

การทดสอบพลวัตแบบเนียนของขึ้นตัวอย่าง ยางธรรมชาติดิบุรูปทรงกระบอกกลวงด้วยเครื่อง DMA

วิไลพร ลักษมีวานิชย์¹ และ มนัส แซ่ด่าน²

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปัตตานี 94001

บทคัดย่อ

การออกแบบขึ้นทดสอบยางธรรมชาติดิบุที่เป็นรูปทรงกระบอกกลวง ผิดรูปแบบเนียนสำหรับทดสอบสมบัติพลวัต (dynamic test) ด้วยเครื่องทดสอบพลวัตเชิงกล DMA รุ่น 7 (Dynamic Mechanical Analyzer, series 7) ให้ค่ามอดุลัสที่ความแปรปรวนน้อยกว่า การทดสอบแบบกดอัดที่เสนอไว้โดยผู้ผลิตเครื่องมือ ผลการทดสอบยางธรรมชาติดิบุจำนวน 4 ชนิด คือ ยาง STR5L, STR20, ยางแผ่นรมควัน และยางสีกิม ที่ช่วงความถี่ 0.1 ถึง 50 เฮิรตซ์ อุณหภูมิ 100 °C ความเครียด 0.5 % พบว่าความหนืดพลวัตเชิงซ้อน (dynamic complex viscosity) มีค่าใกล้เคียงกับค่าความหนืดปรากฏ (apparent viscosity) ที่ทดสอบจากเครื่องคาปิลลารีโอมิเตอร์ (capillary rheometer) โดยใช้สมมุติฐานที่ว่า ความถี่เชิงมุมของการสั่นมีค่าเท่ากับอัตราเฉือนของพอลิเมอร์เหลว ซึ่งเป็นการยืนยันถึงความแม่นยำของการวัดสมบัติพลวัตด้วยขึ้นตัวอย่างรูปทรงกระบอกที่ออกแบบขึ้น

คำสำคัญ : การทดลองแบบเนียน, คุณสมบัติพลวัตเชิงกล,
ขึ้นตัวอย่างรูปทรงกระบอกกลวง, ความหนืด

¹ อาจารย์ แผนกวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ แผนกวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

Dynamic Shear Test on a Hollow Cylinder Raw Natural Rubber using DMA

Vilaiporn Luksameevanish¹ and Manus Seadan²

Prince of Songkla University, Pattani, 94001

Abstract

A designed hollow cylinder rubber specimen tested in shear deformation using a Dynamic Mechanical Analyzer series 7 (DMA7) produces a lower variation coefficient for the storage modulus data than that of a compressive pellet sample in a cup and plate deformation as recommended by the equipment manufacturer. This shear test has been developed to characterize four grades of natural rubber; STR 5L, STR 20, RSS and Skim Block, tested over a frequency range of 0.1 to 50.0 Hz, 100 °C and 0.5 % strain. To confirm the test result from this design specimen tested on DMA7, a comparison was made with a capillary rheometer result is investigated. Based on the assumption of an equivalence of dynamic angular frequency and shear flow rate, an agreement of the dynamic complex viscosity and the apparent shear flow viscosity was found.

Keywords : Shear Test, Dynamic Mechanical Properties, Hollow Cylinder Specimen, Viscosity

¹ Lecturer, Physics Section, Faculty of Science and Technology.

² Assistance Professor, Physics Section, Faculty of Science and Technology.

บทนำ

การศึกษาสมบัติพลวัตของวัสดุอีลาสโตเมอร์ (elastomers) ในรูปของยางวัลคาไนส์ มีมานานในอดีต [1], [2] เพราะเป็นวัสดุที่มีการใช้งานทางวิศวกรรมทั้งในรูปของของแข็ง และของเหลว อย่างกว้างขวาง แต่การศึกษาสมบัติพลวัตในรูปของยางดิบมีจำนวนน้อยมาก [2] ทั้งๆ ที่ในกระบวนการผลิต เช่น ในกระบวนการเอ็กซ์ทรูด และการฉีดยางเข้าเบ้า สมบัติของยางดิบทั้งด้านการไหลหนืดและด้านอีลาสติคมีผลโดยตรงต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ [3] การศึกษาสมบัติการไหลหนืดของยางดิบด้วยเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์ (Capillary Rheometer) และเครื่องวิสโคมิเตอร์ (Viscometer) ได้กระทำกันมาแล้วอย่างกว้างขวาง เพราะกระทำได้ง่ายและสะดวก ส่วนสมบัติอีลาสติค ซึ่งได้จากการทดสอบแบบสมบัติพลวัตมีน้อยเพราะมีความยุ่งยากและเครื่องทดสอบมีราคาแพง ทั้งๆ ที่การทดสอบแบบพลวัตมีข้อดีที่เป็นการผิดรูปน้อยๆ ที่ความเครียดต่ำ นอกจากนั้นผลการทดสอบแบบนี้ยังสามารถอธิบายสมบัติการไหลในเชิงทฤษฎีได้ดีกว่าอีกด้วย

เครื่องทดสอบสมบัติพลวัต DMA7 เป็นเครื่องมือที่มีใช้ในห้องปฏิบัติการของคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เป็นเครื่องมือที่สำคัญสำหรับการทดสอบสมบัติพลวัตของของแข็งและของยางวัลคาไนส์ เช่นเดียวกับเครื่องทดสอบพลวัตชนิดอื่นๆ แต่ข้อจำกัดของการทดสอบยางดิบ คือการสั่นอยู่ในแนวตั้ง (vertical vibration) ดังนั้นทางผู้ผลิตจึงได้แนะนำให้ทดสอบยางดิบแบบกดอัดเมื่อยางที่อยู่ระหว่างถ้วยกับแผ่นราบ (cup and plate kit) ดังแผนภาพที่แสดงใน รูปที่ 1 (ก) แต่จากการศึกษาเบื้องต้นของ ธีรวรรณ สุขภิลภาพ [4] และอุดร ทองหุ่ย [5] พบผลการทดลองที่สอดคล้องกัน คือค่ามอดุลัสสะสม (storage modulus) มีความแปรปรวนสูง ข้อมูลไม่น่าเชื่อถือ ค่ามอดุลัสสะสมสูงกว่าที่ควรจะเป็น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะความแปรปรวนทั้งขนาดและความสมบูรณ์ของชิ้นตัวอย่าง นอกจากนั้นการทดสอบแบบกดอัดยังอาจมีอิทธิพลของตัวประกอบรูปร่าง (shape factor, S)[#] มาเกี่ยวข้อง

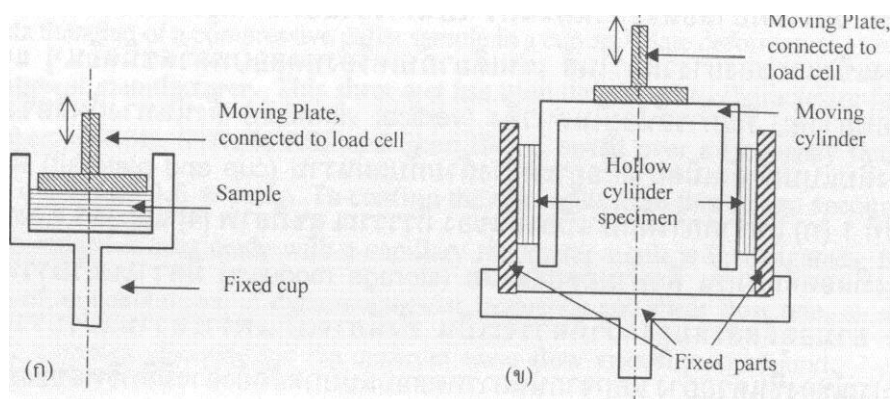
ผู้วิจัยและอุดร ทองหุ่ย [6] จึงได้ออกแบบขึ้นทดสอบเป็นรูปทรงกระบอก ที่มีแกนอยู่ในแนวเดียวกับแนวการสั่นของเครื่องทดสอบพลวัตเชิงกล DMA7 ทำให้ขึ้นทดสอบมีการผิดรูปแบบเฉือน (shear deformation) ดังแผนภาพที่แสดงในรูปที่ 1 (ข) จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าขึ้นทดสอบแบบนี้ให้ผลการทดสอบที่มีความแปรปรวนต่ำกว่าการขึ้นทดสอบชิ้นตัวอย่างแบบกดอัด ดังแสดงใน รูปที่ 2 [5] ซึ่งเป็นการแสดงค่ามอดุลัสสะสมที่แปรค่ากับความถี่เชิงมุมสอดคล้องกับความถี่ช่วง 0.1 ถึง 50 เฮิร์ตซ์ การทดสอบขึ้นทดสอบรูปทรงกระบอกให้ข้อมูลที่ใกล้เคียงกันเมื่อทำการทดลองซ้ำเพียง 3 ชิ้นตัวอย่างมีความแปรปรวนเพียง 5% ส่วนในกรณีของการทดสอบแบบกดอัดแม้ว่าจะทำการทดลองซ้ำมากถึง 20 ชิ้นตัวอย่างก็ยังคงมีความแปรปรวนสูงถึง 33%

[#] ตัวประกอบรูปร่าง คืออัตราส่วนของพื้นที่รับแรงต่อพื้นที่ที่ไม่มีแรงกระทำ ในกรณีนี้ S มีค่ามาก (เช่น ยางแผ่นบาง) ค่ามอดุลัสกดจะมีความสูงกว่ากรณี S มีค่าน้อยกว่า (ยางแผ่นหนากว่าที่มีพื้นที่รับแรงเท่ากัน)

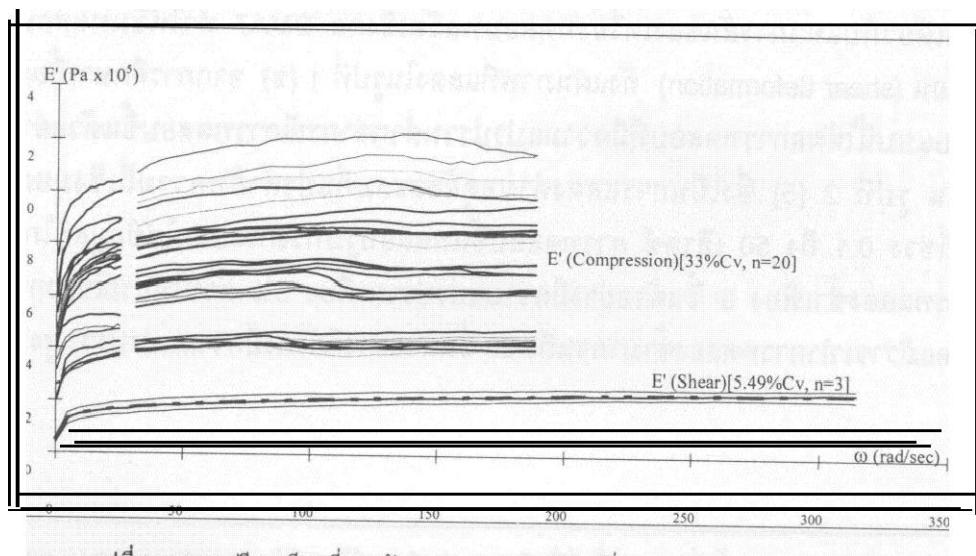
และเนื่องจากไม่มีเครื่องทดสอบพลวัตสำหรับพอลิเมอร์หลอมในพื้นที่ใกล้เคียง การเปรียบเทียบความถูกต้องของค่าวัดได้จากชั้นตัวอย่างที่ออกแบบ จึงเป็นการเปรียบเทียบค่าความหนืดพลวัต (dynamic viscosity) ซึ่งได้แก่ความหนืดพลวัตจริงและเชิงซ้อน (real and complex viscosities) กับค่าความหนืดปรากฏ (apparent viscosity) ที่ทดสอบได้จากเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์ ความสัมพันธ์ของความหนืดทั้งสองประเภทได้มีการศึกษาและเสนอความสัมพันธ์โดย Cox-Merz [7], [8] โดยมีสมมุติฐานว่าให้ความถี่เชิงมุมของการสั่นเท่ากับอัตราเฉือน ซึ่งสอดคล้องกับการอธิบายของ Beuche [9] ดังนี้

$$\left. \begin{array}{l} \eta^*(\omega) = \eta(\dot{\gamma}) \\ \text{หรือ} \quad \eta'(\omega) = \eta(\dot{\gamma}) \end{array} \right\} \text{เมื่อ } (\omega = \dot{\gamma})$$

เมื่อ $\eta^*(\omega)$, $\eta'(\omega)$ และ $\eta(\dot{\gamma})$ คือความหนืดเชิงซ้อน ความหนืดจริงและความหนืดปรากฏที่แปรค่ากับความถี่เชิงมุม, ω หรือ อัตราเฉือน $\dot{\gamma}$



รูปที่ 1 แผนภาพชั้นตัวอย่างที่ทดสอบภายใต้ (ก) การกด และ (ข) การเฉือน
ที่มีชั้นตัวอย่างเป็นรูปทรงกระบอกกลวง



วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

ก. วัสดุ

งานวิจัยนี้ได้ทดสอบสมบัติเฉพาะของยางธรรมชาติดิบจำนวน 4 เกรด ได้แก่ ยาง STR5L STR20 ยางสกิม และยางแผ่นรมควันชั้นหนึ่ง

ข. อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

เครื่องบดอัดสองลูกกลิ้ง (two roll mill) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นิ้ว ความยาว 20 นิ้ว มีอัตราส่วนเสียดทาน 1:1.25

เครื่องมือวีส์โคมิเตอร์ (mooney viscometer) รุ่น AC/684/FD ของบริษัท SPRI ประเทศสหรัฐอเมริกา

เครื่องทดสอบพลวัตเชิงกล รุ่น 7 (Dynamic Mechanical Analyzer series 7, DMA7) ผลิตโดยบริษัทเพอร์กินเอลเมอร์ (Perkin Elmer Co. Ltd.)

เครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์ (capillary rheometer) รุ่น RH-710 แบบบาเรลเดี่ยว ผลิตโดยบริษัทโรซานด์ (Rosand)

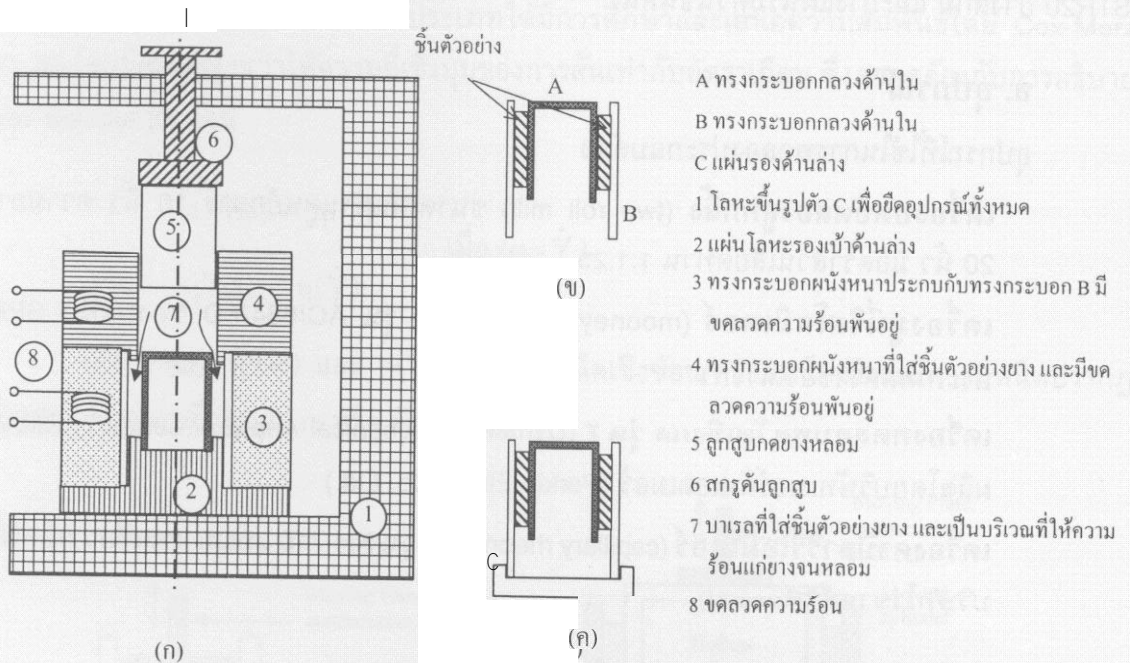
ค. วิธีการ

นำยางดิบทั้ง 4 ชนิดมาทดสอบสมบัติพลวัตเชิงกล โดยการทดสอบขึ้นตัวอย่างยางที่มีรูปทรงกระบอกกลวงด้วยเครื่อง DMA7 และทดสอบสมบัติการไหลด้วยเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์ จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในรูปของค่าความหนืดพลวัตจริง ค่าความหนืดพลวัตเชิงซ้อน และค่าความหนืดปรากฏที่แปรค่ากับความถี่เชิงมุมในการสั่นและอัตราเฉือน มาเปรียบเทียบกัน

การเตรียมขึ้นตัวอย่างยางรูปทรงกระบอกใช้อุปกรณ์ขึ้นรูปขึ้นตัวอย่าง ดังแผนภาพที่แสดงในรูปที่ 3 โดยนำยางดิบแต่ละชนิดมาบดด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้งจนมีค่าความหนืดมูนี่ประมาณ 80 MV จากนั้นจึงนำมาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ อัดเข้าไปยังบาเรล (4) ที่มีขดลวดความร้อนพันอยู่ เมื่อยางได้รับความร้อนจนถึงจุดอ่อนตัวแล้วจึงอัดยางโดยการหมุนสกรู (6) ให้ยางหลอมไหลผ่านช่องเล็กๆ ไปยังบริเวณที่จัดไว้สำหรับบริเวณขึ้นตัวอย่าง จนกระทั่งยางหลอมไหลเข้าไปเต็มช่อง จึงปล่อยให้ระบบทั้งหมดเย็นลง แล้วแกะเอาออก

ขึ้นตัวอย่างที่ได้มีลักษณะดัง รูปที่ 3 (ข) โดยขึ้นตัวอย่างยางจะเป็นทรงกระบอกกลวงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 12 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร และสูง 6 มิลลิเมตร ขึ้นตัวอย่างยางจะเกาะติดกับทรงกระบอกโลหะ A และ B โดยไม่มีสารยึดติดใดๆ

ชิ้นตัวอย่างยางที่เตรียมได้จะถูกนำไปทดสอบสมบัติพลวัตเชิงกลด้วยเครื่อง DMA7 ภายใต้เงื่อนไขการแปรความถี่ช่วง 0.1 จนถึง 50 เฮิรตซ์ ที่ 100°C และความเครียด 0.5% ส่วนเงื่อนไขการทดสอบสมบัติการไหลด้วยเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์คือ เป็นการทดสอบที่ 100°C อัตราเฉือนในเชิง 0.1-10000 ต่อวินาที



รูปที่ 3 แผนภาพอุปกรณ์การเตรียมชิ้นตัวอย่างรูปทรงกระบอกกลวง

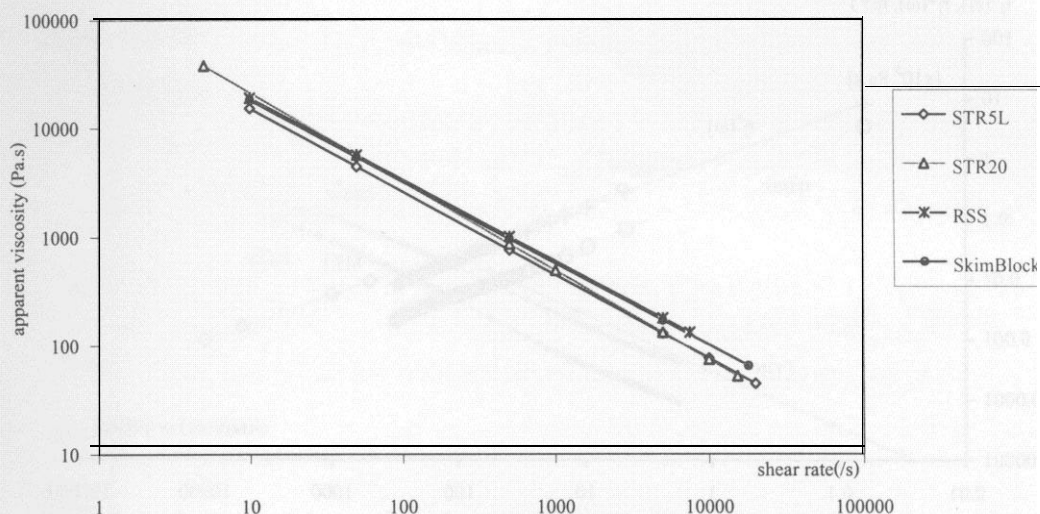
(ก) ภาพของอุปกรณ์โดยรวมทั้งหมด

(ข) ชิ้นตัวอย่างที่เตรียมได้

(ค) ชิ้นตัวอย่างที่นำไปทดสอบด้วยเครื่อง DMA7

ผลการทดลองและวิจารณ์

รูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบสมบัติการไหลของยางดิบด้วยคาปิลารีโอมิเตอร์ โดยแสดงผลในรูปของความหนืดปรากฏที่แปรค่ากับอัตราเฉือนบนสเกลล็อก-ล็อก จะเห็นว่า ค่าความหนืดปรากฏของยางทั้ง 4 ชนิด (ได้แก่ ยาง STR5L, STR20, ยางแผ่นรมควัน และยางสกิม) ที่ทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C ในช่วงอัตราเฉือนประมาณ 10 - 10,000 ต่อวินาที มีค่าไม่แตกต่างกันนัก แต่ยังคงแสดงให้เห็นว่า ยาง STR5L ซึ่งเป็นยางดิบเกรดดีที่สุดมีค่าความหนืดปรากฏแปรค่ากับอัตราเฉือนต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับยางชนิดอื่น โดยค่าความหนืดปรากฏของยางชนิดนี้มีค่าประมาณ 15,000 และ 75 Pa.s ที่อัตราเฉือน 10 และ 10,000 ต่อวินาที ตามลำดับ

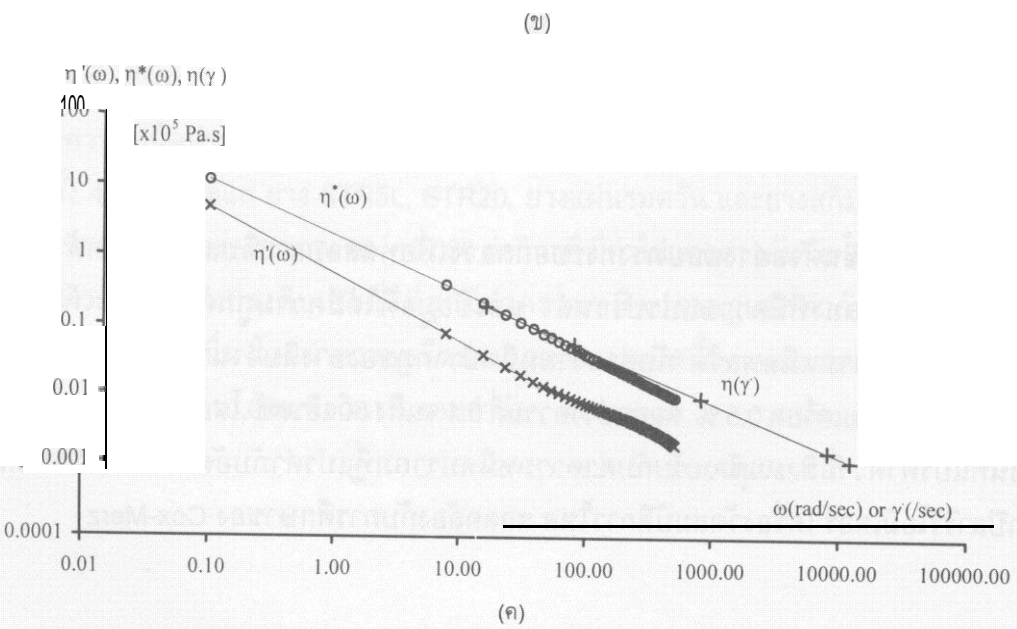
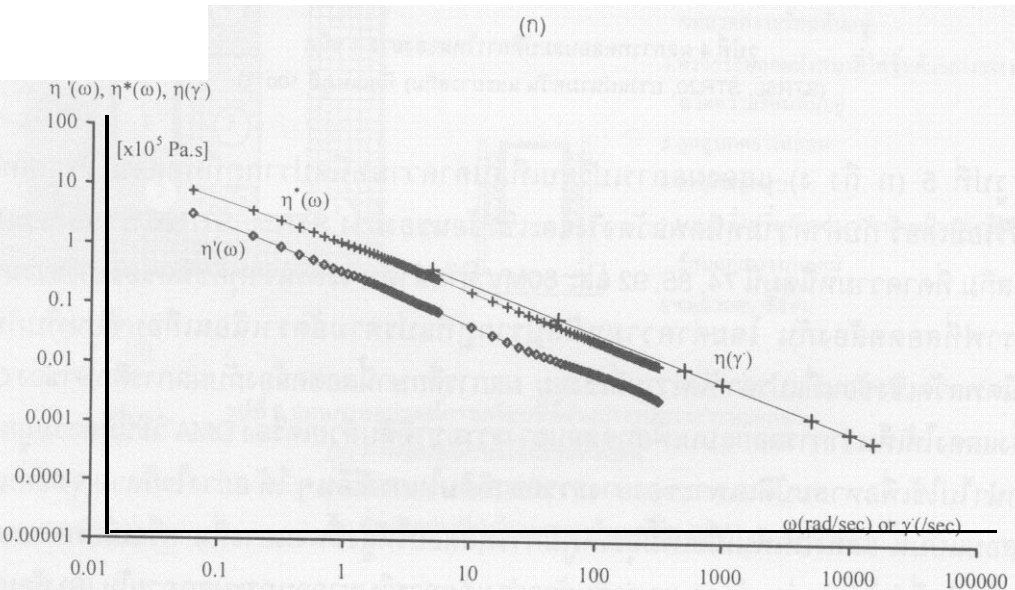
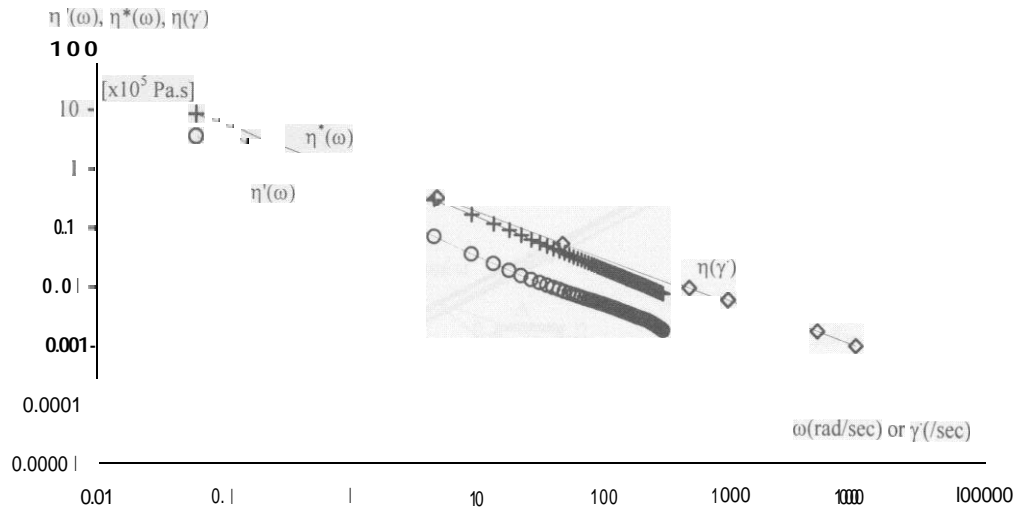


รูปที่ 4 ผลการทดสอบสมบัติการไหลของยาง 4 ชนิด
(STR5L, STR20, ยางแผ่นรมควัน และยางสกิม) ที่อุณหภูมิ 100 °C

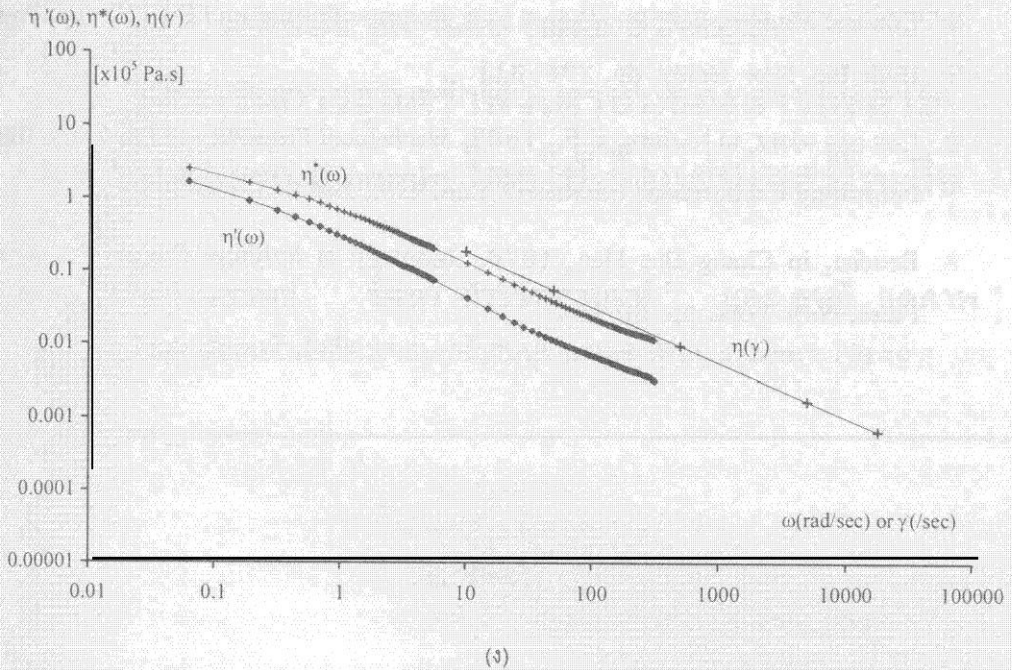
รูปที่ 5 (ก ถึง ง) แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความหนืดปรากฏที่ทดสอบได้จากเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์ กับค่าความหนืดพลวัตจริงและเชิงซ้อนของยาง STR5L STR20 ยางแผ่นรมควัน และยางสกิม ที่ค่าความหนืดมูนี้ 74, 85, 92 และ 80MV ตามลำดับ จะเห็นว่าทุกชนิดของยางธรรมชาติมีเส้นกราฟที่สอดคล้องกัน โดยค่าความหนืดปรากฏที่แปรตามอัตราเฉือนเกือบซ้อนทับกับค่าความหนืดพลวัตเชิงซ้อนที่แปรค่ากับความถี่เชิงมุม ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Cox-Merz ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการออกแบบเพื่อทดสอบยางธรรมชาติด้วยเครื่อง DMA วิธีนี้มีความถูกต้องสามารถนำไปใช้เพื่อหาสมบัติเฉพาะของยางธรรมชาติดิบในกรณีอื่นๆ ได้ อย่างไรก็ตาม จุดอ่อนของการทดสอบแบบนี้ แสดงให้เห็นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทดสอบให้สูงขึ้นจนยางนิ่ม หรือเมื่อทดสอบยางผสมสารตัวเติมที่ทำให้ยางอ่อนตัวลง พบว่าขึ้นตัวอย่างเกิดการคืบมากจนกระบอกภายใน (B) ห้อยย้อยมาสัมผัสกับแผ่นรองรับ (C) ส่วนแนวทางแก้ไขผู้วิจัยพบว่า เมื่อลดความหนาของชั้นตัวอย่างให้บางกว่าเดิม ก็จะทำให้ทดสอบที่อุณหภูมิสูงถึง 200 องศาเซลเซียสได้

บทสรุป

การออกแบบขึ้นตัวอย่างแบบทรงกระบอกกลวงเพื่อทดสอบยางดิบแบบพลวัตด้วยเครื่อง DMA7 ให้ผลการทดลองที่มีความแปรปรวนต่ำ และข้อมูลที่ได้มีความถูกต้องดังจะเห็นได้จากการเปรียบเทียบค่าความหนืดพลวัต กับค่าความหนืดปรากฏของยางดิบจำนวน 4 ชนิดที่ทดสอบที่อุณหภูมิ 100 °C ความเครียด 0.5 % ตลอดช่วงความถี่ 0.1 จนถึง 50 เฮิร์ตซ์ โดยกราฟของความหนืดเชิงซ้อนที่แปรค่าความถี่เชิงมุมซ้อนทับกับค่าความหนืดปรากฏที่แปรค่ากับอัตราเฉือน ซึ่งทดสอบจากคาปิลารีโอมิเตอร์ เครื่องวัดสมบัติการไหล สอดคล้องกับการศึกษาของ Cox-Merz



รูปที่ 5 ผลการเปรียบเทียบความหนืดปรากฏ ($\eta(\dot{\gamma})$) กับความหนืดจริง ($\eta'(\omega)$) และความหนืดเชิงซ้อน ($\eta^*(\omega)$) ของยาง (ก) STR5L (74 MV) (ข) STR20 (85 MV) (ค) ยางแผ่นรมควัน (92 MV) และ (ง) ยางสกิม (80 MV) ที่อุณหภูมิ 100 °C



รูปที่ 5 (ต่อ) ผลการเปรียบเทียบความหนืดปรากฏ ($\eta(\dot{\gamma})$) กับความหนืดจริง ($\eta'(\omega)$) และความหนืดเชิงซ้อน ($\eta^*(\omega)$) ของยาง (ก) STR5L (74 MV) (ข) STR20 (85 MV) (ค) ยางแผ่นรมควัน (92 MV) และ (ง) ยางสีกิม (80 MV) ที่อุณหภูมิ 100 °C

เอกสารอ้างอิง

1. Ferry, J.D., 1962, *Viscoelastic Properties of Polymers*. Reinhold Publishing Corp. pp. 1-12.
2. Noparatanakailas, V., 1994, Dynamic Mechanical Characterisation of Elastomer Compounds, *Ph.D. Thesis*, University of Bradford. UK, pp. 15-31.
3. มนัส แซ่ด่าน, 2538, รีโอไลยีเบื้องต้น (ศาสตร์แห่งการไหลของพอลิเมอร์), คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
4. ถิรวรรณ สุขภิลภาพ, 2539, สมบัติพลวัตเชิงกลของยางธรรมชาติดิบ, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เทคโนโลยียาง), คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
5. อุดร ทองหุ่ย, 2540, ความสัมพันธ์ของสมบัติพลวัตกับสมบัติการไหลของยางธรรมชาติดิบ, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เทคโนโลยียาง), คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
6. วิไลพร นพรัตน์ไกรลาศ, มนัส แซ่ด่าน และอุดร ทองหุ่ย, 2540, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ เรื่องสมบัติพลวัตเชิงกลและความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติพลวัตกับสมบัติการไหลของยางธรรมชาติดิบ, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

7. Cox and Merz, in William, D.J., 1971, *Polymer Science and Engineering*, Prentice-Hall, Inc. New Jersey. pp. 298-311.
8. Cox and Merz, in MEISEN, L.E., 1962, *Mechanical Properties of Polymers*, Reinhold Publishing Corporation, Capman & Hall, Ltd., London., pp. 205-207.
9. Beuche, in Chang Dae Han, 1976, *Rheology in Polymer Processing*. Academic Press, New York. pp. 50-60.