรถที่ใช้ความเร็วต่ำที่ใช้ เขม่าดำและดินขาวกับสัดส่วนการใช้ถั่วลอ่ย 5 ,10 และ 15 phr เทียบกับยางคอมปาวด์สูตรทั่วไปในท้องตลาด พบว่า สูตรที่ 5, 6 และ 7 ซึ่งใช้ถั่วลอ่ยแทนดินขาว ด้วยอัตราส่วน 5 , 10 และ 15 phr ตามลำดับ และสูตรที่ 8 ใช้ถั่วลอ่ย 5 phr ร่วมกับดินขาว 10 phr เป็นสูตรที่เหมาะสมสำหรับการผลิตยางคอมปาวด์สูตรสำหรับรถเทรลเลอร์ชนิดเบา T1 สำหรับการผลิตยางคอมปาวด์ สูตรสำหรับรถเกษตร T3 นั้นพบว่าการใช้ถั่วลอ่ย ในสูตรที่ 5 และ 8 คือ ใช้ถั่วลอ่ยแทนดินขาว ด้วยอัตราส่วน 5 phr และใช้ถั่วลอ่ย 5 phr ร่วมกับดินขาว 10 phr ตามลำดับ เป็นสูตรที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตยางคอมปาวด์สูตรสำหรับรถเกษตร T3 แต่ทั้งนี้จำเป็นต้องปรับปรุงคุณภาพในส่วนความยืด (Eb%) สำหรับสูตรที่ 5 และสมบัติค่าความเค้น สำหรับสูตรที่ 8 ซึ่งยังไม่ผ่านมาตรฐานของยางสำหรับรถเกษตร T3

1.4 การวิเคราะห์ต้นทุน การลดการใช้เขม่าดำ ลง 15 phr โดยทดแทนด้วย ด้วยถั่วลอม พบว่าสามารถลดต้นทุนได้ถึง 5.73 เปอร์เซ็นต์ และถ้าสถานประกอบการนำถั่วลอม 12 ตัน นำมาปรับปรุงคุณภาพ เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบ ทดแทนเขม่าดำ ได้ทั้งหมด สามารถที่จะทำให้สถานประกอบการลดต้นทุนด้านวัตถุดิบได้กว่า 300,000 บาทต่อปี

2. อภิปรายผล

จากการศึกษาสมบัติของยางเมื่อมีการผสมถั่วลอมในยางคอมปาวด์พบว่า ถั่วลอมสามารถนำมาใช้ทดแทนดินขาวได้ โดยที่สมบัติของยางคอมปาวด์ยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของยางคอมปาวด์ที่ผลิตทั่วไปในท้องตลาด ไม่ว่าจะเป็น ยางชนิด T1 ซึ่งเป็นยางที่ผลิตสำหรับรถจักรยานยนต์ชนิดเบา ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม และยางชนิด T3 ซึ่งเป็นยางที่ผลิตสำหรับล้อรถเก๋ง ทั้งนี้จะเห็นว่าจากสมบัติทางด้านกายภาพของถั่วลอมมีองค์ประกอบของซิลิกาอยู่ในปริมาณที่สูงใกล้เคียงกับที่พบในดินขาวซึ่งซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่ทำให้สมบัติเชิงกล คือความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางสูง (สถาบันพลาสติก, 2552) เมื่อใช้ถั่วลอมที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบพื้นฐานอยู่แล้วทดแทนดินขาว ยางคอมปาวด์ที่ทดสอบจึงยังคงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของยางคอมปาวด์ที่ผลิตทั่วไปในท้องตลาด แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากบนพื้นผิวของซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิล (หมู่ -OH) หรือหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากทำให้มีความเป็นขี้สูง ซิลิกาจึงแตกตัวและเข้ากับยางที่ไม่มีขี้ได้ยาก ดังนั้นเมื่อนำถั่วลอมที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบมาทดแทนเขม่าดำจึงจำเป็นต้องนำสารคู่ควบไฮดรอกซิลมาใช้ร่วมด้วยเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว (Sarkawi et al., 2012) และเมื่อพิจารณาขนาดของถั่วลอมที่นำมาใช้ในการทดสอบครั้งนี้ พบว่า มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 32.94 ไมครอน ซึ่งถั่วลอมที่นำมาใช้ในการทดสอบนี้ นำมาจากเครื่องมัลติไซโคลน เพื่อคัดจับอนุภาคตั้งแต่ 10 ไมครอนขึ้นไป และไม่ได้นำไปผ่านกระบวนการแยกขนาดอนุภาคของถั่วลอมก่อนนำมาใช้ ซึ่งวีรยา วรรณิ์และคณะ 2553 ศึกษาและพบว่า ยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาผสมด้วยถั่วลอมที่มีขนาดเล็กกว่า 25 ไมครอนให้ลักษณะการคงรูปของยางและสมบัติเชิงกลโดยรวมดีกว่าการเติมด้วยถั่วลอมขนาดอนุภาค 45-47 ไมครอน

จากผลการเปรียบเทียบความแตกต่าง การใช้ถั่วลอม และ ดินขาว เป็นสารตัวเติมในยางคอมปาวด์ กับสูตรมาตรฐาน โดยใช้สถิติทดสอบ ผลการศึกษาพบว่าค่าเฉลี่ยโมดูลัส ระหว่างสูตรยางคอมปาวด์ต้นแบบ และสูตรยางคอมปาวด์สูตรที่ 5 ไม่แตกต่างกันเนื่องจากการเติมถั่วลอมเพียงเล็กน้อยคือ 5 phr ทดแทนเขม่าดำไม่มีผลกระทบเชิงกล (การเติมถั่วลอม 2.0 และ 4.0 ส่วนต่อเนื้อยาง 100 ส่วน ซึ่งสัดส่วนนี้จะไม่ทำให้สมบัติเชิงกลเปลี่ยนไป (ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ, 2546) สำหรับสูตรอื่นๆพบว่า แตกต่างจากสูตรต้นแบบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเติมถั่วลอมมากกว่า 5 phr

ทดแทนเขม่าดำจะทำให้สมบัติเชิงกลลดลง สำหรับความต้านทานแรงฉีกขาด พบว่า สูตรยางต้นแบบกับสูตรยางคอมปาวด์สูตรที่ 2 และสูตรที่ 5 ไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้ เป็นไปตามผลการทดลองของ (ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ, 2546) ที่พบว่า (การเติมเถ้าลอย 2.0 และ 4.0 ส่วนต่อเนื้อยาง 100 ส่วน ซึ่งสัดส่วนนี้จะไม่ทำให้สมบัติเชิงกลเปลี่ยนไป ส่วนการเปรียบเทียบการยึดตัว พบว่า สูตรยาง ทุกสูตร ไม่แตกต่างกันแสดงให้เห็นว่าการทดแทนเขม่าดำด้วย ด้วยดินขาวหรือ เถ้าลอย 5 10 15 phr สมบัติการยึดยังอยู่ในมาตรฐานที่กำหนดของยางคอมปาวด์ทั้ง 3 สูตร และค่าความเค้น ระหว่างสูตรยางคอมปาวด์ต้นแบบและสูตรทดลอง พบว่ามีเพียงสูตรที่ 7 และ 9 ที่แตกต่างจากสูตรต้นแบบสำหรับสูตรยางคอมปาวด์อื่นๆ ไม่แตกต่างจากสูตรยางต้นแบบ ซึ่งทำให้เห็นว่า การใช้เถ้าลอย 15 phr และ การใช้เถ้าลอย 10 phr ผสมกับ ดินขาว 10 phr สมบัติเชิงกลด้านความเค้น ไม่อยู่ในมาตรฐานของสูตรยางคอมปาวด์ที่นำมาเปรียบเทียบ

เมื่อพิจารณาสัดส่วนที่เหมาะสมในการผสมของเถ้าลอยในยางรถที่ใช้ความเร็วต่ำ โดยเปรียบเทียบสมบัติของยางรถอุตสาหกรรมที่ใช้ เขม่าดำและดินขาว กับสัดส่วนการใช้ เถ้าลอย 5, 10 และ 15 phr พบว่า การใช้เถ้าลอยแทนดินขาว ด้วยอัตราส่วน 5, 10 และ 15 phr และใช้เถ้าลอย 5 phr ร่วมกับดินขาว 10 phr เป็นสูตรที่เหมาะสมสำหรับการผลิตยางคอมปาวด์สูตร T1 หรือยางที่ผลิตสำหรับรถเทอร์เลอร์ชนิดเบา ส่วนการผลิตยางคอมปาวด์ สูตร T3หรือยางที่ผลิตสำหรับล้อรถเกษตรนั้นพบว่า การใช้เถ้าลอยแทนดินขาว ด้วยอัตราส่วน 5 phr และใช้เถ้าลอย 5 phr ร่วมกับดินขาว 10 phr เป็นสูตรที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตยางคอมปาวด์สูตรดังกล่าวนี้ แต่ทั้งนี้จำเป็นต้องปรับปรุงสมบัติด้านความยืด สำหรับสูตรของการใช้เถ้าลอยแทนดินขาว ด้วยอัตราส่วน 5 phr และ ปรับปรุงสมบัติด้านความเค้น สำหรับสูตรที่ใช้เถ้าลอย 5 phr ร่วมกับดินขาว 10 phr ซึ่งยังไม่ผ่านมาตรฐานของยาง T3จากการศึกษาของ วิภาวี พัฒนกุล 2554 พบว่า สารตัวเติมที่มีอนุภาคเล็กจะช่วยเสริมประสิทธิภาพให้กับยาง โดยทำให้ความต้านทานต่อแรงดึง เพิ่มขึ้น 9 หรือ 10 เท่าตัว อาจเป็นไปได้ว่า สมบัติของยางคอมปาวด์จากการทดสอบ ที่มีค่าความยืด และค่าความเค้น ซึ่งเป็นสมบัติของความต้านทานต่อแรงดึง -ของยาง ยังไม่ได้มาตรฐานตามสมบัติของยาง T3 เพราะขนาดอนุภาคของเถ้าลอยที่นำมาใช้ในการทดสอบครั้งนี้ มีขนาดใหญ่ (ค่าเฉลี่ย 32.94 ไมครอน)

ในกระบวนการผลิตยางรถชนิดที่ใช้ความเร็วต่ำเช่นยางรถเทอร์เลอร์ยางรถเกษตร ในการสร้างยางและขึ้นรูปยาง ลักษณะของยางมีความหนา การยึดระยะเวลาคงรูป และเวลาเริ่มคงรูป มีผลดีต่อคุณภาพในการผลิตยางเพราะจะช่วยให้ระยะเวลาในการเก็บสต็อกของคอมปาวด์ได้นานขึ้น และช่วยลดของเสียในกระบวนการที่เกิดจากการระยะเวลาของยางสุกหรือความคงรูปของยางที่เร็วเกินไป

เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์ต้นทุนพบว่ามีความเป็นไปได้ในเชิงเศรษฐศาสตร์ที่สถานประกอบการควรมีการพิจารณานำเถ้าลอยมาปรับปรุงคุณภาพและนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด และยังมีส่วนในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากฝุ่นของเถ้าลอยได้อีกด้วย

3. ข้อเสนอแนะ

3.1 ข้อเสนอแนะจากงานวิจัย

3.1.1 เถ้าลอยประกอบด้วยสารอนินทรีย์หลายชนิด มีองค์ประกอบหลักคือซิลิกา (Silica, SiO_2) อลูมินา (Alumina, Al_2O_3) และออกไซด์ของเหล็ก (Iron oxide, Fe_2O_3) เมื่อพิจารณาเถ้าลอยกับวัสดุประเภทโพลีเมอร์นั้น พบว่า เถ้าลอยที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารคู่ควบประเภทไซเลน (silane coupling agent) สามารถทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมกึ่งเสริมแรงของวัสดุอย่างได้ เนื่องจากซิลิกา ซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งในเถ้าลอย ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารเคมีดังกล่าวแล้ว สามารถ เชื่อมโยงกับโมเลกุลของยางได้ ดังนั้นการศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการใช้เถ้าลอยเป็นสารตัวเติมเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกล ในสารประกอบพอลิเมอร์ อื่นๆ จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อการใช้ประโยชน์จากเถ้าลอยให้มากขึ้น

3.1.2 จากการทดสอบสมบัติทางกายภาพและส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยนี้ พบว่ามีสมบัติที่สามารถใช้ทดแทนสารตัวเติมเขม่าดำซึ่งเป็นสารที่นำเข้าจากต่างประเทศได้ ดังนั้นหน่วยงานภาครัฐควรส่งเสริมให้มีการนำเถ้าลอยไปใช้ในอุตสาหกรรมยางรถให้มากขึ้นเพื่อลดมลพิษจากเถ้าลอยและลดต้นทุนในการผลิตและเป็นประโยชน์ต่อผู้บริโภค

3.1.3 สถานประกอบการควรพิจารณาในการติดตั้งเครื่องคัดกรองอนุภาคเถ้าลอยที่มีประสิทธิภาพสูงที่สามารถปรับปรุงหรือคัดขนาดอนุภาคของเถ้าลอยได้ให้มีขนาดเล็กใกล้เคียงกับอนุภาคของเขม่าดำ (เล็กกว่า 25 ไมครอน) เพื่อนำเถ้าลอยกลับไปใช้เป็นสารตัวเติมในผลิตภัณฑ์ยางอุตสาหกรรมให้มากขึ้นและลดปัญหามลพิษจากอนุภาคเถ้าลอยที่ถูกปล่อยออกสู่อากาศ

3.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

3.2.1 ศึกษาสมบัติของยางคอมปาวด์ที่ผ่านกระบวนการแยกขนาดอนุภาคแล้วมาใช้เป็นสารตัวเติม โดยหาขนาดอนุภาคที่เหมาะสมของเถ้าลอย

3.2.2 ศึกษาผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของเถ้าลอย เมื่อมีสารประกอบอื่นๆ ปริมาณมาก เช่น Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เนื่องจากพบว่าผลการวิเคราะห์คุณภาพของเถ้าลอยก่อนนำไปทดสอบในการศึกษานี้ มีสารประกอบจำพวก Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ในปริมาณสูงกว่าใน ดินขาว

3.2.3 ศึกษาสมบัติของยางคอมปาวด์ที่ใช้ถ้ำลอยเป็นสารตัวเติม เช่น การทนต่อสภาวะความร้อน แสงแดด ความชื้น

3.2.4 ศึกษาโลหะที่เป็นองค์ประกอบในถ้ำลอยเพื่อใช้ประโยชน์ในการเพิ่มคุณสมบัติด้านการหน่วงไฟ (fire retardant)



บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2562). *การนำถ่านลิกไนต์ไปใช้ประโยชน์*. สืบค้นจาก maemoh.egat.com/index.php?option=com_content&view=article&id=89&Itemid=494. (วันที่สืบค้น 17 เมษายน 2562)
- การยางแห่งประเทศไทย. (2563). *การแปรรูปผลผลิตยางพารา*. สืบค้นจาก <https://km.raot.co.th/km-knowledge/detail/401>. (วันที่สืบค้น 15 มีนาคม 2563)
- _____. (2562). *ความรู้เกี่ยวกับน้ำยางและองค์ประกอบต่างๆในน้ำยาง*. สืบค้นจาก <https://km.raot.co.th/km-knowledge/detail/259>. (วันที่สืบค้น 19 เมษายน 2562)
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2560). *ผู้ประกอบการผลิตยางล้อรถยนต์ในประเทศไทย*. กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม.
- จิณณพัตร วงศ์อำมาตย์ และ อนุวัฒน์ เกษเกษร. (2557). *รายงานเรื่อง ถ่านหิน*. มหาสารคาม: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- บริษัท เอ็มดี อาร์ อินเตอร์เนชันแนล จำกัด. (2562). *ชนิดของยางและการใช้งาน*. สืบค้นจาก <https://www.mdr-thai.com/ชนิดของยางและการใช้งาน/>. (วันที่สืบค้น 17 มีนาคม 2562).
- พงษ์ธร แซ่ฮุย. (2562). *กระบวนการผลิต*. สืบค้นจาก <file:///D:/วพ%204%20%203-11-62/process.pdf>. (วันที่สืบค้น 17 กุมภาพันธ์ 2562)
- พงษ์ธร แซ่ฮุย และ ชาคริต สิริสิงห์. (2550). *ยาง: กระบวนการผลิตและการทดสอบ*. ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- พรพรรณ นิธิอุทัย. (2535). *เอกสารประกอบการอบรมเทคโนโลยียางระยะสั้น เรื่อง เทคนิคการออกสูตรยาง*. สงขลา: ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. (2553). *คู่มือวิศวกรรมยางล้อ เล่มที่ 1*. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- นรา เทื่อใหม่. (2552). *เอกสารอบรม ความรู้เกี่ยวกับเคมี สำหรับยาง*. นครปฐม: บริษัท ดีสโตน อินเตอร์เนชันแนล จำกัด.
- วารสารณ์ ขจรไชยกุล. (2554). *ผลิตภัณฑ์ยาง: กระบวนการผลิตและเทคโนโลยี*. กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.

- สถาบันพลาสติก. (2550). *โครงการพัฒนาอุตสาหกรรมยางคอมพาวด์เพื่อยกระดับมูลค่าผลิตภัณฑ์เพื่อสนับสนุนอุตสาหกรรมยานยนต์และเครื่องมือแพทย์*. ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- อภิสิทธิ์ โหมิตชัยยงค์, สันติ มิตรประเสริฐพร, เอกชัย วิมลมาลา, ชีระศักดิ์ หมากรผิน และ ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติ สมภพ. (2553). การใช้ประโยชน์จากอนุภาคถั่วลอย เพื่อทำหน้าที่เป็นสารลดต้นทุนสำหรับผลิตภัณฑ์พอลิเอทิลีนที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการแม่พิมพ์หมุนเหวี่ยงโดยปรับปรุงสภาวะการเตรียมวัสดุผสม. *วารสารวิจัยและนวัตกรรมเพื่ออุตสาหกรรมไทย*, 1(1) (มกราคม-เมษายน), 43-53.
- ศูนย์วิจัยเทคโนโลยียาง มหิดล. (2550). *ยางสังเคราะห์*. นครปฐม: คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.
- American Society for Testing and Materials. (1991). Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness, ASTM D2240-91. *Annual Book of ASTM Standard*, 388-391.
- De, D., D. De & B. Adhikari. (2004). The Effect of Grass Fiber Filler on Curing Characteristics and Mechanical Properties of Natural Rubber. *Polymers for Advanced Technologies*, 15, 708-715.
- Geethamma, V.G., K. Mathew, R. Lakshminarayanan & S. Thomas. (1997). Composite of Short Coir Fiber and Natural Rubber, Effect of Chemical modification, Loading and Orientation of fibre. *Polymer*, 39, 1483-1491.
- Hasegawa, M., Furukawa, S. & Asana, M. (2007). Utilization of the Coal Ash as Filler of Plastics and Rubber Products. *Proceedings of International Symposium on Eco Topia Science*, 842-5.
- International Organization for Standardization. (1979). Rubber, vulcanized - Determination of tear strength (trouser, angle and crescent test pieces). *ISO 34:1979(E)*, 1-5.
- _____. (1994). Rubber, vulcanized or thermoplastic-Determination of tensile stress-strain properties. *ISO 37:1994(E)*, 1-9.
- Jacob, M., S. Thomas & K. T. Varughese. (2004). Mechanical Properties of Sisal/Oil Palm Hybrid Fiber Reinforced Natural Rubber Composites. *Composites Science and Technology*, 64, 955- 965.
- Mishra, S., A. K. Mohanty, L. T. Drzal, M. Misra & G. Hinrichsen. (2004). A review on pineapple leaf fibers, sisal fibers and their biocomposites. *Macromolecular Materials and Engineering*, 289, 955-974.

Nielsen, E. L. & R. L. Landel. (1994). *Mechanical Properties of Polymers and Composites*. (2nd ed.).

New York: Marcel dekker, 557.

Reddy, N., & Y. Yang. (2005). Biofibers from agricultural byproducts for industrial applications.

Trends in Biotechnology, 23(1), 22-27.





ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

สภามหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

ภาคผนวก ก
ภาพประกอบ



ภาพประกอบ



ภาพที่ 1 การเตรียมถ้ำลอยและดินขาว



ภาพที่ 2 การเตรียมถ้ำลอยก่อนส่งไปทดสอบ



ภาพที่ 3 การเตรียมดินขาวก่อนส่งไปทดสอบ





คำขอบริการที่ ทว. 049/60 วันที่ 28 ธันวาคม 2559	ฝ่ายนวัตกรรมวัสดุ (ฝนว.) รายงานผลการทดสอบและวิเคราะห์ ให้แก่ บริษัท สวิสซ์-วันคอร์ปอเรชั่น จำกัด 4/1-2 หมู่ 7 ถนนบางเลน-เกาะเรต ตำบลบางปลา อำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม 73130	ที่ ทป. 047/60 หน้า 1 ของ 4
ชื่อ/รหัสตัวอย่าง :—	ตัวอย่างจากถ่านหิน และ China clay	
ลักษณะตัวอย่าง :—	ผง	
วิธีทดสอบ/วิเคราะห์ :—	ความชื้น, การดูดซับน้ำมัน, การล้างตะแกรง, การกระจายตัวของอนุภาค โดย Particle Size Analyzer : Malvern รุ่น Master Sizer 2000, Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM, Jeol, JSM-6340F, Japan) และ Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS, Inca, Oxford, English)	
ผลการทดสอบ/วิเคราะห์ :—	ผลการทดสอบความชื้น, การดูดซับน้ำมัน, การล้างตะแกรง, การกระจายตัวของอนุภาค รายละเอียดแสดงในตารางที่ 1 หน้าที่ 2 และผลวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมี รายละเอียดแสดงในตารางที่ 2 หน้าที่ 2	
ผู้ทดสอบ/วิเคราะห์	ผู้รับรอง	
..... (นางสาวนิภาพร ชะวงษา) (นางสาวอาจินต์ ศรีบุญเรือง) (นางปณิดา ทวีถาวร) (นางสาวศิริพร ลากเกียรติถาวร) ผู้อำนวยการฝ่ายนวัตกรรมวัสดุ	
ผู้ตรวจสอบ		
..... (นางสาวศิริพร ลากเกียรติถาวร)		
FM-MID-GEN 02-01 แก้ไขครั้งที่ 2		
ผลการทดสอบ/วิเคราะห์นี้ รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ได้ทำการทดสอบ/วิเคราะห์เท่านั้น ห้ามนำผลการทดสอบ/วิเคราะห์ไปโฆษณาโดยมิได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจาก วว.		

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

๓๕ หมู่ ๓ เทคโนโลยีธานี ต.คลองห้า อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี ๑๒๑๒๐
โทร.(๖๖) ๐ ๒๕๖๖๗ ๕๐๐๐ โทรสาร ๐ ๒๕๖๖๗ ๕๐๐๔
E-mail : tistr@tistr.or.th Website : www.tistr.or.th

วิสัยทัศน์ : วว. เป็นองค์กรชั้นนำในการบูรณาการวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรมเพื่อสร้างสังคมนวัตกรรมอย่างยั่งยืน

ภาพที่ 4 ผลทดสอบจากฝ่ายนวัตกรรมวัสดุ 1



คำขอบริการที่ ทว. 049/60
วันที่ 28 ธันวาคม 2559

ฝ้ายนวัตกรรมวัสดุ (ฝนว.)

ที่ หป. 047/60
หน้า 1 ของ 4

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบความชื้น, การดูดซับน้ำมัน, กากค้ำตะแกรง และการกระจายตัวของอนุภาค

การทดสอบ	ได้ลออกจากถ่านหิน	China clay	หมายเหตุ
ความชื้น	0.0938%	0.1661%	-
การดูดซับน้ำมัน	80.88 กรัมต่อ100กรัม	46.30 กรัมต่อ100กรัม	-
กากค้ำตะแกรง ค้าง 325	48.84	-	-
ผ่าน 325	51.16	100	-
การกระจายตัวของอนุภาค	ค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาค		
โดย Particle Size Analyzer	32.94 ไมครอน	5.11 ไมครอน	หน้า 2-3

ตาราง 2 องค์ประกอบทางเคมีของได้ลออกจากถ่านหินและ China Clay

ชื่อตัวอย่าง	องค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)						
	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
ได้ลออกจากถ่านหิน	1.73	1.61	29.7	49.6	2.74	1.60	13.1
China Clay	-	1.24	27.1	64.6	4.88	-	2.22

ชื่อตัวอย่าง	ธาตุ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)						
	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
ได้ลออกจากถ่านหิน	1.62	1.23	19.88	29.35	2.88	1.45	11.45
China Clay	-	0.91	17.45	36.71	4.92	-	1.89

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

๓๕ หมู่ ๓ เทคโนโลยีธานี ต.คลองห้า อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี ๑๒๑๒๐

โทร.(๖๖) ๐ ๒๕๖๗ ๕๐๐ โทรสาร ๐ ๒๕๖๗ ๕๐๐๕

E-mail : tistr@tistr.or.th Website : www.tistr.or.th

วิสัยทัศน์ : วว. เป็นองค์กรชั้นนำในการบูรณาการวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรมเพื่อสร้างสังคมนวัตกรรมอย่างยั่งยืน

ภาพที่ 5 ผลทดสอบจากฝ้ายนวัตกรรมวัสดุ 2

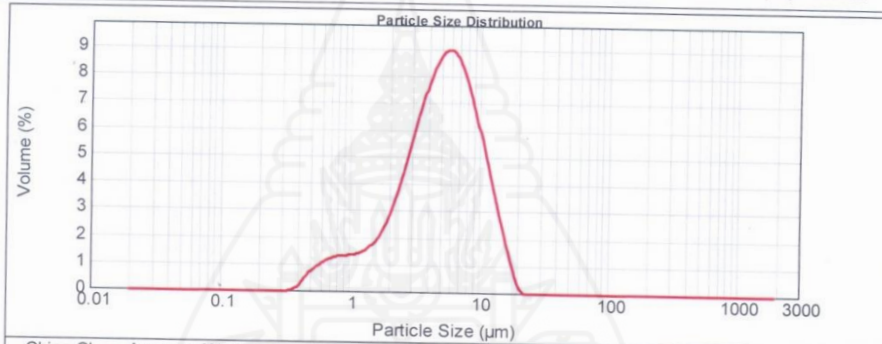


MASTERSIZER 2000

Result Analysis Report

Sample Name: China Clay - Average	SOP Name:	Measured: Wednesday, December 28, 2016 9:59:25 AM	
Sample Source & type: TISTR = panita	Measured by: TISTR	Analysed: Wednesday, December 28, 2016 9:59:27 AM	
Sample bulk lot ref: 28/12/2559	Result Source: Averaged		
Particle Name: Default	Accessory Name: Hydro 2000S (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle Rf: 1.520	Absorption: 0.1	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 15.49 %
Dispersant Name: Water	Dispersant Rf: 1.330	Weighted Residual: 2.712 %	Result Emulation: Off
Concentration: 0.0079 %Vol	Span : 1.888	Uniformity: 0.572	Result units: Volume
Specific Surface Area: 1.88 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 3.188 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 5.856 um	

d(0.1): 1.533 um d(0.5): 5.111 um d(0.9): 11.184 um



China Clay - Average, Wednesday, December 28, 2016 9:59:25 AM

Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	1.26	11.482	3.83	120.226	0.00	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	1.39	13.183	2.73	138.038	0.00	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	1.62	15.136	1.71	158.489	0.00	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	2.01	17.378	0.78	181.970	0.00	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	2.57	19.953	0.09	208.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	3.30	22.909	0.00	239.893	0.00	2511.896	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	4.17	26.303	0.00	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.894	5.13	30.200	0.00	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.01	3.311	6.10	34.674	0.00	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.036	0.00	0.363	0.11	3.802	6.10	39.811	0.00	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.40	4.365	6.97	45.709	0.00	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.68	5.012	7.66	52.481	0.00	549.541	0.00	5754.396	0.00
0.052	0.00	0.550	0.89	5.754	8.06	60.256	0.00	630.967	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	1.06	6.607	8.06	69.183	0.00	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	1.15	7.596	7.74	79.433	0.00	831.764	0.00	8709.639	0.00
0.079	0.00	0.832	1.19	8.710	7.05	91.201	0.00	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	1.21	10.000	6.10	104.713	0.00	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	1.21	11.482	4.97	120.226	0.00	1258.925	0.00		

Operator notes:

ภาพที่ 6 ผลทดสอบจากฝ่ายนวัตกรรมวัสดุ 3

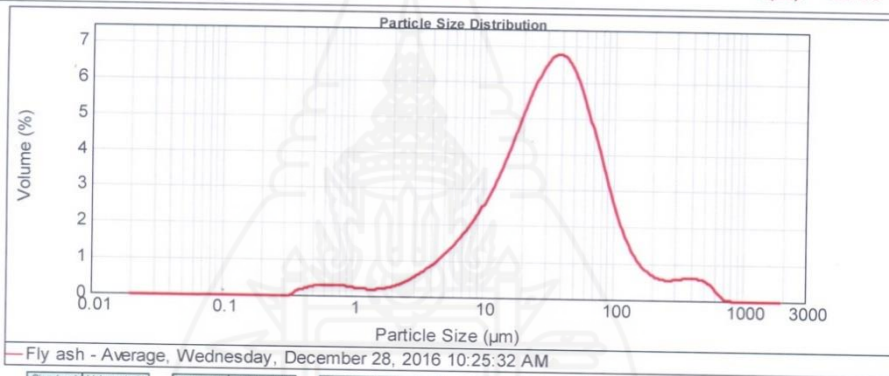


MASTERSIZER 2000

Result Analysis Report

Sample Name: Fly ash - Average	SOP Name:	Measured: Wednesday, December 28, 2016 10:25:32 AM	
Sample Source & type: TISTR = panita	Measured by: TISTR	Analysed: Wednesday, December 28, 2016 10:25:34 AM	
Sample bulk lot ref: 28/12/2559	Result Source: Averaged		
Particle Name: Default	Accessory Name: Hydro 2000S (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle RI: 1.520	Absorption: 0.1	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 18.16 %
Dispersant Name: Water	Dispersant RI: 1.330	Weighted Residual: 0.987 %	Result Emulation: Off
Concentration: 0.0381 %Vol	Span : 2.969	Uniformity: 1.16	Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.499 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 12.021 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 54.778 um	

d(0.1): 7.369 um d(0.5): 32.941 um d(0.9): 105.175 um



Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %	Size (µm)	Volume in %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.18	11.482	2.80	120.226	1.47
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.17	13.183	3.23	138.038	1.09
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.17	15.136	3.71	158.489	0.82
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.19	17.378	4.22	181.970	0.64
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.24	19.963	4.74	208.930	0.54
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.31	22.909	5.24	239.883	0.50
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.40	26.303	5.66	275.423	0.50
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.51	30.200	5.97	316.228	0.53
0.030	0.00	0.316	0.01	3.311	0.64	34.674	6.10	363.078	0.55
0.035	0.00	0.363	0.13	3.802	0.78	39.811	6.04	416.869	0.55
0.040	0.00	0.417	0.19	4.365	0.95	45.709	5.77	478.630	0.48
0.046	0.00	0.479	0.23	5.012	1.13	52.481	5.31	549.541	0.32
0.052	0.00	0.550	0.26	5.754	1.34	60.256	4.69	630.957	0.10
0.060	0.00	0.631	0.27	6.607	1.56	69.183	3.98	724.436	0.01
0.069	0.00	0.724	0.26	7.586	1.81	79.433	3.24	831.764	0.00
0.079	0.00	0.832	0.24	8.710	2.09	91.201	2.56	954.993	0.00
0.091	0.00	0.955	0.21	10.000	2.42	104.713	1.96	1096.478	0.00
0.105	0.00	1.096	0.21	11.482		120.226		1258.925	0.00

Operator notes:

ภาพที่ 7 ผลทดสอบจากฝ่ายนวัตกรรมวัสดุ 4

ภาคผนวก ข
ผลการวิเคราะห์



**SVIZZ-ONE CORPORATION
TEAR TEST REPORT
COMPOUND**

Test method	Date	Time	Unit	Speed mm/min	Width mm	H.S
Tear	2017/02/04	5:11:41 PM	N-mm/min	-500	15	65
Compound	No.	Thick. mm	Force N	Strength N/mm	Dep. mm	
3_TEST	AT01	2.27	233.6	102.91	182.38	
3_TEST	AT01	2.31	237.7	102.9	179.39	
3_TEST	AT01	2.31	231	100	180.61	
3_TEST	AT01	2.29	207.4	90.57	164.72	
3_TEST	AT01	2.28	219.1	96.1	168.25	
Arithmetic Average :			225.76	98.50	175.07	

**SVIZZ-ONE CORPORATION
TEAR TEST REPORT
COMPOUND**

Test method	Date	Time	Unit	Speed mm/min	Width mm	H.S
Tear	2017/02/04	5:15:19 PM	N-mm/min	-500	15	64
Compound	No.	Thick. mm	Force N	Strength N/mm	Dep. mm	
3_TEST	AT02	2.26	214.1	94.73	175.32	
3_TEST	AT02	2.27	222	97.8	182.38	
3_TEST	AT02	2.28	226.6	99.39	187.27	
3_TEST	AT02	2.26	204.8	90.62	175.32	
3_TEST	AT02	2.27	215.6	94.98	180.61	
Arithmetic Average :			216.62	95.50	180.18	

**SVIZZ-ONE CORPORATION
TEAR TEST REPORT
COMPOUND**

Test method	Date	Time	Unit	Speed mm/min	Width mm	H.S
Tear	2017/02/04	5:20:17 PM	N-mm/min	-500	15	60
Compound	No.	Thick. mm	Force N	Strength N/mm	Dep. mm	
3_TEST	AT03	2.1	173.4	82.57	174.91	
3_TEST	AT03	2.13	193	90.61	184.14	
3_TEST	AT03	2.16	195.8	90.65	185.91	
3_TEST	AT03	2.18	199.8	91.65	187.67	
3_TEST	AT03	2.22	181.1	81.58	175.32	
Arithmetic Average :			188.62	87.41	181.59	

**SVIZZ-ONE CORPORATION
TEAR TEST REPORT
COMPOUND**

Test method	Date	Time	Unit	Speed mm/min	Width mm	H.S
Tear	2017/02/04	5:24:12 PM	N-mm/min	-500	15	60
Compound	No.	Thick. mm	Force N	Strength N/mm	Dep. mm	
3_TEST	AT04	2.26	184.9	81.81	184.14	
3_TEST	AT04	2.26	190.8	84.42	185.91	
3_TEST	AT04	2.14	158.2	73.93	174.91	
3_TEST	AT04	2.23	170.3	76.37	175.31	
3_TEST	AT04	2.19	179.7	82.05	189.44	
Arithmetic Average :			176.78	79.72	181.94	

**SVIZZ-ONE CORPORATION
TEAR TEST REPORT
COMPOUND**

Test method	Date	Time	Unit	Speed mm/min	Width mm	H.S
Tear	2017/02/04	5:27:31 PM	N-mm/min	-500	15	64
Compound	No.	Thick. mm	Force N	Strength N/mm	Dep. mm	
3_TEST	AT05	2.27	192.1	84.63	164.73	
3_TEST	AT05	2.29	189	82.53	152.36	
3_TEST	AT05	2.3	199.4	86.7	157.66	
3_TEST	AT05	2.28	217.9	95.57	171.92	
3_TEST	AT05	2.27	212.8	93.74	171.38	
Arithmetic Average :			202.24	88.63	163.61	

**SVIZZ-ONE CORPORATION
TEAR TEST REPORT
COMPOUND**

Test method	Date	Time	Unit	Speed mm/min	Width mm	H.S
Tear	2017/02/04	5:30:36 PM	N-mm/min	-500	15	63
Compound	No.	Thick. mm	Force N	Strength N/mm	Dep. mm	
3_TEST	AT06	2.27	177.9	78.37	161.19	
3_TEST	AT06	2.28	185.6	81.4	171.78	
3_TEST	AT06	2.26	168.3	74.47	162.55	
3_TEST	AT06	2.28	203.5	89.25	180.61	
3_TEST	AT06	2.27	177.4	78.15	166.49	
Arithmetic Average :			182.54	80.33	168.52	

**SVIZZ-ONE CORPORATION
TEAR TEST REPORT
COMPOUND**

Test method	Date	Time	Unit	Speed mm/min	Width mm	H.S
Tear	2017/02/04	5:33:44 PM	N-mm/min	-500	15	60
Compound	No.	Thick. mm	Force N	Strength N/mm	Dep. mm	
3_TEST	AT07	2.09	152.5	72.97	171.78	
3_TEST	AT07	2.18	151.6	69.54	170.02	
3_TEST	AT07	2.18	135.2	62.02	153.72	
3_TEST	AT07	2.12	124.4	58.68	147.07	
3_TEST	AT07	2.05	144.2	70.34	166.48	
Arithmetic Average :			141.58	66.71	161.81	

**SVIZZ-ONE CORPORATION
TEAR TEST REPORT
COMPOUND**

Test method	Date	Time	Unit	Speed mm/min	Width mm	H.S
Tear	2017/02/04	5:36:57 PM	N-mm/min	-500	15	60
Compound	No.	Thick. mm	Force N	Strength N/mm	Dep. mm	
3_TEST	AT08	2.11	178.4	84.55	184.28	
3_TEST	AT08	2.25	179.9	79.96	177.08	
3_TEST	AT08	2.24	163.1	72.81	160.78	
3_TEST	AT08	2.17	178.6	82.3	180.21	
3_TEST	AT08	2.2	171.8	78.09	169.61	
Arithmetic Average :			174.36	79.54	174.39	

**SVIZZ-ONE CORPORATION
TEAR TEST REPORT
COMPOUND**

Test method	Date	Time	Unit	Speed mm/min	Width mm	H.S
Tear	2017/02/07	6:40:26 PM	N-mm/min	-500	15	59
Compound	No.	Thick. mm	Force N	Strength N/mm	Dep. mm	
3_TEST	AT09	2.06	135.3	65.68	182.52	
3_TEST	AT09	2.07	138.3	66.81	189.57	
3_TEST	AT09	2.07	149.2	72.08	196.5	
3_TEST	AT09	2.06	126.1	61.21	171.78	
3_TEST	AT09	2.06	155.4	75.44	201.8	
Arithmetic Average :			140.86	68.24	188.43	

SVIZZ-ONE CORPORATION TEAR TEST REPORT COMPOUND

Test method	Date	Time	Unit	Speed mm/min	Width mm	H.S
Tear	2017/02/04	5:45:44 PM	N-mm/min	-500	15	54
Compound	No.	Thick. mm	Force N	Strength N/mm	Dep. mm	
3_TEST	AT10	2.23	132.9	59.6	182.65	
3_TEST	AT10	2.21	141.3	63.94	192.43	
3_TEST	AT10	2.21	130.3	58.96	184.14	
3_TEST	AT10	2.19	128.9	58.86	182.11	
3_TEST	AT10	2.27	148.9	65.59	202.2	
Arithmetic Average :			136.46	61.39	188.71	

SVIZZ-ONE CORPORATION TENSILE TEST REPORT COMPOUND

Test method	Date	Time	Unit	Speed mm/min	Guage Length mm	Width mm	H.S					
Tension	2017/02/04	4:07:41 PM	N-mm/min	-500	33	6	65					
Compound	No.	Thick. mm	Force N	Stress N/mm ²	Elon. mm	Eb%	Point1 M100	Point2 M200	Point3 M300	Point4 E3	Point5 E6	Point6 E9
0_TEST	AT01	2.32	355.1	25.51	153.58	465.38	2.73	7.46	13.96	0.51	0.84	1.06
0_TEST	AT01	2.31	362	26.12	155.38	470.84	2.91	7.8	14.54	0.54	0.87	1.1
0_TEST	AT01	2.32	348.1	25	152.33	461.59	2.9	7.85	14.16	0.58	0.91	1.16
0_TEST	AT01	2.32	364.1	26.16	156.09	473.01	3.13	8.37	14.85	0.57	0.9	1.15
0_TEST	AT01	2.3	348.5	25.25	155.88	472.35	2.7	7.29	13.68	0.49	0.79	1.04
Arithmetic Average :			355.56	25.61	154.65	468.63	2.87	7.75	14.24	0.54	0.86	1.10

SVIZZ-ONE CORPORATION TENSILE TEST REPORT COMPOUND

Test method	Date	Time	Unit	Speed mm/min	Guage Length mm	Width mm	H.S					
Tension	2017/02/04	4:14:08 PM	N-mm/min	-500	33	6	64					
Compound	No.	Thick. mm	Force N	Stress N/mm ²	Elon. mm	Eb%	Point1 M100	Point2 M200	Point3 M300	Point4 E3	Point5 E6	Point6 E9
0_TEST	AT02	2.3	347	25.14	154.6	468.5	2.75	7.22	13.43	0.5	0.8	1.06
0_TEST	AT02	2.28	342.8	25.06	153.59	465.41	2.9	7.55	13.86	0.54	0.84	1.11
0_TEST	AT02	2.31	349	25.18	155.6	471.52	2.68	7.03	13.28	0.47	0.78	1.01
0_TEST	AT02	2.28	334.4	24.45	154.84	469.21	2.7	6.93	12.95	0.47	0.8	1.05
0_TEST	AT02	2.31	351	25.32	162.46	492.31	2.6	6.64	12.47	0.45	0.81	1.03
Arithmetic Average :			344.84	25.03	156.22	473.39	2.73	7.07	13.20	0.49	0.81	1.05

**SVIZZ-ONE CORPORATION
TENSILE TEST REPORT
COMPOUND**

Test method	Date	Time	Unit		Speed	Guage Length	Width	H.S				
Tension	2017/02/04	4:20:04 PM	N-mm/min		mm/min	mm	mm					
Compound	No.	Thick.	Force	Stress	Elon.	Eb%	Point1	Point2	Point3	Point4	Point5	Point6
		mm	N	N/mm2	mm		M100	M200	M300	E3	E6	E9
0_TEST	AT03	2.16	324.2	25.01	158.86	481.38	2.67	6.63	12.41	0.43	0.74	0.98
0_TEST	AT03	2.12	328	25.79	166.11	503.36	2.6	6.51	12.12	0.45	0.77	0.99
0_TEST	AT03	2.22	297.5	22.33	149.36	452.6	2.51	6.13	11.76	0.42	0.73	0.96
0_TEST	AT03	2.19	327.4	24.91	162.73	493.11	2.48	6.2	11.75	0.42	0.72	0.98
0_TEST	AT03	2.05	286	23.25	150.47	455.98	2.63	6.53	12.25	0.43	0.74	1
Arithmetic Average :			312.62	24.26	157.51	477.29	2.58	6.40	12.06	0.43	0.74	0.98

**SVIZZ-ONE CORPORATION
TENSILE TEST REPORT
COMPOUND**

Test method	Date	Time	Unit		Speed	Guage Length	Width	H.S				
Tension	2017/02/04	4:25:53 PM	N-mm/min		mm/min	mm	mm					
Compound	No.	Thick.	Force	Stress	Elon.	Eb%	Point1	Point2	Point3	Point4	Point5	Point6
		mm	N	N/mm2	mm		M100	M200	M300	E3	E6	E9
0_TEST	AT04	2.29	322	23.43	159.88	484.48	2.49	5.69	10.92	0.4	0.7	0.96
0_TEST	AT04	2.25	302.3	22.39	151.51	459.13	2.54	5.87	11.32	0.41	0.73	0.97
0_TEST	AT04	2.21	326.5	24.62	163.75	496.21	2.57	5.8	11.13	0.45	0.75	0.97
0_TEST	AT04	2.14	312	24.3	157.3	476.65	2.57	5.9	11.39	0.45	0.81	0.97
0_TEST	AT04	2.1	286.7	22.75	143.44	434.68	2.67	6.35	12.32	0.52	0.82	1.04
Arithmetic Average :			309.90	23.50	155.18	470.23	2.57	5.92	11.42	0.45	0.76	0.98

**SVIZZ-ONE CORPORATION
TENSILE TEST REPORT
COMPOUND**

Test method	Date	Time	Unit		Speed	Guage Length	Width	H.S				
Tension	2017/02/04	4:32:45 PM	N-mm/min		mm/min	mm	mm					
Compound	No.	Thick.	Force	Stress	Elon.	Eb%	Point1	Point2	Point3	Point4	Point5	Point6
		mm	N	N/mm2	mm		M100	M200	M300	E3	E6	E9
0_TEST	AT05	2.26	310.6	22.9	142.47	431.73	2.68	7.28	13.69	0.5	0.8	1.04
0_TEST	AT05	2.27	307	22.54	137.73	417.36	2.86	7.65	14.25	0.52	0.84	1.1
0_TEST	AT05	2.26	309.9	22.85	143.96	436.24	2.89	7.66	13.96	0.54	0.87	1.11
0_TEST	AT05	2.25	317.3	23.5	150.19	455.12	2.91	7.44	13.57	0.54	0.9	1.11
0_TEST	AT05	2.25	303	22.45	141.85	429.84	2.91	7.65	13.93	0.56	0.87	1.12
Arithmetic Average :			309.56	22.85	143.24	434.06	2.85	7.54	13.88	0.53	0.86	1.10

**SVIZZ-ONE CORPORATION
TENSILE TEST REPORT
COMPOUND**

Test method	Date	Time	Unit	Speed mm/min	Guage Length mm	Width mm	H.S					
Tension	2017/02/04	4:40:56 PM	N-mm/min	-500	33	6	63					
Compound	No.	Thick. mm	Force N	Stress N/mm ²	Elon. mm	Eb%	Point1 M100	Point2 M200	Point3 M300	Point4 E3	Point5 E6	Point6 E9
0_TEST	AT06	2.23	280.3	20.95	144.47	437.8	2.7	6.62	12.18	0.52	0.85	1.05
0_TEST	AT06	2.29	288.1	20.97	146.57	444.17	2.54	6.17	11.68	0.47	0.77	1
0_TEST	AT06	2.26	259.6	19.15	138.71	420.33	2.52	6.27	11.7	0.46	0.78	1
0_TEST	AT06	2.26	279	20.57	148.22	449.15	2.47	6.01	11.33	0.44	0.75	0.99
0_TEST	AT06	2.25	279.1	20.67	147.97	448.4	2.47	6.04	11.4	0.45	0.77	1
Arithmetic Average :			277.22	20.46	145.19	439.97	2.54	6.22	11.66	0.47	0.78	1.01

**SVIZZ-ONE CORPORATION
TENSILE TEST REPORT
COMPOUND**

Test method	Date	Time	Unit	Speed mm/min	Guage Length mm	Width mm	H.S					
Tension	2017/02/04	4:46:28 PM	N-mm/min	-500	33	6	60					
Compound	No.	Thick. mm	Force N	Stress N/mm ²	Elon. mm	Eb%	Point1 M100	Point2 M200	Point3 M300	Point4 E3	Point5 E6	Point6 E9
0_TEST	AT07	2.05	210.7	17.13	130.07	394.16	2.47	5.89	11.19	0.37	0.66	0.92
0_TEST	AT07	2.11	243.6	19.24	145.35	440.45	2.42	5.79	10.9	0.38	0.69	0.92
0_TEST	AT07	2.21	227.1	17.13	135.85	411.67	2.3	5.3	10.3	0.44	0.7	0.91
0_TEST	AT07	2.15	227.1	17.6	135.08	409.34	2.45	5.97	11.05	0.5	0.69	0.93
0_TEST	AT07	2.18	244	18.65	144.33	437.36	2.31	5.5	10.38	0.39	0.66	0.9
Arithmetic Average :			230.50	17.95	138.14	418.60	2.39	5.69	10.76	0.42	0.68	0.92

**SVIZZ-ONE CORPORATION
TENSILE TEST REPORT
COMPOUND**

Test method	Date	Time	Unit	Speed mm/min	Guage Length mm	Width mm	H.S					
Tension	2017/02/04	4:52:01 PM	N-mm/min	-500	33	6	60					
Compound	No.	Thick. mm	Force N	Stress N/mm ²	Elon. mm	Eb%	Point1 M100	Point2 M200	Point3 M300	Point4 E3	Point5 E6	Point6 E9
0_TEST	AT08	2.13	298.6	23.36	155.99	472.69	2.55	5.9	11.36	0.41	0.74	0.96
0_TEST	AT08	2.28	275.2	20.12	144.08	436.61	2.54	5.83	11.18	0.42	0.7	0.96
0_TEST	AT08	2.26	284.7	20.99	149.2	452.12	2.59	6.1	11.5	0.45	0.77	1.03
0_TEST	AT08	2.18	266.7	20.39	144.99	439.36	2.51	5.85	11.33	0.42	0.74	0.98
0_TEST	AT08	2.24	271.9	20.23	147.73	447.68	2.52	5.76	10.94	0.45	0.75	1
Arithmetic Average :			279.42	21.02	148.40	449.69	2.54	5.89	11.26	0.43	0.74	0.99

**SVIZZ-ONE CORPORATION
TENSILE TEST REPORT
COMPOUND**

Test method	Date	Time	Unit	Speed mm/min	Guage Length mm	Width mm	H.S					
Tension	2017/02/04	4:57:47 PM	N-mm/min	-500	33	6	59					
Compound	No.	Thick. mm	Force N	Stress N/mm2	Elon. mm	Eb%	Point1 M100	Point2 M200	Point3 M300	Point4 E3	Point5 E6	Point6 E9
0_TEST	AT09	2.12	247.6	19.46	152	460.62	2.22	4.76	9.13	0.43	0.68	0.92
0_TEST	AT09	2.22	267.4	20.08	159.51	483.37	2.14	4.58	8.82	0.39	0.68	0.9
0_TEST	AT09	2.15	238.7	18.5	151.15	458.02	2.16	4.63	8.91	0.37	0.66	0.86
0_TEST	AT09	2.26	268.1	19.77	157.76	478.05	2.17	4.62	8.88	0.36	0.65	0.85
0_TEST	AT09	2.24	261.3	19.44	156.26	473.52	2.16	4.65	8.83	0.41	0.67	0.91
Arithmetic Average :			256.62	19.45	155.34	470.72	2.17	4.65	8.91	0.39	0.67	0.89

**SVIZZ-ONE CORPORATION
TENSILE TEST REPORT
COMPOUND**

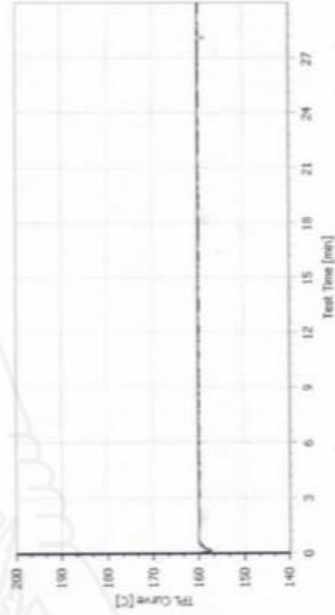
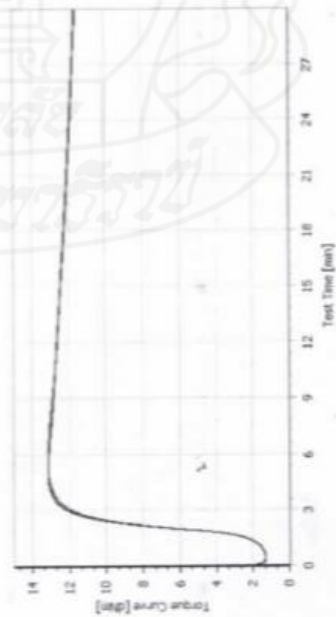
Test method	Date	Time	Unit	Speed mm/min	Guage Length mm	Width mm	H.S					
Tension	2017/02/04	5:03:41 PM	N-mm/min	-500	33	6	54					
Compound	No.	Thick. mm	Force N	Stress N/mm2	Elon. mm	Eb%	Point1 M100	Point2 M200	Point3 M300	Point4 E3	Point5 E6	Point6 E9
0_TEST	AT10	2	193.3	16.11	153.34	464.67	1.97	3.96	7.3	0.35	0.62	0.78
0_TEST	AT10	2.05	191	15.53	152.09	460.88	1.99	3.96	7.25	0.33	0.6	0.8
0_TEST	AT10	2.14	206.1	16.05	150.26	455.34	2.01	3.99	7.51	0.34	0.62	0.81
0_TEST	AT10	2.1	189.6	15.05	147.36	446.53	2	4.05	7.52	0.32	0.59	0.79
0_TEST	AT10	2.13	196.8	15.4	147.38	446.61	2.01	4.09	7.64	0.36	0.58	0.79
Arithmetic Average :			195.36	15.63	150.09	454.81	2.00	4.01	7.44	0.34	0.60	0.79



Compound: AT160

Test: Rheo

Order	Batch Test date	Status	Test Time min	Test Temp C	MH dNm	ML dNm	T90 min	TS2:dNm min	TC25 min	MH - ML dNm
AT-3	1 01/11/2017	Completed	30.00	160.00	13.13	1.30	3.05	1.70	1.82	11.83
AT-3	2 01/11/2017	Completed	30.00	160.00	13.13	1.29	2.94	1.69	1.81	11.83
Number of measurements :										
			2	2	2	2	2	2	2	2
Minimum			30.00	160.00	13.13	1.29	2.94	1.69	1.81	11.83
Maximum			30.00	160.00	13.13	1.30	3.05	1.70	1.82	11.83
Average			30.00	160.00	13.13	1.30	3.00	1.70	1.82	11.83
Standard deviation			0.000	0.000	0.000	0.007	0.078	0.007	0.007	0.000
Cp										
CpK										

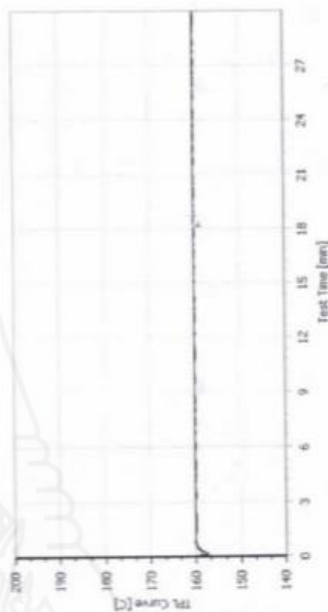
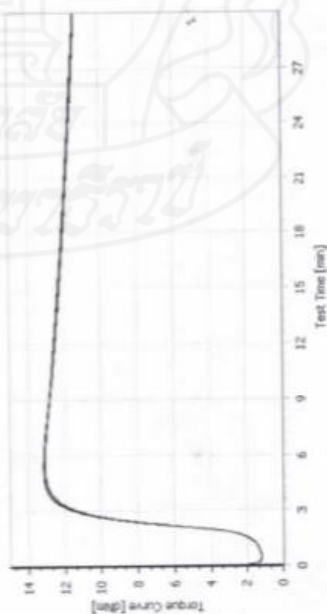


Overview Results

Compound: AT160

Test: Rheo

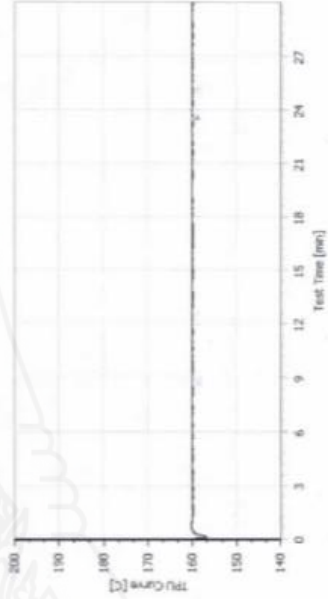
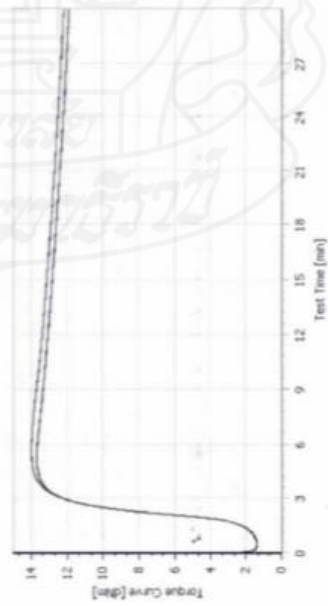
Order	Batch Test date	Status	Test Time	Test Temp	MH	ML	T90	TS2:dNm	TC25	MH - ML
			min	C	dNm	dNm	min	min	min	dNm
AT-4	1 01/11/2017	Completed	30.00	160.00	13.09	1.20	3.25	1.86	1.99	11.89
AT-4	2 01/11/2017	Completed	30.00	160.00	13.14	1.20	3.19	1.86	1.99	11.95
Number of measurements :										
Minimum			30.00	160.00	13.09	1.20	3.19	1.86	1.99	11.89
Maximum			30.00	160.00	13.14	1.20	3.25	1.86	1.99	11.95
Average			30.00	160.00	13.12	1.20	3.22	1.86	1.99	11.92
Standard deviation			0.000	0.000	0.035	0.000	0.042	0.000	0.000	0.042
Cp										
CpK										



Compound: AT160

Test: Rheo

Order	Batch	Test date	Status	Test Time	Test Temp	MH	ML	T90	TS2:dNm	TC25	MH - ML
				min	C	dNm	dNm	min	min	min	dNm
AT-6	1	01/11/2017	Completed	30.00	160.00	13.98	1.40	3.18	1.78	1.93	12.58
AT-6	2	01/12/2017	Completed	30.00	160.00	13.89	1.38	3.07	1.77	1.92	12.33
Number of measurements :											
Minimum	2										
Maximum	2										
Average	13.93										
Standard deviation	0.028										
Cp	0.000										
Cpk	0.205										

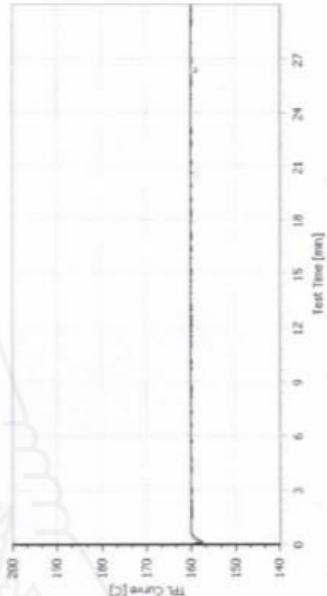
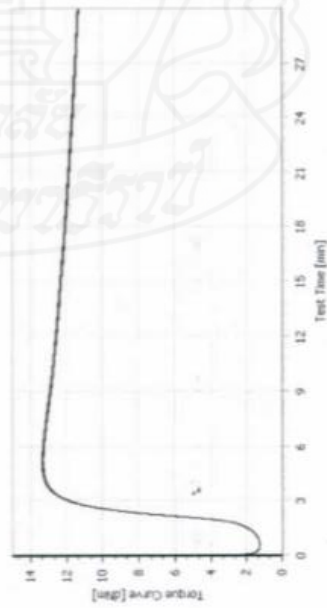


Overview Results

Compound: AT160

Test: Rheo

Order	Batch Test date	Status	Test Time	Test Temp	MH	ML	T190	T52:dNm	TC25	MH - ML
			min	C	dNm	dNm	min	min	min	dNm
AT-7	1 01/12/2017	Completed	30.00	160.00	13.36	1.24	3.09	1.86	1.99	12.12
AT-7	2 01/12/2017	Completed	30.00	160.00	13.29	1.23	3.09	1.86	1.99	12.06
Number of measurements :										
Minimum			2	2	2	2	2	2	2	2
Maximum			30.00	160.00	13.29	1.23	3.09	1.86	1.99	12.06
Average			30.00	160.00	13.36	1.24	3.09	1.86	1.99	12.12
Standard deviation			0.000	0.000	0.049	0.007	0.000	0.000	0.000	0.042
Cp										
CpK										

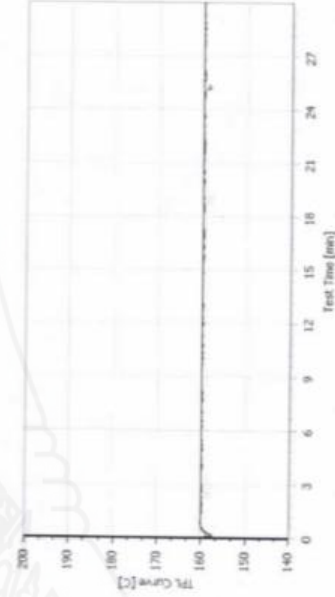
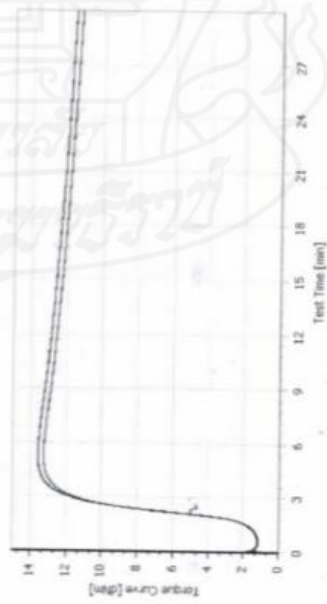


Overview Results

Compound: AT160

Test: Rheo

Order	Batch	Test date	Status	Test Time min	Test Temp C	MH dNm	ML dNm	T90 min	TS2:dNm min	TC25 min	MH - ML dNm
AT-8	1	01/12/2017	Completed	30.00	160.00	13.24	1.11	3.18	1.85	1.97	12.14
AT-8	2	01/12/2017	Completed	30.00	160.00	13.57	1.16	3.19	1.87	2.01	12.41
Number of measurements :											
Minimum	2										
Maximum	2										
Average	2										
Standard deviation	2										
Cp	0.000										
Cpk	0.035										

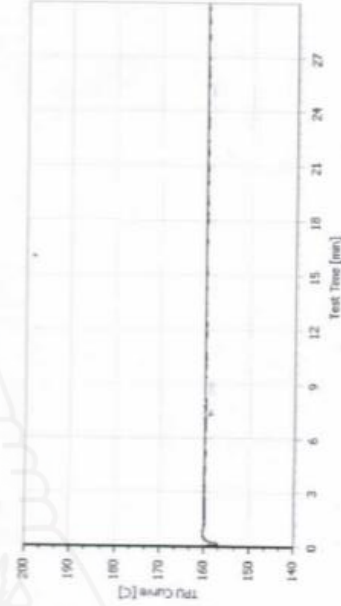
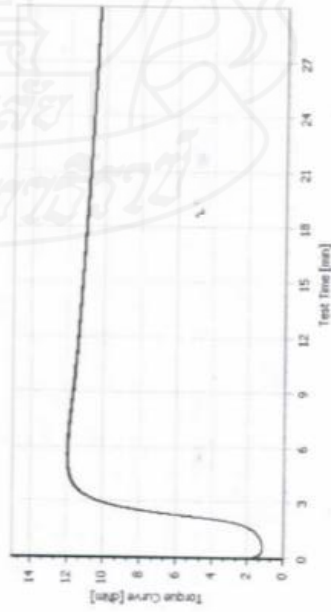


Overview Results

Compound: AT160

Test: Rheo

Order	Batch Test date	Status	Test Time min	Test Temp C	MH dNm	ML dNm	T90 min	TS2:dNm min	TC25 min	MH - ML dNm
AT-9	1 01/12/2017	Completed	30.00	160.00	12.01	1.14	3.26	1.95	2.05	10.87
AT-9	2 01/12/2017	Completed	30.00	160.00	11.93	1.13	3.27	1.95	2.05	10.80
Number of measurements :										
Minimum			2	2	2	2	2	2	2	2
Maximum			30.00	160.00	11.93	1.13	3.26	1.95	2.05	10.80
Average			30.00	160.00	12.01	1.14	3.27	1.95	2.05	10.87
Standard deviation			30.00	160.00	11.97	1.14	3.27	1.95	2.05	10.84
Cp			0.000	0.000	0.057	0.007	0.007	0.000	0.000	0.048
CpK										

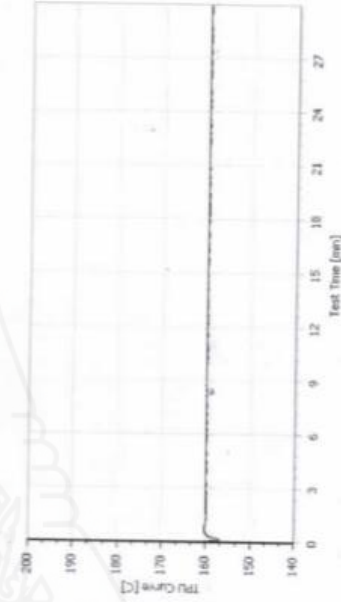
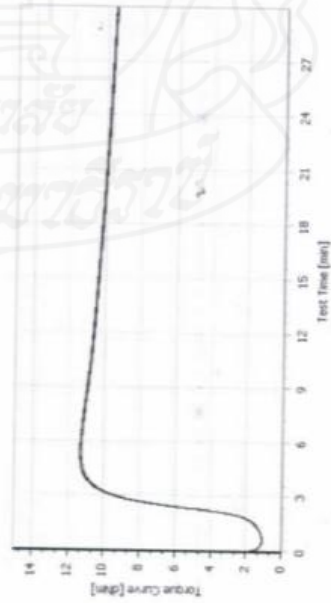


Overview Results

Compound: AT160

Test: Rheo

Order	Batch	Test date	Status	Test Time	Test Temp	MH	ML	T90	TS2:dNm	TC25	MH - ML
				min	C	dNm	dNm	min	min	min	dNm
AT-10	1	01/12/2017	Completed	30.00	160.00	11.25	1.07	3.32	2.06	2.14	10.18
AT-10	2	01/12/2017	Completed	30.00	160.00	11.33	1.07	3.30	2.05	2.13	10.27
Number of measurements :											
Minimum	2										
Maximum	2										
Average	11.29										
Standard deviation	0.057										
Cp	0.000										
CpK	0.014										
	0.007										
	0.007										
	0.064										



ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นายอัคร โยธิน อามาตย์
วัน เดือน ปีเกิด	15 พฤศจิกายน 2513
สถานที่เกิด	อำเภอปทุมรัตน์ จังหวัดร้อยเอ็ด
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีวิเคราะห์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประวัติการทำงาน	บริษัท มณีมงคล อิมพอร์ต เอ็กซ์พอร์ต จำกัด บางปะกง ฉะเชิงเทรา
ตำแหน่ง	ผู้จัดการฝ่ายบริหารคุณภาพและอาชีวอนามัย ตัวแทนฝ่ายบริหาร (QMR)

