

การทดสอบสมบัติของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกเพื่อใช้ในต้นแบบไฟไนต์เอลิเมนต์

Hyperelastic Material Testing for Finite Element Modeling

วิภู พิวัฒน์¹ เจริญยุทธ เดชวายุกุล¹ วิริยะ ทองเรือง¹ ชลดา เลวิส²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

²สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

โทร 0-74287035 โทรสาร 0-74212893 E-mail: wipoo.p@egat.co.th

Wipoo Piwat¹ Charoenyut Decwayukul¹ Wiriya Thongraung¹ Chonlada Lewis²

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University,

²Polymer Science Program, Faculty of Science, Prince of Songkla University,

Hat Yai, Songkla, 90112, Thailand

Tel: 0-74287035 Fax: 0-74212893 E-mail: wipoo.p@egat.co.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดในรูปแบบของ Mooney-Rivlin Model ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก สำหรับการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการทดสอบวัสดุในห้องปฏิบัติการในลักษณะต่างๆคือ uniaxial tension testing, uniaxial compression testing และ planar testing และนำผลการทดสอบมาคำนวณหาสมบัติเฉพาะของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก ซึ่งพบว่าเมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้จากโปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์และโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีความแตกต่างกันน้อย และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบตัวอย่างครั้งนี้ พบว่าสามารถใช้ได้ถูกต้องในช่วง อัตราการยืดตัวน้อยกว่า 2.7 หรือมีความเค้นน้อยกว่า 2.3 เมกกะปาสคาล

Abstract

The objective of this study is the assessment of the coefficients of Mooney-Rivlin strain energy function. These coefficients are used to define the strain energy function of hyperelastic material such as rubber or elastomer in FEA models. In this study, the rubber specimens are tested in various types such as uniaxial tension-compression and planar in order to obtain stress & stretch ratio curves. Those curves are then calculated for coefficients by ABAQUS (Commercial FEA Software) and by analytical method (using MATHEMATICA). It is found that there is not important difference between those calculation. However, the stress and stretch ratio curves between

calculations and experiments become considerable error at stretch ratio exceeding 2.7 or stress exceeding 2.3 MPa.

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการนำวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกเช่น ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์มาใช้ในงานวิศวกรรมมากขึ้น มีผลิตภัณฑ์หลายอย่างที่มาจากวัสดุเหล่านี้เช่น ชุดยางรองแท่นเครื่องยนต์ ชุดข้อต่อยางในอุตสาหกรรมรถยนต์ ยางรองคอกสะพาน และข้อต่อที่ยึดงานด้านชีวแพทย์ ฯลฯ การออกแบบผลิตภัณฑ์เพื่อให้ยืดหยุ่นและแข็งแรงเหมาะสมกับการใช้งานต้องคำนึงถึง รูปร่างผลิตภัณฑ์และสมบัติทางกลของยางที่สำคัญในการออกแบบคือ การวิเคราะห์ความเค้น ที่จะเกิดขึ้นในเนื้อเยื่อจะเป็นประโยชน์ต่อการทำนายการวิบัติของผลิตภัณฑ์ การวิเคราะห์ความเค้นของผลิตภัณฑ์ที่ทำจากยางในไม่สามารถทำได้โดยตรงด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากสมบัติทางกลของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกเป็นแบบไม่เชิงเส้น สามารถคืนรูปร่างเดิมได้ถึงแม้จะมีการยืดตัวหรือมีความเครียดเกิน 100 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งยังมีสมบัติการอัดตัวไม่ได้สูง (High Incompressible Material) จากสาเหตุดังกล่าววิธีคำนวณทางคอมพิวเตอร์ เช่น วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis, FEA) เป็นทางเลือกสำหรับการวิเคราะห์และช่วยออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ทำจากวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก โดยต้องคำนึงถึงช่วงความเค้นและอัตราการยืดตัวที่เหมาะสม

2. วัตถุประสงค์

2.1 โมเดลของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการยืดตัวของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกในแนวต่างๆ สามารถกำหนดอยู่ในรูปแบบของสมการพลังงาน

ความเครียดซึ่งเป็นพลังงานที่สะสมในเนื้อวัสดุต่อหน่วยปริมาตร โดยกำหนดให้เป็นฟังก์ชันของความเครียดเพื่อใช้กับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สมการพลังงานความเครียดที่ใช้กันอยู่มีหลายรูปแบบ ที่นิยมอยู่ในรูปแบบของโพลิโนเมียล (Polynomial form) การกำหนดพลังงานความเครียดในรูปแบบนี้คือ

$$U = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J_{el} - 1)^{2i} \quad (1)$$

เมื่อ U คือ พลังงานความเครียดในเนื้อยาง (Strain Energy) มีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด, J_{el} คือ อัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงของปริมาตร (Elastic Volume Ratio), N คือ ตัวแปรที่กำหนดดีกรีของโพลิโนเมียล, D_i คือ สมบัติการอัดตัวไม่ได้ของวัสดุ, C_{ij} คือค่าคงที่ที่เป็นสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุ และ I_1 และ I_2 คือ first and second deviatoric strain invariants เมื่อ

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2$$

โดย λ_1 , λ_2 และ λ_3 คือ ค่าอัตราการยืดตัวของยางในแนวต่างๆ (Stretch ratio) มีค่าเท่ากับหนึ่งบวกความเครียดเมื่อรับแรงดึง และเท่ากับหนึ่งลบความเครียดเมื่อรับแรงอัด

การกำหนดพลังงานความเครียดในรูปแบบของโพลิโนเมียลสามารถลดรูปลงได้เมื่อพิจารณาให้ยางเป็นวัสดุอัดตัวไม่ได้สูง ซึ่งค่า D_i มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นสมการ (1) ลดรูปเป็น

$$U = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (2)$$

สมการ (2) เรียกว่า Moony-Rivlin Material Model ซึ่งนำมาใช้กับต้นแบบไฟไนต์เอลิเมนต์

2.2 การหาสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก, C_{ij}

สมบัติเฉพาะของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก แสดงในเทอมของสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียด สำหรับ Moony-Rivlin Material Model สัมประสิทธิ์ดังกล่าวคือ C_{10} และ C_{01} หาได้จากการทดสอบยางในลักษณะต่างๆ ซึ่งได้แก่ Uniaxial testing และ Planar testing โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากผลการทดสอบจะอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และ อัตราการยืดตัว สมการ (3,4,5) อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และอัตราการยืดตัว เมื่อวัสดุได้รับแรงในลักษณะต่างๆ สำหรับ Moony-Rivlin Material Model คือ

Uniaxial Load : ($\lambda_1 = \lambda_U, \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda^{-1/2}$)

$$T_U = 2 \left(C_{10} + \frac{C_{01}}{\lambda_U} \right) \left(\lambda_U - \frac{1}{\lambda_U^2} \right) \quad (3)$$

Equibiaxial Load : ($\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_B, \lambda_3 = 1/\lambda_B^2$)

$$T_B = 2 \left(C_{10} + \lambda_B^2 C_{01} \right) \left(\lambda_B - \frac{1}{\lambda_B^3} \right) \quad (4)$$

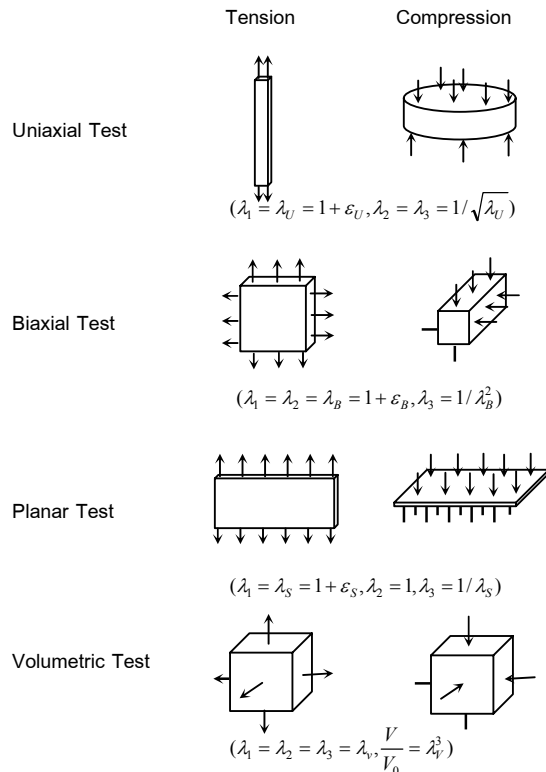
Planar (pure shear) Load : ($\lambda_1 = \lambda_S, \lambda_2 = 1, \lambda_3 = 1/\lambda_S$)

$$T_S = 2(C_{10} + C_{01}) (\lambda_S - \lambda_S^{-3}) \quad (5)$$

โดย T_U , T_B และ T_S คือค่าความเค้นในทิศทางเดียวกับแรง λ_U , λ_B และ λ_S คืออัตราการยืดตัวในทิศทางเดียวกับแรง

2.4 การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก

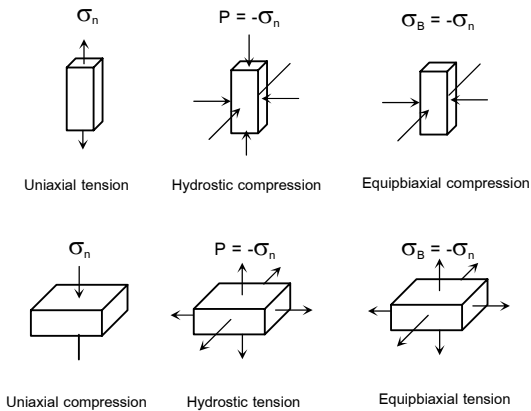
การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียด ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด สามารถทำได้โดยนำชิ้นงานทดสอบมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และอัตราการยืดตัวของยางในลักษณะการทดสอบแบบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยความสัมพันธ์เหล่านี้จะถูกนำมากำหนดพฤติกรรมของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกในต้นแบบไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 1 ภาพแสดงการทดสอบยางในลักษณะต่างๆ [3]

จากการทดสอบวัสดุเชิงกลในลักษณะต่างๆ การทดสอบที่ใช้กำหนดพฤติกรรมของวัสดุประกอบด้วย Uniaxial Tension Test,

Uniaxial Compression Test, Biaxial Tension Test, Planar Test และ Volumetric Test และเนื่องจากวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกส่วนใหญ่มีสมบัติการอัดตัวไม่ได้สูง ทำให้ไม่จำเป็นต้องทดสอบ Volumetric Test และเมื่อชิ้นงานได้รับแรงในลักษณะ Hydrostatic load จะพบว่าจะไม่เกิดการเปลี่ยนรูป (Deformation) เมื่อแรงหรือความเค้นเปลี่ยนไป ทำให้สามารถเทียบเท่าพฤติกรรมจากการทดสอบลักษณะต่างดังรูปที่ 2 ดังนั้นการทดสอบที่จำเป็นในการกำหนดพฤติกรรมของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกจึงประกอบด้วย Uniaxial Tension Test, Uniaxial Compression และ Planar Test



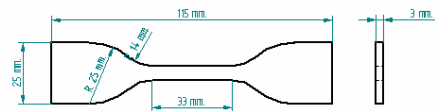
รูปที่ 2 แสดงการเทียบการทดสอบเมื่อวัสดุมีสมบัติอัดตัวไม่ได้[2]

3. วิธีการทดสอบ

ในการทดสอบครั้งนี้วัสดุไฮเปอร์อีลาสติกที่ใช้เป็น Rubber Sheet ทำจากยางธรรมชาติ (Natural Rubber) ซึ่งมีส่วนผสมของ NR และ SBR โดยมีกรทดสอบดังนี้

3.1 Uniaxial Tension Test

สำหรับการทดสอบ Uniaxial Tension ใช้ข้อกำหนดตามมาตรฐานของ ASTM D412-80 ชิ้นงานอยู่ในรูปของ Dumbbell Specimen จะถูกดึงด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุด้วยอัตราการดึงคงที่ 500 มิลลิเมตรต่อนาที ค่าความเค้นและอัตราการยืดตัวจะถูกบันทึกเมื่อแรงดึงเปลี่ยนไป



รูปที่ 3 ชิ้นงานทดสอบแบบ Dumbbell Specimen

3.2 Uniaxial Compression Test

สำหรับการทดสอบ Uniaxial Compression ใช้ข้อกำหนดตามมาตรฐานของ ASTM D 395-78 ชิ้นงานอยู่ในรูปของ Cylindrical Disk ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 29 มิลลิเมตร หนา 12.5 มิลลิเมตร จะถูกนำมาทดสอบด้วยแรงอัดด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุด้วยอัตรา

การอัดคงที่ 100 มิลลิเมตรต่อนาที โดยมีผิวของหัวกดชิ้นงานเป็นโครเมียม และใช้สารหล่อลื่นระหว่างชิ้นงานและหัวกดเพื่อลดแรงเสียดทานให้เหลือน้อยที่สุด ค่าความเค้น และอัตราการยืดตัวจะถูกบันทึกเมื่อแรงอัดเปลี่ยนไป

3.3 Planar (Pure Shear) Test

ในการทดสอบ Planar Test ชิ้นงานทดสอบเป็นแผ่นบางด้านที่รับแรงดึงมีความยาวของชิ้นงานมากกว่าความกว้างไม่น้อยกว่า 10 เท่า ในการทดสอบนี้ใช้ชิ้นงานด้านที่รับแรงยาว 200 มิลลิเมตร ความกว้าง 20 มิลลิเมตร และหนา 3 มิลลิเมตร โดยนำมาทดสอบด้วยแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุด้วยอัตราการอัดคงที่ 200 มิลลิเมตรต่อนาที ค่าความเค้นและอัตราการยืดตัวจะถูกบันทึกเมื่อแรงดึงเปลี่ยนไป

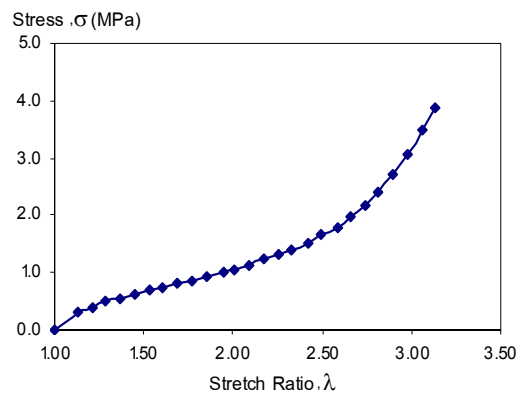


รูปที่ 4 การทดสอบ Planar Test

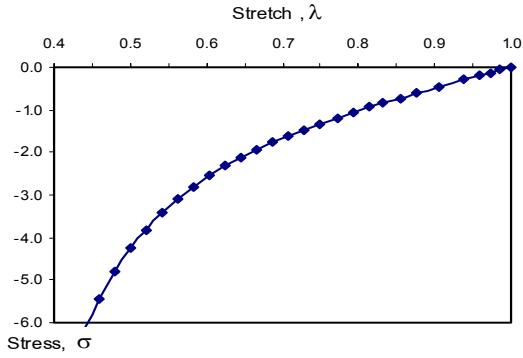
4. ผลการทดสอบและการหาสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียด

4.1 ผลการทดสอบ

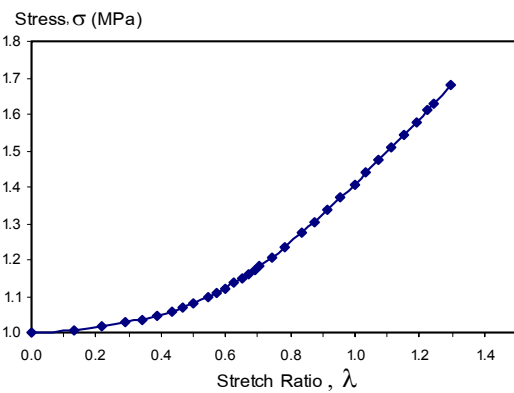
ผลการทดสอบ Uniaxial Tension Test, Uniaxial Compression และ Planar Test สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความเค้นและอัตราการยืดตัว ได้ดังรูปที่ 5,6,7



รูปที่ 5 ผลการทดสอบ Uniaxial Tension Test



รูปที่ 6 ผลการทดสอบ Uniaxial Compression Test



รูปที่ 7 ผลการทดสอบ Planar Tension Test

4.2 การหาสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียด

การคำนวณหาสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบวัสดุเพื่อใช้กำหนดพฤติกรรมของวัสดุในต้นแบบไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถคำนวณได้จากโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ และโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์

4.2.1 การคำนวณจากโปรแกรมทางคณิตศาสตร์

ในการทดสอบครั้งนี้ใช้โปรแกรม Mathematica โดยนำข้อมูลจากการทดสอบมาทำการ Fit Curve หาสัมประสิทธิ์ ข้อมูลจาก Uniaxial Test (Tension, Compression) ใช้ Fit Curve ตามสมการ (3) ข้อมูลจาก Planar Test ใช้ Fit Curve ตามสมการ (5) ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 1 ผลการคำนวณด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์

Test Data	C_{10} (MPa)	C_{01} (MPa)
Tension	0.776	-0.865
Compression	0.567	0.027
Tension and Compression	0.386	0.115

4.2.2 การคำนวณจากโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการทดสอบครั้งนี้ใช้โปรแกรม Abaqus โดยป้อนข้อมูลจากการทดสอบในโปรแกรม เพื่อทำการประมวลผล

ตารางที่ 2 ผลการคำนวณด้วยโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์

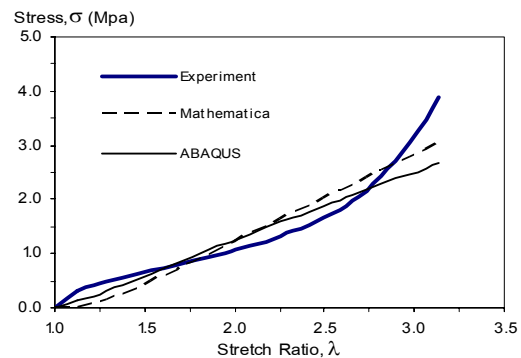
Test Data	C_{10} (MPa)	C_{01} (MPa)
Tension	0.587	-0.458
Compression	0.656	-0.020
Tension and Compression	0.289	0.182
Tension and Planar	0.326	0.139
Compression and Planar	0.320	0.155
Tension, Compression and Planar	0.3019	0.170

ในการหาสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดโดยใช้การทดสอบ Planar Test อย่างเดียวไม่สามารถทำได้ทั้งโดยการคำนวณได้จากโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ และโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งจากสมการ(5) จะพบว่าค่าคงที่ของสมการเป็นผลบวกของค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดทั้งสองตัว

5 การวิเคราะห์ผล

5.1 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้จากโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ และโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์

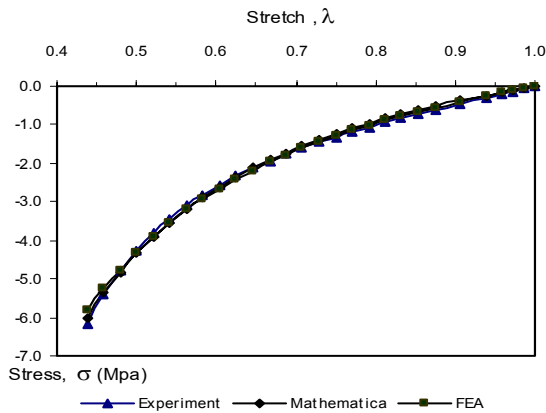
การนำค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้จากโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ และโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จากข้อมูลการทดสอบ Tension อย่างเดียว มาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบตามรูปที่ 8 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้มีความแตกต่างกันน้อยคือ C_{10} ต่างกัน 0.18 เมกกะปาสคาล, C_{01} ต่างกัน 0.4 เมกกะปาสคาล และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลการทดสอบ จนถึงค่าอัตราการยืดตัวประมาณ 2.7 แนวโน้มไม่เป็นไปตามผลการทดสอบ



รูปที่ 8 ผลของค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จาก Tension test

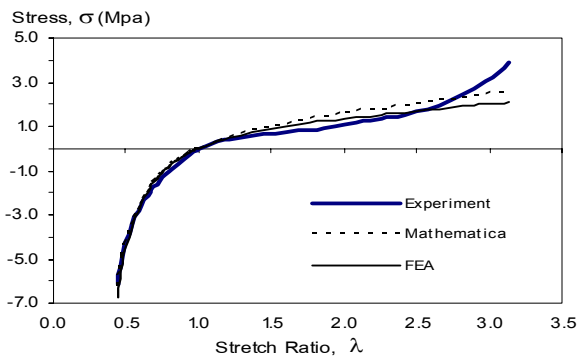
กรณีการใช้ข้อมูลจากการทดสอบ Compression อย่างเดียวตามรูปที่ 9 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้มีความแตกต่างกันน้อยมากคือ C_{10} ต่างกัน 0.001 เมกกะปาสคาล, C_{01} ต่างกัน 0.007 เมกกะ

พลาสติก และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลการทดสอบตลอดช่วงทดสอบ



รูปที่ 9 ผลของค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดสอบ Compression test

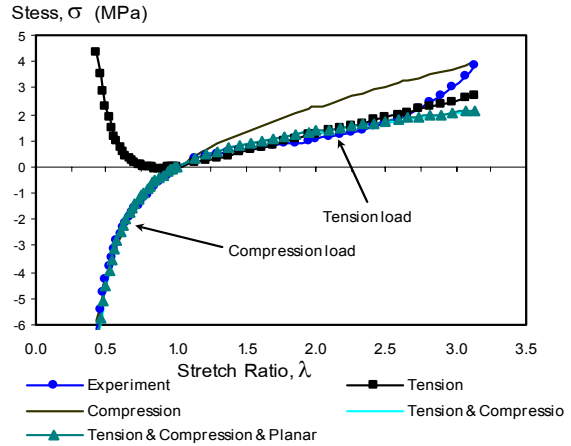
การใช้ข้อมูลจากการทดสอบ Tension และ Compression ร่วมในการคำนวณตามรูปที่ 10 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้มีความแตกต่างกันน้อยมากคือ C_{10} ต่างกัน 0.097 เมกกะปาสคาล, C_{01} ต่างกัน 0.067 เมกกะปาสคาล และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลการทดสอบตลอดช่วงทดสอบจนถึงค่าอัตราการยืดตัว ประมาณ 2.7 แนวโน้มไม่เป็นไปตามผลการทดสอบ



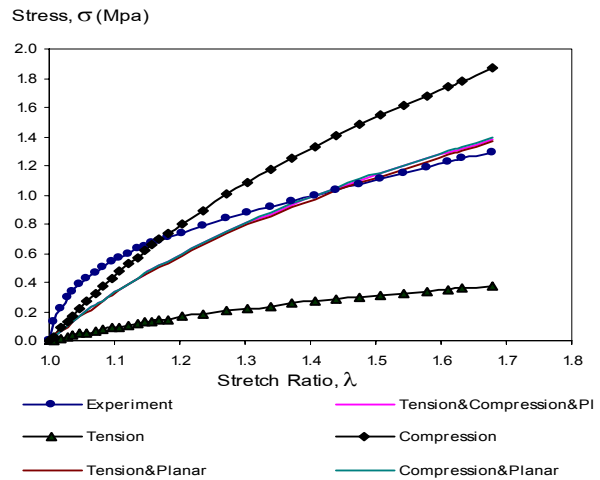
รูปที่ 10 ผลของค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดสอบ Tension และ Compression Test

5.2 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดสอบแต่ละแบบกับผลการทดสอบ

ในการทดสอบสมบัติวัสดุเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์อาจทำการทดสอบบางชนิดและนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณ ซึ่งจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ต่างกันไป และนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดสอบตามรูปที่ 11 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดสอบ Tension ไม่สามารถนำไปใช้กับงานที่รับแรงกดได้ และสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดสอบ Compression ไม่เหมาะสมที่จะใช้กับงานที่รับแรงดึง และจากรูปที่ 12 พบว่าการทดสอบเฉพาะ Tension หรือ Compression ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้กับงานที่รับแรงเฉือน



รูปที่ 11 ผลของค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดสอบแบบต่างๆ กับผลการทดสอบ Uniaxial Test



รูปที่ 12 ผลของค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดสอบแบบต่างๆ กับผลการทดสอบ Planar Test

6. สรุป

- ในการหาค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก เพื่อใช้ในต้นแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถหาได้ด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ และด้วยโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งผลที่ได้มีความแตกต่างกันน้อย
- การใช้ข้อมูลจากการทดสอบ Tension หรือ Compression เพียงอย่างเดียว เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดไม่เหมาะสมสำหรับใช้ในต้นแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ลักษณะงานมีการรับแรงเฉือน สัมประสิทธิ์จากการทดสอบเฉพาะ Tension ไม่สามารถใช้ได้กับงานที่รับแรงกด สัมประสิทธิ์จากการทดสอบเฉพาะ Compression ไม่เหมาะสมกับงานที่รับแรงดึง ส่วนการใช้ข้อมูลจากการทดสอบทั้ง Tension, Compression และ Planar Test เหมาะสมกับการใช้งานที่รับทั้งแรงดึง แรงกด และแรงเฉือน

3. การจะนำค่าสัมประสิทธิ์ไปใช้ในต้นแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ควร จะต้องทำการเปรียบเทียบเกี่ยวกับข้อมูลผลการทดสอบก่อนเพื่อหาช่วงของ ความเค้นและการเปลี่ยนรูปที่เหมาะสมกับการใช้งาน เช่นจากตัวอย่าง ยางที่ใช้ทดสอบในครั้งนี้นับว่ากรณีรับแรงดึงสามารถใช้งานได้ในช่วง ความเค้น 0-2 เมกกะปาสคาล และอัตราการยืดตัว 1-2.7

เอกสารอ้างอิง

- [1] Abraham Pannikotto, Josph A. Seile, and Jerry J. Leyden“,Non-Linear Finite Element Analysis for Gaskets and Seals”,DE-Vol. 100,Reliability, Stress Analysis, and Failure Prevention Aspects of Adhesive and Bolted Joints, Rubber Components,and Composite Springs,ASME 1998.
- [2] C. Moreau, S. Thuillier, G. Rio and V. Grolleau, “The Mechanical Behavior of A Slightly Compressible Rubber-Like Material : Correlation of Simulation and Experiments”,Rubber Chemistry and Technilogy, Vol.72, pp 269-282
- [3] “ABAQUS/Standard User’ Manual”, Version 5.8, Vol.5.8