



การหาค่าคงที่ของวัสดุฟิโม่โดยใช้ แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก

Evaluation of Material Parameters PE Foam Using Hyperelastic Model

นราเศรษฐ์ นะติกา* ณัฐพงษ์ สังขพงศ์ และ ณัฐวิทย์ พรหมมา

Naraset Natika*, Nattapong Sangkapong and Nattawit Promma

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 50200

Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, 50200, Thailand

*E-mail: naraset.natika@gmail.com, Telephone Number: +66-850397176

บทคัดย่อ

บทความนี้เกี่ยวข้องกับการคำนวณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุโพลิเอทิลีนโฟมโดยอาศัยวิธีการปรับเส้นโค้ง ซึ่งวิธีนี้มีประโยชน์ในการคำนวณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดที่ได้จาก ข้อมูลการทดสอบการกดในกรณีของการเสียรูปขนาดใหญ่ วัสดุทดสอบที่ทำมาจากโพลิเอทิลีนโฟมถูกตัดให้มีขนาดหนา ไม่ต่ำกว่า 20 มิลลิเมตรและพื้นที่ภาคหน้าตัดที่ถูกกดต้องมากกว่า 2500 ตารางมิลลิเมตร โดยขนาดของวัสดุทดสอบและวิธีการ ทดสอบนั้นดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D3574 ชนิด C จากสมมติฐานที่ว่าวัสดุโพลิเอทิลีนโฟมเป็นวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก ดังนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดจึงจำเป็นต้องพิจารณาในเชิงการเสียรูปขนาดใหญ่และแสดง ในรูปแบบของฟังก์ชันพลังงานความเครียด โดยในงานวิจัยครั้งนี้เลือกแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกของบลาทซ์โก เพื่ออธิบาย พฤติกรรมการเสียรูปภายใต้ภาระแรงกดในแนวแกนเดียว หลังจากใช้วิธีปรับเส้นโค้งกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้น และความเครียด ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากวิธีดังกล่าว คือ ค่าโมดูลัสแรงเฉือนช่วงต้นของวัสดุโพลิเอทิลีนโฟม โดยมีค่าเท่ากับ 34.230 กิโลปาสคาล พิจารณาข้อมูลความสัมพันธ์ช่วงต้นประกอบกับการแทนค่าอัตราส่วนปัวซองของโฟมเท่ากับ 0.25 โดย อาศัยกฎของฮุกส์ สามารถคำนวณหาโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุทดสอบได้เท่ากับ 85.577 กิโลปาสคาล

คำสำคัญ: โพลิเอทิลีนโฟม; การเสียรูปขนาดใหญ่; แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก; วิธีการปรับเส้นโค้ง; แบบจำลองของ บลาทซ์โก

ABSTRACT

This paper deals with the determination of parameters of polyethylene foam using Curve Fitting Method. This method is useful for calculating parameters from Stress-Strain relation obtained from uniaxial compressive test in case of large deformation. Polyethylene foam is selected as specimens with 20-millimeter minimum thickness and contacted area is more than 2500 square millimeter. ASTM D3574 type C is chosen to be testing standard. Since Polyethylene foam is assumed to be hyperelastic material,

large deformation theory with strain energy function is applied to derive the equation obtained from engineering stress and strain. Blatz-Ko hyperelastic model is used to identify a hyperelastic parameter as initial shear modulus from mechanical response using Curve-Fitting Method. Result which is found in term of initial shear modulus of Polyethylene foam was satisfied. Which is hyperelastic material, those parameters describe the mechanical response under uniaxial compression testing, ASTM D3574 type C, Standard specification for testing. The relation between compressive force and stretch is investigated. Then the test data is calculated to the relationship between stress and strain and the result found in term of initial shear modulus is 34.230 kPa. Substitute Poisson ratio of this foam as 0.25 in Hooke's Law, modulus of elasticity is 85.577 kPa.

Keywords: polyethylene foam; large deformation; hyperelastic model; curve fitting; Blatz-Ko model

1. บทนำ

ปัจจุบันวัสดุทางวิศวกรรมมีบทบาทและถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นงานเชิงอุตสาหกรรมทุกขนาดหรือในเชิงธุรกิจ ซึ่งเมื่อเข้าใจถึงคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและวิศวกรรมของวัสดุแล้ว จะส่งผลให้สามารถนำวัสดุดังกล่าวมาประยุกต์และใช้งานโดยเฉพาะด้านวิศวกรรมได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ โดยงานวิจัยครั้งนี้มีความสนใจในการหาคุณสมบัติของวัสดุชนิดฉนวนกันความร้อน โพลีเอทิลีนโฟมหรือพีอีโฟม (Polyethylene foam, PE foam) [1] ซึ่งโฟมชนิดดังกล่าวถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในงานอาคาร สำนักงานและที่พักอาศัย โดยวัสดุชนิดนี้มีคุณสมบัติเด่นที่หลากหลาย เช่น การป้องกันความร้อนหรือความเย็น การป้องกันเสียง การป้องกันการสั่นสะเทือนและอีกหนึ่งคุณสมบัติที่โดดเด่นนั้นคือการป้องกันการกระแทกโดยเฉพาะในระหว่างการขนส่งวัสดุหรือเครื่องมือที่มีความละเอียดอ่อนเป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาในคุณสมบัติเด่นเฉพาะนี้เท่านั้น

ฉนวนพีอีโฟมกล่าวได้ว่าเป็นวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติก (Hyperelastic material) โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดหรือพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุที่เกิดขึ้นภายใต้แรงที่มากระทำนั้น มีลักษณะพฤติกรรมเป็นแบบการเสียรูปขนาดใหญ่ (Large Deformation) และมีแนวโน้มของความสัมพันธ์ของการเสียรูปแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Deformation) ซึ่ง

ลักษณะดังกล่าวไม่สามารถใช้กฎของฮุกส์ที่ประยุกต์เฉพาะในช่วงยืดหยุ่นของวัสดุมาแก้ปัญหาเหมือนกับวัสดุประเภทที่มีพฤติกรรมการเสียรูปแบบเชิงเส้นได้ ดังนั้น ในการทำนายพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติกจึงจำเป็นต้องใช้ทฤษฎีที่ถูกพัฒนาขึ้นในรูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่หลากหลาย โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องผ่านมา Mooney [2] แสดงแบบจำลองของการเสียรูปของวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติกโดยอาศัยข้อมูลการทดสอบการดึงในแนวแกนเดียวของยางผสมคาร์บอนดำของ Treloar [3] ต่อมา Rivlin [4] ประยุกต์ใช้แบบจำลองทำนายพฤติกรรมการเสียรูปที่มีขนาดใหญ่มากขึ้นโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบโพลีโนเมียลและยังมีการประยุกต์สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อสร้างแบบจำลองที่เหมาะสมกับวัสดุชนิดโฟมโดย Blatz-Ko [5] โดยเน้นวัสดุที่อยู่ภายใต้การทดสอบการกด ต่อมา Ogden [6] ได้สร้างฟังก์ชันพลังงานความเครียด (Strain energy function) ที่ซับซ้อนกว่า Blatz-Ko เพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุสำหรับพฤติกรรมการเสียรูปขนาดใหญ่และเป็นแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เหล่านี้สามารถสร้างขึ้นมาได้จากพฤติกรรมการเสียรูปที่สร้างมาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของแต่ละวัสดุ

ดังนั้น งานวิจัยครั้งนี้เริ่มต้นที่การหาพฤติกรรมการเสียรูปภายใต้การรับภาระหรือแรงกระทำจากการกด

ซึ่งกระบวนการทดสอบดำเนินการภายใต้การทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบทางกลของวัสดุ ASTM (American Standard Testing and Material) D3574 type C [7] ว่าด้วยการทดสอบการกดเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยุบตัวของวัสดุจำพวกโฟลิมเมอร์ หลังจากได้ความสัมพันธ์ดังกล่าว กฎของพฤติกรรมของวัสดุชนิดไม่เป็นเชิงเส้นถูกเลือกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์และคำนวณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวสามารถใช้ในการทำนายพฤติกรรมของวัสดุและเป็นค่าตัวแทนที่บ่งบอกถึงความแข็งแรง อีกทั้งยังสามารถใช้อ้างอิงในการออกแบบเชิงวิศวกรรมในอนาคต โดยวิธีดังกล่าวจะอาศัยแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก (Hyperelastic Model) เพื่อใช้เป็นแบบจำลองแทนพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุประเภทโฟมที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์นั้นจะใช้วิธีการปรับเส้นโค้ง (Curve-Fitting Method) โดยระเบียบวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด โดยค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้นั้นจะหมายถึงความแข็งแรงของวัสดุฟองโฟม

เนื่องจากฉนวนฟองโฟมมีรูปแบบพฤติกรรมของการเสียรูปเป็นการเสียรูปขนาดใหญ่และยืดหยุ่นแบบไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นภาระที่กระทำกับวัสดุที่วัดในค่าของแรงกดจะไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับการเสียรูปหรือระยะที่หดจากแรงกดดังกล่าว จากการค้นคว้าเพื่อนำมาสู่การแก้ปัญหาดังกล่าว ในกรณีการเสียรูปขนาดใหญ่ แบบจำลองการเสียรูปต่างๆ ได้ถูกพัฒนาขึ้น ในรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่หลากหลาย ซึ่งเรียกว่า แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก (Hyperelastic Models) ซึ่งเขียนในรูปแบบของฟังก์ชันพลังงานความเครียด (Strain Energy Function, W) โดยสามารถนำมาใช้ทำนายพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติกได้หลายหลายชนิด

จุดเด่นงานวิจัยนี้คือการศึกษากฎพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุฟองโฟมภายใต้การกระทำในแนวแกนเดียว ซึ่งการวิเคราะห์พฤติกรรมดังกล่าวจะสามารถส่งผลให้งานวิจัยบรรลุถึงวัตถุประสงค์ในการหาค่าคงที่ที่ได้จากสัมประสิทธิ์ซึ่งสอดคล้องความสัมพันธ์ของพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุ โดยค่าที่ได้จะบ่งบอกถึงคุณสมบัติความแข็งแรงเชิงวิศวกรรม

และสามารถนำผลลัพธ์ที่ได้ไปใช้ออกแบบและพัฒนาต่อไป

2. ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 ฉนวนโฟลีโอเทธิลีนโฟม (PE Foam)

ฉนวนโฟลีโอเทธิลีนโฟมหรือ ฟองโฟม เป็นฉนวนกันความร้อนที่มีลักษณะโครงสร้างภายในชนิดเซลล์ปิด (Close Cell) โดยโครงสร้างชนิดเซลล์ปิดหมายถึงลักษณะที่โครงสร้างของเซลล์แต่ละเซลล์เป็นเยื่อบางที่มีลักษณะคล้ายทรงปิด ซึ่งแต่ละเซลล์ไม่ได้เชื่อมถึงกัน [8] ดังนั้นอากาศจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านไประหว่างเซลล์อย่างอิสระได้ การเคลื่อนที่ของอากาศจะเป็นรูปแบบการเคลื่อนที่ผ่านการแพร่ระหว่างเยื่อหุ้มเซลล์เท่านั้น วัสดุชนิดนี้ถูกผลิตจากโฟลีโอเทธิลีนที่ผ่านกระบวนการทางเทคโนโลยีที่ทันสมัยที่เรียกว่าการประสานฟิล์มโลหะ (Metalized Film) [9] เข้ากับฉนวนโฟมโฟลีโอเทธิลีน ที่มีคุณสมบัติการนำความร้อนต่ำ เคลือบด้วยฟิล์มโฟลีโอเทธิลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate) เรียกย่อว่า PET หรือ PETP หรือ PET-P ทำให้เกิดผิวของฉนวนโฟมมีความคงทนต่อรอยขีดข่วน อีกทั้งยังทนต่อสภาพอากาศและความชื้นได้เป็นอย่างดี ด้วยเทคโนโลยีที่ทันสมัยนี้ ทำให้มีประสิทธิภาพการป้องกันความร้อน ทนทานต่อสารเคมี เป็นกลางทางกายภาพและไม่ได้ดูดซับน้ำ เป็นวัสดุที่ไม่มีพิษ ซึ่งถูกเลือกใช้ในการทำกล่องบรรจุอาหารและบรรจุภัณฑ์ของอุปกรณ์ทางการแพทย์ รวมถึงการผลิตวัสดุไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี จึงสามารถนำกลับมาแปรรูปเพื่อใช้ใหม่งานอื่นได้ อีกทั้งไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย โครงสร้างฉนวนชนิดนี้จะมีลักษณะเป็นฟองอากาศขนาดเล็กเกาะเกี่ยวกัน ทำให้ฉนวนฟองโฟมไม่ดูดซับความร้อนและไม่เป็นแหล่งสะสมเชื้อโรค อีกทั้งยังเสริมการป้องกันการลามไฟและป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากแสงแดด มีความต้านทานแรงยึดเหนี่ยวสูง ทนต่อแรงดึงฉีกขาด คุณสมบัติที่เด่นชัดที่แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ประเภทโฟมนี้แตกต่างจากวัสดุวิศวกรรมประเภทอื่นๆ คือด้านความยืดหดหรือยืดหยุ่น เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุยืดหยุ่นชนิดอื่น เช่น โลหะ เมื่อเกิดความเสียหายจนเกิดการเสียรูปขนาดใหญ่แล้ว เป็นความเสียหายแบบพลาสติก

(plastic deformation) หรือการเสียรูปแบบถาวรที่ไม่สามารถคืนกลับสู่รูปร่างเดิมได้ แต่ในขณะที่วัสดุอ่อนจนพียูโฟมเมื่อมีแรงหรือภาระมากระทำ การเสียรูปและเปลี่ยนแปลงรูปร่าง จะสามารถคืนรูปร่างเดิมได้ ซึ่งสามารถทำนายเบื้องต้นได้ว่าเป็นวัสดุที่มีพฤติกรรมคล้ายกับวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกและสามารถเสียรูปขนาดใหญ่ได้

2.2 พฤติกรรมทางกลของวัสดุ

จากที่ได้กล่าวมา พฤติกรรมทางกลของพียูโฟมนั้น เรียกได้ว่าเป็นพฤติกรรมของวัสดุประเภทไฮเปอร์อีลาสติกสามารถอธิบายพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุ โดยอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของเทนเซอร์ของการเสียรูป พิจารณาเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นทางวิศวกรรมและความเครียดวิศวกรรม สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์โดยพิจารณาการเสียรูปในแนวแกนเดียว (ดึงหรือกด) โดยแสดงดังสมการ 1

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

โดย T_{11} คือ ค่าความเค้นในทิศทางเดียวกับแนวแรง

W คือ ฟังก์ชันพลังงานความเครียด

I_1, I_2 คือ principle invariant

λ คือ อัตราการยืดตัวในทิศทางเดียวกับแรง

จากสมการที่ 1 พบว่า เป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ซึ่งแตกต่างจากสมการความสัมพันธ์ของวัสดุอีลาสติกธรรมดาหรือกฎของฮุกส์ เนื่องจากมีตัวแปรของฟังก์ชันพลังงานความเครียดเพิ่มเข้ามาในสมการความสัมพันธ์ดังกล่าว โดยฟังก์ชันพลังงานความเครียดถูกอธิบายในหัวข้อต่อไป

2.3 วัสดุไฮเปอร์อีลาสติก

สำหรับรูปแบบของฟังก์ชันพลังงานความเครียดที่ใช้ในการทำนายพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุพียูโฟมนั้น ในงานวิจัยครั้งนี้ได้เลือกใช้แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกของบลาทซ์โก (Blatz-Ko Model) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีรูปแบบไม่ซับซ้อนและเข้ากับความสัมพันธ์ของการเสียรูปของวัสดุชนิดโฟมต่างๆ ไปได้ดี [5] และเหตุผลสำคัญที่แบบจำลองนี้ได้ถูกเลือก เนื่องจากมีงานวิจัยสำคัญอื่นๆ ได้นำเอาแบบจำลองนี้ไปประยุกต์ใช้ โดย ณัฐพงษ์ และคณะ [10] ได้

ศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปทางกลและคำนวณหาค่าคงที่หรือโมดูลัสแรงเฉือนช่วงต้นของวัสดุประเภทโฟมแข็งหรืออีวีเอโฟม พบว่าแบบจำลองนี้สามารถทำนายพฤติกรรมการเสียรูปได้ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ความเครียด และเนื่องจากแบบจำลองนี้เหมาะสำหรับการศึกษาถึงพฤติกรรมทางกลของวัสดุชนิดโฟม จึงมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาค่าคงที่ของวัสดุที่มีพฤติกรรมทางกลคล้ายโฟม เช่น วัสดุโครงสร้างเลี้ยวเซลล์ (Scaffold) โดย Wiwatwongwana F. and Promma N. [11] – [12] และ Siroros N. and Promma N. [13] ได้ศึกษาถึงพฤติกรรมการเสียรูปทางกลและคำนวณหาค่าคงที่ของวัสดุทดแทนผิวหนังที่ทำมาจากโครงสร้างผสมระหว่างเจลาตินและ Carboxymethylcellulose ทั้งการขึ้นรูปแบบธรรมดา การขึ้นรูปโดยอาศัยความร้อน (Dehydrothermal Treatment) และการขึ้นรูปโดยอาศัยสารเคมี (Chemical Treatment) ตามลำดับ ประยุกต์ใช้แบบจำลองของบลาทซ์โก เพื่อคำนวณค่าโมดูลัสแรงเฉือนช่วงต้น ซึ่งได้ผลเป็นที่น่าพอใจ โดยรูปแบบสมการของแบบจำลองของบลาทซ์โก คือ

$$W = \frac{\mu}{2} \left(\frac{I_2}{I_3} + 2\sqrt{I_3} - 5 \right) \quad (2)$$

โดยสังเกตได้ว่า แบบจำลองดังกล่าวมีค่าคงที่ทางวิศวกรรม คือ ค่า μ ซึ่งหมายถึง ค่าโมดูลัสแรงเฉือนช่วงต้น (Initial Shear Modulus)

จากแบบจำลองของบลาทซ์โกดังกล่าว เมื่อกำหนดให้พิจารณาในกรณีที่วัสดุมีสมบัติแบบไอโซโทรปิก แต่วัสดุมีพฤติกรรมที่สามารถบีบอัดตัวได้ซึ่งจากสมการที่ 2 จะมีความซับซ้อนและยากแก่การพิจารณา ดังนั้นการเริ่มต้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงตั้งสมมติฐานให้วัสดุเป็นวัสดุที่บีบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Material) จึงพิจารณาได้ว่า

$$I_1 = \lambda^2 + \frac{2}{\lambda^2}, I_2 = \frac{1}{\lambda^2} + 2\lambda, I_3 = 1 \quad (3)$$

จากนั้นนำสมการ 2 และ 3 ไปแทนในสมการที่ 1 และปรับสมการให้อยู่ในรูปแบบอย่างง่าย จึงได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสำหรับทำนายพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุในแนวแกนเดียวของแบบจำลองบลาทซ์โกที่ประยุกต์ใช้กับพียูโฟม ดังนี้

$$T_{11} = \mu \left(1 - \frac{1}{(\lambda)^3} \right) \quad (4)$$

เมื่อ λ เป็นอัตราการยืดตัวในทิศทางเดียวกับแรง สามารถคำนวณค่าได้จาก $\epsilon + 1$ โดยที่ ϵ คือ ค่าความเครียดในทิศทางเดียวกับแรงนั่นเอง

หลังจากได้ค่าโมดูลัสแรงเฉือนที่ถูกต้องจากค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองแล้ว รูปแบบความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดโดยปกติแล้วจะไม่เป็นเชิงเส้น แต่ในช่วงต้นของความสัมพันธ์ดังกล่าว ถ้าพฤติกรรมของความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดมีความคล้ายคลึงเป็นแบบเชิงเส้น โดยรูปแบบที่เป็นเชิงเส้นนั้นจะคล้ายคลึงกันกับกฎของฮุกส์ [14] จากเหตุผลดังกล่าว ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นช่วงต้นจึงกล่าวได้ว่า สามารถคำนวณได้จากค่าโมดูลัสแรงเฉือนช่วงต้นและจะต้องกำหนดค่าอัตราส่วนของปัวซองของพอลิโพรไพลีน โดยมีค่าเท่ากับ 0.25 [13] สามารถแสดงสมการได้ดังต่อไปนี้

$$E = 2\mu(1 + \nu) \quad (5)$$

3. วิธีการทดสอบ

3.1 การทดสอบการกดในแนวแกนเดียว

การทดสอบการรับภาระแรงกดในงานวิจัยนี้ ดำเนินการภายใต้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D3574 type C [15] โดยมาตรฐานการทดสอบดังกล่าวกำหนดให้ชิ้นงานทดสอบจะต้องมีขนาดพื้นที่หน้าตัดรับแรงไม่น้อยกว่า 2500 ตารางมิลลิเมตรและความหนาไม่น้อยกว่า 20 มิลลิเมตร ชิ้นงานทดสอบในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางยาว 65 มิลลิเมตร และความหนา 25 มิลลิเมตร ดังแสดงลักษณะดังรูปที่ 1

ก่อนทำการทดสอบทุกครั้งจะต้องการเตรียมชิ้นงานทดสอบทุกชิ้นตามที่ระบุในมาตรฐานการทดสอบ เพื่อขจัดผลของฮิสเทอรีซิส (Hysteresis effect) [16] ซึ่งถือได้ว่าเป็นปัจจัยที่ไม่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุ การเตรียมชิ้นงานทดสอบ ดำเนินการตามมาตรฐานทดสอบวัสดุ ASTM D3574 type C เช่นเดียวกัน โดยทำการกดที่ระยะกด 75 เปอร์เซ็นต์ของความหนาทั้งหมด ณ อัตราเร็ว 250 มิลลิเมตรต่อนาที โดยจะกระทำทั้งหมด 2 ครั้ง ทั้งระยะเวลา



รูปที่ 1 ลักษณะชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน

ห่างกันไม่น้อยกว่า 6 นาที หลังจากผ่านกระบวนการเตรียมแล้ว จะทิ้งระยะเวลาให้ชิ้นงานทดสอบคืนตัวให้อยู่ในสภาวะอุณหภูมิห้อง จึงจะดำเนินการทดสอบเพื่อเก็บข้อมูลการทดสอบได้

การทดสอบการรับภาระแรงกดในแนวแกนเดียวจะดำเนินการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ UTM (Universal Testing Machine) ยี่ห้อ Tinius Olsen ที่มีพิคอัพโหลดของ Load cell ขนาด 5 กิโลนิวตัน ดังแสดงในรูปที่ 2



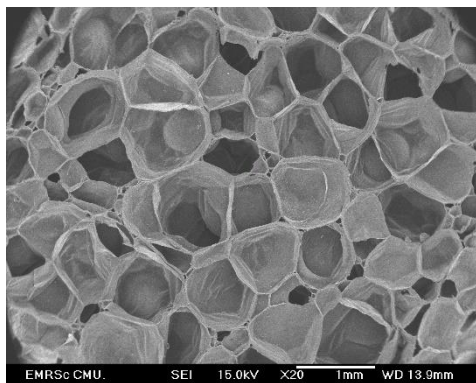
รูปที่ 2 เครื่องทดสอบ UTM
(Universal Testing Machine)

ระหว่างการทดสอบนั้นสามารถบันทึกค่าแรงกดและระยะยุบตัวได้โดยตรงจากเครื่องทดสอบ โดยการทดสอบจะทำการกดขึ้นทดสอบที่ระยะการกดเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ของความหนาทั้งหมดหลังจากการเตรียมชิ้นงานทดสอบแล้วเสร็จด้วยอัตราเร็วการกดเท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อนาที จำนวน 3 ชิ้นงานทดสอบต่อหนึ่งชุดการทดสอบ กำหนดให้มีการทดสอบจำนวนทั้งหมดไม่น้อยกว่า 10 ชุด การทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบที่กำหนดไว้

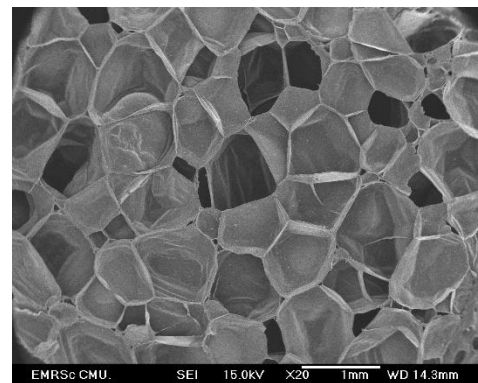
4. ผลการทดสอบ และการวิเคราะห์

4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างภายในของฟอัม

การศึกษาถึงสมบัติทางกายภาพของวัสดุฟอัมเพื่อสังเกตโครงสร้างภายในและเพื่อให้มั่นใจว่าวัสดุดังกล่าวมีสมบัติเป็นวัสดุไอโซโทรปิกหรือไม่นั้น จะอาศัยการส่องสำรวจและถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope หรือ SEM) รุ่น JSM 6335F ใช้กำลังขยาย 20 เท่าโดยจะเตรียมชิ้นงานโดยการตัดชิ้นทดสอบในสองระนาบที่ตั้งฉากกัน พบว่าโครงสร้างภายในมีลักษณะเซลล์ปิด ดังแสดงในรูปที่ 3 หาก



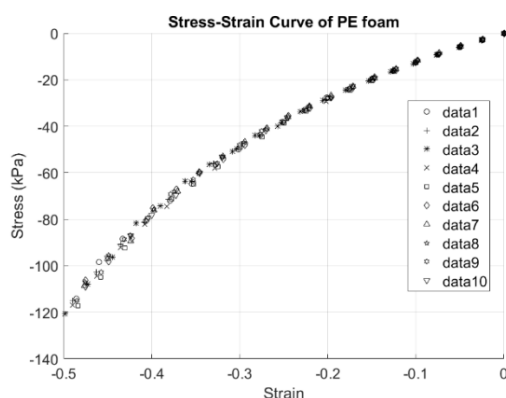
(ก) ภาคตัดขวางโครงสร้างด้านบน (Top view)



(ข) ภาคตัดขวางโครงสร้างด้านข้าง (Side view)

รูปที่ 3 โครงสร้างของฟอัม ที่กำลังขยาย 20 เท่า

4.2 ผลของพฤติกรรมและความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของฟอัม



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมของการทดสอบการกดของฟอัม

ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยุบตัวได้มาจากเครื่องมือวัดที่ติดมากับเครื่องทดสอบ UTM ของ

เปรียบเทียบรูปที่ 3(ก) และ 3(ข) ซึ่งเป็นภาพถ่ายภาคตัดขวางโครงสร้างของวัสดุฟอัม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบภาคตัดขวางของวัสดุทางด้านบนและทางด้านข้างแล้ว การเรียงตัวกันของเซลล์จะเป็นโครงสร้างแบบปิดที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันมาก ซึ่งถือได้ว่าเป็นลักษณะของวัสดุชนิดไอโซโทรปิก โดยในงานวิจัยครั้งนี้ได้เลือกแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่มีขอบเขตของการใช้งานกับวัสดุที่เป็นไอโซโทรปิก ดังนั้นจากผลที่ได้จึงสามารถทำให้เชื่อมั่นได้ว่า การหาค่าคงที่ของฟอัมนั้น สามารถวิเคราะห์ได้จากพฤติกรรมการเสียรูปได้ไม่ว่าการตัดชิ้นรูปของวัสดุนั้นจะอยู่ในแนวใดก็ตาม

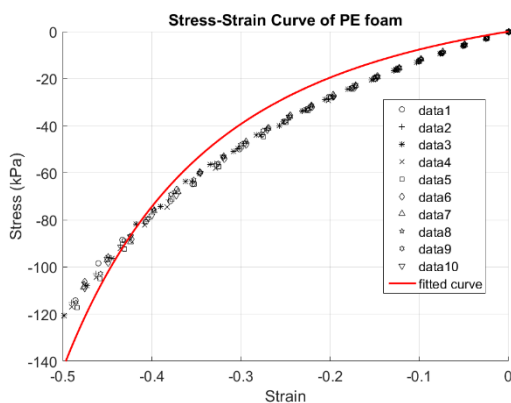
ชิ้นทดสอบทั้งหมด 30 ชิ้น (3 ชิ้นต่อ 1 ชุดข้อมูลการทดสอบ) นำมาสร้างเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดวิศวกรรมโดยอาศัยสมการความเค้นและความเครียดในแนวแกนเดียวและกำหนดให้เป็นไปตามทิศทางของแรงกระทำแสดงดังรูปที่ 4 จากรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดวิศวกรรมและสามารถระบุได้ว่ารูปแบบของความสัมพันธ์หรือพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุนั้น มีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นจึงจำเป็นต้องใช้แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกเพื่อทำนายพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุฟอัม

จากเส้นโค้งความสัมพันธ์ในรูปที่ 4 สังเกตได้ว่าเส้นโค้งในช่วงต้น (0-10 เปอร์เซ็นต์ความเครียด) จะมีลักษณะที่คล้ายกับความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้น โดยในช่วงนี้สามารถกล่าวได้ว่า คือช่วงที่โครงสร้างเซลล์ของวัสดุเริ่มได้รับการแรงกด ผนังเซลล์เกิดการโก่งตัวและยุบตัวลงมา

อากาศที่แทรกอยู่ภายในเซลล์เริ่มแพร่ออกสู่ภายนอกเซลล์ ภายหลังจากพ้นการเสียรูปช่วงต้นแล้ว ช่วงความเครียดที่ 10–30 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ เป็นช่วงที่ความชันเพิ่มสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยหากเทียบกับช่วงต้น กล่าวได้ว่าเป็นช่วงที่ผนังเซลล์แต่ละเซลล์เริ่มปรับตัวบีบซ้อนกันมากขึ้นกว่าช่วงต้นและเกิดการอัดตัวของเซลล์โดยรวมและหลังจากพ้นช่วง 30 เปอร์เซ็นต์ความเครียดเป็นต้นไป ความชันของกราฟยิ่งเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดหากเทียบกับช่วงต้น ในช่วงนี้กล่าวได้ว่าผนังเซลล์ทุกเซลล์เกิดการปรับตัวแนบชิดอัดติดกัน และอากาศภายในเซลล์ไหลออกสู่ภายนอกจนหมดแล้ว จึงจำเป็นต้องใช้แรงกดที่มากขึ้นซึ่งส่งผลให้แรงกดและความเค้นเพิ่มมากขึ้นตามทำให้วัสดุเกิดการยุบตัวลงเพิ่มขึ้น กราฟความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดช่วงนี้จึงมีความชันเพิ่มขึ้นมากเมื่อเทียบกับช่วงอื่น

4.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองของบลัทซ์โก

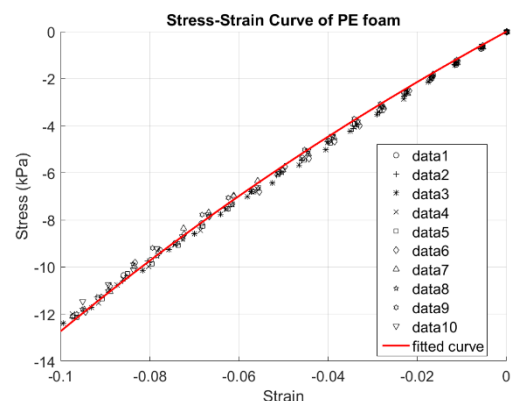
ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการคำนวณของข้อมูลการทดสอบการรับภาระแรงกดนั้น จะถูกนำมาเข้าสู่กระบวนการวิธีการปรับเส้นโค้งโดยอาศัยสมการที่ 4 ประกอบกับการใช้โปรแกรมช่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์ในการปรับแนวโน้มของสมการให้สอดคล้องกับข้อมูลการทดลอง เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองบลัทซ์โก ตัวอย่างของผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5 จากรูปเป็นการแสดงผลการปรับเส้นโค้งของแต่ละชุดการทดสอบ (3 ชุดต่อชุดการทดสอบ) โดยใช้แบบจำลองของบลัทซ์โก



รูปที่ 5 แสดงผลการปรับเส้นโค้งของข้อมูลในช่วง 0-50 เปอร์เซ็นต์ความเครียด โดยใช้แบบจำลองของบลัทซ์โก

จากรูปที่ 5 วิธีการปรับเส้นโค้งโดยใช้แบบจำลองของบลัทซ์โกพบว่า เส้นโค้งที่ปรับเข้ากับข้อมูลนั้นมีแนวโน้มผ่านจุดข้อมูลการทดสอบน้อยมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองดังกล่าวไม่เหมาะสมกับการทำนายหรืออธิบายถึงพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุฟองในช่วงเปอร์เซ็นต์ความเครียดได้ทั้งหมด ซึ่งจากการค้นคว้างานวิจัยเพิ่มเติม [10, 13] พบว่า แบบจำลองของบลัทซ์โกนั้นสามารถทำนายได้ดีสำหรับพฤติกรรมการเสียรูปช่วงต้นเท่านั้น จึงทำการปรับเส้นโค้งใหม่โดยเลือกกำหนดช่วงที่มีแนวโน้มใกล้เคียงกับแนวโน้มของแบบจำลอง พบว่าในช่วง 0-10 เปอร์เซ็นต์ความเครียดนั้นเหมาะสมที่สุด เพื่อที่จะหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 6

รูปที่ 6 จากการปรับเส้นโค้งโดยอาศัยแบบจำลองของบลัทซ์โก พบว่าสามารถทำนายพฤติกรรมการเสียรูปช่วงต้นของวัสดุฟองฟอยล์ที่อยู่ในช่วง 0-10 เปอร์เซ็นต์ความเครียดได้เป็นอย่างดี เส้นโค้งที่ปรับได้มีแนวโน้มผ่านจุดข้อมูลที่ได้จากการทดสอบได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 6 แสดงผลการปรับเส้นโค้งของข้อมูลในช่วง 0 – 10 เปอร์เซ็นต์ความเครียด โดยใช้แบบจำลอง Blatz-Ko

หลังจากที่ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองของบลัทซ์โก ตามสมการที่ 4 นำค่าดังกล่าวที่ได้มาเป็นข้อมูลสำหรับการแทนค่าเพื่อหาค่าโมดูลัสแรงเฉือนช่วงต้นที่สามารถบ่งบอกถึงความแข็งแรงของวัสดุและจากนั้นจึงคำนวณหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นช่วงต้นได้ตามสมการที่ 5 ซึ่งแสดงผลการคำนวณจากข้อมูลการทดสอบได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางแสดงค่าโมดูลัสแรงเฉือนและโมดูลัสยืดหยุ่นจากการคำนวณผ่านสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองของบลาทซ์โกในช่วงของเปอร์เซ็นต์ความเครียดในช่วงต้น (0–10 เปอร์เซ็นต์ความเครียด)

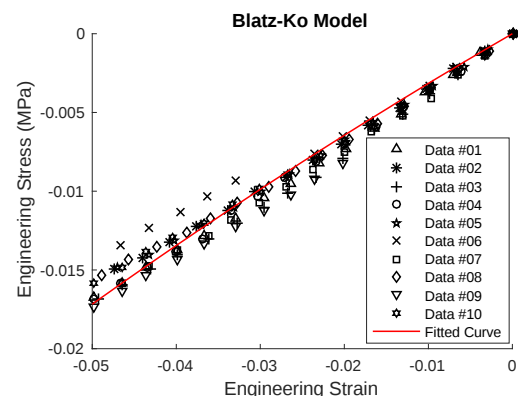
การทดลองที่	μ (kPa)	R^2	E (kPa)
1	34.2468	0.9973	85.6169
2	34.5626	0.9972	86.4064
3	34.9689	0.9965	87.4222
4	34.6694	0.9973	86.6735
5	34.6300	0.9977	86.5749
6	34.1890	0.9955	85.4726
7	33.8198	0.9961	84.5495
8	33.7901	0.9961	84.4752
9	33.7974	0.9960	84.4934
10	33.6348	0.9978	84.0870
ค่าเฉลี่ย	34.2309	-	85.5772
SD	0.4612	-	1.1531

กำหนด SD คือค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลการคำนวณ

จากตารางที่ 1 แสดงค่าโมดูลัสแรงเฉือนและโมดูลัสยืดหยุ่นในช่วงต้น ที่ได้จากการปรับเส้นโค้งของทั้ง 10 ชุดการทดสอบ ค่าโมดูลัสแรงเฉือนช่วงต้นที่ปรับเข้ากับข้อมูลและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นช่วงต้นที่ได้จากการนำค่าโมดูลัสแรงเฉือนช่วงต้นไปคำนวณนั้น ได้ให้ผลเป็นที่น่าเชื่อถือได้ โดยค่าดังกล่าวที่ได้นั้นมีความใกล้เคียงกันทั้ง 10 ชุดการทดสอบ โดยสังเกตได้จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานซึ่งมีค่าน้อยมาก แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองของบลาทซ์โกสามารถอธิบายและทำนายพฤติกรรมในช่วงต้นของวัสดุอีวีโอโพนได้ดี ค่าโมดูลัสแรงเฉือนและโมดูลัสยืดหยุ่นในช่วงต้นเฉลี่ยเท่ากับ 34.230 กิโลปาสกาลและ 85.577 กิโลปาสกาลตามลำดับ

เปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ ณัฐพงษ์และคณะ [10] ได้ทำการศึกษาวัสดุโฟมแข็งชนิดไวโนลอะซิเตทเอทิลีนหรือเรียกว่า อีวีโอโพน ภายใต้การทดสอบการกดในแนวแกนเดียวเช่นกัน และได้ทำการหาค่าคงที่ของวัสดุผ่านกระบวนการการปรับเส้นโค้ง ซึ่งผลที่แสดงดังรูปที่ 7 ในงานวิจัยดังกล่าว ให้ผลว่าแบบจำลองของบลาทซ์โกสามารถอธิบายและทำนายพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุได้เพียงในช่วง

ต้นเท่านั้น ซึ่งกำหนดในช่วงเพียงช่วง 0–5 เปอร์เซ็นต์ของความเครียด และคำนวณค่าโมดูลัสแรงเฉือนช่วงต้นได้เท่ากับ 103.3 กิโลปาสกาล และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นช่วงต้นมีค่าเท่ากับ 258.1 กิโลปาสกาล สังเกตลักษณะของเส้นความสัมพันธ์ พบว่าความชันเส้นโค้งของอีวีโอโพนนั้นสูงกว่าวัสดุอีวีโอโพนมาก ทั้งนี้อาจเนื่องจากว่าวัสดุอีวีโอโพนเป็นโฟมชนิดแข็งเมื่อเปรียบเทียบกับอีวีโอโพน ดังนั้นแรงที่กระทำเพื่อให้วัสดุยุบตัวจึงจำเป็นต้องมีขนาดมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแรงที่ใช้กดอีวีโอโพน อีกทั้งเนื่องจากการที่มีการเปลี่ยนแปลงความชันอย่างรวดเร็วส่งผลให้แบบจำลองของบลาทซ์โกสามารถอธิบายพฤติกรรมได้เพียง 0–5 เปอร์เซ็นต์ความเครียด ในขณะที่วัสดุอีวีโอโพนนั้นมีลักษณะอ่อนตัวกว่าอีวีโอโพน ทำให้ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจึงมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ส่งผลให้ในช่วงต้นที่มีลักษณะโค้งใกล้เคียงกับเชิงเส้นมีช่วงที่ยาวกว่า ทำให้แบบจำลองของบลาทซ์โกสามารถอธิบายได้มากกว่า คือ 0–10 เปอร์เซ็นต์ความเครียด



รูปที่ 7 แสดงผลการปรับเส้นโค้งของวัสดุอีวีโอโพนโดยใช้แบบจำลองของบลาทซ์โก [10]

จากผลการวิจัยทั้งหมดที่กล่าวมา สามารถวิเคราะห์ได้ว่า แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกของบลาทซ์โกเป็นแบบจำลองที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองเพียง 1 ตัวแปรที่ส่งผลกับค่าความชันของเส้นโค้ง หมายความว่า แบบจำลองของบลาทซ์โกนี้สามารถปรับได้ดีกับข้อมูลที่มีลักษณะที่เส้นโค้งที่มีความชันเพียง 1 ช่วงเท่านั้น แต่พฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุอีวีโอโพนนี้มีช่วงของความชันของเส้นโค้งที่แตกต่างกันชัดเจน 2 ช่วง จึงเป็นเหตุให้

แบบจำลองดังกล่าวไม่สามารถอธิบายหรือทำนายพฤติกรรม การเสีรูปได้ทั้งหมด แต่สามารถอธิบายหรือทำนาย พฤติกรรมการเสีรูปได้เพียงช่วงต้นเท่านั้น ซึ่งก็คือช่วงของ เส้นโค้งที่เกิดจากค่าความชันในช่วงแรก (0-10 เปอร์เซ็นต์ ความเครียด) และเมื่อค่าความชันของเส้นโค้งเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากความเค้นที่มากยิ่งขึ้นในช่วงของความเครียด ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้แบบจำลองของบลาทซ์โกไม่สามารถ อธิบายพฤติกรรมการเสีรูปในช่วงต่อไปได้ ซึ่งหากต้องการ ทำนายพฤติกรรมการเสีรูปในช่วงเปอร์เซ็นต์ความเครียด ที่มากขึ้นกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยครั้งนี้ จึงจำเป็นต้อง ใช้แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่มีจำนวนสัมประสิทธิ์ ที่ส่งผลต่อความชันของเส้นโค้งที่มากขึ้น หากพฤติกรรมการ เสีรูปมีช่วงการเปลี่ยนแปลงของความชัน 2 ช่วง จำเป็นต้องใช้แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่มีจำนวน สัมประสิทธิ์อย่างน้อย 2 ตัวแปร หรือหากมีความชัน 3 ช่วง จะต้องใช้แบบจำลองที่มีสัมประสิทธิ์อย่างน้อย 3 ตัวแปร เพิ่มตามไปด้วย เช่น แบบจำลองของมูนนี่ (Mooney) [2] ซึ่งมีตัวแปรในแบบจำลอง 2 ตัวแปรหรือแบบจำลองของ เยลล์ (Yeoh) [17] ซึ่งมีจำนวน 3 ตัวแปร

5. สรุปผลงานวิจัย

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการรับภาระแรงกด นำข้อมูลความสัมพันธ์ดังกล่าวเข้ากระบวนการการปรับ เส้นโค้งด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ร่วมกับแบบจำลอง ไฮเปอร์อีลาสติกของบลาทซ์โกเพื่ออธิบายและทำนาย พฤติกรรมการเสีรูปหรือความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียด เมื่อทราบถึงค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง ดังกล่าว สามารถนำไปเป็นข้อมูลเพื่อคำนวณหาค่าโมดูลัส แรงเฉือน ที่บ่งชี้ถึงความสามารถในการรับภาระแรงกระทำ ของวัสดุพียูโฟม ผลจากกระบวนการการปรับเส้นโค้ง ยังแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองบลาทซ์โกสามารถใช้หาค่า โมดูลัสแรงเฉือนและทำนายพฤติกรรมการเสีรูปในช่วงต้น ได้เป็นอย่างดี เมื่อสังเกตจากการเข้ากันได้ระหว่างผลการ ปรับเส้นโค้งและข้อมูลการทดสอบการกด โดยผลที่ได้จาก กระบวนการการปรับเส้นโค้งนั้นสามารถทำนายพฤติกรรม

การเสีรูปในช่วงต้นไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ความเครียด แต่ เนื่องจากการวิจัยที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันจำนวนน้อยมาก ดังนั้นจึงสามารถเทียบกับผลของ วัสดุพียู และคณะ เท่านั้น โดยงานของ วัสดุพียู และคณะ สามารถทำนายพฤติกรรมการ เสีรูปได้เพียง 5 เปอร์เซ็นต์ เห็นได้ว่า ยังมีข้อมูลการทำนายพฤติกรรมของการกดมากขึ้นเท่าใด ค่าโมดูลัส แรงเฉือนช่วงต้นที่คำนวณได้ก็จะครอบคลุมลักษณะการ เสีรูปมากขึ้น ซึ่งจากการสังเกตลักษณะของเส้นโค้ง คล้ายเป็นเชิงเส้น โดยลักษณะดังกล่าวคล้ายคลึงกับกฎของ ฮุกส์ จึงสามารถนำค่าที่ได้มาคำนวณเพื่อหาค่าโมดูลัส ยืดหยุ่นในช่วงต้น การเปรียบเทียบผลการวิจัยกับงานวิจัย ที่ใช้วัสดุชนิดอีวีเอโฟมซึ่งเป็นโฟมชนิดแข็งกว่าพียูโฟม ส่งผลต่อค่าความเค้นที่มากกว่าอย่างมีนัยยะ กล่าวคือ ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นโค้งที่ส่งผลถึง ความสามารถของแบบจำลองของวัสดุ ทำให้วัสดุชนิด อีวีเอโฟมที่มีความแข็งมีการเปลี่ยนแปลงค่าความชันของ ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดอย่างรวดเร็วจึงทำให้แบบจำลองของบลาทซ์โกสามารถอธิบาย พฤติกรรมการเสีรูปของวัสดุได้ในช่วงเปอร์เซ็นต์ ความเครียดที่น้อยกว่าวัสดุพียูโฟม

ในงานวิจัยครั้งนี้สามารถนำไปสู่ข้อเสนอแนะที่ว่า เนื่องจากการโดยทั่วไปแล้ววัสดุไม่ได้รับภาระแรงเพียงแค่ รูปแบบเดียว และในทางตรงกันข้ามแบบจำลองบลาทซ์โก นั้นมีสัมประสิทธิ์ที่สื่อถึงค่าคงที่เพียงตัวเดียว จึงทำให้ รูปแบบสมการไม่ซับซ้อนมากนัก ทำให้ผลการทำนาย พฤติกรรมทางกลจากข้อมูลการทดสอบสามารถครอบคลุม เพียงความเครียดช่วงต้นๆ เพื่อให้มีความเหมาะสมและการ ใช้งานวัสดุพียูโฟมอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น จึงควรทำการ วิจัยเพิ่มเติม โดยการเลือกประเภทการทดสอบวัสดุดังกล่าว ให้หลากหลายลักษณะของภาระแรงกระทำที่วัสดุจะได้รับ เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลของความสัมพันธ์ของการเสีรูป ในรูปแบบอื่น ดังเช่นการทดสอบการดึง การเฉือน หรือการ ทดสอบการดึงวัสดุในสองแนวแกน เป็นต้น อีกทั้ง หาก ต้องการทำนายหรืออธิบายพฤติกรรมการเสีรูปของวัสดุ ในช่วงของความเครียดที่มากขึ้น จำเป็นต้องใช้แบบจำลอง ไฮเปอร์อีลาสติกที่มีรูปแบบสมการที่ซับซ้อนและจำนวน ค่าสัมประสิทธิ์ที่มากขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ดำเนินการได้ด้วยการสนับสนุนจาก
ทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และทุนสนับสนุนห้องวิจัยโดย
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

เอกสารอ้างอิง

- [1] บริษัท พี.ยู. โฟม อินชูลेशन แอนด์ ชัพพลาย จำกัด, “ความหมายและคุณสมบัติของฉนวนกันความร้อน,” มิถุนายน, 2560, [Online]. Available: <http://www.pufoam.co.th/>. [Accessed Jul. 1, 2021].
- [2] M.A. Mooney, “A theory of large elastic deformation,” Journal of Applied Physics, vol.11, pp. 582-592, 1940.
- [3] L. R. G Treloar., “Stress- strain data for vulcanized rubber under various types of deformation,” Transactions of the Faraday Society, vol. 40, pp. 59-70. 1944.
- [4] R. S. Rivlin, “Large elastic deformations of isotropic materials I, Fundamental concepts,” Philosophical Transactions of the Royal Society of London, vol. 240, pp. 459-490. Jan. 1948.
- [5] P. J. Blatz, W. L. Ko., “Application of finite elasticity to deformation of rubber material Trans,” Transactions of the Society of Rheology, vol. 6, pp. 223-251, 1962.
- [6] R. W. Ogden, “Large deformation isotropic-on the correlation of theory and experimental for the incompressible rubber-like solids,” Royal Society London, vol. 326, pp. 565-584. 1972.
- [7] Standard Test Methods for Flexible Cellular Materials-Slab, Bonded, and Molded Urethane Foams, ASTM international, Designation: D3574-17, 2018.
- [8] W. E. Driver, Plastic Chemistry and Technology. New York: Van Nostrand Reinhold, 1979.
- [9] D. Klemperer, and K. C. Frisch, Handbook of Polymeric Foams and Foam Technology. New York: Oxford University Press, 1991.
- [10] ณัฐพงษ์ สังขพงศ์, ฟาไฮ วิวัฒน์วงศ์วนา และ ณัฐวิทย์ พรหมมา, “การคำนวณหาค่าโมดูลัสแรงเฉือนในช่วงต้นของวัสดุอีวีเอโฟมโดยใช้วิธีการปรับเส้นโค้งในกรณีการทดสอบการกด,” ในการประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 32, ประเทศไทย, 2561, หน้า 50.
- [11] F. Wiwatwongwana, and N. Promma, “Characterization of Gelatin-Carboxymethylcellulose Scaffolds,” International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing, Vol. 7, No. 1, pp. 12-15, Feb. 2019.
- [12] F. Wiwatwongwana, and N. Promma, “Mechanical Properties Analysis of Scaffold Material Using Nonlinear Least Squares Fitting by Hyperelastic Model,” International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing, Vol. 8, No. 3, pp. 84-88, Jun. 2020.
- [13] N. Siroros, and N. Promma, “Determine of material Parameter of Gelatin- Carboxymethylcellulose Scaffold with Dehydrothermal Crosslinking Technique using Curve Fitting Method,” Advanced Materials Research, Vol. 932-932, pp. 375-380, Aug. 2014.
- [14] I. Doghri, Mechanics of Deformable Solid. New York: Springer-Verlag Publishing, 1999.

- [15] ASTM International, "Standard Test Methods for Flexible Cellular Materials-Slab, Bonded, and Molded Urethane Foams," Designation D3574-11, 2011.
- [16] L. Mullins, "Effect of Stretching on the Properties of Rubber," Rubber Chemistry and Technology, vol. 21, no.2, pp. 281–300. Jun. 1948.
- [17] O. H. Yeoh, "Some forms of strain energy function for rubber," Rubber Chemistry and Technology, vol. 66, no. 5, pp. 754-771, Nov. 1993.