

คุณสมบัติของโฟมโพลีสไตรีนสำหรับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Properties of Polystyrene Foam for Finite Element Analysis

สวัสดิ์ ภูมิสวัสดิ์¹ ชัยยากร จันทร์สุวรรณ²

สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนพหลโยธิน กรุงเทพมหานคร 10900

โทร : 0-29428567-70, โทรสาร : 0-29428571, E-mail: poomsawat@yahoo.com¹, fengckj@ku.ac.th²

Sawat Poomsawat¹ Chaiyakorn Jansuwan²

Research and Development Institute of Industrial Production Technology,

Faculty of Engineering, Kasetsart University,

50, Phaholyothin Rd., Bangkok, 10900, Thailand

Tel : 0-29428567-70, Fax : 0-29428571, E-mail: poomsawat@yahoo.com¹, fengckj@ku.ac.th²

บทคัดย่อ

โฟมโพลีสไตรีนเป็นวัสดุดูดซับพลังงานใช้สำหรับเป็นวัสดุรองในหมวกนิรภัย ซึ่งมีหน้าที่หลักในการลดแรงกระแทกที่ส่งผ่านมายังศีรษะของผู้ขับขี่เมื่อเกิดอุบัติเหตุ คุณสมบัติของโฟมจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของหมวกนิรภัยด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ งานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติทางกลของโฟมโพลีสไตรีน ภายใต้สภาวะและเงื่อนไขต่าง ๆ เช่น ภาวะอุณหภูมิสูง-ต่ำ อัตราความเครียดที่เปลี่ยนแปลง และความหนาแน่นของโฟม รวมถึงแบบจำลองที่ใช้ในการประมาณความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดภายใต้ภาระแรงกดที่สภาวะและเงื่อนไขข้างต้น โดยผลที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโฟมโพลีสไตรีน หรืออุปกรณ์ที่มีโฟมโพลีสไตรีนเป็นส่วนประกอบ

Abstract

PolyStyrene Foam (also known as Expanded PolyStyrene or EPS) is an energy absorption material used for a liner in a motorcycle helmet. Its main function is to absorb impact energy during the accident thus reducing the risk of serious head injury for the wearer. EPS mechanical properties, therefore, is essential to the analysis of the helmet safety performance via finite element method. This research studies EPS properties under various conditions such as different foam densities, varied strain rates and temperatures. It also discusses the use of mathematical models for the prediction of stress-strain relation under these

conditions. The results were used in the finite element analysis of a motorcycle helmet.

1. บทนำ

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นเครื่องมือที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างสูงในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรม ซึ่งเป็นผลมาจากความสามารถในการวิเคราะห์ปัญหาที่ซับซ้อน และความสามารถในการกำหนดความแม่นยำของผลการวิเคราะห์ที่ได้จากความละเอียดของเอลิเมนต์ที่ใช้ อย่างไรก็ตามความถูกต้องของผลที่ได้ขึ้นอยู่กับความถูกต้องของข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ซึ่งได้แก่ข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุที่ต้องการในการวิเคราะห์ และเงื่อนไขที่ใช้ในการจำลองปัญหาที่กำลังพิจารณา

คุณสมบัติของวัสดุวิศวกรรมทั่วไปสามารถหาได้จากตำราทางวิศวกรรม หรือแม้แต่ภายในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ แต่หากเป็นวัสดุที่มีได้ใช้กันอย่างแพร่หลาย ก็มีใช้เรื่องง่ายในการหาคุณสมบัติของวัสดุดังกล่าว โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติของวัสดุที่ตรงตามความต้องการของเงื่อนไขต่าง ๆ ในปัญหาที่กำลังพิจารณา เช่น คุณสมบัติของวัสดุที่อุณหภูมิต่างจากอุณหภูมิห้อง หรือคุณสมบัติของวัสดุชนิดเดียวกันแต่ต่างความหนาแน่น ในกรณีเช่นนี้การทำการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติของวัสดุทุก ๆ เงื่อนไข อาจเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ หรือต้องใช้จ่ายสูงเกินความจำเป็น

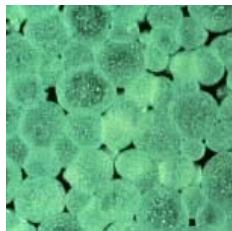
งานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติของโฟมโพลีสไตรีนสำหรับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นส่วนรับแรงกระแทกในหมวกนิรภัย ซึ่งเป็นวัสดุที่มีข้อมูลด้านคุณสมบัติอยู่จำกัด อีกทั้งเงื่อนไขในการวิเคราะห์ที่มีความหลากหลายตามมาตรฐานการทดสอบหมวกนิรภัยของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมได้แก่ การ

วิเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงและต่ำ การวิเคราะห์การดูดซับแรงกระทำ การวิเคราะห์ความคงรูป ซึ่งเงื่อนไขต่างเหล่านี้ส่งผลให้การได้มาซึ่งข้อมูลของคุณสมบัติที่ครบถ้วนของโฟมเป็นไปได้ยาก งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษากระบวนการเตรียมข้อมูลคุณสมบัติของโฟมโพลีสไตรีนเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ตามเงื่อนไขที่ต้องการจากข้อมูลที่มีอยู่จำกัด

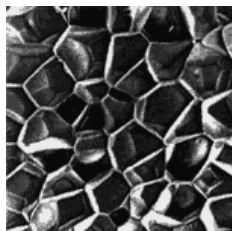
2. โฟมโพลีสไตรีน

โฟมโพลีสไตรีนเกิดจากการขยายตัวของสารที่ช่วยทำให้เกิดการขยายตัว (Blowing Agent) เช่น เพนเทน (Pentane) ซึ่งผสมอยู่ในเม็ดพลาสติกโพลีสไตรีน ทำให้เม็ดพลาสติกโพลีสไตรีนขยายตัวขึ้น การผลิตโฟมโพลีสไตรีนในปัจจุบันมี 2 วิธีคือ การผลิตแบบขยายตัว (Expansion) และการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูด (Extrusion)

การผลิตแบบขยายตัวทำได้โดยการนำเม็ดพลาสติกโพลีสไตรีนที่มีส่วนผสมของเพนเทนมาให้ความร้อนเพื่อให้เกิดการขยายตัวให้ได้ขนาดเม็ดโฟม (Polystyrene beads) ตามต้องการ ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาตรชิ้นงานโฟมและความหนาแน่นที่ต้องการ หลังจากนั้นจึงนำเม็ดโฟมที่ได้ไปอบที่ความดันบรรยากาศเพื่อปรับความดันภายในเม็ดโฟมให้เท่ากับความดันบรรยากาศ ขั้นตอนสุดท้ายคือการนำเม็ดโฟมที่ได้ใส่ในแม่พิมพ์และให้ความร้อนด้วยไอน้ำเพื่อให้เม็ดโฟมขยายตัวจนแน่นภายในแม่พิมพ์และผนังเชื่อมติดกัน วิธีการผลิตแบบนี้มีข้อดีคือสามารถผลิตชิ้นงานโฟมได้รูปร่างซับซ้อนกว่าการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูด แต่เนื้อโฟมที่ได้มีความสม่ำเสมอน้อยกว่าเนื่องมาจากมีช่องว่างของอากาศระหว่างเม็ดโฟมดังแสดงในรูปที่ 1 โฟมที่ได้จากกระบวนการผลิตนี้โดยทั่วไปเรียกว่า Expanded PolyStyrene (EPS)



รูปที่ 1 โครงสร้างโฟม EPS



รูปที่ 2 โครงสร้างโฟม XEPS หรือ XPS

การผลิตแบบเอ็กซ์ทรูดทำได้โดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูดในการหลอมเม็ดพลาสติกโพลีสไตรีน สารที่ช่วยให้เกิดการขยายตัว และสารเติมแต่ง

ตามต้องการเช่นสารป้องกันการติดไฟ เข้าด้วยกันภายใต้แรงดันและอุณหภูมิสูง หลังจากนั้นจึงถูกดันผ่านพิมพ์ตามรูปร่างที่ต้องการ โดยสารผสมที่ได้เกิดการขยายตัวทันทีหลังจากผ่านพิมพ์และเกิดเป็นโฟมที่มีรูปร่างตามพิมพ์ที่ใช้ ข้อดีของโฟมที่ได้จากกระบวนการนี้คือความสม่ำเสมอของเนื้อโฟมโดยไม่มีโพรงอากาศ โฟมที่ได้จากกระบวนการนี้มีลักษณะแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งโดยทั่วไปเรียกว่า Extruded PolyStyrene (XEPS หรือ XPS)

ในการผลิตโฟมโพลีสไตรีนโดยทั่วไปนิยมใช้กระบวนการผลิตแบบขยายตัวเนื่องจากสามารถทำชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้ซึ่งเหมาะสมกับการทำชิ้นงานเพื่อใช้ลดแรงกระทำในอุตสาหกรรมบรรจุหีบห่อ เช่นเครื่องใช้ไฟฟ้า รวมถึงการทำโฟมรองในสำหรับหมวกนิรภัยซึ่งมีรูปร่างที่ซับซ้อน ส่วนโฟม XPS ซึ่งมีคุณสมบัติดีกว่าถูกนำไปใช้ในฉนวนในการทำห้องเย็น และในอาคารต่างๆ

ด้วยกรรมวิธีการผลิตโฟมโพลีสไตรีนดังกล่าวในข้างต้น ทำให้โฟมโพลีสไตรีนโครงสร้างแบบเซลล์ [1-3] (Cellular Structure) ดังรูปที่ 1 และ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นโครงสร้างของโฟมโพลีสไตรีนเป็นแบบเซลล์ปิด (Closed Cell) ลักษณะทรงกลมที่เบียดอัดกันอยู่ โดยมีก๊าซแทรกอยู่ภายใน ซึ่งก๊าซนี้เป็นส่วนสำคัญที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของโฟม โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสามารถในการรับแรงกด ซึ่งก๊าซที่อยู่ภายในเซลล์ปิดไม่สามารถผ่านผนังเซลล์ออกมาได้เร็วเพียงพอ ทำให้เซลล์รับแรงกดได้สูงขึ้นก่อนผนังเซลล์โก่งเสียรูปและแตก ทำให้โฟมโพลีสไตรีนมีคุณสมบัติในการดูดซับพลังงาน

3. คุณสมบัติทางกลของโฟมโพลีสไตรีน

โฟมโพลีสไตรีนเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทางกลแตกต่างจากพลาสติกโพลีสไตรีนอย่างสิ้นเชิงเนื่องจากลักษณะโครงสร้างแบบเซลล์ที่มีก๊าซอยู่ภายในดังได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ คุณสมบัติทางกลของโฟมโพลีสไตรีนแปรผันตามความหนาแน่นเป็นหลัก ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของโฟมโพลีสไตรีน

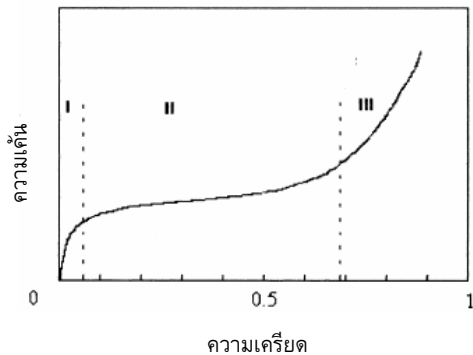
คุณสมบัติ	โพลีสไตรีน ⁴	โฟมโพลีสไตรีน ⁵		
ความหนาแน่น (kg/m ³)	1040-1070	28	55	70
ความต้านแรงดึงคราก (MPa)	25-69	0.4	0.9	1.2
โมดูลัสยืดหยุ่นแรงดึง (GPa)	1.79 - 3.38	-	-	-
ความต้านแรงกดคราก (MPa)	90	0.19	0.46	0.70
โมดูลัสยืดหยุ่นแรงกด (MPa)	-	6.5	21.3	32.3

ตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าโฟมโพลีสไตรีนมีค่าความแข็งแรงต่ำกว่าพลาสติกโพลีสไตรีนมาก โดยโฟมมีพฤติกรรมเป็นวัสดุเปราะ (Brittle Material) เมื่อได้รับแรงดึง และพบว่าทั้งความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงกดและโมดูลัสยืดหยุ่นแรงดึงมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับความหนาแน่นโฟม [5]

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดเป็นคุณลักษณะทางกลที่สำคัญมากอย่างหนึ่งของวัสดุวิศวกรรม สำหรับวัสดุวิศวกรรมทั่วไป ผู้ใช้มักสนใจพฤติกรรมในช่วงก่อนการครากหรือก่อนที่วัสดุเสียรูปถาวร ในขณะที่ในกระบวนการขึ้นรูปให้ความสำคัญกับพฤติกรรมในช่วงเสียรูปถาวรมากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปวัสดุเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของวัสดุแบบถาวร การทดสอบวัสดุเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด โดยเฉพาะวัสดุเหนียว (Ductile Material) มักใช้การทดสอบแรงดึง แต่สำหรับวัสดุโฟมนั้นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของโฟมภายใต้แรงกดเป็นประเด็นสำคัญกว่า เนื่องจากโฟมถูกนำมาเป็นวัสดุที่รับภาระแรงกดหรือแรงกระแทกเป็นหลักและโฟมมีพฤติกรรมเป็นวัสดุประาะเมื่อรับแรงดึง

เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress Strain Curve) ของโฟม จากการทดสอบแรงกด แบ่งออกได้เป็นสามช่วง [1,5] ดังรูปที่ 3 คือ 1. ช่วงยืดหยุ่นแบบเส้นตรง (Linear Elastic) เป็นช่วงสั้นๆ ซึ่งความเครียดอยู่ในช่วงประมาณ 3-5 % ช่วงยืดหยุ่นนี้เกิดจากการโก่งตัว (Bending) ของผนังเซลล์ 2. ช่วงเสียรูปถาวร ซึ่งความเค้นสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อความเครียดเพิ่มขึ้น (Collapse Plateau) การเสียรูปถาวรนี้เกิดจากการครากของผนังเซลล์ ช่วงนี้เป็นช่วงกว้างที่สุด โดยการเสียรูปในช่วงนี้ทำให้โฟมมีคุณสมบัติในการเป็นวัสดุดูดซับพลังงาน 3. ช่วงที่ความเค้นสูงขึ้นมากเมื่อความเครียดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ช่วงนี้เกิดขึ้นเมื่อความเครียดมากจนกระทั่งเกิดการอัดตัวของผนังเซลล์เข้าด้วยกัน ทำให้เนื้อโฟมแน่นขึ้น (Densification)



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

3.2 พฤติกรรมของโฟมโพลีสไตรีนในช่วงยืดหยุ่น

โฟมโพลีสไตรีนมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นช่วงสั้นๆ ในช่วงแรกของการรับภาระ โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดเป็นเส้นตรง เมื่อรับแรงกดในแนวแกนโฟมแทบไม่มีการขยายตัวในแนวขวางเลย นั่นคืออัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ของโฟมมีค่าต่ำมาก ตัวอย่างเช่น จากการทดลองพบว่าโฟมที่มีความหนาแน่น 20 kg/m³ มีค่าอัตราส่วนปัวซองเพียง 0.09 [6]

ในช่วงยืดหยุ่นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของโฟม E_f มีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมเทียบกับพลาสติกตั้งต้น (Relative Density of Foam) ตามสมการ (1) [2,3]

$$E_f = CE_s R^n \quad (1)$$

เมื่อ E_s คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของโพลิเมอร์ตั้งต้น (Solid Polymer) ซึ่งได้แก่ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของพลาสติกโพลีสไตรีน และค่า R คือ ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมเทียบกับพลาสติกตั้งต้น (Relative Density of Foam) C และ n คือค่าคงที่ ซึ่งสามารถทำนายได้จากแบบจำลองโครงสร้างระดับจุลภาคของโฟมโดยผลที่ได้เป็นไปตามสมการ [4]

$$E_f = 0.0598E_s R^{1.066} \quad (2)$$

หรือหาได้จากการเปรียบเทียบกับผลการทดลองของโฟมโพลีสไตรีน โดยในช่วงความหนาแน่น 21-80 kg/m³ พบว่าความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการ (3) [4]

$$E_f = 0.977E_s R^{1.627} \quad (3)$$

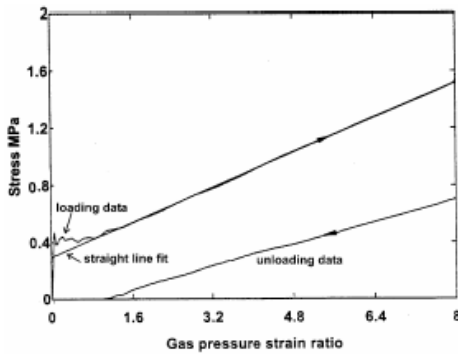
3.3 พฤติกรรมของโฟมโพลีสไตรีนในช่วงเปลี่ยนรูปถาวร

พฤติกรรมของโฟมภายใต้ภาระแรงกดเกือบทั้งหมดอยู่ในช่วงเสียรูปถาวร จากการทดสอบแรงกดตามแกนเดียว (Uniaxial Compression) ความเค้นกด σ_C และความเครียด ε มีความสัมพันธ์ตามสมการ "การแข็งตัวจากความดันก๊าซ" (Gas Pressure Hardening) [4]

$$\sigma_C = \sigma_{C_0} + \frac{p_0 \varepsilon}{1 - \varepsilon - R} \quad (4)$$

เมื่อ σ_{C_0} คือ ความเค้นกดครากเริ่มต้น (Initial Yield Stress) p_0 คือ ค่าความดันก๊าซภายในโฟม (Gas Pressure) และ R คือ ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟม ค่าคงที่ในสมการ (4) สามารถหาได้จากการทดลองและหาความสัมพันธ์แบบเส้นตรงระหว่างความเค้นกดกับอัตราส่วนความเครียดจากความดันก๊าซ (Gas Pressure Strain Ratio), $\varepsilon/(1 - \varepsilon - R)$ ดังรูปที่ 4 แสดงผลที่ได้จากการทดลองกับโฟมโพลีสไตรีนชนิดแผ่นที่ได้จากการเอ็กซ์ทรูด (Extruded Polystyrene Foam, XPS) [6-8] ความหนาแน่นประมาณ 28.3 kg/m³ ด้วยการวัดความสัมพันธ์ตามสมการ (4) จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4 พบว่า p_0 มีค่า 150 kPa ในช่วงใส่โหลด (Loading) และมีค่าประมาณ 100 kPa เมื่อปล่อยโหลด (Unloading) หากโฟมนั้นถูกเก็บไว้ในความดันบรรยากาศหลายๆ เดือน p_0 ควรมีค่าประมาณ

ความดันบรรยากาศ แต่เหตุที่ในช่วงไฮโดลด์ค่า p_0 มีค่าสูงกว่าความดันบรรยากาศเนื่องจากมีความเครียดของเนื้อพลาสติกโพลีเอทิลีนร่วมด้วย สำหรับค่า σ_{C_0} เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบแบบกึ่งสถิตย์ (Quasi Static) (ที่อัตราการความเครียด $4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) กับการทดสอบกระแทกที่มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย โดยในทิศตั้งฉากกับแผ่นโพนั้น σ_{C_0} มีค่า 275 kPa ในการทดสอบแบบกึ่งสถิตย์ และมีค่า 290 kPa ในการทดสอบแบบกระแทก และพบว่า σ_{C_0} ในทิศทางแนวขวางมีค่าใกล้เคียงกับในทิศทางตั้งฉาก ในขณะที่ σ_{C_0} ในทิศการรีดมีค่าต่ำกว่าในทิศทางแนวขวางและแนวตั้งฉากโดยมีค่า 170 kPa ในการทดสอบแบบกึ่งสถิตย์และ 200 kPa ในการทดสอบกระแทก แสดงว่าโพนีมีคุณสมบัติใกล้เคียงกันในทิศทางแนวขวางและแนวตั้งฉาก ทำให้พิจารณาได้ว่าโพนีจากการเอ็กซ์ทรูดมีคุณสมบัติแบบ Transverse Isotropy



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับอัตราส่วนความเครียดจากความดันก๊าซในการทดสอบกกระแทกทิศทางตั้งฉากกับแผ่นโพนี

นอกจากนี้ ค่า σ_{C_0} สามารถประมาณจากค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโพนี โดยการทดลอง [3] พบว่า

$$\sigma_{C_0} \cong \sigma_s R^{1.5} \quad (5)$$

โดย σ_s คือ ค่าความเค้นครากของของพลาสติกตั้งต้น และค่า R คือ ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโพนี

3.4 อิทธิพลของอัตราการความเครียดและอุณหภูมิ

วัสดุโดยทั่วไปรับภาระแบบกึ่งสถิตย์ คือภาระกระทำด้วยความเร็วต่ำมาก โดยทั่วไปอัตราการความเครียดในช่วง 10^{-2} s^{-1} ถึง 10^{-3} s^{-1} สามารถพิจารณาได้ว่าเป็นภาระแบบกึ่งสถิตย์ [9] แต่สำหรับโพนีโพลีเอทิลีน ซึ่งนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับลดแรงกระแทกนั้น อัตราการความเครียดของโพนีสูงกว่าที่ภาระแบบกึ่งสถิตย์มาก อิทธิพลของอัตราการความเครียดจึงเป็นตัวแปรสำคัญที่ต้องพิจารณา

นอกจากอัตราความเครียดแล้วอุณหภูมิเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่สำคัญ และมีผลต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ตัวอย่างเช่นในการทดสอบหมวกนิรภัยตามมาตรฐาน มอก. [10] หมวกนิรภัยต้องถูกนำไปปรับสภาวะก่อนการทดสอบที่ 3 ระดับอุณหภูมิคือ ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) สภาวะอุณหภูมิต่ำ (-10°C) และสภาวะอุณหภูมิสูง (50°C) ซึ่งที่สภาวะอุณหภูมิตดสอบที่แตกต่างกันมากนี้มีผลต่อพฤติกรรมของโพนีซึ่งเป็นวัสดุรองในหมวกนิรภัย

โพนีมีพฤติกรรมที่เหมือนกับวัสดุอื่นทั่วไป คือมีความแข็งแรงมากขึ้นเมื่ออัตราการความเครียดสูงขึ้นและเมื่ออุณหภูมิตดลง Zhang [11] แสดงถึงอิทธิพลของอัตราการความเครียดและอุณหภูมิต่อความเค้นและความเครียดดังสมการ

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_0(\varepsilon)L(T) \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^{a+b\varepsilon} \quad (6)$$

เมื่อ $\sigma_0(\varepsilon)$ เป็นฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่อัตราการความเครียดกึ่งสถิตย์ $\dot{\varepsilon}_0$ โดย a และ b คือค่าคงที่ของวัสดุ $L(T)$ แสดงถึงอิทธิพลของอุณหภูมิซึ่งกำหนดโดยสมการ

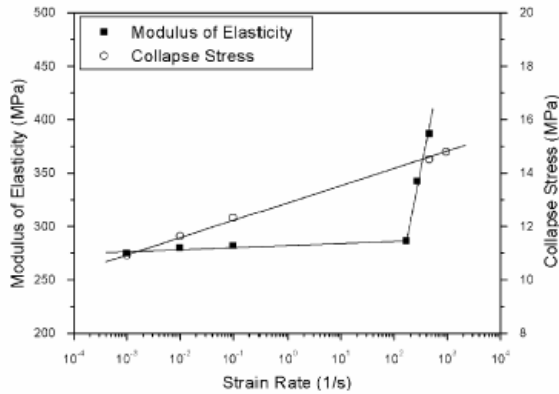
$$L(T) = \exp \left[-\frac{C_1(T-T_r)}{C_2+T-T_r} \right] \quad (7)$$

เมื่อ C_1 และ C_2 คือค่าคงที่ของวัสดุ T_r คืออุณหภูมิห้อง ดังนั้นที่อุณหภูมิห้อง $L(T)$ มีค่าเท่ากับ 1 สมการ (8) แสดงถึงอิทธิพลของอัตราการความเครียดที่อุณหภูมิห้อง

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_0(\varepsilon) \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^{a+b\varepsilon} \quad (8)$$

จากการทดลองในโพนีโพลีเอทิลีนความหนาแน่น 1 pcf พบว่าค่าคงที่ a และ b มีค่า 0.016 และ 0.0833 ตามลำดับ ทั้งนี้สังเกตได้ว่าอิทธิพลของอัตราการความเครียดมีค่าลดลงเมื่ออัตราการความเครียดมีค่าสูงขึ้น โดยที่อัตราการความเครียดมากกว่า 4.5 s^{-1} อัตราการความเครียดเกือบไม่มีอิทธิพลต่อความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

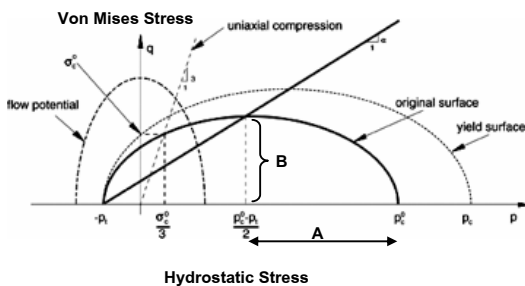
Bo Song [12] ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราการความเครียดช่วง $0.001-950 \text{ s}^{-1}$ ในโพนีโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (ประมาณ 400 kg/m^3) พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและความเค้นครากมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับค่าลอการิทึมของอัตราการความเครียด (Logarithm of Strain rate) โดยในช่วงอัตราการความเครียดต่ำ (น้อยกว่า 170 s^{-1}) อัตราการความเครียดมีผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นน้อยกว่าในช่วงอัตราการความเครียดสูง ในขณะที่อิทธิพลของอัตราการความเครียดต่อความเค้นครากมีลักษณะต่อเนื่องโดยไม่ได้แบ่งเป็นช่วง ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 อิทธิพลของอัตราการความเครียดต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและความเค้นคราก

4. แบบจำลองพฤติกรรมของวัสดุ

ในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความถูกต้องและแม่นยำของการวิเคราะห์ที่สำคัญมาก คือ ความถูกต้องของการจำลองพฤติกรรมวัสดุ แบบจำลองพฤติกรรมของวัสดุสามารถอธิบายได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Constitutive Equation แบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของโฟมในช่วงยืดหยุ่นใช้แบบจำลองยืดหยุ่นเชิงเส้น สำหรับช่วงเปลี่ยนรูปถาวรแบบจำลองมีความซับซ้อนมากขึ้น โดยแบบจำลองต้องสามารถอธิบายพฤติกรรมการเกิดการครากภายใต้ภาวะกระทำลักษณะต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้วได้ สำหรับแบบจำลองพฤติกรรมของโฟมในช่วงเปลี่ยนรูปถาวรสามารถใช้แบบจำลอง Crushable Foams Model ในโปรแกรม ABAQUS [13] แบบจำลองผิวคราก (Yield Surface) ของ Crushable Foams Model กำหนดด้วยสมการรูปร่างรีบนานเมื่อแกนตั้งเป็นความเค้นฟอนมิส (Von Mises Stress) และแกนนอนเป็นความเค้นไฮโดรสแตติก (Hydrostatic Stress) ดังรูป



รูปที่ 6 ผิวครากวงรีและการขยายผิวครากเมื่อเกิดความเครียดเชิง

ผิวครากตัดแกนนอนความเค้นไฮโดรสแตติกที่ความเค้นดึงไฮโดรสแตติก p_t และความเค้นกดไฮโดรสแตติก p_c โดย α คืออัตราส่วนรูปทรง (Shape Factor) มีค่าเท่ากับ B/A

ในแบบจำลองการแข็งตัวเนื่องจากความเครียด (Strain Hardening) ซึ่งกำหนดจากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกดแนวแกน

กับความเครียดกดแนวแกน สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ตามสมการ (4) สำหรับโฟมโพลีเมอร์ โปรแกรม ABAQUS ใช้แบบจำลองการแข็งตัวเชิงปริมาตร (Volumetric hardening) โดยกำหนดให้ p_t มีค่าคงที่ โดยการขยายตัวของผิวครากวงรีขยายด้วยอัตราส่วนรูปทรงคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 6

จากการทดลองแบบกระแทกพบว่าความเค้นไฮโดรสแตติกเมื่อเริ่มคราก p_{c0} มีค่า 0.15 MPa [6-8] การหาค่าความเค้นดึงไฮโดรสแตติก p_t จากการทดลองทำได้ยากมาก ใน ABAQUS แนะนำให้ใช้ค่า p_t ประมาณ 5-10% ของค่า p_{c0} ขณะที่ Mills และคณะ [6-8] เลือกใช้ค่า p_{c0} เท่ากับ 0.15 MPa โดยให้เหตุผลว่าเป็นค่าที่ทำให้การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีเสถียรภาพ สำหรับอิทธิพลของอัตราความเครียดกำหนดได้ด้วย Overstress power Law หรือกำหนดโดยตรงจากอัตราส่วนการคราก (Yield Ratio) คืออัตราส่วนความเค้นครากที่อัตราความเครียดต่างๆ เทียบกับความเค้นครากที่อัตราความเครียดอ้างอิง

5. สรุป

คุณสมบัติทางกลของโฟมโพลีสไตรีนเป็นผลสืบเนื่องจากการผลิตทำให้โฟมมีโครงสร้างแบบเซลล์ โดยมีก๊าซอยู่ภายใน ทำให้โฟมมีคุณสมบัติในการดูดซับแรงกดได้ดี แต่มีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำ ความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดภายใต้การกดตามแนวแกน แบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงยืดหยุ่นสั้นๆ ช่วงเปลี่ยนรูปถาวรซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกสมบูรณ์แบบ (Ideal Plastic) และช่วงสุดท้ายเป็นช่วงที่โฟมอัดตัวทำให้มีความแข็งแรงสูงขึ้น ตัวแปรที่มีอิทธิพลสำคัญต่อคุณสมบัติของโฟม มี 3 ตัวแปร คือ 1. ความหนาแน่นของโฟม ซึ่งถูกกำหนดในขั้นตอนการผลิต 2. อัตราความเครียด 3. อุณหภูมิ โฟมมีความแข็งแรงสูงในกรณีที่มีความหนาแน่นสูง หรืออัตราความเครียดสูง หรืออุณหภูมิต่ำลง โดยคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปตามเงื่อนไขเหล่านี้สามารถประมาณได้ ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ข้อมูลเหล่านี้สามารถนำไปใช้ในแบบจำลองพฤติกรรมของโฟมสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งในโครงการวิจัยเรื่อง “การออกแบบหมวกนิรภัยและแม่พิมพ์หมวกนิรภัยสำหรับเด็กตามมาตรฐาน มอก.” ภายใต้โครงการ “การพัฒนาขีดความสามารถในการออกแบบและผลิตชิ้นส่วนยานยนต์” โดยการสนับสนุนทุนวิจัยของสถาบันยานยนต์

เอกสารอ้างอิง

[1] L.J. Gibson and M.F. Ashby, Cellular Solids-Structure and Properties, Pengamon Press, New York
 [2] M.F. Ashby, “The Mechanical Properties of Cellular solids”, Metallurgical Transactions A, 1983, Vol. 14A, pp. 1755-1769

- [3] A. Gilchrist and N.J. Mills, "Modeling of the Impact Response of Motorcycle Helmets", International Journal of Impact Engineering, 1994, pp.201-218
- [4] N.J. Mills, "Micromechanics of Polymeric Foams", Proc. 3rd Nordic meeting on materials and Mechanics, Aalborg, Denmark, 2000, pp.45-76
- [5] L.D. Landro et al., "Deformation mechanisms and energy absorption of polystyrene foams for protective helmets", Polymer Testing 21, 2002, pp. 217–228
- [6] A. Gilchrist and N.J. Mills, "Impact Deformation of Rigid Polymeric Foams: Experiments and FEA Modeling", International Journal of Impact Engineering, 2001, pp.767-786
- [7] Y. Masso-Moreu and N.J. Mills, "Impact Compression of Polystyrene Foam Pyramids", International Journal of Impact Engineering, 2003, pp.653-676
- [8] N.J. Mills, "Improving the Crushable Foam Model for Low-Density Polystyrene Foam", UK ABAQUS User Group Conference 2003
- [9] A.S. Khan and S. Huang, Continuum Theory of Plasticity, John Wiley & Sons, Inc. 1995
- [10] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม หมวกนิรภัยสำหรับผู้ใช้งานพาหนะ มอก. 369-2539
- [11] J. Zhang et al., "Constitutive Modeling and Material Characterization of Polymeric Foams", Journal of Engineering Materials and Technology, ASME, 1997, Vol.119, pp. 284-291
- [12] Bo Song et al, "Strain-rate Effects on Elastic and Early Cell-Collapse Response of a Polystyrene Foam", International Journal of Impact Engineering, 2004
- [13] ABAQUS Version 6.4 Documentation, ABAQUS, Inc.
- [14] <http://www.matweb.com>