

การจำลองพฤติกรรมการคืบของพลาสติกโดยใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ Simulation of Creep Behavior of Plastic using Finite Element Methodology

ไกรขจร ขจรบุญ และ ชاکริต สุวรรณจำรัส*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

25/25 ถ.พุทธมณฑลสาย 4 ต.ศาลายา อ.พุทธมณฑล จ.นครปฐม 73170

*ติดต่อ: chakrit.suv@mahidol.ac.th, โทรศัพท์ 662 889 2138 ต่อ 6416, โทรสาร 662 889 2139 ต่อ 6429

บทคัดย่อ

การจัดเก็บภาชนะบรรจุน้ำมันหล่อลื่นจำนวนมากจะทำโดยการวางภาชนะซ้อนทับกันเป็นชั้นๆ โดยใช้ค่าความทนทานต่อแรงกดด้านบน (Top load) ของภาชนะเป็นค่าในการกำหนดจำนวนชั้นที่สามารถวางซ้อนทับได้ ภาชนะน้ำมันหล่อลื่นส่วนใหญ่ผลิตจากพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene) ซึ่งมีพฤติกรรมการคืบ (Creep) เมื่อมีการวางภาชนะซ้อนทับกันเป็นเวลานานๆ จะทำให้ภาชนะเกิดการยุบตัวมากกว่าค่าการยุบตัวที่ได้ออกแบบ ทำให้ชั้นของภาชนะน้ำมันหล่อลื่นที่ถูกจัดเก็บล้มพังทลาย ซึ่งอาจทำให้ภาชนะน้ำมันหล่อลื่นแตกและเกิดความเสียหายต่อน้ำมันหล่อลื่นที่บรรจุภายใน

คุณสมบัติการคืบของพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงสามารถหาได้โดยการทดสอบด้วยวิธีดึงด้วยแรงดึงคงที่ตามมาตรฐานการทดสอบของ ASTM D2990 ซึ่งผลการดึงที่ได้จากการทดสอบนี้จำเป็นต้องมีการสังเคราะห์เพื่อนำไปใช้กับเทคโนโลยีการออกแบบขั้นสูง โดยปัจจุบันการออกแบบรูปทรงภาชนะน้ำมันหล่อลื่นมีการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยงานออกแบบ (Computer Aided Design) และมีการใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) วิเคราะห์ความแข็งแรงของภาชนะน้ำมันหล่อลื่นต่อการทดสอบทางกลก่อนการผลิตจริง

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการสังเคราะห์ผลการทดสอบการคืบ ทำให้ได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) และระยะเวลาที่เกิดการคืบของพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ซึ่งสามารถนำไปใช้กับการออกแบบภาชนะน้ำมันหล่อลื่นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทำให้มีความทนทานต่อการคืบ นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้มีการพิสูจน์ความแม่นยำของสมการที่ได้ โดยนำไปจำลองการทดสอบการคืบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และนำผลการจำลองมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2990 พบว่าผลที่ได้จากการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยกว่า 8.66% เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริง

คำหลัก: การคืบ, ไฟไนต์เอลิเมนต์, ภาชนะ, การทดสอบ, พลาสติก

Abstract

Many lubricant oil containers always are stacked to be layers for storage. The numbers of layers depend on the top load resistance of the containers. Almost lubricant oil containers produce by High Density Polyethylene (HDPE) which has the creep behavior. The lubricant oil containers are stacked in a long time will deform more than limitation and cause collapsing of the container layers. The containers may be damaged then the lubricant oil is impracticable.

Creep properties of HDPE are determined by ASTM D2990. The tensile results which receive from testing will be synthesized for using with the high technology of design. The present day, Computer Aided Design is used to design shape and Finite Element method is used to analyze the strength of the lubricant oil containers before actual production.

This research proposed the methods which synthesized the creep testing results. Consequently, the mathematic model was function of stress, strain and time of HDPE creep. This model could used in Finite Element method to design the containers that had the creep strength. Particularly, this research had to compare between the simulation of HDPE creep and the experiment results. The error of the finite element was less than 8.66% when compared with the experiment results.

Keywords: creep, Finite Element, containers, testing, plastic

1. บทนำ

การออกแบบกระป๋องน้ำมันหล่อลื่นในปัจจุบันได้มีการใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการออกแบบ และวิเคราะห์ความแข็งแรงต่อการทดสอบทางกล โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของรูปทรงของกระป๋องน้ำมันหล่อลื่นที่ถูกออกแบบ ซึ่งประกอบด้วยการทดสอบแรงดัน [1] การทดสอบภาระด้านบน [2,3] และการทดสอบปล่อยตก [4-6] ทำให้สามารถลดต้นทุนและระยะเวลาในการออกแบบได้ เมื่อมีการผลิตและใช้งานพบว่ามีปัญหาเกิดขึ้นในขณะมีการจัดเก็บ โดยการวางกระป๋องน้ำมันหล่อลื่นซ้อนทับกันเป็นชั้นๆเป็นเวลานานๆ ทำให้กระป๋องเกิดการยุบตัวและเกิดการล้นพองของชั้นกระป๋องน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งเป็นผลมาจากพฤติกรรม การคืบ (Creep) ของวัสดุที่ใช้ผลิต วัสดุทุกประเภทสามารถเกิดการคืบเมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสม โดยตัวแปรหลักคืออุณหภูมิและแรงกระทำ สำหรับพลาสติกสามารถเกิดการคืบได้ที่อุณหภูมิห้อง [7] โดยคุณสมบัติการคืบของพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene) ซึ่งเป็นวัสดุส่วนใหญ่ที่ใช้ผลิตกระป๋องน้ำมันหล่อลื่นนั้นสามารถหาได้โดยการทดสอบด้วยวิธีดึงด้วยแรงดึงคงที่ ตามมาตรฐานการทดสอบของ ASTM D2990 [8] และสามารถสร้างสมการเพื่อทำนายพฤติกรรม การคืบของพลาสติกโดยเขียนในรูปแบบสมการยกกำลัง งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการสังเคราะห์ผลการทดสอบการคืบของพลาสติกเพื่อให้ได้สมการที่สามารถทำนายพฤติกรรม การคืบของพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง เกรด 6140 ที่มีความแม่นยำ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis) เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบกระป๋องน้ำมันหล่อลื่นให้ทนต่อสภาวะการคืบของวัสดุที่ใช้ผลิตได้ต่อไป

2. แบบจำลองการคืบของพลาสติก

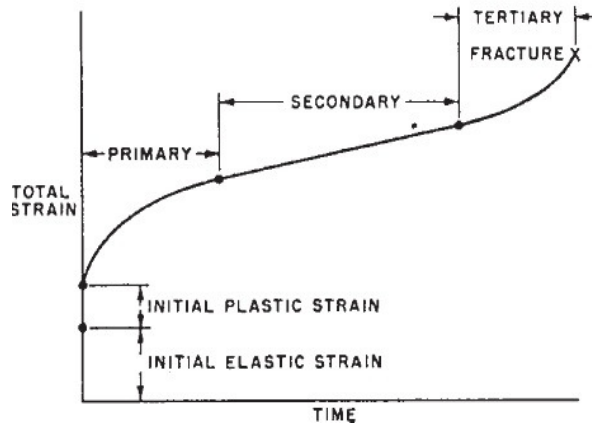
การคืบเป็นคุณสมบัติทางกลของวัสดุ เมื่อให้แรงกระทำคงที่แก่วัตถุใดๆ เป็นระยะเวลานานทำให้วัสดุนั้นมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง การทดสอบการคืบของพลาสติกทำได้โดยการให้แรงดึงหรือความเค้นดึง (Tensile stress) คงที่ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าความเค้นคราก (Yield stress) ของวัสดุแก่วัตถุงานทดสอบ (Specimens) และทำการวัดระยะยืดที่มีการเปลี่ยนแปลงหรือความเครียด (Strain) ณ เวลาที่แตกต่างกัน นำความสัมพันธ์ของความเครียดกับเวลา มาแสดงด้วยกราฟสามารถแบ่งพฤติกรรม การคืบของวัสดุได้เป็น 3 ระยะ (รูปที่ 1) ได้แก่

ระยะที่ 1 (Primary) เป็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอย่างทันทีเมื่อได้รับแรงกระทำและมีอัตราการเปลี่ยนแปลงลดลงเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น เรียกการคืบในระยะนี้ว่า “การคืบแบบฉับพลัน” (Instantaneous creep)

ระยะที่ 2 (Secondary) เป็นการเปลี่ยนแปลงที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงคงที่ซึ่งเรียกการคืบในระยะนี้ว่า “การคืบแบบอัตราคืบคงที่” (Constant rate creep)

ระยะที่ 3 (Tertiary) เป็นการเปลี่ยนแปลงที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเกิดการแตกหัก (Fracture) ของวัสดุในที่สุด เรียกการคืบในระยะที่ 3 นี้ว่า “การคืบแบบเสียหาย” (Creep rupture)

การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติการคืบของวัสดุตามมาตรฐาน ASTM D2990 ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) สามารถแบ่งประเภทการทดสอบออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การทดสอบเพื่อหาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นซึ่งจะศึกษาการคืบตัวในระยะที่ 1 จนถึงระยะที่ 2 และการทดสอบเพื่อหาความเสียหายที่เกิดขึ้นของการคืบเนื่องจากระยะเวลาซึ่งจะศึกษาการคืบตัวตั้งแต่ระยะที่ 1 จนถึงระยะที่ 3



รูปที่ 1 กราฟแสดงพฤติกรรมการคืบของวัสดุ [8]

ความสัมพันธ์ของความเครียดกับเวลาจะมีลักษณะแตกต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนค่าความเค้นดังที่นั่นตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเครียดสามารถแสดงได้ด้วยสมการ

$$\varepsilon^c = F(\bar{\sigma}, t) \quad (1)$$

เมื่อ ε^c คือ ความเครียดคืบ (Creep strain)

$\bar{\sigma}$ คือ ความเค้นเฉลี่ย (Average stress)

t คือ เวลา

สมการ (1) สามารถนำมาเขียนในรูปแบบของสมการการคืบที่มีตัวแปรความเค้นและเวลากำลึงของค่าคงที่ใดๆ ทำให้ได้สมการ

$$\varepsilon^c = A\bar{\sigma}^m t^n \quad (2)$$

เมื่อ A , m และ n คือ ค่าคงที่ใดๆ

3. วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

การสร้างแบบจำลองของการคืบของวัสดุด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิจัยนี้เป็นแบบแผ่นบาง (Plate) ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอยู่ในแนวระนาบ XY โดยสามารถแสดงเป็นสมการเมตริกซ์ (Matrix) ของความเค้นในแนวระนาบ (Plane stress) ดังสมการ

$$\{\sigma\} = [E]\{\varepsilon^E\} \quad (3)$$

เมื่อ $\{\sigma\}$ คือ เวกเตอร์ความเค้นในแนวแกน X และ Y

$[E]$ คือ เมตริกซ์ความแข็งแรงของวัสดุ

$\{\varepsilon^E\}$ คือ เวกเตอร์ความเครียดในช่วงยืดหยุ่น

(Elastic) ตามแนวแกน X และ Y

จากสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้แสดงเป็นค่าความเค้นและความเครียดในช่วงยืดหยุ่น (Elastic) ซึ่งเมื่อพิจารณาพฤติกรรมการคืบของวัสดุ ค่าความเครียดทั้งหมดที่เกิดขึ้นได้จากความเครียดในช่วงยืดหยุ่นและความเครียดที่เกิดจากพฤติกรรมการคืบของวัสดุ ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยสมการเมตริกซ์

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^E\} + \{\varepsilon^c\} \quad (4)$$

เมื่อ $\{\varepsilon\}$ คือ เวกเตอร์ความเครียดทั้งหมด

$\{\varepsilon^E\}$ คือ เวกเตอร์ความเครียดในช่วงยืดหยุ่น

$\{\varepsilon^c\}$ คือ เวกเตอร์ความเครียดคืบ

ในการคำนวณการคืบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มจากการหาระยะการเคลื่อนที่จากสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยกำหนดสถานะเริ่มต้น (Initial condition) เงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) แล้วทำการคำนวณหาค่าความเค้นและความเครียดซึ่งจะเป็นค่าในช่วงยืดหยุ่น หากค่าความเครียดที่เปลี่ยนแปลงมีค่าน้อยกว่าความเครียดในช่วงยืดหยุ่นจะใช้สมการการคืบโดยการกำหนดรูปสมการของการเปลี่ยนแปลงค่าความเครียดคืบให้ช่วงเวลา Δt ด้วยค่าตัวแปรถ่วงน้ำหนัก (Weighting parameter) ทำให้ได้สมการ

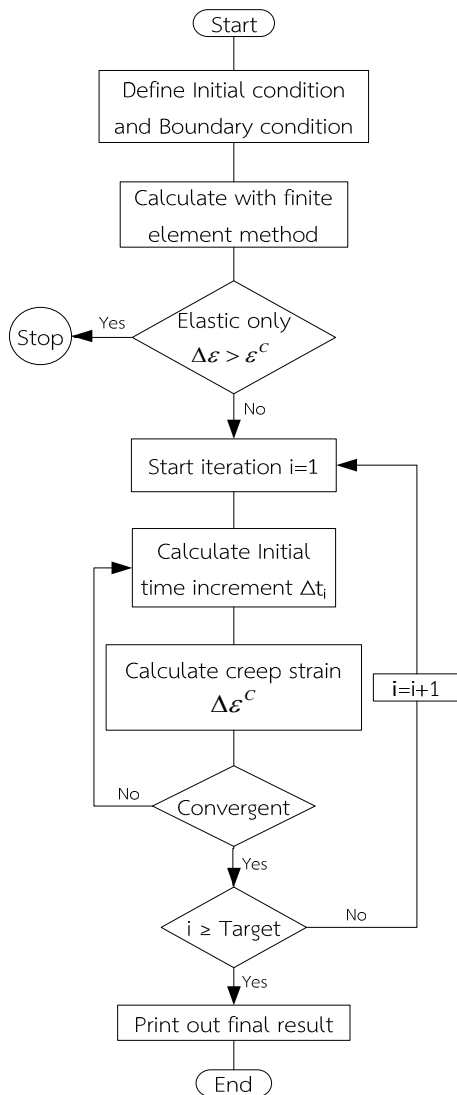
$$\Delta\varepsilon^c = \Delta t((1-\theta)F(\bar{\sigma}, t)^t + \theta F(\bar{\sigma}, t)^{t+\Delta t}) \quad (5)$$

เมื่อ θ คือ ตัวแปรถ่วงน้ำหนัก

Δt คือ ช่วงเวลาใดๆ

$\Delta\varepsilon^c$ คือ ค่าความเครียดคืบที่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลา Δt

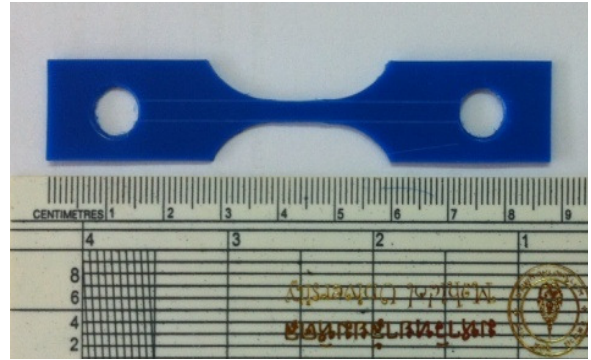
ลำดับการคำนวณความเครียดคืบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในรูปที่ 2



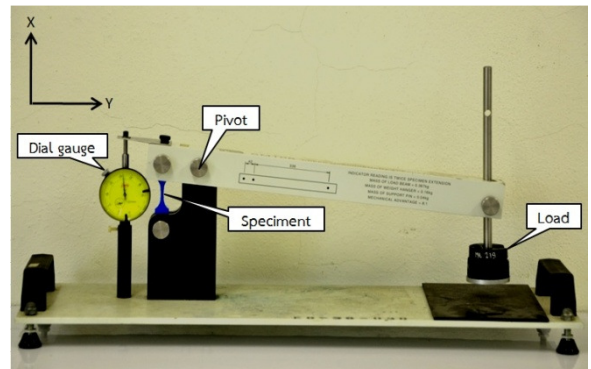
รูปที่ 2 ลำดับการคำนวณการคืบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

4. การทดสอบการคืบของพลาสติก

พลาสติกประเภทโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เป็นวัสดุที่นิยมนำมาผลิตกระป๋องน้ำมันหล่อลื่น โดยพลาสติกที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นพลาสติก HDPE เกรด 6140 การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติการคืบของพลาสติกทำได้โดยการตัดชิ้นงานทดสอบจากกระป๋องน้ำมันหล่อลื่นตามมาตรฐาน ASTM D638 [9] แสดงในรูปที่ 3 หลังจากนั้นจะทำการตั้งชิ้นงานทดสอบจำนวน 5 ชิ้นต่อแรงดึงค่าใดๆ ตามมาตรฐาน ASTM D2990 ในการทดสอบการคืบของชิ้นงานทดสอบพลาสติกจะใช้เครื่องทดสอบการคืบของบริษัท TecQuipment รุ่น SM 1006 แสดงในรูปที่ 4 โดยกำหนดค่าแรงดึงต่อพื้นที่หน้าตัดชิ้นงานทดสอบหรือความเค้น (Stress) มีค่าเฉลี่ย 13, 12.25, 11.5, 10.75 และ 10 MPa ตามลำดับ

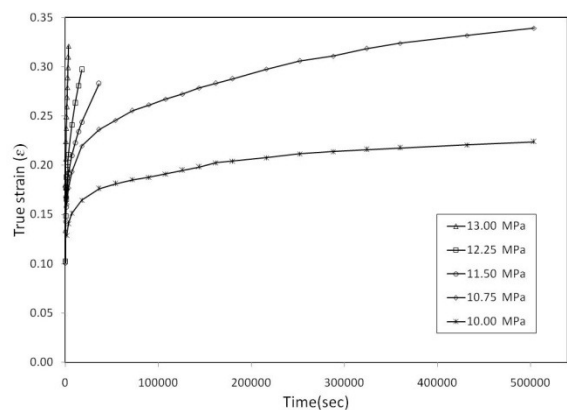


รูปที่ 3 ชิ้นงานทดสอบพลาสติก HDPE เกรด 6140



รูปที่ 4 เครื่องทดสอบการคืบของบริษัท TecQuipment รุ่น SM 1006

ผลการทดสอบได้จากการวัดค่าระยะยืดของชิ้นงานทุกๆ เวลา 60 วินาที จนกระทั่งชิ้นงานทดสอบขาดหรือมีอัตราการคืบคงที่ โดยผลการทดสอบแสดงอยู่ในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดจริง (True strain) ของชิ้นงานทดสอบกับเวลา ที่ระดับความเค้น 5 ค่าแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะยืดของชิ้นงานกับเวลาที่ความเค้น 13, 12.25, 11.5, 10.75 และ 10 MPa

5. การประยุกต์ใช้สมการการคืบ

สมการการคืบของพลาสติกซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการยกกำลัง (สมการที่ 2) ถูกนำมาใช้แสดงพฤติกรรมการยืดของพลาสติก HDPE เกรด 6140 โดยนำผลการทดสอบวัสดุมาใช้ในการหาค่าคงที่ของสมการโดยการแปลงสมการยกกำลังให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงด้วยการทำลอการิทึม (Logarithm) กับสมการการคืบทำให้ได้สมการ

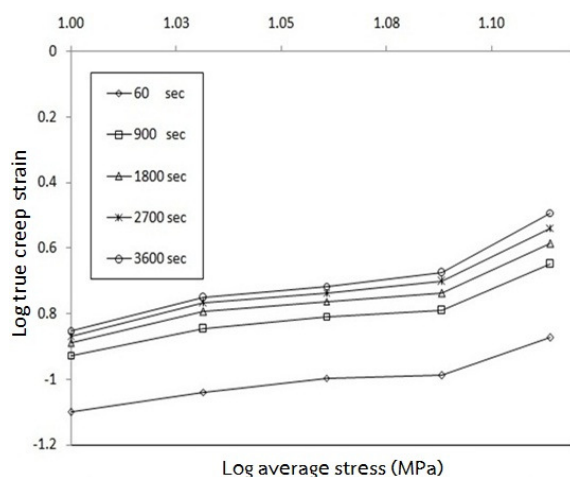
$$\log \varepsilon^C = \log A + m \log \bar{\sigma} + n \log t \quad (6)$$

สมการ (6) สามารถแบ่งสมการออกเป็นสมการเส้นตรงได้ 2 สมการ ซึ่งประกอบด้วยสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดคืบกับความเค้นในรูปสมการ

$$\log \varepsilon^C = m \log \bar{\sigma} + B \quad (7)$$

เมื่อ B คือ ค่าคงที่

ค่าคงที่ m คือค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของความเครียดคืบกับลอการิทึมของความเค้นเฉลี่ยหาได้จากการสวมสมการ (Curve fitting) เส้นตรงกับผลการทำลอการิทึมของความเค้นเฉลี่ยและความเครียดคืบในรูปที่ 6 ทำให้ได้ค่าความชันและค่าคงที่ B ของเส้นกราฟทั้ง 5 เส้นแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของความเครียดคืบจริงกับลอการิทึมของความเค้นเฉลี่ย

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ของสมการ (7) เมื่อเวลาต่างกัน 5 ค่า

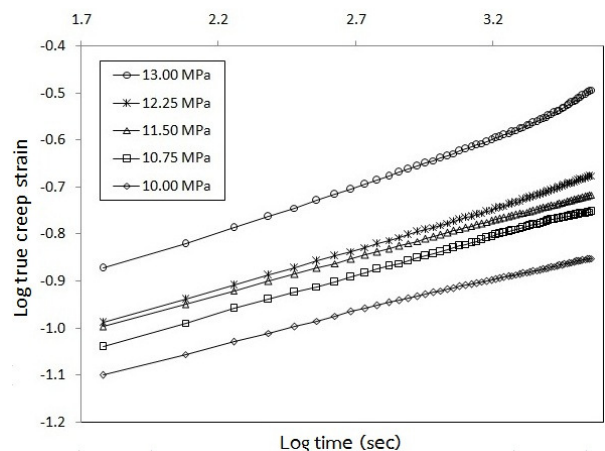
ค่าคงที่	เวลา (วินาที)				
	60	900	1800	2700	3600
m	1.76	2.13	2.31	2.51	2.76
B	-2.87	-3.06	-3.20	-3.39	-3.62

สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดคืบกับเวลาซึ่งได้จากสมการ (6) เขียนในรูปสมการ

$$\log \varepsilon^C = n \log t + D \quad (8)$$

เมื่อ D คือ ค่าคงที่

ค่าคงที่ n คือค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของความเครียดคืบกับลอการิทึมของเวลา ซึ่งหาได้จากการสวมสมการเส้นตรงกับผลการทำลอการิทึมของความเครียดคืบและเวลาในรูปที่ 7 ทำให้ได้ค่าความชันของเส้นกราฟทั้ง 5 เส้นและค่าคงที่ D แสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของความเครียดคืบจริงกับลอการิทึมของเวลา

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ของสมการ(8)เมื่อความเค้นต่างกัน5ค่า

ค่าคงที่	ความเค้นเฉลี่ย (MPa)				
	10	10.75	11.5	12.25	13
n	0.13	0.16	0.15	0.17	0.21
D	-1.33	-1.32	-1.27	-1.31	-1.28

ค่าคงที่ m และ n จากตาราง 1 และ 2 สามารถนำมาเฉลี่ยทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของค่าคงที่ m และ n มีค่า 2.3 และ 0.169 ตามลำดับ ค่าคงที่ A จากสมการ (6) สามารถหาได้โดยการแทนค่าเฉลี่ยของค่าคงที่ m และ n ลงในสมการ (6) และใช้ค่าความเครียดคืบ ความเค้นเฉลี่ย และเวลาที่ได้จากการทดสอบทำให้ได้ค่าคงที่ A มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.13×10^{-4} ดังนั้นสมการการคืบของพลาสติก HDPE เกรด 6140 จะอยู่ในรูปสมการ

$$\varepsilon^C = 2.13 \times 10^{-4} \bar{\sigma}^{2.3} t^{0.169} \quad (9)$$

เมื่อ ε^C คือ ความเครียดคืบจริง

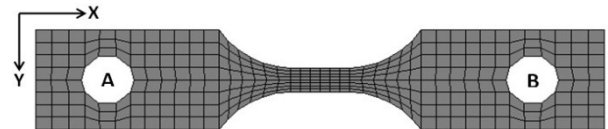
$\bar{\sigma}$ คือ ความเค้นเฉลี่ยในหน่วย MPa

t คือ เวลาในหน่วยวินาที

6. การจำลองการคืบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การจำลองพฤติกรรมการคืบของพลาสติก HDPE เกรด 6140 ด้วยโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) เพื่อกำหนดค่าความแม่นยำระหว่างผลการทดสอบวัสดุจริงกับผลจากการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งใช้สมการการคืบที่ได้จากสังเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ทำได้โดยใช้โปรแกรม MSC. Marc สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นงานทดสอบด้วยเอลิเมนต์ชนิดแผ่นบาง (Plate Element) รูปร่างสี่เหลี่ยมจำนวน 324 เอลิเมนต์

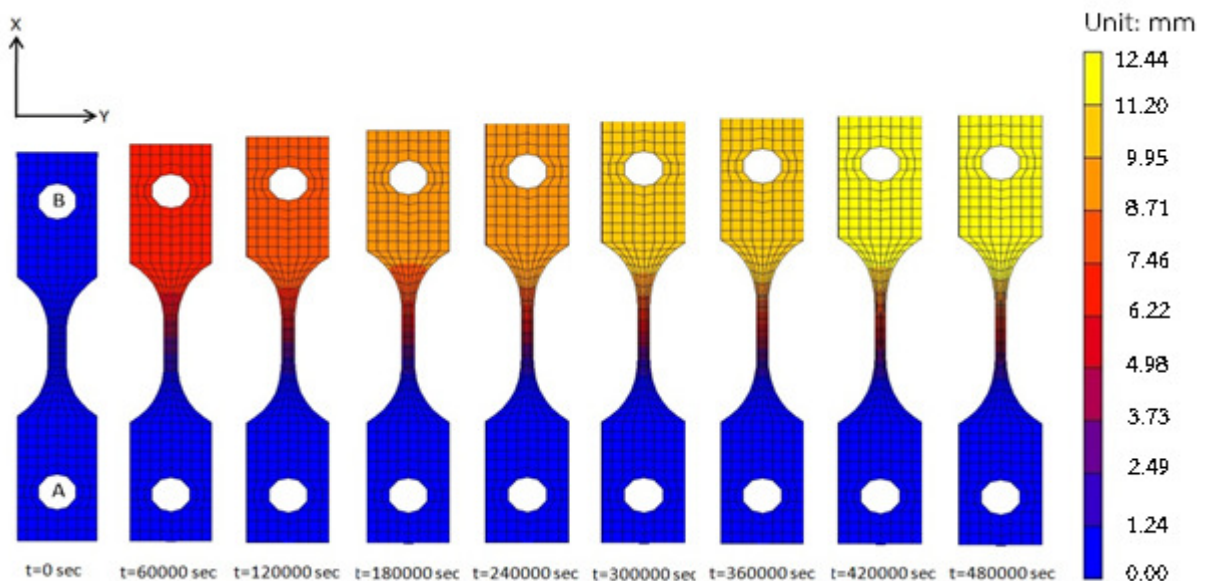
และกำหนดคุณสมบัติวัสดุของเอลิเมนต์ให้มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Elastic Modulus) เท่ากับ 1,422 MPa และมีอัตราส่วนปัวซอง (Poisson Ratio) เท่ากับ 0.38 [2] กำหนดพฤติกรรมการคืบของเอลิเมนต์โดยใช้สมการ (9) กำหนดให้รูเจาะ A เป็นจุดจับยึดและกำหนดให้มีแรงกระทำชิ้นงานในทิศทางตามแนวแกน X ที่ตำแหน่งรูเจาะ B มีค่าตรงตามการทดสอบการคืบทั้ง 5 ค่า ซึ่งแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้แสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นงานทดสอบ

7. ผลและวิจารณ์

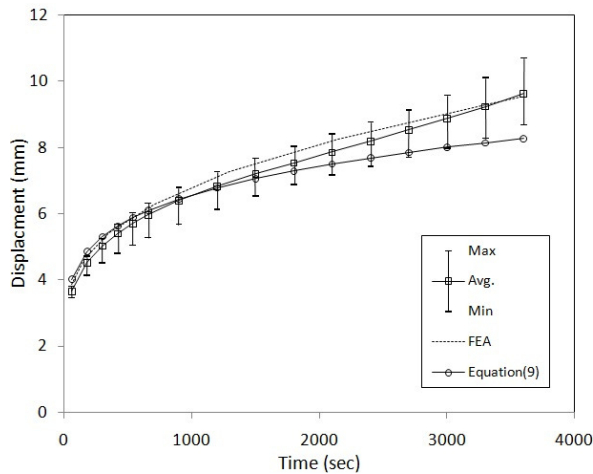
ผลการจำลองการคืบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแสดงตัวอย่างความยาวของชิ้นงานทดสอบซึ่งถูกแรงดึงคงที่ 31.2 N ณ เวลาต่างๆได้ในรูปที่ 9 โดยแสดงระยะยืดของชิ้นงานเป็นเฉดสี (Contour) บริเวณชิ้นงานทดสอบที่มีระยะยืดสูงสุดแสดงได้ด้วยสีเหลืองส่วนบริเวณที่มีระยะยืดต่ำสุดแสดงด้วยสีน้ำเงิน



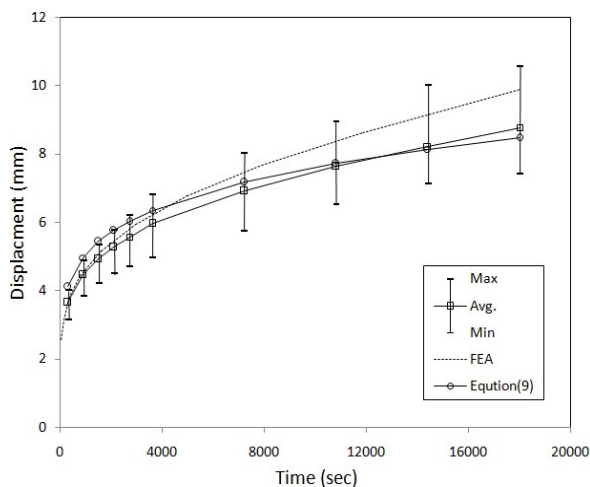
รูปที่ 9 ผลการจำลองการคืบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยกำหนดแรงกระทำคงที่ 31.2 N ($\bar{\sigma}_x = 10$ MPa)

ผลการจำลองการคืบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของพลาสติก HDPE เกรด 6140 ตามมาตรฐาน ASTM D2990 และผลการสังเคราะห์ผลการทดสอบด้วยการสร้างสมการที่ใช้ทำนายพฤติกรรมกรการคืบถูกนำมาเปรียบเทียบโดยใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะยืดกับเวลาที่ค่าแรงดึง 40.5, 38.2, 35.8, 33.5, และ 31.2 N สามารถแสดงเป็นกราฟในรูปที่ 10, 11, 12, 13 และ 14 ตามลำดับ

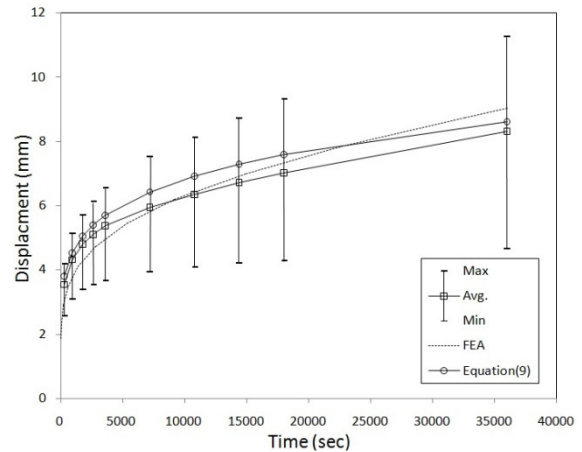
ค่าความผิดพลาดระหว่างผลการจำลองและการทดสอบจริงสามารถนำมาหาร้อยละของความคลาดเคลื่อน (Percent of error) ในแต่ละค่าของความเค้นโดยใช้สมการ (10)



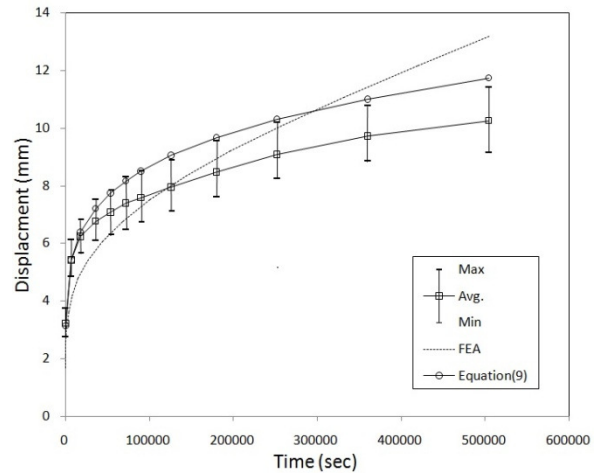
รูปที่ 10 กราฟเปรียบเทียบผลการจำลองด้วยสมการการคืบและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดสอบที่ระดับความเค้นเฉลี่ย 13 MPa (แรงดึง 40.5 N)



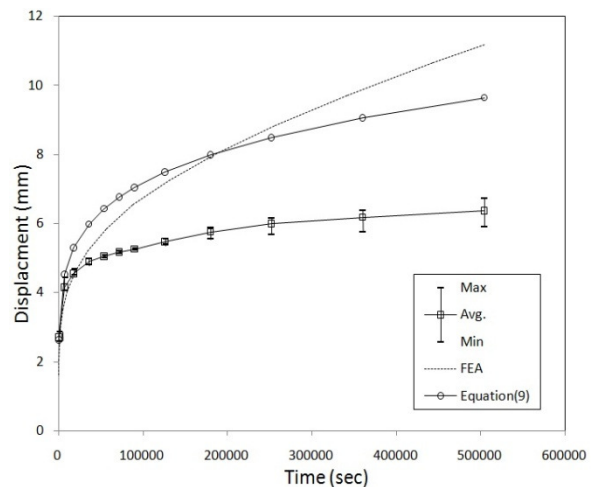
รูปที่ 11 กราฟเปรียบเทียบผลการจำลองด้วยสมการการคืบและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดสอบที่ระดับความเค้นเฉลี่ย 12.25 MPa (แรงดึง 38.2 N)



รูปที่ 12 กราฟเปรียบเทียบผลการจำลองด้วยสมการการคืบและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดสอบที่ระดับความเค้นเฉลี่ย 11.5 MPa (แรงดึง 35.8 N)



รูปที่ 13 กราฟเปรียบเทียบผลการจำลองด้วยสมการการคืบและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดสอบที่ระดับความเค้นเฉลี่ย 10.75 MPa (แรงดึง 33.5 N)



รูปที่ 14 กราฟเปรียบเทียบผลการจำลองด้วยสมการการคืบและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดสอบที่ระดับความเค้นเฉลี่ย 10 MPa (แรงดึง 31.2 N)

$$e_{\%} = \frac{D_T - D_S}{D_T} \times 100\% \quad (10)$$

เมื่อ $e_{\%}$ คือ ร้อยละของความคลาดเคลื่อน

D_S คือ ระยะยืดจากการจำลอง

D_T คือ ระยะยืดจากการทดสอบ

ผลจากการจำลองการคืบด้วยสมการการคืบมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 6.3%, 3.17%, 7.22%, 13.78% และ 44.53% และผลการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 3.03%, 9.47%, 6.94%, 15.22% และ 55.31% ที่ระดับความเค้นเฉื่อย 13, 12.25, 11.5, 10.75 และ 10 MPa ตามลำดับ

8. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการทดสอบพฤติกรรมการคืบของพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D2990 โดยทำการทดสอบด้วยแรงดึง 40.5, 38.2, 35.8, 33.5 และ 31.2 N และนำไปหาค่าความเค้นเฉื่อยได้ 13, 12.25, 11.5, 10.75 และ 10 MPa ตามลำดับ ผลการทดสอบถูกนำไปสวมกับสมการการคืบโดยการสังเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดลองเพื่อหาค่าคงที่ของสมการการคืบที่ถูกนำไปใช้กำหนดพฤติกรรมการคืบของวัสดุด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม MSC. Marc ที่สามารถแสดงพฤติกรรมการคืบของชิ้นงานทดสอบเป็นเวลานานๆ และสามารถนำไปใช้เป็นแบบจำลองวัสดุ (Material model) ของกระป๋องน้ำมันหล่อลื่นได้

จากผลการจำลองและค่าความคลาดเคลื่อนที่แสดงสังเกตได้ว่าผลการจำลองมีความแม่นยำยอมรับได้ที่ช่วงของระดับความเค้นเฉื่อย 13, 12.25, 11.5 และ 10.75 MPa ซึ่งเป็นระดับความเค้นส่วนใหญ่ที่ใช้ทดสอบเนื่องจากค่าคงที่ของสมการการคืบที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ใช้ค่าเฉลี่ยของแต่ละระดับความเค้นของผลการทดสอบ ซึ่งค่าคงที่ในช่วงระดับความเค้นเฉื่อย 10.75 ถึง 13 MPa มีค่าใกล้เคียงกันจึงส่งผลให้ค่าคงที่จากการสังเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกับค่าคงที่ที่อยู่ในระดับความเค้นช่วงดังกล่าว และเมื่อนำค่าความคลาดเคลื่อนในช่วงความเค้นนี้มาเฉลี่ยจะได้ค่าความคลาดเคลื่อน 8.66%

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] สัจจาทิพย์ ทศนียพันธุ์ และ ชาคริต สุวรรณจำรัส (2548). การวิเคราะห์การโป่งโดยใช้ CAD/CAE, *การประชุมทางเชิงวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 43*, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จังหวัดกรุงเทพฯ
- [2] สัจจาทิพย์ ทศนียพันธุ์ และ ชาคริต สุวรรณจำรัส (2547). การยุบตัวของกระป๋องพลาสติกบรรจุของเหลวภายใต้ภาระด้านบนโดยวิธี FEA, *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18*, มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น
- [3] Masood S.H., and Kesharamurthy V. (2005). Development of collapsible PET water fountain bottles, *I. Mat. Processing Tech.*, vol. 162-163, pp. 83-89.
- [4] Suvanjumrat, C., Puttapitukporn, T., and Thusneyapan, S. (2007). Comparison of simulation for fluid-structure interaction of water filled plastic bottles during drop test. *The 21th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, Chonburi, Thailand
- [5] Suvanjumrat, C., Puttapitukporn, T. and Thusneyapan, S. (2008). Analysis of fluid-structure interaction effects of liquid-filled container under drop testing, *Kasetsart J. (Nat. Sci.)*, vol. 42, August 2007, pp. 165 – 176.
- [6] Suvanjumrat, C. and Puttapitukporn, T. (2011). Determination of drop-impact resistance of plastic bottles using computer aided engineering, *Kasetsart J. (Nat. Sci.)*, vol. 45, July 2011, pp. 932 – 942.
- [7] Kraus, H. (1980). *Creep Analysis*, John Wiley & Sons, New York.
- [8] D2990-01 (2009). *Standard test methods for tensile, compressive, and flexural creep and creep-rupture of plastics*, ASTM Vol. 08. 01
- [9] D638-10 (2009). *Standard test methods for tensile properties of plastics*, ASTM Vol. 08. 01