

# การศึกษาพฤติกรรมวัสดุโพลีเมอร์แบบเซลล์ปิดภายใต้แรงกด



นางสาวจินตภา กลิ่นสุข

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2562

**BEHAVIOR STUDY OF CLOSED – CELL POLYMER  
FOAM UNDER COMPRESSIVE LOAD**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Manufacturing Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2019**

## การศึกษาพฤติกรรมวัสดุโพลิเมอร์แบบเซลล์ปิดภายใต้แรงกด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร.จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร)

ประธานกรรมการ




(อ. ดร.ประเสริฐ เอ่งฉ้วน)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.วรรณนัช บุ่งสุต)

กรรมการ



(อ. ดร.สมศักดิ์ ศิวคำรังพงศ์)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนัตร์ร ชานีประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

จินตภา กลิ่นสุข : การศึกษาพฤติกรรมวัสดุโฟมพอลิเมอร์แบบเซลล์ปิดภายใต้แรงกด  
(BEHAVIOR STUDY OF CLOSED-CELL POLYMER FOAM UNDER  
COMPRESSIVE LOAD) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.ประเสริฐ เอ่งฉ้วน, 79 หน้า.

ในปัจจุบันวัสดุพอลิเมอร์โฟมแบบเซลล์ปิดถูกนำมาใช้ในงานทางโครงสร้างมากขึ้น เนื่องจากมีอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง พอลิโวนิลคลอไรด์โฟมเป็นหนึ่งในวัสดุดังกล่าว โฟมพอลิเมอร์เป็นวัสดุประเภทวิสโคอิลาสติกซึ่งสามารถแสดงพฤติกรรมได้หลายสถานะ ขึ้นอยู่กับปัจจัยได้แก่ อุณหภูมิ ขนาดของภาระ และเวลา นอกจากนี้วัสดุยังสามารถแสดงพฤติกรรมของการคืนรูป การคลายความเค้น และการคืบได้ ซึ่งในการนำวัสดุไปใช้ในลักษณะงานการขนส่ง เช่น ตู้คอนเทนเนอร์ หรือ โครงสร้างของพื้นเรือ รวมถึงความหนาแน่นของโฟมที่ส่งผลต่อการรับภาระ การได้รับแรงกดเป็นภาระที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุโฟมได้มากเมื่อเทียบกับภาระรูปแบบอื่น ซึ่งหากการเปลี่ยนแปลงไม่สามารถคืนรูปได้จะส่งต่อการใช้งานและความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น งานวิจัยจึงศึกษาพฤติกรรมแบบวิสโคอิลาสติกประกอบด้วย การคืนรูป การคลายความเค้น และการคืบ ที่ความหนาแน่นต่างกันในช่วง  $60-130 \text{ kg/m}^3$  (H60-H130) ในรูปแบบภาระกด และอัตราภาระที่ต่างกันในช่วง  $0.1-500 \text{ mm/min}$  พบว่าค่าอัตราภาระส่งผลต่อพฤติกรรมทั้ง 3 รูปแบบ และเนื่องจากการทดสอบภายใต้รูปแบบของอัตราภาระส่วนมากมีการทดสอบเป็นเวลานาน จึงได้ทำการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาช่วยในการหาความสัมพันธ์หรือทำนายพฤติกรรมของวัสดุ โดยใช้แบบจำลองทั่วไปของแมกซ์เวลล์ (Generalized Maxwell Model) หาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องด้วยโปรแกรม Abaqus ในการทำนายพฤติกรรมการคลายความเค้นของวัสดุในรูปแบบของค่าความเค้นปกติ พบว่ามีค่า R-square ระหว่างการทดสอบและการทำนายอยู่ในช่วง 0.85 เป็นต้นไป ซึ่งสามารถใช้ทำนายค่าความเค้นปกติที่อัตราภาระอื่นได้ นอกจากนี้ยังมีการใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าองค์ประกอบความเค้นและค่าคงที่ในรูปแบบสมการอัตราการคืบที่ค่าความหนาแน่นต่างกัน พบว่ามีแนวโน้มที่จะใช้ความสัมพันธ์ดังกล่าวในการทำนายพฤติกรรมการคืบที่เกี่ยวข้องกับความหนาแน่นได้ในอนาคต

สาขาวิชา วิศวกรรมการผลิต  
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนักศึกษา จินตภา กลิ่นสุข  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ประเสริฐ เอ่งฉ้วน

JINTAPHA KLINSUK : BEHAVIOR STUDY OF CLOSED-CELL  
POLYMER FOAM UNDER COMPRESSIVE LOAD. THESIS ADVISOR :  
PRASERT AUNGCHUAN,. Ph.D., 79 PP.

#### CLOSED – CELL/ POLYMERS FOAM/ BAHAVIOR/ PREDICTION.

Closed-cell foam polymers are increasingly used in structural work due to their high strength-to-weight ratio. One of the materials is Polyvinyl chloride (PVC) foam. Polymers are viscoelastic materials that can behave in many states depends on many factors such as temperature, load and time. In addition, the material can show the behavior of recovery, stress relaxation and creep. The use of materials for transportation purposes such as containers or the structure of the ship's deck will cause the material to be affected by loading and in many types of load pressure load can deformation of the foam material more than other load. If the deformation cannot be recovered materials will damage and cannot use. The research therefore studied three viscoelastic behaviors (recover, stress relaxation and creep) on PVC foam materials at density range 60 -130 kg/m<sup>3</sup> (H60-H130) in pressure load with loading ratio 0.1 – 500 mm/min. The results show that the pressure loading ratio has been effected on 3 viscoelastic behaviors. In addition, The experiment based on pressure loading it takes a long time to test. Generalized Maxwell Model has been applied to find relationships or predict behavior of materials with Abaqus program. In the prediction of stress behavior found that the R – square value 0.85 between testing and Generalized Maxwell Model. Moreover, There is also a relationship between stress component and constant values in the form of creep

rate equations at different density values. It is found that there is a tendency to use these relationships to predict the creep behavior related to density in the future.



School of Manufacturing Engineering

Academic Year 2019

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ปิยมน พัวพงศกร และ อาจารย์ ดร.ประเสริฐ เอ่งฉ้วน ท่านอาจารย์ที่ปรึกษาทั้งสองที่ให้ความช่วยเหลือ ตั้งแต่เริ่มต้นในการแนะนำหัวข้อ การช่วยเหลือในการหาอุปกรณ์ทดสอบ และคำชี้แนะแนวทางเมื่อเกิดปัญหาตลอดการทำวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งเป็นหลักในการวิจัยครั้งนี้ รวมถึงอาจารย์ในสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตทุกท่านที่คอยให้คำแนะนำและกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ และคุณทัศนีย์ ทิพย์สาคร เลขาสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ที่คอยดูแลความเรียบร้อยของเอกสารในการทำวิจัยตลอดมา

งานวิจัยนี้เกิดขึ้นไม่ได้หากไม่ได้รับโอกาสจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในการมอบทุน “กิตติบัณฑิต” ให้กับข้าพเจ้า รวมถึงสถานที่ห้องปฏิบัติการ ขอบขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือและปฏิบัติการ ห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมการผลิต สาขาวิชาเครื่องกล และสาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ ในการทำวิจัยตลอดการศึกษาในระดับมหาบัณฑิตนี้

ขอบพระคุณครูอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ตั้งแต่ข้าพเจ้าเข้าสู่ภาคการศึกษาของชีวิต และผู้เขียนวรรณกรรมในบทอ้างอิงของข้าพเจ้าทุกท่าน หากไม่มีข้อมูลเหล่านี้ วิทยานิพนธ์นี้จะไม่มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์บรรณสารและสื่อการศึกษา แหล่งค้นคว้าหาวิชาความรู้และข้อมูลสนับสนุนในงานวิจัย และช่วยเหลือในติดต่อขอเข้าถึงทรัพยากรด้วยระบบเครือข่ายห้องสมุดอื่นหากข้อมูลที่ต้องการไม่มีอยู่ในหน่วยงานภายใน ขอบขอบคุณครอบครัว พี่ เพื่อน และน้อง ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมการผลิตทุกท่านที่คอยให้คำแนะนำ เป็นกำลังใจ รับทราบปัญหาและช่วยเหลือมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเกิดขึ้นไม่ได้เลยหากข้าพเจ้าท้อแท้และล้มเลิกความตั้งใจในการทำวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่าหากท่านผู้ใดที่ได้ค้นคว้าความรู้หรือสิ่งที่ท่านคาดว่าจะเป็นประโยชน์ต่อตัวท่านในงานวิจัยฉบับนี้ ท่านจะพบเจอในสิ่งที่ท่านต้องการและวิทยานิพนธ์นี้จะถือว่าบรรลุความตั้งใจในการทำงานของข้าพเจ้าอย่างเต็มภาคภูมิ

จินตภา กลิ่นสุขา

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ</b> .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	2
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	3
1.5 สถานที่ทำงานวิจัย .....	3
1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
<b>2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	5
2.1 พอลิไวนิลคลอไรด์โฟม .....	5
2.2 พฤติกรรมภายใต้แรงกดของวัสดุโฟม .....	7
2.3 พฤติกรรมวิสโคอิลาสติก.....	10
2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัสดุวิสโคอิลาสติก .....	14
2.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ .....	19
2.6 การปริมาตรสัณฐานกรรมที่เกี่ยวข้อง .....	27



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

<b>3</b>	<b>วิธีการดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>32</b>
3.1	พอลิไวนิลคลอไรด์โฟม .....	33
3.2	การทดสอบพฤติกรรมภายใต้แรงกด .....	34
3.3	การทดสอบการคืนรูปภายใต้แรงกด.....	35
3.4	การทดสอบการคลายความเค้นภายใต้แรงกด .....	37
3.5	การทดสอบการคืบภายใต้แรงกด.....	39
3.6	การทำนายพฤติกรรมของวัสดุ.....	42
<b>4</b>	<b>พฤติกรรมภายใต้ภาระแบบกึ่งสถิตยศาสตร์ .....</b>	<b>45</b>
4.1	ผลการทดสอบพฤติกรรมภายใต้แรงกด .....	45
4.2	ผลการทดสอบพฤติกรรมการคืนรูปภายใต้แรงกด .....	49
4.3	ผลการทดสอบพฤติกรรมการคลายความเค้นภายใต้แรงกด .....	52
<b>5</b>	<b>พฤติกรรมการคืบและการทำนายพฤติกรรมของวัสดุ.....</b>	<b>57</b>
5.1	ผลการทดสอบพฤติกรรมการคืบภายใต้แรงกด .....	57
5.2	การทำนายพฤติกรรมของวัสดุ.....	59
<b>6</b>	<b>สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>69</b>
6.1	สรุปผลการทดลอง .....	69
6.2	ข้อเสนอแนะ .....	70
	รายการอ้างอิง.....	71
	<b>ภาคผนวก</b>	
	ภาคผนวก ก การเปรียบเทียบค่าทางสถิติด้วยวิธี Paried – T Test.....	74
	ภาคผนวก ข บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา .....	77
	ประวัติผู้เขียน.....	79

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ค่าคุณสมบัติของวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์..... 5
2.2	ค่าและสัญลักษณ์ทางสถิติ ..... 20
2.3	ตัวอย่างการเขียนตั้งสมมติฐาน ..... 21
2.4	การพิจารณาเลือกใช้สถิติทดสอบ ..... 23
3.1	เงื่อนไขในการทดสอบการคลายความเค้น..... 37
3.2	ค่าความเค้นที่ให้ในการทดสอบ ..... 41
4.1	คุณสมบัติภายใต้แรงกดที่ความหนาแน่นต่างกัน ..... 46
4.2	คุณสมบัติภายใต้แรงกดที่อัตราการระ (loading rate) ต่างกัน ..... 48
5.1	ค่าพารามิเตอร์ของอนุกรม โพรนี้จากการทดสอบจริง..... 60
5.2	ค่าการตัดสินใจ (P – Value) จากการเปรียบเทียบด้วย Paried T Test..... 64
5.3	อัตราการคืบที่ระดับความเค้นต่างกันของ H60 และ H130 ..... 65

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	พันธะเคมีของหมู่ไวนิลคลอไรด์ ..... 5
2.2	ส่วนประกอบภายในเซลล์โฟม ..... 6
2.3	(ซ้าย) เซลล์แบบปิด (ขวา) เซลล์แบบเปิด ..... 7
2.4	ตัวอย่างกราฟการตอบสนองของความเค้นและความเครียดของ โฟม ..... 8
2.5	พฤติกรรมก่อนและหลังรับภาระภายใต้ภาระกดในช่วงอีลาสติก (Elastic region) ..... 8
2.6	พฤติกรรมภายใต้ภาระกดในช่วงความเค้นคงที่ (plateau region) ..... 9
2.7	พฤติกรรมภายใต้ภาระกดในช่วงการอัดตัว (Densification) ..... 10
2.8	การตอบสนองของความเค้นและความเครียดของการคืนรูป ..... 11
2.9	การตอบสนองความเค้นและความเครียดของการคลายความเค้น ..... 11
2.10	การตอบสนองของความเค้นและความเครียดของการคืบ ..... 12
2.11	แบบจำลองพฤติกรรมวิสโคอีลาสติกของแมกซ์เวลล์ ..... 14
2.12	แบบจำลองพฤติกรรมวิสโคอีลาสติกของเคลวิน โวก ..... 15
2.13	แบบจำลองพฤติกรรมวิสโคอีลาสติกแบบสี่องค์ประกอบ (แบบจำลองเบอร์เกอร์) ..... 16
2.14	แบบจำลองพฤติกรรมวิสโคอีลาสติกของซีเนอร์ ..... 17
2.15	แบบจำลองทั่วไปของแมกซ์เวลล์ ..... 18
2.16	พื้นที่วิกฤตของการทดสอบแบบ Z – distribution (สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต) ..... 26
2.17	พื้นที่วิกฤตของการทดสอบแบบ T – distribution (สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต) ..... 27
3.1	แผนผังการดำเนินการงานวิจัย ..... 32
3.2	วัสดุ (ซ้าย) PVC Foam H130 (ขวา) H100 และ H60 ..... 33
3.3	(ซ้าย) ชิ้นทดสอบที่ตัดแล้ว (ขวา) ขนาดที่ตัด ..... 34
3.4	การทดสอบภายใต้แรงกดด้วย UTM 5569 ..... 35
3.5	ขั้นตอนการทดสอบการคืนรูปของวัสดุ ..... 36
3.6	การทดสอบพฤติกรรมของการคลายความเค้น ..... 38
3.7	การออกแบบอุปกรณ์การทดสอบ ..... 40

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 การติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบการคืบ .....	41
3.9 การเปรียบเทียบเครื่องมือทดสอบ .....	42
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดภายใต้แรงกด .....	46
4.2 การตอบสนองต่อความเค้นและความเครียดที่ความหนาแน่นต่างกัน .....	47
4.3 การตอบสนองต่อความเค้นและความเครียดที่อัตราการต่างกัน .....	48
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบรูปที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาในช่วงอีลาสติก .....	50
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบรูปที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่ 20% ของความเครียด..	51
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบรูปที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่ 45% ของความเครียด..	51
4.7 ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นปกติ (normalized stress) ที่อัตราการ 1 mm/min .....	53
4.8 ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นปกติ (normalized stress) ที่อัตราการ 10 mm/min .....	53
4.9 ค่าความเค้นปกติ (normalized stress) และเวลาที่อัตราการต่างกันช่วงอีลาสติก .....	54
4.10 ค่าความเค้นปกติ (normalized stress) และเวลาที่อัตราการต่างกันช่วงพลาสติก .....	55
4.11 ค่าความเค้นปกติ (normalized stress) และเวลาที่อัตราการต่างกันช่วงบีบอัด.....	55
5.1 ผลการทดสอบการคืบที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาของ H60 .....	58
5.2 ผลการทดสอบการคืบที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาของ H130 .....	58
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบกับค่าคงที่ของโพร์นี ที่ $i=1$ .....	60
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบกับค่าคงที่เวลาของโพร์นี ที่ $i=1$ .....	61
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบกับค่าคงที่ของโพร์นี ที่ $i=2$ .....	61
5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบกับค่าคงที่เวลาของโพร์นี ที่ $i=2$ .....	62
5.7 การเปรียบเทียบค่าการคลายความเค้นจากการทำนายและการทดสอบที่ 1 mm/min.....	62
5.8 การเปรียบเทียบค่าการคลายความเค้นจากการทำนายและการทดสอบที่ 100 mm/min.....	63
5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบและค่าความเค้นในการทดสอบที่ H60.....	65
5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบและค่าความเค้นในการทดสอบที่ H130.....	66
5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบและค่าความเค้นที่ทดสอบในรูปแบบ log-log .....	66
5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่(Constant A) และความหนาแน่นสัมพัทธ์ ( $p^*$ ) .....	67
5.13 ค่าองค์ประกอบความเค้น (Stress Component) และความหนาแน่นสัมพัทธ์ ( $p^*$ ) .....	67

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หลายปีที่ผ่านมา ได้มีการนำวัสดุหลายประเภทมาผสมผสานใช้ในงานทางด้านโครงสร้างหรืองานทางด้านวิศวกรรม โดยใช้ปัจจัยในการพิจารณามากกว่าการเล็งผลเฉพาะคุณสมบัติทางกลดั้งเดิม โครงสร้างทางยุคแรก เนื่องจากสถานะที่เปลี่ยนแปลงไปจึงได้เริ่มมีการพิจารณาในด้านที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมและพลังงานมากขึ้น การออกแบบส่วนใหญ่เน้นการเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและทำให้สิ้นเปลืองพลังงานน้อยที่สุด โดยวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการออกแบบทางโครงสร้างเพื่อลดการใช้พลังงานของระบบนั้นก็คือการ ลดน้ำหนักของชิ้นส่วน หรือส่วนประกอบในโครงสร้าง เพื่อให้มวลรวมของระบบลดลงด้วย ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการพัฒนาวัสดุในทางโครงสร้างให้มีน้ำหนักเบา และมีการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย

วัสดุโฟมพอลิเมอร์แบบเซลล์ปิด เป็นหนึ่งในวัสดุที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใช้งานในทางโครงสร้างทางวิศวกรรม ที่ต้องรับภาระมาก เนื่องจากมีน้ำหนักเบาซึ่งเป็นผลจากการมีลักษณะโครงสร้างภายในเซลล์เป็นแบบรูปทรง ทำให้มีอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง ถูกนำมาใช้เป็นส่วนแกน (Core) ของโครงสร้างแบบแซนด์วิช (Sandwich structure) เช่น วัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์โฟมหรือพีวีซีโฟมพบได้ทั่วไปในโครงสร้างเรือ ใบพัดกังหันขนาดใหญ่ โครงสร้างปีกเครื่องบิน และตู้ขนส่งสินค้า เป็นต้น เนื่องจากวัสดุพีวีซีโฟมเป็นวัสดุโฟมที่มีคุณสมบัติเด่นในด้านการรับภาระทั้งแบบสถิตยศาสตร์และพลศาสตร์ รวมถึงมีคุณสมบัติการต้านทานการดูดซับน้ำได้ดี (Netcompostie, 2019)

เมื่อถูกนำมาใช้งานในด้านโครงสร้างทางวิศวกรรม จึงเป็นไปได้ยากที่จะหลีกเลี่ยงภาระทางกลที่อาจเกิดขึ้นกับวัสดุ อาทิ แรงกด แรงดึง แรงบิด ทำให้วัสดุเกิดความเสียหายขึ้น ซึ่งเกิดจากภาระใดและความเสียหายใดเป็นหลัก ขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้ การนำวัสดุโฟมพอลิเมอร์ไปใช้งานในทางโครงสร้างบางประเภท เช่น พื้นเรือ หรือ ตู้ขนส่งสินค้า จะทำให้วัสดุได้รับภาระกด (Compressive) เป็นเวลานาน ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะทำให้เกิดความเสียหายที่ภาระไม่สูงมากได้ที่เรียกว่า การคืบ (Creep) และในการขนส่งยังสามารถพบกับขนาดภาระที่แตกต่างกัน ถือเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการคืบด้วย การออกแบบโครงสร้างที่มีการใช้งานลักษณะนี้ จึงจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่ต้องทราบข้อมูลด้านพฤติกรรมการคืบภายใต้แรงกดของวัสดุ

แต่เนื่องจากการคืบเป็นพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลา หากทำการทดสอบจริงจะใช้เวลานานในแต่ละครั้ง และการทำการทดสอบหลายครั้งที่ปัจจัยหลายระดับกัน จะทำให้การออกแบบและการควบคุมปัจจัยในการทดสอบได้ยาก โดยมีนักวิจัยได้ทำการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาช่วยในการทำนายพฤติกรรมการคืบที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งสามารถลดเวลาการทดสอบ และปริมาณการทดสอบจริงได้ (Briody และคณะ, 2012 ; Amiri และคณะ, 2015)

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการคืบของวัสดุโพลีเมอร์พีวีซีภายใต้สภาวะแรงกดที่ขนาดต่างๆกัน ร่วมกับการสร้างและทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการทำนายพฤติกรรมการคืบ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้คาดว่าจะสามารถนำไปใช้ในการออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมที่มีวัสดุโพลีเมอร์พีวีซีอย่างเหมาะสม หลีกเลี่ยงความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการคืบที่อาจส่งผลกระทบต่อความเสียหายของโครงสร้างโดยรวมต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมแบบวิสโคอิลาสติกของวัสดุพอลิเมอร์โพลีเอทิลีนแบบเซลล์ปิด
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของความหนาแน่น ระดับความเครียด และอัตราภาระที่ส่งผลต่อพฤติกรรมแบบวิสโคอิลาสติกของวัสดุพอลิเมอร์โพลีเอทิลีนแบบเซลล์ปิด
- 1.2.3 เพื่อทำนายพฤติกรรมการคืบของวัสดุพอลิเมอร์โพลีเอทิลีนแบบเซลล์ปิดที่สัมพันธ์กับความหนาแน่นของโพลี

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาพฤติกรรมภายใต้ภาระกดเพียงอย่างเดียว
- 1.3.2 ศึกษาวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์โพลีเอทิลีนแบบเซลล์ปิด ความหนาแน่นในช่วง 60-130 kg/m<sup>3</sup>
- 1.3.3 วัสดุที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเดียวกันทุกการทดสอบ คือ 20 ลูกบาศก์มิลลิเมตร
- 1.3.4 การศึกษาพฤติกรรมทั่วไปภายใต้ภาระกดทำการศึกษาผลกระทบของความหนาแน่นและอัตราภาระ
- 1.3.5 การศึกษาพฤติกรรมการคืบรูปภายใต้ภาระกดทำการศึกษาที่ผลกระทบของความเครียดและอัตราภาระ
- 1.3.6 การศึกษาพฤติกรรมการคลายความเค้นภายใต้ภาระกด ทำการศึกษาผลกระทบของความหนาแน่น ระดับของความเครียด และอัตราภาระ

1.3.7 ในการศึกษาพฤติกรรมการคืบควบคุมอุณหภูมิในช่วงระหว่าง 28 – 30 องศาเซลเซียส ที่ระดับความเค้น 65 – 80 เปอร์เซ็นต์ของความเค้นสูงสุดในช่วงอีลาสติก

1.3.8 ในเงื่อนไขของการศึกษาผลกระทบของอัตราภาระ อยู่ระหว่าง 0.1 – 500 mm/min

1.3.9 การทำนายพฤติกรรมการคืบจะสัมพันธ์กับความหนาแน่นของโพลี

#### 1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาข้อมูลงานวิจัย ปรีทรศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 วางแผนการดำเนินงานและทดสอบ

1.4.3 ออกแบบอุปกรณ์ในการทดสอบพฤติกรรมการคืบ

1.4.4 การเตรียมชิ้นทดสอบ

1.4.5 การทดสอบพฤติกรรมของวัสดุ

1.4.6 การทำนายพฤติกรรมของวัสดุ

1.4.7 วิเคราะห์ผลการทดสอบและการดำเนินงานวิจัย

#### 1.5 สถานที่ทำงานวิจัย

อาคารศูนย์เครื่องมือและวิทยาศาสตร์ 1 4 6 และ 10 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

#### 1.6 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1.6.1 Displacement Transducers ของ Tokyo Sokki Kenkyujo รุ่น FDA – 10A และ FDA – 10A เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดของระยะในการทดสอบการคืบ

1.6.2 Handheld Data Logger ของ Tokyo Sokki Kenkyujo รุ่น TC – 32K Type S – 2770 เชื่อมต่อกับ displacement Transducers เพื่อบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของระยะในการทดสอบการคืบ

1.6.3 ตู้บ่มควบคุมอุณหภูมิของ Memmert รุ่น N110 ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิระหว่างทดสอบพฤติกรรมการคืบ

1.6.4 เครื่องเลื่อยสายพาน และเครื่องกัดคอนกรีตประสังค์เพลาดั้ง ใช้ในการเตรียมชิ้นทดสอบ

1.6.5 Universal Testing Machine รุ่น U 5569 ใช้ในการทดสอบการศึกษาพฤติกรรมทั่วไปภายใต้แรงกด พฤติกรรมการคืบรูป และพฤติกรรมการคลายความเค้น

1.6.6 ได้อัลเกจ ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ของ Mitutoyo ใช้ในการวัดระยะการคืนตัวในการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการคืนรูป

## 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 เข้าใจผลกระทบของความหนาแน่นของโฟมที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการคืบและพฤติกรรมวิสโคอีลาสติกภายใต้ภาระกด

1.7.2 เข้าใจผลกระทบของระดับความเครียดของโฟมที่ส่งผลต่อพฤติกรรมแบบวิสโคอีลาสติกภายใต้ภาระกดของวัสดุ

1.7.3 เข้าใจผลกระทบของอัตราภาระของโฟมที่ส่งผลต่อพฤติกรรมแบบวิสโคอีลาสติกภายใต้ภาระกดของวัสดุ

1.7.4 สามารถทำนายพฤติกรรมการคืบของโฟมพีวีซีที่นอกเหนือจากการทดสอบได้ ซึ่งจะสามารถนำไปเป็นข้อมูลในการออกแบบการใช้งานสำหรับโครงสร้างภายใต้ภาระกด





## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 พอลิไวนิลคลอไรด์โฟม

พอลิไวนิลคลอไรด์เป็นวัสดุพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกที่มีโครงสร้างสายโซ่แบบเส้นตรง (Change length polymer) ขึ้นรูปมาจากกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันแบบรวมตัวของมอนอเมอร์ไวนิลคลอไรด์ (Vinyl chloride monomer) ที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.1 นิยมนำมาใช้มากในทางอุตสาหกรรมด้วยคุณสมบัติเด่นทางด้านทนสภาพกรด ทนความร้อน ไม่ลามไฟ และมีความเหนียวที่สูง วัสดุพีวีซีโดยทั่วไปจะมีความแข็งและเปราะ ในลักษณะการใช้งานบางประเภทที่ต้องการความยืดหยุ่น การผลิตจึงมักจะเติมสารพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) เพื่อทำหน้าที่แทรกระหว่างโมเลกุลของสายโซ่ทำให้โครงสร้างของโมเลกุลเคลื่อนที่ได้มากขึ้น โดยสมบัติเชิงกลของพีวีซี (Solid PVC) แสดงดังตารางที่ 2.1 (Poapongsakorn และ Kanchanomai, 2011).

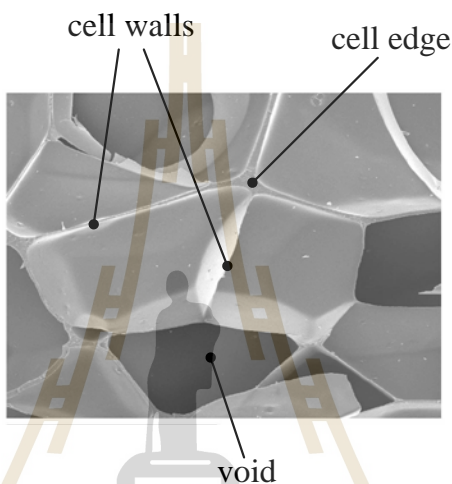


รูปที่ 2.1 พันธะเคมีของหมู่ไวนิลคลอไรด์

ตารางที่ 2.1 ค่าคุณสมบัติของวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์

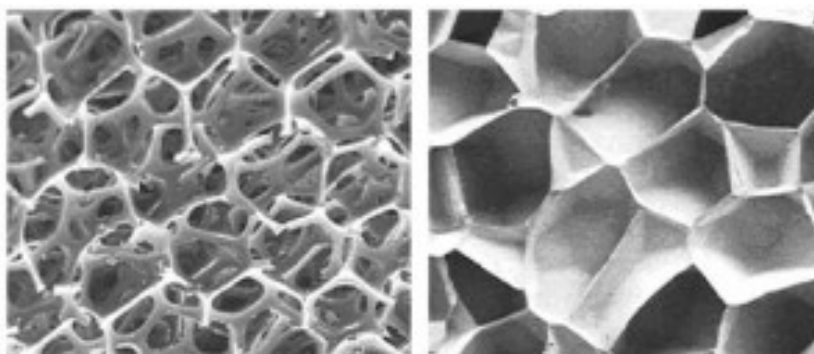
Property	
Density, (kg/m <sup>3</sup> )	1400
Modulus, $E$ (GPa)	2.4-3.0
Yield strength, $\sigma_y$ (MPa)	40-59
Ultimate tensile strength, $\sigma_u$ (MPa)	45-65
Fracture toughness, $K_{Ic}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	2.45
Glass transition temperature, $T_g$ (°C)	50-60

พอลิไวนิลคลอไรด์โฟม (Polyvinylchloride Foam : PVC Foam) โฟมพีวีซี เป็นวัสดุโฟมที่ได้จากพอลิเมอร์ตั้งต้นพีวีซี ด้วยการทำให้เกิดฟองก๊าซภายในทำให้โครงสร้างเป็นรูพรุนจากกระบวนการขยายฟองก๊าซภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศ ซึ่งสามารถทำได้สองวิธี คือ การลดความดันหรือการเพิ่มอุณหภูมิ โฟมแบ่งตามโครงสร้างเซลล์เป็นสองประเภทได้แก่ แบบเซลล์ปิด (Closed cell) และเซลล์เปิด (Open cell) ส่วนประกอบของเซลล์จะประกอบด้วย ผนังเซลล์ (Cell walls) ขอบเซลล์ (Cell edge) ช่องว่างหรือส่วนที่เป็นอากาศ (Void) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบภายในเซลล์โฟม

กระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์โฟมเริ่มต้นคล้ายกับการขึ้นรูปพอลิเมอร์ทั่วไป โดยมีสารตั้งต้นเป็นพอลิเมอร์ที่ต้องการผลิตและมีหมู่  $N=C=O$  ในโครงสร้าง หมู่ดังกล่าวเมื่อทำปฏิกิริยากับความชื้นจะเกิดเป็นสารหมูยูเรียซึ่งเมื่อสลายตัวจะทำให้ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่งผลให้เกิดฟองขึ้นในเนื้อวัสดุ ปัจจุบันจะใช้การเติมคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างกระบวนการผลิตเพื่อให้เป็นสารเกิดฟองแทน ฟองจะเกิดขึ้นเมื่อทำการใส่สารเกิดฟองและทำการรบกวนระบบด้วยการลดความดันหรือเพิ่มอุณหภูมิ หลังจากเกิดฟองจะขยายตัวอยู่ในเนื้อวัสดุเนื่องจากการแพร่ของก๊าซเพิ่มเติมเข้ามายังฟองเริ่มต้น สุดท้ายการแลกเปลี่ยนก๊าซระหว่างภายในและภายนอกของฟองจะทำให้เกิดการคงสภาพของโฟม นอกจากคาร์บอนไดออกไซด์ยังมีการใช้ก๊าซอื่นๆ เป็นสารเกิดฟอง เช่น สารคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (Chlorofluorocarbon : CFC) เพนเทน บิวเทน เป็นต้น โดยตัวแปรที่ส่งผลต่อลักษณะของโฟมในการจะเกิดเป็น โฟมแบบแข็ง (Rigid Foam) หรือ โฟมอ่อน (Flexible Foam) เป็นผลมาจากสารตั้งต้นที่ใช้ การที่ใช้พอลิเมอร์ตั้งต้นที่มีหมู่ไอโซไซยานาตสูงหรือไฮดรอกซิลจะทำให้ได้โฟมที่มีลักษณะเนื่องมาจากสามารถทำพันธะระหว่างสายโซ่โมเลกุลได้สูง

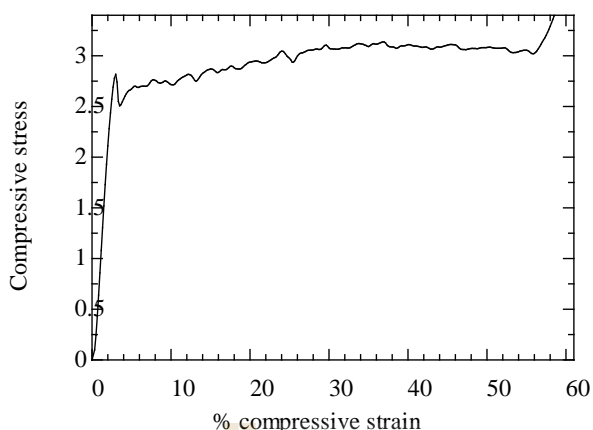


รูปที่ 2.3 (ซ้าย) เซลล์แบบเปิด (ขวา) เซลล์แบบปิด

ความแตกต่างระหว่างโครงสร้างทั้งสองแบบ เนื่องจากความหนาแน่น ขนาด จำนวน เซลล์ และลักษณะของเซลล์ เป็นปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดขึ้นสมบัติที่แตกต่าง โดยพอลิเมอร์โฟมแบบ เซลล์ปิดจะมีสมบัติทางกลด้าน ความแข็งแรง (Strength) การต้านทานความชื้นและสภาพอากาศ ที่ดีกว่าพอลิเมอร์โฟมแบบเซลล์เปิด ในทางกลับกันความหนาแน่นและราคาจะสูงกว่าแบบเซลล์เปิด จึงทำให้ทั้งสองประเภทมีการนำไปใช้งานที่แตกต่างกันตามความเหมาะสม โดยการใช้งานทาง วิศวกรรมส่วนใหญ่จะใช้พอลิโวนิลคลอไรด์โฟมแบบเซลล์ปิดในการผลิตเป็นแกน (Core) ของ โครงสร้างแบบแซนด์วิช (Sandwich Structure)

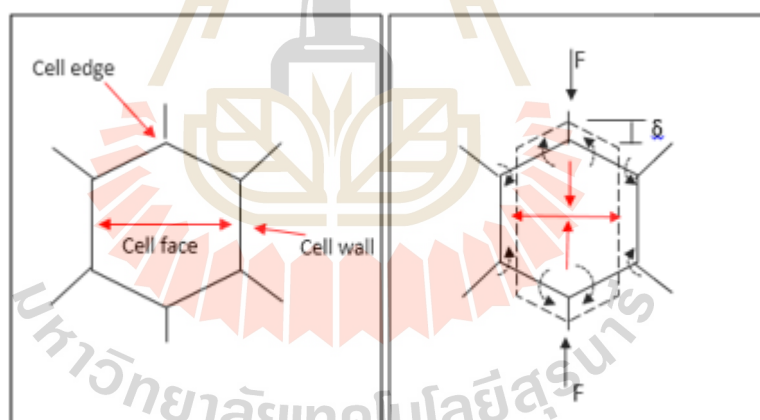
## 2.2 พฤติกรรมภายใต้แรงกดของวัสดุโฟม

ภายใต้ประเภทของภาระที่ต่างกัน วัสดุจะมีผลการตอบสนองต่อพฤติกรรมที่ต่างกันไปซึ่งโดยส่วนมากภายใต้ภาระประเภทเดียวกัน วัสดุจะมีผลการตอบสนองในทางเดียวกันแตกต่างกันที่ความเร็วในการตอบสนองต่อพฤติกรรมนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น เช่น ขนาดของภาระ อุณหภูมิ และสภาพแวดล้อม โดยงานวิจัยของ Subhash และคณะ (2009) ได้ระบุว่าที่ขนาดภาระที่เท่ากัน วัสดุโฟมภายใต้ภาระประเภทแรงกดจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดที่มากกว่าการรับภาระแรงดึง และ กราฟผลการตอบสนองของภาระประเภทเดียวกันนั้นมีลักษณะแนวโน้มไปทางเดียวกัน ซึ่งจะมี ลักษณะดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างกราฟการตอบสนองของความเค้นและความเครียดของโฟม

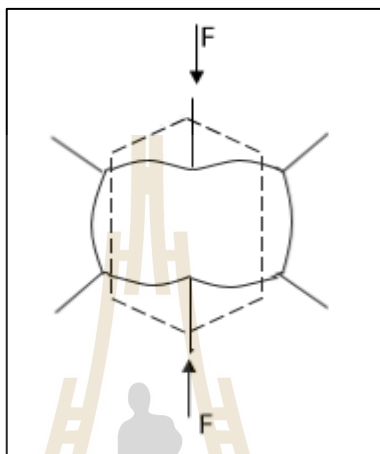
จากรูปจะสามารถแบ่งได้เป็นสามช่วง ประกอบด้วยช่วงอีลาสติก(Elastic region) ช่วงความเค้นคงที่ (Plateau region) และช่วงการอัดตัว (Densification region) ดังนี้



รูปที่ 2.5 พฤติกรรมก่อนและหลังรับภาระภายใต้การกดในช่วงอีลาสติก (Elastic region)

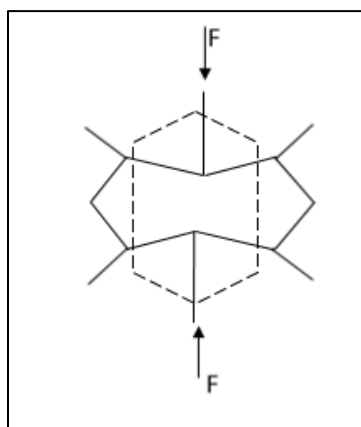
จากรูปที่ 2.5 แสดงพฤติกรรมในช่วงอีลาสติก เริ่มต้นตั้งแต่ค่าความเครียดเท่ากับศูนย์ในขณะที่เริ่มทดสอบ จนถึงช่วงกราฟมีความชันสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงค่าความเค้นสูงสุดค่าแรก เรียกว่า ค่าความเค้นสูงสุดในช่วงอีลาสติก (Peak stress in elastic region) พฤติกรรมจะเกิดการคดแบบอีลาสติกที่ขอบของเซลล์ (Elastic bending of cell edge) โดยภาพเส้นประแทนภาพจำลองของเซลล์โฟมเริ่มต้นก่อนได้รับภาระ ภายหลังจากให้ภาระกระทำในแนวแรง (F) จะเกิดการหดตัวของ

ตามทิศทางในแนวแรง ส่วนในทิศทางขวางแนวแรงเกิดการขยายของผิวหน้าเซลล์ (cell face) ตามทิศทางของลูกศร นอกจากนี้ยังเกิดการคด (Bending) ตามขอบของเซลล์ (cell edge) ซึ่งภาวะที่เกิดขึ้นไม่มากเพียงพอที่จะทำให้เกิดการโก่งงอ (Bulking) ของเซลล์ ซึ่งสามารถคำนวณหาค่ามอดูลัสของยังภายใต้แรงกดได้จากค่าความชันระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงอีลาสติกนี้



รูปที่ 2.6 พฤติกรรมภายใต้ภาวะกดในช่วงความเค้นคงที่ (plateau region)

ช่วงความเค้นคงที่ เริ่มภายหลังจากค่าความเค้นสูงสุดในช่วงอีลาสติก จากรูปที่ 2.6 เมื่อแรงกระทำต่อเนื่องมากพอ ส่งผลให้เกิดการคดที่ขอบเซลล์เข้าสู่ช่วงที่ไม่สามารถคืนรูปได้ (Plastic bending of cell edge) ร่วมกับการเกิดการโก่งตัวของผนังเซลล์ (Buckling of cell wall) โดยที่การโก่งตัวที่เกิดขึ้นช่วงแรกจะเป็นพฤติกรรมแบบอีลาสติกที่สามารถคืนรูปได้ (Elastic buckling) เมื่อภาระกระทำยังคงต่อเนื่อง การโก่งตัวของผนังเซลล์จะเข้าสู่ช่วงพลาสติก (Plastic buckling) ซึ่งจะไม่สามารถคืนรูปได้ จึงส่งผลให้ค่าความเค้นของวัสดุลดลงเนื่องจากเริ่มเกิดความเสียหายของเซลล์บางส่วน หลังจากนั้นเซลล์ที่เหลือจะเริ่มเกิดความเสียหายต่อเนื่องกันไปทำให้ในช่วงพลาสติกนี้ค่าความเค้นและเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดจะเป็นไปอย่างช้าๆ ปรากฏการณ์นั้นจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องยาวนานจนถึงค่าความเครียดประมาณ 50 - 60 เปอร์เซ็นต์ ค่าความเค้นในช่วงดังกล่าวจะเปลี่ยนแปลงไม่มาก เรียกว่า ค่าความเค้นในแนวราบ (Plateau stress)



รูปที่ 2.7 พฤติกรรมภายใต้ภาระกดในช่วงการอัดตัว (Densification)

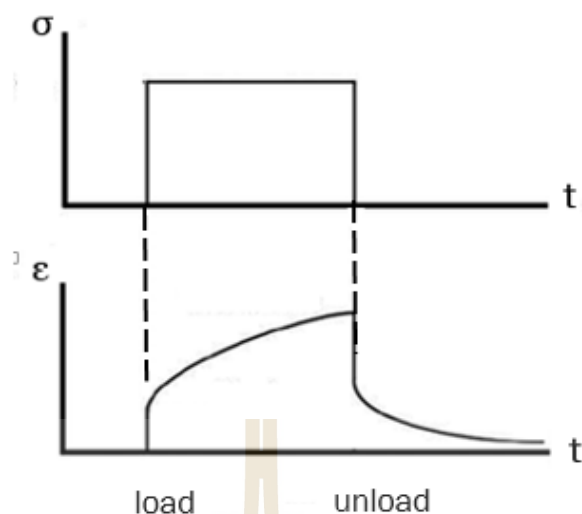
ช่วงการอัดตัว (Densification) จากรูปที่ 2.7 เกิดขึ้นเมื่อเซลล์เกิดการยุบตัว (Cell collapse) เป็นผลมาจากการโก่งงอของผนังเซลล์ที่มากจนกระทั่งช่องว่างภายในเซลล์หายไป และเนื้อวัสดุอัดตัวกันส่งผลให้ค่าความเค้นอัดสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งพฤติกรรมในช่วงนี้จะเข้าใกล้สถานะของแข็งหรือวัสดุตัน โดยส่วนมากถือว่าวัสดุไม่มีพฤติกรรมแบบโฟมอีกต่อไป (Gibson และ Ashby, 1997)

### 2.3 พฤติกรรมวิสโคอิลาสติก

วัสดุประเภทวิสโคอิลาสติก เป็นวัสดุที่สามารถแสดงพฤติกรรมได้ทั้งของแข็ง ของไหล รวมถึงถึงระหว่างของแข็งและของไหล ขึ้นกับสภาวะปัจจัยต่างๆ เช่น ขนาดของภาระหรืออุณหภูมิ โดยทั่วไปวัสดุประเภทนี้จะมีพฤติกรรมที่สำคัญสามประการ ประกอบด้วย พฤติกรรมการคืนรูป (Recovery) การคลายความเค้น (Stress Relaxation) และการคืบ (Creep)

#### 2.3.1 การคืนรูป (Recovery)

เมื่อให้ภาระกับวัสดุหลังจากการปล่อยภาระวัสดุประเภทวิสโคอิลาสติก จะเกิดการคืนตัวได้โดยที่พฤติกรรมการคืนตัวนั้นจะขึ้นกับเวลา เรียกพฤติกรรมนี้ว่า การคืนตัวหรือการคืนรูป (Recovery)

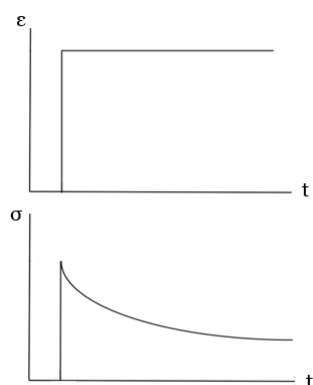


รูปที่ 2.8 การตอบสนองของความเค้นและความเครียดของการคืบรูป

จากรูปที่ 2.8 เป็นแผนภูมิผลการตอบสนองของความเค้นและความเครียดที่เป็นตามเวลา โดยการคืบรูปจะเกิดขึ้นหลังจากการปลดภาระ (Unload) เห็นได้ว่าค่าความเค้นตอบสนองกลับมาถึงค่าต่ำสุดอย่างทันทีทันใด ในขณะที่ค่าความเครียดตอบสนองจะค่อยๆ ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก หลังจากนั้นการเปลี่ยนแปลงความเครียดจะเกิดขึ้นอย่างช้าต่อเนื่องไปตามเวลา

### 2.3.2 การคลายความเค้น (Stress Relaxation)

กรณีการให้ภาระเป็นความเครียดคงตัวต่อวัสดุ วัสดุวิสโคอีลาสติกจะสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงความเค้นที่เป็นไปตามเวลาได้ โดยพฤติกรรมดังกล่าวเรียกว่า การคลายความเค้น โดยมีลักษณะการตอบสนองของความเค้นและความเครียดต่อเวลาดังรูปที่ 2.9

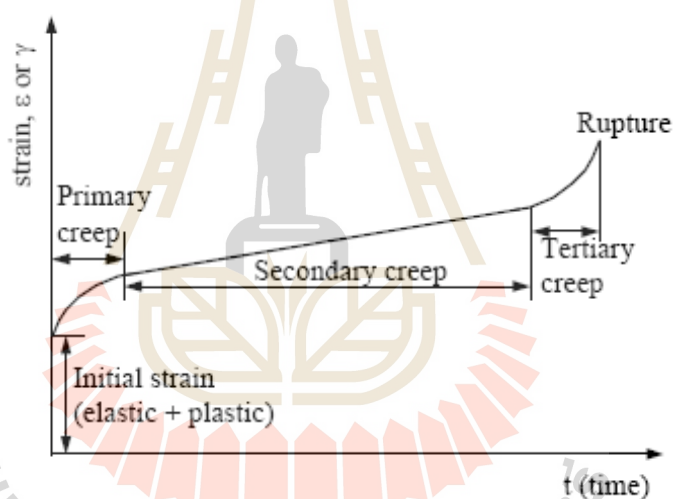


รูปที่ 2.9 การตอบสนองของความเค้นและความเครียดของการคลายความเค้น

### 2.3.3 การคืบ (Creep)

การคืบ (Creep) เป็นความเสียหายที่เกิดจากการรับภาระโหลดเป็นเวลานานภายใต้ อุณหภูมิที่เหมาะสม เป็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ ไม่สามารถสังเกตเห็นได้ในทันที และสามารถ ทำให้วัสดุเสียหายได้ภายใต้ความเค้นไม่มาก หรือไม่เกินจุด yield strength การคืบเกิดได้ทั้งภายใต้ ภาระแรงดึง แรงกด ซึ่งจะเรียกว่า Creep, Compressive Creep ตามลำดับ โดยส่วนใหญ่อุณหภูมิที่ เหมาะสมที่ทำให้เกิดการคืบได้อยู่ในช่วง 0.4 – 0.5 ของ Glass transition temperature ( $T_g$ ) ในหน่วย เคลวิน สำหรับวัสดุประเภทโลหะและพอลิเมอร์ ส่วนในวัสดุเซรามิกจะเกิดการคืบที่อุณหภูมิสูง กว่าช่วงดังกล่าว

พฤติกรรมการคืบเป็นพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับเวลา โดยแสดงดังกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด (strain) และเวลา (Time) ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การตอบสนองของความเค้นและความเครียดของการคืบ

(ที่มา: [http://metallurgy.nist.gov/solder/clech/Sn-Pb\\_creep](http://metallurgy.nist.gov/solder/clech/Sn-Pb_creep))

จากภาพจะเห็นว่า พฤติกรรมการคืบสามารถแบ่งเป็นช่วงหลักๆ ได้ 3 ช่วง คือ ช่วง เริ่มต้น (Primary Creep) ช่วงคงที่การคืบ (Secondary Creep) และช่วงสุดท้าย (Tertiary Creep)

ช่วงที่ 1 Primary Creep เป็นช่วงเริ่มต้นของการเกิดการคืบ วัสดุเมื่อได้รับโหลด คงที่ในช่วงแรกความเครียด (Strain) จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนใกล้เข้าสู่ช่วงที่ 2 การเกิดความเครียด จะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ มีข้อมูลหรือสมการที่กล่าวถึงการหาค่าความเครียดในช่วง primary คือสมการ ของ Garofalo/Dorn Equation



$$\varepsilon_p = \varepsilon_i(1 - e^{-n}) \quad (2.1)$$

ช่วงที่ 2 Secondary Creep เป็นช่วงที่มีการคืบหรือการเปลี่ยนแปลงความเครียดต่อเวลาเป็นไปอย่างช้าหรือค่อนข้างคงที่ อัตราการคืบจะต่ำ (Minimum Creep Rate) ซึ่งมีสมการที่สามารถแสดงพฤติกรรมการคืบในช่วงนี้คือ

$$\dot{\varepsilon} = A\sigma^n e^{-E/RT} \quad (2.2)$$

โดย	$\dot{\varepsilon}$	คือ	อัตราการเกิดความเครียด
	$\sigma$	คือ	ความเค้นที่เกิดขึ้น
	A,n	คือ	ค่าคงที่
	E	คือ	พลังงานกระตุ้นของการเกิด creep ในโลหะ
	R	คือ	ค่าคงตัวของแก๊ส
	T	คือ	อุณหภูมิ

ช่วงที่ 3 Tertiary Creep เป็นช่วงที่อัตราการคืบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งวัสดุเกิดการเสียหายในที่สุด

ซึ่งหากจะอธิบายพฤติกรรมการคืบในระดับอะตอมสามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน คือ Vacancy Creep, Dislocation Glide, Diffusion Creep และ Grain Boundary Sliding

Vacancy Creep เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความเครียดจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือการขยายขยายของอะตอม จะทำให้เกิดช่องว่างและเกิดการเปลี่ยนแปลงที่อยู่ของอะตอมภายในเกรน

Dislocation Glide เป็นช่วงที่อะตอมเกิดการเคลื่อนที่ไปตามระนาบ (Slip plane) แต่จะสามารถเกิดการเคลื่อนที่ข้ามระนาบ (Plane) ได้เช่นกัน กรณีนี้มีสาเหตุจากการเกิด Thermal activation เป็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเมื่อความเค้น (Stress) สูง

Dislocation Creep จะเริ่มเกิดการเคลื่อนที่แบบข้ามผ่าน dislocation เนื่องจากการมีช่องว่างเกิดขึ้น หรือเริ่มเกิดการแพร่ของอะตอม

Diffusion Creep การแพร่ของอะตอมแบบกระโดดเกิดขึ้นทั่วไปภายในเกรน

Grain Boundary Sliding หลังการเกิดการเปลี่ยนแปลงของอะตอมภายในเกรนมากเข้าสุดท้ายจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ขอบเกรน หรือเรียกว่าการเคลื่อนตัวของขอบเกรน ซึ่ง

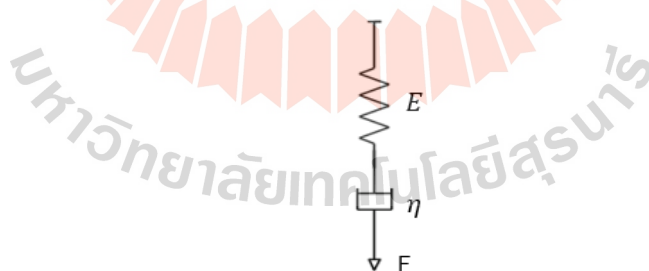
เมื่อเกรนหลายเกรนเกิดการเลื่อนตัวจะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเกรนที่อยู่ติดกันซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงแรกของการคืบระดับสุดท้าย (Tertiary Creep) ส่งผลให้เกิดการเสียหายของวัสดุในที่สุด นอกจากนี้การคืบที่อุณหภูมิสูงพอเหมาะสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสหรือตกตะกอน ส่งผลให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมใหม่ได้

ส่วนมากในการออกแบบใช้งานวัสดุหากพิจารณาพฤติกรรมการคืบมักจะให้ความสำคัญกับช่วงที่ 2 เนื่องจากมีระยะเวลานานและการคืบค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากเหมือนช่วงที่ 1 และช่วงที่ 3 ที่มีการเปลี่ยนแปลงมากในระยะเวลานั้น อย่างไรก็ตามพฤติกรรมที่กล่าวมาเบื้องต้นนั้นเป็นพฤติกรรมการคืบทั่วไปของโลหะเท่านั้น

## 2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัสดุวิสโคอิลาสติก

พฤติกรรมแบบวิสโคอิลาสติกสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งผ่านการพัฒนาเป็นเวลานานเพื่อให้ได้แบบจำลองที่สามารถอธิบายพฤติกรรมได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด เริ่มจากแบบจำลองของแมกซ์เวลล์ แบบจำลองของเคลวิน และแบบจำลองแบบสี่องค์ประกอบซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงมากที่สุด ทุกแบบจำลองจะใช้สปริงและตัวหน่วง (Spring-damper) โดยสปริงจะใช้แทนช่วงการยืดหยุ่นและช่วงเวลากการคืนตัวหรือหดรัดกลับจะใช้การหน่วงเวลาด้วยตัวหน่วง (Damper) (Sadan, 1994)

### 2.4.1 แบบจำลองของแมกซ์เวลล์ (Maxwell Model)



รูปที่ 2.11 แบบจำลองพฤติกรรมวิสโคอิลาสติกของแมกซ์เวลล์

พิจารณาความสัมพันธ์เป็นแบบอนุกรมดังรูปที่ 2.11 เมื่อให้แรงกระทำสปริงจะยืดออกทันทีเป็นความเค้นในส่วนอิลาสติก และ ตัวหน่วงจะเริ่มยืดออกด้วยอัตราคงที่แทนพฤติกรรมที่เปลี่ยนไปอย่างช้าตามเวลา การตอบสนองของความเค้นและความเครียดเป็นไปตามสมการที่ 2.3 และ 2.4

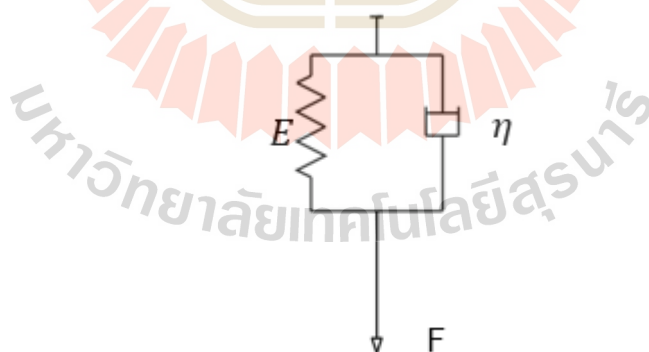
$$\sigma_{total} = \sigma_E + \sigma_\eta \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_E + \varepsilon_\eta \quad (2.4)$$

โดย	$\sigma_{total}$	คือ	ความเค้นโดยรวมที่เกิดขึ้น
	$\sigma_E$	คือ	ความเค้นส่วนที่เกิดจากสปริงหรืออีลาสติก
	$\sigma_\eta$	คือ	ความเค้นส่วนที่เกิดจากตัวหน่วงเป็นไปตามเวลา
	$\varepsilon_{total}$	คือ	ความเครียดโดยรวมที่เกิดขึ้น
	$\varepsilon_E$	คือ	ความเครียดที่เกิดจากส่วนสปริงหรืออีลาสติก
	$\varepsilon_\eta$	คือ	ความเครียดที่เกิดจากตัวหน่วงหรือเป็นไปตามเวลา

แบบจำลองนี้จะไม่ตรงกับพฤติกรรมการคืบของวัสดุพอลิเมอร์ที่มีทั้งหมด 3 ช่วง คือการคืบ (Creep) การคลายตัวของความเค้น (Stress relaxation) และการคืนตัว (Recovery) โดยแบบจำลองนี้จะไม่สามารถอธิบายถึงการคืนตัวได้พิจารณาจากแบบจำลองหลังจากการปลดภาระสปริงจะหดตัวกลับทันทีในขณะที่พฤติกรรมของการคืนรูปจะเป็นไปอย่างช้าตามเวลา

#### 2.4.2 แบบจำลองของเคลวิน โวก (Kelvin Voigt Model)



รูปที่ 2.12 แบบจำลองพฤติกรรมวิสโคอีลาสติกของเคลวิน-โวก

แบบจำลองนี้ Spring และ Damper จะต่อกันแบบขนานดังรูปที่ 2.12 โดยเมื่อให้แรงกระทำลักษณะดังกล่าว ความเค้นและการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นบน Spring และ Damper จะเกิดขึ้นเท่ากัน การตอบสนองของความเค้นและความเครียดเป็นดังสมการ 2.5 และ 2.6

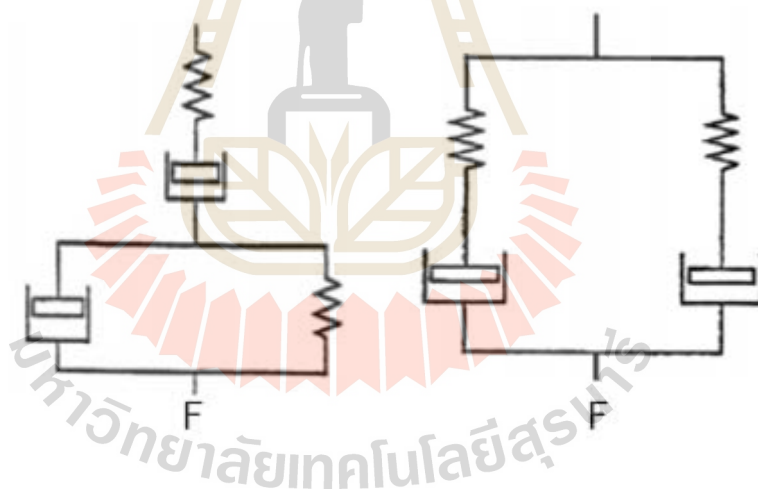
$$\sigma_{total} = \sigma_E + \sigma_\eta \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_E = \varepsilon_\eta \quad (2.6)$$

พิจารณาจากแบบจำลองพบว่าเมื่อความเครียดของระบบคงที่จะทำให้ขาดสมบัติของพฤติกรรมหนึ่งในสามของวัสดุวิสโคอีลาสติกที่เป็นช่วง Stress Relaxation

ดังนั้นจากแบบจำลองทั้งสองจะพบว่าไม่สามารถอธิบายสมบัติสำคัญของพอลิเมอร์ทั้งสามช่วงได้ ทำให้ไม่สอดคล้องกับความจริง จึงได้มีการพัฒนาแบบจำลองขึ้นมาใหม่โดยนำแบบจำลองทั้งสองก่อนหน้ามาประยุกต์ร่วมกัน เพื่อปรับปรุงจุดด้อยและทำให้สามารถครอบคลุมถึงสมบัติที่แสดงความเป็นพอลิเมอร์ได้และเป็นแบบจำลองที่ไม่ซับซ้อนมาก เรียกว่าแบบจำลองแบบสี่องค์ประกอบ (Universal Model)

#### 2.4.3 แบบจำลองแบบสี่องค์ประกอบ (Universal Model)



รูปที่ 2.13 แบบจำลองพฤติกรรมวิสโคอีลาสติกแบบสี่องค์ประกอบ (แบบจำลองเบอร์เกอร์)

โดยเป็นการนำแบบจำลองของแมกซ์เวลล์และเคลวิน มาต่อกันแบบอนุกรมหรือขนาน ซึ่งแบบจำลองแบบสี่องค์ประกอบมีอยู่ด้วยกันหลายแบบแตกต่างกันไป โดยดังภาพ คือแบบจำลองของเบอร์เกอร์ (Burger's Model) ที่แทนพฤติกรรมของการคืบและพฤติกรรมการคลายความเค้น โดยที่การตอบสนองของความเค้นและความเครียดในรูปคอมพลายเอนซ์ (Compliance) ซึ่งปกติคอมพลายเอนซ์สามารถหาได้จากส่วนของโมดูลัส และ โมดูลัสแรงเฉือน (Shear Modulus) เป็นดังสมการที่ 2.7 และ 2.8

$$J(t) = J_g + J_1 t + J_1 [1 - e^{-t/\tau_e}] \quad (2.7)$$

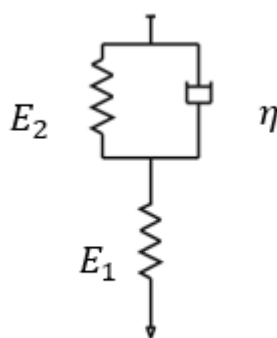
$$G(t) = G_1 e^{-t/\tau_{\sigma,1}} + \sigma_2 e^{-t/\tau_{\sigma,2}} \quad (2.8)$$

เมื่อ	$J(t)$	คือ	ค่าคอมพลาเยนซ์โดยรวม
	$J_g$	คือ	ค่าคอมพลาเยนซ์จากส่วนอีลาสติก ( $E_1$ )
	$J_1 t$	คือ	ค่าคอมพลาเยนซ์จากส่วนตัวหน่วง ( $\eta_1$ )
	$J_1$	คือ	ค่าคอมพลาเยนซ์ที่เกิดขึ้นจากส่วนต่อขนาน ( $E_2, \eta_2$ )
	$\tau_e$	คือ	ค่าคงที่ของเวลา

พิจารณาแบบจำลองการคืบเมื่อให้แรงกระทำเริ่มแรกจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทันทีของแบบจำลอง ซึ่งเป็นผลมาจาก Spring ของแบบจำลองแมกซ์เวลล์ จากนั้นพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับเวลาจะแทนด้วย Spring ในแบบจำลองเคลวิน และ Damper ของทั้งสองแบบจำลอง จากนั้นหากนำความเค้นออกด้วยการปล่อยแรงกระทำ จะเกิดการหดกลับของวัสดุที่แบ่งเป็นสองช่วง คือ การหดกลับอย่างทันทีทันใดซึ่งอธิบายในแบบจำลองด้วย Spring ของแบบจำลองแมกซ์เวลล์ และช่วงการหดกลับที่ขึ้นกับเวลาจะแทนด้วย Spring ร่วมกับ Damper ในแบบจำลองเคลวิน ทำให้แบบจำลองประยุกต์นี้สามารถอธิบายพฤติกรรมและสมบัติทั้งหมดได้ทั้ง 3 ช่วง

#### 2.4.4 แบบจำลองของซีเนอร์ (Zener Model)

แบบจำลองของซีเนอร์ (Zener Model) หรือแบบจำลองมาตรฐานลิเนียโซลิด (Standard linear solid Model) เป็นอีกหนึ่งแบบจำลองที่นำมาพิจารณา แบบจำลองเป็นการต่อร่วมกันระหว่างแมกซ์เวลล์และเคลวิน แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แบบจำลองพฤติกรรมวิสโคอีลาสติกของซีเนอร์

เมื่อให้ภาระกระทำกับแบบจำลองส่วนอีลาสติกจะยืดออกทันทีทันใดตามสปริง  $E_1$  จากนั้นพฤติกรรมอีลาสติกที่เกิดควบคู่กับพฤติกรรมตามเวลาจะถูกแสดงในส่วนต่อขนานของสปริง  $E_2$  และตัวหน่วง ซึ่งใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงในส่วนพฤติกรรมอีลาสติกที่เกิดขึ้นร่วมกับพฤติกรรมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยการตอบสนองของความเค้นและความเครียดของแบบจำลองแสดงดังสมการที่ 2.9 และ 2.10

$$\sigma_{total} = \sigma_{E_1} = \sigma_{E_2} + \sigma_{\eta} \quad (2.9)$$

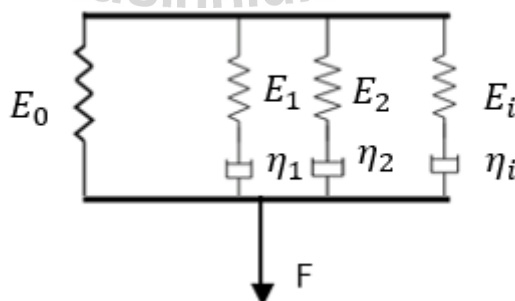
$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_{E_1} + \varepsilon_{E_2} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $\varepsilon_{E_2} = \varepsilon_{\eta}$

ในแบบจำลองข้างต้นเป็นแบบจำลองพื้นฐาน ซึ่งการนำไปศึกษาวัสดุแบบวิสโคอีลาสติคนั้นการต่อแบบขนานหรืออนุกรมเพียงชุดเดียวไม่สามารถแทนพฤติกรรมที่ยืดหยุ่นและซับซ้อนกว่าได้จึงมีการเพิ่มจำนวนชุดการต่อหรือเอลิเมนต์ (Element) เพื่อให้ใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงมากที่สุด

#### 2.4.5 แบบจำลองทั่วไปของแมกซ์เวลล์ (Generalized Maxwell Model)

แบบจำลองทั่วไปของแมกซ์เวลล์เป็นที่นิยมใช้ในการศึกษาพฤติกรรมแบบวิสโคอีลาสติก โดยนำแบบจำลองของแมกซ์เวลล์มาต่อขนานกันหลายเอลิเมนต์เพื่อให้ใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริง แบบจำลองแสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แบบจำลองทั่วไปของแมกซ์เวลล์

พิจารณาจากแบบจำลองให้อยู่ในรูปอนุกรมของโพรนี (Prony Series) ได้ตั้งสมการที่ 2.11

$$J(t) = E_0 \left( 1 - \sum_{i=1}^n P_i (1 - e^{-t/\tau_i}) \right) \quad (2.11)$$

เมื่อ	$J(t)$	คือ	ค่าคอมพลายแอนซ์ที่เวลาใดๆ
	$E_0$	คือ	ค่าโมดูลัสของยัง (Young's Modulus)
	$P_i$	คือ	ค่าคงที่ของโพรนีที่อนุกรม $i$ (Prony's constant)
	$\tau_i$	คือ	ค่าคงที่ของเวลาของโพรนีที่อนุกรม $i$ (Prony's time constant)
	$i$	คือ	จำนวนอนุกรมของโพรนี

## 2.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ในการดำเนินงานวิจัยโดยทั่วไปจะมีการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อเป็นการยืนยันว่า การทดสอบ หรือข้อมูลที่ได้มานั้น มีค่าทางสถิติเป็นที่ยอมรับหรือไม่ ซึ่งจะทำให้ข้อมูลหรือรายงานนั้น มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น และการวิเคราะห์ทางสถิตินั้น มีอยู่ด้วยกันหลายวิธีขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ ลักษณะของข้อมูล และการนำเสนอข้อมูล

งานวิจัยด้านการทดสอบส่วนมากเป็นการเปรียบเทียบหรือวิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูล โดยมีการตั้งสมมติฐานไว้ก่อนเบื้องต้น สามารถแบ่งขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติได้ ดังนี้ (สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ม.เทคโนโลยีสุรนารี)

### 2.5.1 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการทดสอบ

ในการดำเนินงานวิจัย จำเป็นต้องกำหนดพารามิเตอร์ที่ต้องการทดสอบ ต้องการเปรียบเทียบค่าทางสถิติในรูปแบบใด เช่น การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย หรือค่าความแปรปรวน ซึ่งจะส่งผลต่อการกำหนดวิธีการทางสถิติในการทดสอบ นอกจากนี้ผู้ทำการวิเคราะห์ต้องทราบถึงค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งสามารถหาได้จากตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าและสัญลักษณ์ทางสถิติ

กลุ่มประชากร (Population)	การหาค่าสถิติ	กลุ่มตัวอย่าง (Sample)	ความหมาย
$\mu$	$\bar{X} = \frac{\sum X}{n}$	$\bar{X}$	ค่าเฉลี่ย
$\sigma^2$	$S^2 = \frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n-1}$	$S^2$	ความแปรปรวน
$p$	$\hat{p} = \frac{X}{n}$	$\hat{p}$	สัดส่วน/ อัตราส่วน
$\mu_1 - \mu_2$	$\bar{X}_1 - \bar{X}_2 = \frac{\sum X_{1i}}{n_1} - \frac{\sum X_{2i}}{n_2}$	$\bar{X}_1 - \bar{X}_2$	
$p_1 - p_2$	$\hat{p}_1 - \hat{p}_2 = \frac{X_1}{n_1} - \frac{X_2}{n_2}$	$\hat{p}_1 - \hat{p}_2$	

### 2.5.2 การตั้งสมมติฐานในการทดสอบ

การตั้งสมมติฐานเป็นการตั้งหลักการเพื่อเปรียบเทียบชุดข้อมูล เปรียบเทียบค่าใดกับค่าเป้าหมายหรือชุดข้อมูลอื่น ซึ่งมี 2 ประเภทคือ การตั้งสมมติฐานเปรียบเทียบค่าเป้าหมายกับกลุ่มตัวอย่างหรือประชากรกลุ่มเดียว (1 sample) และการเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มตัวอย่างหรือประชากร 2 ชุด (2 sample)

เช่น ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิในเดือนพฤศจิกายนมีค่าต่างจาก 23 องศาเซลเซียส ที่ค่าความแปรปรวน 0.02 องศาเซลเซียส หรือไม่

จากตัวอย่างเป็นการเปรียบเทียบกลุ่มตัวอย่างเดียว คือ ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิในเดือนพฤศจิกายน เทียบกับค่าเป้าหมายที่ทราบหรือกำหนด ที่ 23 องศาเซลเซียส ค่าความแปรปรวน 0.02 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์เกี่ยวข้องที่ทราบ โดยจะสามารถเขียนสัญลักษณ์ทางสถิติเพื่อตั้งสมมติฐานได้ 2 ลักษณะดังนี้

$$\begin{aligned} H_0 : \mu &= \mu_0 \\ H_1 : \mu &\neq \mu_0 \end{aligned} \quad (2.12)$$

หรือย้ายข้างสมการ



$$\begin{aligned} H_0 : \mu - \mu_0 &= 0 \\ H_1 : \mu - \mu_0 &\neq 0 \end{aligned} \quad (2.13)$$

เมื่อ	$\mu$	คือ	ค่าเฉลี่ยเป้าหมายต้องการเปรียบเทียบ
	$\mu_0$	คือ	ค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างที่ได้จากการเก็บข้อมูลหรือทดสอบ
	$H_0$	คือ	สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis)
	$H_1$	คือ	สมมติฐานรอง (Alternative Hypothesis)

สมมติฐานหลักจะเป็นการเปรียบเทียบข้อมูลว่าไม่ต่างกัน หากมีความแตกต่างจะต้องกำหนดที่สมมติฐานรอง ในตัวอย่างเป็นการเปรียบเทียบ โจทย์ถามว่าแตกต่างจากค่าเป้าหมายในลักษณะใด กำหนดค่าเปรียบเทียบเป็น 0 เนื่องจากโจทย์ไม่ได้ระบุว่าแตกต่างกันเป็นค่าเท่าไร หรือแตกต่างกันในลักษณะมากกว่าหรือน้อยกว่า หากเป็นลักษณะดังกล่าวสามารถตั้งสมมติฐานได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการเขียนตั้งสมมติฐาน

	ต่างกันหรือไม่	น้อยกว่าหรือไม่	มากกว่าหรือไม่	ต่างกันเป็นค่า x
สมมติฐานหลัก	$H_0 : \mu = \mu_0$	$H_0 : \mu - \mu_0 = 0$	$H_0 : \mu - \mu_0 = 0$	$H_0 : \mu - \mu_0 = x$
สมมติฐานรอง	$H_1 : \mu - \mu_0 \neq 0$	$H_1 : \mu - \mu_0 < 0$	$H_1 : \mu - \mu_0 < 0$	$H_1 : \mu - \mu_0 \neq x$

จากตาราง หากค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมายมีค่าน้อยกว่าหมายความว่าค่าที่ได้จะมีค่าเป็นบวกตั้งสมการ ทางกลับกันในกรณีที่ค่ากลุ่มตัวอย่างเปรียบเทียบกับมีค่ามากกว่าจะมีค่าน้อยกว่าศูนย์ ซึ่งจะขึ้นกับการตั้งสมมติฐานว่าใช้ค่าใดเป็นตัวตั้ง

ในกรณีที่ต้องการทราบค่าเฉลี่ยอุณหภูมิในเดือนพฤศจิกายนมีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ย ธันวาคมเกิน 2 องศาเซลเซียสหรือไม่ โดยจะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่ม จะสามารถตั้งสมมติฐานได้ดังนี้

$$\begin{aligned} H_0 : \mu_1 - \mu_2 &= 2 \\ H_1 : \mu_1 - \mu_2 &< 2 \end{aligned} \quad (2.14)$$

เมื่อ	$\mu_1$	คือ	ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิในเดือนพฤศจิกายนหรือกลุ่มตัวอย่างที่ 1
	$\mu_2$	คือ	ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิในเดือนธันวาคมหรือกลุ่มตัวอย่างที่ 2

จากตัวอย่างที่ 2 เมื่อค่าเฉลี่ยเดือนพฤศจิกายนมากกว่าเดือนธันวาคมเกิน 2 ขึ้นไป ค่าความแตกต่างในการทดสอบ (Test Difference) มีความเป็นไปได้ตั้งแต่ 3,4,5,...,n สัญลักษณ์ในสมมติฐานรองจึงเป็นเครื่องหมายมากกว่า

### 2.5.3 การกำหนดสถิติในการทดสอบ

วิธีการทางสถิติที่ใช้ในการทดสอบจะขึ้นอยู่กับปัจจัยในข้อ 2.5.1 และ 2.5.2 สามารถจำแนกได้ดังนี้

#### 2.5.3.1 การทดสอบที่กลุ่มตัวอย่างเดียว

การทดสอบบนข้อมูลชุดเดียวหรือกลุ่มตัวอย่างเดียว (1 Sample) มีหลายวิธี บนเงื่อนไขพื้นฐานของการทดสอบข้อมูลต้องมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) และเป็นข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน ในกรณีนี้จะกล่าวถึง 3 วิธี

##### 1) Z-Test (1 Sample Z)

สถิติ Z-Test เป็นการทดสอบบนค่าเฉลี่ย นอกจากเงื่อนไขพื้นฐานแล้ว การใช้สถิติแบบ z ต้องทราบค่าความแปรปรวนของกลุ่มประชากร (Population Variance,  $\sigma^2$ ) ค่าเฉลี่ย ( $\bar{X}$ ) และจำนวนประชากร (n) เพื่อคำนวณหาค่า  $Z_0$  ที่ใช้ทดสอบดังสมการ (2.15)

$$Z_0 = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\sigma / \sqrt{n}} \quad (2.15)$$

##### 2) T-Test (1 Sample t)

ในกรณีการทดสอบแบบ T-Test จะถูกนำมาพิจารณาเมื่อเป็นการทดสอบบนค่าเฉลี่ย แต่ไม่ทราบค่าความแปรปรวนของประชากร โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณค่าทางสถิติแบบ T ประกอบด้วย ค่าเฉลี่ย ( $\bar{X}$ ) จำนวนประชากร (n) ค่าความแปรปรวนของกลุ่มตัวอย่าง (Sample variance, S) และจำนวนประชากร

$$T = \frac{\bar{X} - \mu}{S / \sqrt{n}} \quad (2.16)$$

นอกจากนี้การทดสอบแบบ T-Test ต้องทราบค่าจำนวนตัวแปรอิสระ (Degree of freedom) เพื่อใช้ในการตัดสินใจ กรณีของ 1 Sample T สามารถหาได้จาก  $df = n-1$

### 3) 1 Proportion

สถิติแบบ Proportion เป็นการทดสอบอัตราส่วน หรือสัดส่วน กลุ่มตัวอย่างอยู่ในรูปแบบอัตราส่วนที่พิจารณา เช่น จำนวนของเสียต่อจำนวนการผลิตทั้งหมด ในการทดสอบจะสามารถคำนวณอยู่ในรูปของค่า Z ได้จากสมการ

$$Z = \frac{X - np}{\sqrt{np(1-p)}} \quad (2.17)$$

ตารางที่ 2.4 การพิจารณาเลือกใช้สถิติทดสอบ

สถิติทดสอบ	พารามิเตอร์ทดสอบ	ความแปรปรวนประชากร	การคำนวณ
z - test (1 sample z)	ค่าเฉลี่ย	ทราบ	$Z_0 = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\sigma / \sqrt{n}}$
t- test (1 Sample t)	ค่าเฉลี่ย	ไม่ทราบ	$T = \frac{\bar{X} - \mu}{S / \sqrt{n}}$
1 proportion test	อัตราส่วน/เปอร์เซ็นต์	-	$Z = \frac{X - np}{\sqrt{np(1-p)}}$

### 2.5.3.2 การทดสอบเปรียบเทียบกลุ่มตัวอย่างหรือประชากร 2 กลุ่ม

การเปรียบเทียบกลุ่มตัวอย่างหรือประชากร 2 กลุ่ม มีเงื่อนไขพื้นฐานเช่นเดียวกันกับหัวข้อ 2.5.3.1 นอกเหนือจากนั้นพารามิเตอร์ที่ทราบค่าจะส่งผลต่อการพิจารณาสถิติในการทดสอบที่ใช้ดังนี้

#### 1) Z -Test (2 Sample Z)

เมื่อหาค่าข้อมูลทั้งสองนั้นทราบค่าความแปรปรวนของกลุ่มประชากร และพิจารณาทดสอบบนค่าเฉลี่ย จะใช้สถิติแบบ Z - Test ในการทดสอบทางสถิติ โดยสามารถหาได้จากสมการ (2.15)

$$Z = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2 - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $\mu_1 - \mu_2 = \Delta_0$  หมายถึงค่าความแตกต่างในการทดสอบ (Test Difference)

## 2) T -Test (2 sample T)

การทดสอบแบบ T -Test ใช้ในกรณีที่ทดสอบบนค่าเฉลี่ยแต่ไม่ทราบค่าความแปรปรวนของประชากร ซึ่งจะอาศัยการประมาณค่าจากข้อมูลของกลุ่มตัวอย่าง สามารถจำแนกได้เป็น 3 กรณี

2.1) เมื่อไม่ทราบค่าความแปรปรวนของกลุ่มประชากรแต่ทราบว่าเท่ากัน

( $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ )

สามารถประมาณค่าความแปรปรวนที่เท่ากันนี้ได้จาก

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (2.19)$$

และหาค่าสถิติเพื่อทดสอบจากสมการ (2.20)

$$T = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{S_p^2 \left( \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} \quad (2.20)$$

เมื่อ

$S_p^2$  คือ ค่าประมาณของความแปรปรวน

$S_1^2$  คือ ค่าความแปรปรวนของกลุ่มข้อมูลหรือกลุ่มตัวอย่างที่ 1

$S_2^2$  คือ ค่าความแปรปรวนของกลุ่มข้อมูลหรือกลุ่มตัวอย่างที่ 1

$n_1$  คือ จำนวนของกลุ่มข้อมูลหรือกลุ่มตัวอย่างที่ 1

$n_2$  คือ จำนวนของกลุ่มข้อมูลหรือกลุ่มตัวอย่างที่ 2

และ จำนวนตัวแปรอิสระ (Degree of freedom: df) หาได้จาก  $df = n_1 + n_2 - 2$

2.2) เมื่อไม่ทราบค่าความแปรปรวนของกลุ่มประชากร ทราบว่าไม่เท่ากัน

( $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$ )

หาค่าสถิติในการทดสอบได้จาก (2.21)

$$T = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}\right)}} \quad (2.21)$$

และ จำนวนตัวแปรอิสระ (Degree of freedom: df)

$$df = \frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}\right)}{\frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1}\right)}{n-1} + \frac{\left(\frac{S_2^2}{n_2}\right)}{n-2}} \quad (2.22)$$

### 3) 2 Proportion

การเปรียบเทียบสัดส่วนหรืออัตราส่วนของข้อมูล 2 กลุ่ม เช่นเดียวกันในกรณี 1 proportion ทำการพิจารณาบนค่า Z ได้จาก (2.22)

$$Z = \frac{\hat{P}_1 - \hat{P}_2 - (p_1 - p_2)}{\sqrt{\frac{p_1(1-p_1)}{n_1} + \frac{p_2(1-p_2)}{n_2}}} \quad (2.23)$$

### 4) Paired T test

Paired T test เป็นการทดสอบค่าเฉลี่ยของค่าความแตกต่างสองกลุ่มข้อมูล โดยที่ข้อมูลเหล่านั้นไม่เป็นอิสระต่อกัน ใช้ในการเปรียบเทียบวิธีการ เช่น การทำงานของพนักงาน 2 คนภายใต้ลักษณะงานเดียวกัน โดยค่าทดสอบทางสถิติหาได้จาก (2.24)

$$T = \frac{\bar{D} - \Delta_0}{S_D / \sqrt{n}} \quad (2.24)$$

เมื่อ  $\bar{D}$  คือ ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างระหว่างชุดข้อมูลที่ 1 และ 2  
 $\Delta_0$  คือ ค่าความแตกต่างที่ต้องการทดสอบ

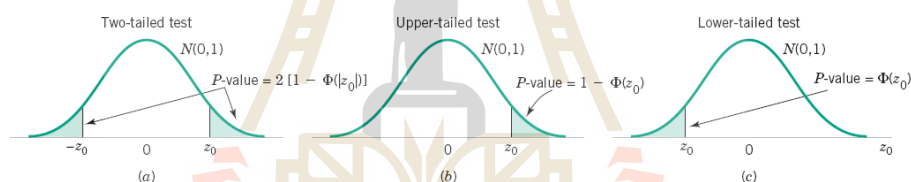
$S_D$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแตกต่างระหว่างชุดข้อมูล  
ที่ 1 กับ 2

$n$  คือ จำนวนของกลุ่มข้อมูลหรือกลุ่มตัวอย่างที่ 1

#### 2.5.4 การกำหนดค่าระดับความสำคัญและค่าวิกฤตในการทดสอบ

การกำหนดค่าวิกฤต เป็นการกำหนดพื้นที่หรือบริเวณในการแจกแจงตัวอย่างของสถิติทดสอบที่ใช้สำหรับปฏิเสธหรือยอมรับสมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) มีความสัมพันธ์กันระหว่างค่าระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) ไปหาค่าวิกฤต (critical value) มาใช้ในการเปรียบเทียบกับค่า ที่คำนวณได้จากกลุ่มตัวอย่าง สำหรับการตัดสินใจว่า จะยอมรับ (Acceptance) หรือปฏิเสธ (Rejection) สมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) อยู่ที่ 0.01, 0.05, 0.1 ขึ้นอยู่กับระดับความเชื่อมั่นที่พิจารณา

โดยปกติในการค่าความเชื่อมั่นความถูกต้องของชุดข้อมูล (Confidence Interval) มีไว้เพื่อสมมติฐานว่า ไม่มีข้อมูลใดถูกต้อง 100 % จึงมีค่าระดับนัยสำคัญที่ระดับต่างๆมาเพื่อใช้สนับสนุนว่าข้อมูลอยู่ในช่วงค่าที่สามารถยอมรับได้หรือไม่ ดังรูปตัวอย่าง 2.16

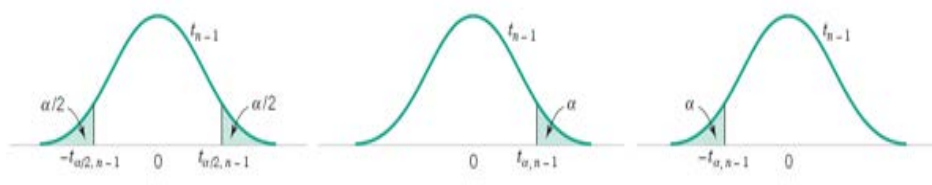


รูปที่ 2.16 พื้นที่วิกฤตของการทดสอบแบบ Z -distribution

(ที่มา: สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ม.เทคโนโลยีสุรนารี)

จากภาพตัวอย่าง ค่าระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) คือค่าพื้นที่ปฏิเสธภายใต้เส้นโค้งปกติ จะถูกนำมาหาค่าวิกฤต (critical value) ด้วยการเปิดตาราง Z ว่าพื้นที่ดังกล่าวมีค่าสถิติ (Z) เป็นเท่าไร ค่าสถิติที่แบ่งพื้นที่ระหว่างพื้นที่ยอมรับและปฏิเสธนั้น จะเรียกว่า ค่าวิกฤต (critical value) ซึ่งแตกต่างกันตามค่าระดับนัยสำคัญ สมมติฐานที่ตั้งในการทดสอบ และสถิติที่ใช้ในการทดสอบ

ในขณะที่การทดสอบด้วย T-Test จะใช้ตาราง T Distribution ค่าระดับนัยสำคัญ และจำนวนตัวแปรอิสระ ในการหาค่าวิกฤต



รูปที่ 2.17 พื้นที่วิกฤตของการทดสอบแบบ t-distribution  
(ที่มา: สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ม.เทคโนโลยีสุรนารี)

### 2.5.5 การสรุปข้อมูลจากการทดสอบ

จากการคำนวณค่าทางสถิติ จะสามารถตัดสินใจยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) มีวิธีการพิจารณา 2 วิธี คือ การเปรียบเทียบค่าทางสถิติ ( $Z, T$ ) กับค่าวิกฤต และการเปรียบเทียบค่า P-Value กับค่าระดับนัยสำคัญ

#### 1) การเปรียบเทียบค่าทางสถิติกับค่าวิกฤต

เมื่อได้ค่า  $Z$  และ  $T$  นำค่าดังกล่าวเปรียบเทียบกับค่าวิกฤตเพื่อตรวจสอบว่าอยู่ในพื้นที่ยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) หากตกอยู่ในพื้นที่ปฏิเสธสมมติฐานหลักจะไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานรอง ( $H_1$ ) ได้ หรือสรุปว่าสมมติฐานรองเป็นจริง

#### 2) การเปรียบเทียบค่า P-value กับค่าระดับนัยสำคัญ

ค่า P-Value คือ พื้นที่ภายใต้เส้นโค้งปกติของค่าทางสถิติที่คำนวณได้ หากมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ หมายความว่าพื้นที่นั้นตกอยู่ส่วนปฏิเสธสมมติฐานหลัก

## 2.6 ปิทธิรสนั้วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถแบ่งได้ 3 ส่วน คือ งานวิจัยด้านพฤติกรรมภายใต้แรงกดของวัสดุ งานวิจัยด้านผลกระทบของอัตราภาระ และงานวิจัยด้านการทำนายพฤติกรรม

### 2.6.1 งานวิจัยด้านพฤติกรรมภายใต้แรงกดของวัสดุ

Kraatz และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมภายใต้แรงดึงและอัดแบบ Long-term ของโฟมพีวีซี โดยมีการวัดความเครียดบนชิ้นทดสอบด้วยอุปกรณ์แบบ Non-contact ซึ่งจะใช้กล้อง CCD จับภาพการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุในระหว่างการทดสอบแล้วนำการเปลี่ยนแปลงบนภาพไปคำนวณเป็นความเครียดที่เกิดขึ้น จากการศึกษาพบว่าในกรณีที่มีความเค้นมากกว่าเท่า ๆ กัน ความเครียดที่เกิดขึ้นภายใต้ภาระอัดจะมีค่ามากกว่าความเครียดที่เกิดขึ้นภายใต้ภาระดึง แสดงให้เห็นว่าโฟมพีวีซีเป็นวัสดุที่เกิดความเสียหายได้ง่ายภายใต้ภาระอัด

Subhash และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมภายใต้ภาระกดและภาระดึง พบว่าที่ภาระขนาดเท่ากัน ภายใต้ภาระกดวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดหรือเสีรูปร่างมากกว่า พฤติกรรมภายใต้แรงดึง ยืนยันผลว่าโฟมพีวีซีเกิดความเสียหายได้ง่ายกว่าภายใต้ภาระกด นอกจากนี้งานวิจัยยังศึกษาเงื่อนไขความหนาแน่นของวัสดุ ของโฟมพีวีซีที่ความหนาแน่นต่างกัน พบว่า ที่ความหนาแน่นสูงวัสดุจะมีค่าคุณสมบัติ เช่น ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ค่าความแข็งแรงกด (Strength) จะมีค่าสูงกว่าความหนาแน่นต่ำ แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมของโฟมขึ้นอยู่กับความหนาแน่นด้วยเช่นกัน

Miyase และคณะ (2016) ศึกษาผลของความหนาแน่น โฟมและอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของเซลล์ (Cell rise ratio) ของวัสดุโฟมพีวีซีความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$  (H100) พบว่าค่าความแข็งของวัสดุ (Stiffness) ไม่ได้มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับค่าความหนาแน่น โฟมและอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของเซลล์ (Cell rise ratio) ความเสียหายภายใต้แรงกดของเซลล์ ประกอบด้วย การเกิดการโก่งงอของเซลล์ (cell bulking) รวมถึงการเกิดแรงเฉือนขึ้นทั่วทั้งหน้าตัดของผิวชั้นทดสอบ การจะพัฒนาคุณสมบัติของโฟมขึ้นกับโครงสร้างจุลภาคและกลไกภายในของโฟม (microstructure and mechanism) นอกจากนี้งานวิจัยทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์และคาดการณ์พฤติกรรม ร่วมกับการทดลองเพื่อหาค่าคุณสมบัติ (stiffness & strength) ผลการทดลองพบว่าความหนาแน่น โฟมและ อัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของเซลล์ (Cell rise ratio) เพียงอย่างเดียวไม่สามารถระบุผลกระทบต่อการกระจายตัวของวัสดุและพารามิเตอร์ต่างๆภายใต้แรงกดได้อย่างชัดเจน จึงทำการวิเคราะห์ผลกระทบร่วมของสองตัวแปรพบว่าผลกระทบร่วมดังกล่าวมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นต่อความแข็ง (stiffness) และความแข็งแรงของวัสดุ (strength) ซึ่งระบุได้ว่าค่าคุณสมบัติภายใต้แรงกดของวัสดุของโฟมนั้นขึ้นกับความหนาแน่นของโฟมและความเสียหายที่เกิดขึ้นภายในโฟม

### 2.6.2 งานวิจัยด้านผลกระทบของอัตราภาระ

Poapongsakorn และ Kanchanomai (2011) ซึ่งเป็นงานวิจัยก่อนหน้าของผู้วิจัย ได้ทำการศึกษาผลกระทบของเวลาที่มีต่อพฤติกรรมทางกลต่าง ๆ ของโฟมพีวีซี ได้แก่ การทดสอบแรงดึง การทดสอบความต้านทานการแตกหัก และการขยายตัวของรอยร้าวแล้ว รวมไปถึงการทดสอบการคืบภายใต้แรงดึงของโฟมพีวีซี จากการศึกษาพบว่าที่อุณหภูมิห้อง โฟมพีวีซีมีพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลา คือสามารถเกิดการคืบ และ/หรือ การคลายตัวของความเค้น (Stress relaxation) ได้ และการพิจารณานำสมบัติเชิงกลของโฟมพีวีซีไปใช้งานจะต้องคำนึงถึงอัตราภาระ (Loading rate) ที่มากระทำด้วยเสมอ

Mane และคณะ (2017) ศึกษาการตอบสนองและการเปลี่ยนแปลงภายใต้อัตราภาระที่แตกต่างกันของพอลิยูรีเทน โฟมโดยใช้การทดสอบการกดแบบ Iniaxial ภายใต้ภาระแบบกึ่ง



สถิตยศาสตร์ (quasi - static ) และพลศาสตร์ (dynamic rate) พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญของสมบัติทางกล และการบีบอัด (densification) จะเกิดขึ้นได้ดีที่อัตรากระต่าภายใต้ภาวะแบบกึ่งสถิตยศาสตร์ (quasi - static) นอกจากนี้ค่าพลังงานการดูดซับพลังงาน (energy absorption) จะขึ้นกับค่าความเค้นความยาวนานของช่วงการบีบอัด และอัตราความเครียด (strain rate) จากงานวิจัยยังสามารถสรุปได้ว่าโฟมจะมีพฤติกรรมขึ้นอยู่กัทิศทาง ผลการตอบสนองทางกลที่แตกต่างกันขึ้นกับ rise direction และ transverse direction นอกจากนี้ยังขึ้นกับความหนาแน่นของโฟม อัตราความเครียด และอุณหภูมิ

Kendall และ Siviour (2014) ได้ค้นคว้าผลกระทบของการเติม plasticizer ที่แตกต่างกัน 4 แบบในวัสดุพีวีซี (PVC) รวมถึงผลของอัตราเครียดและอุณหภูมิ โดยทำการทดสอบภายใต้การกดที่อัตราเครียดช่วง 0.0001 ถึง 0.00001 ที่อุณหภูมิห้องในช่วง และการศึกษาผลของอุณหภูมิ -115 ถึง 100 องศาเซลเซียส ที่อัตราเครียด 0.001 s<sup>-1</sup> ทำการทดสอบแบบไดนามิกและวิเคราะห์อุณหภูมิ ซึ่งผลงานวิจัยพบว่าค่าคุณสมบัติ เช่น อีลาสติคโมดูลัส (Elastic modulus) ค่าความเค้นคราก (yield stress) จะขึ้นกับ อุณหภูมิและอัตราเครียด นอกจากนี้ในอุณหภูมิห้องที่อัตราเครียดสูงสามารถเกิดการเปลี่ยนเฟสของพอลิเมอร์ได้

Piero และคณะ (2010) ศึกษาพฤติกรรมที่ขึ้นกับอัตราภาวะเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพอลิยูรีเทนโฟมแบบเซลล์เปิดโดยทำการทดสอบ 3 แบบคือ strain localization, cyclic compression, loading-unloading cycle in the plateau regime และ relaxation และใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยอีลาสติกและวิสโคอีลาสติกโมเดล (Boltzmann model) ซึ่งพบว่าพฤติกรรมของโฟมแบบเซลล์เปิดสามารถอธิบายในแต่ละองค์ประกอบ (แยก elements) ได้ด้วยวิสโคอีลาสติกโมเดลด้วย fractional exponential law ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถอธิบายขอบกร่องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บางแบบได้

Saha และคณะ (2009) ศึกษาพฤติกรรมแบบกึ่งสถิตยศาสตร์ (quasi-static) ของวัสดุพีวีซีโฟม (cross-linked PVC foam) และพอลิยูรีเทนโฟม (PU Foam) ภายใต้แรงกดที่อัตราเครียด (strain rate) 0.001, 0.01 และ 0.1 s<sup>-1</sup> โดยในการทดสอบพีวีซีโฟมทดสอบที่ 3 ความหนาแน่น และ 2 โครงสร้างโฟม ในขณะที่พอลิยูรีเทนโฟมทำการทดสอบที่ 2 ความหนาแน่น ทดสอบในทิศทางความหนา เพื่อหาค่าความเค้นสูงสุด (peak stress) และค่าการดูดซับพลังงาน (energy absorption) พบว่าทั้งสองคุณสมบัติมีค่าขึ้นกับความหนาแน่น โครงสร้างโฟม และอัตราเครียด นอกจากนี้ค่าความเค้นสูงสุดและความหนาแน่นโฟมมีความสัมพันธ์แบบสมการกำลัง (power law) เป็นค่าคงที่ในแต่ละอัตราภาวะ ส่วนในทางโครงสร้างแสดงให้เห็นว่าพอลิยูรีเทนโฟมแบบเซลล์ทรงกลม (PUR) เกิดความเสียหายอย่างสมบูรณ์ที่ 1600 s<sup>-1</sup> พีวีซีโฟมจะถูกกดอัดจนมีความหนาแน่น

เข้าใกล้ความเป็นของแข็ง รวมถึงประเภทของสายโซ่ของเซลล์ โครงสร้างตาข่าย (cross-linked) จะมีความแข็งแรงมากกว่าโครงสร้างเซลล์แบบเส้นตรง (linear) ที่ความหนาแน่นเดียวกัน

Lung, Pinisetty และ Gupta (2013) ทำการศึกษาคุณสมบัติของพอลิไวนิลคลอไรด์ โฟมแบบเซลล์ปิด ที่ความหนาแน่นต่างกันในช่วง  $60 - 250 \text{ kg/m}^3$  ที่อัตราการ  $10^{-4}$ ,  $10^{-3}$  และ  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  พบว่าค่าคุณสมบัติ peak stress, plateau stress มีค่าขึ้นกับความหนาแน่นและค่าอัตราการ และความเสียหายหลักและการเสียรูปของของโฟมจะเกิดจากพฤติกรรมการ โกงของผนังเซลล์ (Bulking of cell wall) นอกจากนี้ยังพบว่า ความสัมพันธ์ของ strain rate ในแต่ละความหนาแน่น โฟมมีลักษณะเป็นสมการกำลัง (power law)

Koohbor (2016) และคณะ ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Length to diameter ratio) และความเร็วในการให้ภาระหรืออัตราการต่อพฤติกรรม ภายใต้แรงกดของวัสดุพอลิยูรีเทน โฟมแบบเซลล์ปิด พบว่าค่าคุณสมบัติของวัสดุจะขึ้นกับอัตราภาระ เมื่ออัตราภาระสูงขึ้น ค่าความเค้นที่วัสดุสามารถรับได้จะสูงขึ้นด้วยเช่นกัน และที่วัสดุที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางน้อย ขึ้นทดสอบสั้น เกิดความเสียหายได้ช้ากว่าชิ้นงานแบบยาว

Yoshimoto และคณะ (2006) ศึกษาผลกระทบของอัตราภาระและอุณหภูมิบนวัสดุพอลิเอไมด์โฟม ที่อัตราการ  $10^{-3}$  ถึง  $10^3 \text{ s}^{-1}$  และอุณหภูมิช่วง  $-190$  ถึง  $270$  องศาเซลเซียส พบว่าความเค้นสูงขึ้นเมื่ออัตราภาระที่ใช้ทดสอบเพิ่มขึ้นจนถึงค่าอัตราการ  $10^3$  ไม่พบว่าอัตราภาระมีผลอีกต่อไป และอุณหภูมิส่งผลต่อพฤติกรรมของวัสดุอย่างมีนัยสำคัญ

### 2.6.3 งานวิจัยด้านการทำนายพฤติกรรม

Briody และคณะ (2012) ทำการศึกษาพฤติกรรมการคืบในระยะยาว (Long-term creep) และพฤติกรรมการคืบในระยะเวลาดสั้น (Short-term creep) ของพอลิยูรีเทน โฟม (Polyurethane foam) จากการทำนายโดยใช้ทฤษฎีการซ้อนทับของเวลาและอุณหภูมิ (Time-temperature superposition) ร่วมกับทฤษฎีของ William Randal Ferry เปรียบเทียบกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 45, 60, 70 และ 83 องศาเซลเซียส แล้วทำการสร้าง Master curve เพื่อใช้ในการทำนายการคืบที่อุณหภูมिनอกช่วง (30 และ 115 องศาเซลเซียส) งานวิจัยนี้พบว่าสมการทำนายโดยใช้ทฤษฎีการซ้อนทับของเวลาและอุณหภูมิ (Time-temperature superposition) ร่วมกับทฤษฎีของ William Randal Ferry มีความแม่นยำ โดยที่ 30 องศาเซลเซียส ทำนายพฤติกรรมได้อย่างแม่นยำถึง 35 วัน และที่ 115 องศาเซลเซียส ทำนายพฤติกรรมได้อย่างแม่นยำถึง 208 วันจากการสร้างกราฟการทำนาย 208 วัน นอกจากนี้ยังพบว่าช่วงเวลาแรกของการทำนายจะมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างแต่ช่วงที่เกิดความคลาดเคลื่อนกินระยะเวลาน้อยกว่า 2% ของ

ช่วงเวลาที่ใช้การทดสอบทั้งหมด และได้เสนอแนะว่าการทำนายโดยใช้สมการของ William Randal Ferry ร่วมด้วยไม่ควรใช้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $T_g$  เนื่องจากค่า  $\log$  จะมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆจนไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงในช่วง  $T_g$

Amiri และคณะ(2015) ศึกษาพฤติกรรม Long-term creep ของ Flax/vinyl ester composite โดยทำการทดสอบ Creep ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อใช้ข้อมูลนี้ในการทำนายพฤติกรรมการคืบตามทฤษฎีการซ้อนทับของเวลาและอุณหภูมิ (Time-temperature superposition) ร่วมกับหลักการซ้อนทับของโบลซมันน์ (Boltzmann superposition principle) โดยสามารถหาค่า Shift factor ได้จากความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียส (Arrhenius) ในการทำนายเปรียบเทียบกับค่าการคืบของการทำนายกับค่าการคืบที่ได้จากกราฟของสมการ Findley Power Law พบว่ามีความใกล้เคียงกัน และแนะนำว่าความสัมพันธ์ของ อาร์เรเนียส (Arrhenius) ควรหลีกเลี่ยงหรือระวังการเปลี่ยนแปลงเฟสในช่วงอุณหภูมิกลายแก้ว (Glass-transition temperature)

Williams และคณะ (1995) ได้ศึกษาพฤติกรรมที่ขึ้นกับอุณหภูมิในพอลิเมอร์อสัณฐาน ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) ที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะสามารถนำไปคำนวณหาค่า Shift factor ได้ พบว่าการเปลี่ยนแปลงตามเวลาจะขึ้นกับปริมาตรอิสระ (Free volume) ที่เปลี่ยนแปลงเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและเวลา สามารถพิสูจน์ได้ว่าพฤติกรรมที่ขึ้นกับอุณหภูมิและเวลาของพอลิเมอร์จะสามารถคาดการณ์ทำนายได้ โดยสมการของ WLF เมื่ออุณหภูมิที่สนใจเท่ากับ  $T_g$  และ  $T_g \pm 50$  และ  $T_g + 50$  (หรือ  $T_g + 100$ ) จะมีสมการความสัมพันธ์แตกต่างกันที่มีพื้นฐานมาจากสมการเดียวกัน

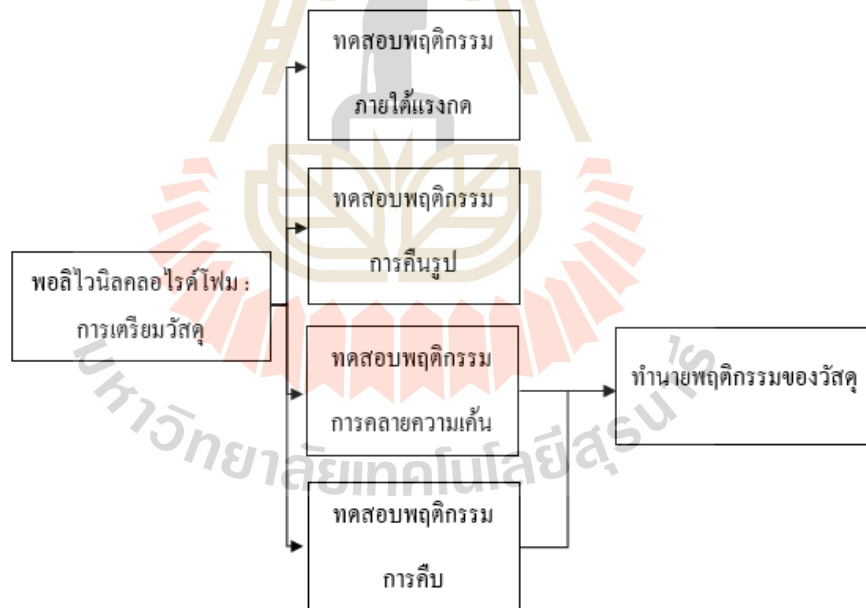
Denay และคณะ (2010) ทำการศึกษาพฤติกรรมการคืบภายใต้ภาวะกด (Compressive creep) โดยพิจารณาผลของขนาดที่ใช้ในการทดสอบเพื่อหาขนาดชิ้นทดสอบที่เหมาะสม ทำการทดสอบโดยใช้พอลิยูรีเทนโฟม (PU Foam) ขนาดความหนาแน่น 130 กิโลกรัมต่อตารางเมตร พบว่าจะต้องมีขนาดอยู่ระหว่าง 8-12 ตารางมิลลิเมตร และในงานวิจัยนี้พบว่าในส่วนการทำนายพฤติกรรมการคืบในระยะยาว (Long term creep) ที่อุณหภูมิต่ำ ไม่สามารถทำนายได้เนื่องจากโฟมที่อุณหภูมิต่ำจะไม่มีสมบัติของวิสโคอิลาสติกจึงไม่ทำให้เกิดการคืบ

Chen (2000) ได้ค้นคว้ารวบรวมแบบจำลองในการทำนายพฤติกรรมของวัสดุแบบวิสโคอิลาสติกและการหาค่าจำเพาะ (coefficients) ของอนุกรมพอร์นีนเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในแบบจำลองการศึกษาพฤติกรรมแบบวิสโคอิลาสติกที่ขึ้นกับอัตราภาระ ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square)

### บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยทำการศึกษาพฤติกรรมแบบวิส โคอีลาสติกของวัสดุพอลิไวนิลคลอไรด์โฟม ประกอบไปด้วย พฤติกรรมการคืนรูป การคลายความเค้น และการคืบ ภายใต้แรงกด เบื้องต้น จำเป็นต้องทราบพฤติกรรมทั่วภายใต้แรงกดของวัสดุโฟม นอกจากนี้ยังทำการศึกษาผลกระทบของ ความหนาแน่น(density) ระดับของความเครียด(stain level) และอัตราการระ(loading rate) ที่ส่งผล ต่อพฤติกรรมดังกล่าว รวมถึงทำนายพฤติกรรมของวัสดุด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วย โปรแกรมช่วยวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ออบาคัส (Abaqus) โดยในบทนี้แบ่งวิธีการดำเนินงานวิจัยได้ 6 ส่วนตามแผนผังการทำงานดังนี้



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงานวิจัย

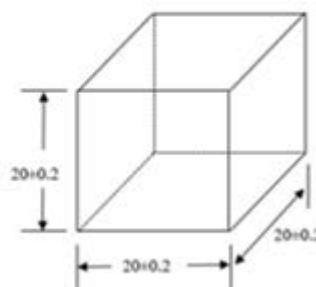
### 3.1 พอลิไวนิลคลอไรด์โฟม

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ คือพอลิไวนิลคลอไรด์โฟมแบบเซลล์ปิดหรือพีวีซีโฟม (Polyvinylchloride Foam : PVC Foam) ทั้งหมดสามความหนาแน่นประกอบด้วย 60, 100 และ 130 kg/m<sup>3</sup> จาก Divinyl cell มีชื่อทางการค้า คือ H60, H100 และ H130 ตามลำดับ วัสดุเริ่มต้นมาในขนาดต่างกัน ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วัสดุ (ซ้าย) PVC Foam H130 (ขวา) H100 และ H60

การเตรียมชิ้นทดสอบ ในทุกการทดสอบจะมีขนาดเดียว ทำการตัดขนาดอย่างหยาบด้วยเครื่องเลื่อยสายพานใบมีด 2 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นทดสอบไปทำการกัดด้วยเครื่องกัดเอนกประสงค์แบบเพลตตั้ง เพื่อให้ชิ้นทดสอบมีความฉากและขนานของแต่ละด้าน แล้วจึงทำการกัดละเอียดให้ได้ขนาดที่ใช้ในการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1621 ที่  $20 \pm 0.2$  ลูกบาศก์ มิลลิเมตร (mm<sup>3</sup>) (Denay และคณะ, 2013) ดังภาพที่ 3.3 หลังจากนั้นนำชิ้นงานเก็บในตู้ควบคุมความชื้นเพื่อรักษาอุณหภูมิและความชื้นก่อนนำไปทดสอบไม่ต่ำกว่า 40 ชั่วโมงตามมาตรฐาน ASTM D1621 (2000)



รูปที่ 3.3 (ซ้าย) ชิ้นทดสอบที่ตัดแล้ว (ขวา) ขนาดที่ตัด

### 3.2 การทดสอบพฤติกรรมภายใต้แรงกด

เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมพื้นฐานของวัสดุวิสโคอิลาสติกภายใต้แรงกด ก่อนจะทำการศึกษาพฤติกรรมแบบวิสโคอิลาสติกอื่นๆ จึงทำการทดสอบพฤติกรรมภายใต้แรงกด ด้วยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine 5569 (UTM 5569) โดยแบ่งการทดสอบเป็นสองประเด็น คือ การทดสอบเพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นภายใต้แรงกด และ การทดสอบเพื่อศึกษาผลของอัตราการภายใต้แรงกด

#### 3.2.1 การทดสอบเพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นภายใต้แรงกด

ในการทดสอบเพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นภายใต้แรงกด จะทำการทดสอบที่อัตราการเดียวคือ 10 มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) ที่สามความหนาแน่น ทั้ง H60, H100 และ H130 ให้ภาระเริ่มต้นประมาณ 2 นิวตัน (N) จากการทดสอบเบื้องต้นพบว่าเป็นค่าที่ไม่เกิดช่องว่างและการเลื่อนไถลระหว่างตัวจับยึด (Grip) กับชิ้นทดสอบ จากนั้นทำการเริ่มทดสอบการกดจนกระทั่งถึงค่าความเครียดประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากในช่วงความเครียดดังกล่าวจะสามารถศึกษาพฤติกรรมวัสดุได้ครบทุกช่วง ทดสอบกำหนดให้หลังจากการทดสอบการเคลื่อนที่ของหัวกด (Crosshead) เป็นแบบเคลื่อนที่กลับ (Return) ผลที่ได้จากการทดสอบนำมาทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียด (Stress – Strain) ค่าความเค้นสูงสุดในช่วงอิลาสติก (Peak stress) ความความเค้นในช่วงคงที่ (Plateau stress) และค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดในช่วงการอัดตัว (% Densification strain) ที่ความหนาแน่นต่างๆ

#### 3.2.2 การทดสอบเพื่อศึกษาผลของอัตราการภายใต้แรงกด

การศึกษากลไกของอัตราการจะทำการจำกัดผลกระทบของความหนาแน่น โดยจะทำการศึกษาเฉพาะที่ความหนาแน่น H130 ทดสอบที่อัตราการ (Loading rate) ต่างๆกัน

ในช่วง 0.1 – 500 มิลลิเมตรต่อนาที ประกอบด้วย 0.1,1,10,100 และ 500 มิลลิเมตรต่อนาที (โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ตัวย่อคือ R0.1 ถึง R500 ตามลำดับ) เจื่อนไขในการทดสอบ การเก็บข้อมูล และการวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆเป็นไปในทางเดียวกันกับการทดสอบ 3.2.1



รูปที่ 3.4 การทดสอบภายใต้แรงกดด้วย UTM 5569

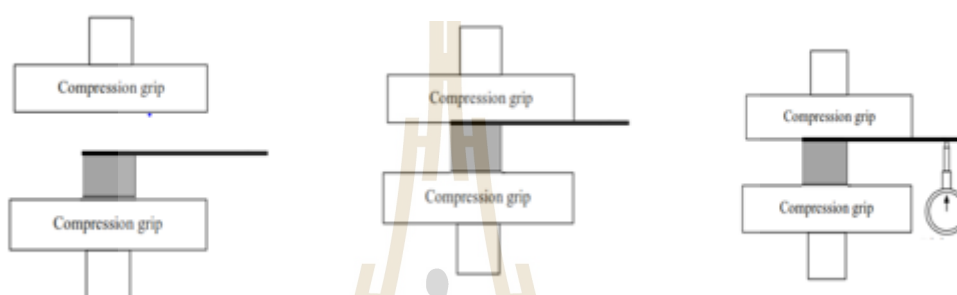
### 3.3 การทดสอบการคืนรูปภายใต้แรงกด

พฤติกรรมการคืนรูปเป็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นหลังจากการปลดภาระ ทำการทดสอบที่ความหนาแน่นเดียวที่ H130 แบ่งการทดสอบเป็นสองช่วง ได้แก่ ช่วงให้ภาระ (Loading) และช่วงปลดภาระ(Unloading) โดยจะทำการศึกษาผลกระทบของอัตราภาระและระดับของความเครียดที่ส่งผลต่อพฤติกรรมดังนี้

- 1) ความเครียดในช่วงอีลาสติกที่ระดับความเค้น 80% ของความเค้นสูงสุดในช่วงอีลาสติก (80% of peak stress)
- 2) ความเครียดที่ 20 เปอร์เซ็นต์ในช่วงความเค้นคงที่ (20% of strain)
- 3) ความเครียดที่ 45 เปอร์เซ็นต์ในช่วงความเค้นคงที่ (45% of strain)

4) ความเครียดที่ 58 เปอร์เซ็นต์ในช่วงการอัดตัว (58% of strain)

ในช่วงให้ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine 5569 (UTM 5569) โดยทำการทดสอบเพื่อศึกษาผลของอัตรากระทำที่อัตรา 0.1, 5 และ 100 mm/min ก่อนทดสอบทำการติดคานยื่นเข้ากับด้านบนขึ้นทดสอบด้วยกาว ความยาวคานเลขตัวจับยึดชิ้นงาน (Grip) ปลายคานด้านที่ยาวออกมาทำการติดตั้งไดอัลเกจ (Dial gauge) เพื่อวัดระยะการคืนรูปหลังปลดภาระ ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการทดสอบการคืนรูปของวัสดุ

เริ่มการทดสอบ โดยให้ภาระที่อัตราต่างๆจนถึงช่วงค่าความเครียดที่กำหนด และให้การเคลื่อนที่ของหัวกด (Crosshead) เป็นแบบหยุด (Stop) ตั้งค่าศูนย์ของไดอัลเกจ หลังจากนั้นเข้าสู่ช่วงปลดภาระ ทำการเคลื่อนที่หัวกดขึ้น วัสดุจะเริ่มคืนตัวทำการอ่านค่าและบันทึกค่าระยะที่เปลี่ยนแปลงไป การเปลี่ยนแปลงในช่วงแรกจะเกิดขึ้นเร็วทำให้ไม่สามารถอ่านค่าด้วยตาได้จึงทำการบันทึกภาพเคลื่อนไหวของการทดสอบ (Video) นำข้อมูลของระยะเริ่มต้น ระยะคืนตัวหลังการทดสอบคำนวณเป็นค่าอัตราส่วนการคืนรูป (Strain Recovery Ratio) ดังสมการที่ (3.1)

$$\text{Strain Recovery Ratio} = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_{total}} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $\varepsilon_r$  คือ ค่าความเครียดหลังปลดภาระ  
 $\varepsilon_{total}$  คือ ค่าความเครียดรวมสุดท้ายก่อนปลดภาระ

Strain Recovery Ratio หากค่าอัตราส่วนการคืนรูปเท่ากับหนึ่ง หมายถึงวัสดุสามารถคืนรูปหลังจากปลดภาระได้ทั้งหมด



### 3.4 การทดสอบการคลายความเค้นภายใต้แรงกด

การคลายความเค้นเป็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเมื่อภาระที่ให้ไว้ในรูปความเครียดคงที่ทำการศึกษาผลของความหนาแน่น ระดับของความเครียด และอัตราภาระที่ส่งผลต่อการคลายความเค้น การศึกษาผลกระทบของความหนาแน่นทำการศึกษาที่ H60, H100 และ H130 ที่อัตราภาระ 1 และ 10 mm/min จำกัดผลกระทบของความเครียดโดยการทำการทดสอบที่ระดับความเครียดที่เท่ากันทั้งสามความหนาแน่น

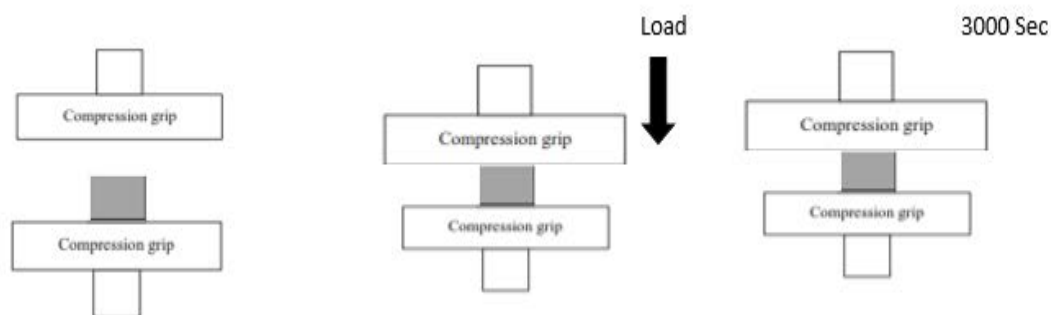
ในส่วนผลกระทบของระดับของความเครียดและอัตราภาระ ทำการศึกษาที่ 6 ระดับความเครียดดังนี้

- 1) ความเครียดที่ 1.8% ในช่วงอีลาสติก (อีลาสติก 1:Elastic 1)
- 2) ความเครียดที่ 2% ในช่วงอีลาสติก (อีลาสติก 2:Elastic 2)
- 3) ความเครียดที่ 2.25% ในช่วงอีลาสติก (อีลาสติก 3:Elastic 3)
- 4) ความเครียดที่ 20% ในช่วงความเค้นคงที่ (Plateau 1)
- 5) ความเครียดที่ 45% ในช่วงความเค้นคงที่ (Plateau 2)
- 6) ความเครียดที่ 58% ในช่วงการอัดตัว (Densification)

โดยที่แต่ละระดับความเครียดจะทำการทดสอบที่อัตราภาระดังตารางที่ 3.1 และวิธีการทดสอบดังรูปที่ 3.5

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขในการทดสอบการคลายความเค้น

ช่วงการทดสอบ	ความเครียดทดสอบ	อัตราภาระ (mm/min)				
		0.1	1	10	100	500
Elastic1	1.80%	/	/	/	/	/
Elastic2	2.00%	/	/	/	/	/
Elastic3	2.25%			/		
Plateau1	20.00%	/	/	/	/	/
Plateau2	45.00%			/		
Densification	58.00%	/	/	/	/	/



รูปที่ 3.6 ทดสอบพฤติกรรมการคลายความเค้น

ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine 5569 (UTM5569) ทำการตั้งค่าการทดสอบให้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงให้ภาระจะทำการให้ภาระกับชิ้นทดสอบจนถึงค่าความเครียดที่กำหนด จากนั้นตั้งค่าให้อัตราภาระเป็นศูนย์เพื่อเข้าสู่ช่วงของการคลายความเค้น ทำการทดสอบจนค่าความเค้นเปลี่ยนแปลงน้อยหรือประมาณ 3000 วินาที หลังจากการหยุดให้ภาระ

การวิเคราะห์ข้อมูลจะทำการวิเคราะห์ค่าความเค้น (Stress) ค่าความเค้นเทียบกับความเค้นสูงสุดหรือเรียกว่าค่าความเค้นปกติ (Normalized Stress,  $\sigma_n$ ) และค่าคอมพลายแอนซ์ของการคลายความเค้น (Compliance,  $J(t)$ ) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา โดยที่ค่าความเค้นเป็นค่าที่ได้จากการที่ทดสอบโดยตรง ส่วนค่าความเค้นเทียบกับความเค้นสูงสุด และค่าคอมพลายแอนซ์ของการคลายความเค้น สามารถหาได้จากสมการที่ 3.2 (Chen, 2000)

$$\sigma_n = \frac{\sigma_{t=t}}{\sigma_{t=0}} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $\sigma_n$  คือ ค่าความเค้นเทียบกับความเค้นสูงสุดที่ช่วงเวลาใดๆ

$\sigma_{t=t}$  คือ ค่าความเค้นที่ช่วงเวลาใดๆ

$\sigma_{t=0}$  คือ ค่าความเค้นสูงสุดที่เวลาเริ่มต้นหลังจากปล่อยภาระที่กระทำ

หากค่าความเค้นเทียบกับความเค้นสูงสุดมีค่าน้อยหมายความว่าวัสดุสามารถคลายความเค้นได้ดี

$$J(t) = \frac{\varepsilon_{t=t}}{\sigma_{t=t}} \quad (3.3)$$

เมื่อ	$J(t)$	คือ	ค่าคอมพลายแอนซ์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา
	$\varepsilon_{t=t}$	คือ	ค่าความเครียดที่ช่วงเวลาใดๆ
	$\sigma_{t=t}$	คือ	ค่าความเค้นที่ช่วงเวลาใดๆ

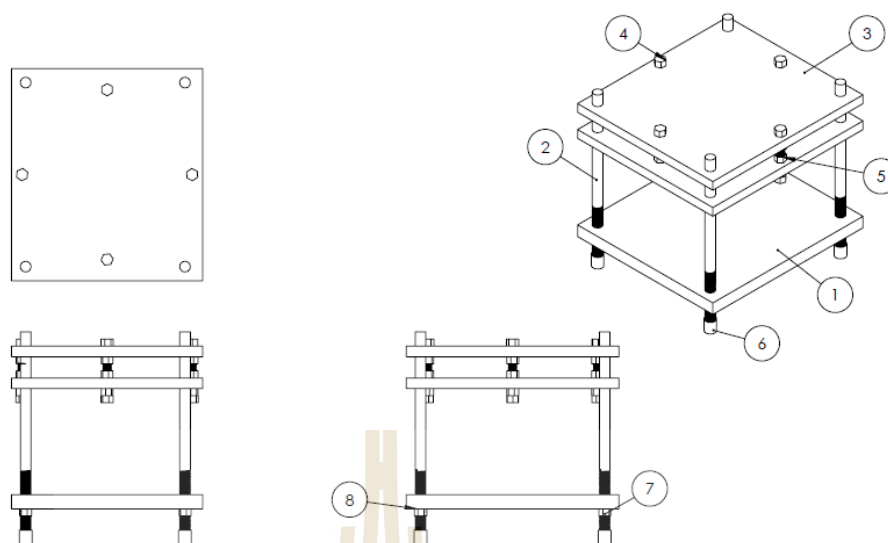
### 3.5 การทดสอบการคืบภายใต้แรงกด

พฤติกรรมการคืบเป็นพฤติกรรมที่มีปัจจัยเกี่ยวเนื่องกับอุณหภูมิ ความเค้น และเวลา งานวิจัยนี้ทำการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมความคืบที่ระดับความเครียด 65 – 80 เปอร์เซ็นต์ของความเค้นสูงสุดในช่วงอีลาสติก ควบคุมอุณหภูมิที่ 28 – 30 องศาเซลเซียส ที่วัสดุความหนาแน่นสูงสุดและต่ำสุดคือ H60 และ H130 การดำเนินงานแบ่งเป็นสองช่วงคือ การออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ และการทดสอบการคืบ

การออกแบบอุปกรณ์การทดสอบอ้างอิงตามงานวิจัยของ Briody และคณะ (2012) โดยปรับให้มีความเหมาะสมกับลักษณะการทดสอบ ในการออกแบบอุปกรณ์การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1621 ได้ระบุว่า เครื่องทดสอบมีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน ประกอบด้วย แผ่นทดสอบที่สามารถเคลื่อนที่ได้ แผ่นทดสอบที่หยุดนิ่ง ในส่วนของความกว้างและความสูงของแผ่นทดสอบได้พิจารณาจากขนาดของผู้ควบคุมอุณหภูมิร่วมด้วย ทำการวิเคราะห์และออกแบบด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟต์ โนต์เอลิเมนต์ ทำการปรับแต่งเพื่อหาขนาดของแผ่นทดสอบที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดภาวะเบื้องต้นกับชิ้นทดสอบ เมื่อได้ขนาดที่ต้องการ ทำการคำนวณน้ำหนักของแผ่นทดสอบจากความหนาแน่นของวัสดุเหล็กที่ใช้ จากความหนาแน่นและปริมาตร

$$\rho = \frac{m}{v} \quad \text{ในหน่วย kg/m}^3 \quad (3.4)$$

ซึ่งจะทำให้สามารถทราบน้ำหนักของแผ่นทดสอบได้ โดยจะได้อุปกรณ์การทดสอบดังรูปที่ 3.7



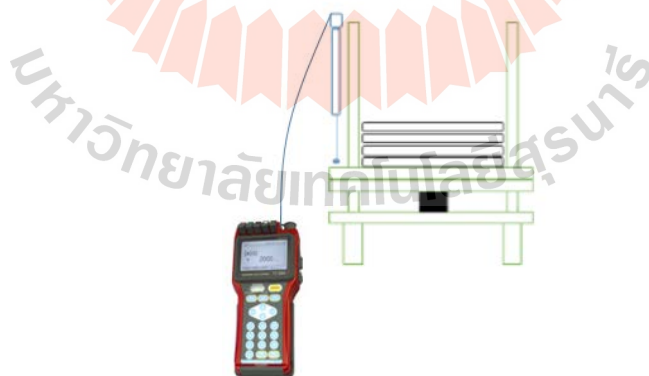
รูปที่ 3.7 การออกแบบอุปกรณ์การทดสอบ

- โดยที่ หมายเลข 1 คือ แผ่นเพลตด้านล่างหรือแผ่นเพลตที่หุขุดหนึ่ง (Plate 1)  
 หมายเลข 2 คือ เสาในแนวตั้งจำนวน 4 เสา (Vertical bar)  
 หมายเลข 3 – 4 คือ แผ่นเพลตกลางและแผ่นเพลตบนกำหนดให้เป็นเพลตเคลื่อนที่ (Plate 2 - 3)  
 หมายเลข 5 คือ น็อตตัวเมียและน็อตตัวผู้ยึดระหว่างเพลตกลางและเพลตบน (Nut)  
 หมายเลข 6 คือ ฐานของเสาในแนวตั้ง (Base)  
 หมายเลข 7 คือ สกรูเพื่อปรับระดับให้เพลตล่างอยู่ในแนวระนาบ (Adjust screw)  
 หมายเลข 8 คือ แหวนรองกันระหว่างสกรูปรับระดับและเพลตด้านล่าง (Washer)
- ก่อนเริ่มทำการทดสอบการคืบ นำผลค่าความเค้นสูงสุดในช่วงอิลาสติกจากการทดสอบพฤติกรรมภายใต้แรงกด ทำการคำนวณหาระดับความเค้นที่จะทำการทดสอบของแต่ละความหนาแน่น โฟม ที่ 65, 70, 75 และ 80 เปอร์เซ็นต์ดังนี้

ตารางที่ 3.2 ค่าความเค้นที่ให้ในการทดสอบ

ระดับของความเค้น(%)	ค่าความเค้นที่ให้ในการทดสอบ (MPa)	
	H60	H130
65	0.32	1.667
70	0.35	1.725
75	0.38	1.864
80	0.40	1.962

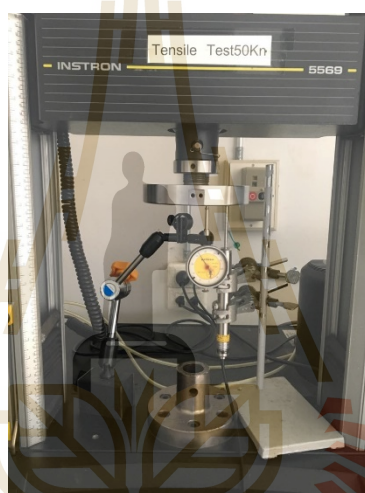
การติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.7 ทำการตั้งเสาทั้งสี่ภายในและแผ่นเพลตที่ 1 ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ เพื่อให้ตรวจสอบว่าการเคลื่อนที่ของแผ่นเพลต 2 และ 3 เป็นไปตามแนวตั้ง (Vertical) และน้ำหนักทั้งหมดกระทำที่ขึ้นทดสอบโดยไม่ถ่วงน้ำหนักลงที่เสา ทำการตรวจสอบแผ่นเพลตด้านล่างให้อยู่ในแนวระนาบด้วยมาตรวัดระดับน้ำ รวมถึงวัดความฉากของเสากับแผ่นเพลต จากนั้นทำการติดตั้งขึ้นทดสอบที่จุดกึ่งกลางของเพลตที่ 1 วางแผ่นเพลตที่ 2 และ 3 ด้านบนขึ้นทดสอบแล้วทำการวัดระนาบและความฉากของเพลตด้านบน สุดท้ายทำการติดตั้งเครื่องมือวัดการเปลี่ยนแปลงขนาด (Displacement Transducers) กับเครื่องบันทึกข้อมูล (Handheld data logger) ให้ภาระเพิ่มเติมกับขึ้นทดสอบตามขนาดที่กำหนดแล้วบันทึกค่า



รูปที่ 3.8 การติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบการคืบ

ผลการทดสอบที่ได้ผู้รูปของการเปลี่ยนแปลงของระยะทางการเคลื่อนที่ต่อเวลา (Displacement) ทำการแปลงค่าวิเคราะห์ในรูปของค่าความเครียด (Strain) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาหรือกราฟความสัมพันธ์ของความเครียดต่อเวลาที่ระดับความเค้นต่างๆ (Creep curve)

เครื่องมือวัดการเปลี่ยนแปลงขนาด (Linear Variable Displacement Transducers: LVDT) รวมเครื่องมือวัดทุกชนิดที่ใช้ในการทดสอบทั้ง ไดอัลเกจ (Dial gauge) และ UTM ถูกปรับเทียบ (Calibration) กับชุดเปรียบเทียบมาตรฐาน (Gauge block) เพื่อสมการปรับเทียบให้ได้ค่าที่ถูกต้อง โดยการปรับเทียบไดอัลเกจและ LVDT เป็นการปรับเทียบโดยตรงกับชุดเปรียบเทียบมาตรฐาน ในขณะที่เครื่องUTM ทำการปรับเทียบผ่านไดอัลเกจอีกครั้ง ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การปรับเทียบเครื่องมือทดสอบ

### 3.6 การทำนายพฤติกรรมของวัสดุ

การทำนายพฤติกรรมของวัสดุเป็นการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาศึกษาและทำนายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นโดยลดปัจจัยด้านเวลา และความไม่แน่นอนต่างๆที่เกิดขึ้นได้ในระหว่างการทดสอบ งานวิจัยทำการศึกษาวิธีการทำนายพฤติกรรมแบบวิสโคอีลาสติก 2 ประเภท คือ พฤติกรรมการคลายความเค้น และ พฤติกรรมการคืบ โดยใช้ผลจากการทดสอบทั้งสองเพื่อทำนายพฤติกรรมในช่วงหรือความหนาแน่นอื่นๆ

#### 3.6.1 การทำนายพฤติกรรมการคลายความเค้น

วิธีการทำนายใช้แบบจำลองทั่วไปของแมกซ์เวลล์ (Generalized Maxwell model) ร่วมกับอนุกรมแบบโพรนี (Prony Series) โดยใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์ในการหาพารามิเตอร์ของ

สมการที่ (2.11) ด้วยโปรแกรมออบาคัส (Abaqus) จากผลการทดสอบที่อัตราการ 0.1, 10 และ 100 mm/min ทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบ ประกอบด้วย ค่าโมดูลัสที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ( $E(t)$ ) ค่าคอมพลายแอนซ์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Compliance,  $J(t)$ ) จากสมการ (3.5)

$$J(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon} \quad (3.5)$$

จากค่าโมดูลัสจะสามารถหาค่าคอมพลายแอนซ์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาได้จากสมการ

$$J(t) = \frac{1}{E(t)} = \frac{\varepsilon}{\sigma(t)} \quad (3.6)$$

เมื่อ  $\sigma(t)$  และ  $\varepsilon$  คือค่าความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบ

เนื่องจากวัสดุแบบวิสโคอีลาสติกมีพฤติกรรมซับซ้อน ในโปรแกรมออบาคัสค่าเริ่มต้นที่ให้อ้างอิงต้องมีการกำหนดเป็นสองส่วน คือพฤติกรรมอีลาสติก จำเป็นต้องใส่ค่าอีลาสติกโมดูลัส (Elastic young modulus) ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson ratio) ด้านพฤติกรรมแบบวิสโคอีลาสติก ต้องทราบค่าโมดูลัสแรงเฉือนปกติที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Normalized Shear stress,  $G_n$ ) โดยโมดูลัสแรงเฉือน ( $G(t)$ ) สามารถหาได้จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัส ( $E(t)$ ) และอัตราส่วนปัวซอง ( $\nu$ ) (สมการที่ 3.7)

$$G(t) = \frac{E(t)}{2(1+\nu)} \quad (3.7)$$

และค่าโมดูลัสแรงเฉือนปกติที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Normalized Shear stress,  $G_n$ ) สามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าโมดูลัสที่เปลี่ยนไปตามเวลา  $G(t)$  และค่าโมดูลัสเริ่มต้น ( $G_{t=0}$ )

$$G_n = \frac{G(t)}{G_{t=0}} \quad (3.8)$$

การให้ค่าเริ่มต้นในโปรแกรมแสดงตามขั้นตอนดังนี้

- 1) เลือกโมดูลในการทดสอบเป็นการกำหนดค่าคุณสมบัติ (Property) เพื่อให้ค่าคุณสมบัติเริ่มต้นกับวัสดุ
- 2) กำหนดค่าคุณสมบัติทางกล (Mechanical) ในช่วงที่หนึ่งคือพฤติกรรมแบบอิลาสติก ให้วัสดุมีรูปแบบประเภทไอโซเมทริกซ์ (Isomeric) โดยระดับของเวลาที่ศึกษาเป็นพฤติกรรมที่ต่อเนื่องยาวนาน (long-term) ข้อมูลที่ให้ประกอบด้วยค่าโมดูลัสของยัง (Young's modulus) และค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson ratio,  $\nu$ )
- 3) กำหนดค่าคุณสมบัติทางกล (Mechanical) เพิ่มข้อมูลของพฤติกรรมแบบวิสโคอิลาสติก (Viscoelastic) โดยศึกษาบนโดเมนของเวลา (Time) และข้อมูลที่ศึกษาคือพฤติกรรมการคลายความเค้น (Relaxation test data) จากนั้นกำหนดจำนวนของอนุกรมสูงสุดที่อาจเกิดขึ้นได้
- 4) เลือกข้อมูล (Test data) หรือค่าเริ่มต้นที่กำหนดให้คือ ค่าโมดูลัสแรงเฉือน (Shear test data) แล้วใส่ค่าของเวลากับค่าโมดูลัสแรงเฉือนปกติที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาในคอลัมน์ (Time and  $\eta_s/gR$ )
- 5) ก่อนการประมวลผล (Evaluate) ทำการตรวจสอบค่าข้อมูลเริ่มต้นที่ให้ (Available input data) และค่าผลตอบแทนที่ต้องการ (Normalized Response Plots) แล้วจึงสั่งให้โปรแกรมประมวลผล

ในแต่ละอัตราภาวะจะได้ค่าคงที่ของโพรนิ (Prony constant,  $P_i$ ) และค่าคงที่เวลาของโพรนิ (Prony time constant,  $\tau_i$ ) ตามจำนวนอนุกรม การวิเคราะห์ที่อยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราภาวะและพารามิเตอร์ของอนุกรมโพรนิ หากค่าพารามิเตอร์ของโพรนิที่อัตราภาวะอื่นๆ (1 และ 100 mm/min) แทนค่าในสมการรูปทั่วไปของแมกซ์เวลล์และอนุกรมโพรนิ ผลลัพธ์จะอยู่ในรูปค่าคอมพลายแอนซ์ที่เกิดจากการทำนายของที่อัตราภาวะนอกเหนือการทดสอบ แล้วจึงทำการเปรียบเทียบค่าคอมพลายแอนซ์จากการทำนายกับค่าจากการทดสอบจริง

### 3.6.2 การทำนายพฤติกรรมการคืบ

งานวิจัยมีจุดมุ่งหมายในการศึกษาและทำนายพฤติกรรมการคืบที่เกี่ยวข้องกับความหนาแน่นของวัสดุ อ่างหลักการของทฤษฎีหลักการซ้อนทับของความเค้นและเวลา กล่าวว่าการคืบที่ความเค้นต่างๆจะเกิดขึ้นเหมือนกันแต่เกิดที่เวลาแตกต่างกัน ประยุกต์เป็นหลักการซ้อนทับของระดับความเค้นและอัตราการคืบ ที่ระดับความเค้นต่างๆจะเกิดพฤติกรรมที่คล้ายกันแตกต่างกันที่ความเร็วในการเกิดหรืออัตราการคืบ ทำการหาค่าประกอบของความเค้น (Stress component) และค่าคงที่จากสมการของอัตราการคืบ (Creep Rate) ที่ค่าความหนาแน่น H60 และ H130 แล้วสร้างกราฟเพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ของการคืบและความหนาแน่นของวัสดุ



## บทที่ 4

### พฤติกรรมภายใต้ภาวะแบบกึ่งสถิตยศาสตร์

ภายใต้ภาวะแบบกึ่งสถิตยศาสตร์หรือภาวะกึ่งสมดุล (Quasi-static) วัสดุจะมีการเปลี่ยนจากสถานะหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่ง และมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ ซึ่งจะมีพฤติกรรมที่แตกต่างกับพฤติกรรมแบบสถิตยศาสตร์ (Statics) และพลศาสตร์ (Dynamic) ซึ่งในงานวิจัยการทดสอบที่อยู่ภายใต้รูปแบบการดังกล่าวประกอบด้วย พฤติกรรมภายใต้แรงกด พฤติกรรมการคืนรูปภายใต้แรงกด และพฤติกรรมการคลายความเค้นภายใต้แรงกด

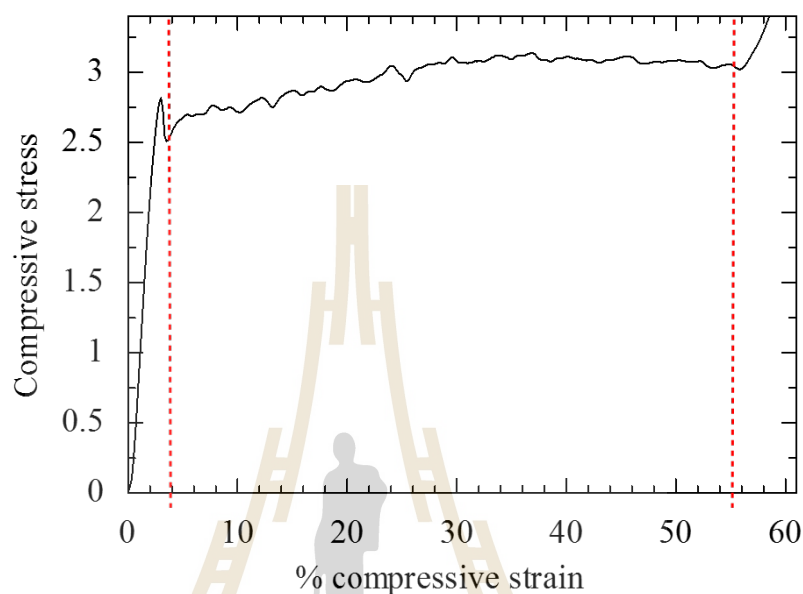
#### 4.1 ผลการทดสอบพฤติกรรมภายใต้แรงกด

พฤติกรรมทั่วไปภายใต้แรงกดพิจารณาผลกระทบของความหนาแน่นและอัตราภาระที่ให้กับวัสดุ โดยที่ผลกระทบของความหนาแน่นศึกษาที่ความหนาแน่นโฟม H60, H100 และ H130 จำกัดผลกระทบของอัตราภาระที่ 10 มิลลิเมตรต่อนาที ส่วนผลกระทบของอัตราภาระจำกัดผลของความหนาแน่นด้วยการศึกษาบนความหนาแน่นเดียวที่ H130 ที่อัตราภาระ 0.1, 1, 10, 100 และ 500 มิลลิเมตรต่อนาที ภายใต้แรงกดความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแสดงดังรูปที่ 4.1 สามารถแบ่งพฤติกรรมเป็นสามช่วงคือ ช่วงอีลาสติก (Elastic region) ช่วงความเค้นคงที่ (Plateau region) และช่วงการอัดตัว (Densification region)

ช่วงอีลาสติก ค่าความเค้นจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจากค่าความเครียดที่เปลี่ยนแปลงไม่มาก เกิดพฤติกรรมการคดของผนังเซลล์ (Bending of cell wall) ความเค้นที่สูงเนื่องจากวัสดุยังมีความสามารถในการรับภาระได้ดีและยังไม่เกิดความเสียหาย จนถึงค่าความเค้นสูงสุดค่าหนึ่งเรียกว่า ค่าความเค้นสูงสุดในช่วงอีลาสติก (Peak stress in elastic region/Peak stress) จากนั้นความเค้นจะลดลงเนื่องจากเกิดเริ่มเกิดความเสียหายของเซลล์ พฤติกรรมจะเข้าสู่ช่วงค่าความเค้นคงที่

ช่วงความเค้นคงที่ เป็นช่วงที่ค่าความเค้นเปลี่ยนแปลงน้อยและมีลักษณะขึ้น-ลง สลับกันไป เนื่องจากความเสียหายของเซลล์เป็นไปอย่างต่อเนื่อง ภายในเซลล์เกิดพฤติกรรมแบบการ โกงแบบอีลาสติก (Elastic bulking) และเกิดการเสียหายแบบไม่สามารถคืนรูปได้ (Plastic yielding) ตามมุมขอบของเซลล์ (Edge) หลังจากนั้นภาระที่กระทำอย่างต่อเนื่องจะทำให้เกิดการพังทลาย (Collapse) จนผนังเซลล์ด้านตรงข้ามมาบรรจบหรือสัมผัสกัน (Touching of cell wall) เมื่อเซลล์เกิด

ความเสียหายจนไม่สามารถรับภาระได้จะทำให้การเปลี่ยนแปลงขนาดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเกิดขึ้นเข้าสู่ช่วงการอัดตัว ความเค้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้ง เนื่องจากเซลล์เกิดความเสียหายเกือบทั้งหมด (Collapse) โครงสร้างทั้งหมดของพอลิเมอร์โฟมเสียหายอย่างทั่วถึง



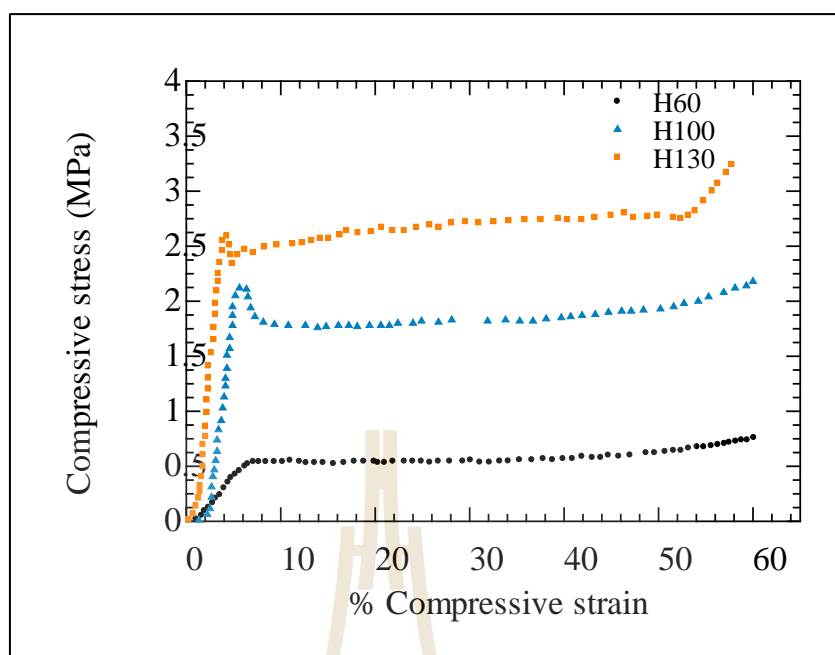
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดภายใต้แรงกด

#### 4.1.1 ผลกระทบของความหนาแน่นภายใต้แรงกด

ผลกระทบของความหนาแน่นภายใต้แรงกด พิจารณาในรูปของค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบแรงกดที่ความหนาแน่นต่างภายใต้อัตราภาระเดียวกัน ประกอบด้วย ค่าความเค้นสูงสุดในช่วงอีลาสติก (Peak stress) ค่าความเค้นคงที่ (Plateau stress) และค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดที่เข้าสู่ช่วงการอัดตัว (% Densification strain) แสดงดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติภายใต้แรงกดที่ความหนาแน่นต่างกัน

Density	Compressive Modulus (MPa)	Peak stress (MPa)	Plateau stress (MPa)	%Densification strain
H60	55.12	0.55	0.50	51
H100	71.04	2.10	1.81	53
H130	117.64	2.81	3.09	56



รูปที่ 4.2 การตอบสนองต่อความเค้นและความเครียดที่ความหนาแน่นต่างกัน

จากผลการทดสอบตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 แสดงผลการตอบสนองต่อความเค้นและความเครียดที่ความหนาแน่นต่างกัน เมื่อความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ทั้งมอดูลัสแรงกด ค่าความเค้นสูงสุดในช่วงอีลาสติก ค่าความเค้นคงที่ สูงขึ้นสาเหตุเนื่องจากปัจจัยของความแข็งแรงของเซลล์ ในขนาดที่ปริมาตรของวัสดุทั้งสามเท่ากัน ที่ความหนาแน่นต่ำจะมีโพรงหรือช่องว่างภายในจำนวนมากและมีเนื้อวัสดุน้อย ในขณะที่โฟมความหนาแน่นสูงมีโพรงหรือช่องว่างภายในเซลล์น้อยกว่า มีส่วนที่เป็นเนื้อวัสดุมากกว่า เนื่องจากส่วนที่รับภาระได้คือส่วนที่เป็นของแข็งหรือเนื้อวัสดุ ทำให้ที่ความหนาแน่นสูงสามารถรับภาระได้มากกว่า ต้องใช้ภาระที่สูงกว่าจึงทำให้เกิดความเสียหายกับวัสดุได้ นอกจากนี้เนื่องจากโฟมที่มีความหนาแน่นสูงนั้นมีช่องว่างอยู่ในน้อยกว่าจึงทำให้พฤติกรรมเปลี่ยนแปลงขนาดเข้าสู่ช่วงอัดตัว (Densification) ซึ่งหมายถึงวัสดุเข้าสู่สถานะใกล้เคียงความเป็นของแข็ง (Rigid) ได้เร็วกว่า และมีช่วงความเค้นคงที่ (Plateau) สั้นกว่าโฟมที่มีความหนาแน่นต่ำ นอกจากนี้สังเกตได้ว่าที่ความหนาแน่นต่ำ (H60) จะมีการตอบสนองที่แตกต่างจากความหนาแน่นสูง เนื่องจากค่าความเค้นเข้าสู่ช่วงค่าความเค้นคงที่ (Plateau) ไม่เป็นไปอย่างชัดเจน การตอบสนองลักษณะนี้เรียกว่าเป็นรูปแบบของโฟมแบบอีลาสติก (Elastomeric Foam) พฤติกรรมเกิดจากการ โกงของเซลล์ (Elastic bulking) จากการที่มีโพรงอากาศมากภายในเซลล์ ในขณะที่โฟมความหนาแน่นสูงมีการตอบสนองเป็นแบบอีลาสติก-พลาสติก

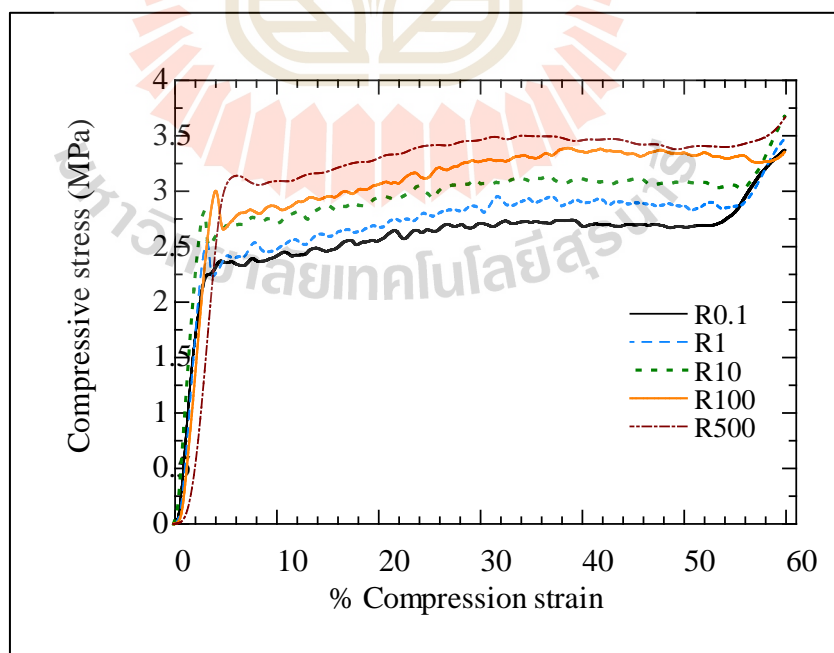
(Elastomeric-plastic Foam) ที่มีการเข้าสู่ช่วงความเค้นคงที่ (Plateau) อย่างชัดเจนจากพฤติกรรมการพังของของเซลล์ (Plastic hinges) (De Brvies, 2009)

#### 4.1.2 ผลกระทบของอัตราภาระภายใต้กด

จากการทดสอบที่อัตราภาระต่างกันตั้งแต่อัตราภาระต่ำ จนถึงอัตราภาระสูง ที่ 0.1 ถึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที ทำการหาค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบเช่นเดียวกันกับการทดสอบผลกระทบของความหนาแน่น ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติภายใต้แรงกดที่อัตราภาระ (loading rate) ต่างกัน

Loading rate (mm/min)	Compressive Modulus (MPa)	Peak stress (MPa)	Plateau stress (MPa)
0.1	83.89	2.23	2.70
1	103.80	2.53	2.89
10	117.64	2.81	3.09
100	128.19	2.99	3.35
500	147.61	3.13	3.46

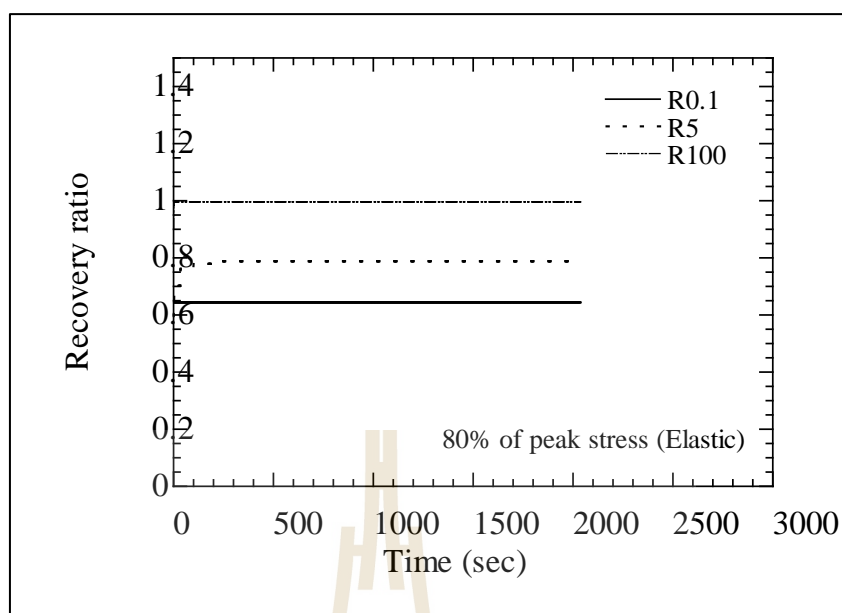


รูปที่ 4.3 การตอบสนองต่อความเค้นและความเครียดที่อัตราภาระต่างกัน

จากตารางที่ 4.2 คุณสมบัติภายใต้แรงกดที่อัตราภาระ (Loading rate) ต่างกัน และรูปที่ 4.3 กราฟการตอบสนองต่อความเค้นและความเครียดที่อัตราภาระต่างกัน พบว่าเมื่ออัตราภาระสูงขึ้น ค่าความเค้นทั้งสาม ได้แก่ มอดูลัสแรงกด ค่าความเค้นสูงสุดในช่วงอีลาสติก และค่าความเค้นคงที่มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเสียหายในวัสดุพอลิเมอร์เป็นพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลา หมายความว่าความเสียหายสามารถเกิดขึ้นได้มากเมื่อมีระยะเวลาในการทดสอบนาน ที่อัตราภาระต่ำวัสดุจะมีเวลาในการเปลี่ยนแปลงขนาดนานกว่าที่อัตราภาระสูง จึงทำให้ความเสียหายของเซลล์อันได้แก่ การคดของขอบเซลล์ (Bending of cell edge) และการโก่งตัวของผนังเซลล์ (Buckling of cell wall) เกิดขึ้นได้มาก ดังนั้นภาระที่ให้กับวัสดุแม้ไม่สูงมากหรือไม่เกินช่วงอีลาสติกก็สามารถทำให้เกิดความเสียหายต่อเซลล์ได้ไม่ว่าความหนาแน่นจะมากหรือน้อยโดยจะสามารถเกิดพฤติกรรมแบบอีลาสติกได้มากน้อยแตกต่างกันที่ปรากฏในหัวข้อ 4.1.1 การที่วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดอย่างช้าตามเวลาและเสียหายได้ภายใต้ภาระในช่วงอีลาสติก กรณีนี้กล่าวได้ว่าวัสดุเกิดการคืบ (Creep) ร่วมด้วย ขณะที่อัตราภาระสูงจะเกิดการคดของขอบเซลล์ (Bending of cell edge) และการโก่งตัวของผนังเซลล์ (Buckling of cell wall) เกิดขึ้นได้น้อย ส่งผลให้เซลล์ยังคงความแข็งแรงและต้องอาศัยภาระที่สูงกว่าเพื่อทำให้เกิดความเสียหาย นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราภาระไม่ส่งผลกระทบต่อเปอร์เซ็นต์ความเครียดที่เข้าสู่ช่วงการอัดตัวเนื่องจากคุณสมบัติส่วนดังกล่าวขึ้นกับความหนาแน่นเท่านั้น

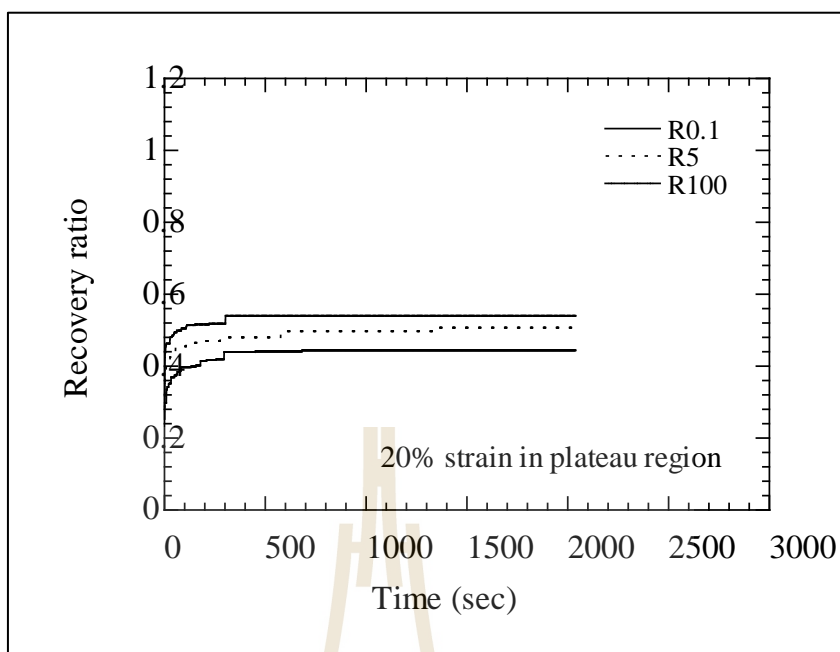
#### 4.2 ผลการทดสอบพฤติกรรมการคืบรูปภายใต้แรงกด

ผลการทดสอบการคืบรูปของวัสดุโฟมภายใต้แรงกด พิจารณาผลกระทบของระดับความเครียด ที่ความเครียดในช่วงอีลาสติก (80% of Peak stress) ความเครียดในช่วงพลาสติกหรือช่วงคงที่ (20% และ 45% ของความเครียด) และความเครียดในช่วงบีบอัด (58% ของความเครียด) รวมถึงผลกระทบของอัตราภาระที่ 0.1, 5 และ 100 มิลลิเมตรต่อวินาที ผลแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบรูปที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาดังรูปที่ 4.4 ถึงรูปที่ 4.6

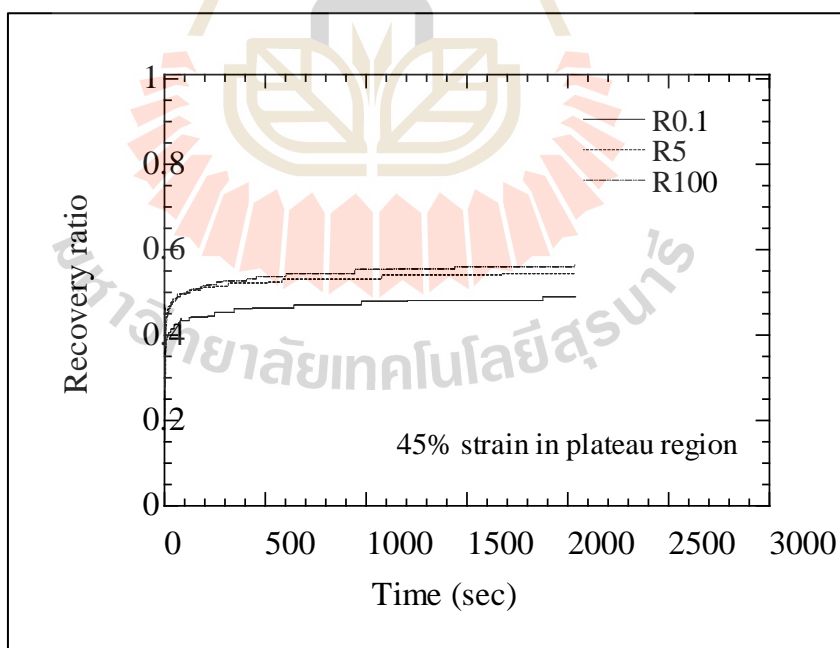


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืนรูปที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาในช่วงอีลาสติก

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืนรูปที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่อัตราการ 0.1, 5 และ 100 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยให้ภาระถึง 80 เปอร์เซ็นต์ของความเค้นสูงสุดในช่วงอีลาสติก แล้วปล่อยให้คืนตัวตามเวลา พบว่าที่อัตราการสูงอัตราการคืนรูป (Recovery Ratio) มีค่าใกล้เคียง 1 นั่นคือวัสดุสามารถคืนรูปได้มากหรือเกือบทั้งหมด เนื่องจากที่อัตราการสูง เวลาที่ใช้ทดสอบจะสั้นกว่า เมื่อกำหนดให้ทดสอบถึงค่าระดับความเครียดเท่ากัน วัสดุจึงมีเวลาในการเกิดความเสียหายน้อย พฤติกรรมที่เกิดขึ้นจึงยังอยู่ในช่วงอีลาสติกทำให้เกิดการคืนรูป (Recovery) ได้เกือบทั้งหมด ในขณะที่เมื่ออัตราการลดลง เวลาที่ใช้ในการทดสอบนานขึ้น ส่งผลให้เกิดความเสียหายจากการคืบ (Creep) ได้มาก ซึ่งความเสียหายจากการคืบนี้จะไม่สามารถคืนรูปได้ ส่งผลให้อัตราการคืนรูปมีค่าลดลงซึ่งหมายความว่าวัสดุสามารถคืนรูปได้น้อยลง แม้การทดสอบจะเกิดขึ้นที่อัตราการไม่สูงหรือเกิดในช่วงอีลาสติก หากทดสอบที่อัตราการต่ำวัสดุจะสามารถเกิดพฤติกรรมการคืบได้ จึงทำให้ที่อัตราการต่ำวัสดุไม่สามารถคืนรูปได้ทั้งหมดหรืออัตราการคืนรูปต่ำกว่า 1 ดังสมการ (3.1)



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืนรูปที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่ 20% ของความเครียด



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืนรูปที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่ 45% ของความเครียด

จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืนรูปที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา โดยการทดสอบในช่วง 20 และ 45 เปอร์เซ็นต์ของความเครียด ซึ่งเป็นช่วงความเค้นคงที่ โดยทำการทดสอบที่อัตราภาวะ 0.1, 5 และ 100 มิลลิเมตรต่อนาที ผลแสดงให้เห็นว่าอัตราการคืนรูปจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราภาวะสูงเนื่องจากไม่เกิดความเสียหายหรือการเปลี่ยนแปลงขนาดอย่างช้าดังที่อัตราภาวะต่ำ ทำให้สามารถคืนรูปได้มากกว่า นอกจากนี้สังเกตว่าอัตราการคืนรูปจะลดลงตามระดับความเครียดในการทดสอบ เนื่องจากเมื่อเข้าช่วงความเค้นคงที่ พฤติกรรมจะเกิดการ โกง (Elastic bulking) และเกิดการเสียรูปแบบไม่สามารถคืนตัวได้ (Plastic yielding) ซึ่งเมื่อระดับความเครียดในการทดสอบเพิ่มขึ้น จำนวนเซลล์ที่เสียหายแบบไม่สามารถคืนตัวได้มีมากขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งเซลล์ที่มีพฤติกรรมแบบอลาสติกเท่านั้นที่สามารถคืนรูปได้ จึงทำให้อัตราการคืนรูปลดลง เนื่องจากเซลล์ที่มีพฤติกรรมอลาสติกลดลง นอกจากนี้พฤติกรรมการคืบยังคงร่วมอยู่เช่นเดิมโดยที่อัตราภาวะสูงการคืบจะเกิดขึ้นน้อยกว่าที่อัตราภาวะต่ำ เนื่องจากเวลาในการเปลี่ยนแปลงขนาดที่มากทำให้จำนวนเซลล์ที่มีพฤติกรรมแบบคดงอ (Elastic bending of cell wall) มีมากที่อัตราภาวะต่ำ ซึ่งเซลล์เหล่านี้พร้อมจะเกิดความเสียหายเมื่อระดับความเค้นที่เวลานานขึ้น

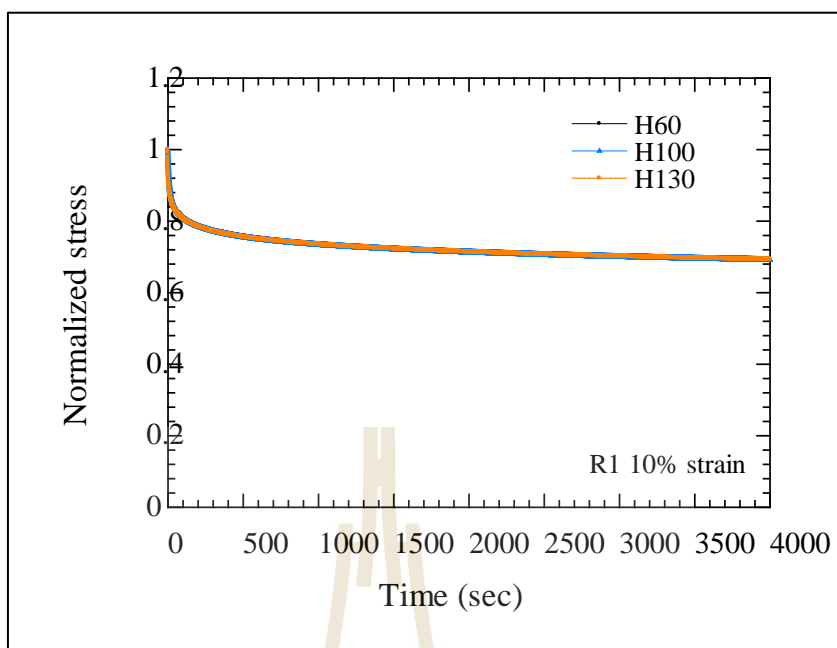
#### 4.3 ผลการทดสอบพฤติกรรมการคลายความเค้นภายใต้แรงกด

ผลการคลายความเค้นวิเคราะห์ในรูปของค่าความเค้นปกติ (Normalized stress) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าความเค้นที่เปลี่ยนไปตามเวลาหลังปลดภาวะเทียบกับค่าความเค้นเริ่มต้น ณ จุดปลดภาวะ ค่าความเค้นปกติที่ได้ก็คือค่าความเค้นที่กระทำกับวัสดุซึ่งแปรผกผันกับค่าความเค้นที่คลายได้ โดยแบ่งการวิเคราะห์เป็นสามส่วน ได้แก่ ผลกระทบของความหนาแน่นต่อการคลายความเค้น ผลกระทบของอัตราภาวะต่อการคลายความเค้น และผลกระทบของระดับความเครียดต่อการคลายความเค้น

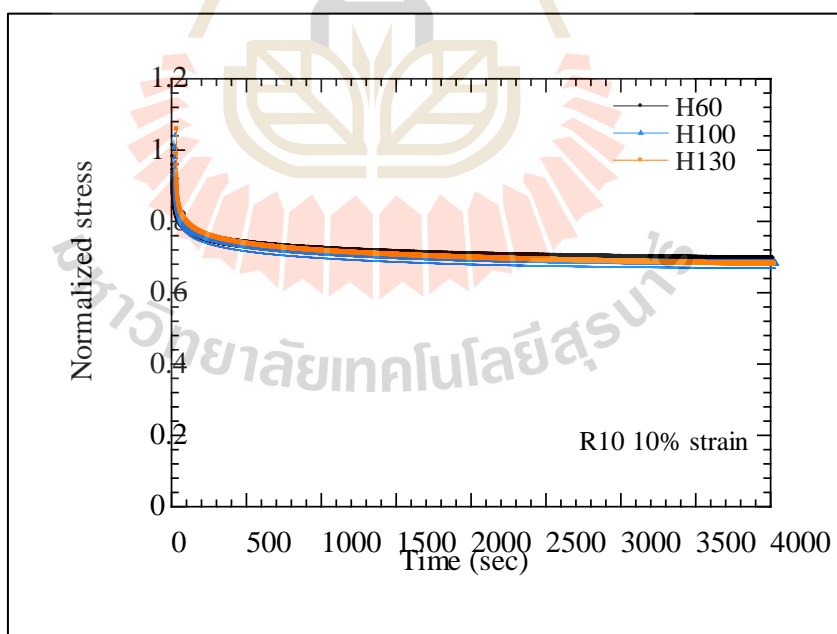
##### 4.3.1 ผลกระทบของความหนาแน่นต่อพฤติกรรมการคลายความเค้น

การศึกษาผลของความหนาแน่นทำการทดสอบที่ทุกความหนาแน่น คือ H60, H100 และ H130 ที่อัตราภาวะ 1 และ 10 มิลลิเมตรต่อนาที โดยค่าระดับความเครียดทดสอบเท่ากัน





รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นปกติ (normalized stress) และเวลา ที่อัตราภาวะ 1 mm/min

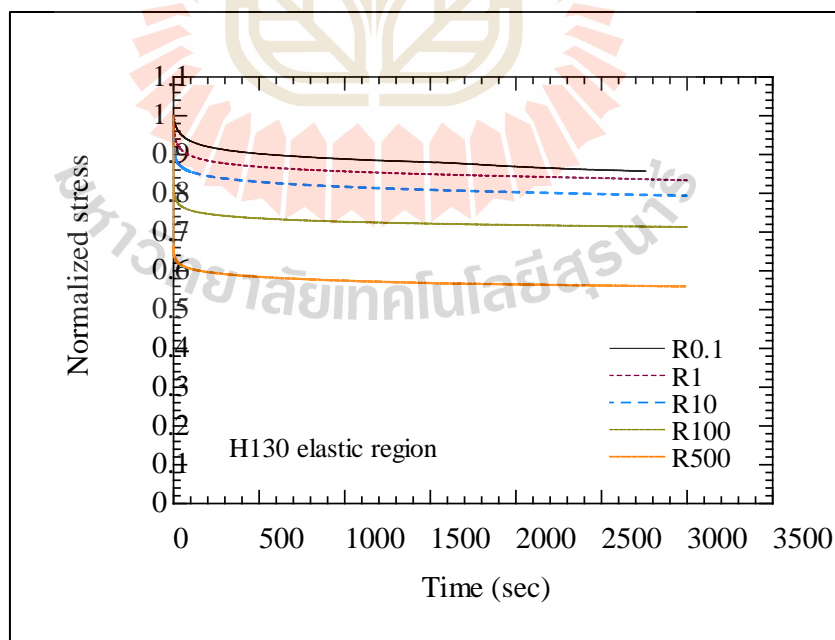


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นปกติ(normalized stress) กับเวลา อัตราภาวะ 10 mm/min

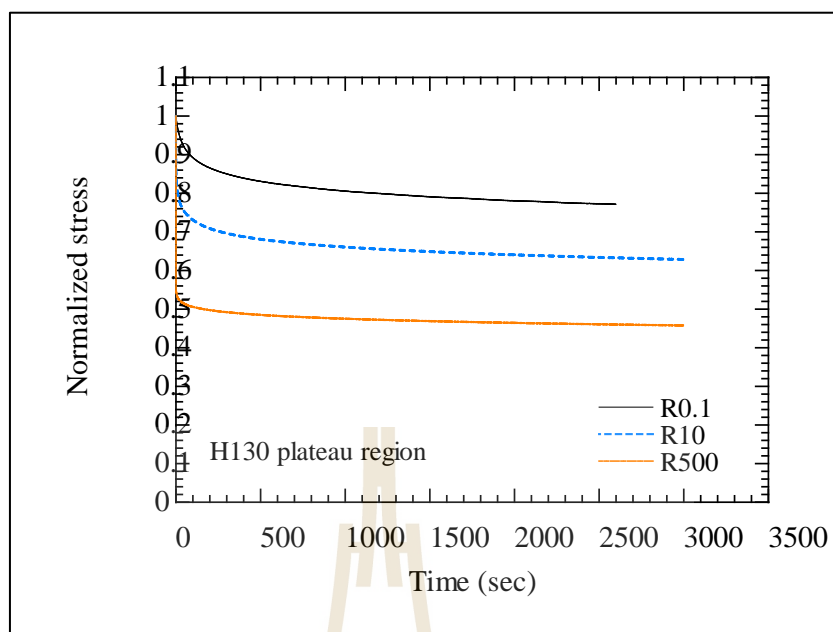
จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นปกติกับเวลาของพีวีซีโฟมความหนาแน่น 60, 100 และ 130 kg/m<sup>3</sup> ที่อัตราการกระ 1 และ 10 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าที่อัตราการกระเดียวกัน ค่าความเค้นปกติมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากเมื่อทำการพิจารณาในรูปแบบความเค้นปกติ (Normalized Stress) สามารถทำได้โดยนำค่าความเค้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาหารด้วยความเค้นเริ่มต้นก่อนจะเกิดการคลายความเค้น ซึ่งเป็นการลดผลกระทบของความเค้นเริ่มต้นที่แตกต่างกันในแต่ละความหนาแน่นหรือกล่าวคือเป็นการลดผลกระทบของความหนาแน่น ดังนั้นค่าความเค้นปกติหรือสัดส่วนของการคลายความเค้นจึงได้รับผลมาจากสมบัติของวัสดุที่นำมาทำโฟม เมื่อทำการทดสอบบนโฟมจากวัสดุเดียวกันผลที่ได้จึงไม่แตกต่าง

#### 4.3.2 ผลกระทบของอัตราการกระต่อพฤติกรรมการคลายความเค้น

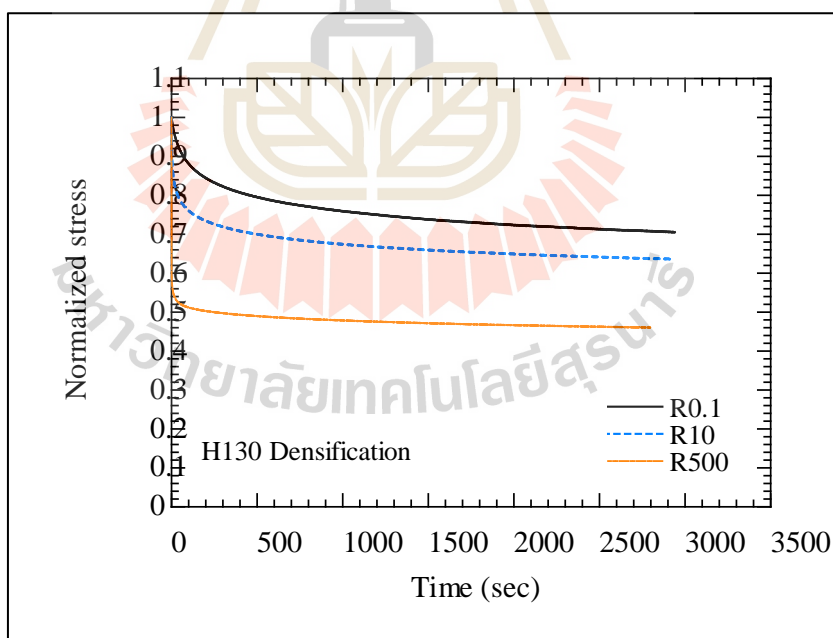
ผลการทดสอบผลกระทบของอัตราการกระ ความหนาแน่น H60 และ H100 ทำการทดสอบที่สองอัตราการกระที่ 1 และ 10 มิลลิเมตรต่อนาที ในช่วงระดับความเครียดเดียวกัน ส่วนความหนาแน่น H130 ทำการศึกษาที่อัตราการกระ 0.1, 1, 10, 100 และ 500 มิลลิเมตรต่อนาที ในช่วงอิลาสติก (2% ของความเครียด) แสดงดังภาพ 4.9 และที่อัตราการกระ 0.1, 10 และ 500 มิลลิเมตรต่อนาทีที่ระดับความเครียดในช่วงพลาสติกและช่วงบีบอัด (20% และ 58% ของความเครียด) แสดงดังรูปที่ 4.10 และ 4.11



รูปที่ 4.9 ความเค้นปกติ(normalized stress) และเวลาที่อัตราการกระต่างกันช่วงอิลาสติก



รูปที่ 4.10 ความเค้นปกติ (normalized stress) และเวลาที่อัตราภาระต่างกันช่วงพลาสติก



รูปที่ 4.11 ค่าความเค้นปกติ (normalized stress) และเวลา ที่อัตราภาระต่างกันช่วงบีบอัด

จากรูปที่ 4.9, 4.10 และ 4.11 แสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นปกติกับเวลา ที่อัตราภาระ 0.1, 10 และ 100 มิลลิเมตรต่อนาที โดยทำการทดสอบในช่วงอิลาสติก ช่วงความเค้นคงที่ และช่วงการอัดตัวตามลำดับ พบว่าที่อัตราภาระสูงขึ้นคลายความเค้นได้ดีกว่าที่อัตราภาระต่ำ เนื่องจากที่อัตราภาระต่ำสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดตามเวลาได้มากกว่า และเกิดพฤติกรรมการคืบร่วม โดยการคืบนั้นเป็นกระบวนการที่ไม่สามารถย้อนกลับได้ กล่าวคือความเค้นที่ทำให้เกิดการคืบจะไม่สามารถคลายตัวได้ และอัตราภาระการทดสอบจะเกิดการคืบร่วมไม่เท่ากัน ที่อัตราภาระต่ำการคืบร่วมจะเกิดขึ้นมากทำให้สามารถคลายความเค้นได้น้อย ในขณะที่อัตราภาระสูงมีการคืบร่วมน้อยกว่า ทำให้สามารถคลายความเค้นได้มากกว่า



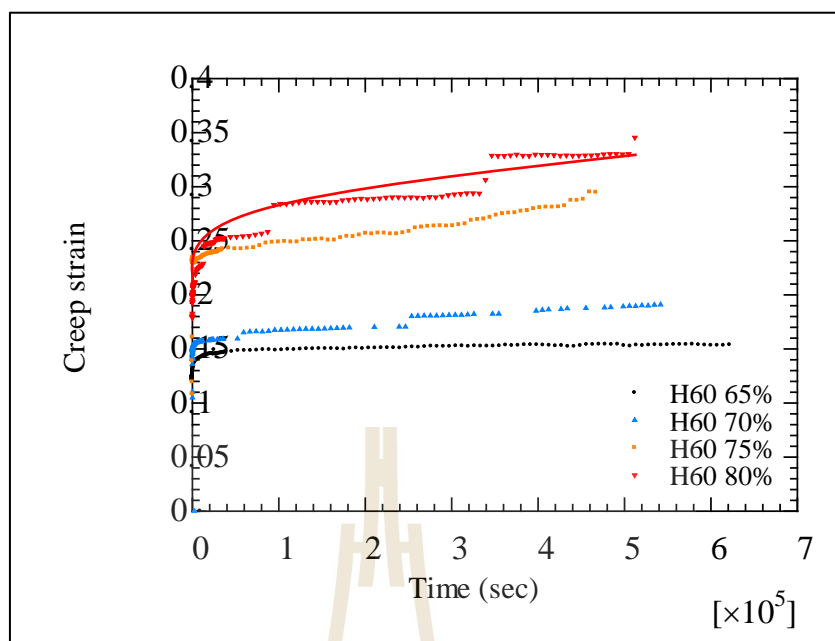
## บทที่ 5

### พฤติกรรมการคืบและการทำนายพฤติกรรมของวัสดุ

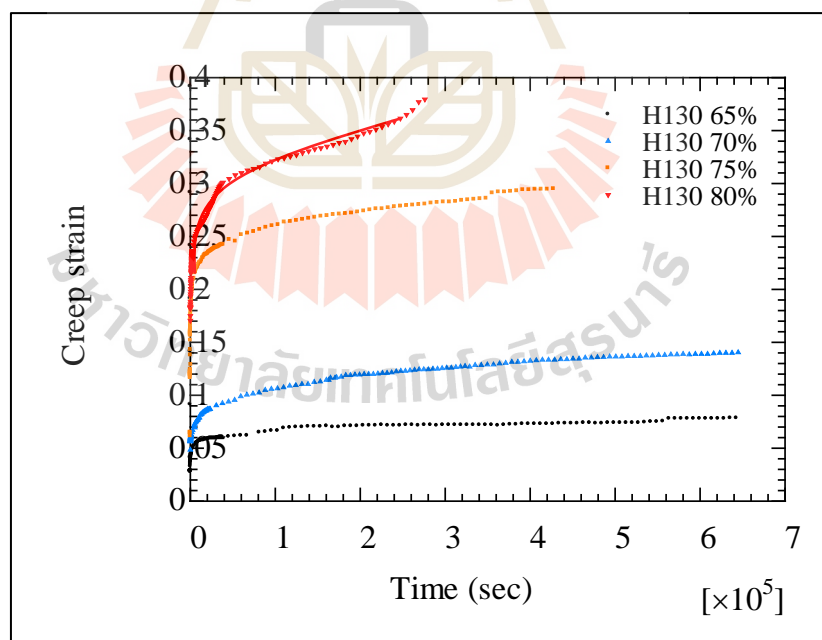
พฤติกรรมการคืบอยู่ภายใต้ภาวะแบบสถิตศาสตร์ (Statics) หรือภาวะคงที่เป็นเวลานาน พฤติกรรมเป็นการเปลี่ยนแปลงขนาดอย่างช้าตามเวลาซึ่งแตกต่างกับพฤติกรรมแบบกึ่งสถิตศาสตร์ (Quasi-Statics) ในบทที่ 4 ที่มีการเปลี่ยนแปลงหรือการให้ภาระอย่างรวดเร็วกับวัสดุ การทดสอบการคืบให้ภาระคงที่กับวัสดุพีวีซีโฟมความหนาแน่นสูงและต่ำ (H60 และ H130) ที่ 4 ระดับความเค้นคือ 65, 70, 75 และ 80% ของความเค้นสูงสุดในช่วงอีลาสติก และนำมาทำนายผลของพฤติกรรมการคืบ

#### 5.1 ผลการทดสอบพฤติกรรมการคืบภายใต้แรงกด

การทดสอบพฤติกรรมการคืบภายใต้แรงกดที่ระดับความเค้น 65, 70, 75 และ 80% ของความเค้นสูงสุดในช่วงอีลาสติก ที่อุณหภูมิ 28 – 30 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นโฟม H60 และ H130 ทำการทดสอบเป็นเวลา 5-7 วัน ขึ้นอยู่กับผลการทดสอบ เนื่องจากวัสดุจะสามารถเกิดการคืบได้ช้าเร็วต่างกัน ผลแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดการคืบที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (Creep strain – Time) รูปที่ 5.1 และ 5.2 พบว่าเมื่อค่าความเค้นที่ให้กับวัสดุมีค่ามากขึ้น ค่าความเครียดการคืบจะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันทั้งสองความหนาแน่น เป็นไปตามความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของฮุก (Hook's law) (Gibson และ Ashby, 1997) นอกจากนี้พบว่าที่ระดับความเค้นต่ำจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเป็นไปอย่างช้าตามเวลาทำให้มีการทดสอบนาน ในขณะที่ระดับความเค้นสูงจะเกิดความเค้นมากพอที่ทำให้เกิดความเสียหายกับชิ้นทดสอบจึงส่งผลให้มีระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงความเครียดการคืบอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดความเสียหายของวัสดุเร็วกว่าเนื่องจากภาระที่ให้ ที่ระดับความเค้นต่ำภาระที่ให้อย่างไม่เพียงพอทำให้เกิดความเสียหายต่อวัสดุ ทำให้การเปลี่ยนแปลงขนาดมีระยะเวลานานกว่าที่ระดับความเค้นสูง



รูปที่ 5.1 ผลการทดสอบการคืบที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ของ H60



รูปที่ 5.2 ผลการทดสอบการคืบที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ของ H130

จากรูปที่ 5.1 ผลการทดสอบการคืบที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของโพลีเมอร์ H60 พบการกระโดดของความเค้นที่ระดับความเค้น 80% ของความเค้นสูงสุดในช่วงอีลาสติก เกิดจากการพังทลายของเซลล์อย่างทันทีทันใดในช่วงเวลาไม่นาน

รูปที่ 5.2 แสดงผลการทดสอบการคืบที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของโพลีเมอร์ความหนาแน่น H130 พบว่าที่ระดับความเค้นทดสอบต่ำมีช่วงการคืบคงที่ (Secondary creep) เป็นเวลานาน เนื่องจากภาระกระทำที่ยังไม่สูงมาก จึงทำให้การเปลี่ยนแปลงขนาดเป็นไปอย่างช้า เมื่อค่าความเค้นในการทดสอบสูงขึ้น ช่วงการคืบคงที่ใช้เวลาน้อย และเกิดค่าความเครียดสูงขึ้น เซลล์มีการเปลี่ยนแปลงขนาดเพื่อให้สามารถรับภาระ เมื่อภาระที่มีขนาดมากจึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดอย่างรวดเร็ว และเกิดการเสียหายของเซลล์ พิจารณาจากอัตราคืบที่ค่าความเค้นสูงสุด พบว่าอัตราคืบเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเกิดความเสียหายจนเข้าสู่ช่วงที่สามของพฤติกรรมการคืบ (Tertiary Creep) จึงสิ้นสุดการทดสอบ

## 5.2 การทำนายพฤติกรรมของวัสดุ

ผลของการทำนายพฤติกรรมของวัสดุ แบ่งเป็น 2 ส่วน คือการทำนายพฤติกรรมการคลายความเค้นและการทำนายพฤติกรรมการคืบของวัสดุ

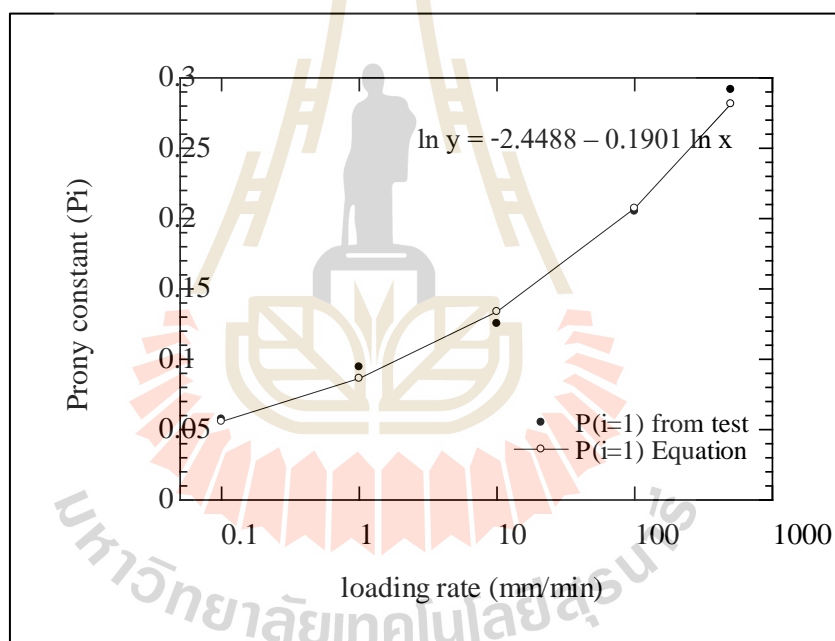
### 5.2.1 การทำนายพฤติกรรมการคลายความเค้น

การทำนายพฤติกรรมการคืบของวัสดุ โดยขึ้นกับอัตราภาระ โดยทำการทดสอบที่อัตราภาระ 0.1, 10 และ 500 มิลลิเมตรต่อวินาที จากนั้นนำข้อมูลในรูปแบบค่าโมดูลัสแรงเฉือนและเวลาเข้าสู่โปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของอนุกรมโพรนี ได้แก่ ค่าคงที่ของโพรนี (Prony constant,  $P_i$ ) กับ ค่าคงที่ของเวลาของโพรนี (Prony time constant,  $\tau_i$ ) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราภาระกับค่าคงที่ของโพรนี แสดงดังรูปที่ 5.3 ถึง 5.6 แทนค่าอัตราภาระที่ 1 และ 100 มิลลิเมตรต่อวินาทีในสมการความสัมพันธ์ดังกล่าว

จากรูปที่ 5.3 ถึง 5.6 แสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่ของโพรนี (Prony constant,  $P_i$ ) กับ ค่าคงที่ของเวลาของโพรนี (Prony time constant,  $\tau_i$ ) ที่เปลี่ยนแปลงตามอัตราภาระเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบ (From test) และค่าที่ได้จากสมการในรูปแบบสมการทั่วไปของแมกซ์เวลล์ (Equation) พบว่ามีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย นำค่าคงที่ของโพรนีแทนลงในสมการในรูปแบบทั่วไปของแมกซ์เวลล์ ผลแสดงดังรูปที่ 5.7 และ 5.8 ที่อัตราภาระ 1 และ 100 มิลลิเมตรต่อวินาที

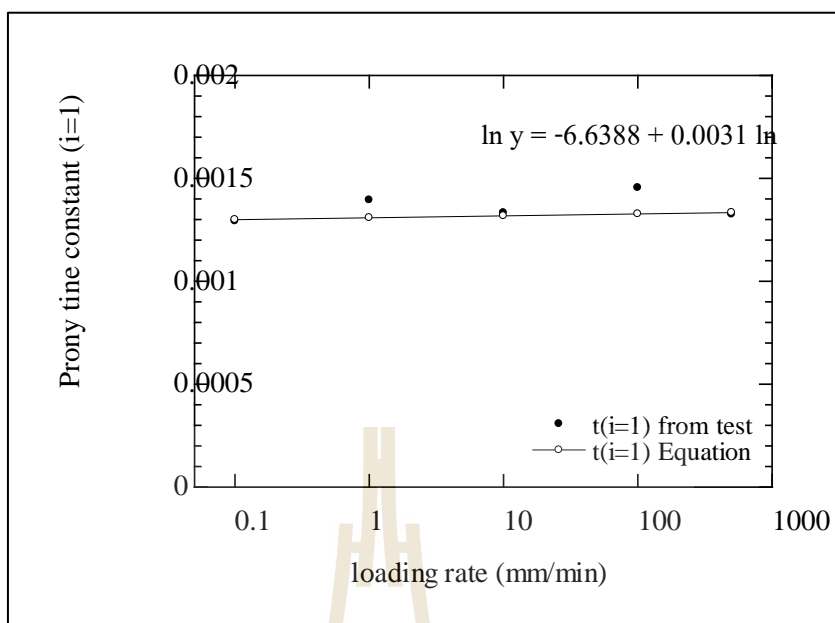
ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ของอนุกรมโพรนิจากการทดสอบจริง

อัตราภาระ (mm/min)	ค่าคงที่ของ โพรนิ ( $P_i$ ) ที่ i=1	ค่าคงที่ของ โพรนิ ( $P_i$ ) ที่ i=2	ค่าคงที่เวลาของ โพรนิ ( $\tau_i$ ) ที่ i=1	ค่าคงที่เวลาของ โพรนิ ( $\tau_i$ ) ที่ i=2
0.1	0.05748	0.08453	0.001292	931.31
1	0.09451	0.07103	0.001394	828.75
10	0.12533	0.06996	0.001333	756.30
100	0.20510	0.05214	0.001454	574.08
500	0.29168	0.06036	0.001352	651.56

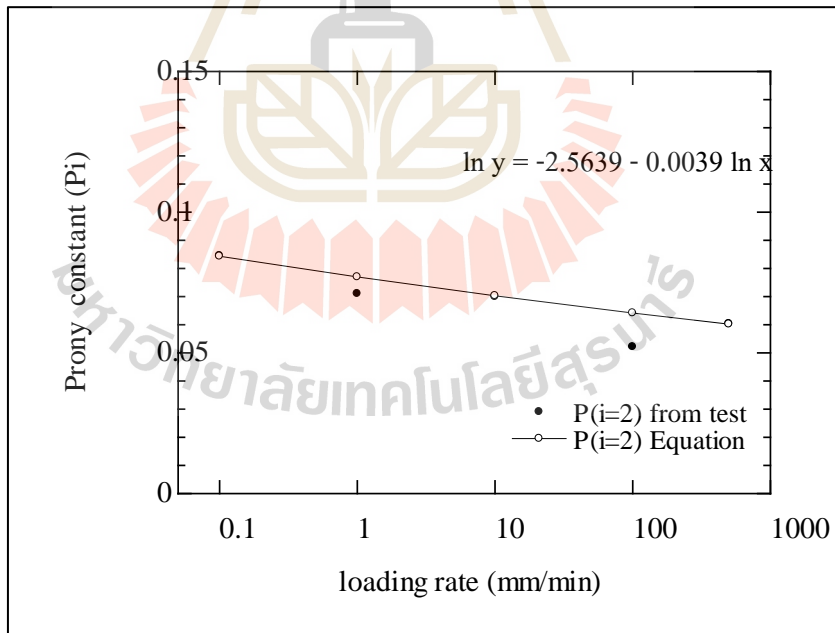


รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราภาระกับค่าคงที่ของโพรนิ ที่ i=1

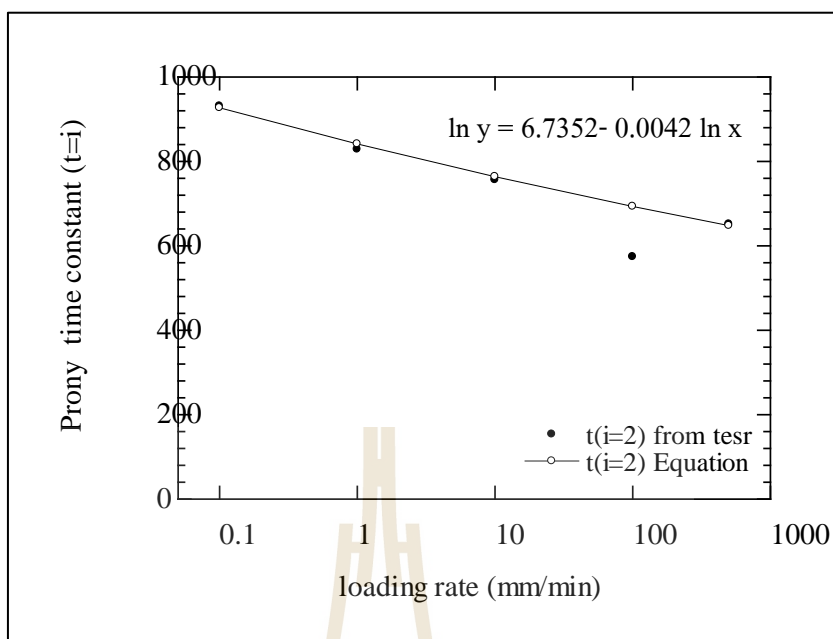




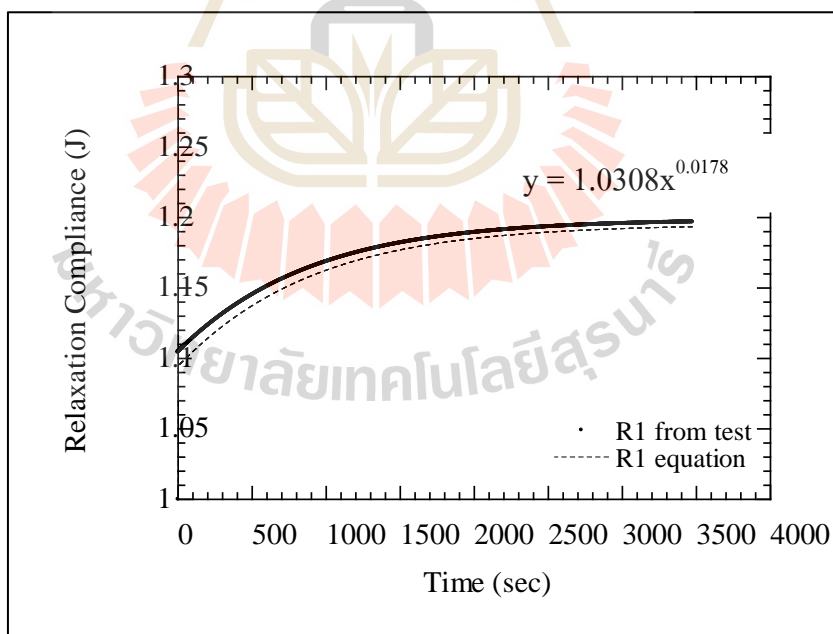
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร่งกับค่าคงที่เวลาของโพรนิ ที่  $i=1$



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร่งกับค่าคงที่ของโพรนิ ที่  $i=2$

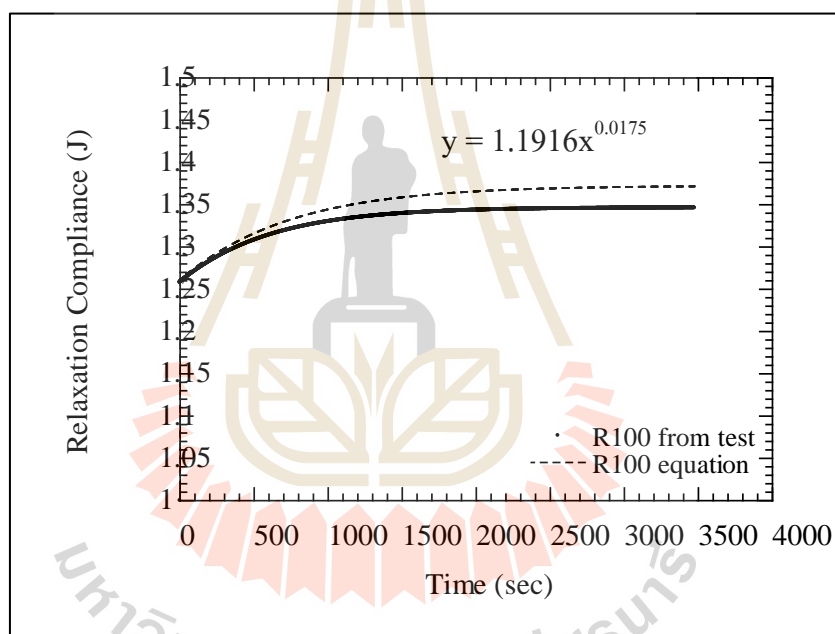


รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตรากระทำกับค่าคงที่เวลาของโพรนี ที่  $i=2$



รูปที่ 5.7 การเปรียบเทียบค่าการคลายความเค้นจากการทำนายและการทดสอบที่ 1 mm/min

ผลการทำนายพฤติกรรมการคลายความเค้นของโพลีเอทิลีน H130 ด้วยแบบจำลองของแมกซ์เวลล์ ที่อัตราภาระ 1 มิลลิเมตรต่อนาที เทียบกับการทดสอบจริง แสดงในรูปขององค์ประกอบของการคลายความเค้น(Relaxation compliance)และเวลาดังรูปที่ 5.7 ซึ่งองค์ประกอบของการคลายความเค้นแปรผกผันกับค่าความเค้นปกติ (Normalized stress) พบว่าผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันโดยค่าจากการทดสอบมีค่าสูงกว่าเล็กน้อย จึงพิจารณาสมการทำนายจากแบบจำลองอยู่ในรูปสมการกำลัง  $y = 1.0308x^{0.0178}$  เมื่อ  $y$  คือค่าองค์ประกอบความเค้น และ  $x$  คือเวลาในการคลายความเค้น สมการมีค่าความแปรผันของตัวแปรตอบสนองที่สามารถอธิบายได้ ( R-square :  $R^2$ ) เท่ากับ 0.9001



รูปที่ 5.8 การเปรียบเทียบค่าการคลายความเค้นจากการทำนายและการทดสอบที่ 100 mm/min

ในขณะที่การทำนายพฤติกรรมการคลายความเค้นที่อัตราภาระสูงแสดงดังรูปที่ 5.8 ผลที่ได้จากการจากทดสอบมีแนวโน้มต่ำกว่าเล็กน้อย เพื่อความชัดเจนจึงทำการวิเคราะห์ในรูปสมการ โดยจากแบบจำลองจะได้ค่าสมการในรูปแบบสมการกำลังที่  $y = 1.1916x^{0.0175}$  และมีค่ามีความแปรผันของตัวแปรตอบสนองที่สามารถอธิบายได้ ( R-square :  $R^2$ ) อยู่ที่ 0.925 ซึ่งมีความว่าค่าความแปรผันของตัวแปรในสมการสามารถอธิบายได้ด้วยสมการหรือสมการใกล้เคียงค่าความจริง

เพื่อพิจารณาว่าความแตกต่างระหว่างวิธีการที่ได้มาซึ่งผลของการคลายความเค้นต่างกันอย่างนั้นมีนัยสำคัญหรือไม่ จึงทำการวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบระหว่าง 2 วิธีการที่แตกต่างกัน (Paired-T Test) โดยการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบและจากการทำนายบนพื้นฐานของแบบจำลอง (Prony's constant) บนสมมติฐานหลักคือ ค่าที่ได้จากสองวิธีไม่ต่างกัน และสมมติฐานรองคือค่าที่ได้จากสองวิธีต่างกัน บนค่าความเชื่อมั่น 95% (95% Confidence Interval) โดยที่หากค่า P-values หรือค่าการตัดสินใจ น้อยกว่า 0.05 หมายความว่าสมมติฐานหลักถูกปฏิเสธ ผลแสดงค่า P-value ดังตาราง 5.2 (เพิ่มเติมที่รูป ก.1 ถึง ก.4)

ตารางที่ 5.2 ค่าการตัดสินใจ (P-Value) จากการเปรียบเทียบด้วย Paired T Test

ค่าการตัดสินใจ	ค่าคงที่ของโพรนิ ( $P_i$ ) ที่ $i=1$	ค่าคงที่ของโพรนิ ( $P_i$ ) ที่ $i=2$	ค่าคงที่เวลาของโพรนิ ( $\tau_i$ ) ที่ $i=1$	ค่าคงที่เวลาของโพรนิ ( $\tau_i$ ) ที่ $i=2$
P-Value	0.47	0.56	0.352	0.856
T-Value	0.80	0.64	-1.05	0.19

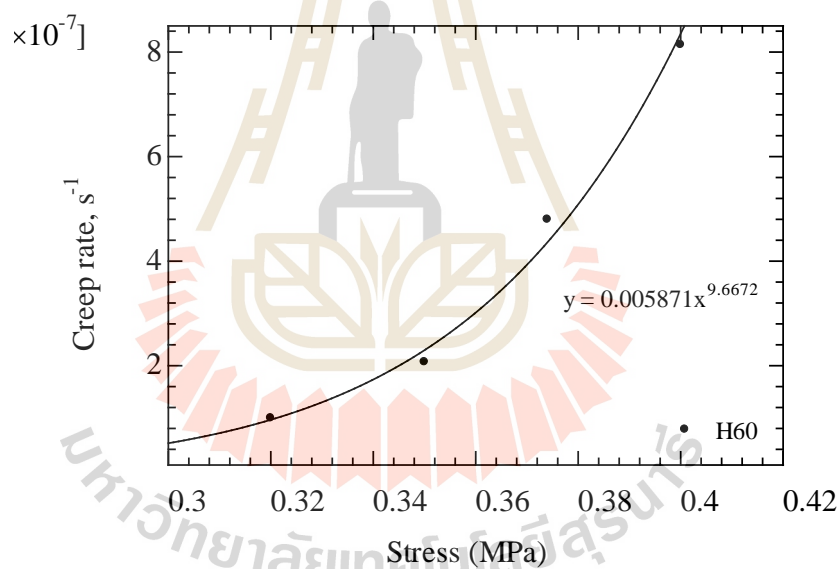
โดยค่าความแปรผันของตัวแปรตอบสนองที่สามารถอธิบายได้ (R-square :  $R^2$ ) จากสมการของกราฟในรูปที่ 5.7 และ 5.8 ที่สามารถยอมรับได้อยู่ระหว่าง 0.8 - 1 จากทั้งสองกราฟพบว่ามีความอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ และค่าจากการทดสอบทางสถิติเปรียบเทียบวิธีการดังตารางที่ 5.2 ทุกค่ามี P-Value มากกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าแบบจำลองดังกล่าวสามารถนำมาทำนายพฤติกรรมของการคลายความเค้นของวัสดุโพลีเอทิลีนที่อัตราต่างๆ ได้ เนื่องจากความแตกต่างระหว่างการทดสอบและสมการจะขึ้นกับจำนวนเอลิเมนต์ในสมการทั่วไปของแมกซ์เวลล์ ซึ่งผลที่ได้จากโปรแกรมแบ่งวัสดุโพลีเอทิลีนเป็นสองเอลิเมนต์เท่านั้นจึงทำให้ค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย (Piero และ Pampolini, 2010)

### 5.2.2 การทำนายพฤติกรรมการคืบ

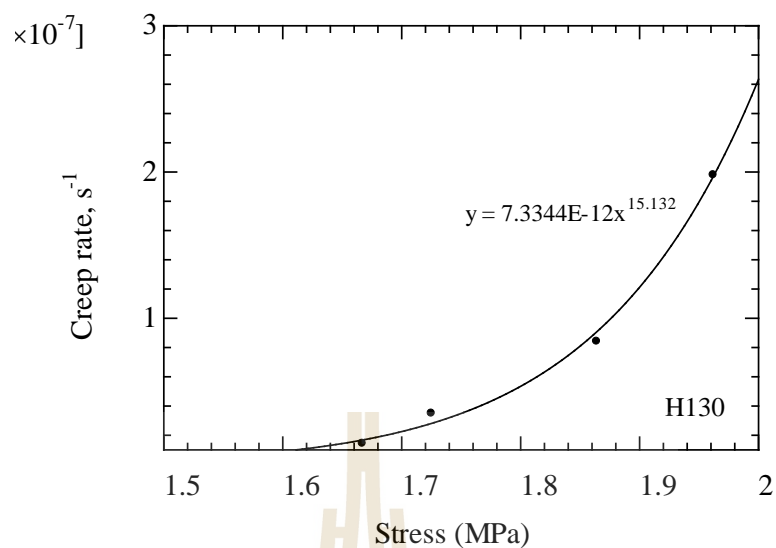
จากการทดสอบการคืบทำพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบ (Creep Rate) และค่าความเค้นที่ใช้ในการทดสอบทั้งสิ้น พบว่าทั้งสองความหนาแน่นคือ H60 และ H130 จะได้สมการอัตราการคืบที่ขึ้นกับความเค้นคือ  $y = 0.005871x^{9.6672}$  กับ  $y = 7.334E-12x^{15.132}$  โดยที่  $y$  คือ อัตราการคืบ( $s^{-1}$ ) และ  $x$  คือค่าความเค้น ผลแสดงดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 อัตราการคืบที่ระดับความเค้นต่างกันของ H60 และ H130

Density	% of Elastic stress	Stress (MPa)	Creep rate ( $s^{-1}$ )
H60	65	0.32	9.98E-08
	70	0.35	2.072E-07
	75	0.37	4.798E-07
	80	0.4	8.141E-07
H130	65	1.67	1.44E-08
	70	1.72	3.50E-08
	75	1.86	8.42E-08
	80	1.96	1.98E-07

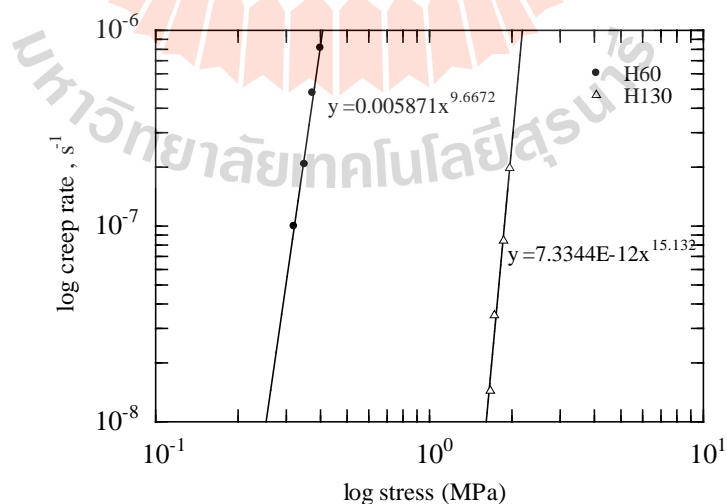


รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบและค่าความเค้นในการทดสอบที่ H60

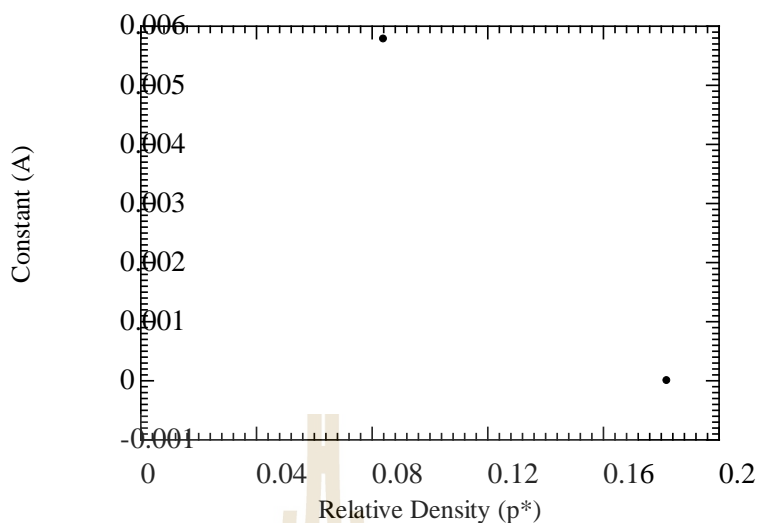


รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบและค่าความเค้นในการทดสอบที่ H130

จากตารางที่ 5.2 และรูปที่ 5.9 – 5.10 ตารางอัตราการคืบที่ระดับความเค้นต่างกัน รวมถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบและค่าความเค้นในการทดสอบของแต่ละความหนาแน่น พบว่าค่าความเค้นแปรผันตรงกับอัตราการคืบ ที่ความเค้นต่ำอัตราการคืบจะน้อยกว่า ดังหัวข้อที่ 5.1 เรื่องผลการทดสอบพฤติกรรมการคืบภายใต้แรงกด

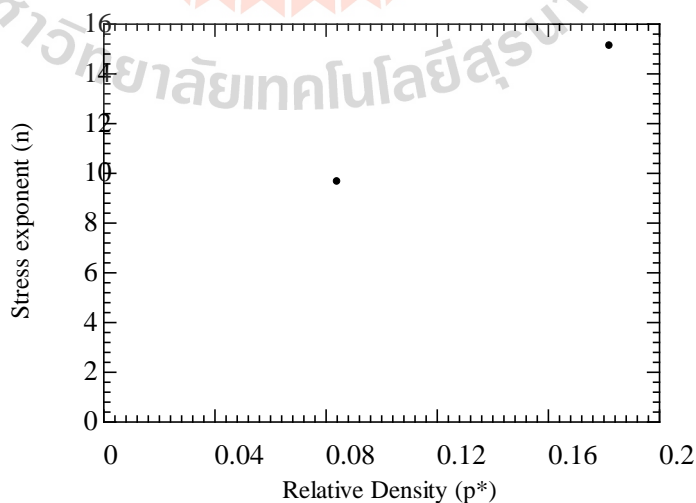


รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบและค่าความเค้นที่ทดสอบในรูปแบบ log-log



รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ (Constant, A) และความหนาแน่นสัมพัทธ์(p\*)

จากนั้นทำการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ (Constant, A) และ ค่าองค์ประกอบความเค้น (Stress Component) กับค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ ผลแสดงดังรูปที่ 5.12 พบว่าเมื่อค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นค่าคงที่จากสมการจะลดลง หากพิจารณาสมการโดยรวมที่  $y = 0.005871x^{9.6672}$  กับ  $y = 7.334E-12x^{15.132}$  พบว่าค่าอัตราการกึ่งที่ความหนาแน่นต่ำจะมีค่ามากกว่าที่ความหนาแน่นสูง เนื่องจากผลพฤติกรรมของเซลล์ที่มีโพรงหรือช่องว่างภายในเซลล์มาก ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดเกิดขึ้นได้มากจากการยุบตัวของช่องว่างภายในเซลล์นั้น



รูปที่ 5.13 ค่าองค์ประกอบความเค้น (Stress Component) กับค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์(p\*)

รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบและค่าความเค้นที่ทดสอบที่อยู่ในรูปกราฟ log-log พบว่าเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้นต้องให้ภาระกระทำมากกว่าจึงจะทำให้เกิดอัตราการคืบที่เท่ากันได้ ทำการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ (Constant, A) และ ค่าองค์ประกอบความเค้น (Stress Component) กับค่าความหนาแน่นสัมพันธ์ ผลแสดงดังรูปที่ 5.12 กับ 5.13 พบว่าเมื่อค่าความหนาแน่นสัมพันธ์เพิ่มขึ้นค่าคงที่จากสมการจะลดลง หากพิจารณาสมการ โดยรวมที่  $y = 0.005871x^{9.6672}$  กับ  $y = 7.334E-12x^{15.132}$  พบว่าค่าอัตราการคืบที่ความหนาแน่นต่ำจะมีค่ามากกว่าที่ความหนาแน่นสูง เนื่องจากผลมาจากพฤติกรรมของเซลล์ที่มีโพรงหรือช่องว่างภายในเซลล์มาก ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดเกิดขึ้นได้มากจากการยุบตัวของช่องว่างภายในเซลล์นั้น การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าองค์ประกอบความเค้น (Stress component) กับความหนาแน่นสัมพันธ์ดังรูปที่ 5.13 พบว่าเมื่อความหนาแน่นสัมพันธ์เพิ่มขึ้นองค์ประกอบของความเค้นจะมากขึ้นเช่นกัน แสดงว่าการที่จะทำให้วัสดุที่ความหนาแน่นสัมพันธ์สูงกว่าเกิดอัตราคืบที่เท่ากันจำเป็นต้องให้เกิดความเค้นโดยรวมต่อวัสดุนั้นมากกว่า เนื่องจากส่วนที่รับภาระเป็นส่วนที่มีเนื้อวัสดุ ที่ความหนาแน่นสัมพันธ์สูงหมายความว่ามีส่วนที่เป็นของแข็งหรือเนื้อวัสดุมากจึงต้องให้ภาระสูงกว่าจึงจะเกิดการคืบหรืออัตราคืบที่เท่ากันได้



## บทที่ 6

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองทั้งสามเพื่อศึกษาผลของอัตราการ ความหนาแน่น และการทำนายพฤติกรรมของวัสดุสามารถสรุปผลได้ดังนี้

6.1.1 จากทั้งสามการทดสอบคือ พฤติกรรมภายใต้แรงกด การคืนรูปและการคลายความเค้น พบว่าอัตราการส่งผลต่อพฤติกรรมของวัสดุพีวีซีโฟม อัตราการสูงจะส่งผลให้อัตราการคืนรูปและการคลายความเค้นมากกว่าที่อัตราการต่ำ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุนั้นขึ้นกับเวลา ที่อัตราการสูงจะเกิดการให้ภาระในเวลารวดเร็วจึงทำให้จำนวนเซลล์เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในที่มีลักษณะเป็นการคดงอของผนังเซลล์ (Bending of cell wall) เกิดขึ้นน้อยกว่าที่อัตราการต่ำที่ใช้เวลาในการทดสอบนานกว่า ทำให้ยังไม่เกิดการเสียหายแบบไม่สามารถคืนรูปได้หรือเกิดขึ้นได้น้อย จึงสามารถคลายความเค้นและคืนรูปได้ดีกว่าที่อัตราการต่ำ เพราะเซลล์ที่สามารถคืนตัวหรือคลายความเค้นได้เป็นเซลล์ที่มีพฤติกรรมแบบอีลาสติกเท่านั้น

6.1.2 ความหนาแน่นส่งผลต่อพฤติกรรมภายใต้แรงกด โมดูลัสแรงกด ค่าความสูงในช่วงอีลาสติก และค่าความเค้นคงที่ มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากที่ความหนาแน่นต่ำวัสดุมีช่องว่างภายในเซลล์มากกว่า ซึ่งไม่สามารถรับภาระได้ ทำให้ที่ความหนาแน่นต่ำรับภาระได้น้อยกว่าความหนาแน่นสูง

6.1.3 ระดับความเค้นส่งผลต่ออัตราการคืบ เมื่อระดับความเค้นเริ่มต้นที่ให้กับวัสดุมากกว่าทำให้ขนาดการเปลี่ยนแปลงขนาดมากกว่าระดับความเค้นอื่นที่ความหนาแน่นเดียวกัน วัสดุเกิดความเสียหายภายในระยะเวลาที่เร็วกว่าเนื่องจากความเค้นสูง ทำให้ช่วง secondary creep สั้นกว่าการทดสอบที่ความเค้นต่ำ

6.1.4 การทำนายพฤติกรรมการคลายความเค้นได้ด้วยแบบจำลองทั่วไปของแมกซ์เวลล์ พบว่ามีความใกล้เคียงกับการทดสอบจริงที่อัตราการ 0.1 และ 100 mm/min เนื่องจากผลความแตกต่างระหว่างแบบจำลองจะขึ้นอยู่กับจำนวนเอลิเมนต์ที่ได้ ซึ่งการทำแบบจำลองนี้แบ่งวัสดุเป็น 2 เอลิเมนต์ จึงทำให้ค่าที่ได้ใกล้เคียงกัน

6.1.5 การหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและพารามิเตอร์การคืบ พบว่าค่าองค์ประกอบความเค้น (Stress component) มีค่าเพิ่มขึ้น และค่าคงที่ (A) จะมีค่าลดลงเมื่อความหนาแน่นสูงขึ้น

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 ในการทดสอบการคืบยังไม่มีกรขึ้นชั้นผล เนื่องจากอุปกรณ์และเครื่องมืออยู่ในสถานะที่ไม่สนับสนุนต่อการทำวิจัยต่อ ทั้งนี้การศึกษาวิจัยสามารถทำได้เมื่อมีโอกาส

6.2.2 มีแบบจำลองและหลายสมการรูปแบบและวิธีการที่ถูกพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสามารถค้นคว้าเพิ่มเติมและหาวิธีการที่เหมาะสมอื่นๆมาเปรียบเทียบเพื่อยืนยันผลของการหาพารามิเตอร์ได้อย่างถูกต้อง



## รายการอ้างอิง

- สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ม.เทคโนโลยีสุรนารี. Decision Making 1-2 sample. เอกสารประกอบการเรียนการสอน. รายวิชา 540201 Statistics for engineering.
- Cripps, D.\ (2019, Jan 24).\ Cores Materials : Other Foam Cores [Web blog messege].Retrieved from <https://netcomposites.com/guide/core-materials/other-foam-cores/>
- Amiri, A., Hosseini, N., Ulven, C. A . (2015). Long -Term creep behavior of flax/Vinyl Ester Composite Using Time Temperature Superposition Principle. **J Rebrew Materials**. 3: 224-233.
- ASTM D1621-15. (2000). Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastic. West Conshohocken, **PA: ASTM International**.
- ASTM E328-13. (2013). Standard test Method for Stress relaxation Test for Materials and Structure”, West Conshohocken, **PA: ASTM International**.
- Briody, C., et al. (2012). Prediction of Compressive Creep behavior in Flexible Polyurethane Foam Over long Time Scales and Elevated Temperatures. **Polymer testing**. 31: 1019 – 1025.
- Colloca, M., et.al. (2012). Mechanical Properties and Failure Mechanism of Closed-cell PVC Foams. **International Journal of Crashworthiness**. 17(3): 327-336.
- Chen, T. (2000). Determining a Prony Series for a Viscoelastic Material From Time Varying Strain Data. **U.S. Army Research Laboratory**.
- Denay, A.G., Castagnet, S., Roy, A., Alice G. (2010). Creep compression behavior of a polyurethane foam from cryogenic temperatures: size effect and long term prediction. **EPJ Web of Conference** 6: 1-8.
- Denay, A.G., Castagnet, S., Roy, A. (2013) Compressive Behavior of Glass-Fiber-Reinforce and Pure Polyurethane Foam at Negative Temperatures Down to Cryogenatics Ones. **Journal of Cellular Plastic**. 49.
- De Vries, D.V.W.M. (2009). **Characterization of Polymeric Foams**. Eindhoven University of Technology. MT 09.22: 1-35.

- Elleuch, R., Taktak, W. (2006). Prediction of compressive Creep and Relaxation of HDPE. **International Journal of Modelling and Simulation**. 26(4): 344-340.
- Guo, J., Shi H., and Meng, W. (2013). Prediction Methodology of Creep Performance from Stress Relaxation Measurements. **Applied Mechanics and Materials**. (401-403): 920-923.
- Gibson, L. J. and Ashby, M. F. (1997). Cellular solids: Structure and properties (2 Ed). **Cambridge University Press**.
- ISO 13314:2011 Mechanical testing of metals-Ductility testing – Compression test for porous and cellular machine.
- Kalyanasundaram, V., and Holdsworth, S. R. (2016). Prediction of Forward Creep Behavior from Stress Relaxation Data for a 10% Cr Steel at 600 °C. **Trans Indian Inst Met**. 69: 573-578.
- Karaman, S., Yilmaz, M. T., Toker, O.S., Dogan, M. (2016) .Stress relaxation/Creep compliance behavior of kashar cheese: Scanning electron microscopy observation”. **International of Dairy Technology**. 69: 254-261.
- Kendell, M. J. and Siviour, C. R. (2014). Rate dependent of poly(vinyl chloride), the effect of plasticizer and time-temperature superposition. **Royal Society proceeding**.
- Koohbor, B. ,Kidane A. and Lu, W.Y. Lu. (2016). Effect of specimen size, compressibility and inertia on the response of rigid polymer foam subjected to high velocity direct impact loading. **International Journal of Impact Engineering**. 98: 62-74.
- Kraatz, A., Moneke, M. and Kolupaev, V. (2006). Long-Term Tensile and Compressive Behavior of Polymer Foams. **J. Cell. Plast**. 423: 221–228.
- Loung, D., Pinisetty., D and Gupta, N. (2013). Compressive Properties of Closed-Cell Polyvinylchloride Foams at Low and High Strain Rates: Experimental and Critical Review of State of The Art. **Composite Part B Engineering**. 44: 403-416
- Mainardi, F., Mainardi, G. Spad and A. Creep. (2011). Relaxation and Viscosity Properties for Basic Fractional Models in Rheology. **The European Physical Journal**. 193: 133-160.
- Mane, J., Chandra, S. (2017). Mechanical Property Evaluation Foam Under Quasi-Static and Dynamics Strain Rates – An Experiment Study. **Procedia Engineer**. 173: 726-731
- Miyase, A., Lo, K. H., and Wang, S. S. (2016). Effect of density and Cell Rise Ratio on Compressive Stiffness and Strength of PVC Structural Foam.

- Petru, M., Novak, O. (2017). Measurement and Numerical Modeling of Mechanical Properties of Polyurethane Foam. **Intech open Chapter 4**: 86-96.
- Piero, G. D., and Pampolini, G. (2010). On the rate-dependent properties of open-cell polyurethane foams. **TECHNISCHE MECHANIK**. 30: 74-84.
- Poapongsakorn, P. and Kanchanomai, C. (2011). Time-dependent deformation of closed-cell PVC Foam. **Journal of Cellular Plastics**. 47: 323-336.
- Sadan, M. (1994) Polymer Theory of Rheology. Bangkok: **Forepace Publish House**.
- Saha, M.C., Barua, B. and Balakrishnan, A. (2009). Stress Relaxation Behavior of thermoset polyurethane foams. **Proceeding of SEM Annual Conference**.
- Saha, M.C., Barua, B. (2016). Incorporating Density and Temperature in the Stretched Exponential Model for Predicting Stress Relaxation Behavior of Polymer Foams. **Journal of Engineering Materials and Technology**. 138.
- Saha, M.C., Mahfuz, H., Chakravarty, U.K., Uddin, M., Kabir, Md. E., and Jeelani, S. (2005). Effect of density, Microstructure, and strain rate on compression behavior of polymeric foams. **Materials Science and Engineering A**. 406: 328-336.
- Subhash, G., Walter, T. R., Richards, A. W. (2005) .A Unified Phenomenological Model for Tensile and Compressive Response of Polymeric Foams. **Journal of Engineering Materials and Technology**. 131.
- Tagarielli, V. L., Deshpande, V.S., and Fleck, N.A. (2008).The high strain rate response of PVC foams and end-grain balsa wood. **Composites part B: engineering**. 39: 83-91.
- Willains, M. L., Landel, R.F., and Ferry, J.D. (1995). The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass forming liquid. **Journal of the American Chemical Society**.
- Yoshimoto, A., Kobayashi, H., Horikawa, K., and Tanigaki, K. (2016). Effect of strain-rate and temperature on mechanical behavior of polyamide foam in compression. **Advance Publication by J-STAGE Mechanical Engineering Journal**.
- Zhang, J.L., Lu, Z.X. (2006). Numerical Modeling of the Compression Process of Elastic Open-cell Foams. **Chinese Journal of Aeronautics**. 20: 215-222



ภาคผนวก ก

การเปรียบเทียบค่าทางสถิติด้วยวิธี Paired - T Test

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## การเปรียบเทียบค่าทางสถิติด้วยวิธี Paired - T Test

### Paired T-Test and CI: P(i-1) T, P(i-1) Eq

Paired T for P(i-1) T - P(i-1) Eq

	N	Mean	StDev	SE Mean
P(i-1) T	5	0.1548	0.0939	0.0420
P(i-1) Eq	5	0.1491	0.0803	0.0359
Difference	5	0.00575	0.01600	0.00716

95% CI for mean difference: (-0.01412, 0.02562)

T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = 0.80 P-Value = 0.466

รูปที่ ก.1 การเปรียบเทียบค่าทางสถิติด้วยวิธี Paired-T Test ค่าคงที่ของ โพรบี่ (P<sub>i</sub>) ที่ i=1

### Paired T-Test and CI: P(i-2) T, P(i-2) Eq

Paired T for P(i-2) T - P(i-2) Eq

	N	Mean	StDev	SE Mean
P(i-2) T	5	0.06760	0.01220	0.00546
P(i-2) Eq	5	0.06572	0.01521	0.00680
Difference	5	0.00188	0.00656	0.00293

95% CI for mean difference: (-0.00626, 0.01003)

T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = 0.64 P-Value = 0.556

รูปที่ ก.2 การเปรียบเทียบค่าทางสถิติด้วยวิธี Paired-T Test ค่าคงที่ของ โพรบี่ (P<sub>i</sub>) ที่ i=2

### Paired T-Test and CI: T(i=1) T, T(i=1) Eq

Paired T for T(i=1) T - T(i=1) Eq

	N	Mean	StDev	SE Mean
T(i=1) T	5	0.001365	0.000062	0.000028
T(i=1) Eq	5	0.001390	0.000041	0.000018
Difference	5	-0.000025	0.000053	0.000024

95% CI for mean difference: (-0.000090, 0.000041)

T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = -1.05 P-Value = 0.352

รูปที่ ก.3 การเปรียบเทียบค่าทางสถิติด้วยวิธี Paired -T Test ค่าคงที่เวลาของโพรมี (T<sub>i</sub>) ที่ i=1

### Paired T-Test and CI: T(i=2) T, T(i=2) Eq

Paired T for T(i=2) T - T(i=2) Eq

	N	Mean	StDev	SE Mean
T(i=2) T	5	748.4	141.2	63.1
T(i=2) Eq	5	741.1	203.8	91.2
Difference	5	7.3	85.1	38.1

95% CI for mean difference: (-98.4, 113.0)

T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = 0.19 P-Value = 0.856

รูปที่ ก.4 การเปรียบเทียบค่าทางสถิติด้วยวิธี Paired -T Test ค่าคงที่เวลาของโพรมี (T<sub>i</sub>) ที่ i=2





ภาคผนวก ข

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

### บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติ

จินตภา กลิ่นสุข, ประเสริฐ เอ่งฉ้วน และปิยะมน พัวพงศกร. การทำนายพฤติกรรมการคลายความเค้นของพอลิเมอร์โฟมแบบเซลล์ปิดภายใต้แรงกด. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, ปีที่ 15 ฉบับที่ 3. กันยายน – ธันวาคม 2562., จำนวน 13 หน้า

### บทความวิจัยที่รับการนำเสนอในการประชุมวิชาการ ระดับนานาชาติ

Jintapha Klinsuk, Piyamon Poapongsakorn. Effect of Strain Rate on Compressive Strain Recovery of Closed-cell PVC Foam. 11 th South East Asia Technician University Consortium Symposium (The 11<sup>th</sup> SEATUC), 2017.

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวจินตภา กลิ่นสุข เกิดวันที่ 29 กรกฎาคม พ.ศ.2536 เข้าศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนอทรสังฆะวัฒนะ 1 วัดลาดบัว และระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนสองพี่น้องวิทยา จังหวัดสุพรรณบุรี จากนั้นเข้าศึกษาต่อและสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ด้วยทุนเรียนดีจนสำเร็จการศึกษาในปี 2557

หลังจากนั้นได้รับโอกาสสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มอบทุนการศึกษาต่อระดับปริญญาโทด้วยทุนกิตติมศักดิ์ ในปีการศึกษา 2558 โดยตลอดระยะเวลาที่ศึกษาต่อได้รับมอบหมายให้เป็นผู้ช่วยสอนในวิชาปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตตามเงื่อนไขของทุนการศึกษา



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี