

การวิเคราะห์หาค่าโมดูลัสแรงเฉือนในช่วงต้นของยางธรรมชาติโดยใช้
แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกในกรณีของการทดสอบการดึงในแนวแกนเดียว
**Analysis of Initial Shear Modulus of Natural Rubber Using Hyperelastic Model
in case of Uniaxial Tensile Testing**

บุญยพรรณ อนุชน¹, ณิชวิทย์ พรหมมา^{2*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ. เชียงใหม่ 50200

ติดต่อ: โทรศัพท์: 053 944 146 ต่อ 981 , โทรสาร: 053 944 145

E-mail: b.anuchon@gmail.com¹, nano_504@hotmail.com^{2*}

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงการศึกษาวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกของวัสดุยางธรรมชาติจากผลการทดสอบการดึงในแนวแกนเดียว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าโมดูลัสแรงเฉือนในช่วงต้น (Initial Shear Modulus) โดยเลือกใช้แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกของมูนี การหาค่าพารามิเตอร์จากฟังก์ชันพลังงานความเครียดจะใช้ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและระยะยืดในกรณีของการทดสอบการดึงในแนวแกนเดียว

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ จำนวน 5 ชิ้นงาน จากวัสดุยางธรรมชาติแบบแผ่นเรียบ ความหนา 2 มิลลิเมตร ให้มีลักษณะแบบดัมเบลตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D412 จากนั้นทำการทดสอบดึงในแนวแกนเดียวเพื่อให้ได้ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและระยะยืด นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ หาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกโดยคำนวณจากโมดูลัสแรงเฉือนในช่วงต้นด้วยวิธีการปรับเส้นโค้ง (Curve Fitting) การศึกษาครั้งนี้เลือกใช้ข้อมูลในช่วงความเครียดน้อยๆ (small strain) และเลือกการปรับเส้นโค้งในช่วงข้อมูลทดสอบที่ 0-10 เปอร์เซ็นต์ความเครียด พบว่าได้ค่าโมดูลัสแรงเฉือนในช่วงต้นของวัสดุยางธรรมชาติ เฉลี่ยเท่ากับ 1.256 ± 0.094 MPa ซึ่งจากการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้และแบบจำลองของมูนี พบว่าแบบจำลองนี้สามารถอธิบายพฤติกรรมความเค้นความเครียดของยางธรรมชาติภายใต้การดึงในแนวแกนเดียวได้เป็นอย่างดี

คำหลัก: โมดูลัสแรงเฉือน, วัสดุยางธรรมชาติ, การเสียรูปขนาดใหญ่, แบบจำลองของมูนี

Abstract

The aim of this research is to determine constitutive parameters of natural rubber using hyperelastic model from the results of uniaxial test. The objective of this study is to analyst the value of the initial shear modulus of natural rubber from obtained parameters of Mooney hyperelastic model which occur in strain energy function. The relation between tensile strength and stretch in case of uniaxial testing is investigated.

Five specimens are prepared from natural rubber sheets with 2 millimeters of thickness. The actual geometry of the specimen is dumbbell shape following with ASTM D412 standard testing. Several uniaxial tests give the resulting displacement/strain maps. A simple tool, namely, Curve Fitting is used to

AMM-214

characterize two parameters of Mooney model. Mechanical response in case of small strain (0 – 10% strain) is chosen. The initial shear modulus of natural rubber in this case is 1.256 ± 0.094 MPa approximately. We also found that the Mooney model can provide realistic stress-strain prediction in uniaxial deformation mode.

Keywords: Shear Modulus, Natural Rubber, large deformations, Mooney Model

1. บทนำ

ยางพาราหรือยางธรรมชาติ เป็นผลิตภัณฑ์มูลฐานของผลิตภัณฑ์ต่างๆ โดยยางธรรมชาติเป็นวัสดุพอลิเมอร์ชนิดหนึ่ง ซึ่งมีสมบัติที่โดดเด่น ในด้านของความยืดหยุ่น (Elasticity) [1] มีรูปแบบพฤติกรรมการเสียรูปแบบยืดหยุ่นขนาดใหญ่ (Large elastic deformation) และเป็นแบบยืดหยุ่นแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Elastic) กล่าวคือ ภาวะที่กระทำกับวัสดุไม่ได้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับการเสียรูปที่เกิดขึ้น จากการค้นคว้าเพื่อนำไปสู่การแก้ปัญหาดังกล่าว ในกรณีที่เกิดการเสียรูปขนาดใหญ่ ทฤษฎีต่างๆ ได้ถูกพัฒนาขึ้น ในรูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่หลากหลาย อย่างต่อเนื่อง ซึ่งเรียกว่าแบบจำลองวัสดุแบบไฮเปอร์อีลาสติก (Hyperelastic Material Model) โดย Mooney [2] ได้แสดงแบบจำลองของการเสียรูปของวัสดุพอลิเมอร์ Rivlin [3],[4] ประยุกต์ใช้แบบจำลองทำนายพฤติกรรมของการเสียรูปขนาดใหญ่ในวัสดุประเภทยางโดยใช้ข้อมูลความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองของ Treloar Blatz-Ko [5] ได้กล่าวถึงฟังก์ชันพลังงานความเครียด (Strain energy function; W) เพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุประเภทยางโดยเน้นวัสดุที่รับแรงกด Order [6],[7] ได้สร้างฟังก์ชันพลังงานความเครียด (Strain energy function) ที่ซับซ้อนกว่าของ Blatz-Ko เพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุสำหรับพฤติกรรมการเสียรูปขนาดใหญ่แบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear large elastic deformations) Yeoh [8] ได้นำเสนอทฤษฎีฟังก์ชันพลังงานความเครียด (Strain energy function) เพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมการเสียรูปของ

วัสดุประเภทยางผสมคาร์บอน (Carbon-black rubber) และ Arruda and Boyce [9] ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับอธิบายพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุประเภทยาง ภายใต้พื้นฐานของโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เหล่านี้สามารถนำมาใช้อธิบายถึงคุณลักษณะพิเศษของวัสดุ โดยใช้รูปแบบเฉพาะของฟังก์ชันพลังงานความเครียด

โดยในการศึกษานี้ ได้เลือกใช้แบบจำลองของมูนนี่ (Mooney Model) เป็นแบบจำลองที่มีสัมประสิทธิ์ 2 ค่า และเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับทำนายพฤติกรรมของวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติกที่มีการเสียรูปปานกลาง (ประมาณ 300-400 % strain) [10] นอกจากนี้ แบบจำลองดังกล่าวสามารถนำค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้ในช่วงต้นพฤติกรรมการเสียรูป หรือช่วง Small Strain ที่มีลักษณะการเสียรูปคล้ายกับช่วง Elastic มาหาค่าโมดูลัสแรงเฉือน (Shear Modulus) ซึ่งเป็นกรณีพิเศษสำหรับแบบจำลองนี้ ค่าโมดูลัสแรงเฉือนดังกล่าวนี้อาศัยข้อมูลการทดสอบวัสดุ จากการทดสอบการดึงในแนวแกนเดียว (Uniaxial Testing) โดยค่าโมดูลัสแรงเฉือนนี้ เป็นค่าที่แสดงถึงความคงทนของวัสดุ เมื่อได้รับภาระการเฉือน ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการทำนายการเสียหายของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการออกแบบต่อไป

2. ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 พฤติกรรมทางกลของวัสดุ

โดยทั่วไปวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก (Hyperelastic Material) [11] สามารถอธิบายพฤติกรรมการเสียรูป

AMM-214

ของวัสดุซึ่งอยู่ในรูปของเทนเซอร์ของการเสียรูป ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด สามารถแสดงความสัมพันธ์ เมื่อพิจารณาในกรณีที่วัสดุเสียรูปแล้ว ได้ดังนี้

$$\sigma = 2B \frac{\partial W}{\partial B} - pI \quad (1)$$

เมื่อ σ คือ เทนเซอร์ของความเค้นเคอซี (Cauchy stress tensor)

W คือ ฟังก์ชันพลังงานความเครียด

B คือ left Cauchy–Green deformation tensor และ

p คือ hydrostatic pressure

โดยที่จะอธิบายถึงการเสียรูปของเอลิเมนต์ เมื่อ λ_i ถูกเรียกว่า ระยะยืดหลัก (Principle stretch) ดังนั้น left Cauchy–Green deformation tensor; B จึงสามารถเขียนได้ ดังนี้

$$B = \begin{bmatrix} \lambda_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

โดยระยะยืดหลัก ได้ถูกนำไปสัมพันธ์กับ principle invariants, I ของเทนเซอร์ของการเสียรูป คือ

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = J^2 \end{aligned} \quad (3)$$

เมื่อ J คือ Jacobian transformation ซึ่งถ้าวัสดุมีพฤติกรรมแบบบีบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible material) จะสมมติให้ 3^{rd} principle invariant, นั่นคือ I_3 มีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้น จากสมการที่ (1) ในกรณีของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก เมื่อปรับข้อมูลให้เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในการคำนวณหาความเค้นเคอซีในเทอมของ principle invariants ได้ดังนี้

$$\sigma = -pI + 2 \frac{\partial W}{\partial I_1} - 2 \frac{\partial W}{\partial I_2} B^{-1} \quad (4)$$

สำหรับทิศทางที่ 1 หรือ i , ความเค้นเคอซีสามารถเขียนแสดงได้ดังนี้

$$\sigma_i = -p\delta_i + 2 \frac{\partial W}{\partial I_1} \lambda_i^2 - 2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \frac{1}{\lambda_i^2} \quad (5)$$

สำหรับทิศทางที่ 2 หรือ j , ความเค้นเคอซีสามารถเขียนแสดงได้ดังนี้

$$\sigma_j = -p\delta_j + 2 \frac{\partial W}{\partial I_1} \lambda_j^2 - 2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \frac{1}{\lambda_j^2} \quad (6)$$

โดยทั่วไป ผลต่างของความเค้นเคอซี $(\sigma_i - \sigma_j)$ สามารถเขียนโดยตัดค่า Hydrostatic pressure; p และให้ σ_j เท่ากับศูนย์ ดังนั้นจะสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\sigma_i = 2 \left[(\lambda_i^2 - \lambda_j^2) \frac{\partial W}{\partial I_1} - \left(\frac{1}{\lambda_i^2} - \frac{1}{\lambda_j^2} \right) \frac{\partial W}{\partial I_2} \right] \quad (7)$$

ดังนั้น จากสมการดังกล่าวจึงสามารถเขียนเทนเซอร์ของความเค้นหลักเคอซี สำหรับการทดสอบแบบดึงในแนวแกนเดียว [12] ได้ดังนี้

$$\sigma_{11} = 2 \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \quad (8)$$

และ Engineering stress สามารถคำนวณหาได้จาก λ หารด้วยสมการที่ (8) จะได้

$$T_{11} = 2 \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \quad (9)$$

2.2 วัสดุไฮเปอร์อีลาสติก (Hyperelastic Material)

เนื่องจากพฤติกรรมของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกมีจุดเด่น คือ มีการเสียรูปขนาดใหญ่ ซึ่งเราสามารถอธิบายพฤติกรรมของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกนี้ โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งถูกสร้างจากฟังก์ชันพลังงานความเครียด (Strain Energy Function; W) และวัสดุประเภทนี้ยังมีพฤติกรรมในการบีบอัดได้น้อยมากๆ ดังนั้นเราจึงสามารถตั้งสมมติฐานให้เป็นวัสดุซึ่งไม่สามารถบีบอัดได้ (Incompressible material)

สำหรับรูปแบบของฟังก์ชันพลังงานความเครียด โดยในการศึกษานี้ได้เลือกแบบจำลองของมูนนี่ คือ

$$W = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3) \quad (10)$$

AMM-214

เนื่องจากเป็นแบบจำลองซึ่งเหมาะสมในการนำมาอธิบายพฤติกรรมไฮเปอร์อีลาสติกในช่วงต้น ประกอบด้วยสัมประสิทธิ์ 2 ค่า ซึ่งในการศึกษาในครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าโมดูลัสแรงเฉือนช่วงต้น (Initial Shear Modulus) โดยแบบจำลองนี้เป็นกรณีพิเศษซึ่งสามารถนำไปหาค่าดังกล่าวได้ในช่วง Small Strain โดยใช้ความสัมพันธ์

$$G = 2(C_1 + C_2) \quad (11)$$

จากสมการที่ (10) แบบจำลองของมูนี และเมื่อพิจารณาในกรณีที่วัสดุยางธรรมชาติมีสมบัติแบบวัสดุไอโซโทรปิก (Isotropic Material) และเป็นวัสดุที่บีบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Material) เมื่อ

$$I_1 = \lambda^2 + \frac{2}{\lambda}, I_2 = \frac{1}{\lambda^2} + 2\lambda \quad (12)$$

นำสมการที่ (10) และ (12) ไปแทนค่าในสมการที่ (9) จะได้สมการสำหรับทำนายการเสียรูปของวัสดุในแนวแกนเดียว ตามแบบจำลองของมูนี ดังนี้

$$T_{11} = 2C_1(\lambda - \lambda^{-2}) + 2C_2(1 - \lambda^{-3}) \quad (13)$$

เมื่อ T_{11} เป็นค่าความเค้นในทิศทางเดียวกับแรง และ λ เป็นอัตราการยืดตัวในทิศทางเดียวกับแรง มีค่าเท่ากับ Engineering strain +1

2.3 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)

แผ่นยางธรรมชาติที่ใช้ในการวิจัยนี้ ได้จากการนำน้ำยางธรรมชาติที่ได้จากการกรีตจากต้นยางพารามาทำให้จับตัวกันโดยใช้กรดฟอร์มิคที่ความเข้มข้น 0.6% ต่อปริมาณเนื้อยางแห้ง จากนั้นจึงนำมารีดเป็นยางแผ่นเรียบความหนา 2 มิลลิเมตร แล้วทำให้แห้งด้วยการผึ่งลมในที่ร่ม เป็นเวลาไม่ต่ำกว่า 1 เดือน หรือจนกว่าแผ่นยางแห้งสนิท ดังแสดงในรูปที่ 1



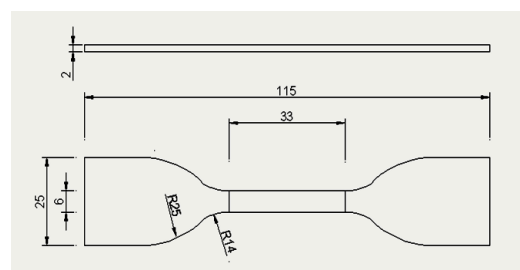
รูปที่ 1 ตัวอย่างแผ่นยางธรรมชาติที่ใช้ในการทดสอบ

3. วิธีการทดสอบ

การศึกษานี้ได้ทดสอบวัสดุซึ่งเป็น ยางธรรมชาติแผ่นเรียบ (Unfilled Natural Rubber) และถูกตัดจากยางแผ่นเดียวกัน โดยมีรายละเอียดของการทดสอบดังนี้

3.1 การทดสอบดึงในแนวแกนเดียว (Uniaxial Testing)

การทดสอบนี้ใช้ข้อกำหนดการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D412 ชิ้นงานมีลักษณะเป็น คอคอดหรือ Dumbbell โดยชิ้นงานทดสอบมีขนาดดังแสดงในรูปที่ 2 ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ยี่ห้อ Instron รุ่น 5566 Load cell ขนาด 100 N และใช้เครื่องวัดการยืดตัว (Extensometer) สำหรับวัดการยืดตัวของชิ้นงาน โดยก่อนทำการทดสอบจะต้องกำจัดผลของมุลลิน (Mullin effect) [13] ด้วยการดึงชิ้นงานในลักษณะที่เป็นวงรอบฮิสเทอเรซิส (Hysteresis) จำนวน 5 รอบที่ 60 %strain จากนั้น ทดสอบดึงชิ้นงานด้วยอัตราการดึงคงที่ 500 มิลลิเมตรต่อนาที (ตามมาตรฐาน ASTM D412) ดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 ขนาดชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ Uniaxial

AMM-214

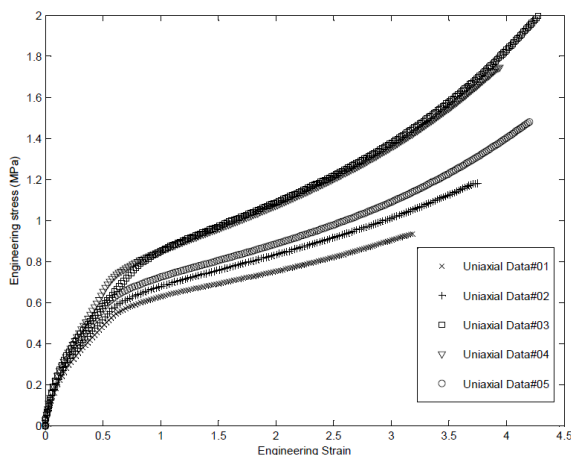


รูปที่ 3 การทดสอบ Uniaxial Testing

4. ผลการทดสอบ และการวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการทดสอบ

เมื่อนำผลการทดสอบแบบดึงแกนเดียว จำนวน 5 ชิ้นงาน ซึ่งถูกทดสอบในสภาวะเดียวกัน มาสร้างและแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียด ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4

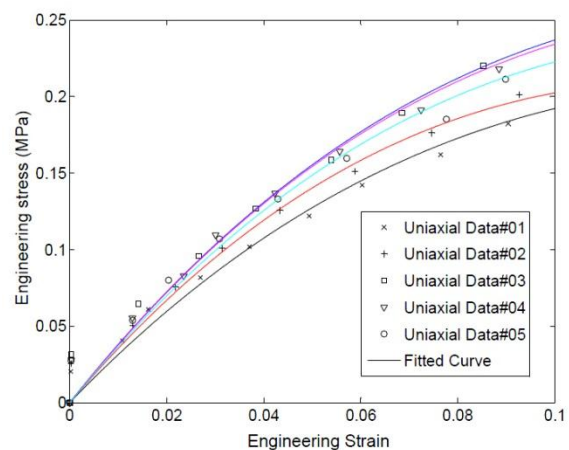


รูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบ Uniaxial Testing ของแต่ละชิ้นงาน

จากรูปที่ 4 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแต่ละชิ้นงาน สังเกตได้ว่ามีความใกล้เคียงกันมากในช่วงต้นของพฤติกรรมการเสียรูป หรือในช่วง small strain ซึ่งพฤติกรรมในช่วงดังกล่าวคล้ายกับช่วงอีลาสติก ดังนั้นข้อมูลความสัมพันธ์ในส่วนนี้จึงถูกเลือกมาใช้ในการศึกษา เพื่อหาค่าโมดูลัสแรงเฉือนของวัสดุประเภทยางธรรมชาติต่อไป

4.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์และโมดูลัสแรงเฉือน

หลังจากได้ผลการทดสอบแบบดึงแกนเดียว ของทั้งจำนวน 5 ชิ้นงานทดสอบแล้ว นำผลดังกล่าวมาใช้เป็นข้อมูลในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองของมูนนี่โดยวิธีปรับเส้นโค้ง (Curve Fitting Method) ประกอบกับอาศัยสมการที่ 13 ที่มีสัมประสิทธิ์ของมูนนี่ 2 ค่าแฝงอยู่ และเลือกช่วงข้อมูล small strain เท่านั้น ซึ่งในการศึกษานี้ได้เลือกปรับเส้นโค้ง ในช่วงข้อมูลการทดสอบที่ 0-10 %strain ได้ผลดังรูปที่ 5 ซึ่งเป็นการแสดงผลการปรับเส้นโค้งของแต่ละชิ้นงาน ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของมูนนี่ จากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ เป็นข้อมูลเพื่อคำนวณหาค่าโมดูลัสแรงเฉือนตามสมการที่ 11 ต่อไป



รูปที่ 5 แสดงผลการปรับเส้นโค้งของข้อมูลการทดสอบการดึงในแนวแกนเดียวของแต่ละชิ้นงาน โดยใช้แบบจำลองมูนนี่

จากรูปที่ 5 แสดงผลของการปรับเส้นโค้งของข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับความเครียด แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองของมูนนี่ที่มี 2 ค่าสัมประสิทธิ์นั้น สามารถสามารถทำนายพฤติกรรมของการเสียรูปภายใต้ภาระการดึงในช่วงต้น (ช่วง 0-10 %strain) ของวัสดุตัวอย่างประเภทยางธรรมชาติทั้ง 5 ตัวอย่างได้เป็นอย่างดี แสดงให้เห็นถึงแบบจำลองมูนนี่ที่เลือกมามีพฤติกรรมที่สอดคล้องกับพฤติกรรมจริงของวัสดุประเภทยาง

AMM-214

ธรรมชาติ และผลของค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ของทั้ง 5 ตัวอย่างแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ และค่าโมดูลัสแรงเฉือน ในช่วง 0-10 %strain จากการปรับเส้นโค้งของข้อมูลการทดสอบการดึงในแนวแกนเดียว ทั้ง 5 ชิ้นงานทดสอบ

Test Data	C ₁ (MPa)	C ₂ (MPa)	G (MPa)	R ²
#01	-1.627	2.176	1.098	0.9848
#02	-2.162	2.785	1.245	0.9818
#03	-1.881	2.545	1.328	0.9803
#04	-1.912	2.573	1.323	0.9851
#05	-1.963	2.607	1.287	0.9814
Avg.	-1.909	2.537	1.256	-

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่า ผลของการหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองของมูนนี่โดยวิธีปรับเส้นโค้งจากข้อมูลการทดสอบชิ้นงานทั้ง 5 ชิ้นงาน แสดงผลของค่าความผิดพลาด เป็นที่น่าพอใจ จึงนำผลที่ได้ดังกล่าวของทั้ง 5 ชิ้นงาน มาเฉลี่ยค่า และผลการหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองมูนนี่ทั้งสองนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน นั่นคือ C₁ มีค่าเฉลี่ย -1.909±0.191 MPa และ C₂ มีค่าเฉลี่ย 2.537±0.222 MPa และเมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองมูนนี่ที่ได้ คำนวณค่าโมดูลัสแรงเฉือนของแต่ละชิ้นงาน สังเกตเห็นว่าโมดูลัสแรงเฉือนมีค่าที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันมาก และเมื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย มีค่า 1.256±0.094 MPa

จากผลที่ได้มีข้อสังเกตที่สำคัญ โดยในที่นี้สามารถกล่าวได้ว่า กรณีการใช้แบบจำลองของมูนนี่ที่พัฒนามาจากพฤติกรรมกายภาพ สัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดสอบโดยอาศัยวิธีการปรับเส้นโค้งนั้น ใช้ข้อมูลการทดสอบเพียงชนิดเดียวนั่นคือ การทดสอบในแนวแกนเดียว ทั้งนี้ยังมีการทดสอบวัสดุภายใต้ภาระแบบอื่นๆ เช่น การทดสอบสองแกน (Bi-axial testing) และการทดสอบแบบ Planar shear ทั้งนี้

เพื่อความแม่นยำในการหาค่าสัมประสิทธิ์ ควรใช้ข้อมูลจากการทดสอบภายใต้ภาระต่างๆ ดังกล่าว หาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่เลือกไว้เพิ่มเติม โดยจะเป็นแนวทางในการทำวิจัยในโอกาสต่อไป

5. สรุป

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์หาค่าโมดูลัสแรงเฉือนในช่วงต้นของวัสดุยางธรรมชาติ โดยใช้ข้อมูลของค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองของมูนนี่โดยเลือกข้อมูลที่อยู่ในช่วง small strain ในกรณีของการทดสอบดึงในแนวแกนเดียว สามารถวิเคราะห์ได้ค่าโมดูลัสแรงเฉือนเฉลี่ยเท่ากับ 1.256±0.094 MPa ซึ่งเมื่อเทียบกับค่าที่ได้ดังกล่าวนี้กับข้อมูลมาตรฐาน จัดอยู่ในช่วงทั่วไปของวัสดุประเภทยาง นั่นคือ 0.35-1.38 MPa [14]

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ดร.ธนพัฒน์ ศาสตรระวี ศูนย์วิจัยทางทันตแพทยศาสตร์ ห้องวิจัยทันตวัสดุศาสตร์ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ได้เอื้อเฟื้อในการทดสอบกับเครื่อง Universal Testing Machine (UTM)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Treloar L.R.G. The Physics of Rubber Elasticity. UK. Oxford University Press, 1975.
- [2] Mooney M.A. (1940) A theory of large elastic deformation. Journal of Applied Physics 11, 582-592.
- [3] Rivlin R. S. (1948a) Large elastic deformations of isotropic materials I, Fundamental concepts. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A 240, pp. 459-490.
- [4] Rivlin R. S. (1948b) Large elastic deformations of isotropic materials IV, Further developments of the general theory.

AMM-214

Philosophical Transactions of the Royal Society of London A 241, pp. 379-397.

[5] P.J. Blatz, W.L. Ko Application of finite elasticity to deformation of rubber materials Trans. Soc. Rheol., 6 (1962), p. 223

[6] Ogden R.W. (1972a) Large deformation isotropic elasticity – on the correlation of theory and experiment for the incompressible rubber-like solids. Proceedings of Royal Society London A 326, pp. 565-584.

[7] Ogden R.W. (1972b) Large deformation isotropic elasticity – on the correlation of theory and experiment for the compressible rubber-like solids. Proceedings of Royal Society London A 328, pp. 567-583.

[8] Yeoh O.H. (1993) Some forms of strain energy function for rubber. Rubber Chemistry and Technology 66, 754-771.

[9] Boyce M. C., Arruda E. M. (2000) Constitutive models of rubber elasticity: a review. Rubber Chemistry Technology 73, 504-523.

[10] N. Promma et al. (2009) Application of the virtual fields method to mechanical characterization of elastomeric materials. International Journal of Solids and Structures 46, 698–715.

[11] Doghri, Issam, (1999). Mechanics of Deformable Solid, Springer-Verlag Publishing, New York.

[12] Horgan C. O. and Schwartz J. G., (2004). Constitutive modeling and the trousers test for fracture of rubber-like material, Journal of Mechanics and Physics of Solid, 53 (2004), 545-564.

[13] Mullins L. Effect of stretching on the properties of rubber. Journal of Rubber Research 16. p.275-289. (1947)

[14] MSC. Software Corporation. (2010). Nonlinear Finite Element Analysis of Elastomers, URL: [http:// www.mscsoftware.com](http://www.mscsoftware.com), access on 1/4/2014