

สมบัติเชิงกลของวัสดุผสมเถ้าลอย/ยางคอมปาวด์ที่ประยุกต์ใช้สำหรับยางรถอุตสาหกรรม

Mechanical Properties of Fly Ash/Rubber Compound Composites

Applied for Industrial Tyre

อตัโยธิน อามาศย์* สิริรัตน์ สุวนิชย์เจริญ และ พรสวรรค์ ศรีสวัสดิ์

Attayothin Armart* Sirirat Suwanidcharoen and Ponsawat Srisawat

สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

School of Health Science, Sukhothai Thammathirat Open University

*E-mail: attayothina@gmail.com

Received: Nov 05, 2018

Revised: Aug 22, 2019

Accepted: Sep 10, 2019

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของยางคอมปาวด์ที่ใช้เถ้าลอยเป็นสารตัวเติมแทนเขม่าดำสูตรต้นแบบซึ่งเป็นสูตรที่เหมาะสมในการผลิตยางคอมปาวด์ ออกแบบสูตรการทดลองโดยลดสัดส่วนการใช้เขม่าดำ จากสูตรต้นแบบลง 3 ระดับ คือ 5 10 และ 15 phr ทดแทนด้วย ดินขาว และ เถ้าลอย วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติ Kruskal Wallis Test เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างสมบัติเชิงกลของยางคอมปาวด์สูตรต้นแบบกับสูตรทดสอบ และเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของยางคอมปาวด์สูตรทดสอบกับยางรถอุตสาหกรรม ผลการศึกษาพบว่าค่าเฉลี่ยโมดูลัส และค่าความต้านทานแรงฉีกขาด ของสูตรต้นแบบแตกต่างจากสูตรทดสอบ สูตรที่ใช้เขม่าดำ 35 phr เถ้าลอย 15 phr ใช้เขม่าดำ 30 phr ดินขาว 10 phr เถ้าลอย 10 phr และใช้ เขม่าดำ 25 phr ดินขาว 10 phr เถ้าลอย 15 phr อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับสมบัติการยืดตัว พบว่า สูตรต้นแบบไม่แตกต่างกับสูตรทดสอบทุกสูตร และค่าเฉลี่ยความเค้น สูตรที่ใช้เขม่าดำ 35 phr เถ้าลอย 15 phr ใช้เขม่าดำ 30 phr ดินขาว 10 phr เถ้าลอย 10 phr แตกต่างจากสูตรต้นแบบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของยางรถอุตสาหกรรมกับสูตรทดสอบ พบว่าสูตรที่ใช้เถ้าลอยในสัดส่วน 5 10 และ 15 phr และสูตรที่ใช้เถ้าลอย 5 phr ร่วมกับดินขาว 10 phr แทนเขม่าดำ เป็นสูตรที่เหมาะสมสำหรับการผลิตยางรถเทรเลอร์ TD202

คำสำคัญ: เถ้าลอย เขม่าดำ สารตัวเติม ยางรถอุตสาหกรรม ยางคอมปาวด์

Abstract

This research aims to study the mechanical properties of rubber compound based on fly ash filler as an alternative to carbon black which was the standard formula that suitable for rubber compound fabrication. The samples were designed by reducing the proportion of carbon black; 5, 10 and 15 phr and replacing it with china clay and fly ash. Data was analyzed using Kruskal Wallis test statistics to compare the mean difference between the mechanical properties of the standard formula and testing formula and then compared the mechanical characteristics of testing formula and industrial tyres. The results indicated that the mean of modulus 300 and tear strength of the standard formula significantly differed from testing formula: using carbon black 35 phr and fly ash 15 phr, using carbon black 30 phr, china clay 10 phr and fly ash 10 phr and using carbon black 25 phr, china clay 10 phr and fly ash 15 phr. The Elongation at break showed no significantly difference among standard formula and all testing formula. The stress characteristics formula, which used carbon black 35 phr and fly ash 15 phr and carbon black 30 phr, china clay 10 phr and fly ash 10 phr, were significantly different from standard formula. While

comparing the mechanical properties of the industrial tyres and the testing formula, it was found that using fly ash ratio 5, 10 and 15 phr and using fly ash 5 phr with china clay 10 phr can be applied for trailer tyre grade TD202.

Keyword: Fly ash, Carbon Black, Filler, Industrial tyre, Rubber compound

1. บทนำ

ยางคอมปาวด์ คือยางที่มีการผสมสารเคมี เช่น สารวัลคาไนซ์ สารตัวเร่งปฏิกิริยา สารตัวเติม และอื่น ๆ ใช้ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางต่างๆ ได้แก่ยางล้อรถ ถังมือยาง ยางรองคอสพาน ท่อยาง เป็นต้น โดยทั่วไปส่วนประกอบในยางคอมปาวด์ประกอบด้วย ยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ ยางผสม สารวัลคาไนซ์ สารตัวเติม [1] ซึ่งสารตัวเติมที่ผสมในยางคอมปาวด์ทำหน้าที่เป็นทั้งชนิดเสริมแรงและไม่เสริมแรง ที่นิยมคือเขม่าดำ เป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรง ส่วนสารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรงเช่น ดินขาว ซึ่งโดยทั่วไปสารตัวเติมชนิดเขม่าดำและดินขาว ที่มีคุณภาพดีจะต้องนำเข้าจากต่างประเทศ จึงทำให้ยางคอมปาวด์ที่ผลิตมีต้นทุนที่สูง

เถ้าลอย (fly ash) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเผาถ่านหินของโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำ องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าลอย ประกอบด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ซึ่งสารซิลิกาที่เกิดจากการแตกตัวของสารประกอบในซิลิกอนไดออกไซด์ในเถ้าลอยจะมีคุณสมบัติในการเสริมแรงได้ จากการศึกษาของ Sirinthorn Thongsang (2005) พบว่าการเติมเถ้าลอยลงในยางคอมปาวด์ปริมาณ 0-90 ส่วนในร้อยส่วน มีผลทำให้สมบัติเชิงกลของยางคอมปาวด์เพิ่มขึ้น [2] และ Wipawee Pattanakul (2011) พบว่าอนุภาคเถ้าลอยที่มีอนุภาคเล็กจะช่วยเสริมประสิทธิภาพให้กับยางคอมปาวด์ได้ [3]

ในโรงงานผลิตยางอุตสาหกรรมที่ศึกษาครั้งนี้ มีการใช้ถ่านหินประเภท ซับบิทูมินัส (Sub-Bituminous) เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งเถ้าลอยที่ได้จะมีองค์ประกอบหลักทางเคมีคือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) มีออกไซด์เหล่านี้ประมาณร้อยละ 50-70 โดยน้ำหนัก [4] จากคุณสมบัติและองค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าลอย คาดว่าสามารถที่จะนำมาใช้ทดแทน เขม่าดำ และ ดินขาวได้ เพื่อลดมลพิษ และต้นทุนการจัดการเถ้าลอย และลดต้นทุนการนำเข้าวัตถุดิบในส่วนผสมยางคอม

ปาวด์สูตรที่ใช้กับยางรถอุตสาหกรรมที่ไม่ใช้ความเร็ว เช่น ยางรถเทรเลอร์ จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดใช้เถ้าลอยเป็นสารทดแทน เขม่าดำ และดินขาว โดยทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางรถอุตสาหกรรม เมื่อใช้เถ้าลอยผสมเป็นสารตัวเติม ทดแทนเขม่าดำ และ ดินขาว เปรียบเทียบกับสูตรต้นแบบซึ่งเป็นสูตรที่ใช้ในการผลิตยางคอมปาวด์ [5] ที่ใช้สำหรับยางในปัจจุบัน ในโรงงานอุตสาหกรรมแห่งหนึ่งในจังหวัดนครปฐม ระหว่างเดือนพฤศจิกายน 2559 ถึง เดือนเมษายน 2560 ผู้วิจัยได้ใช้เถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงจากหม้อต้ม เก็บเถ้าลอยจากเครื่องดักฝุ่นแบบกระแสนวน (Multicyclone) เพื่อนำมาทดลองเป็นสารตัวเติมในยางคอมปาวด์ทดแทนเขม่าดำของโรงงาน ทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลเปรียบเทียบกับยางคอมปาวด์ที่ใช้ผลิตยางรถเทรเลอร์ และยางรถเกษตร การศึกษารังนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับเป็นข้อมูลนำไปประยุกต์ใช้เพื่อการผลิตยางรถอุตสาหกรรมที่มีคุณภาพในราคาที่ถูกลงและลดปัญหาการกำจัดเถ้าลอยในอนาคตต่อไป

2. วิธีการทดลอง

1) ออกแบบสูตรการทดลอง โดยลดสัดส่วนการใช้เขม่าดำจากสูตรต้นแบบ ลง 3 ระดับ คือ 5 10 และ 15 phr ทดแทนด้วย เถ้าลอย [6] รายละเอียดองค์ประกอบของสูตรต้นแบบดังแสดงใน Table 1

2) เตรียมคอมปาวด์ โดย ใส่ยางธรรมชาติ (Rubber STR 20) สารตัวเติม ได้แก่ เขม่าดำ ดินขาว เถ้าลอย ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide) และ เอ็น-ไซโคลเฮกซ์-ทุ-เบนโซโรอาโซน (CBTS) ลงในเครื่องผสมระบบปิดโดยเติม เขม่าดำ ดินขาว และ เถ้าลอย ตามอัตราส่วนผสมใน Table 2 โดยเติมสารตัวเติม และ สารป้องกันการเสื่อมสภาพรวมด้วย ทำการผสมที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปทำให้เย็นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เติมกรดสเตียริก (Stearic Acid) ซิงค์ออกไซด์ เอ็น-ไซโคลเฮกซ์-ทุ-เบนโซโรอาโซน และ กำมะถัน ลงในเครื่องผสมที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ทิ้งไว้ให้เย็น นำไปนวดอัดรีดที่เครื่องรีด (Model DXS160) ประมาณ 5 นาที โดยขึ้นงานทดสอบแสดง ดัง Figure 1

Table 1 Standard prototype formula

No.	Material Compound	Composition Ratio
		phr (Part per Hundred Rubber)
1	STR 20	100
2	Carbon black	50
3	Zinc oxide	3
4	N-cyclohexi-2-benzothiazone	1.6
5	Sulphur	1.4
6	Stearic acid	2
7	6-PPD	1

Note: Reference the original formula from the study of Xianjie Ren 2016 [5]

Table 2 Proportion of filler for rubber compound testing

Formula ID	Carbon Black (phr)	Filler Proportion	
		China Clay (phr)	Fly Ash (phr)
1 (Standard formula)	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



Figure 1 Test specimens

ทดสอบสมบัติทางกายภาพ (Physical Property)

- ทำการทดสอบความชื้นของเถ้าลอย โดยการนำเถ้าลอยมาอบที่อุณหภูมิ ประมาณ 105 -110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วเปรียบเทียบกับน้ำหนักก่อนและหลังอบ

- ทำการทดสอบการดูดซับน้ำมัน โดยใช้ น้ำมันลินสีด (Linseed Oil) หยดลงบนเถ้าลอยจนไม่เกิดการดูดซับ หลังจากนั้นเปรียบเทียบกับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น กับน้ำหนักของเถ้าลอยก่อนการดูดซับ

- ทำการทดสอบกากค้ำตะแกรง โดยทำการร่อนแบบเปียก บนตะแกรงเบอร์ 325 ที่มีขนาดช่องเปิด 45 ไมโครเมตร เพื่อหาน้ำหนักของเถ้าลอยที่ค้ำบนตะแกรง

- หาค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคเถ้าลอย โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ขนาด (Particle Analyzer)

- หาค่าคุณลักษณะความคงตัว เพื่อทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ หรือคุณสมบัติการคงรูปของยางด้วยเครื่อง EKTRON TEK EKT 2000 โดยใช้ตัวอย่าง 5 มิลลิกรัม ทดสอบ

ที่ 160 องศาเซลเซียส 30 นาที โดยเวลาในการเซตตัวหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง Heat Flow กับเวลา $T_{90}/0.9 = \text{Cure Time}$

- หาค่าความหนืดมูนี เพื่อทดสอบความสามารถในการไหลหรือความหนืด โดยนำตัวอย่างยางที่ผ่านการรีดให้เป็นแผ่นเรียบรื้อแล้ว มาประมาณ 27 ± 3 กรัม ทำเป็นแผ่นให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 47 มิลลิเมตร ทดสอบด้วยเครื่อง Mooney Viscometer Mooney (Model EKTRON TEK EKT 2001M (U.S.A.))

ทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

- ทำการทดสอบความต้านทานแรงดึง ตามมาตรฐาน ISO 37- 1994(E) [7] ด้วยเครื่อง Tensometer Model EKTRON TEK TS 2000 โดยใช้ความเร็วในการดึงขึ้นทดสอบ 500 มิลลิเมตรต่อนาที เพื่อทดสอบหาค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 300% ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) และระยะยืดก่อนขาด (Elongation at Break) แล้วหาค่าเฉลี่ยโดยใช้ชิ้นงานทดสอบ 5 ชิ้น

- ทำการทดสอบความต้านทานแรงฉีกขาด (Tear Strength) ตามมาตรฐาน ISO 34 (Angle test piece) [8] ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ด้วยอัตราเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที

- ทำการทดสอบความแข็ง โดยใช้เครื่อง Shore Durometer Model 716 ตามมาตรฐาน ASTM D2240 [9]

Table 3 Physical properties of Fly ash and China clay

Testing	Fly ash	China clay
Moisture content (%)	0.0938	0.1661
Oil Absorption (g./100g.)	80.88	46.30
Residue stuck in grate (%)		
- Stuck at 325 mesh	48.84	0
- Pass at 325 mesh	51.16	100
The average size of the particle (µm)	32.94	5.11

ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของยางคอมปาวด์จากการทดลอง

เมื่อทดแทนเขม่าดำด้วยเถ้าลอย สัดส่วน 5 10 และ 15 phr (สูตรที่ 5 6 และ 7) และทดแทนเขม่าดำด้วยเถ้าลอย สัดส่วน 5 10 และ 15 phr คงสัดส่วนของดินขาวที่ 10 phr (สูตรที่ 8 9 และ 10 ตามลำดับ) จะพบว่าสมบัติ ด้านความหนืด

ภายใต้ระยะเวลากด (Indentation Time) 15 วินาที ทำการทดลอง 5 ครั้งเพื่อขจัดความผิดพลาดจากผลการทดลอง (Contamination Error) ซึ่งโดยทั่วไป ทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง [10] และหาค่าเฉลี่ย

การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติ Kruskal Wallis Test (Non-parametric) ในการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างสมบัติเชิงกลของยางคอมปาวด์สูตรต้นแบบและยางคอมปาวด์สูตรต่างๆ ที่ใช้เถ้าลอยเป็นสารตัวเติมที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของยางคอมปาวด์ที่ทดสอบ กับยางคอมปาวด์สำหรับผลิตภัณฑ์ยางอุตสาหกรรมที่มีอยู่โดยทั่วไปในท้องตลาด

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยและดินขาวแสดงดัง Table 3 พบว่าค่าความความชื้นของเถ้าลอยมีค่าต่ำกว่าดินขาวซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีของสารตัวเติมเพราะเถ้าลอยมีความชื้นสูงจะรบกวนการการเซตตัวของยางเถ้าลอยจะดูดซับน้ำมันมากกว่าดินขาวความสามารถในการดูดซับน้ำมันที่สูงกว่าทำให้การผสมเข้ากันได้ดีของยางและสารตัวเติม และพบว่าขนาดอนุภาคของเถ้าลอย มีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคของดินขาวทำให้กากค้างตะกอนของเถ้าลอยมีการตกค้างมากกว่าซึ่งขนาดของอนุภาคยิ่งเล็กลงจะมีผลต่อความแข็งแรงของยางเพิ่มขึ้นเมื่อนำยางคอมปาวด์ไปขึ้นรูป[11]

มูนีของยางเปลี่ยนแปลงและมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากลักษณะของอนุภาคของเถ้าลอยไม่สม่ำเสมอและอนุภาคใหญ่กว่าเขม่าดำซึ่งมีผลต่อโครงสร้างและแรงยึดเกาะของโพลิเมอร์ของยางคอมปาวด์ และการทดแทนเขม่าดำด้วยดินขาวความหนืดลดลงเนื่องจากดินขาวเป็นสารตัวเติมที่ปลดคุณสมบัติด้านความแข็งแรงและความหนืดเพราะไม่มีคุณสมบัติด้านเสริมแรง

[11] ดังแสดงใน Figure 2 ส่วนความคงรูปของยาง (Cure Characteristics) จะพบว่าสูตรที่ 5-10 เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากกำมะถันในเถ้าลอยมีปริมาณน้อยกว่าในเขม่าดำซึ่งในกระบวนการผลิตยางคอมปาวด์มีการเติมกำมะถันเพื่อควบคุมเวลาการเกิดคงรูปของยาง ดังแสดง

ใน Figure 3 และสำหรับความแข็ง (Shore A Hardness) เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยและมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากอนุภาคของเถ้าลอยไม่สม่ำเสมอและมีขนาดใหญ่กว่าเขม่าดำเมื่อเกิดโพลีเมอร์จะเกิดได้สมบูรณ์น้อย[11] ดังแสดงใน Figure 4

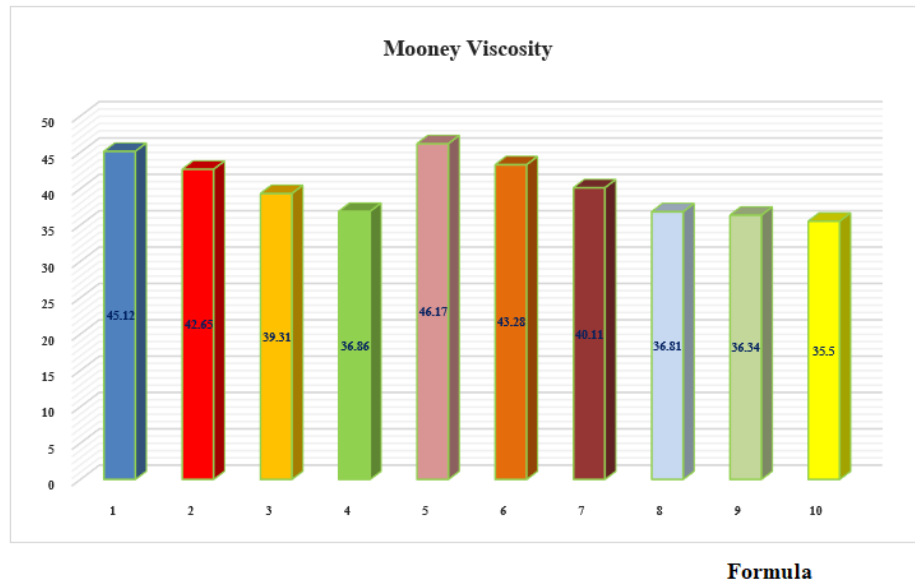


Figure 2 Mooney viscosity of rubber compound for Mooney Viscosity testing

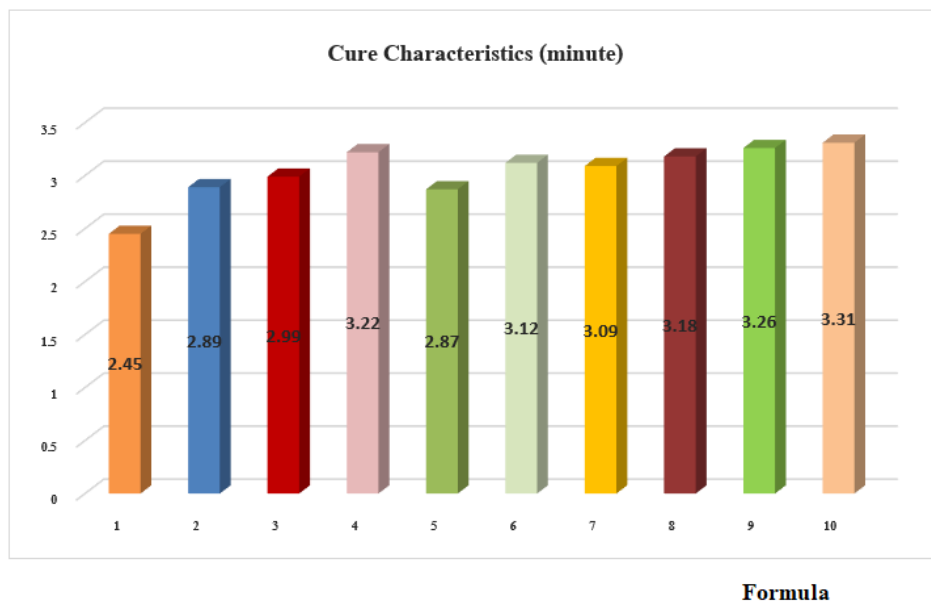


Figure 3 Cure characteristics of rubber compound for Cure Characteristics testing

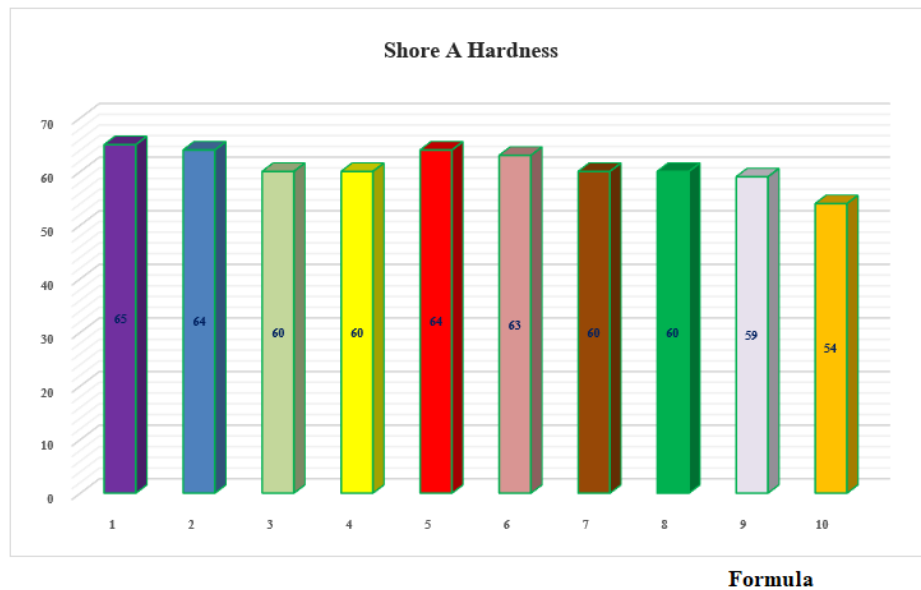


Figure 4 Hardness of rubber compound for Shore A Hardness testing

การเปรียบเทียบสมบัติทางกลของการใช้เถ้าลอยเป็นสารตัวเติม ในยางคอมปาวด์กับสูตรต้นแบบ

ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยสมบัติเชิงกลของการใช้เถ้าลอยเป็นสารตัวเติม ในยางคอมปาวด์กับสูตรต้นแบบโดยใช้สถิติ Kruskal Wallis Test แสดงดัง Table 4 พบว่า มีสูตรการทดสอบอย่างน้อย 1 คู่ที่แตกต่างกัน (p -value < 0.05) และเมื่อพิจารณาเทียบกับสูตรต้นแบบรายคู่พบว่าค่าเฉลี่ยโมดูลัส 300 ของสูตรต้นแบบแตกต่างจากสูตรยางคอมปาวด์สูตรที่ 7 9 และ 10 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ p -value เท่ากับ 0.021 0.001 และ < 0.001 ตามลำดับ การทดแทนเขม่าดำด้วยเถ้าลอย 10 15 phr มีผลทำให้ค่าโมดูลัส 300 ลดลง เนื่องจากเถ้าลอยมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบน้อยกว่า และอนุภาคไม่สม่ำเสมอ[3]

ค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงฉีกขาดของสูตรต้นแบบแตกต่างจากสูตรยางคอมปาวด์สูตรที่ 7 9 และ 10 อย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติ p -value เท่ากับ 0.003 0.008 และ < 0.001 ตามลำดับการทดแทนเขม่าดำด้วยเถ้าลอย 10 15 phr มีผลทำให้ค่าต้านทานแรงฉีกขาดลดลง เนื่องจากเถ้าลอยมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบน้อยกว่า และอนุภาคไม่สม่ำเสมอ[3]

ค่าเฉลี่ยการยืดตัว ของสูตรต้นแบบ แตกต่างกับสูตรยางคอมปาวด์ทุกสูตรอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ (p -value > 0.05)

ค่าเฉลี่ยความเค้น (Stress) สูตรที่ 7 และ 9 แตกต่างจากสูตรต้นแบบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ p -value = 0.002 และ 0.017 ตามลำดับ ค่าความเค้นลดลงเมื่อทดแทนเขม่าดำด้วยเถ้าลอย 10 15 phr เพราะองค์ประกอบทางเคมีเช่นซิลิกาที่ต่ำกว่า และขนาดอนุภาคของเถ้าลอยที่ไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดโพลีเมอร์ที่ไม่เป็นระเบียบมีผลทำให้แรงยึดเกาะระหว่างโมเลกุลลดลง[11]

Table 4 The statistical value of mechanical characteristics between fly ash and china clay in filler compound by Kruskal Wallis Test

Mechanical Characteristics	Standard formula		Testing formula		p-value
	Formula ID	Mean (SD)	Formula ID	Mean (SD)	
Modulus 300	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
Tear Strength	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
Elongation at Break	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
Stress	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

**การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของยางคอมปาวด์ที่ทดสอบ
กับยางคอมปาวด์สำหรับผลิตยางรถอุตสาหกรรมที่ไม่ใช้
ความเร็วสูตรต่างๆ ในท้องตลาด**

การศึกษานี้ผู้วิจัยนำเสนอผลการเปรียบเทียบ
สมบัติเชิงกลของยางคอมปาวด์เพียงสูตรที่ 5-10 เนื่องจากเป็น
สูตรที่ใช้ถ้อยเป็นสารตัวเติม จะพบว่าสมบัติเชิงกลของยาง
คอมปาวด์ที่ทดสอบในภาพรวมกับยางคอมปาวด์สูตร TD202

ซึ่งเป็นยางคอมปาวด์ที่ใช้สำหรับรถแทรกเตอร์ พบว่าสูตรยางคอม
ปาวด์ที่ 6 7 และ 8 ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของยางคอมปาวด์
สูตร TD202 ทุกคุณสมบัติ ซึ่งมีการใช้ถ้อยและดินขาว
ทดแทนเขม่าดำรวมกัน ไม่เกิน 15 phr ส่วนสูตรที่ 5 ผ่าน
เกณฑ์มาตรฐาน ของยาง TD202 สี่รายการยกเว้นค่าโมดูลัส
300 ที่ผลจากการทดสอบมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งหมายถึง
อัตราการยืดของยางคอมปาวด์ที่ทดสอบสูตรที่ 5 นี้มีอัตราการ
ยืดดีกว่ายางคอมปาวด์สูตร TD202 แสดงดัง Table 5 และ
Figure 5 6

Table 5 The comparison of mechanical properties between testing rubber and TD 202 rubber compounds

Testing formula	Mechanical Characteristics/Standard Comparison									
	Tensile Strength (MPa)		Modulus 300 (MPa)		Elongation at Break (%)		Tear Strength (MPa)		Hardness Shore	
	≥17		9.2-11.6		≥400		≥55		58-68	
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	✓

Note: The mechanical properties of rubber compound formula TD 202 is based on the standard specification of the
manufacturer ○ means the tested value was higher than the standard value.

✓ means the tested value was meets the standard value

×

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของยางคอมปาวด์ที่
ทดสอบในภาพรวมกับยางคอมปาวด์สูตร TD333 ซึ่งเป็นยาง
คอมปาวด์ที่ใช้สำหรับรถแทรกเตอร์ พบว่าไม่มียางคอมปาวด์ที่

ทดสอบสูตรใดเลยที่มีสมบัติเชิงกล เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน
ของยางคอมปาวด์สูตร TD333 ทุกรายการ แสดงดัง Table 6
และ Figure 5 6 7

Table 6 The comparison of Mechanical properties between testing rubber and TD333 rubber compounds

Testing formula	Mechanical Characteristics/Standard Comparison									
	Tensile Strength (MPa)		Modulus 300 (MPa)		Elongation at Break (%)		Tear Strength (MPa)		Hardness Shore	
	≥20		7.3-9.3		≥500		≥60		53-63	
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	✓

Note: The mechanical properties of rubber compound formula TD 333 is based on the standard specification of the manufacturer

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของยางคอมปาวด์ที่ทดสอบในภาพรวมกับยางคอมปาวด์สูตร T234 ซึ่งเป็นยางคอมปาวด์ที่ใช้สำหรับยางรถเกศตร พบว่าสูตรยางคอมปาวด์สูตรที่ 5 และ 8 ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของยางคอมปาวด์สูตร T234 สำรายการ ซึ่งมีการใช้เส้นล้อยและดินขาว ทดแทนเขม่า

ดำรวมกัน ไม่เกิน 15 phr แสดงดัง Table 7 และ Figure 5, 6 และ 7 ซึ่งพบเพียงสมบัติความยืด สูตรที่ 5 ต่ำกว่ามาตรฐาน และสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงสูตรที่ 8 ต่ำกว่ามาตรฐาน โดยจะเห็นว่าคุณสมบัติที่ไม่ผ่านสามารถปรับปรุงคุณภาพโดยใช้เส้นล้อยที่มีขนาดอนุภาคเล็กลงและขนาดสม่ำเสมอ[12]

Table 7 The comparison of Mechanical properties between testing rubber and T234 rubber compounds

Testing formula	Mechanical Characteristics/Standard Comparison									
	Tensile Strength (MPa)		Modulus 300 (MPa)		Elongation at Break (%)		Tear Strength (MPa)		Hardness Shore	
	≥22		11.2-13.8		≥450		≥70		57-67	
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	×

Note: The mechanical properties of rubber compound formula T234 is based on the standard specification T234 of the manufacturer

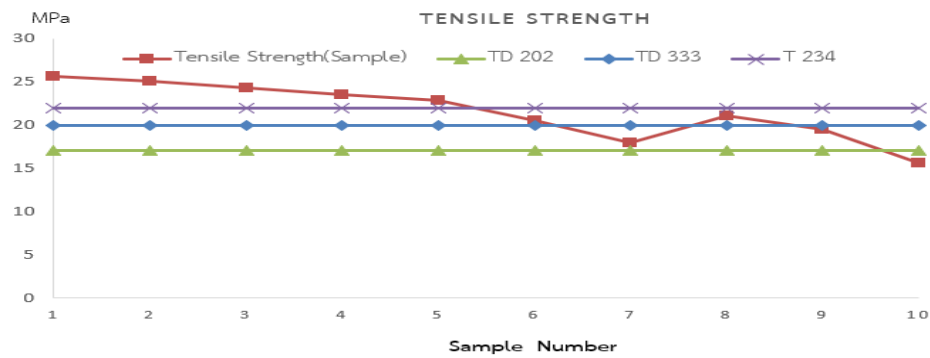


Figure 5 The Comparison of Tensile Strength between testing rubber and formula TD202 TD333 and T234

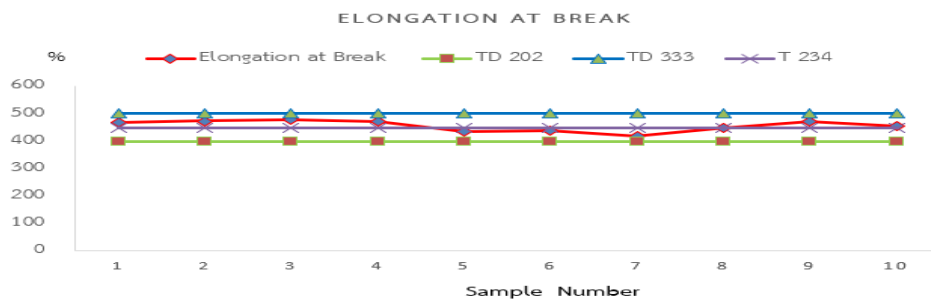


Figure 6 The Comparison of Elongation at Break between testing rubber and formula TD202 TD333 and T234

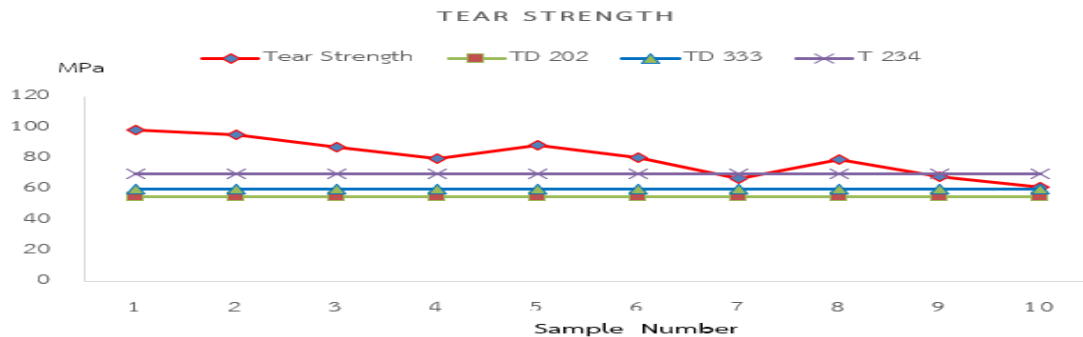


Figure 7 The Comparison of Tear Strength between testing rubber and formula TD202 TD333 and T234

4. สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

จากการทดสอบสมบัติทางกายภาพของยางคอมปาวด์เมื่อทดแทนเขม่าดำด้วยเถ้าลอยด้วยสัดส่วน 5 10 และ 15 phr ความหนืดของยางเปลี่ยนแปลงและมีแนวโน้มลดลง สำหรับความคงรูปของยาง เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และความแข็ง เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยและมีแนวโน้มลดลง สำหรับการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลเมื่อผสมเถ้าลอยในยางคอมปาวด์พบว่า เถ้าลอยสามารถนำมาใช้

ทดแทนสารตัวเติมในการผลิตยางคอมปาวด์ได้ โดยที่คุณสมบัติของยางคอมปาวด์ยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของยางคอมปาวด์ที่ผลิตทั่วไปในท้องตลาด โดยเฉพาะ ยางชนิด TD 202 ซึ่งเป็นยางที่ผลิตสำหรับรถแทรกเตอร์ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากเถ้าลอยมีองค์ประกอบของซิลิกาอยู่ในปริมาณที่สูงใกล้เคียงกับที่พบในเขม่าดำซึ่ง ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่ทำให้สมบัติเชิงกล ด้านความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางสูง[1] เมื่อใช้เถ้าลอยที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบพื้นฐานอยู่แล้วทดแทนเขม่าดำ ยางคอมปาวด์ที่ทดสอบจึงอยู่ในเกณฑ์

มาตรฐานของยางคอมปาวด์ที่ผลิตทั่วไปในท้องตลาด แต่เนื่องจากบนพื้นผิวของซิลิกาที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (หมู่ -OH) หรือหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ในปริมาณมากทำให้มีความเป็นขี้ผึ้ง ซิลิกาจึงแตกตัวและเข้ากับยางที่ไม่มีขี้ผึ้งได้ยาก ดังนั้นเมื่อนำเถ้าลอยที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบมาทดแทนเขม่าดำจะต้องนำสารคู่ควบไซเลนมาใช้ร่วมด้วย [13] เมื่อพิจารณาขนาดของเถ้าลอยที่นำมาใช้ในการทดสอบมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 32.94 ไมครอน ซึ่งถือว่ามีความใหญ่ เถ้าลอยที่ใช้ในการทดสอบนี้ ได้จากเครื่องดักจับฝุ่นขนาดเล็กแบบกระแสนวน (Multi Cyclone) อนุภาคตั้งแต่ 10 ไมครอนขึ้นไป และไม่ผ่านกระบวนการแยกขนาดอนุภาคของเถ้าลอยก่อนนำมาใช้ ซึ่ง Weeraya Vorakan (2010) [12] พบว่า ยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาผสมด้วยเถ้าลอยที่มีขนาดเล็กกว่า 25 ไมครอนจะให้ลักษณะการคงรูปของยางและสมบัติเชิงกลโดยรวมดีกว่าการเติมด้วยเถ้าลอยขนาดอนุภาค 45-47 ไมครอน

ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยเชิงกล การใช้เถ้าลอย เป็นสารตัวเติมในยางคอมปาวด์กับสูตรต้นแบบโดยใช้สถิติ Kruskal Wallis ทดสอบ สำหรับค่าเฉลี่ยโมดูลัส และค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงฉีกขาด พบว่าสูตรต้นแบบและสูตรยางคอมปาวด์สูตรที่ 7 9 และ 10 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p -value < 0.05) สำหรับสูตรอื่น ๆ พบว่า ไม่แตกต่างจากสูตรต้นแบบ ทั้งนี้ เนื่องมาจากมีการลดสัดส่วนการเติมเขม่าดำซึ่งมีผลทำให้ค่าโมดูลัส และความต้านทานแรงฉีกขาดลดลง เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากของเขม่าดำจะช่วยในการเกาะตัวของยางได้แน่นเมื่อเกิดการคงรูป แต่เมื่อทดแทนด้วยเถ้าลอยที่มีขนาดใหญ่กว่าจึงทำให้การเกาะตัวของอนุภาคของยางไม่สม่ำเสมอ ทำให้ความแข็งแรงลดลง [11] ส่วนการยึดตัว พบว่า สูตรที่ทำการทดสอบ ไม่แตกต่างกับสูตรยางต้นแบบทุกสูตร แสดงให้เห็นว่าการทดแทนเขม่าดำด้วยเถ้าลอยที่ 5 10 และ 15 phr สมบัติการยึดยังอยู่ในมาตรฐานที่กำหนดของยางคอมปาวด์ทั้งหมด และค่าความเค้น ระหว่างสูตรต้นแบบและสูตรทดสอบ พบว่ามีเพียงสูตรที่ 7 และ 9 ที่แตกต่างจากสูตรต้นแบบ สำหรับสูตรยางคอมปาวด์อื่น ๆ ไม่แตกต่างจากสูตรต้นแบบ ซึ่งทำให้เห็นว่า การใช้เถ้าลอย 15 phr และการใช้เถ้าลอย 10 phr ผสมกับ ดินขาว 10 phr ยังคงสมบัติเชิงกลด้านความเค้นให้อยู่ในมาตรฐานของสูตรยางคอมปาวด์สูตรต้นแบบ

เมื่อพิจารณาสัดส่วนที่เหมาะสมในการเติมเถ้าลอยในยางคอมปาวด์ โดยเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของยางรถอุตสาหกรรมที่ไม่ใช้ความเร็ว พบว่า การใช้เถ้าลอย ด้วย

อัตราส่วน 5 10 และ 15 phr และใช้เถ้าลอย 5 phr ร่วมกับดินขาว 10 phr แทนเขม่าดำ เป็นสูตรที่เหมาะสมสำหรับการผลิตยางคอมปาวด์สูตร TD202 หรือยางที่ผลิตสำหรับรถแทรคเตอร์ ส่วนการผลิตยางคอมปาวด์ สูตร T234 หรือยางที่ผลิตสำหรับล้อรถเก๋งนั้นพบว่า การใช้เถ้าลอย ด้วยอัตราส่วน 5 phr และใช้เถ้าลอย 5 phr ร่วมกับดินขาว 10 phr แทนเขม่าดำ เป็นสูตรที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตยางคอมปาวด์สูตรดังกล่าวนี้ แต่ทั้งนี้จะต้องปรับปรุงคุณสมบัติด้านความยืดหยุ่นสำหรับสูตรของการใช้เถ้าลอยแทนเขม่าดำ ด้วยอัตราส่วน 5 phr และ ปรับปรุงคุณสมบัติด้านความเค้น สำหรับสูตรที่ใช้เถ้าลอย 5 phr ร่วมกับดินขาว 10 phr ซึ่งยังไม่ผ่านมาตรฐานของยาง T234 จากการศึกษาของ Wipawee Pattanakul (2011) [3] พบว่า สารตัวเติมที่มีอนุภาคเล็กจะช่วยเสริมประสิทธิภาพให้กับยาง โดยทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น 9 หรือ 10 เท่าตัว ซึ่งเป็นไปได้ว่า คุณสมบัติของยางคอมปาวด์จากการทดสอบ ที่มีค่าความยืด และค่าความเค้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติของความต้านทานต่อแรงดึง ของยาง ยังไม่ได้มาตรฐานตามคุณสมบัติของยาง T234 เพราะขนาดอนุภาคของเถ้าลอยที่นำมาใช้ในการทดสอบครั้งนี้มีขนาดใหญ่ (ค่าเฉลี่ย 32.94 ไมครอน)

ข้อเสนอแนะ

1. เถ้าลอยประกอบด้วยสารอนินทรีย์หลายชนิด มีองค์ประกอบหลักคือซิลิกา (Silica, SiO_2) อลูมินา (Alumina, Al_2O_3) และออกไซด์ของเหล็ก (Iron oxide, Fe_2O_3) เถ้าลอยกับวัสดุประเภทโพลิเมอร์นั้น พบว่า เถ้าลอยที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารคู่ควบประเภท ไซเลน (Silane coupling agent) สามารถทำหน้าที่เป็นสาร ตัวเติมที่เสริมแรงของวัสดุยางได้เนื่องจาก “ซิลิกา” ซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งในเถ้าลอยที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารเคมีดังกล่าวแล้ว สามารถเชื่อมโยงกับโมเลกุลของยางได้ ดังนั้นการศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการใช้เถ้าลอยเป็นสารตัวเติมเพื่อเพิ่มคุณสมบัติเชิงกล ในสารประกอบพอลิเมอร์ อื่น ๆ จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อประโยชน์ของเถ้าลอยให้มากขึ้น

2. จากการทดสอบสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของเถ้าลอยนี้พบว่ามีความสมบัติที่สามารถใช้ทดแทนสารตัวเติมเขม่าดำซึ่งเป็นสารที่นำเข้าจากต่างประเทศได้ ดังนั้นหน่วยงานภาครัฐควรส่งเสริมให้มีการนำเถ้าลอยไปใช้ในอุตสาหกรรมยางรถให้มากขึ้นเพื่อลดมลพิษจากฝุ่นเถ้าลอยและลดต้นทุนในการผลิตและเป็นประโยชน์ต่อผู้บริโภค

3.สถานประกอบการควรพิจารณาในการติดตั้งเครื่องดักอนุภาคเถ้าลอยที่มีประสิทธิภาพสูงที่สามารถปรับปรุงหรือคัดขนาดอนุภาคของเถ้าลอยได้ให้มีขนาดเล็กลงใกล้เคียงกับอนุภาคของเขม่าดำ(เล็กกว่า 25 ไมครอน) [11] เพื่อการนำเถ้าลอยกลับไปใช้เป็นสารตัวเติมในผลิตภัณฑ์ยางอุตสาหกรรมให้มากขึ้นและลดปัญหามลพิษจากฝุ่นอนุภาคเถ้าลอยที่ถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณบริษัทสวิชวันคอร์ปอเรชั่น จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ เถ้าลอย เครื่องมืออุปกรณ์ ในการทดสอบคุณสมบัติของยางคอมปาวด์ในการทำวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบพระคุณคณาจารย์จากมหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช ที่สนับสนุนและให้คำแนะนำการทำวิจัยในครั้งนี้จนสำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Plastics Institute of Thailand. **Training program for the development of rubber compound industry to raise the value of the product and support the automotive industry and medical equipment.** International College; Mahidol University (Salaya): Nakhon Pathom; 2014. (in Thai)
- [2] Sirinthorn Thongsang. **Production and properties of natural rubber products with fly ash as filler.** King Mongkut's University of Technology Thonburi: Bangkok; 2005. (in Thai)
- [3] Wipawee Pattanakul. **Natural and synthetic rubber.** <http://rubberthai.com/yang/administrator/jour/98.pdf>. Accessed 23 May 2018. (in Thai)
- [4] Electricity Generating Authority of Thailand. **Using Lignite fly ash.** <http://maemoh.egat.com/index.php/89-sarat/89-sarat1>. Accessed 23 May 2018. (in Thai)
- [5] Xianjie Ren. **Used of Fly Ash as Eco-Friendly in synthetic rubber for tire application.** Thesis: master of Science. Faculty of University of Akron, Akron, USA.; 2016.
- [6] Narongrit Sombatsompop and Sirinthorn Thongsang. **Production condition and natural rubber properties which containing fly ash as filler.** King Mongkut's University of Technology Thonburi: Bangkok; 2005. (in Thai)
- [7] British Standards Institution. BS 903-A2:1995, ISO 37:1994. Physical testing of rubber. Method for determination of tensile stress- strain properties, BSI,1995; 20 Pages.
- [8] International Organization for Standardization. ISO 34- 1: 2015 Preview Rubber, vulcanized or thermoplastic— Determination of tear strength—Part 1: Trouser, angle and crescent test pieces, ISO, Fourth edition. 2015;15 Pages.
- [9] ASTM International. ASTM D2240- 15e1, Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness, **ASTM International**, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org.
- [10] Sebastian Vencken University College Dubli. **How can we incorporate uncertainty in repeat experiments?** <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3321166/>. Accessed 14 March 2019.
- [11] Nara Tueamai. **Training materials on the chemistry of rubber blends,** Deestone International Co., Ltd.: Nakhon Pathom; 2009; 50. (in Thai)
- [12] Weeraya Vorakan, Narongrit Sombatsompop, Ekachai Wimolmala and Sirinthorn Thongsang. Reinforcement of Natural Rubber with Fly Ash Silica/Precipitated Silica Hybrid Filler: **Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University** 2010;12(4): 9-20. (in Thai)
- [13] Sarkawi, S.S., Dierkes, W.K. & Noordermeer, J.W.M. The Effect of Protein Content in Natural Rubber on Performance of Silica Filled Compounds as Influenced by Processing Temperature. In: **International Rubber Conference**, 21-24 May 2012. Jeju, Korea.