

**สมบัติการบิดเชิงพลวัตของยางธรรมชาติ
ผสมดินขาว และยางเอสปีอาร์ผสมดินขาว
Torsion Dynamic Properties
of NR/Clay - SBR/Clay**

สมบัติ พุทธจักร¹ ธรนิต นาวารัตน์² อามัน เจ๊ะแว³

Sombat Puttajukr¹ Thoranit Navarat² and Arman Jeckwear³

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน : โทรศัพท์ 073-312201 และ E-mail : psombat@bunga.pn.psu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติการบิดเชิงพลวัตของยางที่ผสมดินขาว ซึ่งมีความซับซ้อนมากกว่าสมบัติของยางเพียงอย่างเดียว เนื่องจากอนุภาคของดินขาวดังกล่าวที่ผสมในปริมาณต่าง ๆ นั้นเป็นโครงสร้างที่ทำให้สายโซ่ของยางส่วนหนึ่งมาเกาะเกี่ยวโครงสร้าง สามารถแตกตัวเปลี่ยนแปลงได้ เมื่อมีความเค้นมากกระทำ ชนิดของดินขาวและชนิดของยางที่ต่างกันทำให้มีอันตรกิริยาที่แตกต่างกัน ดังนั้นค่า G' , G'' และ $\tan \delta$ จึงสัมพันธ์กับชนิดของดินขาวและชนิดของยางทำให้เกิดการทำการเชื่อมโยงที่แตกต่างกันในเนื้อยาง การทดลอง dynamic mechanical testing แบบ torsion มีผลการทดลองของดินขาวชนิด bentonites ผสมกับยางเอสปีอาร์ 1502 และผสมกับยางธรรมชาติ (STR 5L) พบว่ากราฟ ของ $\tan \delta$ เพิ่มขึ้นกับปริมาณดินขาวโดยกราฟ ไม่เป็นเส้นตรง และกราฟของ $\tan \delta$ ของดินขาวผสมกับยาง SBR 1502 มีค่ามากกว่ากราฟ $\tan \delta$ ของดินขาวผสมกับยางธรรมชาติ (STR 5L)

คำสำคัญ : สมบัติเชิงพลวัต ดินขาว

¹รองศาสตราจารย์ แผนกวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (ปัตตานี)

²อาจารย์ แผนกวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (ปัตตานี)

³นักศึกษา แผนกวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (ปัตตานี)

¹Assoc. Prof., Division of Physics, Faculty of Science and Technology, Prince of Songkhla University (Pattani).

²Lecturer, Division of Physics, Faculty of Science and Technology, Prince of Songkhla University (Pattani).

³Student, Division of Physics, Faculty of Science and Technology, Prince of Songkhla University (Pattani).

Abstract

This research was to study Torsion dynamic properties of rubber filled with clay. It was far more complicated than that of rubber alone. Due to clay particle used in different amount. It caused the clay structure to link with the some part of rubber chain molecule. The structure could be changed under stress. The type of clay and rubber gave different interaction, therefore the value of G' , G'' and $\tan \delta$ depended on the type of clay and rubber. Also the cross linking reaction in rubber. As a result from dynamic mechanical properties testing with torsion mode of NR(STR 5L)/Bentonites and SBR 1502/bentonites. The graph of $\tan \delta$ filled rubber with the amount of Bentonites as a non linear graph. The graph $\tan \delta$ of SBR/Bentonites was higher than that of NR/Bentonites.

Keywords : Dynamic properties, Clay

บทนำ

การศึกษาสมบัติเชิงฟิสิกส์ของยางธรรมชาติ (NR) ผสมดินขาว และยางสังเคราะห์ ยางเอสบีอาร์ (SBR) ผสมดินขาว โดยการทดสอบสมบัติพลวัตการบิด โดยการวัด มอดูลัสสะสม (storage modulus, G') มอดูลัสสูญเสีย (loss modulus, G'') แฟกเตอร์ ของการสูญเสีย ($\tan \delta$) และ logarithmic decrement (Δ) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงปริมาณเหล่านี้สัมพันธ์กันโดยตรงกับอันตรกิริยาเชิงฟิสิกส์ (physical interaction) ของยางและดินขาวซึ่งจะเกี่ยวข้องกับสมบัติด้านอื่น ๆ ของยางผสมดังกล่าว เช่น สมบัติการนำความร้อน และสมบัติการสะท้อนเสียง ซึ่งเป็นแนวทางกำหนดการนำไปใช้ในด้านต่าง ๆ ยางดิบ เช่น ยางแผ่นหรือยางแท่งจะมีขีดจำกัดในการใช้งานเนื่องจากสมบัติเชิงกลต่ำและมีลักษณะทางกายภาพที่ไม่เสถียร โดยสมบัติต่าง ๆ ของยางแผ่นนั้นจะแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างมาก (สมบัติ พุทธจักร, 2547, หน้า 67) (Puttajukr, Tassin, 2544, p.822) กล่าวคือ ยางจะอ่อนตัวและเหนียวและไหลเยิ้มเมื่อร้อน แต่จะแข็งเปราะที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g ด้วยเหตุนี้ การใช้ประโยชน์จากยางจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารต่าง ๆ เช่น สารตัวเติม และสารเคมีต่าง ๆ เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ และสารตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น หลังจากการผสมเคมีกับยาง ซึ่งยางผสมที่ได้นี้เรียกกันโดยทั่วไปว่ายางคอมพาวด์ (compound rubber) จะถูกนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความดันและความร้อน กระบวนการนี้เรียกว่า กระบวนการคงรูปของยางหรือในทางเทคนิคจะเรียกว่ากระบวนการวัลคาไนเซชัน (vulcanization) ยางที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวแล้วจะเรียกว่า ยางสุก หรือยางคงรูป (vulcanizate) ซึ่งสมบัติของยางมีการคงรูปที่เสถียร ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนักและมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น จากความเป็นมาและความสำคัญดังกล่าว จึงได้มีการศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติมดินขาว ชนิด Bentonites (สรุสิทธิ์ ประสารปราวณ, 2548, หน้า 36) ที่มีผลต่อสมบัติเชิงฟิสิกส์ของยาง นอกจากนี้การผสมสารตัวเติมดินขาวยังสามารถลดต้นทุนการผลิตได้อีกเช่นกัน ซึ่งคาดว่าจะงานวิจัยนี้เป็นข้อมูลพื้นฐานของการศึกษาสมบัติเชิงฟิสิกส์ของยาง และเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาสมบัติต่าง ๆ ของยางในอนาคตต่อไป (สมบัติ พุทธจักร, 2547, หน้า 40)

วิธีการวิจัย

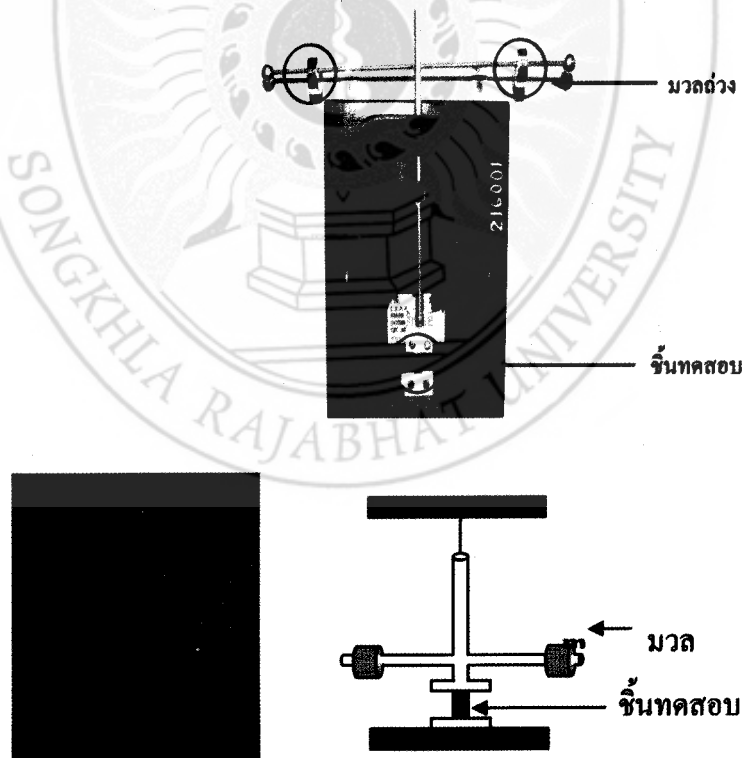
วิธีการทดลองและรวบรวมข้อมูล

1. วัสดุที่ใช้ คือ (1) ยางธรรมชาติ (natural rubber) STR 5L (2) ยางเอสบีอาร์ (Styrene Rubber; SBR 1502) (3) ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide) ชนิด White seal (4) N-Cyclohexyl-2-benzothiazolesulfenamide (CBS) (5) N-phenyl-N'-1, 3-dimethylbutyl-p-phenylenediamine (6PPD) (6) กำมะถัน (Sulphur) (7) สารตัวเติมดินขาวชนิด Bentonites ส่วนอุปกรณ์ที่ใช้ คือ (1) เครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง (two roll mill) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการบดยางและสารเคมีต่าง ๆ เข้าด้วยกัน ลูกกลิ้งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.82 นิ้ว ความยาว 16 นิ้ว ลูกกลิ้งหน้าหมุนด้วยความเร็ว 50 รอบต่อนาที ลูกกลิ้งหลังหมุนด้วยความเร็ว 40 รอบต่อนาที อัตราส่วนความเร็วของผิวลูกกลิ้งหน้าต่อลูกกลิ้งหลัง (friction ratio) เท่ากับ 1.25 ต่อ 1 ใช้ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ (2) เครื่อง compression moulding เป็นเครื่องสำหรับอัดยางเข้าเบ้าพิมพ์โดยใช้ระบบไฮดรอลิกให้ความร้อนด้วยระบบไฟฟ้า มี 2 ชั้น แต่ละชั้นมีขนาด 20x20 นิ้ว (3) เครื่อง oscillating disk rheometer รุ่น 2000 ผลิตโดย Monsanto Co., Ltd, USA โรเตอร์เป็นแบบ biconical disk มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.3996 นิ้ว ซึ่งหมุนกลับไปมา 1 องศา ด้วยความถี่ 100 รอบต่อนาที ใช้สำหรับหา scorch time และ cure time ตั้งอุณหภูมิได้สูงสุด 200 องศาเซลเซียส (4) ชุดทดลองสมบัติทางรีโอโลยีเพื่อทดสอบสมบัติพลวัตเชิงกลโดยการบิด และ (5) เครื่องชั่งไฟฟ้า (electronic balance)

2. วิธีการเตรียมยางคอมพอสต์ เนื่องจากวิธีการในการเตรียมยางคอมพอสต์จะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์อย่างมาก จึงได้ออกแบบขั้นตอนและวิธีการเตรียมยางคอมพอสต์ให้เป็นมาตรฐานเดียวกันทั้งยางธรรมชาติ STR 5L และยางเอสบีอาร์ 1502 การผสมแบบเดียวกันที่จะนำมาทดลองจะต้องออกแบบสูตรยางให้เหมาะสมกับจุดประสงค์ของการศึกษา ตารางที่ 1 สำหรับการทดลองมีขั้นตอนดังต่อไปนี้ โดยยางจะถูกบดผสมยางกับสารเคมีด้วยเครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง และมีลำดับการใส่สารเคมีต่าง ๆ ลงในยางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ ตามรายการตามรายการต่อไปนี้ ลำดับการใส่สารเคมีและส่วนผสมคือ (1) บดยาง (mastication) (2) ใส่ ZnO (3) ดินขาว + Stearic acid (4) CBS (5) 6PPD (6) Sulphur (7) รีดเป็นแผ่นหนา ผสมเสร็จตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปอัดเบ้าเพื่อเตรียมชิ้นทดสอบ (John, Sommer, and Oon Hock Yeoh, 1922, p.47)

ตารางที่ 1 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาสมบัติการบิดเชิงพลวัตของยางธรรมชาติ ผสมดินขาวและยางเอสบีอาร์ผสมดินขาว (ออกแบบสูตรยางโดยผู้วิจัยเพื่อให้เหมาะสมกับจุดประสงค์ของการศึกษา)

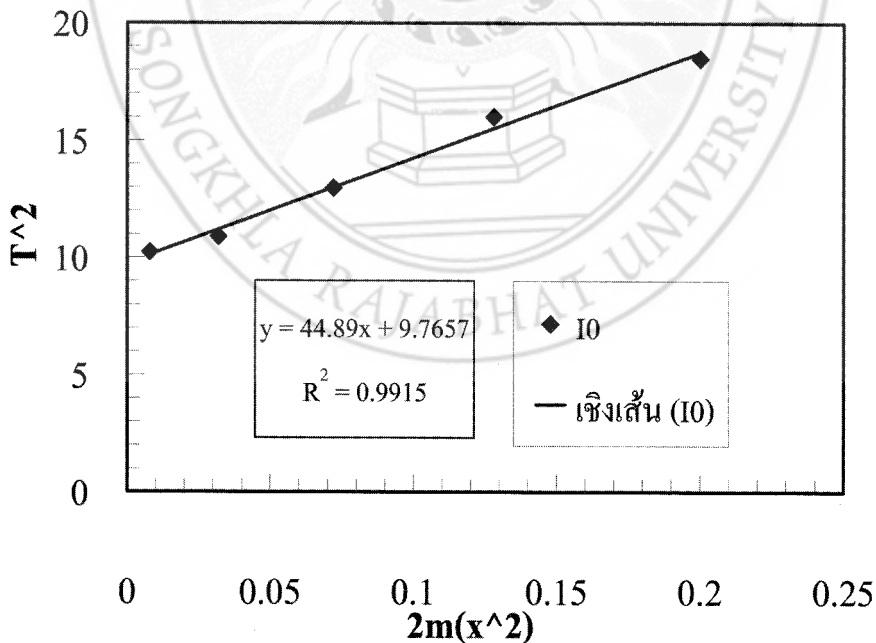
ส่วนผสม	สูตรที่/ปริมาณ (phr)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
STR 5L	100	100	100	100	100	100	-	-	-	-	-	-
SBR 1502	-	-	-	-	-	-	100	100	100	100	100	100
ZnO	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Stearic acid	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
clay	0	3	10	20	30	50	0	3	10	20	30	50
CBS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6PPD	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sulphur	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5



รูปที่ 1 ชุดทดสอบสมบัติการบิดเชิงพลวัต

การหาเวลา 95% cure time โดยนำยางคอมเพาต์ที่ตั้งไว้ 24 ชั่วโมง มาทดสอบหาเวลา 95% cure time ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส จากการใช้เครื่อง oscillating disk rheometer ทั้งนี้ เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการนำยางไปขึ้นรูป จากนั้นนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อน และความดัน กระบวนการนี้เรียกว่า กระบวนการวัลคาไนซ์เซชัน

การทดสอบค่า G' , G'' , Δ และ $\tan \delta$ นำยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์ มาตัดเป็นชิ้นทดสอบ มีขนาดสี่เหลี่ยมเล็ก ๆ กว้าง 6.8 มิลลิเมตร ยาว 1 มิลลิเมตรและหนา 1.5 มิลลิเมตรโดยประมาณ วิธีการทดสอบมีดังต่อไปนี้ (1) เตรียมความพร้อมของชุดทดสอบสมบัติการบิดเชิงพลวัต (รูปที่ 1) (2) หาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบเมื่อแกว่งอย่างอิสระของชุดทดสอบ (ไม่เพิ่มมวล) (3) ตั้งค่า โมเมนต์ความเฉื่อยโดยตั้งระยะ x (ระยะห่างจากแกนกลางที่วางมวล m) และมวลหน่วย $m = 10$ กรัมซึ่งเป็นค่าคงที่ตลอดการทดลอง (4) ติดตั้งชิ้นทดสอบแล้วยึดกับชุดทดสอบ (5) แกว่งชิ้นทดสอบ ในระนาบการบิดแนวอนด้วยมุมน้อย ๆ ไม่เกิน 5° เพื่อให้ค่าต่าง ๆ ที่วัดได้นั้นเป็นสมบัติแบบ linear viscoelastic (สมบัติ พุทธจักร, 2547, หน้า 177) (6) วัดคาบของการบิด (T) เนื่องจากการบิด ไปมาเป็นการเคลื่อนที่แบบ simple harmonic โดยคาบของการบิดจะแปรผันกับความเฉื่อย (I) และความเฉื่อยจะขึ้นกับทั้งมวล (m) ที่เพิ่มเข้าไปและตำแหน่งที่วาง (x) ดังสมการ $I = I_0 + 2mx^2$ และ วัดแอมพลิจูด (A) จากจุดสูงสุดถึงจุดต่ำสุดของการแกว่ง (สมบัติ พุทธจักร, 2550, หน้า 34) เนื่องจากค่าแอมพลิจูดกำลังสองจะแปรผันโดยตรงกับพลังงานสะสมในเนื้อยางที่จะใช้ในการแกว่งในรอบ ถัดไป พลังงานส่วนหนึ่งจะเสียไปกับแรงเสียดทานระหว่างโซ่พอลิเมอร์และการแตกของโครงสร้าง ของสารตัวเติม จึงทำให้แอมพลิจูดของรอบถัดไปลดลง ทดลองซ้ำเดิม 3 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 2 กราฟการทดลองหาค่า I_0 ของเครื่องมือชุดทดสอบสมบัติการบิดเชิงพลวัต

วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลจะเริ่มจากการหาความถี่ของระบบที่แกว่งอย่างอิสระ (I_0) โดยให้มีการบิดไปมาเมื่อระบบมีความถี่จากมวล m ที่ปรับค่า ระยะ x ต่าง ๆ แล้วหา I จากสมการคือ

$$I = I_0 + 2mx^2$$

การหาค่า I_0 ของระบบจากสมการความสัมพันธ์ของ T^2 และ $2mx^2$ และผลการทดลองคือ กราฟรูปที่ 2

จากรูปที่ 2 แสดงกราฟการทดลองหาค่า I_0 ของเครื่องมือชุดทดลองการบิด จากสมการความสัมพันธ์ของ T^2 และ $2mx^2$ คือ $y = 44.89x + 9.7657$ จากสมการการสั่น คือ $T^2 = \frac{(2\pi)^2}{K} (I_0 + 2mx^2)$ เมื่อ K คือค่าคงที่การบิด ดังนั้นจึงได้ว่า $I_0 =$ จุดตัดแกน $y / \text{slope} = 9.7657/44.89 = 0.218 \text{ kg m}^2$ ซึ่งผลการทดลองมีแนวโน้มที่ดี ค่าสหสัมพันธ์ของข้อมูลจากสมการก็ดี และจากการทดลองหลายครั้ง การหาค่า I_0 ก็มีค่าใกล้เคียงกันมาก แม้ว่าการเตรียมตัวอย่างแต่ละครั้งอาจจะไม่มีความหนาเป็น 1 มิลลิเมตรเสมอไป แต่เมื่อนำค่าแพคเตอร์รูปร่างมาใช้ประกอบการคำนวณก็จะทำให้รูปร่างของตัวอย่างทดสอบไม่มีผล ต่อค่าที่วัดได้และค่าที่วัดได้อยู่ในรูปสัมพัทธ์ เช่น logarithmic decrement ($\Delta = \ln(A_1/A_2) = \ln(A_2/A_3)$) เมื่อ A คือ แอมพลิจูดที่วัดจากจุดสูงสุดถึงจุดต่ำสุดของการ แกว่งแต่ละรอบต่อเนื่องแล้วหาจากค่าเฉลี่ย ค่านี้ขึ้นกับสมบัติทางฟิสิกส์ของยางแต่ละสูตร ค่าแอมพลิจูดจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณพลังงานที่สะสมในเนื้อยาง และวัดค่า $\frac{G''}{G'}$ = $\tan \delta$ (loss factor) ซึ่งอยู่ในรูปสัมพันธ์กับพลังงานที่สูญเสียไปในเนื้อยางระหว่างการบิดอีกเช่นกัน โดยวัดได้ที่ความถี่ต่ำ ๆ ที่เป็นสมบัติเชิงเส้น จึงไม่ขึ้นกับความถี่ของการแกว่งอีกเช่นกัน เมื่อเพิ่มมวลในระยะ x แล้วความถี่จะเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นคาบก็จะเปลี่ยนแปลงด้วย การสั่นจะกลับมาสู่ตำแหน่งเดิมทุกเวลาที่เพิ่มขึ้นเป็นคาบ T คือ $e^{-\alpha t} = e^{-\alpha(Tn)}$ จากการแกว่งด้วยรัศมีคงที่ R ดังนั้นแอมพลิจูดมีความสัมพันธ์กับมุมที่แกว่ง คือ $A = R\theta$ แล้ว ทำให้ $A_1/A_2 = (R\theta_1/R\theta_2) = \theta_1/\theta_2$ ดังนั้นจึงนิยาม Logarithmic decrement,

$$\Delta = \ln \left\{ \frac{\theta_n}{\theta_{n+1}} \right\} \ll 1, \text{ โดย } G'' = \frac{4\pi\Delta}{KT^2}, G' = \frac{1}{KT^2} (4\pi^2 - \Delta^2) \text{ และ } \frac{G''}{G'} = \frac{4\pi\Delta}{KT^2} \text{ เทอม } \frac{G''}{G'}$$

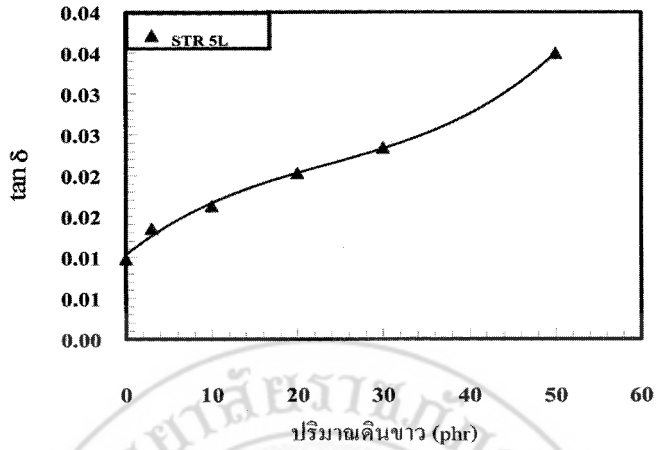
= $\tan \delta$ (loss factor) แสดงสัดส่วนการเกิดปริมาณความร้อนหรือการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นขณะการแกว่งแต่ละรอบ (สมบัติ พุททจักร, 2550, หน้า 37) นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta = \pi \tan \delta$ ซึ่ง K คือ shape factor หาได้โดย $(KG^* = K$ โดย K คือค่าคงที่การบิด และ $G^* = G' + G''$) $K = \frac{C \cdot D^3}{16 \cdot l} \mu$ สำหรับวัตถุสี่เหลี่ยม C คือ ความกว้าง D คือความหนาและ l คือระยะระหว่างการหนีบของตัวอย่าง ที่นำมาทดสอบและ $\mu = 5.33 \left\{ 1 - 0.63 \frac{D}{C} \right\}$ เมื่อทำการทดสอบเสร็จแล้ว เราจะได้ข้อมูลคือ คาบ แอมพลิจูด ของยางสูตรต่าง ๆ ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่า G', G'', Δ และ $\tan \delta$ ได้ จากนั้นเขียนกราฟระหว่าง $\tan \delta$ กับปริมาณดินขาว สังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

ผลการวิจัยและวิจารณ์

ชุดทดสอบสมบัติการบิดเชิงพลวัตโดยการบิดนั้นสร้างขึ้นมาจากองค์ความรู้ทางฟิสิกส์ เมื่อยางถูกบิดพลังงานจะสะสมอยู่ในเนื้อยาง ทำให้ยางบิดไปมาจนพลังงานจะสะสมอยู่นั้นหมดไป และพลังงานสะสมดังกล่าวเกี่ยวข้องกับปริมาณทางฟิสิกส์ที่วัดได้โดยตรง เช่น แอมพลิจูดและคาบเวลาเป็นต้น เมื่อพลังงานจะสะสมอยู่ในเนื้อยางหมดก็จะหยุดการแกว่ง และยังมีราคาถูกมากเมื่อเปรียบเทียบกับชุดทดลอง DMTA ซึ่งแปลงค่าพลังงานจะสะสมอยู่ในเนื้อยางเป็นทอร์คแล้วแปลงค่าเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วอ่านเป็นตัวเลข ซึ่งมีการแปลงค่าหลายครั้งและเป็นชุดทดลองราคาแพง การทดลองจะต้องจัดให้มีการแกว่งอย่างอิสระที่แท้จริง ผู้ทดลองต้องตรวจสอบและแก้ไขการแกว่งอย่างอิสระ และแกว่งด้วยแอมพลิจูดน้อย ๆ ไม่เกิน 5 เพื่อให้ผลการทดลองเป็นสมบัติแบบ linear viscoelastic ซึ่งไม่ขึ้นกับขนาดการเปลี่ยนรูปของการบิด การหาค่า I_0 โดยการทดลองหลาย ๆ ครั้งเพื่อดูความเสมอต้นเสมอปลายของข้อมูลตลอดจนดูค่าสหสัมพันธ์ของข้อมูลจากสมการของกราฟด้วย ผลการทดลองจาก กราฟรูปที่ 2 ได้ $I^0 =$ จุดตัดแกน $y / \text{slope} = 9.7657/44.89 = 0.218 \text{ kg m}^2$ จากนั้นทำการทดลองสมบัติการบิดเชิงพลวัตของยางสูตรต่าง ๆ (ตารางที่ 1) โดยการวัดค่าแอมพลิจูดค่าคาบเวลาการบิด หาค่า shape factor แล้วคำนวณหาค่า G' , G'' , Δ และ $\tan \delta$ ดังตารางที่ 2 ตารางที่ 3 จากนั้นเขียนกราฟระหว่าง $\tan \delta$ กับปริมาณดินขาวดังรูปที่ 3 รูปที่ 4 สังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 2 ค่า G' , G'' และ $\tan \delta$ ที่มาจากผลของการแปรปริมาณดินขาวในยางธรรมชาติ STR 5L

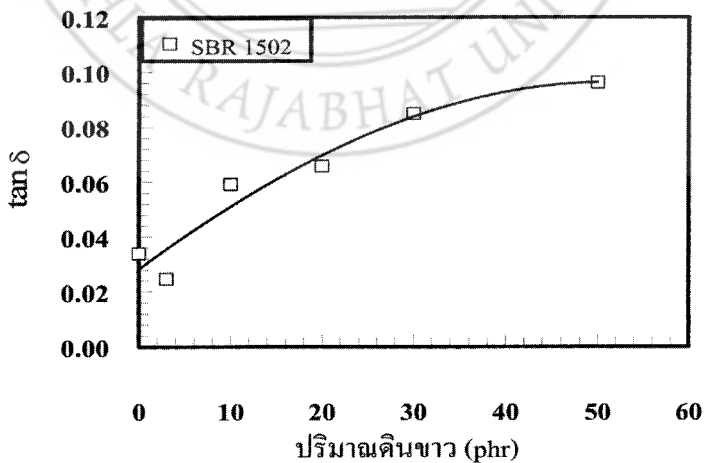
NR+CLAY (phr)	T(s)	G' (Pa)	G'' (Pa)	Log G'	Log G''	$\tan \delta$
0	4.275	604.561×10^5	5.934×10^5	7.781	5.773	0.0098
3	4.821	891.004×10^5	11.968×10^5	7.950	6.078	0.0135
10	5.013	834.360×10^5	13.493×10^5	7.921	6.130	0.0162
20	5.099	849.720×10^5	17.187×10^5	7.929	6.235	0.0203
30	5.136	862.402×10^5	20.150×10^5	7.936	6.304	0.0234
50	5.199	917.524×10^5	31.935×10^5	7.963	6.504	0.0349



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า tan δ กับ ปริมาณดินขาวของยางธรรมชาติ STR 5L

ตารางที่ 3 ผลของการแปรปริมาณดินขาวในยางเอสบีอาร์ 1502 ต่อค่า G', G'' และ tan δ

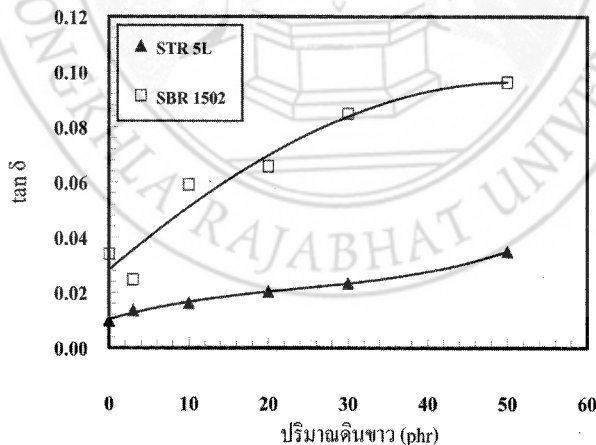
SBR+CIAY (phr)	T(s)	G' (Pa)	G'' (Pa)	Log G'	Log G''	tan δ
0	4.032	571.109 x10 ⁵	19.307 x10 ⁵	7.757	6.286	0.0340
3	4.975	1009.914 x10 ⁵	24.864 x10 ⁵	8.004	6.396	0.0247
10	3.625	570.334 x10 ⁵	33.453 x10 ⁵	7.756	6.524	0.0592
20	3.726	660.608 x10 ⁵	43.395 x10 ⁵	7.820	6.637	0.0658
30	3.403	636.188 x10 ⁵	53.821 x10 ⁵	7.804	6.731	0.0849
50	2.656	894.725 x10 ⁵	86.313 x10 ⁵	7.952	6.936	0.0963



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า tan δ กับ ปริมาณดินขาวของยางเอสบีอาร์ 1502

ผลของปริมาณดินขาวในยางเอสปีอาร์ 1502 ต่อค่า G' , G'' และ $\tan \delta$ และผลของปริมาณดินขาวในยางธรรมชาติ STR 5L ต่อค่า G' , G'' และ $\tan \delta$ นั้นจะแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ คือเป็นสมบัติคู่ของวัสดุ (อันตรกิริยา) ที่เกิดจากชนิดของยางเท่านั้น คือยางมีค่า flexibility ต่างกัน โดยยางธรรมชาติมีค่า flexibility สูงกว่ายางเอสปีอาร์ จึงทำให้สามารถยับยั้งตัวได้ดีกว่า ทำให้มีการเกาะเกี่ยวได้ดีกว่ากับโครงสร้างแบบอ่อนของดินขาว ทำให้มีการสูญเสียพลังงานน้อยในแต่ละรอบของการบิด ผลคือ $\frac{G''}{G'}$ $\tan \delta$ (loss factor) ยางธรรมชาติมีค่าต่ำ แสดงสัดส่วนการเกิดปริมาณความร้อน หรือการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นขณะการแกว่งแต่ละรอบ นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta = \pi \tan \delta$ (Young, 1983, p.165) การสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นขณะแกว่งแต่ละรอบที่ขึ้นกับทั้งปริมาณดินขาว ค่า G' คือ elastic modulus ที่แปรผันโดยตรงกับพลังงานสะสม และ ค่า G'' คือ loss modulus ที่แปรผันโดยตรงกับพลังงานสูญเสียภายในเนื้อวัสดุของแต่ละรอบของการบิดไปมา ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุนั้น ๆ พลังงานสูญเสียในรูปของความร้อน H คือ $H = \pi G'' \mathcal{E}_0^2$ หรือ $H = \pi G' \tan \delta \mathcal{E}_0^2$ เมื่อ \mathcal{E}_0 คือแอมพลิจูดของการเปลี่ยนรูปขณะที่บิด (Sperling, 1992, p. 369)

จากผลต่างของสมบัติคู่ของวัสดุ (อันตรกิริยา) ที่เกิดจากชนิดของยางเท่านั้น คือยางมีค่า flexibility ต่างกัน โดยยางธรรมชาติมีค่า flexibility สูงกว่ายางเอสปีอาร์ จึงทำให้สามารถยับยั้งตัวได้ดีกว่าทำให้มีการเกาะเกี่ยวได้ดีกว่ากับโครงสร้างแบบอ่อนของดินขาว ทำให้มีการสูญเสียพลังงานน้อยในแต่ละรอบของการบิด ผลคือ $\frac{G''}{G'}$ $\tan \delta$ (loss factor) ยางธรรมชาติมีค่าต่ำนั้นสามารถแสดงการเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 5 สำหรับยางเอสปีอาร์นั้นมีผลจาก Vinylbenzene ทำให้ค่า flexibility ต่ำ (Treloar, 1995, p. 1467) (Vlacovicova, 2007, p. 2) การขยับตัวเพื่อเกาะเกี่ยวกับโครงสร้างแบบอ่อนของดินขาวได้น้อยลง



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\tan \delta$ กับ ปริมาณดินขาวของยางเอสปีอาร์ 1502 และยางธรรมชาติ STR 5L

สรุป

ซึ่งก็คือค่า $\tan \delta$ และสามารถทำการศึกษาวัดเพื่อที่จะเปรียบเทียบสมบัติเชิงพลวัตของยางชนิดทั้งสองนี้โดยเปรียบเทียบกราฟ $\tan \delta$ กับการแปรปริมาณดินขาวตั้งรูปที่ 5 จะเห็นว่าค่า $\tan \delta$ ของยางเอสบีอาร์ 1502 มีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติ STR 5L ในแต่ละสัดส่วนของปริมาณดินขาว ค่า ($\tan \delta$ ของยางเอสบีอาร์ 1502/ $\tan \delta$ ของยางธรรมชาติ STR 5L) ที่ 50: 30 : 20 : 10 : 0 phr คือ 2.76 : 3.63 : 3.24 : 3.65 : 3.47 แม้ว่าการเตรียมตัวอย่างแต่ละครั้งอาจจะไม่ได้ความหนาเป็น 1 มิลลิเมตร เสมอไปแต่เมื่อนำค่าแฟคเตอร์รูปร่างมาใช้ประกอบการคำนวณ ก็จะทำให้รูปร่างของตัวอย่างทดสอบไม่มีผลต่อค่าต่าง ๆ ที่วัดได้ และค่าที่วัดได้นั้นอยู่ในรูปปริมาณสัมพัทธ์ เช่น logarithmic decrement (Δ) = $\ln(A_1/A_2) = \ln(A_2/A_3)$ และค่า A_1 จะแปรผันตรงกับพลังงานที่สะสมในเนื้อยางเพื่อจะใช้ในการบิดรอบที่ 2 แต่ในระหว่างการบิดรอบที่ 2 ก็มีการเสียพลังงานไปอีก จึงทำให้ $A_1 > A_2 > A_3$ (Ward, 1993, p. 227) ค่านี้ขึ้นกับสมบัติทางฟิสิกส์ของยางแต่ละสูตรเท่านั้น นอกจากนี้พลังงานที่เสียไปในเนื้อยางในการบิดของยางแต่ละสูตรนั้น มีความสัมพันธ์กับค่า $\tan \delta$ ดังนั้นจึงแสดงการเปรียบเทียบกราฟ $\tan \delta$ ตั้งรูปที่ 5 ปริมาณพลังงานที่สะสมและพลังงานที่เสียไปในเนื้อยางนั้น สามารถนำไปทำนายสมบัติการนำความร้อนและการดูดซับเสียงของผนังยางได้

บรรณานุกรม

- สมบัติ พุทธจักร.(2550). **คู่มือปฏิบัติการ Properties of matter and rheology**. สงขลา : คณะวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
- _____.(2547). **สมบัติเชิงฟิสิกส์ เชิงรีโอโลยีและเชิงวิศวกรรมของยาง**. สงขลา : โรงพิมพ์ฝ่ายเทคโนโลยีทางการศึกษา สำนักวิทยบริการ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
- สมบัติ พุทธจักร และ เจ.เค. ตาแซง. (2544) Dynamic properties of SBR rubber. ในพระบรมราชูปถัมภ์,วิชาการ รายงานการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ครั้งที่ 27, 16-18 ตุลาคม, จังหวัดสงขลา, 822, กรุงเทพมหานคร, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
- สุรสิทธิ์ ประสารปราน.(2548), **การพัฒนาถ้วยรับน้ำยางโดยน้ำยางธรรมชาติและดินขาว**. สืบค้นเมื่อ 11 กันยายน 2550, จาก http://www.trf.or.th/News/Content.asp?Art_ID=478
- Bower, D.I. (2005). **An introduction to polymer physics**. Cambridge : The Press syndicate of the University of Cambridge.
- Kumnantip, C.,& Sombatsompop, N. (2003). Dynamic mechanical properties and swelling behaviour of NR/reclaimed rubber blends. **Materials letters**, 57, 3167-3174.

- Lee, Y.J., France, L.M., & Hawley, M.C. (1997). Rubber chem. **Techno**, 70,256-263.
- Radhakrishnan, N., Mathew, N.M., Thomas, S., Chatterjee, P., & Siddiqui, M.A. (1998). Physical and rheological characteristics of liquid natural rubber modified bitumen. **Journal of Applied Science**, V.26 (10), 53-61.
- Sommer, J.G., & Yeoh, O.H. (1992). Test and specifications. In Alan N. Gent. **Bold Engineering with Rubber** (pp. 144-149). Munich
- Sperling, L.H. (1992). **Introduction to physical polymer science**. New York, John Wiley.
- Treloar, I.R.G. (1995). Dynamic-mechanical properties of polybutadiene rubber. **Journal of Polymer** 26, 1463-1468.
- Vlacovicova, Z. (2007). Creep characteristics of asphalt modified by styrene butadiene styrene copolymer. **Science Direct**, from : <http://www.accessmylibrary.com>.
- Ward, I.M. (1993). **An introduction to the mechanical properties of solid polymers**. Chichester, John Wiley.
- Young, R.J. (1983). **Introduction to polymers**. London : Chapman and Hill.