

Received: December 22, 2019; Revised: March 2, 2020; Accepted: April 20, 2020

พฤติกรรมการตอบสนองต่อพอลิเอไมด์ Viscoplastic behaviour of polyamides

ภาณุเมศวร์ สุขศรีศิริวัชร^{1*} จิรวัดน์ รักการ¹ โปเสก ภานุรัตน์¹ และเรวัฒน์ เต็มกล้า²
Panumet Suksrisirawat^{1*}, Jirawat Rakkan¹, Posek Bhanuratana¹ and Rewat Termkla²

¹คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์²คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์

* Corresponding Author E-mail Address: P_7722@hotmail.com

บทคัดย่อ

เทอร์โมพลาสติก เป็นพลาสติกที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนตัวลงและเมื่อเย็นลงจะแข็ง สามารถเปลี่ยนรูปได้ ในเชิงอุตสาหกรรมเทอร์โมพลาสติกเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางสำหรับการผลิตเพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ทางการบรรจุเพื่อเกิดมูลค่าและรักษาชิ้นงานรวมถึงการส่งออก อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงของวัสดุและมอดูลัสทั้งสองนี้ล้วนมีความยืดหยุ่นต่ำ รวมถึงวิธีการผลิตขึ้นรูปในเชิงอุตสาหกรรม ในงานวิจัยครั้งนี้ศึกษาถึงการตอบสนองพฤติกรรมทางอีลาสติก ได้แก่ การให้ความร้อนสัมพันธ์กับระยะเวลาที่เกิดขึ้น ลักษณะการไหลนิวโตรเนียนและหาผลกระทบจากสมการที่แตกต่างกันในแต่ละบทความเพื่อหาสมรรถนะที่เกิดขึ้น ผลจากการศึกษา การทดลองมีทั้งหมด 2 วิธี 1) วิธีการให้ความร้อนเมื่อเวลาผ่านไปหาจุดการคืนรูปอิสระ ความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียด และ 2) วิธีการไหลเมื่อให้ความร้อนอุณหภูมิที่แตกต่างหาทิศทางในการไหล วิธีที่ 1) เมื่อให้ความร้อนช่วง 0-100 องศาเซลเซียส พลาสติกกำลังเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยที่มอดูลัสเข้าสู่กระบวนการไยแก้วซึ่งทำให้พลาสติกยืดได้เต็มตัว ในช่วง 350 องศาเซลเซียส ความเปราะบางในการเปรียบเทียบผลต่างกันอยู่ที่ 4 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเคยแบดิกทำให้วัสดุผ่นกลับ ผลในวิธีที่ 2 พฤติกรรมการไหลเข้าสู่สัมประสิทธิ์ความเปราะบางที่ 0.90 เป็นต้นไป จึงบ่งบอกถึงพฤติกรรมการไหลความเป็นนิวโตรเนียนเชิงเส้น

คำสำคัญ: เทอร์โมพลาสติก ความเค้น ความเครียด นิวโตรเนียน

Abstract

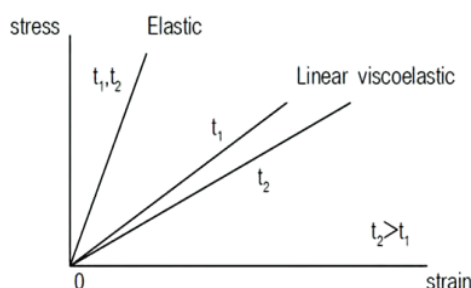
Thermoplastic is widely used. After heat exposure, the thermoplastic was melted and soft while becoming rigid when the temperature was cooling down. Thus, the thermoplastic can be transformable. For industrial usage, thermoplastic was beneficially used in molding the packaging production and product preservation for export value. However, thermoplastic performed low flexibility according to its strength and modulus value affecting on industrial re- molding production. This study aimed to investigate the

factors affecting to the viscoplastic behavior of polyamides such as heating, time exposure, Newtonian flow and determined the effect of equational difference for evaluating this material capacity. Result suggested the heat treatment process until reaching the independent re-forming point presented the correlation with the strain and stress value. The direction flow by different temperature treatment performed different profile. Heating with 0- 100 °C made thermoplastic changeable to modulus led to optic fiber stage that presented absolute flexibility, while at 350 °C treatment presented the diabatic effect that brought into material reversion through 4% difference. The viscoplastic behavior turned closely to 0.90 coefficient deviation suggested Newtonian flow exhibited in linearity.

Keywords: Thermoplastic, stress, strain, newtonian

บทนำ

สมบัติวิสโคอิลาสติก (Viscoelasticity) คือการที่วัสดุมีสมบัติทั้งเหนียวหนืด (Viscous) เหมือนของเหลวและยืดหยุ่น (Elastic) เหมือนของแข็งในเวลาเดียวกันซึ่งเป็นสมบัติที่มีอยู่ในวัสดุพอลิเมอร์ รูปที่ 1



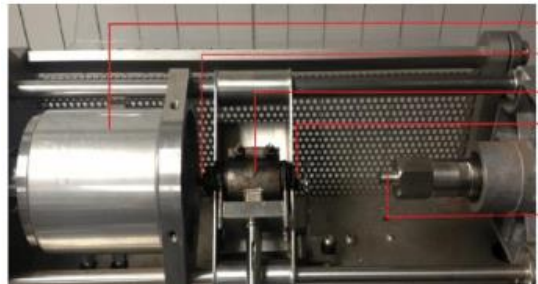
รูปที่ 1 พฤติกรรมของวิสโคอิลาสติกเชิงเส้น

ในการใช้งานส่วนมากพอลิเมอร์จะอยู่ในรูปของแข็งจึงความเป็นอิลาสติกสูงในช่วงเวลาและอุณหภูมิใช้งานเหมือนกับการใช้ฆ้อนทุบอย่างรวดเร็วอย่างไรก็ตามพอลิเมอร์ก็ยังแสดงสมบัติคล้ายของเหลวบ้าง เช่น แก้วพลาสติกนั่งนานทุกๆ วันหรือน้ำหนักคงที่เป็นเวลานานจะเกิดการไหลทำให้โก่งลงได้เช่นกัน ประโยชน์ของวิสโคอิลาสติกในพอลิเมอร์สามารถนำไปใช้ในการขึ้นรูปพอลิเมอร์ เช่น การเป่าและการทำเส้นใยซึ่งจำเป็นต้องอาศัยความยืดหยุ่นของพลาสติกของพอลิเมอร์หลอมเพื่อนำไปใช้ในการปรับปรุงสมบัติแรงกลหลังการขึ้นรูป (Schapery, 1997; Chailleux and Davies, 2003)

ลักษณะการผลิต

เครื่องทดสอบการผลิตความหนาแน่นที่ต่ำที่สุดของโพลีเอทิลีนจะใช้ DSM Xplore Micro 10cc injection Molding Machine โดยมาตรฐานรองรับจาก ASTM standard D638-03 ลักษณะการผลิตเครื่องจักรจะเริ่มฉีดวัสดุผ่านหัวฉีดเข้าสู่

ตัวโมนที่ได้ทำรูปทรงไว้จากนั้นกระบอกนิวเมตริกจะเป็นตัวยืดระยะของวัสดุเพื่อสร้างความยาวและคงความหนาของวัสดุดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 DSM Xplore Micro 10cc injection Molding Machine

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ก่อนการทดสอบ

ความกว้าง	0.5
ความยาว	5
ความหนา	0.125

หลังจากฉีดวัสดุเข้าสู่ตัวโมนที่ 200 องศาเซลเซียส ลักษณะโครงวัสดุจะขึ้นรูปตามตัวโมนดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ASTM D790-07 molded material flex bar mold

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงหลังจากฉีดเข้าสู่โมน

การยืดตัวออก	0.5
การยืดระยะ	2.25
ความกว้างทั้งหมด	0.75
ความยาวทั้งหมด	6.5
รัศมีที่ขอบ	3
ความหนา	0.125

จากรูปที่ 3 เมื่อวัสดุชนิดโพลีเอทิลีนเกิดการอ่อนตัวลงจนทำให้กำหนดน้ำหนักวัสดุจะอยู่ในรูปของการเปลี่ยนแปลงรูปทรง เมื่อฉีดเข้าสู่โมนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เนื่องจากความหนืดที่อยู่ในวัสดุจะแปรผันตามอุณหภูมิที่เกิด 150 องศาเซลเซียส และจะคงรูปร่างเมื่อใช้ลมเป่าที่ 5-7 บาร์ ระยะเวลาในการเป่าลมอยู่ในช่วง 4-30 วินาที เป็นต้น (Leech et al., 1993)

เมื่อกล่าวถึงการเป่าลมเพื่อให้วัสดุคงรูปร่างในทางมาตรฐานสำหรับพลาสติกแบบโพลีเอทิลีน จะมีค่าหัดตัวกลับเมื่อความดันและเวลาตกอยู่ในช่วงระหว่างดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าสมรรถนะ

สมรรถนะ	ช่วง	ความดัน (บาร์)	เวลา (วินาที)
ไม่สามารถขึ้นรูป	1	8	4
การขึ้นรูป	2	11	0.2
การคงตัว	3	11	30
การผันกลับ	1	5	4
	2	11	0.2
	3	11	30
จุดหดตัวน้อยที่สุด	1	5	4
	2	8	0.2
	3	8	30

จากตารางที่ 3 เมื่อเทียบกันในช่วงเวลาที่เท่ากันและทำการแยกการทดสอบเป็น 3 ช่วง จะพบจุดที่ไม่สามารถขึ้นรูปได้ช่วงในการขึ้นรูป ช่วงในการคงสภาพ การผันกลับ และจุดที่หดตัวน้อยที่สุดเมื่อมีความดันและเวลามาเกี่ยวข้อง

วิธีขึ้นรูปโดยสูญญากาศ

เทคนิคการขึ้นรูปโดยใช้แรงดันสูญญากาศโดยตรง (Straight vacuum forming) เป็นเทคนิคเทอร์โมฟอร์มที่ง่ายที่สุดใช้กับการแปรรูปที่ใช้เบ้าตัวผู้ (Male mold) และเบ้าตัวเมีย (Female mold) และตัวจับแบบเฟรมคู่ (Double clamping flame) สามารถสรุปขั้นตอนของการขึ้นรูปโดยใช้แรงดันสูญญากาศโดยตรงได้ 4 ขั้นตอนดังนี้ 1) จับยึดแผ่นพลาสติกโดยใช้เฟรมจับ (Clamping flame) 2) ให้ความร้อน (Heating) และวางตำแหน่ง (Positioning) ทำโดยการให้ความร้อนจนแผ่นพลาสติกอ่อนตัวในเครื่องเทอร์โมฟอร์ม ทำการให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติกซึ่งวางอยู่ด้านบนของเบ้า 3) การขึ้นรูป (Forming) ทำโดยใช้แรงดันสูญญากาศ (Vacuum) ดึงให้แผ่นพลาสติกที่อ่อนตัวยึดตัวประกบเบ้า และ 4) ถอดชิ้นงานออกจากเบ้า เทคนิคนี้นิยมใช้ในการแปรรูปพลาสติกที่มีความแข็งแรงสูง แต่มีข้อเสียคือชิ้นงานที่ได้มีความหนาไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือ มีส่วนหนา และมีส่วนมุม (Corners) บาง ลักษณะการยึดตัวของพลาสติกในขณะที่ถูกดึงโดยแรงดันสูญญากาศ ประสิทธิภาพการใช้เทคนิคการขึ้นรูปโดยใช้แรงดันสูญญากาศโดยตรงนี้ (Straight vacuum forming) เนื่องจากจะต้องมีการดึงแผ่นพลาสติกให้มีการยืดตัวสูง (Deep draw) ก่อนทำการ [4] ขึ้นรูปดังรูปที่ 4 (Heuvel et al., 1992)



รูปที่ 4 การขึ้นรูปแบบสูญญากาศ

คุณสมบัติคุณลักษณะ

องค์ประกอบพื้นฐานของผลการทดสอบเมื่อเทียบกับผลการทดสอบกับบทความต่างๆ ดังตารางที่ 4 และ 5

ตารางที่ 4 คุณลักษณะที่เกิดขึ้นจากการทดลอง

ลักษณะการทดลอง	การทดลอง	งานวิจัยต่างๆ
อัตราการไหล	18.66	2-2300 [10]
อุณหภูมิขึ้นรูป	287.32	264-289 [4]
สีวัสดุ	ใส	50-95 % ใส [10]
ความหนาแน่น	0.916	0.91-0.98 [10]
ความยืดต่อวัสดุแข็ง	2.6056	8.2 [10]
ความยืดต่อมอดูรัส	40.1677	16-65.01 [10]

ตารางที่ 5 ค่าพารามิเตอร์ที่กระทำ

ตัวแปร	Stress = 1 Mpa		
	Spring	Maxwell	Kelvin
E_0	133.7414	158.142	116.3633
μ_0		141088.8901	174.5450
μ/E			1.500
E_1			252.8678
μ_1			3190.3005
τ_{01}			12.616
Chi sq.	1.4638	0.6750	1.0227

สมการในการออกแบบ

ฟังก์ชันที่แสดงถึงความแตกต่างระหว่างพฤติกรรมของผิวพลาสติกในการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

$$C.S. = a + bT + cT^2 + dT^3 + e \ln(t) \quad (-5 < T < 90, 30 < t < 1440) \quad (1)$$

เมื่อการแสดงผลพฤติกรรมจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 90 องศาเซลเซียส และลดลงถึง 30 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบกับเวลาที่น้อยกว่า 1,440 วินาที

สมการที่บ่งบอกผลการทดลองในมาตรฐาน ISO 1856²⁰

$$C.S. = \frac{d_o - d_r}{d_o} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ d_o ค่าความหนาเดิม

d_r ค่าความหนาที่ได้รับจากกด

และเมื่อพลาสติกเกิดการกลับรูปร่างจะมีแรงที่กระทำซ้ำ จะเกิดจุดการเปลี่ยนของค่า strain เพื่อทราบถึงกระบวนการเปลี่ยนรูปในทุกๆ 37.5 เปอร์เซ็นต์

$$C.S.(%) = a \ln(t) + (30 < t < 1440) \quad (3)$$

จากที่เกิดความสัมพันธ์ระหว่าง stress – strain จะมีพฤติกรรมโหมมิ่ง หรือการเกิดพลาสติกผุดพองในลักษณะก้น

$$L(T) = \text{EXP} \left(\frac{-C(T-T_r)}{C_2 + (T-T_r)} \right) \quad (4)$$

เมื่อ C_1, C_2 ค่าคงที่ชนิดของวัสดุ

T_r อุณหภูมิอ้างอิงเมื่อวัสดุยืดกลับ

T อุณหภูมิเมื่อวัสดุขยายตัว

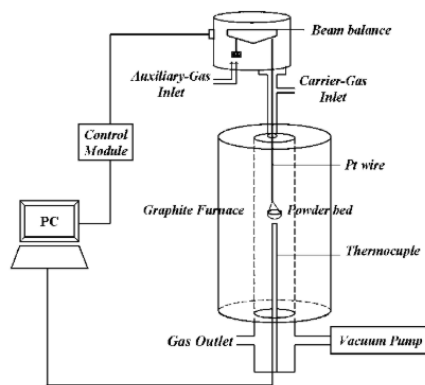
วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

ชุดของการทดสอบเพื่อหาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของวัสดุทั้งหมด 2 รูปแบบ ได้แก่ Thermal gravimetric analyzer ดังรูปที่ 5 โดยให้ความร้อนแก่วัสดุเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างตามช่วงอุณหภูมิที่สูงสุด 400 องศาเซลเซียส



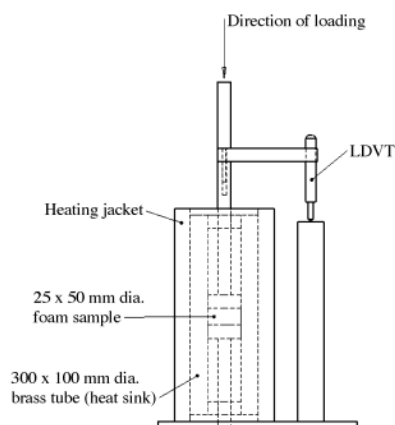
รูปที่ 5 Thermal gravimetric analyzer ทดสอบหาค่ามอดูลัสและความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียด

จากรูปที่ 5 ลักษณะการทดสอบของเครื่อง Thermal gravimetric analyzer ใช้โปรแกรม Math lab ในการควบคุมปริมาณแก๊สร้อนสมดุลเข้าสู่สภาวะคงตัวเพื่อรอการฉีดวัสดุผ่าน Carrier gas และ Auxiliary gas เข้าสู่ Thermocouple กระจายความร้อนสู่พอลิเมอร์เมื่อบันทึกค่าความร้อน มอดูรัส และความสัมพันธ์ของความดันและความเครียดในลักษณะกราฟผ่านโปรแกรม เมื่ออุณหภูมิเกิดขึ้นที่วัสดุหลอมละลายเซ็นเซอร์นำความร้อนรูปแบบ Superheat ออกทาง Gas outlet และเติม Vacuum pump เพื่อเติมสมดุลอากาศเพื่อไม่ให้อุณหภูมิเกินขีดกำหนดดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 Diagram การทดสอบ

จากรูปที่ 6 High temperature test set up การทดสอบเพื่อหาค่าความแตกต่างระหว่างพลาสติก ไนลอน และพอลิเมอร์อัลลอย โดยฉีดวัสดุแล้วหาค่า Compressive Strain ช่วง 25.0% 37.5% และ 50.0% เพื่อหา สัมประสิทธิ์บนผิวที่อุณหภูมิ 50 70 และ 90 องศาเซลเซียส เริ่มต้นการนำวัสดุชนิดทดสอบผ่าน Direct of loading อัดตัวผ่าน LDVT เพื่อเพิ่มความดันผ่านอุณหภูมิในความร้อนของแต่ละช่วง บันทึกข้อมูลโดยโปรแกรม Vishay measurements group system 5100 (Data logger) ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 High Temperature Test Set Up

ตารางที่ 6 สัมประสิทธิ์ที่เลือกพิจารณาบนผิวโนลอน

Compressive Strain	Coefficient				
	a	b	c	d	e
25 %	17.7925	8.2×10^{-2}	-1.04×10^{-4}	-5.7×10^{-6}	-1.1572
37.5 %	23.5808	1.1×10^{-1}	-1.5×10^{-5}	-8.9×10^{-6}	-1.2686
50 %	35.7303	4.2×10^{-2}	-2.08×10^{-3}	-1.7×10^{-5}	-1.7773

ตารางที่ 7 สัมประสิทธิ์ที่เลือกพิจารณาบนผิวพลาสติกอัลลอย

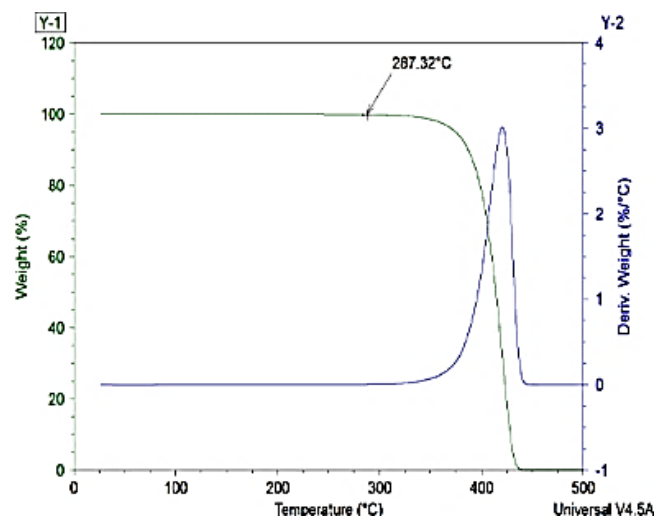
Compressive Strain	Coefficient				
	a	b	c	d	e
25 %	9.1989	1.9×10	-4.1×10^{-3}	3.03×10^{-5}	-1.0598
37.5 %	11.4089	8.3×10^{-2}	-4.2×10^{-4}	8.14×10^{-6}	-1.0745
50 %	13.5568	1.1×10	-2.05×10^{-4}	8.1×10^{-6}	-1.2642

สัมประสิทธิ์บนผิวโนลอนและอัลลอยเมื่อมีแรงกระทำตั้งฉากกับพื้นที่ตัดขวางค่าที่อัดต่อวัสดุทำให้ระยะลดลงที่อุณหภูมิและระยะเวลาเดียวกันจากสมการที่ 1 เมื่อ a ระยะคงที่ของสัมประสิทธิ์ผิวไม่มีแรงกระทำ จนถึง e เมื่อมีอุณหภูมิพร้อมทั้งเวลาที่ทำให้เกิดการคืนรูปเมื่อมีแรงกระทำตั้งฉาก 25%, 37.5% และ 50% ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ -5 องศาเซลเซียส ถึง 90 องศาเซลเซียส และช่วงเวลา 30 – 1440 วินาที ทำให้วัตถุที่อยู่ภายใต้แรงอัดจะต้องกระทำแรงตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของท่อนวัตถุที่กระทำนั้นความเค้นดึงจะให้เครื่องหมายแสดงเป็นลบ เช่น ความเค้นอัดที่ 25 % ค่าสัมประสิทธิ์ a ของผิวโนลอนไม่เกิดแรงกระทำตั้งฉากนั้น 17.7925 เมื่อเพิ่มแรงกระทำเกิดการเปลี่ยนระยะหรือปริมาณผิวสัมประสิทธิ์ลดลงจนถึงสภาวะ d เกิดการคืนรูปแบบบิสระยะทำให้แรงการทำผิวตั้งฉากเพิ่มขึ้นคือค่าสัมประสิทธิ์ e เป็นกรณีเดียวกับผิวอัลลอยทำให้วัสดุยืดถาวร

ผลการวิจัย

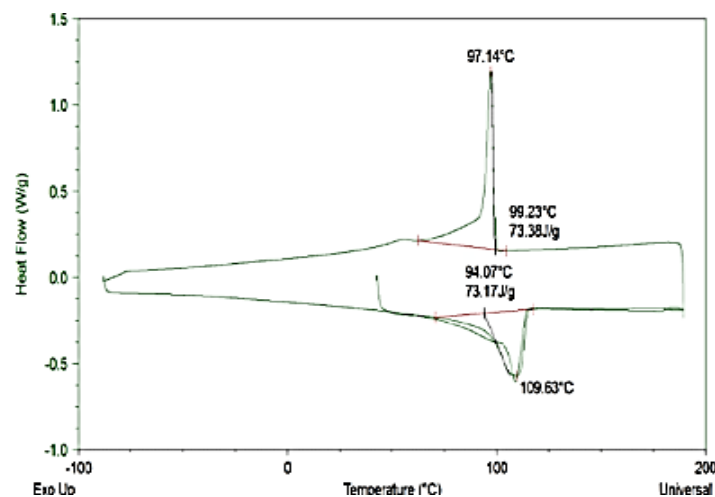
ความร้อนที่ทำให้เกิดจุดขึ้นรูปของพอลิเมอร์ด้วยการใช้วิธี Thermal gravimetric analyzer (TGA) จะทำให้วัสดุเกิดความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการหยุดและขยายตัว เมื่อทดสอบให้น้ำหนักที่ 15.92 มิลลิกรัม ที่อุณหภูมิที่ 2 องศาเซลเซียสต่อนาที และให้ความร้อนจนถึง 50 องศาเซลเซียส (Leech et al., 1993)

จากข้อมูลเมื่อถึงจุดที่วัสดุค่อยๆขึ้นรูปนั้นอยู่ในช่วง 287 องศาเซลเซียส จนถึงช่วง 400 องศาเซลเซียสและเห็นลักษณะความผันกลับและเป็นไปได้ที่จะเปลี่ยนแปลงในช่วง 350 องศาเซลเซียส ภายในระยะเวลาที่สั้น



รูปที่ 8 พารามิเตอร์ที่เกิดขึ้นของ Thermal gravimetric analyzer

จากรูปที่ 8 พบว่าอุณหภูมิเกาะตัว T_m คือปัจจัยสำคัญที่ทำให้พลาสติกเกิดรูปร่าง แต่ต้องมีอุณหภูมิคายตัวเพื่อช่วยลดจุดรั่วของชิ้นงาน T_c การที่พลาสติกขึ้นรูปเป็นที่ยืดหยุ่นอีกสิ่งหนึ่งคือสีของวัสดุ วิธีการทดสอบจะใช้ลมเป่าในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะเห็นการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเมื่ออุณหภูมิกระทำต่อวัสดุ (Hoff and Jacobsson, 1981) ในการทดสอบจะใช้ น้ำของโพลีเอทิลีน 6.4 มิลลิกรัม ให้ความร้อนจนถึง 190 องศาเซลเซียส ตัดกับอุณหภูมิติดลบ 100 องศาเซลเซียส เพื่อหาผลกระทบจุดเกาะตัวและจุดคายตัวของพลาสติก

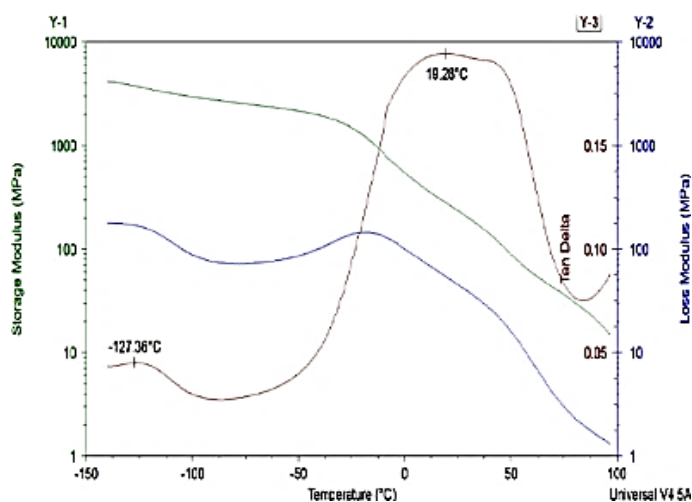


รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับลมเป่า

จากรูปที่ 9 เมื่อให้ความร้อนที่ 97.14 องศาเซลเซียส ลมที่ใช้ในการขึ้นรูปจะเพิ่มขึ้นถึง 1.1 บาร์ แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างนี้ได้รับอิทธิพลจากความเร็วของลมเช่นกัน ในช่วงอุณหภูมิที่ 109.63 องศาเซลเซียส อัตราการไหลกำลังมาติดลบเนื่องจากการคายตัวแบบอเดียเบติก

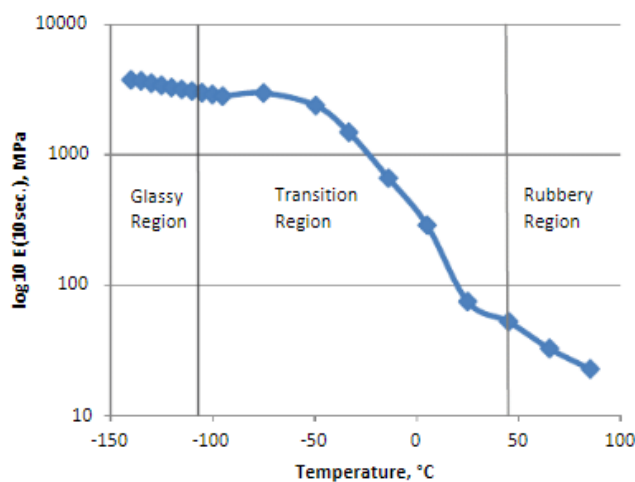
มอดูลัส คือ ค่าที่พลาสติกกักเก็บพลังงานเพื่อตอบสนองต่อความยืดและสร้างความหนาแน่นให้คงที่ต่อการเปลี่ยนรูป และยังบ่งบอกถึงพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงเมื่อความร้อนกระทำจะเกิดจุดช่วงของการเปลี่ยนสถานะในรูปแบบใดแก้ว T_g ในการ

ทดสอบเมื่อเทียบกับกราฟมอดูลัส จุดอิสระจะบอกถึงช่วงก่อนการกลับรูปเมื่อผ่านช่วง 10 วินาที เกิดจุดสมรรถนะสูงสุดที่ 19.20 องศาเซลเซียส (Hoff and Jacobsson, 1981; Han et. al., 2007)



รูปที่ 10 มอดูลัสการสูญเสียและจุดสูงสุด

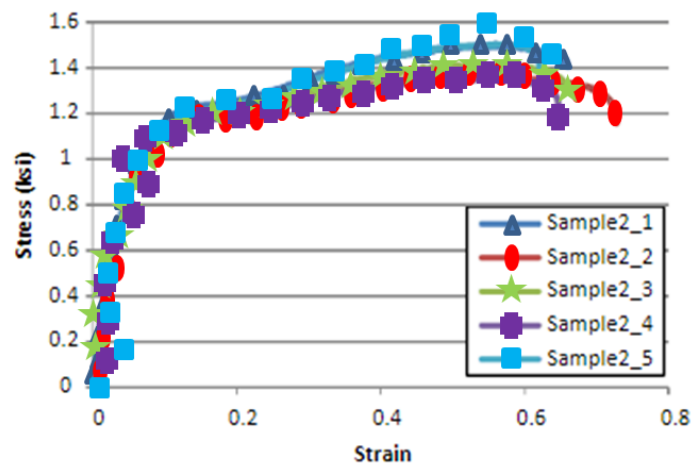
จากรูปที่ 10 เมื่อพิจารณาต่อฟังก์ชันอากาลิเทียมกับอุณหภูมิจะพบว่ารูปแบบการเปลี่ยนแปลงแบบอิสระนั้นเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาที่ยาวจนกลายมาเป็นยางสังเคราะห์ดังรูปที่ 11 (Vasile and Pascu, 2005)



รูปที่ 11 ช่วงการเปลี่ยนสถานะในมอดูลัส

จากรูปที่ 11 พบว่าช่วงการเปลี่ยนสถานะในมอดูลัสจะเริ่มตั้งแต่การที่อุณหภูมิที่ฐาน 10,000 ลักษณะจะอยู่ในรูปใยแก้วของจุดขีดกำหนดอุณหภูมิต่ำที่สุดจนขึ้นมาเป็น การเปลี่ยนแปลงที่ขีดอุณหภูมิปกติในฐานอากาลิเทียม 100-1,000 เป็นที่แน่นอน เมื่อสถานะที่ถูกความร้อนกระทำนั้นเกิดการเปลี่ยนรูปร่างที่ถาวรในช่วงการที่อุณหภูมิ 100 เท่านั้น (Heuvel et al., 1992)

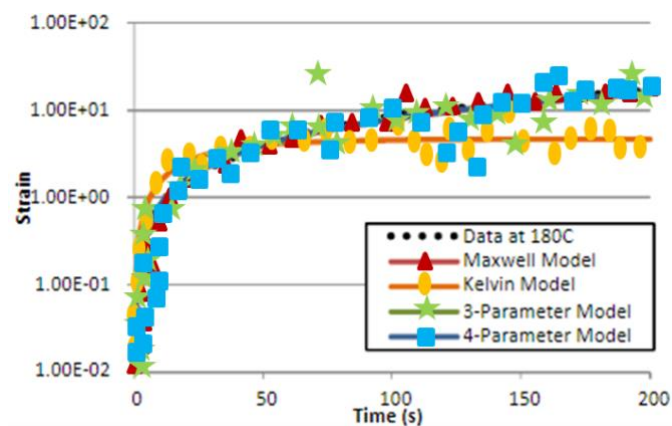
แรงดึงของวัสดุจะมีค่า Stress และ Strain อยู่ภายในเมื่อวัสดุถูกการยืด ค่าของ Stress จะเพิ่มตาม Strain เมื่อวัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปเมื่อนำโพลีเอทิลีนมาทำสอบการดึง 5 ครั้งผลที่ได้ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain

จากรูปที่ 12 ในการทดสอบแรงดึงครั้งที่ 5 จะเห็นได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของ Stress อยู่ในช่วงที่มากที่สุดเนื่องจากการสูญเสียความแข็งแรงในโครงสร้างที่มีค่าความล้ามากที่สุด และรูปร่างชิ้นงานจะคงสภาพได้นานที่สุด

ในการทดสอบที่ค่า Stress = 7 ค่าที่เปลี่ยนแปลงต่อการยืดตัวของพลาสติกอยู่ที่ 0.2145 ปัจจัยหลักที่ค่า Stress เพิ่มขึ้นเมื่อการทดสอบใช้รอบวัฏจักรในช่วง $1.00\text{E}-02$ ถึง $1.00\text{E}+02$ และนำผลมาเปรียบเทียบกับแต่ละบทความดังรูปที่ 13 (Lai and Bakker, 2005)

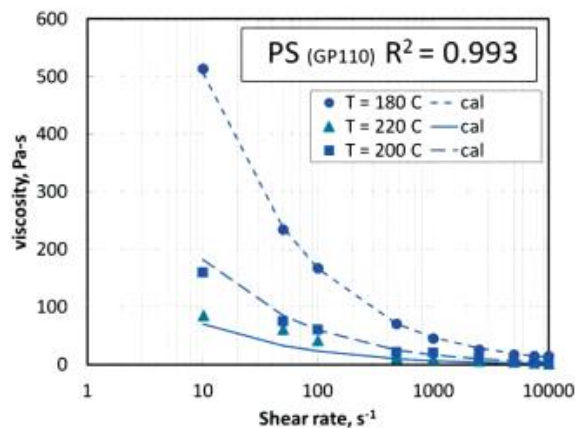


รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain และ Time

จากรูปที่ 13 พบว่า Max well, 3-parameter model, 4-parameter model ใช้ฟังก์ชัน $1.00\text{E}+0.1$ คือค่าที่ strain เกิดจุดสมดุลเท่ากันจนถึงระยะเวลา 200 วินาที แต่ในด้าน Kelvin model ได้ฟังก์ชันที่น้อยกว่าจนทำให้เห็นได้ชัดว่าวัฏจักรในการทดสอบซ้ำๆ จะไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงสูงสุดเมื่อพิจารณาแรงเฉือนที่ 180 องศาเซลเซียส ที่ 0.7% มีแรงต้านและยาวนานถึง 100 วินาที

พฤติกรรมกลไกของพอลิเมอร์ การฉีดเข้าแม่พิมพ์ที่ไม่สมมาตรเพื่อหาค่าความร้อนจำเพาะ ค่าความหนืด ค่าการนำความร้อน และความหนาแน่นของพลาสติกหลอมเหลว ที่เกิดขึ้นกับอุณหภูมิเพื่อนำมาสร้างสมการอธิบายความสัมพันธ์ของค่าดังกล่าว อุณหภูมิของพลาสติกหลอมเหลว ความเร็วในการฉีด และความดันในการฉีดที่คงที่แบบ Shot size ที่แตกต่างกัน

จำนวน 5 ค่าของพลาสติกและนำผลจริงมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองการไหลตามระยะทางที่พลาสติกไหลได้ในแต่ละทิศทาง และลักษณะของ Flow front ที่ระยะฉีดเท่ากัน จะได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของพอลิเมอร์กับอัตราการฉีด ณ อุณหภูมิต่างๆ จะนำมาเทียบกับ Fitting curve แบบเชิงเส้นกับเส้นค่าอุณหภูมิบนโปรแกรม Math lab ดังรูปที่ 14 และจะได้ 5 ค่า สมการ Cross model คือ 1) Zero shear viscosity 2) Power law index (n) 3) Time constant (lamda) 4) Temp reference (Tr) 5) Activation energy ดังตารางที่ 5



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของพอลิเมอร์กับอัตราการฉีด ณ อุณหภูมิต่างๆ

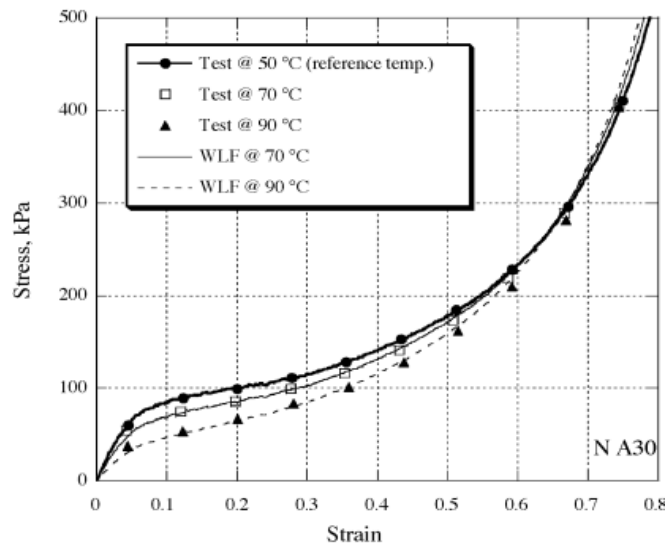
จะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่ออุณหภูมิไม่เท่ากัน ลักษณะค่าความหนืดจะแตกต่างกันและค่าแรงเฉือนจะเข้าใกล้กันเมื่อเวลาผ่านไปทำให้แรงเฉือนแสดงค่า Time constant มีผลต่อการสร้างสภาวะพลาสติกเช่นกัน (Leech et al., 1993; Davies et al., 2000)

ตารางที่ 8 ตัวแปร Cross Model

R ²	Zero shear viscosity	n	lamda	Tr	Activation energy	Type
0.951	6.15X10 ⁴	0.56	1.17	214.99	2514.95	HDPE
0.981	1.42X10 ⁵	0.46	2.06X10 ⁷	531.81	7356.93	PP
0.993	1.56X10 ⁷	0.43	0.71	331.31	3978.23	PS

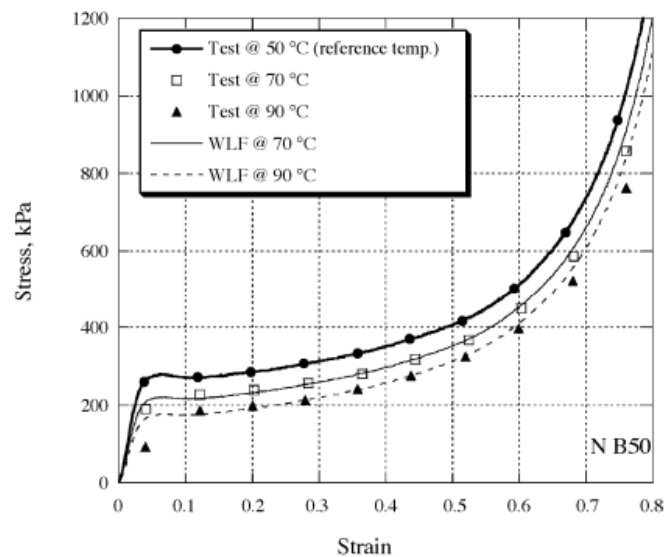
จากตารางที่ 8 กล่าวได้ว่าการทดสอบสอดคล้องกับสมการ Cross model ซึ่งแสดงให้เห็นด้วยค่าสัมประสิทธิ์การประมาณ (Coefficient of determination หรือ R²) ที่มีค่าสูง 0.90 ทุกตัวอย่าง พอลิเมอร์ หลอมเหลวทั้งหมดมีลักษณะการไหลแบบ non-newtonian เนื่องจากค่า Power law index ไม่เท่ากับ 1 และอยู่ในช่วง 0.4-0.7

ผลของการทดสอบ High temperature test set up พลาสติกชนิดอัลลอย พฤติกรรมที่เกิดขึ้นมาจากสมการข้างต้น แต่ผลของไบนลอนแสดงให้เห็นดังรูปที่ 16 ผลของการทดสอบนี้เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบจริง Thermal gravimetric analyzer ผลของการทดสอบแสดงดังรูป 15



รูปที่ 15 Strain-stress ที่เกิดขึ้นจากการทดลองอัลลอย High temperature test set up

จากรูปที่ 15 อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบจริงที่ 50, 70 และ 90 องศาเซลเซียส และใช้ความดันในการเหือนพลาสติกอัลลอย ตั้งแต่ 0-500 กิโลปาสกาล พบว่าค่า strain – stress จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณการฉีดจนถึงความดันที่ 345 กิโลปาสกาล ลักษณะของค่า strain – stress ทุกๆอุณหภูมิมีค่าเท่ากันแสดงให้เห็นว่าพลาสติกชนิดอัลลอยจะเกิดจุดอ่อนตัวลงในความดันค่าหนึ่งเสมอ



รูปที่ 16 Strain – stress ที่เกิดขึ้นจากการทดลองไนลอน High temperature test set up

จากรูปที่ 16 อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบจริงที่ 50, 70 และ 90 องศาเซลเซียส และใช้ความดันในการฉีดพลาสติกไนลอน ตั้งแต่ 0-1,200 กิโลปาสกาล พบว่าค่า strain – stress ทุกๆ ช่วงอุณหภูมิและทุกๆ ช่วงของความดันในการเหือนมีลักษณะของค่า strain – stress ทุกๆ ช่วงอุณหภูมิมีค่าเท่ากัน แสดงให้เห็นว่าพลาสติกชนิดไนลอนไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคงที่

การอภิปรายผล

ในการทดสอบงานวิจัยนี้เพื่อให้ได้ค่าที่บ่งบอกถึงพฤติกรรมที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างพลาสติกชนิดพอลิเมอร์ในหลายรูปแบบ เพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงมากกว่าวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และการอ้าง ถึงสมการของผู้วิจัยจากการสืบค้นบทความที่เกี่ยวข้อง เนื่องจากสมการแต่ละบทความนั้นมีข้อแตกต่างกันในการเลือกใช้กับงาน การพิจารณาพฤติกรรมในส่วนของการทดสอบหาพฤติกรรมที่เปลี่ยนไปนั้น เครื่องมือหรือลักษณะการทดสอบควรมีค่าความคาดเคลื่อนอยู่ที่ ± 0.2 เท่านั้น เพื่อให้สภาวะการไหลของวัสดุคงตัวที่สุด และเพื่อความเสถียรของผลการทดลองนี้ควรศึกษาขณะมีความร้อนผ่านพลาสติกเพื่อหาคุณลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนช่วงใดๆ รูปแบบใดๆ แสดงให้เห็นถึงจุดที่พลาสติกเกิดความแตกต่าง เกิดจุดร้าว หรือการคืนรูป

บทสรุป

เมื่อพิจารณาในส่วนการไหลแบบ Newtonian หรือการกำหนดค่าความหนืดคงที่ไม่เหมาะสมกับการจำลองการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวในแม่พิมพ์ เพราะทำให้เกิดค่าความผิดพลาดสูงถึง 38 เปอร์เซ็นต์ การจำลองพฤติกรรมนี้สามารถออกแบบแม่พิมพ์ได้ สำหรับการไหลของพอลิเมอร์ PS มีความผิดพลาดไม่น้อยกว่า 12 เปอร์เซ็นต์ HDPE และ PP จะมีความผิดพลาดมากถึง 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอาจเกิดการตั้งสมมุติฐานด้านการถ่ายเทความร้อนที่กำหนดให้ผนังมีอุณหภูมิที่คงที่และต่ำกว่าการลดอุณหภูมิในแม่พิมพ์

พฤติกรรมจากกระบวนการ Thermal gravimetric analyzer บ่งบอกถึงการคืนรูปตั้งแต่ช่วง 350 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป และเมื่อมีลมมากระทำจะเกิดการคงรูปที่ 109.63 องศาเซลเซียส ต่อ 1.1 บาร์ ทำให้เกิดอเดียแบติกทันที ค่า Stress และ Strain จะมีค่าเข้าใกล้กันทั้งที่สมการนำไปใช้ทดสอบแตกต่างกันความเบี่ยงเบนจะอยู่ที่ 4 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อหาผลกระทบ Stress เท่ากับ 7 จะมีลักษณะการอยู่ตัวของพลาสติกก็จะคงที่เมื่อใช้เวลาในการให้ความร้อนช่วง 100 วินาทีเป็นต้นไป แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมการตอบสนองต่อการกระทำเชิงกล แล้วการเปลี่ยนแปลงนั้นจะย้อนกลับเข้าสู่สภาวะตั้งต้นได้เสมอ

เอกสารอ้างอิง

- Chailleux E. and Davies P. (2003). Modelling the non-linear viscoelastic and viscoplastic behaviour of aramid fibre yarns. *Mechanics of Time Dependent materials*. 7: 291-303.
- Davies P., Huard G., Grosjean F and Francois M. (2000). Creep and relaxation of polyester mooring Lines. In *Proceedings of the offshore technology conference*. Paper OTC. 12176. 1-12.
- Ghoreishi S.R., Messenger T., Cartraud P. and Davies P. (2004). Assessment of cable models for synthetic synthetic mooring lines. In *Proceedings ISOPE conference*. Toulon. JSC-301.
- Han Y.C., Lee S., Ahn B.H., Oh S.W. and Kang Y.S. (2007). Preparation of anti-fogging low density polyethylene film by using irradiation. *Sensors and Actuator B: Chemical*. 126(1): 266-270.

- Heuvel H.M., Lucas L.J., van den Heuvel C.J.M. and Weijer A.P. (1992). Experimental relations between physical structure and mechanical properties of a huge number of drawn poly (ethylene terephthalate) yarns. *Journal of Applied Polymer Science*. 45: 1649-1660.
- Hoff A. and Jacobsson S. (1981). Thermo-oxidative degradation of low density polyethylene close to industrial processing conditions. *Journal of Applied Polymer Science*. 26(10): 3409-3423.
- Lai J. and Bakker A. (1995). An integral constitutive equation for nonlinear plasto-viscoelastic behaviour of high-density polyethylene. *Polymer Engineering and Science*. 35(17): 1339-1347.
- Leech C.M., Hearle J.W.S., Overington M.S. and Banfield S.J. (1993). Modelling tension and torque properties of fibre rooves and splices. In *Proceeding ISOPE conference*. Singapore. 370- 376.
- Schapery R.A. (1997). Non-linear viscoelastic and viscoplastic constitutive equations based on thermodynamics. *Mechanics of time dependent materials*. 1:209-240.
- Vasile C. and Pascu M. (2005). *Practical Guide to Polyethylene*. Rapra Technology Limited. Shawbury. UK