

การศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแบบสองแกนของวัสดุประเภทยาง Investigation of Biaxial Deformation Behaviour of Rubber Sheets

ณัฐวิทย์ วัฒนสกุลพงษ์ อริสรา ชัยกิตติรัตนาน *

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เขตบางซื่อ จ.กรุงเทพมหานคร 10800

โทร 02 5870026 ต่อ 402 โทรสาร 02 5870026 ต่อ 111 E-mail: nuttyMME@yahoo.com, acn@kmitnb.ac.th

Nutawit Wattanasakhunpong Arisara Chaikittiratana

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok,

Bangkok, 10800, Thailand

Tel: 02 5870026 ext 402 Fax: 02 5870026 ext 111 E-mail: nuttyMME@yahoo.com, acn@kmitnb.ac.th*

*Corresponding author

บทคัดย่อ

โดยส่วนมากพฤติกรรมของวัสดุประเภทยางสามารถอธิบายด้วยแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก (Hyperelastic Material Models) ซึ่งมีอยู่หลายรูปแบบด้วยกัน เพื่อให้แบบจำลองสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดภายใต้ภาวะในหลายแกน ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองเหล่านี้โดยทั่วไปต้องการข้อมูลความสัมพันธ์จากการทดสอบในภาวะความเครียด (Strain State) มากกว่าหนึ่งภาวะ การศึกษานี้คณะผู้วิจัยได้สร้างชุดอุปกรณ์ที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบแบบดึงสองแกนเท่ากันสำหรับขึ้นทดสอบแบบแผ่น อุปกรณ์ที่ได้สร้างขึ้นสามารถใช้ร่วมกับเครื่องทดสอบและ VDO Extensometer ที่ใช้สำหรับการทดสอบแบบดึงแกนเดียว ข้อมูลจากผลการทดสอบจากการดึงแกนเดียวและสองแกนเท่ากันได้ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแบบของวัสดุประเภทยางสองประเภทคือ ยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์แบบไม่เติมและเติมผงคาร์บอนดำและเพื่อศึกษาถึงความสามารถของแบบจำลองทางไฮเปอร์อีลาสติกแบบต่างๆ อาทิ Ogden, Mooney-Rivlin, Neo-Hookean, Arruda-Boyce และ Van der Waals ที่จะอธิบายพฤติกรรมทางกลที่ได้จากการทดสอบเหล่านี้ การศึกษานี้ได้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่หาจากผลการทดสอบทั้งแบบดึงแกนเดียวไม่สามารถที่จะอธิบายพฤติกรรมทางกลของวัสดุประเภทยางทั้งสองประเภทในภาวะความเค้นแบบดึงสองแกนเท่ากันได้ และเมื่อใช้ผลการทดสอบทั้งแบบดึงแกนเดียวและสองแกนเท่ากันในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก พบว่าแบบจำลอง Van der Waals สามารถอธิบายพฤติกรรมทางกลของวัสดุยางทั้งแบบเติมและไม่เติมผงคาร์บอนดำใช้ค่าทั้งสองภาวะความเค้นได้ใกล้เคียงกับผลทดสอบมากโดยมีจำนวนค่าสัมประสิทธิ์ที่ต้องหาเพียงสี่ค่า

Abstract

Rubber are often classified as hyperelastic materials which their behaviour can be described through different forms of strain energy functions. Earlier research reported in the literature suggest that for incompressible or nearly incompressible materials such as natural rubbers, multiple strain states experimental data are required in obtaining accurate material parameters for hyperelastic models and thus, reliable stress-strain analysis of the rubber components. In this work, an economical biaxial testing apparatus was designed and built for investigating equi-biaxial tensile behavior of rubber sheets. The experimental method employed a video extensometer for monitoring and measuring the deformation during biaxial tensile tests. Hyperelastic models which can be divided in to two categories notably the phenomenological models eg. Ogden, Mooney-Rivlin model and the molecular physical based models eg. Neo-Hookean, Arruda-Boyce and Van der Waals model were explored. These models were then verified against the obtained biaxial and uniaxial experiment data of carbon black filled vulcanised natural rubber sheet and unfilled vulcanised natural rubber sheet. From this study, when both uniaxial and equi-biaxial experimental data were used for obtaining Hyperelastic models' parameters, it was found that Van der Waals model can give very good representation of the deformation behaviour of the rubber materials used with only four parameters required.

1. บทนำ

วัสดุประเภทยางเป็นวัสดุหนึ่งที่ยิมนำมาใช้ในวงการวิศวกรรม เนื่องจากคุณสมบัติทางกลที่มีความยืดหยุ่นตัวได้สูงจึงมีการนำมาใช้ในการผลิตยางรถยนต์ อุปกรณ์รองรับการสั่นสะเทือน สายพานรถยนต์ และในงานอุตสาหกรรมอื่นๆ ซึ่งส่วนมากแล้วผลิตภัณฑ์จะต้องใช้รับภาระโหลดในหลายรูปแบบและหลายแกน ดังนั้นในการคำนวณถึงความแข็งแรงของวัสดุเพื่อใช้ในการกำหนดขนาดและรูปร่างของผลิตภัณฑ์จำเป็นที่จะต้องทราบความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดภายใต้ภาระในหลายแกน โดยส่วนมากแล้วพฤติกรรมของวัสดุประเภทยางจะถูกอธิบายโดยแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก (Hyperelastic Material Models) ซึ่งมีอยู่หลายรูปแบบด้วยกัน เพื่อให้แบบจำลองสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดภายใต้ภาระในหลายแกน ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองเหล่านี้โดยทั่วไปต้องการข้อมูลความสัมพันธ์จากการทดสอบในภาวะความเครียด (Strain State) ที่สำคัญคือ การดึงแกนเดียว (Uniaxial Tension) การอัดแกนเดียว (Uniaxial Compression) และการเฉือน (Pure Shear) ทั้งนี้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบส่วนมากจะได้อาจจากการทดสอบในภาวะความเครียดแบบดึงแกนเดียวเพราะสามารถทำได้ง่ายที่สุด ภาวะความเครียดแบบ Pure shear ก็สามารถทำได้โดยง่ายโดยใช้ Planar test ส่วนภาวะความเครียดแบบอัดแกนเดียวถ้าทดสอบโดยใช้การอัดขึ้นทดสอบโดยตรงจะเกิดปัญหาเนื่องจากความเสียหายระหว่างขึ้นทดสอบกับอุปกรณ์การทดสอบซึ่งทำให้มีอิทธิพลของ Strain state อื่นๆเข้าแทรกแซงเช่น Shear ซึ่งจะมีผลถึงความแม่นยำของข้อมูลที่ได้ สำหรับวัสดุที่อัดตัวไม่ได้หรือแทบที่จะอัดตัวไม่ได้เช่นวัสดุประเภทยางการดึงขึ้นทดสอบแบบสองแกนที่เท่ากัน (Equi-Biaxial Extension) จะทำให้เกิดภาวะความเครียดที่เทียบเหมือน (Equivalent) กับภาวะความเครียดแบบอัดแกนเดียวโดยไม่มีภาวะความเค้นอื่นเข้าแทรก โดยในการศึกษานี้ผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างอุปกรณ์เพื่อใช้ในการดึงขึ้นทดสอบแบบแผ่นแบบสองแกนที่เท่ากันและได้ใช้ข้อมูลจากการทดสอบแบบการดึงแกนเดียวและแบบดึงสองแกนที่เท่ากันเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุประเภทยางสองประเภทคือ Unfilled Vulcanized Natural Rubber และ Carbon filled Vulcanized Natural Rubber และเพื่อศึกษาถึงความสามารถของแบบจำลองทางไฮเปอร์อีลาสติกแบบต่างๆที่จะอธิบายพฤติกรรมทางกลเหล่านี้

2. สมการทางคณิตศาสตร์ของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก

โดยทั่วไปวัสดุยางที่นำมาใช้ในงานเชิงวิศวกรรมเช่นยางรถยนต์จะมีพฤติกรรมยืดหยุ่นแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งส่วนมากแล้วความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดในขณะรับภาระแบบ ควาซีสถิต (Quasi-Static) มักจะถูกนำเสนอในรูปแบบของฟังก์ชันพลังงานความเครียด (Strain energy function) ในการศึกษาพฤติกรรมของวัสดุประเภทยางสมมุติให้วัสดุเป็นแบบไอโซโทรปิก (Isotropic Material) และเป็นวัสดุแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Material) ตามข้อสมมุติดังกล่าวสามารถเขียนแทนเซอร์ของความเค้นหลักคอสซี (Cauchy Principle Stress Tensor) ได้แสดงออกมาในเทอมของฟังก์ชันพลังงานความเครียดต่อหน่วยปริมาตรโดยเป็นฟังก์ชันกับอัตราการยืด

(Extension Ratio) [1]

$$\sigma_i = \lambda_i \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} + p, \quad i = 1 \dots 3 \quad (1)$$

p เป็นค่าความดันไฮโดรสแตติก (Hydrostatic Pressure) ซึ่งหาค่าได้จากเงื่อนไขค่าขอบเขต (Boundary Condition) จากสมการพลังงานความเครียด $W = W(I_1, I_2, I_3)$ โดยจากการสมมุติฐานพบว่า $I_3 = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$ จะเขียนแทนเซอร์ความเค้นได้ดังนี้

$$\sigma_i = \lambda_i \left[\frac{\partial W}{\partial I_1} \frac{\partial I_1}{\partial \lambda_i} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \frac{\partial I_2}{\partial \lambda_i} \right] + p, \quad i = 1 \dots 3 \quad (2)$$

ความเค้นวิศวกรรม (Nominal Stress)

$$f_i = \frac{1}{\lambda_i} \sigma_i, \quad i = 1 \dots 3 \quad (3)$$

$$\text{โดยที่ } I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (4)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \quad (5)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \quad (6)$$

สำหรับการดึงแบบแกนเดียว (Uniaxial Extension)

$$\lambda_1 = \lambda \quad \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda^{-\frac{1}{2}}$$

$$\text{เมื่อ } p = -2 \left[\frac{1}{\lambda} \frac{\partial W}{\partial I_1} - \lambda \frac{\partial W}{\partial I_2} \right] \quad (7)$$

จะได้ความเค้นคอสซี (Cauchy Stress) ในแกนดึงคือ

$$\sigma = 2 \left[(\lambda - \lambda^{-2}) \left(\lambda \frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] \quad (8)$$

สำหรับการดึงสองแกนที่เท่ากัน (Equi-Biaxial Extension)

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda \quad \lambda_3 = \lambda^{-2}$$

$$\text{เมื่อ } p = -2 \left[\lambda^{-4} \frac{\partial W}{\partial I_1} - \lambda^4 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right] \quad (9)$$

จะได้ความเค้นคอสซี (Cauchy Stress) ในแกนดึงคือ

$$\sigma = 2 \left[(\lambda^2 - \lambda^{-4}) \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda^2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] \quad (10)$$

สมการพลังงานความเครียด W สามารถแบ่งออกได้สองกลุ่มคือแบบจำลองที่แทนพฤติกรรมการสังเกต (Phenomenological Model) เป็นแบบจำลองที่พัฒนามาจากความสัมพันธ์ของความเค้นกับการเปลี่ยนรูปโดยไม่สนใจพฤติกรรมโครงสร้าง และแบบจำลองแทนกายภาพ (Physical based Model) เป็นการพัฒนาจากกลไกโครงสร้างจุลภาคตามเอกสารอ้างอิง[2]-[7] แบบจำลองที่แทนพฤติกรรมกายภาพ (Physical based Model) ที่ใช้ในการศึกษานี้คือแบบจำลองนีโอฮุกเกียน (Neo-Hookean Model)

$$W = C_{10} (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad (11)$$

แบบจำลองของอูรูดาบอยซ์ (Arruda-Boyce Model)

$$W = \mu \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_m^{2i-2}} (I_1^i - 3^i) \quad (12)$$

$$\text{เมื่อ } C_1 = \frac{1}{2} \quad C_2 = \frac{1}{20} \quad C_3 = \frac{11}{1050}$$

$$C_4 = \frac{19}{7050} \quad C_5 = \frac{519}{673750}$$

แบบจำลองของวานเดอร์วาลส์ (Van der Waals Model)

$$W = \mu \left\{ -(\lambda_m^2 - 3) [\ln(1 - \eta)\eta] - \frac{2}{3} a \left(\frac{\tilde{I} - 3}{2} \right)^3 \right\} \quad (13)$$

$$\tilde{I} = (1 - \beta)I_1 + \beta I_2 \quad \eta = \sqrt{\frac{\tilde{I} - 3}{\lambda_m^2 - 3}}$$

แบบจำลองที่แทนพฤติกรรมการสังเกต (Phenomenological Based Model) ที่ใช้ในการศึกษานี้ได้แก่

แบบจำลองพหุนาม (Polynomial Model (n=2))

$$W = \sum_{i+j=1}^n C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (14)$$

แบบจำลองของมูลนีรีฟลิน (Mooney-Rivlin Model)

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (15)$$

แบบจำลองของโยห์ (Yeoh Model)

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 \quad (16)$$

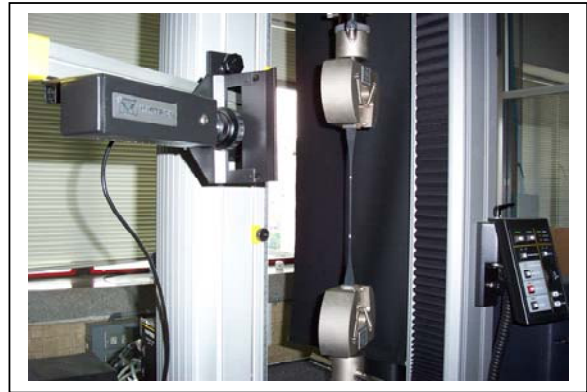
แบบจำลองของอ็อกเดน (Ogden Model)

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (17)$$

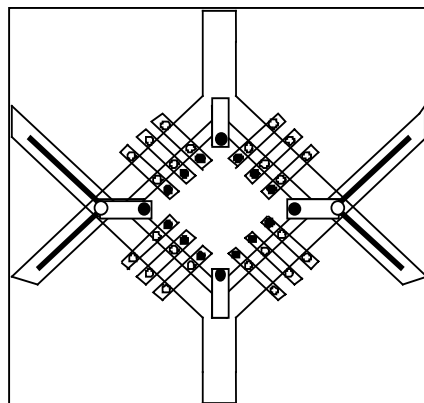
3. การทดลองและการหาคคุณสมบัติของวัสดุ

การศึกษานี้ได้ทำการทดสอบยางธรรมชาติผ่านการวัลคาไนซ์ที่เติมผงคาร์บอนดำด้วยอัตราส่วน 5 phr และที่ไม่เติมผงคาร์บอนดำ ในการทดสอบแบบดึงแกนเดียวได้ใช้ชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ISO 37:1994(E) ทำการทดลองด้วยอัตราการดึงเท่ากับ 200 mm/min ที่อุณหภูมิห้องด้วยเครื่องทดสอบ Instron Universal Testing Machine Model 5567 ในการวัดความเครียด Instron VDO Extensometer ถูกใช้ในการวัดระยะกระจัดของเส้นอ้างอิงสองเส้นที่ถูกวาดไว้บนชิ้นทดสอบซึ่งมีระยะห่างระหว่างกันเริ่มต้นคือ 25 mm ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 1 สำหรับการทดสอบแบบดึงสองแกนเท่ากัน (Equibiaxial Extension) ผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ที่เหมาะสมเพื่อใช้กับเครื่องทดสอบรุ่นเดียวกันโดย Schematic diagram ของอุปกรณ์ที่ได้จัดสร้างขึ้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 2 ชิ้นทดสอบที่ใช้กับอุปกรณ์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 100x100x2 mm (กว้างxยาวxหนา) ซึ่งความหนาเป็นความหนาเดียวกับชิ้นทดสอบแบบดึงแกนเดียวข้างต้น โดยอุปกรณ์ดังกล่าวได้ใช้ตัวหนีบยึดชิ้นทดสอบทั้งหมด 16 ตำแหน่งและตัวหนีบยึดเหล่านี้สามารถสไลด์ไปตามแนวโครงกรอบ (Frame) ด้วยระบบเบร็คว์ซึ่งมีความเสียดทานน้อยมาก เมื่อประกอบอุปกรณ์ดังกล่าวเข้ากับ Instron Universal Testing Machine และให้

แรงดึงในแนวตั้ง ชิ้นทดสอบจะถูกยึดออกแบบเท่ากันในสองแกนเท่ากันแบบสม่ำเสมอได้แสดงไว้ในรูปที่ 3 และเมื่อใช้การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรมABAQUS วิเคราะห์การกระจายตัวของความเค้นในชิ้นทดสอบโดยให้สภาวะการรับภาระเหมือนกับขณะถูกดึงโดยใช้อุปกรณ์ที่สร้างขึ้น พบว่าการกระจายตัวของความเค้นเป็นไปแบบสม่ำเสมอเป็นบริเวณกว้างดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 4 ในการวัดความเครียด Instron VDO Extensometer ถูกใช้ในการวัดระยะกระจัดของเส้นอ้างอิงสองเส้นที่ถูกวาดไว้บนชิ้นทดสอบซึ่งมีระยะห่างระหว่างกันเริ่มต้นคือ 25 mm ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 5 จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าในบริเวณที่เส้นอ้างอิงถูกวาดไว้มีการกระจายความเค้นและความเครียดแบบสม่ำเสมอ (Uniform) ในการทดลองแบบดึงสองแกนเท่ากันได้อัตราการดึงเท่ากับ 200 mm/min



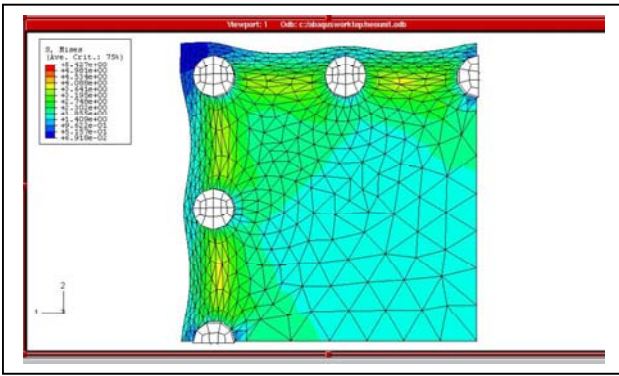
รูปที่ 1 การทดสอบแบบดึงแกนเดียว



รูปที่ 2 Schematic Diagram ของอุปกรณ์สำหรับการทดสอบแบบดึงสองแกนเท่ากัน



รูปที่ 3 ลักษณะการเปลี่ยนรูปของชิ้นทดสอบภายใต้การรับโหลดแบบการดึงสองแกนเท่ากัน



รูปที่4 ผลการวิเคราะห์ความเค้นโดยไฟไนท์เอลิเมนต์ของ 1/4 ของชิ้นทดสอบขณะถูกดึงสองแกนเท่ากัน



รูปที่5 การทดสอบแบบสองแกนที่เท่ากัน

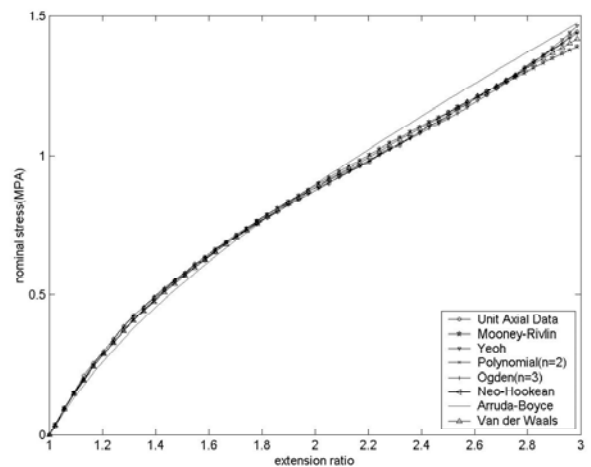
4. ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

ข้อมูลจากการทดสอบทั้งสองแบบข้างต้นได้ถูกนำไปใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกด้วยระเบียบวิธีการเชิงตัวเลขกับวิธีการถดถอยกำลังสองที่น้อยที่สุด (Least Square Regression) โดยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ ABAQUS แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่ใช้ในการศึกษานี้ได้แก่ Neo-Hookean, Arruda-Boyce, Van der Waals, Polynomial (n=2), Mooney-Rivlin, Ogden (n=3) และ Yeoh

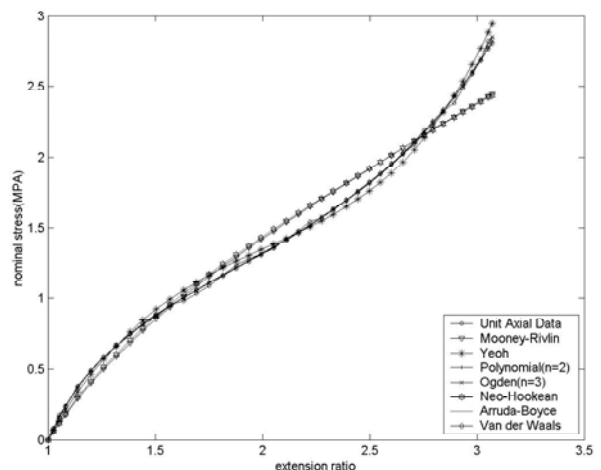
ผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบแบบดึงแกนเดียวและผลการจำลองจากแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกแบบต่างๆโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่หาจากผลการทดสอบแบบดึงแกนเดียวเพียงอย่างเดียวของวัสดุยางไม่เติมผงคาร์บอนได้แสดงไว้ในรูปที่6 จะสังเกตได้ว่าทุกแบบจำลองสามารถให้ผลจำลองใกล้เคียงกับผลการทดสอบ สำหรับวัสดุยางเติมผงคาร์บอนได้แสดงไว้ในรูปที่7 พบว่าแบบจำลองทุกแบบสามารถให้ผลจำลองใกล้เคียงกับผลการทดสอบยกเว้น Neo-Hookean และ Mooney-Rivlin เมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์ชุดเดียวกันนี้มาทำนายผลการทดสอบแบบดึงสองแกนเท่ากันแล้วมาเทียบกับผลการทดสอบจริงดังได้แสดงไว้ในรูปที่8 และ รูปที่9 จะเห็นว่าในกรณีของวัสดุยางธรรมชาติ แบบจำลองทุกแบบจำลองให้แนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดใกล้เคียงกัน ยกเว้น Polynomials (n=2) และแบบจำลอง Ogden (n=3) ซึ่งเป็นแบบจำลองแบบ Phenomenological Based ให้ผลที่ไม่เสถียร (Unstable) โดยให้ค่าความเค้นเป็นลบในขณะที่ยื่น

ทดสอบรับโหลดการดึงแบบสองแกนเท่ากัน ทั้งนี้ไม่มีแบบจำลองใดให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลทดสอบ สำหรับยางธรรมชาติผสมผงคาร์บอนดำแบบจำลองแต่ละประเภทก็ให้ผลทำนายที่มีแนวโน้มที่แตกต่างกันไป โดยไม่มีแบบจำลองใดที่ให้ผลที่ใกล้เคียงผลการทดสอบ

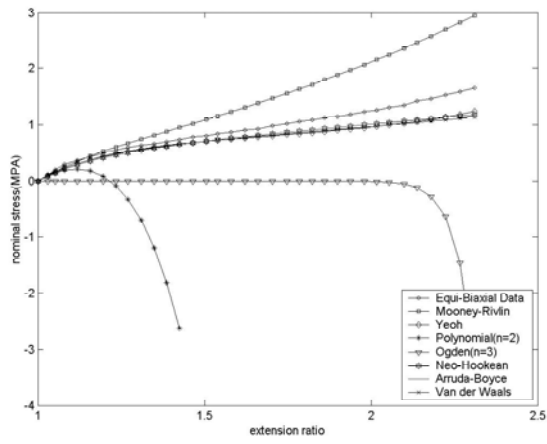
เมื่อนำผลการทดสอบทั้งแบบดึงแกนเดียวและดึงสองแกนเท่ากันมาใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองต่างๆแล้วนำมาจำลองผลการทดสอบแบบดึงแกนเดียวและสองแกนเท่ากันดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 10 ถึงรูปที่13 พบว่า สำหรับวัสดุยางธรรมชาติทุกแบบจำลองที่ใช้ยกเว้นแบบจำลอง Yeoh และ Neo-Hookean สามารถที่จะให้ผลการจำลองใกล้เคียงกับผลทดสอบทั้งสองแบบ สำหรับวัสดุยางธรรมชาติเติมผงคาร์บอนดำแบบจำลองที่ให้ผลการจำลองใกล้เคียงกับผลทดสอบทั้งสองแบบคือ Polynomial (n=2) Ogden (n=3) และ Van der Waals



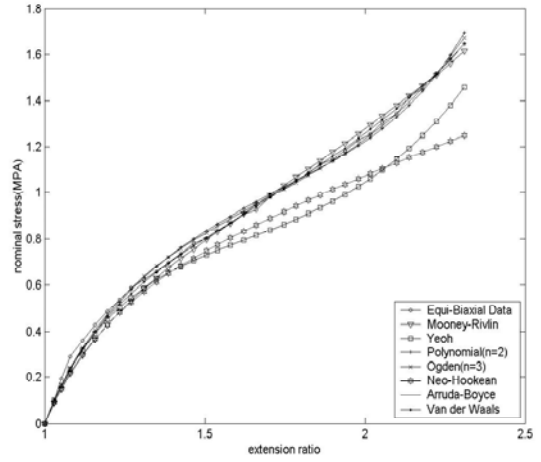
รูปที่6 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบการดึงแบบแกนเดียวของยางธรรมชาติและผลจำลองจากแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่ได้ค่าสัมประสิทธิ์จากข้อมูลการทดสอบการดึงแกนเดียวเพียงอย่างเดียว



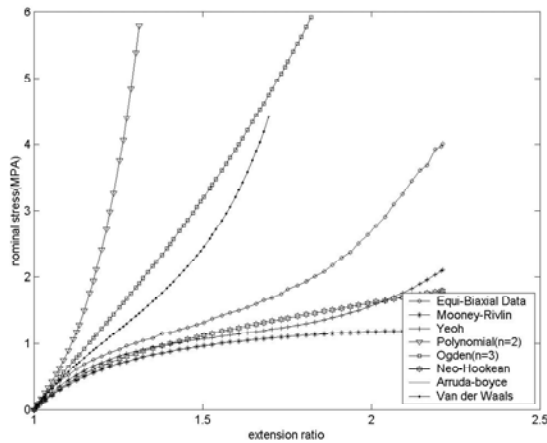
รูปที่7 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบการดึงแบบแกนเดียวของยางธรรมชาติเติมผงคาร์บอนและผลจำลองจากแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่ได้ค่าสัมประสิทธิ์จากข้อมูลการทดสอบการดึงแกนเดียวเพียงอย่างเดียว



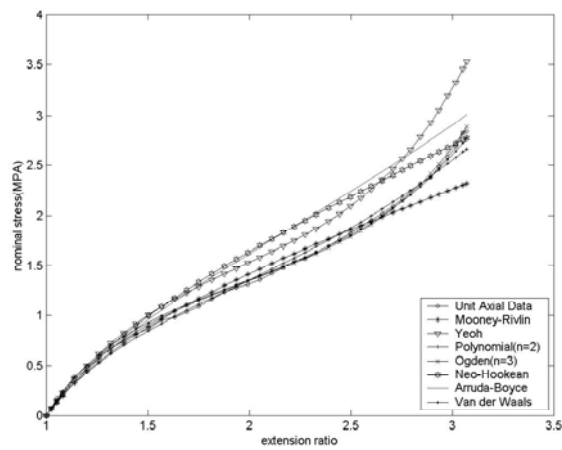
รูปที่8 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบการดึงแบบสองแกนเท่ากันของยางธรรมชาติและผลจำลองจากแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่ได้ค่าสัมประสิทธิ์จากข้อมูลการทดสอบการดึงแกนเดียวเพียงอย่างเดียว



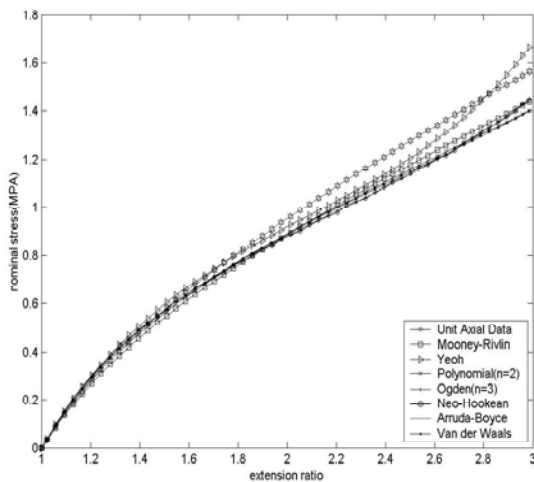
รูปที่11 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบการดึงแบบสองแกนเท่ากันของยางธรรมชาติและผลจำลองจากแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่ได้ค่าสัมประสิทธิ์จากข้อมูลการทดสอบการดึงแกนเดียวและแบบสองแกนเท่ากัน



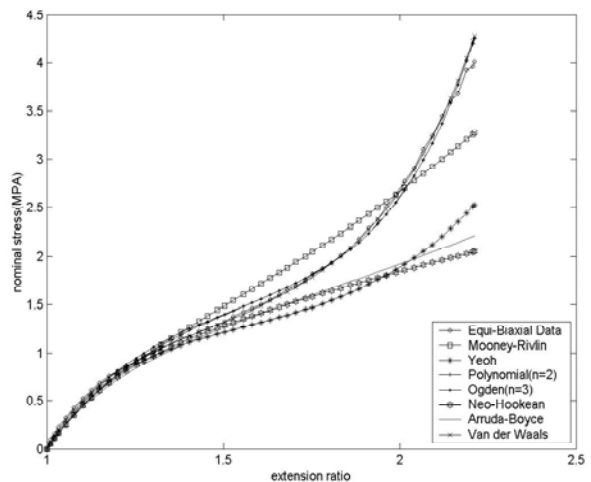
รูปที่9 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบการดึงแบบสองแกนเท่ากันของยางธรรมชาติเติมผงคาร์บอนและผลจำลองจากแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่ได้ค่าสัมประสิทธิ์จากข้อมูลการทดสอบการดึงแกนเดียวเพียงอย่างเดียว



รูปที่12 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบการดึงแบบแกนเดียวของยางธรรมชาติผสมผงคาร์บอนและผลจำลองจากแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่ได้ค่าสัมประสิทธิ์จากข้อมูลการทดสอบการดึงแกนเดียวและแบบสองแกนเท่ากัน



รูปที่10 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบการดึงแบบแกนเดียวของยางธรรมชาติและผลจำลองจากแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่ได้ค่าสัมประสิทธิ์จากข้อมูลการทดสอบการดึงแกนเดียวและแบบสองแกนเท่ากัน



รูปที่13 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบการดึงแบบสองแกนเท่ากันของยางธรรมชาติผสมผงคาร์บอนและผลจำลองจากแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่ได้ค่าสัมประสิทธิ์จากข้อมูลการทดสอบการดึงแกนเดียวและแบบสองแกนเท่ากัน

ทั้งนี้ แบบจำลอง Van der Waals ให้ผลจำลองที่ใกล้เคียงกับผลทดสอบแบบดึงสองแกนเท่ากันมากที่สุดและมีจำนวนค่าสัมประสิทธิ์ที่ต้องหาน้อยกว่าแบบจำลองสองแบบข้างต้น

5. สรุป

การศึกษานี้คณะผู้วิจัยได้สร้างชุดอุปกรณ์ที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบแบบดึงสองแกนเท่ากันสำหรับชิ้นทดสอบแบบแผ่น อุปกรณ์ที่ได้สร้างขึ้นสามารถใช้ร่วมกับเครื่องทดสอบและ VDO Extensometer ที่ใช้สำหรับการทดสอบแบบดึงแกนเดียว การศึกษานี้ได้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่หาจากผลการทดสอบทั้งแบบดึงแกนเดียวไม่สามารถที่จะอธิบายพฤติกรรมทางกลของวัสดุประเภทยางทั้งสองประเภทที่ใช้ในการศึกษานี้ในภาวะความเค้นแบบดึงสองแกนเท่ากันได้และแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกแบบ Phenomenological based บางประเภทยังให้ผลการจำลองที่ไม่เสถียร ดังนั้นในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกต่างๆจำเป็นต้องใช้ผลการทดสอบในภาวะความเค้นมากกว่าหนึ่งภาวะ และเมื่อใช้ผลการทดสอบทั้งแบบดึงแกนเดียวและสองแกนเท่ากันในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก พบว่าแบบจำลอง Van der waals สามารถอธิบายพฤติกรรมทางกลของวัสดุยางทั้งแบบเติมและไม่เติมผงคาร์บอนดำใช้ค่าทั้งสองภาวะความเค้นได้ใกล้เคียงกับผลทดสอบมากโดยมีจำนวนค่าสัมประสิทธิ์ที่ต้องหาเพียงสี่ค่า

6. เอกสารอ้างอิง

1. Treloar, L.R.G. "The Physics of Rubber Elasticity." 3rd.Ed, oxford, Clarendon Press, 1975.
2. Mary, C.Boyce., and Ellen, M.Arruda. "Constitutive Model of Rubber ElasticityA Review." Rubber CHEM. Technol. Vol.73, 2000, pp 504-523.
3. Yeoh, O.H. "Some Forms of The Strain Energy Function For Rubber." Rubber CHEM. Technol. Vol.66, 1993, pp754-771.
4. Seibert, D.J., and Schoche, N. "Direct Comparison of Some Recent Rubber Elasticity Model." Rubber CHEM. Technol. Vol.73, 2000, pp366-384.
5. Mary, C.Boyce. "Direct Comparison of The Gent and Arruda-Boyce Constitutive Model of Rubber Elasticity." Rubber CHEM. Technol. Vol.69, 1996, pp781-785.
6. Yeoh, O.H. "On The Ogden Strain-Energy Function." Rubber CHEM. Technol. Vol.70, 1997, pp175-182.
7. Shariff, M.H.B.M. "Strain Energy Function for Filled and Unfilled Rubberlike Material." Rubber CHEM. Technol. Vol.73, 2000, pp1-18.