

สมบัติรีโอโลยีในการทดสอบการไหลแบบเฉือน Rheology Property Testing of Shear Flows

ชาญยุทธ โกลิตะวงษ์*

Chanyut Kolutawong*

ศูนย์วิจัยพอลิเมอร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

Polymer Research Center, Department of Mechanical and Aerospace Engineering,

Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangsue, Bangkok 10800

วันที่ส่ง : 25 กันยายน 2561 วันที่แก้ไข : 14 ธันวาคม 2561 วันที่ตอบรับ 16 ธันวาคม 2561

บทคัดย่อ

บทความนี้จะอธิบายถึงสมบัติรีโอโลยีของการทดสอบการไหลแบบเฉือน (Shear test experiments) ที่ใช้กันมากเช่น การทดสอบเฉือนคงตัว (Steady shear) การทดสอบเฉือนไป-มา (Oscillatory shear) ความเค้นเฉือนโตขึ้น (Stress growth) ความเค้นเฉือนลดลง (Stress decay) ความเค้นผ่อนคลาย (Stress relaxation) และการคืบเฉือน (Shear creep) เป็นต้น ทางสมาคมรีโอโลยีแห่งสหรัฐอเมริกา (Society of Rheology, USA) ได้ตั้งคณะกรรมการทำความตกลงร่วมกันในการใช้สมบัติรีโอโลยีที่ได้จากการทดสอบรวมทั้งกำหนดตัวแปรที่ได้จากการทดสอบเหล่านี้ และได้ประกาศให้กับนักวิจัยที่ทำงานทางด้านรีโอโลยีได้ใช้ตัวแปรและสมบัติรีโอโลยีที่ได้จากการทดสอบในทิศทางเดียวกัน ถึงแม้ว่าในบทความนี้จะรวบรวมสมบัติรีโอโลยีของการทดสอบการไหลแบบเฉือนที่ใช้กันมากไปแล้ว แต่ก็ยังมีสมบัติรีโอโลยีบางตัวที่ไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้

คำสำคัญ: สมบัติรีโอโลยี การทดสอบการไหลแบบเฉือน การทดสอบเฉือนไป-มา ความเค้นผ่อนคลาย การคืบเฉือน

*ที่อยู่ติดต่อ โทรศัพท์: 02-555-2000 (ต่อ 8308) E-mail address : chanyut.k@eng.kmutnb.ac.th

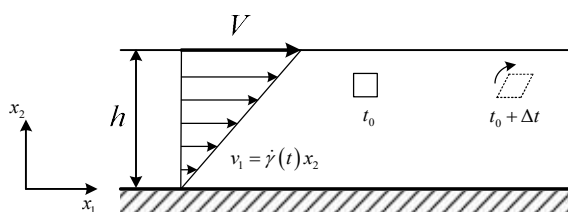
Abstract

This article contains most of rheology properties used in shear test experiments: for example, steady shear, oscillatory shear, stress growth, stress decay, stress relaxation and shear creep experiments. The Society of Rheology, SOR, United State of America, directed a committee to declare those rheology testing properties and their symbols for rheologists to use worldwide. While we aim to collect all those rheology testing properties and their symbols, but there are some rheology testing properties that have not been mentioned in this article.

Keyword: Rheology testing property, Shear test experiments, Oscillatory shear, Stress relaxation, Shear creep.

1. บทนำ

การทดสอบสมบัติทางรีโอโลยีสำหรับวัสดุที่อยู่ในสถานะที่เป็นของไหลที่มีความหนืดสูง ๆ (Highly viscous fluids) มักจะทดสอบด้วยการไหลแบบเฉือน พอลิเมอร์หลอมเหลวเช่น พลาสติกหรือยางที่ยังไม่คงรูป (Uncured elastomers) หรือสารละลายพอลิเมอร์ (Polymer solutions) เช่น เลือด น้ำเหลือง หรือ สบู่เหลวและแชมพูสระผม สมบัติของวัสดุจะค่อนข้างเป็นของไหล (Liquids) หรือของไหลเหนียวหนืด (Viscoelastic fluids) ที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเค้นและความเครียด สำหรับการเฉือนอย่างง่ายสำหรับวัสดุพอลิเมอร์เหลวที่แสดงในรูปที่ 1 แสดงวัสดุพอลิเมอร์เหลวที่อยู่ระหว่างแผ่นประกบคู่



รูปที่ 1. แสดงการไหลแบบเฉือนอย่างง่าย (Simple shear flow) ที่ไหลในทิศทาง x_1

ถ้าระยะระหว่างแผ่นประกบน้อยมาก ๆ ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและอัตราเครียดเป็นแบบเชิงเส้นตามสมการที่ (1)

$$\tau_{ij} = -\eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma}_{ij} \quad (1)$$

เมื่อ i และ j เป็นตำแหน่งบนเทนเซอร์ความเค้นและความเครียดซึ่งมีค่าเท่ากับ 1, 2, 3 และเป็นหมายเลขกำกับทิศทางของระบบแกน โดยแกน x_1, x_2, x_3 บางครั้งเรียกว่าแกน x, y, z ในระบบแกนพิกัดฉากตามลำดับเราเรียก η ว่าความหนืดของของไหลชนิดนอนนิวทอนเนียนโดย η เป็นฟังก์ชันของสเกลาร์คงตัวของอัตราเครียดเฉือน $\dot{\gamma}$ (Scalar invariants of strain rate) เราเรียกสมการที่(1)ว่าเป็นพฤติกรรมการไหลเลียนแบบหรือคล้ายนิวทอนเนียน (Generalized Newtonian fluid) ซึ่งพจน์ของอัตราเครียดเฉือนหาได้จาก [1]

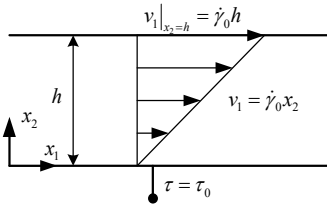
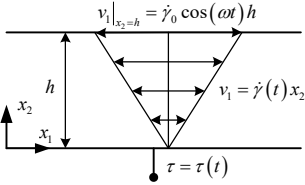
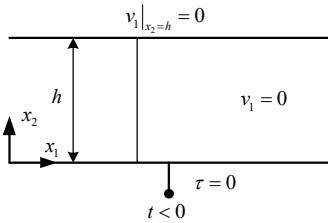
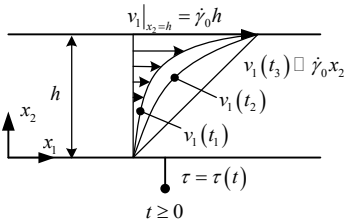
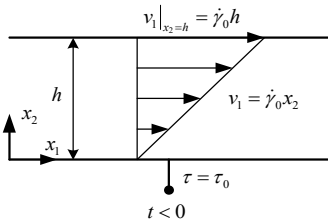
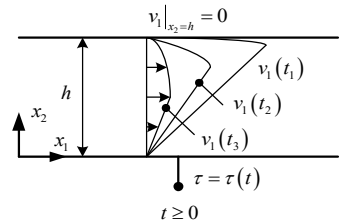
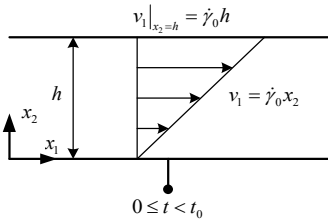
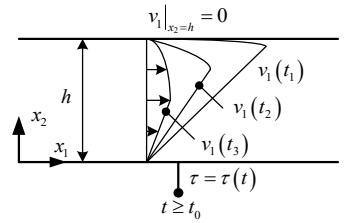
$$\dot{\gamma}_{ij} = \frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad (2)$$

เมื่อ v_i และ v_j เป็นความเร็วของก้อนของไหล (Fluid element) ในแนวแกน i และ j และ x_i และ x_j เป็นตำแหน่งของก้อนของไหลในแนวแกน i และ j ตามลำดับ เมื่อ $i, j = 1, 2, 3$ สมการที่ (2) ทำให้เราทราบว่าอัตราเครียดของวัสดุเกิดจากอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเชิงเส้น (Linear deformation) ซึ่งอยู่ในตำแหน่งแนวทแยง (Diagonal positions) ของเทนเซอร์อัตราเครียด และอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเชิงมุม (Angular deformation) ซึ่งจะอยู่นอกตำแหน่งทแยงมุม (Off-diagonal position) ของเทนเซอร์อัตราเครียด

ในขณะที่การทดสอบยืดดึงสำหรับวัสดุที่มีความหนืดสูง ๆ (Highly viscous materials) หรือวัสดุหนืดยืดหยุ่นมาก ๆ (Viscoelastic materials) เช่นในกระบวนการหลอมปั่นเส้นใย (Fiber spinning) พอลิเมอร์ในสภาวะดึงยืดจะทดสอบขณะที่พอลิเมอร์มีสมบัติเหนียวหนืดซึ่งมีอุณหภูมิต่ำลงมาและกำลังจะเปลี่ยนสถานะจนเกือบจะกลายเป็นของแข็ง การทดสอบเพื่อหาความหนืดยืดดึงยังเป็นเรื่องใหม่ในศาสตร์รีโอโลยีและมีการศึกษากันอยู่ในวงจำกัดพอสมควร เนื่องจากการทดสอบหาความหนืดยืดดึงจะต้องใช้เครื่องมือเฉพาะและการวัดกระทำได้อย่างกว่าการทดสอบหาความหนืดแบบเฉือน ในบทความนี้จะยังไม่กล่าวถึงการทดสอบสำหรับวัสดุพอลิเมอร์ที่มีสมบัติยืดหยุ่นสูง ๆ (Highly elastic or hyper-elastic solids) เช่นยางคงรูป (Cured elastomers) หรือพลาสติกที่อยู่ในสถานะของแข็ง (Solid polymers) และวัสดุพอลิเมอร์ที่ไม่ได้เป็นสารเนื้อเดียว (Anisotropic materials) เช่นวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composite materials) เช่นพลาสติกผสมเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ เป็นต้น [2,3 ,4]

ตัวแปรของสมบัติรีโอโลยีในการไหลแบบเฉือนในบทความนี้อ้างอิงตัวแปรที่ทางสมาคมรีโอโลยีแห่งสหรัฐอเมริกา (Society of Rheology, USA) กำหนดและได้ตั้งคณะกรรมการทำความเข้าใจร่วมกันในการใช้สมบัติรีโอโลยีที่ได้จากการทดสอบเหล่านี้ [5,6,7] และได้ประกาศให้กับนักวิจัยที่ทำงานทางด้านรีโอโลยีได้ใช้ตัวแปรและสมบัติรีโอโลยีที่ได้จากการทดสอบในทิศทางเดียวกัน ถึงแม้ว่าในบทความนี้จะรวบรวม

สมบัติรีโอโลยีของการทดสอบการไหลแบบเฉือนที่ใช้กันมากไปแล้ว แต่ก็ยังมีสมบัติรีโอโลยีบางตัวที่ไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้

(ก) เฉือนคงตัว (Steady shear)		
(ข) เฉือนไปมา- (Oscillatory shear)		
(ค) ความเค้นโตขึ้น (Stress growth)		
(ง) ความเค้นลดลง (Stress decay)		
(จ) ความเค้นผ่อนคลาย (Stress relaxation)		

รูปที่ 2. แสดงการทดสอบสมบัติทางรีโอโลยีแบบเฉือนต่าง ๆ ที่ควบคุมข้อมูลเข้า (Input) ด้วยอัตราเฉือนเฉือนคงตัว $\dot{\gamma}_0$ ตามช่วงเวลาที่ต้องการ

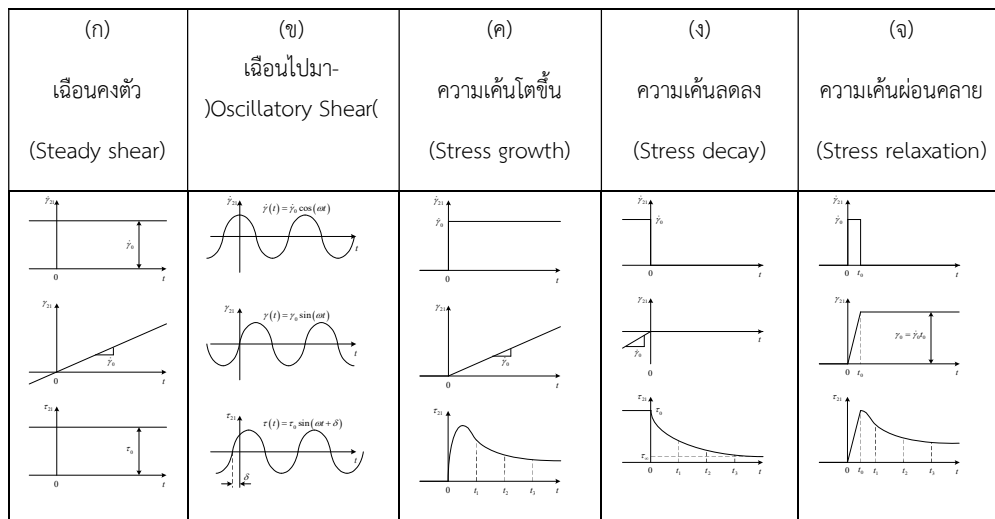
2. การทดสอบการไหลแบบเฉือน

การทดสอบสมบัติทางรีโอโลยีของพอลิเมอร์เหลวส่วนใหญ่จึงกระทำจากแผ่นประกบคู่ที่มีระยะระหว่างแผ่นประกบน้อย ๆ ทำให้มีความเร็วในเนื้อวัสดุที่ทดสอบด้วยการไหลแบบเฉือนเป็นไปตามสมการที่ (3)

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix}_{123} = \begin{pmatrix} \dot{\gamma}(t)x_2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}_{123} \quad (3)$$

เมื่อ

$$\dot{\gamma}_{21} = \dot{\gamma}(t) \quad (4)$$



รูปที่ 3. กราฟแสดงการควบคุมข้อมูลเข้า-ออก (Input and Output)ในการทดลองแบบควบคุมอัตราเฉือนคงตัว $\dot{\gamma}_0$ ที่ช่วงเวลาที่ต้องการ

โดย $\dot{\gamma}(t)$ ในสมการที่ (4) เป็นฟังก์ชันของเวลาในการทดลองแบบไม่คงตัว (Unsteady flow) และจะเป็นค่าคงที่ $\dot{\gamma}_0$ ในการทดลองแบบคงตัว (Steady flow) ดังนั้นจากสมการที่ (2) การไหลแบบเฉือนอย่างง่ายแบบไม่คงตัวจะมีอัตราเครียดเฉือน

$$\underline{\dot{\gamma}} = \begin{pmatrix} \dot{\gamma}_{11} & \dot{\gamma}_{12} & \dot{\gamma}_{13} \\ \dot{\gamma}_{21} & \dot{\gamma}_{22} & \dot{\gamma}_{23} \\ \dot{\gamma}_{31} & \dot{\gamma}_{32} & \dot{\gamma}_{33} \end{pmatrix}_{123} = \begin{pmatrix} 0 & \dot{\gamma}(t) & 0 \\ \dot{\gamma}(t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}_{123} \quad (5)$$

เมื่อขนาดของเทนเซอร์อัตราเค้น $\underline{\dot{\gamma}}$ คือ

$$|\underline{\dot{\gamma}}| = +\sqrt{\frac{1}{2} \underline{\dot{\gamma}} : \underline{\dot{\gamma}}} \quad (6)$$

แทนสมการที่ (5) ลงใน (6) จะได้

$$|\underline{\dot{\gamma}}| = +\sqrt{\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & \dot{\gamma}(t) & 0 \\ \dot{\gamma}(t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}_{123} : \begin{pmatrix} 0 & \dot{\gamma}(t) & 0 \\ \dot{\gamma}(t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}_{123}} = \dot{\gamma}(t) \quad (7)$$

ในกรณีที่เป็นการไหลคงตัวแบบเฉือนอย่างง่าย (Steady simple shear flow) หรือเรียกอย่างสั้น ๆ ว่าการไหลคงตัวแบบเฉือน (Steady shear flow) ในทางทฤษฎีแล้วเราสามารถควบคุมความเค้นที่แผ่นประกบด้านหนึ่งแล้ววัดอัตราเครียดที่แผ่นประกบอีกด้าน หรือในทางกลับกันเราสามารถควบคุมอัตราเครียดแล้ววัดความเค้นก็ได้ ถึงแม้ว่าทั้ง 2 วิธีมีข้อดี-ข้อเสียที่แตกต่างกัน [8] แต่การควบคุมความเค้นแล้ววัดอัตราเครียดทำได้ยากกว่าเนื่องจากผลของความเฉื่อย (Inertia effects) [ดูหัวข้อ 2.3 ของ [9]] จึงทำให้อุปกรณ์ทดสอบสมบัติทางรีโอโลยีของพอลิเมอร์เหลวส่วนใหญ่จะควบคุมอัตราเครียดและวัดความเค้นเป็นหลักจากรูปที่ 1 สำหรับการควบคุมอัตราเครียดที่แผ่นประกบบนที่มีระยะ h น้อย ๆ

$$\dot{\gamma}_{21} = \frac{\Delta v_1}{\Delta x_2} = \frac{v_1|_{x_2=h} - v_1|_{x_2=0}}{h} \quad (8)$$

จากสมการที่ (8) จะเห็นได้ว่าการควบคุมอัตราเครียดในของเหลวจะกระทำได้โดยการควบคุมความเร็วที่แผ่นประกบบน $v_1|_{x_2=h}$ รูปที่ 2 แสดงการทดสอบเพื่อหาสมบัติทางรีโอโลยีแบบเฉือนแบบต่าง ๆ ปกติแล้วการทดสอบจะควบคุมข้อมูลเข้า (Input) ด้วยอัตราเครียดเฉือนคงตัว $\dot{\gamma}_0$ ที่ช่วงเวลาที่ต้องการ ในที่นี้จะเห็นได้ว่าควบคุมข้อมูลเข้า (Input) ด้วยการเลื่อนแผ่นประกบบน ($x_2 = h$) และวัดความเครียดเฉือนที่

ของไหลกระทำกับแผ่นประกบล่าง ($x_2 = 0$) ยกเว้นการทดสอบการคืบที่ควบคุมข้อมูลเข้า (Input) ด้วยความเค้นเฉือนคงที่ τ_0 และวัดอัตราเครียดเฉือนที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $\dot{\gamma}(t)$ (ดูรูปที่ 5) รูปที่ 3 กราฟแสดงการควบคุมข้อมูลเข้า-ออก (Input and output) ในการทดลองแบบควบคุมอัตราเครียดเฉือนคงตัว $\dot{\gamma}_0$ ที่ช่วงเวลาที่ต้องการ ที่ได้จากการทดลองที่ใช้ในรูปที่ 2 ส่วนรูปที่ 6 แสดงการควบคุมข้อมูลเข้า-ออก (Input and output) ในการทดลองแบบควบคุมอัตราเค้นเฉือนคงตัว τ_0 ที่ช่วงเวลาที่ต้องการ ที่ได้จากการทดลองการคืบและการคืบผ่อนคลายที่แสดงในรูปที่ 5

2.1 การทดสอบเฉือนคงตัว

การไหลแบบเฉือนคงตัว (Steady shear flow) เป็นการทดสอบที่สภาวะการไหลที่ไม่ขึ้นกับเวลาเป็นการไหลในช่องแคบหลังจากผ่านช่วงเริ่มต้น (Start up) มาแล้ว เป็นการควบคุมความเร็วที่ระยะ $v_1|_{x_2=h}$ ให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ โดยสมการความเร็วของวัสดุระหว่างแผ่นประกบในการไหลแบบเฉือนคงตัวจะแสดงได้ด้วยสมการที่ (3) โดยมีอัตราเครียดคือ [ดูรูปที่ 2(ก) และรูปที่ 3(ก)]

$$\dot{\gamma}(t) = \dot{\gamma}_{21} = \dot{\gamma}_0 \quad (9)$$

การทดสอบเฉือนคงตัวจะมีสัมประสิทธิ์ความเค้นตั้งฉากลำดับที่ 1 และ 2 คือ

$$\Psi_1(\dot{\gamma}) \equiv -\frac{N_1}{\dot{\gamma}_0^2} = -\frac{\tau_{11} - \tau_{22}}{\dot{\gamma}_0^2} \quad (10)$$

$$\Psi_2(\dot{\gamma}) \equiv -\frac{N_2}{\dot{\gamma}_0^2} = -\frac{\tau_{22} - \tau_{33}}{\dot{\gamma}_0^2} \quad (11)$$

และความหนืดคือ

$$\eta(\dot{\gamma}) \equiv -\frac{\tau_{21}}{\dot{\gamma}_0} \quad (12)$$

โดย $\dot{\gamma}_0$ มีค่าได้ทั้งบวก (+) และลบ (-) ขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลและการตั้งระบบแกน สำหรับการไหลแบบนิวทอนเนียนความหนืดจะเป็นค่าคงที่ $\eta = \mu$ และ $\Psi_1 = \Psi_2 = 0$ แต่สำหรับของไหลพอลิเมอร์ $\eta = \eta(\dot{\gamma})$ และ $\Psi_1 = \Psi_1(\dot{\gamma})$ มีค่าเป็นบวก (+) และ $\Psi_2 = \Psi_2(\dot{\gamma})$ มีค่าเป็นลบ (-)

2.2 การทดสอบเฉือนไป-มา

การทดสอบเฉือนไป-มา (Oscillatory Shear test) เป็นการควบคุมความเร็วที่ระยะ $v_1|_{x_2=h}$ ให้เคลื่อนที่ไป-มาด้วยความถี่ ω แล้ววัดความเค้นที่แผ่นประกบล่าง ($x_2 = 0$) สมการความเร็วของวัสดุระหว่างแผ่นประกบในการไหลแบบเฉือนไป-มาจะแสดงได้ด้วยสมการที่ (3) โดยอัตราเครียดคือ [ดูรูปที่ 2(ข) และรูปที่ 3(ข)]

$$\dot{\gamma}(t) = \dot{\gamma}_{21} = \dot{\gamma}_0 \cos \omega t \quad (13)$$

โดย $\dot{\gamma}_0$ เป็นขนาดของอัตราเครียด (Strain rate amplitude) ซึ่งมีความเครียดหาได้จาก

$$\gamma_{21}(0, t) = \int_0^t \dot{\gamma}_0 \cos \omega t' dt' = \gamma_0 \sin \omega t \quad (14)$$

เมื่อ γ_0 เป็นขนาดของความเครียด (Strain amplitude) มีค่าเป็นบวก (+) เสมอ และมีความสัมพันธ์กับขนาดของอัตราเครียดคือ

$$\dot{\gamma}_0 = \omega \gamma_0 \quad (15)$$

ซึ่งเป็นการทำให้ของเหลวที่อยู่ระหว่างแผ่นประกบคู่เคลื่อนที่ไป-มาตามอัตราเครียดที่ได้รับจากแผ่นประกบบน สมการที่ (15) เป็นตัวกำหนดลักษณะของสมการความเค้นที่จะเกิดที่แผ่นประกบล่าง กล่าวคือถ้าขนาดของอัตราเครียดต่ำ (Small Amplitude Oscillatory Shear, SAOS) สมการความเค้นจะเป็นเชิงเส้นกับอัตราเครียด (Linear viscoelastic behavior) แต่ถ้าขนาดของอัตราเครียดสูง (Large Amplitude Oscillatory Shear, LAOS) สมการความเค้นจะไม่เป็นเชิงเส้นกับอัตราเครียด (Nonlinear viscoelastic behavior) ซึ่งความเค้นจะเขียนอยู่ในรูปอนุกรมคำตอบของฟูริเยร์ (Fourier series solutions) ที่จะประกอบไปด้วยชุดคำตอบหลาย ๆ ชุดรวมกัน [ดูหัวข้อ 5.7 ใน [10], [11] และสมบัติทางรีโอโลยีในการทดสอบเฉือนไป-มา ยังคงนิยมเหมือนกับการทดสอบเฉือนคงตัวในสมการที่ (10) - (12)]

สมการที่ (15) แสดงให้เห็นว่าถ้าขนาดของอัตราเครียดต่ำ (Small Amplitude Oscillatory Shear, SAOS) นั่นคือมีขนาดความเครียด γ_0 ต่ำและความถี่ ω ต่ำ สมการความเค้นยังสามารถตามอัตราเครียดทันแต่จะมีระยะเฟสที่แตกต่างกัน (Phase difference) ระหว่างความเค้นและอัตราเครียด δ อยู่บ้าง ดังนั้นสมการความเค้นจะเป็นเชิงเส้นกับอัตราเครียด (Linear viscoelastic behavior) และความเค้นที่ของเหลวส่งให้แผ่นประกบคู่ที่อยู่ด้านล่างจะมีค่าเท่ากับ [ดูหัวข้อ 4.2 ใน [12]]

$$-\tau_{21} = \tau_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (16)$$

โดย δ เป็นระยะเฟสที่ต่างกัน (Phase difference) ระหว่างความเค้นและอัตราเครียด และ τ_0 เป็นขนาดของความเค้นตอบสนอง (Stress response amplitude) ซึ่งควรจะเป็นค่าคงที่และมีความสัมพันธ์กับขนาดอัตราเครียด $\dot{\gamma}_0$ ในสมการที่ (15) ด้วยการใช้เอกลักษณ์ทางตรีโกณมิติสมการที่ (16) สามารถเขียนอยู่ในรูป

$$-\tau_{21} = (\tau_0 \cos \delta) \sin \omega t + (\tau_0 \sin \delta) \cos \omega t \quad (17)$$

จะเห็นว่าความเค้นที่เกิดจากการทดสอบเฉือนไป-มาในสมการที่ (17) สามารถเขียนอยู่ในรูปของ $\cos \omega t$ ซึ่งอินเฟสกับอัตราเครียด [ดูสมการที่ (13)] จะบ่งถึงสมบัติของเหลวนิวทอนเนียน (Newtonian fluid) และ $\sin \omega t$ ซึ่งอินเฟสกับความเครียด [ดูสมการที่ (14)] จะบ่งถึงสมบัติของความยืดหยุ่น (Elastic solid) ดังนั้นการทดสอบเฉือนไป-มาจะสามารถเขียนให้อยู่ในรูป

$$-\frac{\tau_{21}}{\gamma_0} = G'(\omega) \sin \omega t + G''(\omega) \cos \omega t \quad (18)$$

เมื่อ

$$G'(\omega) = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \cos \delta \quad (19)$$

$$G''(\omega) = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \sin \delta \quad (20)$$

โดย G' คือมอดูลัสกักเก็บ (Storage modulus) และ G'' คือมอดูลัสสูญเสีย (Loss modulus) จะเห็นได้ว่าการทดสอบเฉือนไป-มา สามารถวัดได้ทั้งพฤติกรรมความยืดหยุ่นและพฤติกรรมของเหลวออกมาได้พร้อม ๆ กัน สมการที่ (19) และ (20) สามารถหาค่าระยะเฟสที่แตกต่างระหว่างความเค้นและอัตราเครียดได้คือ

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (21)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (15) แทนลงในสมการที่ (17) ทำให้สามารถเขียนในอีกรูปแบบได้คือ

$$-\frac{\tau_{21}}{\dot{\gamma}_0} = \eta'' \sin \omega t + \eta' \cos \omega t \quad (22)$$

โดย[14]

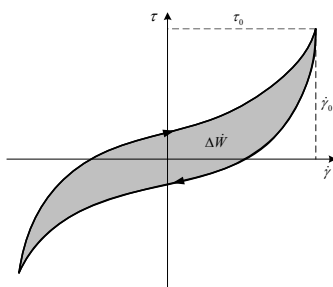
$$G'(\omega) = \omega \eta''(\omega) \quad (23)$$

$$G''(\omega) = \omega \eta'(\omega) \quad (24)$$

เนื่องจาก η' จะมีค่าเท่ากับความสัมพันธ์นิวทอนเนียน μ เมื่อ $G' = 0$ ทำให้เราเรียก η' ว่าความหนืดพลวัต (Dynamic viscosity) ในขณะที่ η'' มิได้มีชื่อเรียกอย่างเป็นทางการเนื่องจากเมื่อ $G'' = 0$ วัสดุที่วัดจะมีสมบัติยืดหยุ่นสมบูรณ์ (Purely elastic) นั่นคือ $G' = G$ สำหรับวัสดุหนืดยืดหยุ่น (Viscoelastic materials) จะมีทั้ง $G'(\omega)$ และ $G''(\omega)$ [15] ในขณะที่ผลต่างความเค้นลำดับที่ 1 และ 2 ในการไหลแบบเฉือนไป-มาจะเกิดในชุดคำตอบคู่เท่านั้น (Even harmonics) ทำให้ยังเป็นที่ถกเถียงกันว่าอาจจะไม่สามารถตรวจวัดค่าผลต่างความเค้นลำดับที่ 1 และ 2 ใน SAOS ได้และยังไม่มีนิยามตัวแปรผลต่างความเค้นลำดับที่ 1 และ 2 ใน SAOS อย่างเป็นทางการ [8] แต่อย่างไรก็ตามได้มีนักวิจัยบางท่าน [16,17,18] ได้ประมาณการผลต่างความเค้นลำดับที่ 1 และ 2 ใน SAOS ไว้แต่จะไม่กล่าวถึงในที่นี้ในขณะที่การพล็อตระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราเฉือนในการทดสอบเฉือนไป-มาจะเกิดวงรอบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งเป็นกำลังงานที่สูญเสียต่อหน่วยพื้นที่ถ้าวัสดุมีสมบัติหนืดยืดหยุ่น (Viscoelastic property) นั่นคือ

$$\Delta W = \oint \tau d\gamma \quad (25)$$

สมการที่ (25) แสดงให้เห็นว่าวัสดุที่ยืดหยุ่นสมบูรณ์ (Purely elastic) เท่านั้นที่จะไม่เกิดวงรอบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) นั่นคือจะต้องใช้แรงเฉือนและปล่อยกลับที่เท่ากันที่อัตราเฉือนเดียวกัน



รูปที่ 4. แสดงวงรอบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) ในการทดสอบเฉือนไป-มาเป็นกำลังงานที่สูญเสียต่อหน่วยพื้นที่เนื่องจากวัสดุมีสมบัติหนืดยืดหยุ่น (Viscoelastic property)

2.3 การทดสอบความเค้นโตขึ้น

การทดสอบความเค้นโตขึ้น (Stress growthtest) เกิดจากการใส่อัตราเฉือนคงตัว $\dot{\gamma}_0$ อย่างทันทีทันใดลงบนแผ่นประกบคู่ขนานและเฝ้าดูการตอบสนองของความเค้นจากการวัดแผ่นประกบอีกด้านหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 2(ค) และ รูปที่ 3(ค) ดังนั้นสมการความเร็วของวัสดุระหว่างแผ่นประกบในการทดสอบความเค้นโตขึ้นจะแสดงได้ด้วยสมการที่ (3)โดยมีอัตราเฉือนคือ

$$\dot{\gamma}(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \dot{\gamma}_0 & t \geq 0 \end{cases} \quad (26)$$

สมบัติทางรีโอโลยีของการทดสอบความเค้นโตขึ้นจะเป็นฟังก์ชันของเวลา t และอัตราเฉือน $\dot{\gamma}$ ที่ใช้ โดยมีสัมประสิทธิ์ความเค้นตึงฉากลำดับที่ 1 และ 2 คือ

$$\Psi_1^+(t, \dot{\gamma}) \equiv -\frac{N_1^+}{\dot{\gamma}_0^2} - \frac{\tau_{11} - \tau_{22}}{\dot{\gamma}_0^2} \quad (27)$$

$$\Psi_2^+(t, \dot{\gamma}) \equiv -\frac{N_2^+}{\dot{\gamma}_0^2} = -\frac{\tau_{22} - \tau_{33}}{\dot{\gamma}_0^2} \quad (28)$$

และความหนืดคือ

$$\eta^+(t, \dot{\gamma}) \equiv -\frac{\tau_{21}^+}{\dot{\gamma}_0} \quad (29)$$

โดยถ้า $t \rightarrow \infty$ สมบัติทางรีโอโลยีของการทดสอบความเค้นโตขึ้นในสมการที่ (27) - (29) จะมีค่าเท่ากับ การทดสอบเฉือนคงตัวในสมการที่ (10) - (12) ตามลำดับ นั่นคือ

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Psi_1^+(t, \dot{\gamma}) = \Psi_1(\dot{\gamma}) \quad (30)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Psi_2^+(t, \dot{\gamma}) = \Psi_2(\dot{\gamma}) \quad (31)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \eta^+(t, \dot{\gamma}) = \eta(\dot{\gamma}) \quad (32)$$

2.4 การทดสอบความเค้นลดลง

การทดสอบความเค้นลดลง (Stress decay test) เกิดจากการหยุดอัตราเฉือนคงตัว $\dot{\gamma}_0$ อย่างทันทีทันใดบนแผ่นประกบคู่ขนานแล้วเฝ้าดูการตอบสนองของความเค้นจากการวัดแผ่นประกบอีกด้านหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2(ง) และ รูปที่ 3(ง) ดังนั้นสมการความเร็วของวัสดุระหว่างแผ่นประกบในการทดสอบความเค้นลดลงจะแสดงได้ด้วยสมการที่ (3) โดยมีอัตราเครียดคือ

$$\dot{\gamma}(t) = \begin{cases} \dot{\gamma}_0 & t < 0 \\ 0 & t \geq 0 \end{cases} \quad (33)$$

สมบัติทางรีโอโลยีของการทดสอบจะเป็นฟังก์ชันของเวลา t และอัตราเฉือน $\dot{\gamma}$ ที่ใช้ โดยมีสัมประสิทธิ์ความเค้นตั้งฉากลำดับที่ 1 และ 2 คือ

$$\Psi_1^-(t, \dot{\gamma}) \equiv -\frac{N_1^-}{\dot{\gamma}_0^2} - \frac{\tau_{11} - \tau_{22}}{\dot{\gamma}_0^2} \quad (34)$$

$$\Psi_2^-(t, \dot{\gamma}) \equiv -\frac{N_2^-}{\dot{\gamma}_0^2} = -\frac{\tau_{22} - \tau_{33}}{\dot{\gamma}_0^2} \quad (35)$$

และความหนืดคือ

$$\eta^-(t, \dot{\gamma}) \equiv -\frac{\tau_{21}^-}{\dot{\gamma}_0} \quad (36)$$

สำหรับของไหลนิวทอนเนียนของไหลจะหยุดทันทีเมื่อไม่มีอัตราเครียด แต่สำหรับของไหลนอนนิวทอนเนียนใด ๆ ความเค้นจะค่อย ๆ ผ่อนคลายลงจนเริ่มคงที่ $\tau_{21}^- = \tau_{\infty}$ ที่เวลา $t = \lambda$ ใด ๆ เราเรียก λ ว่าเป็นเวลาผ่อนคลายความเค้น (Relaxation time)

2.5 การทดสอบความเค้นเฉือนผ่อนคลาย

การทดสอบความเค้นผ่อนคลาย (Stress relaxation test) บางครั้งเรียกว่าการทดสอบสเตปความเครียด (Step strain test) ระวังอย่าไปสับสนกับการทดสอบความเค้นลดลง (Stress decay test) การทดสอบการผ่อนคลายความเค้น (Stress relaxation) นี้จะทำได้โดยการใส่อัตราเครียดคงตัว $\dot{\gamma}_0$ ในช่วงเวลาสั้น ๆ t_0 ลงบนแผ่นประกบบน (กระซวกแผ่นประกบบน 1 ครั้งในช่วงเวลาสั้น ๆ t_0 ด้วยความเร็วคงที่) ทำให้ของไหลระหว่างแผ่นประกบมีความเครียดคงที่อย่างถาวร

$$\gamma_0 = \dot{\gamma}_0 t_0 \quad (37)$$

แล้วทำการวัดความเค้นที่ค่อย ๆ คลายตัวลงเรื่อย ๆ ที่แผ่นประกบล่างดังแสดงในรูปที่ 2(จ) และ รูปที่ 3(จ) ดังนั้นสมการความเร็วของวัสดุระหว่างแผ่นประกบในการทดสอบความเค้นผ่อนคลายจะแสดงได้ด้วยสมการที่ (3) โดยมีอัตราเครียดคือ

$$\dot{\gamma}(t) = \lim_{t_0 \rightarrow 0} \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \dot{\gamma}_0 & 0 \leq t < t_0 \\ 0 & t \geq t_0 \end{cases} \quad (38)$$

โดยความเค้นและความเครียดเป็นไปตามกฎของฮุก (Hook's law) ดังนั้นมอดูลัสผ่อนคลาย $G(t, \gamma_0)$ หาได้จาก

$$G(t, \gamma_0) \equiv -\frac{\tau_{21}(t, \gamma_0)}{\gamma_0} \quad (39)$$

และสัมประสิทธิ์ความเค้นตั้งฉากผ่อนคลายลำดับที่ 1 และ 2 คือ

$$G_{\Psi_1}(t, \gamma_0) \equiv -\frac{N_1}{\gamma_0^2} = -\frac{\tau_{11} - \tau_{22}}{\gamma_0^2} \quad (40)$$

$$G_{\Psi_2}(t, \gamma_0) \equiv -\frac{N_2}{\gamma_0^2} = -\frac{\tau_{22} - \tau_{33}}{\gamma_0^2} \quad (41)$$

ที่ความเครียด γ_0 น้อย ๆ ค่ามอดูลัสผ่อนคลาย $G(t, \gamma_0)$ จะไม่ขึ้นอยู่กับความเครียด γ_0 นั่นคือ

$$\lim_{\gamma_0 \rightarrow 0} G(t, \gamma_0) = G(t) \quad (42)$$

ทำให้สมบัติหนืดยืดหยุ่นของมอดูลัสผ่อนคลาย $G(t)$ เป็นเชิงเส้น (Linear viscoelastic property) ดังนั้นมอดูลัสผ่อนคลาย $G(t, \gamma_0)$ ที่ไม่เป็นเชิงเส้นสามารถเขียนแยกตัวประกอบให้อยู่ในรูปของมอดูลัสผ่อนคลายเชิงเส้น $G(t)$ และฟังก์ชันการหน่วง [Damping function, $h(\gamma_0)$] ได้คือ

$$G(t, \gamma_0) = h(\gamma_0) G(t) \quad (43)$$

2.6 การทดสอบการคืบเนียน

การทดสอบการคืบเนียน (Shear creep test) เป็นการควบคุมความเค้นที่ระยะ $\tau_{21}|_{x_2=h} = \tau_0$ ให้เคลื่อนที่ด้วยแรงคงที่อย่างทันทีทันใดลงบนแผ่นประกบคู่ขนานและเฝ้าดูการตอบสนองของความเครียดจากการวัดแผ่นประกบอีกด้านหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 5(ก) และรูปที่ 6(ก) การควบคุมแรงคงที่อย่างง่ายคือการใช้ตุ้มน้ำหนัก (Dead weight) ดึงแผ่นเพลทที่อยู่ระหว่างชิ้นทดสอบ (Samples) ทั้งด้านบนและล่างดังแสดงในรูปที่ 7 โดยสมการความเร็วของวัสดุระหว่างแผ่นประกบในการทดสอบการคืบเนียนจะแสดงได้ด้วยสมการที่ (3) โดยมีความเค้นคือ

$$\tau_{21}(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \tau_0 & t \geq 0 \end{cases} \quad (44)$$

สมบัติทางรีโอโลยีของการทดสอบจะเป็นฟังก์ชันของเวลา t และความเค้นเนียน τ_0 ที่ใช้ โดยมีค่าคอมไพล런스การเนียนคืบคือ

$$J(t, \tau_0) \equiv -\frac{\gamma_{21}(0, t)}{\tau_0} \quad (45)$$

เมื่อค่าความเครียดในสมการที่ (45) คือ

$$\gamma_{21}(0, t) = \int_0^{t_0} \dot{\gamma}_{21}(t) dt + \int_{t_0}^t \dot{\gamma}_0 dt \quad (46)$$

สังเกตว่าความเครียดหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟ $\dot{\gamma}_{21}-t$ ดังแสดงในรูปที่ 6(ก) ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือช่วงเวลา $0-t_0$ เป็นช่วงที่อัตราเครียดเนียนเป็นฟังก์ชันของเวลา $\dot{\gamma}_{21}(t)$ และช่วงเวลา t_0-t ซึ่งอัตราเครียดเนียนเข้าสู่สภาวะคงตัว $\dot{\gamma}_0$ แล้ว เมื่อแทนสมการที่ (46) ลงในสมการที่ (45) และจัดรูปจะได้

$$J(t, \tau_0) = J_s(\tau_0) + \frac{t}{\eta_0} \quad (47)$$

เมื่อกำหนดให้คอมไพล런스การเนียนคืบคงตัว (Steady-state compliance)

$$J_s(\tau_0) \equiv \frac{\dot{\gamma}_0}{\tau_0} t_0 - \frac{1}{\tau_0} \int_0^{t_0} \dot{\gamma}_{21}(t) dt \quad (48)$$

และความหนืดที่สภาวะอัตราเครียดเนียนคงตัวคือ

$$\eta_0 = -\frac{\tau_0}{\dot{\gamma}_0} \quad (49)$$

ภาพล่างสุดในรูปที่ 6(ก) แสดงกราฟระหว่าง $J(t, \tau_0)$ ที่เวลา t ใด ๆ หลังจากเวลา $t = t_0$ กราฟ $J(t, \tau_0)$ จะเป็นเส้นตรงและ $J_s(\tau_0)$ เป็นค่าที่ได้จากการต่อกราฟเส้นตรง $J(t, \tau_0)$ ช่วง $t \geq t_0$ ให้มาตัดที่แกนเวลา $t = 0$ ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ (47)

2.6.1 การทดสอบการคืบเนียนผ่อนคลาย

การทดสอบการคืบเนียนผ่อนคลาย (Shear creep recovery test) เกิดจากการหยุดความเค้นเฉือนคงตัว τ_0 อย่างทันทีทันใดบนแผ่นประกบคู่ขนานแล้วเฝ้าดูการตอบสนองของความเครียดจากการวัดแผ่นประกบอีกด้านหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 5(ข) และรูปที่ 6(ข) โดยสมการความเร็วของวัสดุระหว่างแผ่นประกบในการทดสอบการคืบเนียนผ่อนคลายจะแสดงได้ด้วยสมการที่ (3) โดยมีความเค้นคือ

$$\tau_{21}(t) = \begin{cases} \tau_0 & t < 0 \\ 0 & t \geq 0 \end{cases} \quad (50)$$

สมบัติทางรีโอโลยีของการทดสอบจะเป็นฟังก์ชันของเวลา t และความเค้นเฉือน τ_0 ที่ใช้ โดยมีค่าคอมไพลันซ์การคืบเนียนผ่อนคลายคือ

$$J_r(t, \tau_0) \equiv -\frac{\gamma_r(t)}{\tau_0} \quad (51)$$

เมื่อค่าความเครียดหาได้จาก

$$\gamma_r(t) = \int_0^t \dot{\gamma}_r(t') dt' \quad (52)$$

เมื่อความเครียดหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟ $\dot{\gamma}_{21}-t$ ดังแสดงในรูปที่ 6(ข) ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงเวลา $0-t_\infty$ เป็นช่วงที่อัตราเครียดเฉือนเป็นฟังก์ชันของเวลา $\dot{\gamma}(t)$ และช่วงเวลา $t_\infty-t$ ซึ่งอัตราเครียดเฉือนเข้าสู่ภาวะคงตัว $\dot{\gamma}_\infty \rightarrow 0$ แล้วทำให้เกิด $\gamma_\infty(\tau_0)$ เป็นระยะหดกลับสูงสุด (Ultimate recoil) นิยามโดย

$$\gamma_{\infty}(\tau_0) \equiv \lim_{t \rightarrow \infty} \gamma_r(t) \quad (53)$$

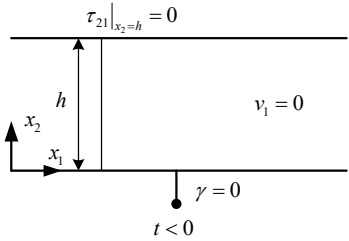
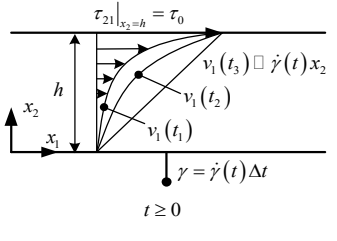
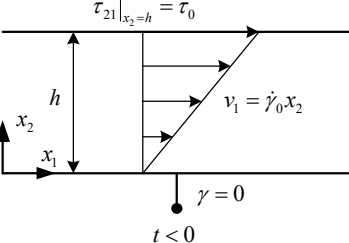
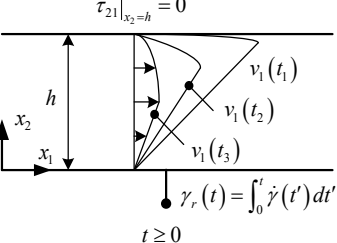
ดังนั้นกำหนดให้คอมไพล런스การเหวี่ยงคืบพ้องคลายสูงสุด(Ultimate recoil compliance) คือ

$$J_{\infty}(\tau_0) = \lim_{t \rightarrow \infty} J(t, \tau_0) \equiv -\frac{\gamma_{\infty}(\tau_0)}{\tau_0} \quad (54)$$

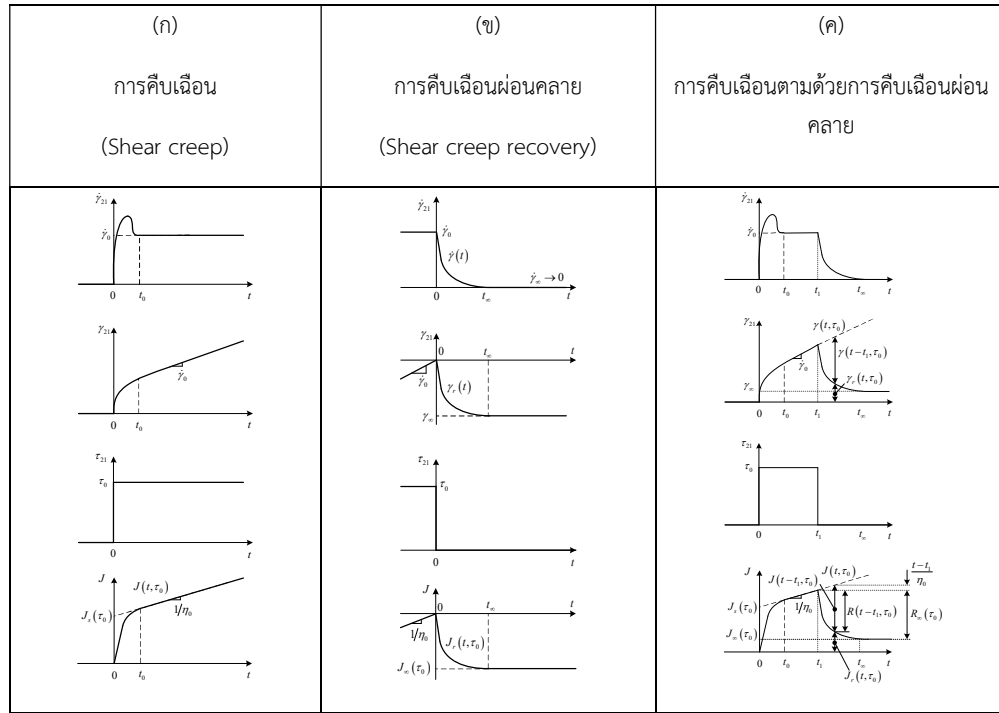
เนื่องจากการทดสอบการคืบเฉือนผ่อนคลาย (Shear creep recovery test) จะต้องทำหลังจากที่มีความเค้นเฉือนคงตัว τ_0 ทำให้ส่วนมากจะทดสอบทั้งการคืบเฉือนและตามด้วยการคืบเฉือนผ่อนคลาย (Shear creep and shear creep recovery) ไปพร้อม ๆ กัน

2.6.2 การทดสอบการคืบเฉือนตามด้วยการคืบเฉือนพ่นคลาย

การทดสอบการคืบเนื่องตามด้วยการคืบเนื่องผ่อนคลาย (Shear creep and shear creep recovery) เป็นการรวมการทดสอบการคืบเนื่องและการคืบเนื่องผ่อนคลายไว้บนกราฟเดียวกัน เป็นการควบคุมความเค้นเนื่องคงตัว τ_0 บนแผ่นประกบคู่ขนาดดังนี้

(ก) การคืบเฉือน (Shear creep)	 $\tau_{21} _{x_2=h} = 0$ h x_2 x_1 $v_1 = 0$ $\gamma = 0$ $t < 0$	 $\tau_{21} _{x_2=h} = \tau_0$ h x_2 x_1 $v_1(t_3) \propto \dot{\gamma}(t)x_2$ $v_1(t_2)$ $v_1(t_1)$ $\gamma = \dot{\gamma}(t)\Delta t$ $t \geq 0$
(ข) การคืบเฉือน พ่อนคลาย (Shear creep recovery)	 $\tau_{21} _{x_2=h} = \tau_0$ h x_2 x_1 $v_1 = \dot{\gamma}_0 x_2$ $\gamma = 0$ $t < 0$	 $\tau_{21} _{x_2=h} = 0$ h x_2 x_1 $v_1(t_1)$ $v_1(t_2)$ $v_1(t_3)$ $\gamma_r(t) = \int_0^t \dot{\gamma}(t') dt'$ $t \geq 0$

รูปที่ 5. กราฟแสดงการทดสอบสมบัติทางรีโอโลยีแบบคืบเนียนและคืบเนียนผ่อนคลาย ที่ควบคุมข้อมูลเข้า (Input) ด้วยความเค้นเฉือนคงตัว τ_0 ตามช่วงเวลาที่ต้องการ



รูปที่ 6. กราฟแสดงการควบคุมข้อมูลเข้า-ออก (Input and Output) ในการทดลองการคืบเฉือนและการคืบเฉือนผ่อนคลายแบบควบคุมความเค้นเฉือนคงตัว τ_0 ที่ช่วงเวลาที่ต้องการ

$$\tau_{21}(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \tau_0 & 0 \leq t < t_1 \\ 0 & t \geq t_1 \end{cases} \quad (55)$$

เมื่อ t_1 เป็นเวลาที่หยุดการควบคุมความเค้นเฉือนคงตัว τ_0 ซึ่งจะอยู่ในช่วงที่อัตราเฉือนคงตัว $\dot{\gamma}_0$ แล้ว
 ฝ้าดูการตอบสนองของความเครียดจากการวัดแผ่นประกบอีกด้านหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 6(ค) โดยสมการ
 ความเร็วของวัสดุระหว่างแผ่นประกบในการทดสอบการคืบเฉือนผ่อนคลายจะแสดงได้ด้วยสมการที่ (3) ถ้า

โครงสร้างของวัสดุไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามความเครียดหรือเสื่อมไปตามเวลา (Aging) สมบัติทางรีโอโลยีของการทดสอบจะเป็นฟังก์ชันของเวลา t และความเค้นเฉือน τ_0 ตามหลักการรวมตัวของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann superposition principle) [1,2,3] ดังนั้นความเครียดผ่อนคลายจะหาได้จาก

$$\gamma_r(t, \tau_0) = \gamma(t, \tau_0) - \gamma(t - t_1, \tau_0) \quad (56)$$

จากสมการที่ (51) ค่าคอมไพล런스การคืบเฉือนผ่อนคลายคือ

$$J_r(t, \tau_0) = J(t, \tau_0) - J(t - t_1, \tau_0) \quad (57)$$

เมื่อ $J(t, \tau_0)$ และ $J(t - t_1, \tau_0)$ เป็นไปตามสมการที่ (47) ดังนั้นเมื่อแทนค่า $J(t, \tau_0)$ และ $J(t - t_1, \tau_0)$ ลงในสมการที่ (57) ที่สภาวะคงตัวจะได้ค่าคอมไพล런스การคืบเฉือนผ่อนคลายสูงสุด (Ultimate recoil compliance) คือ

$$J_\infty(\tau_0) \equiv \lim_{t \rightarrow \infty} J(t, \tau_0) = \frac{t_1}{\eta_0} \quad (58)$$

จะเห็นว่าค่าคอมไพล런스การคืบเฉือนผ่อนคลายสูงสุด (Ultimate recoil compliance) จะขึ้นอยู่กับเวลา t_1 ส่วนค่าฟังก์ชันการหดตัวกลับ (Recoil function) [ดูรูปที่ 6(ค)] คือ

$$R(t - t_1, \tau_0) = J(t, \tau_0) - J_r(t, \tau_0) - \frac{t - t_1}{\eta_0} \quad (59)$$

เมื่อแทนค่า $J(t, \tau_0)$ จากสมการที่ (47)

$$R(t - t_1, \tau_0) = J_s(\tau_0) - J_r(t, \tau_0) - \frac{t_1}{\eta_0} \quad (60)$$

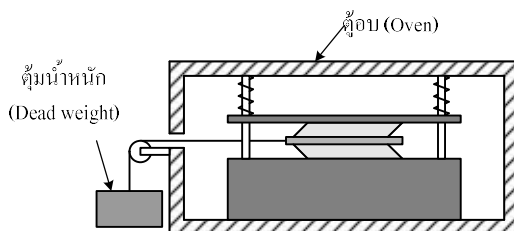
เมื่อ $t \rightarrow \infty$ สมการที่ (60) จะมีค่าเป็นฟังก์ชันการหดตัวกลับสูงสุด (Ultimate recoil function)

$$R_\infty(\tau_0) \equiv \lim_{t \rightarrow \infty} R(t - t_1, \tau_0) = J_s(\tau_0) - \lim_{t \rightarrow \infty} J_r(t, \tau_0) - \frac{t_1}{\eta_0} \quad (61)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่(58)ลงในสมการที่ (61) จะได้

$$R_\infty(\tau_0) = J_s(\tau_0) \quad (62)$$

จะเห็นได้ว่าถ้าโครงสร้างของวัสดุไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามความเครียดหรือเสื่อมไปตามเวลา ฟังก์ชันการหดตัวกลับสูงสุด (Ultimate recoil function) จะมีค่าเท่ากับคอมไพอันซ์การเนียนคืบคงตัว (Steady-state compliance) ตามหลักการรวมตัวของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann superposition principle)



รูปที่ 7. การทดสอบการคืบด้วยแรงคงที่จากตุ้มน้ำหนัก (Dead weight) ดึงแผ่นเพลท (Plate) ที่อยู่ระหว่างชิ้นทดสอบ (Samples) ทั้งด้านบนและด้านล่าง

3 บทสรุป

รีโอโลยี (Rheology) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปของวัตถุในช่วงเวลาที่สนใจโดยที่แรงนั้นจะทำให้วัตถุเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรและเกิดการไหลของสสาร โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปของของไหลจะถูกทดสอบด้วยการไหลแบบเฉือน (Shear test experiments) เพื่อหาสมบัติรีโอโลยีของของไหลนั้น ๆ การทดสอบการไหลแบบเฉือนที่นักวิจัยใช้ทดสอบกันมากเช่น การทดสอบเฉือนคงตัว (Steady shear) การทดสอบเฉือนไป-มา (Oscillatory shear) ความเค้นเฉือนโตขึ้น (Stress growth) ความเค้นเฉือนลดลง (Stress decay) ความเค้นผ่อนคลาย (Stress relaxation) และการคืบเฉือน (Shear creep) เป็นต้น เพื่อให้ให้นักวิจัยที่ทำงานทางด้านนี้ได้มีการอ้างอิงถึงสมบัติรีโอโลยีและใช้ตัวแปรไปในทิศทางเดียวกันทางสมาคมรีโอโลยีแห่งสหรัฐอเมริกา (Society of Rheology, SOR) ได้ตั้งคณะกรรมการทำความเข้าใจร่วมกันในการกำหนดสมบัติรีโอโลยีที่ได้จากการทดสอบรวมทั้งกำหนดตัวแปรที่ได้จากการทดสอบเหล่านี้และได้ออกเอกสารเผยแพร่ออกมาเป็นระยะ ๆ ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ นายพงศ์เทพ พ่วงทอง นักศึกษาระดับปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ช่วยอ่านตรวจทานต้นฉบับชุดนี้

เอกสารอ้างอิง(References)

- [1] Bird, R.B., Stewaet, W.E., Lightfoot, E.N., Klingenberg, D.J., “Introductory Transport Phenomena,” Wiley (2015).
- [2] SathaphonWangchai, “Finite Element Analysis of Heat Generation in Particle Filled Natural Rubber Valcanizates During Cyclic Deformation,” Master Thesis, Department of Mechanical Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology North Bangkok, Thailand (2005).
- [3] Wangchai, S., C. Kolutawong, and A. Chaikittiratna, “Finite Element Simulation for Heat Built-up in Vulcanized Natural Rubber Subjected to Dynamic Load,” *J. of KMITNB*, **18**(3), pp.49-61 (2008). Published in Thai.
- [4] Wangchai, S., C. Kolutawong, and A. Chaikittiratna, “Finite Element Analysis of Heat Generation in Particle Filled Natural rubber Valcanizates During Cyclic Deformation,” *J. of KMITNB*, **21**(1), pp.754-762 (2011). Published in Thai.
- [5] Ward, I.M. and Sweeney, J., An Introduction to The Mechanical Properties of Solid Polymers, 2nd, John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex, UK (2004).
- [6] John M. Dealy, Official Nomenclature for Material Functions Describing the Response of a Viscoelastic Fluid to Various Shearing and Extensional Deformations, *Journal of Rheology*, **28**, 181 (1984).
- [7] John M. Dealy, Official Nomenclature for Material Functions Describing the Response of a Viscoelastic Fluid to Various Shearing and Extensional Deformations, *Journal of Rheology*, **39**, 253 (1995).
- [8] Ad Hoc Committee on Official Nomenclature and Symbols, Official symbols and nomenclature of the society of rheology, *Journal of Rheology*, **57**, 1047 (2013).
- [9] W. Gleißle, “Rate- or stress-controlled rheometry,” Chapter 12, Collyer, A. A. and Clegg, D.W., *Rheological Measurement*, 2nd Ed., Chapman and Hall, London & New York, pp.357-391 (1998).
- [10]. Kwang Soo Cho, Viscoelasticity of Polymers: Theory and Numerical Algorithms, Springer Series in Materials Science Vol. 241, (Springer, Dordrecht, 2016).
- [11] Dealy, J.M., and K.F. Wissbrun, *Melt Rheology and its Role in Plastics Processing: Theory and Applications*, Van Nostrand Reinhold, New York (1990).
- [12] Giacomini, A.J. and Dealy, J.M., “Using large-amplitude oscillatory shear,” Chapter 11, Collyer, A. A. and Clegg, D.W., *Rheological Measurement*, 2nd Ed., Chapman and Hall, London & New York, pp.327-356 (1998).

- [13] C. Kolutawong, Local shear stress transduction in sliding plate rheometry, Ph.D. Dissertation, Department of Mechanical Engineering, The University of Wisconsin-Madison, USA (2002).
- [14] Giacomini, A.J., and Bird, R.B., Erratum: Official Nomenclature of The Society of Rheology: $-\eta''$, *Journal of Rheology*, **55**(4), 921-923 (2011).
- [15] J.D. Ferry, Viscoelastic properties of polymers, 2nd. Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York (1970).
- [16] Jung Gun Nam et al., Phase angle of the first normal stress difference in oscillatory shear flow, *Korea-Australia Rheology Journal*, **22**(4), pp.247-258 (2010).
- [17] Saengow, C. and A.J. Giacomini, "Normal Stress Differences from Oldroyd 8-Constant Framework: Exact Analytical Solution For Large-Amplitude Oscillatory Shear Flow," *Physics of Fluids*, **29**, 121601 (2017).
- [18] C Saengow and AJ Giacomini, Exact solutions for oscillatory shear sweep behaviors of complex fluids from Oldroyd 8-constant framework, *Physics of Fluids*, **30**, 030703 (2018).
- [19] J.D. Ferry, Viscoelastic properties of polymers, 2nd. Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York (1970).
- [20] Certh, C., et al., Rheology of fibrin clots II. Linear viscoelastic behavior in shear creep, *Biophysical Chemistry*, **2**, pp.208-217 (1974).
- [21] Nelb, G.W., et al., Rheology of fibrin clots III. Shear creep and creep recovery of fine ligated and coarse unligated clots, *Biophysical Chemistry*, **5**, pp.377-387 (1976).