



แบบจำลองพฤติกรรมการคืบของวัสดุผสมพอลิโพรพีลีนและผงไม้ยางพารา  
Modeling of Creep Behavior of Recycled Polypropylene/Rubberwood Flour  
Composites

วิระ ลีลาศิลปศาสตร์  
VIRA LEELASILAPASART

วิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและระบบ  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of  
Master of Engineering in Industrial and Systems Engineering  
Prince of Songkla University

2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์      แบบจำลองพฤติกรรมกรรมการคืบของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพารา  
 ผู้เขียน                นายวิระ ลีลาศิลปศาสตร์  
 สาขาวิชา              วิศวกรรมอุตสาหการและระบบ

---

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....  
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ รัตนวิไล)

.....ประธานกรรมการ  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภิสพร มีมงคล)

.....กรรมการ  
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ รัตนวิไล)

.....กรรมการ  
 (รองศาสตราจารย์ ดร.วิริยะ ทองเรือง)

.....กรรมการ  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา เต็มสุขสวัสดิ์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
 ของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและ  
 ระบบ

.....  
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มี  
ส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ .....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ รัตน์วิไล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ .....

(นายวิระ ลีลาศิลปศาสตร์)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ  
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ .....

(นายวิระ ลีลาศิลปศาสตร์)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	แบบจำลองพฤติกรรมการคืบของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพารา
ผู้เขียน	นายวิระ ลีลาศิลปศาสตร์
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการและระบบ
ปีการศึกษา	2557

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการคืบของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพารา โดยใช้อัตราส่วนของพอลิโพรพิลีนร้อยละ 50.3% โดยน้ำหนัก ผงไม้ 44.5% โดยน้ำหนัก สารคู่ควบ 3.9% โดยน้ำหนัก สารต้านรังสียูวี 0.2% โดยน้ำหนัก และสารหล่อลื่น 1% โดยน้ำหนัก เริ่มต้นจากการศึกษาเปรียบเทียบถึงผลกระทบของกระบวนการผสม และขึ้นรูปวัสดุผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยวแล้วขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีดร้อน นำไปทดสอบสมบัติทางกลตามมาตรฐาน ASTM จากการทดสอบพบว่ามีความสัมพันธ์ทางกลทางด้านความแข็งแรงตัดที่ 29.95 MPa ความแข็งแรงอัดที่ 26.69 MPa และความแข็งแรงดึงที่ 20.05 MPa ของ จากนั้นศึกษาพฤติกรรมการคืบระยะยาวเป็นระยะเวลา 1,000 ชั่วโมง ภายใต้ภาระกระทำสามระดับที่ 20%, 30% และ 40% ของภาระสูงสุดจากการทดสอบพบว่าระยะการโก่งงอของชิ้นงานทดสอบพอลิโพรพิลีนร้อยละ 50.3% มีค่าเท่ากับ 2.45 มม. 4.65 มม. และ 6.68 มม. ตามลำดับ และวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพารา มีค่าเท่ากับ 1.53 มม. 2.41 มม. และ 3.37 มม. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่ระดับของภาระที่เท่ากันพอลิโพรพิลีนร้อยละ 50.3% จะเกิดการคืบที่สูงกว่าวัสดุผสมไม้พลาสติก และการคืบจากกระบวนการทดสอบจะมีแนวโน้มของความเครียดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มภาระ จากการศึกษาพฤติกรรมการคืบระยะสั้นของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพาราเป็นระยะเวลา 100 นาที ที่ระดับอุณหภูมิ 28, 38, 48, 58 และ 68°C จากการทดสอบพบว่ายิ่งอุณหภูมิ และความเค้นเพิ่มขึ้นยิ่งส่งผลให้เกิดความเสียหายเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติการคืบที่เกิดขึ้นตรงกับอุณหภูมิ เวลา และความเค้น ในส่วนของการทำนายพฤติกรรมการคืบพบว่าพฤติกรรมการคืบที่ได้จากแบบจำลองของเบอร์เกอร์ 6 องค์ประกอบ จะได้การทำนายที่เหมาะสม และแม่นยำเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองของเบอร์เกอร์ 4 องค์ประกอบ และแบบจำลองสมการยกกำลัง นอกจากนี้หลักการซ้อนทับกันระหว่างเวลา และความเค้นถูกนำมาใช้ทำนายอายุการใช้งานโดยการคืบระยะยาวเกินกว่า 3 ปี ที่ระดับภาระ 20% ของภาระสูงสุดที่สภาวะอุณหภูมิห้อง

**Thesis Title** Modeling of Creep Behavior of Recycled Polypropylene/  
Rubberwood Flour Composites  
**Author** Mister Vira Leelasilapasart  
**Major Program** Industrial and Systems Engineering  
**Academic Year** 2014

### ABSTRACT

The purpose of this research was to study the creep behavior of composites of recycled polypropylene/rubberwood flour (rPP/RWF). This is implemented by using formulation ratio of 50.3 wt% rPP, 44.5 wt% RWF, 3.9 wt% MAPP, 0.2 wt% UV stabilizer and 1 wt% Lub. The specimen was mixed with single screw extruder and hot compression molding process. The mechanical properties were obtained to have 29.95 MPa flexural strength, 26.69 MPa compression strength and 20.05 Mpa tensile strength regarding to the ASTM standard. Creep behavior was then observed at duration time of 1,000 h, under a 20%, 30% and 40% constant load levels of maximum flexural strength. According to the tests, it showed that the deflections of the rPP are 2.45, 4.65 and 6.68 mm, and rPP/RWF composites are 1.53, 2.41 and 3.37 mm, respectively. At the same load levels, the rPP gave more creep than that of rPP/RWF composites. The creep strain tends to increase with enhanced loading. Short-term creep tests of rPP/RWF composites with temperature 28, 38, 48, 58 and 68°C were conducted for 100 min. The results found that degree of damage increased with the load level and temperature, which was consistent with the creep behavior depending on time, temperature and stress. The prediction of the creep behavior by the Burger and Power law models fitted the experimental creep profiles well in general, but six-element Burger model provided better fitting than four-element Burger model with the experimental data. The time-stress superposition was used to predict long-term creep model. It was found that the lifetime limitation by long-term creep exceeds 3 years for load levels of 20% at room temperature.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องด้วยการให้ความช่วยเหลือจากผู้ที่เกี่ยวข้องกับทุกท่าน ทั้งที่ได้ออกนาม และมีได้ออกนาม ข้าพเจ้าขอขอบคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าในทุก ๆ ด้านไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ รัตนวิไล อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้สละเวลาในการให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ในการปรับปรุงการดำเนินการวิจัย ตลอดจนสละเวลาในการแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภิสพร มีมงคล อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ รองศาสตราจารย์ ดร.วิริยะ ทองเรือง อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา เต็มสุขสวัสดิ์ อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ และให้ความกรุณาในการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ และมีความถูกต้องมากขึ้น

ขอขอบพระคุณ ดร.ชาตรี หอมเขียว อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ได้ให้คำแนะนำ แนวคิด และความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยจนบรรลุวัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่ได้ให้การสนับสนุน และให้กำลังใจมาโดยตลอด ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ คุณค่าและประโยชน์อันใดที่พึงจะเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูต่อบิดา มารดา ตลอดจนบูรพาจารย์ของผู้วิจัย และผู้มีพระคุณทุกท่าน

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
ABSTRACT	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
สารบัญตาราง	(10)
สารบัญภาพ	(11)
สัญลักษณ์ที่ใช้	(14)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 การสำรวจเอกสาร	3
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	8
1.4 ขอบเขตการวิจัย	9
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	9
บทที่ 2 ทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง	11
2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับวัสดุคอมโพสิต	11
2.2 กรรมวิธีในการผลิต	14
2.3 สมบัติทางกล	16
2.4 การวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐานวิทยา	20
2.5 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน	21
2.6 สมบัติเชิงวิสโคอีลาสติกของวัสดุ	21
2.7 พฤติกรรมวิสโคอีลาสติกที่ขึ้นกับอุณหภูมิ	29
2.8 การยืนยันผลการทดลอง	32
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	33
3.1 วัสดุ และสารเคมี	33
3.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์	35
3.3 การออกแบบวิธีดำเนินงานวิจัย	47
3.4 วิธีการวิจัย	49



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์	55
4.1 สมบัติทางกลของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพาราที่ผ่านกระบวนการผสมโดยการอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยวและขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดร้อน	55
4.2 การวิเคราะห์แบบจำลองสำหรับพฤติกรรมการคืบระยะยาวของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพารา	58
4.3 การวิเคราะห์สมบัติทางเทอร์โมแอกวิเมตริก	66
4.4 การวิเคราะห์แบบจำลองสำหรับพฤติกรรมการคืบระยะสั้นของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพารา	68
4.5 หลักการซ้อนทับกันระหว่างเวลา อุณหภูมิและความเค้น	79
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	83
5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	83
5.2 ข้อเสนอแนะในการดำเนินงานวิจัย	85
บรรณานุกรม	87
ภาคผนวก	94
ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดสอบสมบัติทางกลโดยเครื่องทดสอบสมบัติทางวัสดุ	95
ภาคผนวก ข ข้อมูลระยะการโค้งงอและค่าความเครียดของการคืบ	96
ภาคผนวก ค ค่าความผิดพลาดของแบบจำลอง	104
ประวัติผู้เขียน	106

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า	
1.1	อัตราการเจริญเติบโตของการผลิต WPCs ช่วงปี 2010 ถึง ปี 2015	4
1.2	ส่วนแบ่งทางการตลาดของแผ่นเรียบ (decking) ในแต่ละวัสดุ	4
4.1	ระดับของภาระที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบ	58
4.2	ค่าความเครียดของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพารา	60
4.3	ค่าตัวแปรของแบบจำลองเบอร์เกอร์ 4 องค์ประกอบและแบบจำลองสมการยกกำลัง	64
4.4	ค่าตัวแปรของแบบจำลองเบอร์เกอร์ 6 องค์ประกอบ	64
4.5	ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ระดับภาระ 20%	65
4.6	ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ระดับภาระ 30%	65
4.7	ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ระดับภาระ 40%	66
4.8	ค่าความเครียดของการคืบของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน	69
4.9	ค่าตัวแปรของแบบจำลองที่ภาระ 20% ในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน	73
4.10	ค่าตัวแปรของแบบจำลองที่ภาระ 30% ในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน	73
4.11	ค่าตัวแปรของแบบจำลองที่ภาระ 40% ในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน	74
4.12	ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่อุณหภูมิ 28°C ภาระ 20%	78
4.13	ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่อุณหภูมิ 38°C ภาระ 20%	78
4.14	ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่อุณหภูมิ 48°C ภาระ 20%	78
4.15	ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่อุณหภูมิ 58°C ภาระ 20%	79
4.16	ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่อุณหภูมิ 68°C ภาระ 20%	79

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ		หน้า
1.1	การทดสอบแรงดัดของชิ้นส่วนคานวัสดุผสมโดยใช้ไดอัลเกจ	7
2.1	โครงสร้างทางเคมีของหน่วยย่อยของพอลิโพรพิลีน	13
2.2	การทำงานส่วนต่าง ๆ ของเครื่องอัดรีด	15
2.3	ส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องขึ้นรูปแบบการอัด	16
2.4	เส้นโค้งความเค้นและความเครียดของการทดสอบแรงดึง	17
2.5	การทดสอบแรงอัด	18
2.6	แรงเค้นในชิ้นทดสอบที่หาความทนแรงโค้งงอแบบ 3 จุด	19
2.7	การทดสอบความทนแรงโค้งงอแบบ 3 จุด	19
2.8	ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง SEM	20
2.9	สมบัติการยืดหยุ่นเชิงเส้นและการยืดหยุ่นไม่เชิงเส้น	21
2.10	ลักษณะของเส้นโค้งการคืบ	23
2.11	การคืบตัวเป็นฟังก์ชันของเวลาที่เวลา $t$ ใด ๆ	24
2.12	แบบจำลองของแมกซ์เวลล์	24
2.13	แบบจำลองของเคลวิน	25
2.14	แบบจำลองเบอร์เกอร์ 4 องค์ประกอบ	26
2.15	แบบจำลองเบอร์เกอร์ 4 องค์ประกอบของพฤติกรรมการคืบ	27
2.16	แบบจำลองเบอร์เกอร์ 6 องค์ประกอบ	28
2.17	ค่ามอดุลัสที่ขึ้นกับอุณหภูมิ	29
2.18	การสร้างเส้นโค้งหลักโดยการเลื่อนแกนในแนวนอน	31
2.19	การสร้างเส้นโค้งหลักโดยการเลื่อนแกนในแนวนอนและแนวตั้ง	31
3.1	พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล	33
3.2	ผงไม้ยางพารา	34
3.3	สารคู่ควบ	34
3.4	สารต้านรังสียูวี	34
3.5	สารหล่อลื่น	35
3.6	เครื่องร่อนแยกขนาด	35
3.7	ตู้อบความร้อน	36
3.8	เครื่องย่อยพลาสติกและวัตถุบดสำหรับป้อนเข้า	36

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า	
3.9	เครื่องอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยว	37
3.10	เครื่องอัดรีดร้อน	37
3.11	แม่พิมพ์แผ่นบนและแม่พิมพ์แผ่นล่าง	38
3.12	แบบแม่พิมพ์แผ่นกลาง	38
3.13	เครื่องทดสอบสมบัติทางวัสดุ	39
3.14	เตาอบสำหรับเครื่องทดสอบวัสดุ	40
3.15	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด	40
3.16	เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน	41
3.17	ชุดทดสอบพฤติกรรมการคืบ	42
3.18	ฐานรองรับชิ้นงานทดสอบ	42
3.19	แท่งน้ำหนัก	43
3.20	โครงเหล็กรองรับชุดทดสอบ	43
3.21	ไดอัลเกจ	44
3.22	ฐานแม่เหล็กจับยึดไดอัลเกจ	45
3.23	แม่แรงไฮดรอลิก	45
3.24	กล้องเว็บแคม	46
3.25	ชิ้นงานทดสอบแรงดัด	46
3.26	ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง	47
3.27	ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงอัด	47
3.28	แผนผังการดำเนินงาน	48
3.29	เส้นวัสดุผสมที่ผ่านกระบวนการอัดรีด	50
3.30	เม็ดวัสดุผสม	50
3.31	ขั้นตอนการใส่เม็ดวัสดุผสมลงแม่พิมพ์อัดรีด	51
3.32	ชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดรีด	51
3.33	เตรียมชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องกัดแนวตั้ง	52
3.34	ชิ้นงานสำหรับการทดสอบทางโครงสร้างสัณฐานวิทยา	52
3.35	ชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติทางความร้อน	53
4.1	สมบัติทางกลของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพารา	56

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ		หน้า
4.2	โครงสร้างสัณฐานวิทยาของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพารา	56
4.3	โครงสร้างสัณฐานวิทยาของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพาราที่ผสมด้วยกระบวนการอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยวและขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีดอื่น	57
4.4	ค่าความเครียดของการคืบของ WPCs และ rPP	58
4.5	เส้นโค้งการคืบแรงดัดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองของเบอร์เกอร์และแบบจำลองสมการยกกำลังที่ระดับภาระที่แตกต่างกัน	60
4.6	เส้นโค้ง TGA ของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล และวัสดุผสมจากพอลิโพรพิลีนกับผงไม้ยางพารากับพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล	67
4.7	เส้นโค้ง DTG ของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล และวัสดุผสมจากพอลิโพรพิลีนกับผงไม้ยางพารากับพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล	68
4.8	เส้นโค้งการคืบระยะสั้นของภาระ 20% ที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน	70
4.9	เส้นโค้งการคืบระยะสั้นของภาระ 30% ที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน	71
4.10	เส้นโค้งการคืบระยะสั้นของภาระ 40% ที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน	72
4.11	แนวโน้มระยะการโก่งงอของวัสดุผสมไม้พลาสติกที่ระดับของภาระที่แตกต่างกัน	72
4.12	เส้นโค้งหลักจากการคืบระยะสั้นที่ภาระ 40% อ้างอิงที่อุณหภูมิ 28°C	80
4.13	เส้นโค้งหลักจากการคืบระยะยาวที่ระดับภาระที่แตกต่างกัน อ้างอิงที่ระดับของภาระ 20%	80
4.14	การเปรียบเทียบเส้นโค้งต้นแบบจาก TTS และเส้นโค้งจากการคืบระยะยาว	82
4.15	อายุการใช้งานของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและผงไม้ยางพารา	82

### สัญลักษณ์ที่ใช้

$C_e$	ความเครียดของการคืบอย่างทันที
$C_{ve}$	ความเครียดของการคืบหย่อนหนืดหลังเวลา $t$
$C_t$	ความเครียดของการคืบรวมหลังเวลา $t$
$E_M$	มอดุลัสยืดหยุ่นของชิ้นส่วนสปริงขององค์ประกอบแมกซ์เวลล์ในแบบจำลองของเบอร์เกอร์ 4 องค์ประกอบ
$E_K$	มอดุลัสยืดหยุ่นของชิ้นส่วนสปริงขององค์ประกอบเคลวินในแบบจำลองของเบอร์เกอร์ 4 องค์ประกอบ
$E_0$	มอดุลัสยืดหยุ่นของชิ้นส่วนสปริงขององค์ประกอบแมกซ์เวลล์ในแบบจำลองของเบอร์เกอร์ 6 องค์ประกอบ
$E_1$	มอดุลัสยืดหยุ่นของชิ้นส่วนสปริงขององค์ประกอบเคลวิลส่วนแรกในแบบจำลองของเบอร์เกอร์ 6 องค์ประกอบ
$E_2$	มอดุลัสยืดหยุ่นของชิ้นส่วนสปริงขององค์ประกอบเคลวิลส่วนที่สองในแบบจำลองของเบอร์เกอร์ 6 องค์ประกอบ
$F$	แรงที่กระทำบนชิ้นงานทดสอบ
$h$	ความหนาของชิ้นงานทดสอบ
$L$	ระยะห่างของบารองรับชิ้นงานทดสอบ
$n$	เลขชี้กำลังของสมการยกกำลังเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและความเค้นที่เพิ่มขึ้น
$r_0$	ตัวแปรความยืดหยุ่นของการตอบสนองอย่างทันที
$t$	เวลา
$t_{Cve}$	เวลา ณ ตำแหน่งความเครียดของการคืบหย่อนหนืดในช่วงวิสโคอิลาสติกแบบไม่เป็นเชิงเส้น
$t_{Cve1}$	เวลา ณ ตำแหน่งความเครียดของการคืบหย่อนหนืดในช่วงวิสโคอิลาสติกแบบไม่เป็นเชิงเส้นในตำแหน่งแรก
$t_{Cve2}$	เวลา ณ ตำแหน่งความเครียดของการคืบหย่อนหนืดในช่วงวิสโคอิลาสติกแบบไม่เป็นเชิงเส้นในตำแหน่งที่สอง
$t_{Ct}$	เวลา ณ ตำแหน่งความเครียดของการคืบหย่อนหนืดในช่วงวิสโคอิลาสติกแบบเชิงเส้น
UFS	ความต้านทานแรงดัดสูงสุด
W	ความกว้างของชิ้นงานทดสอบ

### สัญลักษณ์ที่ใช้ (ต่อ)

$\varepsilon$	ความเครียด
$\sigma$	ความเค้น
$\eta_K$	ความหนืดของชั้นส่วนแดชพอตขององค์ประกอบเคลวินในแบบจำลองของเบอร์เกอร์ 4 องค์ประกอบ
$\eta_M$	ความหนืดของชั้นส่วนแดชพอตขององค์ประกอบแมกซ์เวลล์ในแบบจำลองของเบอร์เกอร์ 4 องค์ประกอบ
$\eta_1$	ความหนืดของชั้นส่วนแดชพอตขององค์ประกอบเคลวินส่วนแรกในแบบจำลองของเบอร์เกอร์ 6 องค์ประกอบ
$\eta_2$	ความหนืดของชั้นส่วนแดชพอตขององค์ประกอบเคลวินส่วนที่สองในแบบจำลองของเบอร์เกอร์ 6 องค์ประกอบ
$\eta_0$	ความหนืดของชั้นส่วนแดชพอตขององค์ประกอบแมกซ์เวลล์ในแบบจำลองของเบอร์เกอร์ 6 องค์ประกอบ
$\varepsilon_{Ce}$	ความเครียดของการคืบอย่างทันทีในช่วงอีลาสติก
$\varepsilon_{Cve}$	ความเครียดของการคืบหยุ่นหนืดในช่วงวิสโคอีลาสติกแบบไม่เป็นเชิงเส้น
$\varepsilon_{Ct}$	ความเครียดของการคืบหยุ่นหนืดในช่วงวิสโคอีลาสติกแบบเชิงเส้น

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

วัสดุผสมไม้พลาสติก (wood plastic composites; WPCs) เป็นวัสดุประเภทหนึ่งที่กำลังเติบโต WPCs ผลิตได้โดยการนำผงไม้ผสมกับพลาสติก และสารเติมแต่งหรือสารเพิ่มการยึดเกาะ และทำการขึ้นรูป ในการขึ้นวัสดุผสมไม้พลาสติกสามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น การอัดรีด การอัดร้อน และการฉีด [1] นอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุงสมบัติได้ง่าย โดยการเติมสารเติมแต่ง (additives) เช่น สารเสริมสภาพพลาสติก (plasticizer) สารปรับปรุงคุณภาพ (modifier) สารเสริม (filler) สารคงสภาพ (stabilizer) สารยับยั้งปฏิกิริยา (inhibitor) สารหล่อลื่น (lubricant) และผงสี (pigment) เป็นต้น [2] วัสดุผสมไม้พลาสติกเป็นวัสดุซึ่งได้รับความนิยมอย่างมากทั่วโลก ทั้งในยุโรป อเมริกา หรือแม้แต่ในเอเชียรู้จักในชื่อทั่วไปว่า “ไม้เทียม” วัสดุชนิดนี้สามารถทนทานต่อแสงแดด และฝน มีสีสันทน และลวดลายหลากหลาย หรือสามารถทาสีได้ตามความต้องการ และปลอดภัยจากการรุกรานของปลวก วัสดุผสมไม้พลาสติกนี้ได้ประยุกต์ใช้เมทริกซ์เป็นพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ พอลิโพรพิลีน (PP) พอลิเอทิลีน (PE) พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) และพอลิสไตรีน (PS) เป็นต้น [3] วัสดุผสมไม้พลาสติกมีการนำมาประยุกต์เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายทั้งในการก่อสร้างด้านวิศวกรรมโยธา และในอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น โครงสร้างเรือ ชิ้นส่วนรถยนต์ รั้ว หน้าต่าง ประตู และเฟอร์นิเจอร์ในสวน เนื่องจากในปัจจุบันไม่มีปริมาณลดน้อยลง และมีราคาเพิ่มสูงขึ้นทำให้เกิดการพัฒนาวัสดุผสมไม้พลาสติกขึ้นมาเป็นวัสดุทดแทนไม้จริง [1, 4, 5] ต่อมาได้เกิดแนวคิดในการประยุกต์ใช้วัสดุรีไซเคิลรวมกันเป็นผลิตภัณฑ์จากวัสดุผสม และวัสดุรีไซเคิลซึ่งมีข้อดี คือ มีค่าใช้จ่ายน้อยกว่าผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพลาสติกเพียงอย่างเดียว และยังสามารถที่จะนำกลับมาใช้สำหรับการผลิตวัสดุผสมครั้งต่อ ๆ ไปได้ [6] Balatinecz et al. ได้พบว่า การนำวัสดุผสมมารีไซเคิลต่อเนื่องส่งผลให้สมบัติทางกล และค่าความหนืดลดลงเล็กน้อย [7] ในประเทศสหรัฐอเมริกา ปี 1983 American woodstock ได้ทำการอัดรีดวัสดุผสมพอลิโพรพิลีน (PP) กับขี้เลื่อยไม้ โดยใช้ผงไม้ 50 % เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ตกแต่งในอุตสาหกรรมรถยนต์ ถือว่าเป็นก้าวแรกในการใช้วัสดุผสมไม้พลาสติกอุตสาหกรรม จากนั้นได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งในปี 1993 Anderson Corporation ได้ผลิตวัสดุผสมพอลิไวนิลคลอไรด์กับขี้เลื่อยไม้ เพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ ปัจจุบันวัสดุผสมไม้พลาสติกเป็นวัสดุที่ได้รับการสนใจมากมีการผลิต และมีการนำไปใช้มากขึ้น [8]



เนื่องจากความไม่แน่นอนด้านความเสถียรของวัสดุผสมไม้พลาสติกในการนำไปประยุกต์ใช้งานภายใต้เงื่อนไขสถานที่โล่งแจ้งทำให้มีข้อจำกัดต่อการประยุกต์ใช้งาน และเงื่อนไขหลักที่มีผลต่อวัสดุผสมไม้พลาสติก คือ อุณหภูมิและแสงอาทิตย์ (แสงยูวี) ส่งผลให้วัสดุผสมไม้พลาสติกเปลี่ยนสมบัติทางฟิสิกส์ และเคมี [1] จากงานวิจัยที่ศึกษาพฤติกรรมการคืบของวัสดุผสมที่ผลิตจากเทอร์โมพลาสติก และสารเสริมแรงทางธรรมชาติ เช่น ผงไม้สน เมเปิล ชานอ้อย และปอกระเจา เพื่ออธิบายความเครียดที่เพิ่มขึ้นโดยขึ้นอยู่กับความเค้น เวลา และอุณหภูมิ [9] พฤติกรรมทางกลเป็นแบบวิสโคอีลาสติก (viscoelastic) หรือมีคุณลักษณะยืดหยุ่น (elastic) และหนืด (viscous) พฤติกรรมนี้จะประกอบไปด้วยพฤติกรรมที่ขึ้นอยู่กับเวลา และการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรหลังจากที่นำเอาภาระที่กระทำกับวัสดุออก ตัวอย่างของพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลา เช่น พฤติกรรมการคืบ (creep) ซึ่งเป็นพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุที่ขึ้นอยู่กับเวลาเมื่อวัสดุนั้นอยู่ภายใต้สภาวะภาระคงที่ ส่วนพฤติกรรมการคลายความเค้น (stress relaxation) คือ พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความต้านทานแรงในวัสดุเมื่อวัสดุนั้นอยู่ภายใต้สภาวะที่การเสียรูปคงที่ [10] ในงานวิจัยของ C. Homkhiew et al. [11] ได้ดำเนินการทดสอบการคืบในสภาวะแวดล้อมที่ 25°C ระยะเวลาในการทดสอบคืบเป็น 100 นาที แล้วเทียบเคียงกับแบบจำลองของเบอร์เกอร์ ซึ่งได้ผลจากการทดลองที่เหมาะสม ในการทำนายพฤติกรรมการคืบเป็นการใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์คำนวณพฤติกรรมการคืบของวัสดุที่มีสมบัติวิสโคอีลาสติก คือ maxwell combined voigt model (burgers model) โมเดลนี้จะใช้การคำนวณค่าของพฤติกรรมการคืบ และนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าของการคืบที่ได้จากการทดลองจริง พบว่า burgers model สามารถทำนายพฤติกรรมการคืบระยะสั้นได้อย่างถูกต้อง และแม่นยำ นอกจากนี้ ทฤษฎี time-temperature superposition (TTS) เป็นทฤษฎีที่นำมาใช้ในการทำนายพฤติกรรมการคืบระยะยาวโดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบระยะสั้นที่หลาย ๆ อุณหภูมิมาวางทับซ้อนกันบนเส้นของเวลาเดียวกันจะทำให้ได้เป็นเส้นกราฟการคืบหลักขึ้นมา จากนั้นคำนวณหาอายุการใช้งานของวัสดุผสมที่ได้จากการประยุกต์โมเดลทางคณิตศาสตร์ [12] เพราะฉะนั้นการคืบจึงเป็นสมบัติอย่างหนึ่งที่มีความจำเป็นต้องศึกษาเมื่อมีการพัฒนา และใช้วัสดุผสม [13]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบหาค่ามอดุลัสการแตกร้า และมอดุลัสยืดหยุ่นของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีน และผงไม้ยางพาราโดยวิธีการดัดแบบ 3 จุด (3 points bending) ซึ่งเหมาะสำหรับการทดสอบวัสดุผสมไม้พลาสติกที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ต่ำ ง่ายต่อการติดตั้งการทดลอง และเป็นที่ยอมรับในการใช้วิเคราะห์ โดยการทดสอบพฤติกรรมการคืบแบบภาระตายตัว (dead load) ซึ่งจะได้รับภาระที่คงที่เปรียบเสมือนการรับภาระจากการใช้งานจริง เพื่อหาพฤติกรรมการคืบของชิ้นทดสอบที่ผลิตจากวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพารา โดยมีจุดมุ่งหมายในการศึกษาพฤติกรรมการคืบของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพาราเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการทำนายการเสียหายของชิ้นงานเมื่อได้รับภาระคงที่ที่แตกต่างกัน และใช้เป็นพื้นฐานในงานวิจัยการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ได้

จากวัสดุผสมพอลิโพรพิลีน และผงไม้ยางพาราต่อไปในอนาคตนอกจากจะเป็นการนำเศษวัสดุไม้เหลือใช้จากกระบวนการผลิตในโรงงานมาผลิตเป็นวัสดุทดแทนไม้แล้วยังถือเป็นการรักษาสิ่งแวดล้อมด้วยการสร้างมูลค่าให้กับขยะที่ไม่ก่อให้เกิดประโยชน์

## 1.2 การสำรวจเอกสาร

การตรวจสอบเอกสารที่ผ่านมาพบว่าในประเทศไทย และต่างประเทศมีการบริโภคพลาสติกในอัตราที่สูง จึงมีนักวิจัยและผู้ผลิตมีแนวคิดที่ใช้วัสดุธรรมชาติ เช่น ผงไม้ และเส้นใยธรรมชาติ เป็นสารตัวเติมในพลาสติกเพื่อลดต้นทุนในการผลิต ปัจจุบันวัสดุผสมพลาสติกกับไม้เป็นวัสดุที่ได้รับการสนใจมากมีการผลิตและการนำไปใช้มากขึ้น [14] ในส่วนของเส้นใยเสริมแรงที่นำมาประยุกต์ใช้ยกตัวอย่าง เช่น ผงไม้ยางพารา เนื่องมาจากต้นยางพาราจะปลูกกันอย่างแพร่หลายในประเทศไทยเมื่อผลผลิตน้ำยางที่ได้ไม่คุ้มค่าจะถูกตัดโค่นอายุต้นประมาณ 25 ปี [15] ไม้ยางพาราส่วนใหญ่จะใช้ในการผลิตเฟอร์นิเจอร์ ของเล่น และบรรจุภัณฑ์ จากกระบวนการแปรรูปเชิงอุตสาหกรรมเหล่านี้ก่อให้เกิดผงไม้ และซีลี้อยในปริมาณมาก โดยทั่วไปเศษไม้ยางพาราเหล่านี้จะถูกนำไปฝังกลบหรือเผา นอกจากนี้ยังใช้ในการผลิตปาร์ติเกิลบอร์ด (particleboard) หรือ ไฟเบอร์บอร์ดความหนาแน่นปานกลาง (MDF) [16] และยังได้ประยุกต์ใช้ประโยชน์จากเศษไม้ยางพาราเป็นตัวเติมในวัสดุผสมพอลิเมอร์สามารถลดปริมาณขยะที่เกิดขึ้น และเป็นการเพิ่มมูลค่า ซึ่งประเทศไทยถือว่าเหมาะแก่การผลิตวัสดุเชิงประกอบพลาสติก และไม้เป็นอย่างดี เพราะประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมซึ่งมีของเสียหรือของเหลือใช้ที่เกิดขึ้นจากภาคอุตสาหกรรมเกษตรเป็นจำนวนมาก เช่น ซีลี้อยไม้ยางพาราที่เป็นของเหลือใช้จากอุตสาหกรรม การผลิตเฟอร์นิเจอร์ และการแปรรูปไม้ยางพารา ในขณะเดียวกันการผลิตวัสดุเชิงประกอบจำเป็นต้องมีความรู้ และความเข้าใจพื้นฐานในวัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนผสม การปรับปรุงสมบัติทางกล และกรรมวิธีการผลิตวัสดุเชิงประกอบ [17] จากผลการสำรวจอัตราการเจริญเติบโตของการผลิตวัสดุผสมไม้พลาสติกสามารถพบได้ในจีนร้อยละ 25 ต่อปี และมีอุปสงค์ในประเทศจีนมีการเติบโตขึ้น อุตสาหกรรมวัสดุผสมไม้พลาสติกของจีนเป็นที่ใหญ่ที่สุด ในโลกรองจากสหรัฐอเมริกา ตามการคาดการณ์ในปี 2015 แสดงดังตารางที่ 1.1 [18] เช่นเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบปริมาณส่วนแบ่งทางการตลาดของแผ่นเรียบ (decking) ที่ผลิตจากไม้ธรรมชาติ พลาสติก และวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้แสดงในตารางที่ 1.2 พบว่าส่วนแบ่งทางการตลาดของแผ่นเรียบที่ผลิตจากไม้ธรรมชาติมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน สิ่งนี้เป็นเพราะว่าไม้ธรรมชาติมีปริมาณลดลง และราคาสูงขึ้นตลอดจนในปัจจุบันมีการตระหนักถึงการอนุรักษ์ธรรมชาติเพิ่มขึ้น เพื่อต้องการลดภาวะโลกร้อน ทำให้เกิดการวิจัยเพื่อหาวัสดุทดแทนการใช้ไม้จากธรรมชาติ และวัสดุเหล่านั้นคือ พลาสติกและวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ [19]

ตารางที่ 1.1 อัตราการเจริญเติบโตของการผลิต WPCs ช่วงปี 2010 ถึง ปี 2015

	2010	2015	growth (% ต่อปี.)	global share in 2015 (%)
อเมริกาเหนือ	900,000	1,300,000	8	48
จีน	300,000	900,000	25	33
ยุโรป	150,000	250,000	11	9
ญี่ปุ่น	60,000	120,000	15	4
รัสเซีย	10,000	70,000	48	3
เอเชียตะวันออกเฉียงใต้	30,000	55,000	13	2
อเมริกาใต้	10,000	50,000	38	2
อินเดีย	5,000	40,000	52	1
รวม	1,450,000	2,695,000	13	103

ที่มา : bioplastics MAGAZINE [18]

ตารางที่ 1.2 ส่วนแบ่งทางการตลาดของแผ่นเรียบ (decking) ในแต่ละวัสดุ

Year	Market (\$ billions)	Share of (%)		
		Wood	Plastic	WPCs
1992	2.3	97	1	2
2002	3.4	91	2	7
2005	5.1	77	4	19
2006	5.5	73	5	22
2011	6.5	66	4	30

ที่มา : A. A. Klyosov [19]

พอลิเมอร์ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกบริสุทธิ์ เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) พอลิโพรพิลีน (PP) พอลิเอทิลีน (PE) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) และความหนาแน่นต่ำ (LDPE) [20, 21] นอกจากนี้มีงานวิจัยจำนวนน้อยที่มีการนำพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกรีไซเคิล เช่น พอลิโพรพิลีน พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และความหนาแน่นต่ำ [22] มาประยุกต์ใช้เป็นส่วนผสมของวัสดุผสม อย่างไรก็ตามจากการวิจัยพบว่ามีสมบัติทางกลของวัสดุผสมที่มีส่วนผสมของพลาสติกประเภท พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (rPP) มีความคล้ายหรือบางสมบัติดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุผสมที่มีส่วนผสมของพลาสติกบริสุทธิ์ [1, 20] ขั้นตอนการผสมและขึ้นรูปวัสดุผสมไม้พลาสติก รวมไปถึงพฤติกรรมคาร์บอนที่เกิดขึ้นของวัสดุผสมไม้พลาสติกมีรายละเอียดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

### 1.2.1 กระบวนการผสมและขึ้นรูปวัสดุผสมไม้พลาสติก

กระบวนการผลิตวัสดุผสมบนพื้นฐานของเทอร์โมพลาสติกโดยปกติมี 2 ขั้นตอน คือ (1) การผสมของวัสดุเสริมแรง และพลาสติกกับสารเพิ่มการยึดเกาะหรือสารอื่น ๆ เพิ่มเติม (2) การอัดรีด การฉีด หรือการอัดของส่วนผสมที่ผสมเตรียมไว้เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการผสมที่เหมาะสมของวัสดุเสริมแรงกับพอลิเมอร์ และสารเสริมเป็นสิ่งสำคัญในการผลิตวัสดุผสม การผสมคือ กระบวนการของการบด และการกระจายของวัสดุเสริมแรง และสารเสริมเข้าไปสู่พอลิเมอร์ที่หลอมเหลวโดยการใช้แบทช์ (batch) หรือการผสมที่ต่อเนื่อง (continuous) นอกจากนี้เวลาการผสมที่เหมาะสม และอุณหภูมิที่ผสมสามารถปรับปรุงคุณภาพของการผสม และสมบัติของวัสดุผสม [1] ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ [23] ได้ผลิตผลิตภัณฑ์จากวัสดุผสมพีวีซีกับซีลื้ออไม้จากกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป โดยการเตรียมของผสมระหว่างพีวีซีกับซีลื้ออไม้ และสารช่วยผลิตหรือสารเติมแต่งต่าง ๆ คือ พีวีซีเรซิน ซีลื้ออ สารเพิ่มความเหนียวพีวีซี สารเพิ่มความเสถียรทางความร้อน สารหล่อลื่น แคลเซียมคาร์บอเนต แคลเซียมสเตียเรต และสารช่วยผลิต นอกจากนี้ P.Y. Kuo et al. [20] พบว่าค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคของเส้นใยลดลง และขนาดของอนุภาคที่ใช้ในการผลิตวัสดุผสมไม้พลาสติกควรมีขนาดเล็กกว่า 80 เมช (mesh) ในขั้นตอนของกระบวนการผสมเม็ดพลาสติก และผงไม้ K. P. Gohr et al. [24] ทำการเตรียมเม็ดพลาสติกผสมผงไม้ด้วยการนำผงไม้ผสมในเครื่องอัดรีด โดยเครื่องอัดรีดที่ใช้ในการผสมจะต้องมีการควบคุมความชื้นของผงไม้ด้วย ซึ่งในการผลิตนี้เริ่มจากใส่พอลิเมอร์ลงในเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ในช่วงแรกก่อน จากนั้นถูกลำเลียงตามบารเรล แล้วจึงป้อนผงไม้ตามไปซึ่งในช่วงนี้จะต้องมีการระบายอากาศออกด้วยจนกระทั่งพอลิเมอร์ผสมที่หลอมเหลวถูกอัดผ่านรูเล็ก ๆ แล้วจึงตัดเป็นเม็ด จากนั้นเป่าผงแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) และทลคิปที่เม็ดพลาสติกผสมเพื่อให้เย็นเร็ว Naret Intawong et al. [25] ทำการผสมส่วนผสมของวัสดุผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวเดียว และขึ้นรูปวัสดุผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดซึ่งช่วงอุณหภูมิของเครื่องอัดรีดสามารถแบ่งเป็น 4 ช่วง คือ 170, 180, 190, 190°C ตามลำดับ และใช้ความเร็วของเกลียวที่ 50 รอบต่อนาที ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปเม็ดวัสดุผสม (wood plastic composite pellets) อุณหภูมิในบารเรลจะแตกต่างกันเนื่องจากอัตราการเย็นในช่วงต่าง ๆ ของบารเรล G. Hua et al. [26] นำเส้นใยไม้อบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยให้ความชื้นต่ำกว่า 1% จากนั้นทำการผสมส่วนผสมของวัสดุผสมโดยเครื่องผสมความเร็วสูงที่อุณหภูมิ 75°C เป็นเวลา 15 นาที และทำการผสมซ้ำอีกครั้งโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (co-rotating twin-screw) El-Hagggar et al. [27] ได้ทำการผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE), พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และผงไม้ ซึ่งใช้อุณหภูมิในการอัดรีดที่ 120°C และ 180°C ภายในเวลา 17 นาที สำหรับวัสดุ 1.5 กิโลกรัม จากนั้นนำไปบดในเครื่องย่อยเพื่อให้ได้เม็ดพลาสติกผสมขนาดเล็กเพื่อกระจายความแตกต่างของเนื้อวัสดุผสมในชิ้นงาน H. Wang

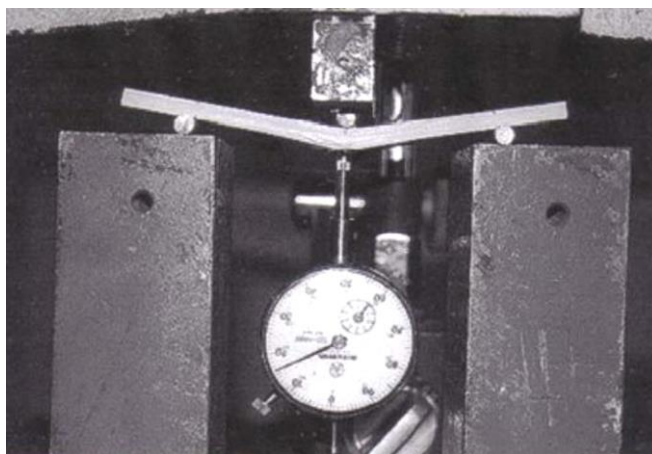
et al. [28] ทำการขึ้นรูปวัสดุผสมจากไม้ไผ่ และพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ด้วยกระบวนการอัดร้อนที่ 6 MPa อุณหภูมิ 448.15 เคลวิน โดยให้ความร้อนในการอุ่นแม่พิมพ์ก่อนอัดขึ้นรูปเป็นเวลา 3 นาที และใช้เวลาในการอัดขึ้นงานที่เวลา 5 นาที และเช่นเดียวกับการขึ้นรูปวัสดุผสมของ D. P. Kamdem et al. [29] ขึ้นรูปวัสดุผสมโดยกระบวนการอัดร้อนโดยใช้แรงดันในการอัดที่ 800 psi อุณหภูมิ 200°C ในช่วงแรกทำการให้ความร้อนในแม่พิมพ์จนถึง 200°C เป็นเวลา 8 นาที จากนั้นประกบ และปิดแม่พิมพ์อย่างช้า ๆ 2 นาที เพื่อการไหลของเทอร์โมพลาสติกจะช่วยลดโอกาสที่จะเกิดช่องว่าง ภายใน หลังจากนั้นทำการอัดเป็นเวลา 5 นาที

จากการสำรวจเอกสารจะเห็นได้ว่าการขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุผสมไม้พลาสติกมีความจำเป็นต้องขึ้นรูปเม็ดวัสดุผสม (wood plastic composite pellets) เป็นลำดับแรก เพื่อให้ได้การกระจายตัวของผงไม้ในพลาสติกเมทริกซ์ที่มีความสม่ำเสมอ หลังจากนั้นจึงสามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน หรือผลิตภัณฑ์ตามลักษณะการใช้งาน ในงานวิจัยได้เลือกใช้การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการอัดร้อน เนื่องจากการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อน ประหยัดวัตถุดิบในกระบวนการขึ้นรูป และได้ชิ้นงานที่มีความหนาแน่นสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน

### 1.2.2 พฤติกรรมการคืบของวัสดุผสมไม้พลาสติก

วัสดุพอลิเมอร์มีพฤติกรรมที่ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น เวลา อุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ค่าความเค้น เป็นต้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้เป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลของวัสดุพอลิเมอร์ [30] การคืบได้ถูกรวมอยู่ในสมบัติทางกลของวัสดุผสมไม้พลาสติก ซึ่งการเสียรูปจะขึ้นอยู่กับเวลาภายใต้ภาระที่กระทำต่อเนื่อง การคืบดังกล่าวเป็นปัญหาที่สำคัญในการใช้งานสำหรับด้านวิศวกรรมหลายอย่าง เช่น ชีวการแพทย์ อากาศยาน และการใช้งานโครงสร้างพื้นฐานทางวิศวกรรมโยธา [31] การคืบจึงเป็นลักษณะสำคัญในการออกแบบผลิตภัณฑ์วัสดุผสมไม้พลาสติก และเกี่ยวข้องกับภาระรับน้ำหนักจนสิ้นสุดอายุผลิตภัณฑ์ เช่นเดียวกัน ความทนทาน และข้อจำกัดอายุของผลิตภัณฑ์ ควรได้รับการประเมินตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบ [32] ในส่วนของงานก่อสร้างด้านวิศวกรรมโยธาได้มีการพัฒนาพลาสติกเสริมเส้นใยชนิดใหม่ขึ้นมากมาย เช่น พลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดชัน (Pultrusion) หน้าที่ครูปัวซีได้มีการทดสอบแรงดัด (flexural test) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790-92 เพื่อหาค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของการดัด (flexural modulus of elasticity) และค่าความแข็งแรงดัดสูงสุด (flexural ultimate stress) ตัวอย่างทดสอบถูกตัดในแนวขนานกับทิศทางการวางตัวหลักของเส้นใยเพียงทิศทางเดียว [33] ลักษณะการทดสอบแสดงดังภาพที่ 1.1 Mosallam et al. [34] เนื่องจากลักษณะความยืดหยุ่นของวัสดุผสมมักส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และเสียหายจากการคืบจึงได้คิดค้นคานวัสดุผสม และลวดอัดเสริมแรง และทำการทดสอบสมบัติการคืบโดยใช้ป้าสองข้างในการรองรับคาน และใช้น้ำหนักคงที่ (dead weight) ทั้ง

ไว้บนพื้นผิวด้านบนที่จุดกึ่งกลางของคานทดสอบ ณัฐพจน์ สุวรรณชีวะศิริ [35] ได้ศึกษาการคืบที่ขนาดการโก่งตัวของชิ้นงานเริ่มต้นต่างกัน คือ การโก่งตัวเมื่อได้รับภาระคงที่ขนาด 20%, 30% และ 40% ของภาระเฉลี่ยสูงสุด โดยใช้เวลาเก็บข้อมูลในการทดสอบการคืบเป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง นับจากวันที่เริ่มให้ภาระ และเก็บข้อมูลการโก่งตัว และความเครียดในนาที่ที่ 1, 6, 12, 30 ตามด้วย ชั่วโมงที่ 1, 2, 5, 20, 50, 100, 200, 500, 700 และ 1,000 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ASTM D2990 ธวัชชัย อุ่นใจจง [36] ได้ศึกษาพฤติกรรมกรรมการคืบของไม้ไผ่ภายใต้สภาวะความชื้น และอุณหภูมิคงที่ ด้วยการให้ภาระกระทำกับชิ้นงานพบว่าชิ้นงานทดสอบมีการโก่งอย่างฉับพลันเมื่อเริ่มมีภาระกระทำ จากนั้นจะเกิดการโก่งเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนมีค่าสูงสุดเมื่อเวลาครบ 4 ชั่วโมง



ภาพที่ 1.1 การทดสอบแรงดัดของชิ้นส่วนคานวัสดุผสมโดยใช้ไดอัลเกจ [33]

จากการวิจัยของ S. Panthapulakkal et al. [37] พบว่าการใช้พลาสติกบริสุทธิชนิดพอลิโพรพิลีนซึ่งเป็นพลาสติกชนิดที่มีการนำมาประยุกต์ใช้ยังมีข้อดีคือ ราคาถูก รีไซเคิลง่าย และความเสถียรทางความร้อนสูง และพบว่าสมบัติทางกลของพลาสติกรีไซเคิลจากขวดนมไม่มีความแตกต่างจากพลาสติกบริสุทธิ C. Homkhiew et al. [38] ได้พบว่าอัตราส่วนผสมของ พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล 50.3% โดยน้ำหนัก ผงไม้ยางพารา 44.5% โดยน้ำหนัก สารคู่ควบ 3.9% โดยน้ำหนัก สารต้านรังสียูวี 0.2% โดยน้ำหนัก และสารหล่อลื่น 1% โดยน้ำหนัก ได้ค่ามอดุลัสแตกร้า (MOR) เท่ากับ 47.28 MPa และค่ามอดุลัสยืดหยุ่น (MOE) เท่ากับ 2527 MPa เป็นอัตราส่วนผสมของวัสดุผสมไม้พลาสติกที่มีความเหมาะสมที่สุด A. J. Schildmeyer [9] พบว่าความไม่แน่นอนด้านความเสถียรของ WPCs ในการนำไปประยุกต์ใช้งานจึงต้องมีการศึกษาพฤติกรรมกรรมการคืบของวัสดุผสมที่ผลิตจากเทอร์โมพลาสติก และสารเสริมแรงทางธรรมชาติเพื่ออธิบายความเครียดที่เพิ่มขึ้นโดยขึ้นอยู่กับความเค้น เวลา และอุณหภูมิ ในงานวิจัยของ K. G. N. C. Alwis et al [39] การคืบโดยปกติจะใช้เวลานานเพื่อให้ได้ข้อมูลความเค้นแตกร้า (stress-rupture) เส้นใยอะรามิดที่ระดับความเครียดต่ำ อย่างไรก็ตามอัตราการคืบของอะรามิดที่สามารถเร่งโดยการเปิดใช้กระบวนการทางความร้อน ซึ่งจะ

ส่งผลให้เกิดการเสียรูปกับชิ้นงานทดสอบภายในไม่กี่ชั่วโมง และยังสามารถนำเส้นโค้งการคืบที่ระดับอุณหภูมิต่างกันมาซ้อนทับตามทฤษฎี time-temperature superposition principle (TTSP) เส้นโค้งที่ได้จะสอดคล้องกับอายุการใช้งานภายใต้ภาระกระทำ M. Nakada et al. [40] จึงได้มีงานวิจัยเพื่อคาดการณ์การตอบสนองต่อความเค้นที่กระทำของวัสดุ (viscoelastic) ในระยะยาวของรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงไปที่อุณหภูมิสภาพแก้ว ( $T_g$ ) ด้วยการทำนายพฤติกรรมการคืบระยะสั้นพร้อมกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น บนหลักการของ time-temperature superposition principle เพื่อให้ได้เส้นโค้งหลักที่ได้รับการยอมรับเมื่อเทียบกับการทดสอบระยะยาว Shim V.P.W. et al [41] ได้ทำการจำลองพฤติกรรมให้เป็นแบบวิสโคไฮเปอร์อีลาสติก ซึ่งทำการทดสอบกดที่ความเครียดแตกต่างกัน และอุณหภูมิแตกต่างกันที่อุณหภูมิ -10, 25, 55 และ 100°C จากนั้นสร้างแบบจำลองโดยใช้สมการวิลเลียม-แลนเดล-เฟอรี (WLF) ในการทำนายผลของอุณหภูมิที่แตกต่างกันในการจำลอง

ผลจากการสำรวจเอกสารจะเห็นได้ว่าพฤติกรรมการคืบเป็นปัญหาที่สำคัญของวัสดุผสมไม้พลาสติก ซึ่งส่งผลให้เกิดการเสียรูปของวัสดุผสมไม้พลาสติกโดยมีหลายปัจจัย ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น เวลา (time) อุณหภูมิ (temperature) การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation) ค่าความเค้น (stress) ปัจจัยเหล่านี้จะนำมาใช้ในงานวิจัยพฤติกรรมการคืบระยะยาว ซึ่งจะถูกรับภาระน้ำหนักเป็นเวลานานเสมือนการใช้งานจริง และพฤติกรรมการคืบระยะสั้นจะถูกกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยใช้อุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้อง และทำนายพฤติกรรมการคืบที่เกิดขึ้นโดยเปรียบเทียบแบบจำลองของเบอร์เกอร์เมื่อมีการเพิ่มขึ้นส่วนในแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ถึงความเหมาะสม และความแม่นยำของแบบจำลองที่เกิดขึ้น

### 1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากภาระ (load) ต่อพฤติกรรมการคืบของวัสดุผสมไม้พลาสติก
- 2) เพื่อทำนายพฤติกรรมการคืบระหว่างการทดสอบระยะสั้นเทียบกับการทดสอบระยะยาวของวัสดุผสมไม้พลาสติก

## 1.4 ขอบเขตการวิจัย

1) ส่วนผสมที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย คือ พลาสติกกรีซเคลิล 50.3% โดยน้ำหนัก ผงไม้ 44.5% โดยน้ำหนัก สารคู่ควบ 3.9% โดยน้ำหนัก สารต้านรังสียูวี 0.2% โดยน้ำหนัก และสารหล่อลื่น 1% โดยน้ำหนัก [38]

2) การเตรียมชิ้นงานทดสอบทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยว และขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดร้อน โดยชิ้นงานทดสอบมีลักษณะตามมาตรฐานการทดสอบแรงดัดตาม ASTM D790

3) ทำการทดสอบชิ้นงานทดสอบด้วยวิธีการดัดแบบ 3 จุด (3 points bending) ด้วยวิธีการทดสอบการคืบแบบภาระตายตัว (dead load)

4) ทำนายพฤติกรรมการคืบของวัสดุผสมไม้พลาสติกด้วยการทดสอบแรงดัดตาม ASTM D790-92 เพื่อทำนายพฤติกรรมการคืบระยะยาวเปรียบเทียบกับระยะสั้น

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

### 1.5.1 ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

1) การศึกษาสมบัติของวัสดุผสมพลาสติกกับผงไม้ให้มีสมบัติที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน เป็นการนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตวัสดุผสมพลาสติกกับเส้นใยธรรมชาติ

2) ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับพฤติกรรมการคืบของวัสดุผสมตลอดจนตัวแปรต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการคืบ ได้แก่ ความเค้น อุณหภูมิ และเวลา

### 1.5.2 ด้านเศรษฐกิจและสังคม

การนำพลาสติก และผงไม้มาผลิตเป็นวัสดุผสมมีส่วนช่วยส่งเสริมให้มีการนำเศษวัสดุเหลือใช้มาใช้ให้เกิดประโยชน์มากขึ้น เช่น การนำผงไม้มาใช้เป็นสารเสริมแรง และการนำพลาสติกกรีซเคลิลกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งเมื่อมีการผลิตในเชิงพาณิชย์จะส่งผลให้เกิดการจ้างงานเพิ่มมากขึ้น และช่วยลดปัญหาการว่างงานภายในประเทศ

### 1.5.3 ด้านสิ่งแวดล้อม

1) การนำผงไม้ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมโรงเลื่อยมาทำให้เกิดประโยชน์เป็นการช่วยกำจัดสิ่งเหลือใช้จากการผลิต และยังเป็น การลดปริมาณการใช้พลาสติก เป็นการนำพลาสติกมาใช้ซ้ำ ทำให้มลพิษที่เกิดขึ้น และขยะมีปริมาณลดน้อยลง



2) วัสดุผสมที่หมดอายุการใช้งาน และเสื่อมสภาพสามารถนำกลับมาย่อยให้มีขนาดเล็ก และนำวัสดุเหล่านั้นมาทำการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ ดังนั้นวัสดุประเภทนี้จะไม่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม

#### 1.5.4 ด้านอุตสาหกรรมและพาณิชย์

ได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถใช้งานได้ในระยะยาว และคงทนต่อการรับน้ำหนัก ซึ่งผลิตมาจากวัสดุผสมที่มีส่วนผสมของผงไม้ ทำให้เป็นผลิตภัณฑ์ทางเลือกใหม่ของผู้บริโภค

#### 1.5.5 ด้านวิชาการทั่วไป

สามารถตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัยในวารสารระดับชาติหรือนานาชาติ และผลงานวิจัยสามารถเป็นแนวทางในการทำวิจัยได้ต่อไปโดยเฉพาะกับวัสดุธรรมชาติ และพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ และสามารถนำไปสู่การพัฒนาสมบัติในด้านต่าง ๆ ให้มีสมบัติที่สูงขึ้น

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยเรื่องพฤติกรรมการคืบของวัสดุผสมพอลิโพรพีลีน และผงไม้ยางพารา ได้ทำการศึกษาในเรื่องของพฤติกรรมการคืบที่เกิดขึ้นต่อภาระคงที่ที่กระทำทั้งในระยะเวลาสั้น และระยะเวลายาว เพื่อนำมาวิเคราะห์ และทำนายพฤติกรรมการคืบที่เกิดขึ้นต่อวัสดุผสมไม้พลาสติก ซึ่งประกอบไปด้วยทฤษฎีเกี่ยวกับวัสดุคอมโพสิต กรรมวิธีในการผลิต สมบัติเชิงกล การวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐานวิทยา การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงวิโคอีลาสติกของวัสดุ พฤติกรรมวิโคอีลาสติกที่ขึ้นกับอุณหภูมิ และการยืนยันผลการทดลองโดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของความคลาดเคลื่อน

#### 2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับวัสดุคอมโพสิต [14]

วัสดุคอมโพสิต คือ วัสดุที่มีวัสดุอื่นอย่างน้อย 2 ชนิดขึ้นไปเป็นองค์ประกอบ วัสดุผสมส่วนใหญ่จะประกอบด้วยสองส่วนสำคัญ คือ ส่วนเมทริกซ์ (matrix phase) และ ส่วนเสริมแรง (reinforcement phase) หรือวัสดุเสริมแรงกับสารเชื่อมประสานพวกเรซินที่เข้ากันได้เมื่อผสมกันแล้วจะได้ลักษณะเฉพาะที่ต้องการ วัสดุผสมมีหลากหลายประเภท บางประเภทมีเส้นใยเป็นส่วนเสริมแรงในเนื้อวัสดุ หรือแบบมีอนุภาคเล็ก ๆ กระจายตัวอยู่ในปัจจุบันประเภทที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ การทำพลาสติกเสริมแรงโดยสมบัติของวัสดุคอมโพสิตขึ้นอยู่กับ

- 1) การยึดติดระหว่างเมทริกซ์ และสารเสริมแรง
- 2) สมบัติของเมทริกซ์ และสารเสริมแรง
- 3) ขนาด และรูปร่างของสารเสริมแรง
- 4) ปริมาณสารเสริมแรง
- 5) กระบวนการผลิต
- 6) การจัดเรียงตัว และการกระจายตัวของสารเสริมแรง
- 7) ตำหนิ หรือช่องว่างภายในวัสดุคอมโพสิต

### 2.1.1 พลาสติกเสริมแรง (reinforced plastics) [42]

พลาสติกเสริมแรงเป็นวัสดุผสมระหว่างพลาสติก และวัสดุเสริมแรงที่เติมลงไปเพื่อช่วยให้พลาสติกมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เป็นการเพิ่มสมบัติทางกลของพลาสติกให้ดีขึ้น และช่วยให้พลาสติกมีความคงรูปสูง รับแรงได้มากขึ้น โดยสมบัติทางกลของพลาสติกเสริมแรงนั้นขึ้นอยู่กับ การเลือกใช้การเสริมแรงแบบรับแรงทางเดียว รับแรงสองทางหรือรับแรงทุกแนว ซึ่งการเลือกทิศทางการรับแรงก็ต้องเลือกใช้ลักษณะของเส้นใยที่แตกต่างกันออกไป

ในทางอุตสาหกรรมสามารถผลิตพลาสติกเสริมแรงให้มีข้อดีมากกว่าข้อเสียได้ โดยการเลือกปัจจัยต่าง ๆ ในการผลิตผลิตภัณฑ์ให้เหมาะสมกับงานได้ดังนี้

- 1) ชนิดของพอลิเมอร์ ซึ่งอาจจะเป็นเทอร์โมพลาสติกหรือเทอร์โมเซต
- 2) สารเสริมแรง เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอนหรือเส้นใยธรรมชาติ และ ปริมาณส่วนผสมในการผลิต
- 3) สารเติมแต่ง เช่น สารหล่อลื่น สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน เป็นต้น
- 4) กรรมวิธีในการผลิต
- 5) สภาพะในการผลิต

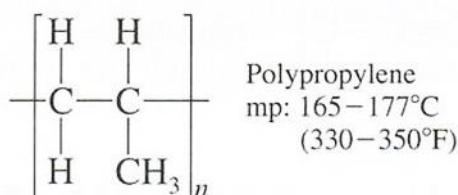
#### 2.1.1.1 พอลิเมอร์เมทริกซ์ (polymer matrix) [43, 44]

พอลิเมอร์เมทริกซ์เป็นส่วนที่ห่อหุ้ม และยึดส่วนวัสดุเสริมแรงเข้าด้วยกัน ดังนั้น พอลิเมอร์เมทริกซ์มักมีความเหนียวสูง มีค่าความแข็งแรง และค่ามอดุลัสต่ำกว่าสารเสริมแรง หน้าที่หลัก ๆ ของพอลิเมอร์เมทริกซ์ คือ

- 1) รักษาความเสถียรในรูปร่าง และขนาดของวัสดุผสมพอลิเมอร์
- 2) ช่วยทำให้วัสดุเสริมแรงกระจายตัว
- 3) สามารถกระจายถ่ายแรงที่ได้รับจากภายนอกไปยังวัสดุเสริมแรงได้
- 4) ช่วยให้วัสดุมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้

พอลิเมอร์เมทริกซ์ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะการแปรรูป หรือพฤติกรรมในกระบวนการแปรรูปเมื่อได้รับความร้อน คือ เทอร์โมเซตติ้ง (thermosettings) และ เทอร์โมพลาสติก (thermoplastics) โดยในที่นี้ขอกล่าวถึงพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกกลุ่มของพอลิโพรพิลีน

พอลิโพรพิลีนเป็นพลาสติกชนิดหนึ่งที่มีการใช้มากเนื่องจากราคาถูก เพราะสามารถสังเคราะห์ได้จากปิโตรเลียมราคาถูกโดยใช้ ziegler-type catalyst ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของหน่วยย่อยของพอลิโพรพิลีน [44]

โครงสร้าง และสมบัติจากพอลิเอทีลีนไปเป็นพอลิโพรพิลีนด้วยการแทนที่ไฮโดรเจนด้วยหมู่เมทิล (-CH<sub>3</sub>) ทุก ๆ 2 อะตอมของคาร์บอนในโครงสร้างทำให้พอลิโพรพิลีนมีความแข็งแรงมากขึ้น อ่อนตัวน้อยลง หมู่เมทิลในโครงสร้างช่วยทำให้เพิ่มอุณหภูมิสภาพแก้ว (glass transition temperature; T<sub>g</sub>) ดังนั้นพอลิโพรพิลีนจึงมีจุดหลอมเหลว และจุดทำให้อ่อนตัวสูงกว่าพอลิเอทีลีน จากการใช้ stereo specific catalysts ทำให้สามารถสังเคราะห์ isotactic polypropylene ซึ่งมีจุดหลอมเหลว 165-177°C ซึ่งวัสดุนี้ถ้าได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 120°C จะไม่มีการเปลี่ยนรูปร่าง

พอลิโพรพิลีนใช้ทำผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมมากมาย เพราะมีสมบัติที่ดีหลายอย่าง เช่น ทนต่อสารเคมี ไม่ดูดความชื้น ทนความร้อนได้ดี มีความหนาแน่นต่ำ (0.900-0.910 g/cm<sup>3</sup>) ผิวหน้าแข็ง และมีรูปร่างเสถียรแต่มีความอ่อนตัวที่จะโค้งงอได้ ประกอบกับราคาของโมโนเมอร์ถูกทำให้พอลิโพรพิลีนเป็นเทอร์โมพลาสติกที่ได้รับความนิยมมากซึ่งการประยุกต์ของพอลิโพรพิลีนที่เป็นหลักคือ ทำของใช้ในบ้าน และเครื่องไฟฟ้า ภาชนะบรรจุ อุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ ขวด และภาชนะต่าง ๆ ใช้ทำพอลิเมอร์สหพันธ์ (copolymer) ที่ทนต่อแรงกระแทกแทนยางในระบบขนส่ง ได้แก่ ใช้ทำหม้อแบตเตอรี่ ใช้หุ้มกันชน ใบพัด ท่อน้ำ พรม ถัง แผ่นฟิล์มสำหรับห่อของ

#### 2.1.1.2 วัสดุเสริมแรง (reinforcement)

สารเสริมแรงเป็นสารเติมแต่งที่อยู่ในรูปของแข็ง ซึ่งมีโครงสร้างแตกต่างจากพอลิเมอร์ ช่วยทำให้สมบัติทางกล หรือทางกายภาพดีขึ้น เช่น เพิ่มความต้านทานแรงดึง (tensile strength) วัสดุที่ใช้เป็นวัสดุเสริมแรง ได้แก่ ไยแก้ว ไยคาร์บอน เส้นใยธรรมชาติ ลักษณะของวัสดุเสริมแรง แบ่งตามโครงสร้างได้ดังนี้ วัสดุเสริมแรงชนิดไฟเบอร์ วัสดุเสริมแรงชนิดเป็นอนุภาค และวัสดุเสริมแรงที่มีโครงสร้างเป็นแผ่นบาง การเสริมแรงด้วยเส้นใย (fiber) จะช่วยปรับปรุงความทนทานต่อการยืด และเพิ่มความแข็งแรง จึงเป็นที่นิยมใช้เป็นวัสดุเสริมแรง

การเลือกใช้วัสดุเสริมแรงควรพิจารณาปัจจัยหลายอย่าง เช่น สมบัติทางกายภาพ ขนาดของอนุภาค และความเป็นผลึก การกระจายตัว ความคงทนระหว่างการผลิต และการใช้งาน การเลือกใช้วัสดุเสริมแรง ควรคำนึงถึงหลักการดังนี้ [29]

1) เส้นใย หรือวัสดุเสริมแรงที่ใช้ต้องมีค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และมอดุลัสสูงกว่าพอลิเมอร์

2) หน้าที่ที่สำคัญของพอลิเมอร์ คือ การส่งผ่าน และกระจายแรงระหว่างเส้นใย อีกทั้งยังช่วยป้องกันการเสียดสีกันระหว่างเส้นใยแต่ละตัว ป้องกันความชื้นไม่ให้สัมผัสกับเส้นใย และยังช่วยให้เส้นใยทำงานเป็นกลุ่มในการต้านทานแรงหรือการเสีรูปร่างภายใต้การใช้งาน และช่วยป้องกันการซึมผ่านของของเหลว และอากาศ

3) รอยต่อระหว่างผิวเส้นใย หรือวัสดุเสริมแรงกับพอลิเมอร์ เป็นจุดที่ต้องคำนึงถึงมากเพื่อให้ได้สมบัติตามต้องการ เมื่อได้รับแรงจุดที่ได้รับแรงมากที่สุด คือ จุดรอยต่อ หรือ โกล์จุดรอยต่อระหว่างผิวของเส้นใยกับพอลิเมอร์ ถ้าจุดนี้มีการเชื่อมต่อกันไม่ดี อาจทำให้เกิดความเสียหายก่อนกำหนด ดังนั้นรอยต่อนี้ต้องมีลักษณะทางเคมี และฟิสิกส์ที่เหมาะสมที่จะส่งผ่านแรงจากพอลิเมอร์ไปสู่วัสดุเสริมแรง โดยทั่วไปนิยมใช้สารคู่ควบ (coupling agent) เป็นตัวเชื่อมต่อกับผิวของเส้นใยกับพอลิเมอร์ช่วยให้มีการส่งผ่านแรง และกระจายแรงได้ดี

4) เมื่อเติมวัสดุเสริมแรงแล้ว ต้องสามารถตกแต่งผิวให้สวยงามได้ง่าย เช่น การพิมพ์ หรือการติดกาว รวมถึงการขัดสีของเครื่องจักร และต้องคำนึงถึงปัญหาความปลอดภัยเนื่องจากฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นในระหว่างการตกแต่งชิ้นงาน

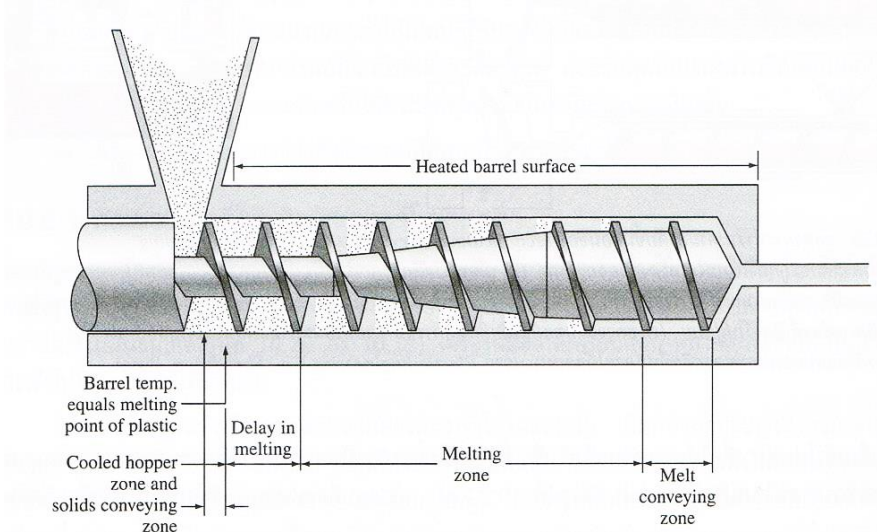
5) ราคาของวัสดุเสริมแรงที่ใช้ เพราะวัสดุเสริมแรงที่ใช้มักมีราคาสูง จึงต้องพิจารณาถึงต้นทุนของการผลิต

## 2.2 กรรมวิธีในการผลิต

### 2.2.1 กระบวนการอัดรีด (extrusion) [44]

กระบวนการอัดรีดเป็นกระบวนการผลิตที่สำคัญอีกวิธีหนึ่งสำหรับใช้กับเทอร์โมพลาสติก กระบวนการนี้โดยมากใช้ผลิตพวกท่อ แท่ง เป็นฟิล์ม และแผ่นพลาสติก เครื่องอัดรีดอาจใช้ทำวัตถุดิบที่เป็นพลาสติกผสมให้ออกมามีรูปร่างต่าง ๆ กัน เช่น ทำเม็ด และใช้กับพวกพลาสติกที่ใช้แล้ว

ในกระบวนการอัดรีดพลาสติกแสดงดังภาพที่ 2.2 เม็ดพลาสติกจะถูกส่งเข้าไปให้ความร้อนแล้วพลาสติกที่หลอมเหลวจะถูกบังคับให้ออกทางท่อเปิด (die) ตามรูปร่างที่ต้องการด้วยสกรูหมุนพลาสติกที่ออกมาแล้วจะทำให้เย็นต่ำกว่า  $T_g$  เพื่อให้แน่ใจว่ารูปร่างจะคงที่ การทำให้พลาสติกเย็นลงใช้วิธีเอาลมเป่าหรือใช้ระบบน้ำเย็นหล่อ

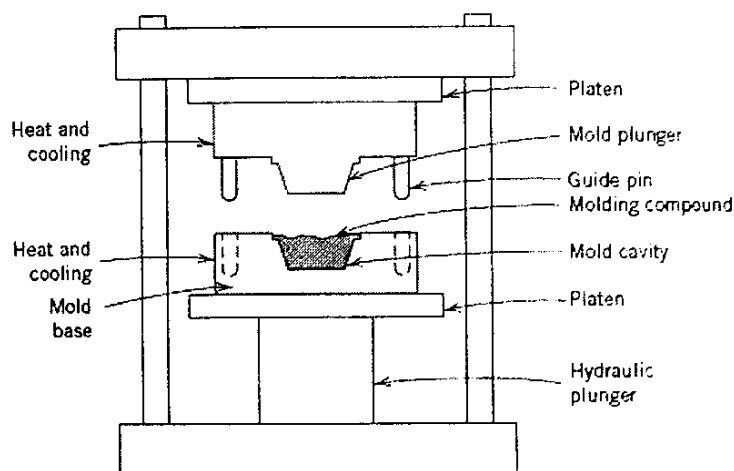


ภาพที่ 2.2 การทำงานส่วนต่าง ๆ ของเครื่องอัดรีด [44]

### 2.2.2 การขึ้นรูปแบบการอัด (compression molding) [45, 46]

การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบกดอัดเป็นวิธีที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมเมื่อเทียบกับการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบอื่น เพราะเป็นวิธีที่ง่าย และเครื่องจักรที่ใช้ราคาไม่สูงมากนัก เครื่องจักรที่ใช้ ได้แก่ เครื่องกดอัดระบบไฮดรอลิก (hydraulic press) ซึ่งประกอบด้วยแผ่นกดอัด (platen) จำนวน 2 แผ่น หรือมากกว่า 2 แผ่น ขึ้นกับการออกแบบ แผ่นกดอัดจะเลื่อนขึ้นลงด้วยระบบไฮดรอลิกเพื่ออัดและส่งผ่านแรงดันไปสู่แม่พิมพ์ที่อยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นกดอัด เครื่องจะสามารถตั้งอุณหภูมิ และควบคุมความร้อนให้คงที่ระหว่างการผลิต

การขึ้นรูปขึ้นงานพลาสติกวิธีนี้ส่วนใหญ่จะใช้กับพลาสติกเทอร์โมเซต เช่น ฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ (phenol-formaldehyde) เมลามีน (melamine) และเทอร์โมเซตอื่น ๆ ในส่วนของแม่พิมพ์แบบกดอัดนี้ประกอบด้วยแม่พิมพ์ 2 ส่วน คือ แม่พิมพ์ส่วนบน (lid) และแม่พิมพ์ส่วนล่าง (base) โดยแม่พิมพ์ส่วนล่างจะมีช่องเป็นรูปร่างของผลิตภัณฑ์ เรียกว่า เบ้าพิมพ์ (cavity) โดยเริ่มจากการนำแม่พิมพ์อุ่นผ่านการให้ความร้อนก่อนที่จะบรรจุเม็ดวัสดุผสมแล้วให้แรงดันแก่แม่พิมพ์ ความร้อน และความดันจะทำให้พลาสติกเกิดการไหลไปบรรจุในช่องว่างต่าง ๆ ของแม่พิมพ์ แล้วปล่อยให้วัสดุที่อุณหภูมิสูงจนกระทั่งเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลโดยสมบูรณ์ ก่อนที่จะหล่อเย็น และเอาชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ข้อดีของกระบวนการนี้คือ มีต้นทุนการผลิตต่ำ เครื่องจักรไม่ซับซ้อน ราคาถูก และแรงงานไม่ต้องการความชำนาญมาก ส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องขึ้นรูปแบบการอัดแสดงดังภาพที่



ภาพที่ 2.3 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องขึ้นรูปแบบการอัด [45]

## 2.3 สมบัติทางกล

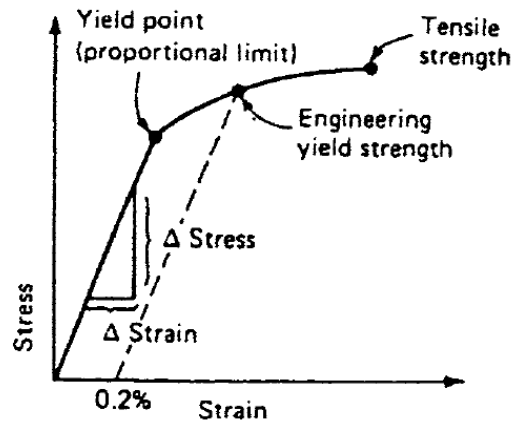
วัสดุพลาสติกตอบสนองต่อสมบัติทางกลซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญที่สุด เพราะเป็นข้อจำกัด และเงื่อนไขของการใช้งาน นอกจากนี้ยังถูกนำมาประยุกต์ใช้ในส่วนของคุณสมบัติความยืดหยุ่น โดยการออกแบบ และการเลือกวัสดุสำหรับการใช้งานต่าง ๆ มักจะต้องคำนึงถึงสมบัติทางกล เช่น สมบัติความแข็งแรงดึง สมบัติความแข็งแรงอัด และสมบัติความแข็งแรงดัด โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.3.1 สมบัติทางด้านแรงดึง (tensile properties) [47]

การวัดความแข็งแรงดึงและมอดุลัสเป็นส่วนสำคัญของการชี้วัดความล้าในวัสดุ และเป็นสมบัติที่ระบุไว้ในวัสดุพลาสติก การทดสอบแรงดึงคือการวัดความสามารถของวัสดุที่จะทนต่อแรงที่ดึงให้ขาดออกจากกัน เพื่อกำหนดขอบเขตการยืดตัวก่อนจะขาด การทดสอบแรงดึงชิ้นงานทดสอบจะถูกจับยึดไว้ที่ปลายแต่ละด้าน และถูกดึงให้แยกออกจากกันอย่างต่อเนื่องเพื่อวัดแรงที่ทำให้ชิ้นงานทดสอบยืดออกด้วยอัตราคงที่ จากการทดสอบนี้ความเค้น และความเครียดจะเกิดขึ้นซึ่งทำหน้าที่กำหนดเงื่อนไขดัง เช่น ความเค้น และความเครียดแรงดึง (tensile stress and strain) ร้อยละของการยืดตัว (percentage of elongation) จุดคราก (yield strength) ขีดจำกัดการแปรผันตรง (proportional limit) ความเค้นวิกฤติ (yield strength) และมอดุลัสของสภาพยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ดังแสดงในภาพที่ 2.4 นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของความเร็วในการดึงมักส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของจุดคราก (yield point) และค่าความแข็งแรงสูงสุด (ultimate strength) ค่าความแข็งแรงสูงสุด และค่ามอดุลัสแรงดึงสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.1) และสมการ (2.2)

$$\text{Ultimate tensile strength} = \frac{\text{Maximum load}}{\text{Cross - section area}} \left( \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right) \quad (2.1)$$

$$\text{Tensile modulus} = \frac{\text{Tensile stress}}{\text{Tensile strain}} \left( \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right) \quad (2.2)$$



ภาพที่ 2.4 เส้นโค้งความเค้นและความเครียดของการทดสอบแรงดึง

### 2.3.2 สมบัติทางด้านแรงอัด (compressive properties)

สมบัติการอัดของวัสดุพลาสติกมีความสำคัญมากสำหรับการวิเคราะห์การออกแบบผลิตภัณฑ์ และเป็นหนึ่งในกฎการออกแบบผลิตภัณฑ์ขั้นพื้นฐาน คือ การประยุกต์ใช้แรงอัด โครงสร้าง และการกระจายของแรงอย่างทั่วถึงทั้งโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ สมบัติการอัดเป็นพฤติกรรมของวัสดุภายใต้แรงอัดในอัตราที่สม่ำเสมอของแรงที่กระทำซึ่งเป็นการกระทำโดยการบีบ ขึ้นงานทดสอบแสดงดังภาพที่ 2.5 สำหรับพลาสติกจะไม่ได้สร้างความเสียหายโดยอัดให้แตกหักเมื่อไม่เกิดการแตกหัก ค่าความแข็งแรงอัดจากการเสียรูปจะอยู่ที่ระดับ 1-10 % นอกจากนี้สมบัติการอัดยังรวมถึง ค่าความแข็งแรงอัด (compressive strength) โมดูลัส (modulus) ความเค้นคราก (yield stress) การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเกินกว่าจุดคราก (deformation beyond yield point) และค่าความเค้นแรงอัด (compressive strain) แต่อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงอัด และค่าโมดูลัสก็เป็นเพียงสองค่าที่ถูกกำหนดอย่างแพร่หลายในการออกแบบผลิตภัณฑ์ ค่าความแข็งแรงอัด และค่าโมดูลัสสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.3) และสมการ (2.4)

$$\text{Ultimate compressive strength} = \frac{\text{Maximum load}}{\text{Cross - section area}} \left( \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right) \quad (2.3)$$



$$\text{Compressive modulus} = \frac{\text{Compressive stress}}{\text{Compressive strain}} \left( \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right) \quad (2.4)$$

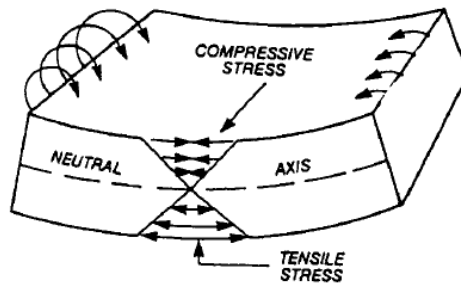


ภาพที่ 2.5 การทดสอบแรงอัด

### 2.3.3 สมบัติทางด้านการดัด (flexural properties) [45, 48]

เป็นค่าความเค้นที่ได้จากการทดสอบให้เกิดการงอตัวโดยใช้หัวกด (indenter) ซึ่งกดลงตั้งฉากกับชิ้นทดสอบที่อยู่ในลักษณะแนวนอนโดยมีตัวรองรับ (supporting jig) เป็นตัวกำหนดช่วงห่าง (span) การทดสอบแบบนี้ชิ้นทดสอบจะได้รับทั้งแรงเค้นดึง (tensile stress) และแรงเค้นกด (Compressive stress) ซึ่งแรงเค้นกดจะเกิดขึ้นบนชิ้นทดสอบ ส่วนแรงเค้นดึงจะเกิดได้ ชิ้นทดสอบดังภาพที่ 2.6 การทดสอบนี้สามารถทดสอบได้ 2 ลักษณะ คือการทดสอบแรงโค้งงอแบบ 3 จุด (three point bending) เป็นการทดสอบความเค้นโดยจะมีหัวกดสำหรับแรงกด 1 จุด ซึ่งอยู่ด้านบนชิ้นทดสอบ และมีตัวรองรับที่กำหนดระยะห่างอยู่ด้านล่างชิ้นทดสอบ 2 จุด ดังภาพที่ 2.7 และการทดสอบแรงโค้งงอแบบ 4 จุด (four point bending) และค่า flexural strength คือความเค้นมากที่สุด หรือความเค้นโค้งงอ (maximum stress or flexural stress :  $\sigma_{\max}$ ) ที่เกิดตรงกลาง ชิ้นทดสอบตรงส่วนผิวนอกหาได้ดังสมการ (2.5)

มอดูลัสของความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ในการทำให้ตัวอย่างโค้งงอสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.6) เมื่อ คือระยะที่ตัวอย่างเกิดการโค้งงอเมื่อถูกกดด้วยแรง F



ภาพที่ 2.6 แรงเค้นในชั้นทดสอบที่หาความทนแรงโค้งงอแบบ 3 จุด [48]

$$\text{Ultimate flexural strength} = \frac{3FL}{2Wh^2} \left( \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right) \quad (2.5)$$

$$\text{Flexural modulus} = \frac{L^3(\text{slope})}{4Wh^3} \left( \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right) \quad (2.6)$$

เมื่อ

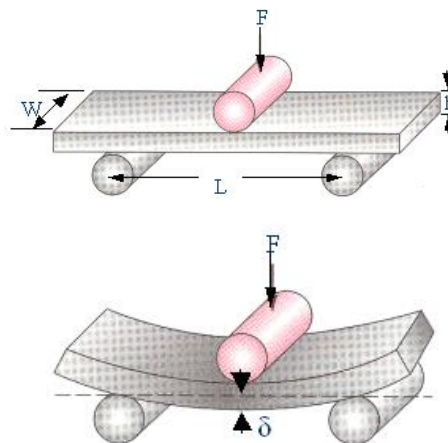
$F$  = น้ำหนักที่ทำให้เกิดการแตกของพอลิเมอร์

$L$  = ระยะห่างระหว่างตำแหน่งของวัสดุที่รองรับตัวอย่าง

$W$  = ความกว้างของตัวอย่าง

$h$  = ความสูงของตัวอย่าง

$m$  = ความชันจากกราฟการเปลี่ยนรูปที่ความเครียดในช่วง 0.05% ถึง 0.25%



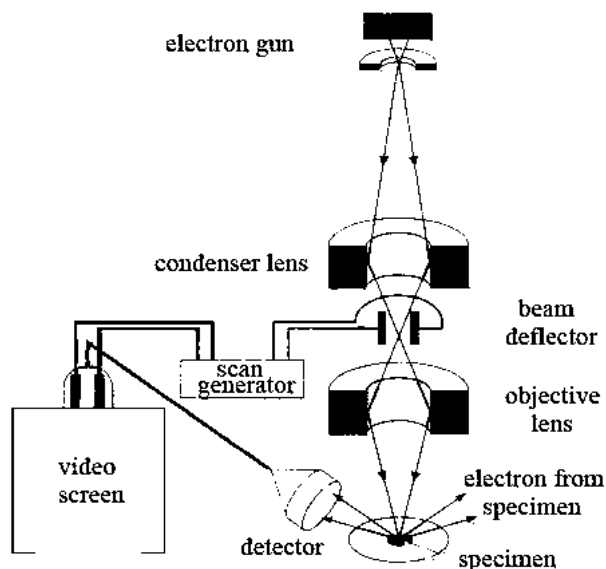
ภาพที่ 2.7 การทดสอบความทนแรงโค้งงอแบบ 3 จุด [48]

จากค่ามอดูลัสการแตกร้าว (modulus of rupture) ที่ได้ในกระบวนการทดสอบจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาระดับน้ำหนักเพื่อใช้ในการทดสอบพฤติกรรมการคืบของวัสดุผสมไม้พลาสติกในงานวิจัยต่อไป

## 2.4 การวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐานวิทยา [49]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope ; SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์หน้าตัดของโลหะ และวัสดุ เป็นต้น

หลักการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง SEM ดังภาพที่ 2.8



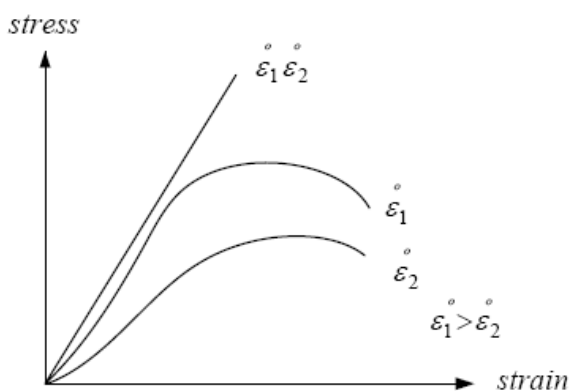
ภาพที่ 2.8 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง SEM [49]

## 2.5 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน [50]

การวิเคราะห์สมบัติทางเทอร์โมแกรวิเมตริก (thermo gravimetric analysis; TGA) เป็นวิธีการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนแบบหนึ่ง โดยตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงมวลของสารตัวอย่าง เมื่อเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิคงที่หรือเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิคงที่ ในการวิเคราะห์วิธีนี้มวลของสารตัวอย่างซึ่งอยู่ในบรรยากาศที่ถูกควบคุมจะถูกบันทึกอย่างต่อเนื่อง กราฟที่ได้จาก TGA เรียกว่า TGA thermogram หรือ thermal decomposition curve เป็นความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงมวลเทียบกับเวลาหรืออุณหภูมิ ข้อมูลที่ได้จากวิธี TGA ค่อนข้างจำกัดว่าข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนวิธีอื่น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะต้องมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงมวลสารตัวอย่างจึงจะสามารถทดสอบโดยวิธีนี้ได้ ดังนั้นวิธี TGA จึงจำกัดอยู่เฉพาะการตรวจสอบเกี่ยวกับ กระบวนการสลายตัวหรือปฏิกิริยาออกซิไดซ์ หรือ กระบวนการทางกายภาพ เช่น การระเหย (evaporation) การระเหิด (sublimation) หรือการปล่อยสาร (desorption)

## 2.6 สมบัติเชิงวิสโคอีลาสติกของวัสดุ [51, 52]

วัสดุพอลิเมอร์ที่มีสมบัติวิสโคอีลาสติกจะแสดงสมบัติระหว่างการยืดหยุ่น และการไหลหนืดโดยจะแสดงสมบัติการยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elasticity) ในขอบเขตที่มีความเครียดต่ำ ๆ (small strains) แต่เมื่อความเครียดเพิ่มขึ้นเกินขีดจำกัดหนึ่ง ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเค้นกับความเครียดก็จะหมดไป โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดนี้จะขึ้นฟังก์ชันของอัตราการเสียรูป (rate of deformation) ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 สมบัติการยืดหยุ่นเชิงเส้นและการยืดหยุ่นไม่เชิงเส้น [51]

ปรากฏการณ์ที่แสดงสมบัติของวิสโคอีลาสติกได้แก่ การคืบ (creep) การคลายความเค้น (stress relaxation) และการคืนรูป (recovery) สามารถอธิบายได้ด้วยการเคลื่อนที่ของโมเลกุลขนาดใหญ่หรือโซ่โมเลกุล โดยการเคลื่อนที่ของโซ่โมเลกุลหนึ่งข้ามอีกโซ่โมเลกุลหนึ่งนั้นเป็นการเคลื่อนที่แบบไหลหนืด (viscous flow) ส่วนการเคลื่อนที่ของส่วนย่อยหนึ่งในโซ่โมเลกุลกับส่วนอื่นของโซ่โมเลกุลเดียวกันจะก่อให้เกิดการเรียงตัวใหม่เป็นผลให้วัสดุแสดงสมบัติยืดหยุ่น (elastic) ออกมา

การคืบจะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุของแข็ง (solid materials) ถูกแรงกระทำหรือรับภาระ (load) จะเกิดความเค้น (stress) ขึ้นภายในวัสดุทำให้เกิดการเปลี่ยนรูป (deformation) ภายใต้ภาระหรือความเค้นคงที่ การเปลี่ยนรูปจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า การคืบ (creep) พฤติกรรมการคืบของวัสดุขึ้นอยู่กับตัวแปรที่สำคัญได้แก่ ความเค้น อุณหภูมิ และเวลา เมื่อทดสอบให้วัสดุรับภาระคงที่ (constant load creep) หรือรับความเค้นคงที่ (constant stress creep) การเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นทั้งหมด (overall deformation,  $\epsilon$ ) ของวัสดุสามารถเขียนแทนได้ด้วยสมการ (2.7) [53]

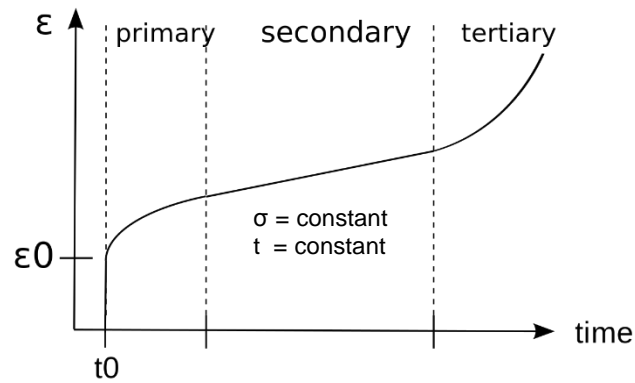
$$\epsilon = \epsilon_0 + \epsilon(\sigma, t, T) \quad (2.7)$$

เมื่อ

$\epsilon_0$  คือ ความเครียดทันทีทันใด (instantaneous strain)

$\epsilon(\sigma, t, T)$  คือ ค่าความเครียดของการคืบ (creep strain) ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นกับความเค้น ( $\sigma$ ) อุณหภูมิ ( $T$ ) และเวลา ( $t$ )

สมมติในการทดสอบการคืบของวัสดุโดยกำหนดให้ภาระแรงดึงคงที่ (constant tension load) และอุณหภูมิคงที่ (constant temperature) พฤติกรรมการคืบของวัสดุสามารถแสดงได้โดยเส้นโค้งการคืบ (creep curve) ซึ่งเป็นการพล็อตค่าความเครียดของการคืบบนแกน  $y$  ต่อเวลาบนแกน  $x$  ดังแสดงในภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 ลักษณะของเส้นโค้งการคืบ [53]

เส้นโค้งการคืบสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระยะคือ

(1) ระยะแรก (primary) ระยะนี้อัตราการคืบจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เส้นโค้งความเครียดของการคืบต่อเวลามีลักษณะโค้งคว่ำ ซึ่งจัดเป็นเส้นโค้งการคืบระยะแรกแบบปกติ (normal primary creep)

(2) ระยะที่สอง (secondary creep) หรือระยะการคืบแบบสถานะคงที่ (steady state creep) เป็นระยะที่อัตราการคืบมีค่าคงที่ และต่ำสุด เส้นโค้งการคืบจะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง

(3) ระยะที่สาม (tertiary creep) เป็นระยะที่อัตราการคืบจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุดที่วัสดุแตกหัก (rupture) เส้นโค้งการคืบจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งแบบหงาย

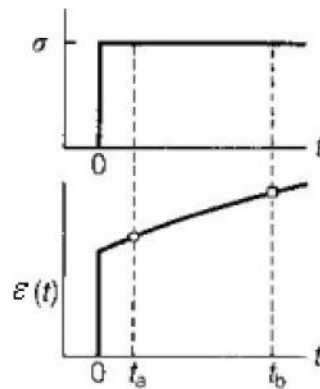
ความสัมพันธ์ของการคืบกับค่าความเค้น และความเครียดของสมบัตินี้คือเมื่อวัสดุพอลิเมอร์มีแรงภายนอกกระทำโดยกำหนดให้แรงกระทำคงที่ตลอดเวลาของภาระกระทำ ซึ่งเป็นผลให้ความเค้นคงที่ความเครียดที่เกิดขึ้นจะแปรผันไปตามเวลา (time dependent) ดังแสดงในภาพที่ 2.11 ยิ่งเวลามากขึ้นค่าของความเครียดก็จะมากขึ้นตามเวลาเขียนได้ดังสมการ (2.8)

$$D(t) = \frac{\epsilon(t)}{\sigma} \quad (2.8)$$

เมื่อ

$D(t)$  คือ การคืบของวัสดุที่จะเกิดการครากตัวแบบยืดหยุ่นภายใต้แรงกระทำที่เวลา  $t$  ใด ๆ

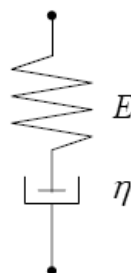
$\epsilon(t)$  คือ ฟังก์ชันของความเครียดที่ขึ้นกับเวลา



ภาพที่ 2.11 การคืบตัวเป็นฟังก์ชันของเวลาที่เวลา  $t$  ใด ๆ [52]

พฤติกรรมยืดหยุ่นหนืดของพอลิเมอร์ได้ถูกศึกษาค้นคว้าและจำลองรูปแบบต่าง ๆ เพื่อให้ได้ผลที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมที่เป็นจริงของพอลิเมอร์ที่ได้จากการทดลองและทดสอบมากที่สุด จากการวิเคราะห์ที่ผ่านมาพบว่าแบบจำลองที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของวัสดุยืดหยุ่นหนืดได้ดีที่สุดคือ แบบจำลองวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของสปริงและแดชพอต ถึงแม้ว่าโครงสร้างทางโมเลกุลของวัสดุพอลิเมอร์ไม่ได้แยกเป็นส่วน ๆ เหมือนในแบบจำลอง แต่ก็เพียงพอที่จะทำให้สามารถเข้าใจพื้นฐานเบื้องต้นเกี่ยวกับพฤติกรรมของวัสดุพอลิเมอร์ได้ค่อนข้างดี [45]

สมบัติวิสโคอีลาสติกสามารถทำการวิเคราะห์ความเค้นหรือความเครียดจากแบบจำลองพฤติกรรมเชิงกลที่ต่ออนุกรมกันระหว่างชิ้นส่วนสปริง (spring) และชิ้นส่วนตัวหน่วง (dashpot) เรียกว่า แบบจำลองแมกซ์เวลล์ (Maxwell model) แสดงตามภาพที่ 2.12 เมื่อนำมาต่อแบบอนุกรมจะเรียกว่า “ชิ้นส่วนแมกซ์เวลล์” มีพฤติกรรมแบบผ่อนคลายความเค้นเมื่อนำชิ้นส่วนแมกซ์เวลล์ 2 ชุดขึ้นไปต่อขนานจะแทนสมบัติเชิงวิสโคอีลาสติกได้ดี



ภาพที่ 2.12 แบบจำลองของแมกซ์เวลล์ [45]

แบบจำลองของแมกซ์เวลล์แสดงดังภาพที่ 2.12 ความเครียดทั้งหมด (หรืออัตราความเครียด) ที่เกิดขึ้นเป็นการรวมกันระหว่างค่าความเครียดของชิ้นส่วนสปริง และชิ้นส่วนตัวหน่วง จากกฎของฮุก อัตราความเครียดของสปริงยืดหยุ่นในอุดมคติเขียนได้ดังสมการ (2.9)

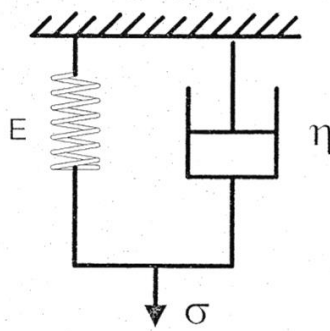
$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} \quad (2.9)$$

อัตราความเครียดของชิ้นส่วนตัวหน่วงตั้งสมการ (2.10)

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma}{\eta} \quad (2.10)$$

แบบจำลองของแมกซ์เวลล์เกิดจากผลรวมของอัตราความเครียดจากสมการ (2.9) และสมการ (2.10) สามารถเขียนได้ดังสมการ (2.11)

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (2.11)$$



ภาพที่ 2.13 แบบจำลองของเคลวิน [45]

สำหรับแบบจำลองที่ต่อขนานกันระหว่างชิ้นส่วนสปริง และชิ้นส่วนตัวหน่วงเรียกว่าแบบจำลองเคลวินหรือเรียกอีกอย่างว่าแบบจำลองวอยท์ (Voigt model) ประกอบด้วยสปริงกับตัวหน่วงต่อแบบขนานกันจากภาพที่ 2.13 เมื่อมีการใส่ภาระเข้าไปแบบจำลองชนิดนี้จะไม่มีการเคลื่อนที่ทันทีเพราะตัวหน่วงจะเป็นตัวเหนี่ยวไว้ให้ค่อย ๆ เคลื่อนที่ไป การเคลื่อนที่ของตัวหน่วงจะมีลักษณะเป็นสมการเอกซ์โพเนนเชียล ความเค้นของแบบจำลองเคลวินสามารถเขียนได้ดังสมการ (2.12)

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2.12)$$

โดยทั่วไปค่าความเครียดของการคืบ  $\varepsilon(\sigma, t, T)$  จะขึ้นอยู่กับ ความเค้น ( $\sigma$ ) เวลา ( $t$ ) และอุณหภูมิ ( $T$ ) ซึ่งประกอบไปด้วย 3 องค์ประกอบหลัก คือ การเปลี่ยนรูปของสมบัติยืดหยุ่น



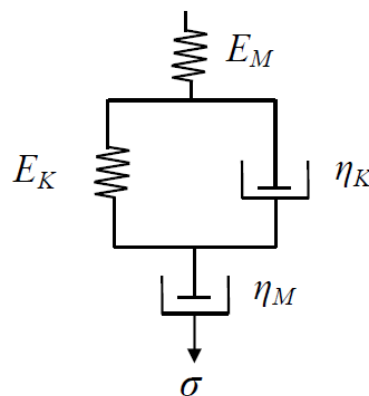
$\varepsilon_e(\sigma, T)$  การเปลี่ยนรูปของสมบัติวิสโคอิลาสติก  $\varepsilon_{ve}(\sigma, t, T)$  และการเปลี่ยนรูปของสมบัติวิสโคพลาสติก  $\varepsilon_p(\sigma, t, T)$  [11] สามารถเขียนได้ดังสมการ (2.13)

$$\varepsilon(\sigma, t, T) = \varepsilon_e(\sigma, T) + \varepsilon_{ve}(\sigma, t, T) + \varepsilon_p(\sigma, t, T) \quad (2.13)$$

จากแบบจำลองของแมกซ์เวลล์และเคลวินพบว่าแบบจำลองของแมกซ์เวลล์สามารถใช้ทำนายการคลายความเค้นได้อย่างสมเหตุสมผลแต่สำหรับการคืบและการการคืนตัวยังไม่สอดคล้องตามความเป็นจริง ในทางกลับกันสำหรับแบบจำลองของเคลวินสามารถใช้ทำนายการคืบและการการคืนตัวได้อย่างสมเหตุสมผลแต่มีข้อด้อยในการทำนายการคลายความเค้น ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงมักมีการนำแบบจำลองทั้งสองมาผสมผสานเพื่อใช้ในการทำนายพฤติกรรมของพอลิเมอร์ให้เป็นไปอย่างถูกต้องที่สุด [45] เพื่ออธิบายและทำนายพฤติกรรมการคืบระยะสั้นหลาย ๆ แบบจำลองได้มีการพัฒนา และประยุกต์ใช้ส่วนประกอบที่เป็นความสัมพันธ์ของวัสดุพอลิเมอร์ 4 องค์ประกอบของแบบจำลองเบอร์เกอร์ [47] ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการเผยแพร่ และให้การคาดการณ์ที่น่าพอใจ แบบจำลองนี้เป็นการรวมกันของแบบจำลองแมกซ์เวลล์และเคลวิน ซึ่งประกอบด้วยสมบัติยืดหยุ่นและสมบัติวิสโคอิลาสติก สำหรับรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ของเบอร์เกอร์สามารถแสดงดังสมการ (2.14) [11]

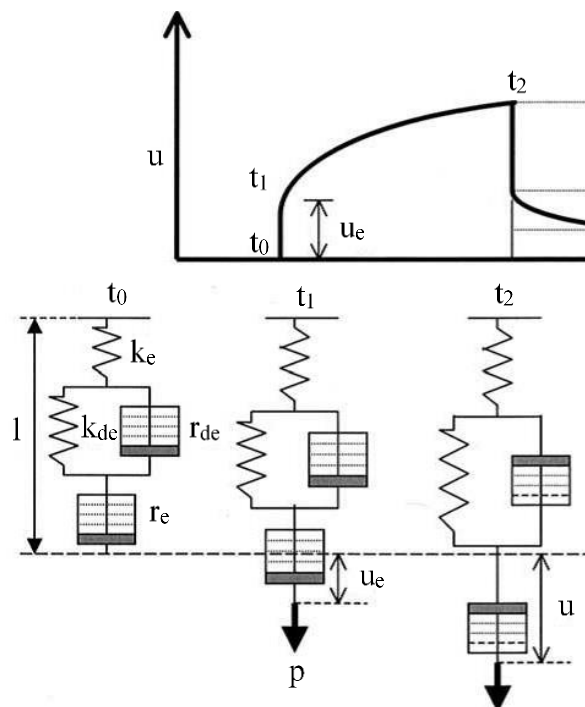
$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_M} + \frac{\sigma}{E_K} \left[ 1 - \exp\left(-t \frac{E_K}{\eta_K}\right) \right] + t \frac{\sigma}{\eta_M} \quad (2.14)$$

ตัวแบบจำลองของเบอร์เกอร์ประกอบไปด้วยการต่ออนุกรมกันระหว่างชิ้นส่วนสปริงและชิ้นส่วนตัวหน่วงโดยมีตัวแบบของเคลวินที่มีสปริงกับตัวหน่วงต่อแบบขนานกันแทรกอยู่ระหว่างกลาง แสดงดังภาพที่ 2.14



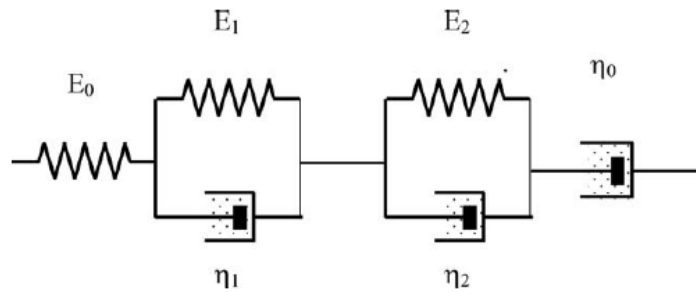
ภาพที่ 2.14 แบบจำลองเบอร์เกอร์ 4 องค์ประกอบ [11]

เมื่อ  $\varepsilon$  คือ ความเครียดสะสมขึ้นอยู่กับเวลา  $t$  เมื่อเกิดความเค้น  $\varepsilon$  และ  $E_M$  แสดงให้เห็นถึงมอดูลัสยืดหยุ่นของสปริงตามที่กำหนดในองค์ประกอบแมกซ์เวลล์ การเปลี่ยนรูปของสมบัติยืดหยุ่นสามารถคืนรูปได้ทันที เมื่อนำความเค้นที่กระทำออกโดยที่  $E_K$  และ  $\eta_K$  ซึ่งเป็นตัวแทนของมอดูลัสยืดหยุ่นของสปริง และความหนืดของแดชพ็อตตามลำดับในองค์ประกอบของเคลวิน ซึ่งเชื่อมโยงกับความล่าและความหนืดของ  $\eta_M$  ที่เน้นการไหลของห่วงโซ่พอลิเมอร์สายสั้น ๆ แสดงให้เห็นถึงความหนืดของแดชพ็อตที่กำหนดความหนืดในองค์ประกอบของแมกซ์เวลล์ แบบจำลองนี้สามารถช่วยในการอธิบายพฤติกรรมการคืบแสดงดังภาพที่ 2.15 จากภาพแสดงถึงขั้นตอนการเปลี่ยนรูปของชิ้นส่วนทางกลที่สัมพันธ์กับพฤติกรรมการคืบโดยที่เวลาเริ่มต้น  $t_0$  แบบจำลองมีความยาวเท่ากับ  $l$  เมื่อใส่ภาระ  $p$  ณ เวลา  $t_1$  จะเกิดการเปลี่ยนรูปยืดหยุ่นอย่างทันทีส่งผลให้เกิดการยืดตัวของสปริง  $k_e$  ซึ่งมีแนวโน้มเส้นโค้งเป็นเชิงเส้น ช่วงวิสโคอีลาสติกของการคืบที่ระหว่างเวลา  $t_1$  และ  $t_2$  เป็นการผสมผสานระหว่างเกิดการทำงานร่วมกันของสปริง  $k_{de}$  กับตัวหน่วง  $r_{de}$  เกิดเส้นโค้งไม่เป็นเชิงเส้น และช่วงปลายเป็นการทำงานของตัวหน่วง  $r_e$  ซึ่งส่งผลให้เกิดเส้นโค้งเชิงเส้นจนกระทั่งนำภาระออกจะเกิดขั้นตอนการคลายความเค้นต่อไป [13]



ภาพที่ 2.15 แบบจำลองเบอร์เกอร์ 4 องศาประกอบของพฤติกรรมการคืบ [13]

การจำลองพฤติกรรมหนืดด้วย 6 องศาประกอบของแบบจำลองเบอร์เกอร์แสดงดังภาพที่ 2.16 เป็นการต่อพ่วงกันของแบบจำลองเคลวินสองชุดแทรกอยู่ระหว่างการต่ออนุกรมชิ้นส่วนสปริง และชิ้นส่วนตัวหน่วงของแบบจำลองแมกซ์เวลล์



ภาพที่ 2.16 แบบจำลองเบอร์เกอร์ 6 องค์ประกอบ [54]

แบบจำลองนี้เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานทางกลที่มีความหนืดของชิ้นส่วนแดชพอต (dashpot) และการตอบสนองต่อความยืดหยุ่นของชิ้นส่วนสปริง (spring) โดยเฉพาะอย่างยิ่งรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ของเบอร์เกอร์ในการทำงาน การรวมชุดองค์ประกอบแมกซ์เวลล์หนึ่งชุด และองค์ประกอบเคลวินสองชุดซึ่งมีส่วนช่วยในการทำนายพฤติกรรม การคืบในช่วงวิสโคอีลาสติกได้แม่นยำและถูกต้องกับข้อมูลจากการทดสอบมากยิ่งขึ้นดังแสดงในสมการ (2.15) [54]

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_1} \left[ 1 - \exp\left(-t \frac{E_1}{\eta_1}\right) \right] + \frac{\sigma}{E_2} \left[ 1 - \exp\left(-t \frac{E_2}{\eta_2}\right) \right] + t \frac{\sigma}{\eta_0} \quad (2.15)$$

- เมื่อ  $\varepsilon$  คือ ความเครียดสะสมขึ้นอยู่กับเวลา (t)  
 $t$  คือ เวลา  
 $E_0$  คือ การตอบสนองที่รวดเร็วต่อความยืดหยุ่นของวัสดุ  
 $E_1$  และ  $E_2$  คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของสปริง  
 $\eta_1$  และ  $\eta_2$  คือ ความหนืดของแดชพอตขององค์ประกอบเคลวิน  
 $\eta_0$  คือ ความหนืดของแดชพอตขององค์ประกอบแมกซ์เวลล์

แบบจำลองสมการยกกำลังเป็นอีกหนึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกนำมาใช้วิเคราะห์ความหนืดของพอลิเมอร์ แสดงดังสมการ (2.16) [55, 56]

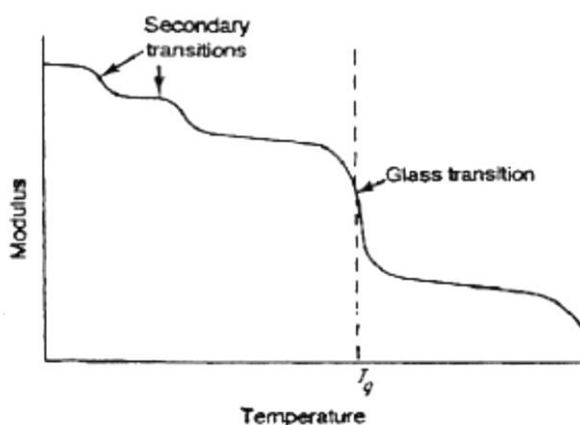
$$\varepsilon(t) = r_0 t^n \quad (2.16)$$

- เมื่อ  $\varepsilon$  คือ ความเครียดจากการคืบที่เวลา t  
 $r_0$  คือ ตัวแปรความยืดหยุ่นของการตอบสนองอย่างทันที  
 $n$  คือ เลขชี้กำลังของสมการยกกำลังเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและความเค้นที่เพิ่มขึ้น

สองตัวแปรของแบบจำลองสมการยกกำลัง ค่าตัวแปรความยืดหยุ่นของการตอบสนองอย่างทันที และเลขยกกำลังได้รับผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญโดยระดับความเครียด และอุณหภูมิ

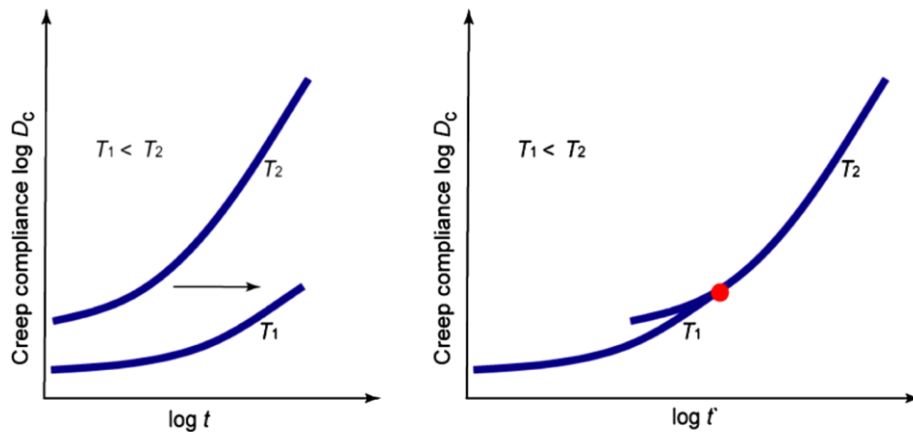
## 2.7 พฤติกรรมวิสโคอีลาสติกที่ขึ้นกับอุณหภูมิ [52]

พฤติกรรมวิสโคอีลาสติกประกอบด้วยโซโม่เลกุลขนาดยาวยึดด้วยพันธะแวนเดอร์วาลส์ซึ่งไม่แข็งแรงมากนัก โซโม่เลกุลเหล่านี้เมื่อได้รับความร้อนพันธะที่ยึดของแต่ละสายโซ่จะมีความอ่อนแอลง และสายโซ่ก็จะเคลื่อนที่ได้มากขึ้นทำให้พอลิเมอร์มีลักษณะที่อ่อนนิ่มลง เมื่ออุณหภูมิสูงเพียงพอแต่ภายหลังจากปล่อยให้เย็นลงพอลิเมอร์ที่หลอมเหลวดังกล่าว สามารถที่จะแข็งตัวอีกครั้ง ความสามารถในการหลอมเหลว และแข็งตัวได้ใหม่หลายครั้งนี้ถือได้ว่าเป็นข้อดีของพอลิเมอร์แต่ในขณะเดียวกันก็เป็นข้อเสีย คือ พอลิเมอร์ ประเภทนี้มักไม่ทนต่ออุณหภูมิสูง และในแต่ละรอบของการหลอมเหลวนั้นพอลิเมอร์ที่แข็งตัวกลับมาใหม่ มักมีสมบัติที่ด้อยลงกว่าเดิมด้วย หากสมมติโดยปริยายว่ามีเพียงการเปลี่ยนในช่วงวิสโคอีลาสติกช่วงเดียวเท่านั้นที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วที่อุณหภูมิต่ำไปเป็นสถานะยางในทางปฏิบัติจะมีการเปลี่ยนแปลงการผ่อนคลายหลายอย่างสำหรับสถานะตัวอย่างของพอลิเมอร์แสดงดังภาพที่ 2.17 ที่อุณหภูมิต่ำ ๆ มักจะอยู่ในช่วงการเปลี่ยนแปลงค่ามอดูลัสเพียงเล็กน้อยการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้เนื่องมาจากลักษณะพิเศษบางประการซึ่งมักเรียกว่า อุณหภูมิสภาพแก้ว ( $T_g$ ) ซึ่งก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่ามอดูลัสอย่างมากที่มักแสดงโดยอุณหภูมิมสภาพแก้ว



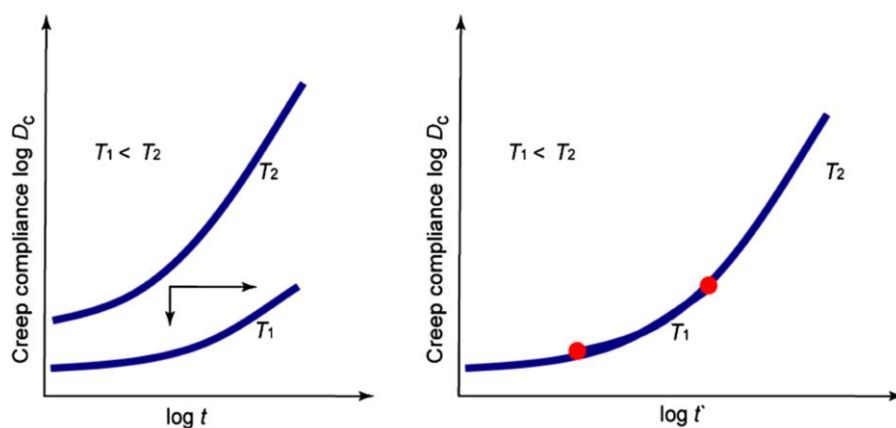
ภาพที่ 2.17 ค่ามอดูลัสที่ขึ้นกับอุณหภูมิ [52]

แม้ว่าการใช้การทดสอบพฤติกรรมการคืบจะมีสภาพการทดสอบที่ใกล้เคียงกับสภาวะจริงมาก แต่ยังคงมีข้อจำกัดในด้านของช่วงเวลาที่ใช้ในการทดสอบกับอายุการใช้งานจริง เนื่องจากไม่สามารถรอผลการทดสอบได้นานเป็นเวลาหลายสิบปี จึงได้ค้นหาทางออกของปัญหานี้คือการทำการทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ กันแล้วนำมาสร้างเป็นเส้นโค้งหลัก (master curve) โดยใช้หลักการซ้อนทับกันระหว่างเวลา อุณหภูมิและความเค้น (time-temperature and stress superposition; TTSP) เป็นแนวคิดในฟิสิกส์พอลิเมอร์จะใช้กำหนดสมบัติทางกลของความยืดหยุ่นหนืดเชิงเส้นจากสมบัติที่อุณหภูมิอ้างอิง [57] เส้นโค้งของค่ามอดุลัสจะขึ้นอยู่กับเวลาโดยไม่ได้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างตามอุณหภูมิแต่จะปรากฏเฉพาะในการเลื่อนเส้นโค้งหลักไปทางด้านซ้าย และด้านขวาที่กำหนดโดยอุณหภูมิอ้างอิง เส้นโค้งหลักสามารถนำมาใช้ในการทำนายพฤติกรรมการคืบในเวลายาวแม้การทดลองจะถูกจำกัดด้วยเวลาที่สั้น โดยปกติพอลิเมอร์มีลักษณะยืดหยุ่นหนืดซึ่งเป็นพฤติกรรมที่แสดงออกในช่วงการเปลี่ยนรูปนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลา เช่น พอลิเมอร์ภายใต้ภาระคงที่โดยมอดุลัสยืดหยุ่นของวัสดุจะลดลงตามช่วงเวลาเกิดขึ้นเนื่องจากการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลเพื่อพยายามลดความเค้นให้น้อยลง พฤติกรรมที่ขึ้นอยู่กับเวลาแสดงให้เห็นถึงการประเมินสมรรถนะของวัสดุได้อย่างแม่นยำในการทดสอบวัสดุภายใต้อุณหภูมิและเวลาจนสิ้นสุดการใช้งาน หลักการพื้นฐานของหลักการซ้อนทับกันแสดงให้เห็นถึงการเท่ากันระหว่างอุณหภูมิและเวลา นั่นคือการทดสอบวัสดุภายใต้ภาระ และอุณหภูมิที่คงที่ในระยะยาวจะส่งผลให้เกิดค่าความเครียดในชิ้นงานที่สูงขึ้นส่งผลต่อเส้นโค้งวิสโคอีลาสติกที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามเวลา เช่นเดียวกับการใช้ข้อมูลวิสโคอีลาสติกที่เก็บได้ในแต่ละช่วงอุณหภูมิสามารถนำมาซ้อนทับข้อมูลอื่นที่มีอุณหภูมิที่แตกต่างกันโดยการขยับเส้นโค้งตามแกนของเวลา ซึ่งหลักการซ้อนทับกันตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่ากระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการผ่อนคลาย หรือการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลในอัตราความเครียดที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงขึ้น [58] ซึ่งหลักการนี้ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายกับวัสดุชนิด เช่น พลาสติกไม้เสริมแรงเป็นที่ชัดเจนว่าความสัมพันธ์ระหว่างเวลา และอุณหภูมิ หรือเวลา และความเค้น ผลกระทบของอุณหภูมิคงที่หรือการเปลี่ยนแปลงความเครียดที่ขึ้นกับเวลามีผลเท่ากับการเลื่อนตัวแบบในลอการิทึมมาตราส่วนเวลา (time-scale) ส่วนเส้นโค้งหลักที่อุณหภูมิอ้างอิง ( $T_{ref}$ ) จะใช้ลอการิทึมมาตราส่วนเวลา รวมถึงเส้นโค้งการคืบที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันเหล่านี้จะถูกวางไว้บนเส้นโค้งหลักโดยการเลื่อนแกนในแนวนอน แสดงดังภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 การสร้างเส้นโค้งหลักโดยการเลื่อนแกนในแนวนอน [40]

พฤติกรรมเชิงกลของพอลิเมอร์จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เรียกว่า พฤติกรรมหนืด ไม่เพียงแต่บริเวณเหนืออุณหภูมิสภาพแก้ว ( $T_g$ ) แต่ยังรวมไปถึงด้านล่างเส้น  $T_g$  ด้วย พฤติกรรมทางกลของพอลิเมอร์ยังแสดงให้เห็นเวลา และการขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ต่ำกว่า  $T_g$  ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ใช้ งานตามปกติเมื่อเทียบกับเวลาที่ลดลงที่อุณหภูมิอ้างอิงถูกสร้างโดยขยับข้อมูลที่วัดได้ที่อุณหภูมิสูง พร้อมแกนเวลาบันทึก (แกนนอน) ข้อมูลที่วัดได้ที่อุณหภูมิสูงด้านล่าง  $T_g$  ไม่สามารถซ้อนทับได้อย่างราบรื่นโดยขยับแนวนอนเท่านั้นดังแสดงในภาพที่ 2.18 เส้นโค้งหลักที่ดูราบเรียบดังภาพที่ 2.19 กว่าจะถูกเลื่อนข้อมูลที่วัดในแนวตั้งเช่นเดียวกับแนวนอน ในขณะที่การแก้ไขความร้อนขึ้นอยู่กับความยืดหยุ่นของเอนโทรปีที่สูงกว่า  $T_g$  เป็นที่รู้จักกันดีว่าการเลื่อนแกนในแนวตั้งเป็นการแก้ไขความหนืดของเอนโทรปีที่สูงกว่า  $T_g$



ภาพที่ 2.19 การสร้างเส้นโค้งหลักโดยการเลื่อนแกนในแนวนอนและแนวตั้ง [40]

อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของการทำนายสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์จากเส้นโค้งหลักคือ ความคลาดเคลื่อนที่อาจจะเกิดจากสภาพแวดล้อม เช่น การเสื่อมสภาพทางโครงสร้าง และการสูญเสียสมบัติเนื่องจากแสงแดด และความร้อน เป็นต้น

## 2.8 การยืนยันผลการทดลอง [59]

เนื่องจากการพยากรณ์มีด้วยกันหลายวิธีและเป้าหมายสูงสุดในการพยากรณ์ที่ผู้เกี่ยวข้องกับการพยากรณ์ทุก ๆ ฝ่ายต้องการ คือการได้ค่าพยากรณ์ที่มีความถูกต้องและค่าความถูกต้องของการพยากรณ์จะมากหรือน้อยนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าความคลาดเคลื่อนในการพยากรณ์ (forecast error) ดังนั้นการที่จะตัดสินว่าวิธีการพยากรณ์แบบใดให้คำตอบที่ดีที่สุดจึงจำเป็นต้องมีดัชนีชี้วัดเพื่อตรวจสอบว่าค่าที่ได้จากการพยากรณ์แตกต่างจากค่าจริงมากน้อยเพียงใด ณ ช่วงเวลา  $t$  เดียวกันใด ๆ หากค่าจริงแตกต่างจากค่าพยากรณ์มาก ค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ก็จะมีค่าสูง การวัดความคลาดเคลื่อนของค่าจริงและค่าที่พยากรณ์ได้โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ หรือจำนวนข้อมูลต่าง ๆ จะพิจารณาจากการที่ค่าจริงใกล้เคียงค่าพยากรณ์ที่สุด หรือทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ย่อมเป็นค่าที่เหมาะสมกับการใช้พยากรณ์ให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำ การวัดความคลาดเคลื่อนสามารถวัดได้จากค่าต่าง ๆ เช่น ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (mean square error; MSE) ค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของความคลาดเคลื่อน (mean absolute error; MAE) และค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (mean absolute percentage error; MAPE) อย่างไรก็ตามการวัดความถูกต้องของการพยากรณ์โดยใช้ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์นั้นจะมีข้อได้เปรียบกว่าอีก 2 วิธีที่กล่าวมา เนื่องจากเป็นการวัดความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์เทียบกับค่าข้อมูลจริงจึงสามารถที่จะใช้ในการประเมินการพยากรณ์ได้เหมาะสมกว่า นั่นคือค่า MAPE ยิ่งน้อย หมายถึงการพยากรณ์ยิ่งแม่นยำ

สำหรับวิธีค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (mean absolute percent error; MAPE) ถ้าหากค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนที่ได้น้อย แสดงว่าการพยากรณ์ยังมีความแม่นยำซึ่งคำนวณได้จากสมการ (2.17)

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n \left| \frac{T_t - Y_t}{T_t} \right| \times 100 \quad (2.17)$$

เมื่อ	$T_t$	คือ ค่าจริงของผลลัพธ์ในช่วงเวลา
	$Y_t$	คือ ค่าที่พยากรณ์ในช่วงเวลา $t$
	$N$	คือ จำนวนช่วงเวลาของข้อมูลที่พยากรณ์

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึง วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือวัด รวมถึงวิธีในการทดสอบสมบัติทางกล และวิธีการทดสอบพฤติกรรมการคืบทั้งการทดสอบระยะสั้น และการทดสอบระยะยาว

#### 3.1 วัสดุ และสารเคมี

3.1.1 พอลิโพรพิลีนรีไซเคิลเกรด WT170 มีดัชนีการหลอมไหล (melt flow index) 11 กรัมต่อ 10 นาที ที่อุณหภูมิ 230°C จัดจำหน่ายโดย บริษัทวิทยานินเตอร์เทรต จำกัด (สมุทรปราการ ประเทศไทย) ดังภาพที่ 3.1

3.1.2 ผงไม้อยางพาราที่รับมาจากโรงงานเฟอร์นิเจอร์ไม้อยางพาราในจังหวัดสงขลา (ประเทศไทย) ดังภาพที่ 3.2

3.1.3 สารคู่ควบ (maleic anhydride-grafted polypropylene; MAPP) จัดจำหน่ายโดย บริษัท Sigma-Aldrich (Missouri, USA) ดังภาพที่ 3.3

3.1.4 สารต้านทานรังสียูวี (hindered amine light stabilizer; MEUV008) จัดจำหน่ายโดย บริษัท ทีเอช คัลเลอร์ จำกัด (สมุทรปราการ ประเทศไทย) ดังภาพที่ 3.4

3.1.5 สารหล่อลื่น (paraffin) จัดจำหน่ายโดย บริษัท Nippon Seiro จำกัด (Yamaguchi, Japan) ดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.1 พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล





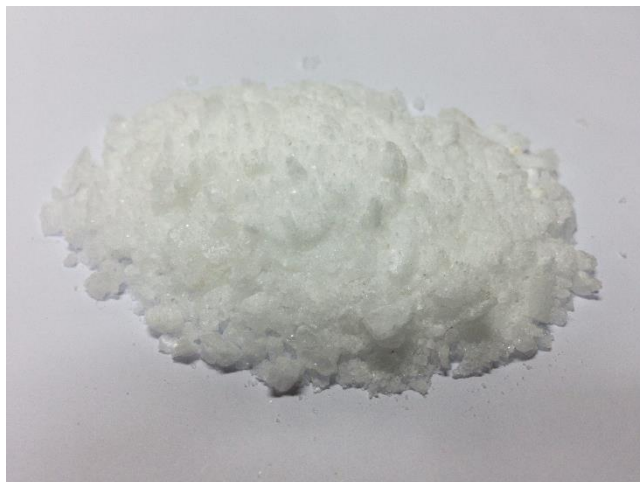
ภาพที่ 3.2 ผงไม้ยางพารา



ภาพที่ 3.3 สารคู่ควบ



ภาพที่ 3.4 สารต้านรังสียูวี



ภาพที่ 3.5 สารหล่อลื่น

### 3.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์

3.2.1 เครื่องร่อนแยกขนาด ยี่ห้อ Ro-tap ผลิตโดยบริษัท W.S. Tyler (Ohio, USA) ใช้สำหรับแยกขนาดผงไม้ยางพาราโดยการใส่ตะแกรงร่อนให้ผ่านขนาด 80 เมช ( $< 180 \mu\text{m}$ ) ดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 เครื่องร่อนแยกขนาด

3.2.2. ตู้อบความร้อน ยี่ห้อ Heraeus ผลิตโดยบริษัท Heraeus Precious Metals GmbH & Co. KG จำกัด (Hanau, Germany) ใช้สำหรับอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110°C ของผงไม้ยางพารา และชิ้นงานทดสอบ ดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 ตู้อบความร้อน

3.2.3 เครื่องย่อยพลาสติก ใช้ในการย่อยวัสดุผสมที่ผ่านกระบวนการผสมโดยเครื่องอัดรีดให้ได้เม็ดวัสดุผสมขนาดเล็ก ดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 เครื่องย่อยพลาสติกและวัสดุดิบสำหรับป้อนเข้า

3.2.4 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยว ยี่ห้อ Cincinnati ผลิตโดยบริษัท Cincinnati Milacron จำกัด (Malterdingen, Germany) ใช้ในการผสมเม็ดพลาสติก และผงไม้ เพื่อให้ได้เม็ดวัสดุผสม (wood plastic composite pellets) ความเร็วหมุนของเกลียว 50 รอบต่อนาที ใช้อุณหภูมิระหว่าง 170-190°C ดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยว

3.2.5 เครื่องอัดร้อน ใช้สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ ตัวเครื่องประกอบไปด้วยส่วนของแม่พิมพ์อัดร้อน และแม่พิมพ์หล่อเย็น กำลังในการอัดสูงสุด 2,500 psi ดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 เครื่องอัดร้อน



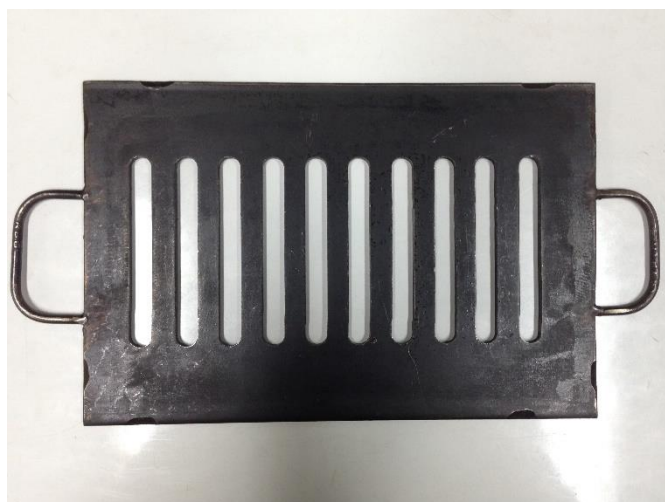
### 3.2.6 แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ ประกอบด้วย 2 ส่วน ดังนี้

1) แม่พิมพ์แผ่นบน และแม่พิมพ์แผ่นล่างขนาด 240 มม. x 340 มม. x 6 มม. สำหรับประกบเพื่ออัดแบบแม่พิมพ์แผ่นกลางที่ใส่เม็ดวัสดุผสมไว้ ดังภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 แม่พิมพ์แผ่นบนและแม่พิมพ์แผ่นล่าง

2) แบบแม่พิมพ์แผ่นกลางมีขนาด 200 มม. x 300 มม. x 6 มม. สามารถขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบได้จำนวน 10 ชิ้นต่อการอัด 1 ครั้ง ดังภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 แบบแม่พิมพ์แผ่นกลาง

3.2.7 เครื่องมือสำหรับกระบวนการทดสอบ ประกอบด้วย เครื่องทดสอบสมบัติทางวัสดุ เตาอบสำหรับเครื่องทดสอบวัสดุ และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) เครื่องทดสอบสมบัติทางวัสดุ ยี่ห้อ Instron โมเดล 5582 ผลิตโดยบริษัท Instron corporation จำกัด (Massachusetts, USA) ใช้ในการวัดค่าสมบัติทางกลด้านความแข็งแรง ดัด ความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงอัด ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบดัดคือ 2 มิลลิเมตรต่อนาที และทดสอบที่อุณหภูมิห้อง 25°C [60] สถานที่ทดสอบภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ดังภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13 เครื่องทดสอบสมบัติทางวัสดุ

2) เตาอบสำหรับเครื่องทดสอบวัสดุ ใช้สำหรับควบคุมอุณหภูมิ และสภาวะในการทดลองให้แก่ชิ้นงานทดสอบ โดยจะให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 38-68°C เพื่อเร่งการเสียรูปให้กับชิ้นงานทดสอบให้เกิดการคืบที่รวดเร็วยิ่งขึ้น ดังภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 เตาอบสำหรับเครื่องทดสอบวัสดุ

3) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) ยี่ห้อ FEI™ โมเดล quanta 400 ผลิตโดยบริษัท FEI company จำกัด (Oregon, USA) เป็นเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์ที่ใช้สำหรับศึกษาโครงสร้างจุลภาค (microstructure) ของตัวอย่าง เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของผงไม้ และการยึดเกาะระหว่างพลาสติกและผงไม้ โดยมีกำลังขยายสูงสุด 300,000 เท่า ในส่วนของงานวิจัยนี้ได้ใช้กำลังขยายที่ 100 และ 1,000 เท่า สถานที่ทดสอบศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ แสดงดังภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.15 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

ที่มา : ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ [61]

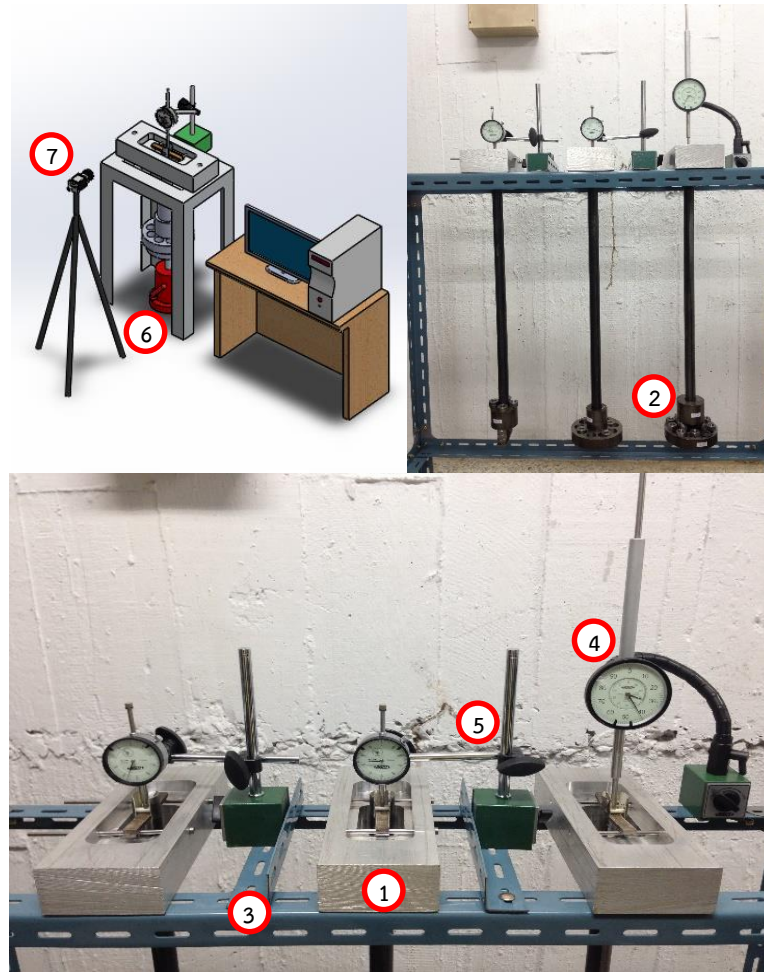
4) เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (thermogravimetric Analyzer; TGA) ยี่ห้อ PerkinElmer โมเดล TGA7 ผลิตโดยบริษัท PerkinElmer จำกัด (Massachusetts, USA) ใช้วิเคราะห์หาปริมาณน้ำหนักที่หายไป เนื่องจากการสลายตัวขององค์ประกอบในสารตัวอย่าง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 50 ถึง 1,300°C วัสดุต่าง ๆ ที่ศึกษาได้แก่ ดิน ยาง ไม้ เซรามิกส์ พลาสติก วัสดุผสม เป็นต้น สถานที่ทดสอบศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ แสดงดังภาพที่ 3.16



ภาพที่ 3.16 เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน  
ที่มา : ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ [61]

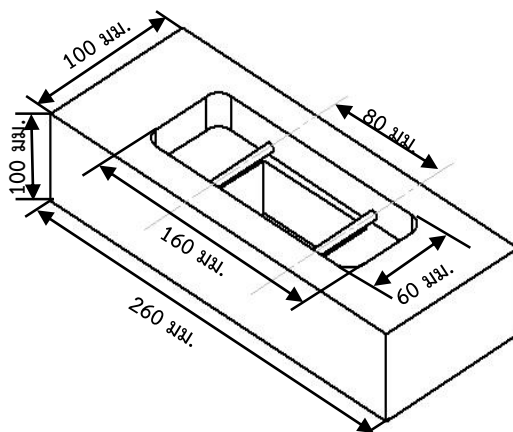
3.2.8 ชุดทดสอบพฤติกรรมการคืบแสดงดังภาพที่ 3.17 ผ่านการสร้างแบบจำลองสามมิติด้วยโปรแกรม solid work 2012 เพื่อความเหมาะสมของขนาด และรูปร่างของชุดทดสอบ หลังจากนั้นจึงจัดสร้างชุดทดสอบขึ้นตามแบบที่กำหนดไว้ ซึ่งประกอบด้วย 1) ฐานรองรับชิ้นงานทดสอบสำหรับการตัดแบบ 3 จุด 2) แท่งน้ำหนัก 3) โครงเหล็กรองรับชุดทดสอบ 4) ไดอัลเกจ 5) ฐานแม่เหล็กจับยึดไดอัลเกจ 6) แม่แรงไฮดรอลิก และ 7) กล้องบันทึกวีดีโอ โดยมีรายละเอียดดังนี้





ภาพที่ 3.17 ชุดทดสอบพฤติกรรมการคืบ

1) ฐานรองรับชิ้นงานทดสอบสำหรับการตัดแบบ 3 จุด ขนาด 100 มม. x 260 มม. x 52 มม. มีระยะห่างระหว่างบารองรับชิ้นงาน (span) มีระยะ 80 มม. ตามมาตรฐาน ASTM D790-92 ดังภาพที่ 3.18



ภาพที่ 3.18 ฐานรองรับชิ้นงานทดสอบ

2) แท่งน้ำหนัก สามารถปรับลดหรือเพิ่มภาระได้ โดยให้ภาระแก่ชิ้นงานทดสอบ ที่ระดับ 20%, 30% และ 40% ของภาระสูงสุดของชิ้นงานทดสอบ [35, 62] มีค่าเป็น 1.524, 2.286 และ 3.048 กิโลกรัม ตามลำดับ โดยใช้วัดจากเครื่องชั่งแบบไฟฟ้า ยี่ห้อ yamato รุ่น DP-5301 ค่าความละเอียด 0.002 กิโลกรัม ดังภาพที่ 3.19



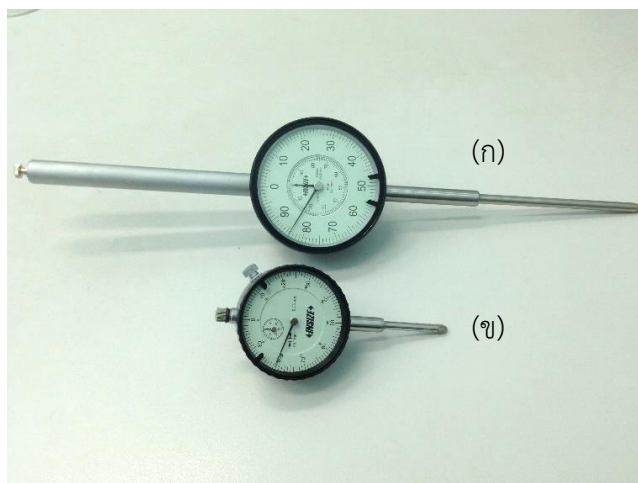
ภาพที่ 3.19 แท่งน้ำหนัก

3) โครงเหล็กรองรับชุดทดสอบ ใช้สำหรับติดตั้งฐานรองรับชิ้นงานทดสอบ และใช้ในการจับยึดฐานแม่เหล็กไดอัลเกจในขณะที่ทำการทดลอง แสดงดังภาพที่ 3.20



ภาพที่ 3.20 โครงเหล็กรองรับชุดทดสอบ

4) ไดอัลเกจประกอบด้วย ไดอัลเกจแบบ long range 0-100 มม. ยี่ห้อ Insize (โมเดล 2309-100D) ความละเอียดในการวัด 0.01 มม. ใช้สำหรับวัดระยะการโก่งงอของชิ้นงานทดสอบ ระยะวัดสูงสุดสามารถวัดได้ 100 มม. และไดอัลเกจแบบ short range 0-30 มม. Insize (โมเดล 44 2310-30A) ความละเอียดในการวัด 0.01 มม. ใช้สำหรับวัดระยะการโก่งงอของชิ้นงานทดสอบ ระยะวัดสูงสุดสามารถวัดได้ 30 มม. ภาพที่ 3.21



ภาพที่ 3.21 ไดอัลเกจ (ก) แบบ long range 0-100 มม.  
และ (ข) แบบ short range 0-30 มม.

5) ฐานแม่เหล็กจับยึดไดอัลเกจ ยี่ห้อ Insize ประกอบด้วย โมเดล IS16207-80 ใช้สำหรับจับยึดไดอัลเกจเข้ากับโครงเหล็กรองรับชุดทดสอบในขณะที่ทำการทดลอง ดังภาพที่ 3.22(ก) และฐานแม่เหล็กจับยึดไดอัลเกจ โมเดล 6200-60 ใช้สำหรับจับยึดไดอัลเกจเข้ากับโครงเหล็กรองรับชุดทดสอบในขณะที่ทำการทดลอง ภาพที่ 3.22(ข)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.22 ฐานแม่เหล็กจับยึดไดอัลเกจ (ก) โมเดล IS16207-80 (ข) โมเดล 6200-60

6) แม่แรงไฮดรอลิก ยี่ห้อ Herida ขนาด 2 ตัน ใช้สำหรับยกแท่งน้ำหนักขึ้น ติดตั้งกับชิ้นงานทดสอบ และใช้ควบคุมความเร็วในการปล่อยภาระลงให้สม่ำเสมอขณะทำการทดสอบ ดังภาพที่ 3.23



ภาพที่ 3.23 แม่แรงไฮดรอลิก

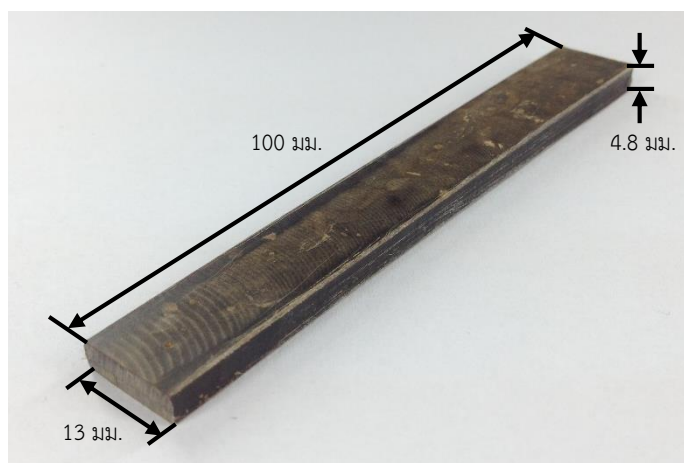
7) กล้องเว็บแคม (web camera) ยี่ห้อ oker ความละเอียด 16 ล้านพิกเซล สำหรับบันทึกความเคลื่อนไหวของหน้าปัดไดอัลเกจขณะที่ชิ้นงานทดสอบรับภาระ ดังภาพที่ 3.24



ภาพที่ 3.24 กล้องเว็บแคม

### 3.2.9 ชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติทางกล

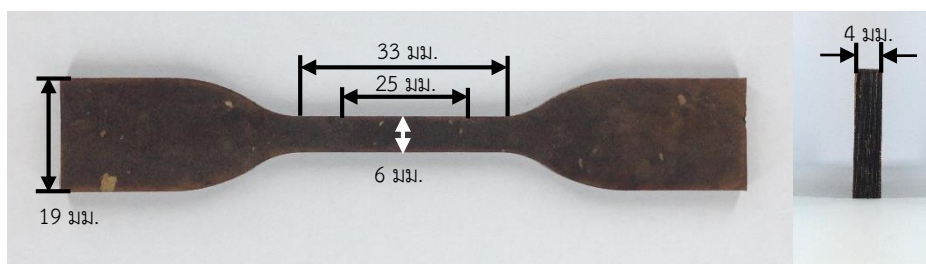
- 1) ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดัด มีขนาด 13 มม. x 100 มม. x 4.8 มม. (กว้าง x ยาว x หนา) ตามมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงดัด ASTM D790-92 ดังภาพที่ 3.25



ภาพที่ 3.25 ชิ้นงานทดสอบแรงดัด

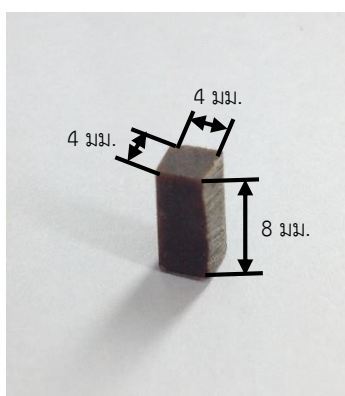
- 2) ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง ลักษณะของชิ้นงานที่ใช้ คือ ชิ้นงานทดสอบที่เกจมีขนาด 6 มม. x 25 มม. x 4 มม. (กว้าง x ยาว x หนา) ตามมาตรฐานของการทดสอบความแข็งแรงดึง ASTM D6108-97 ดังภาพที่ 3.26





ภาพที่ 3.26 ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง

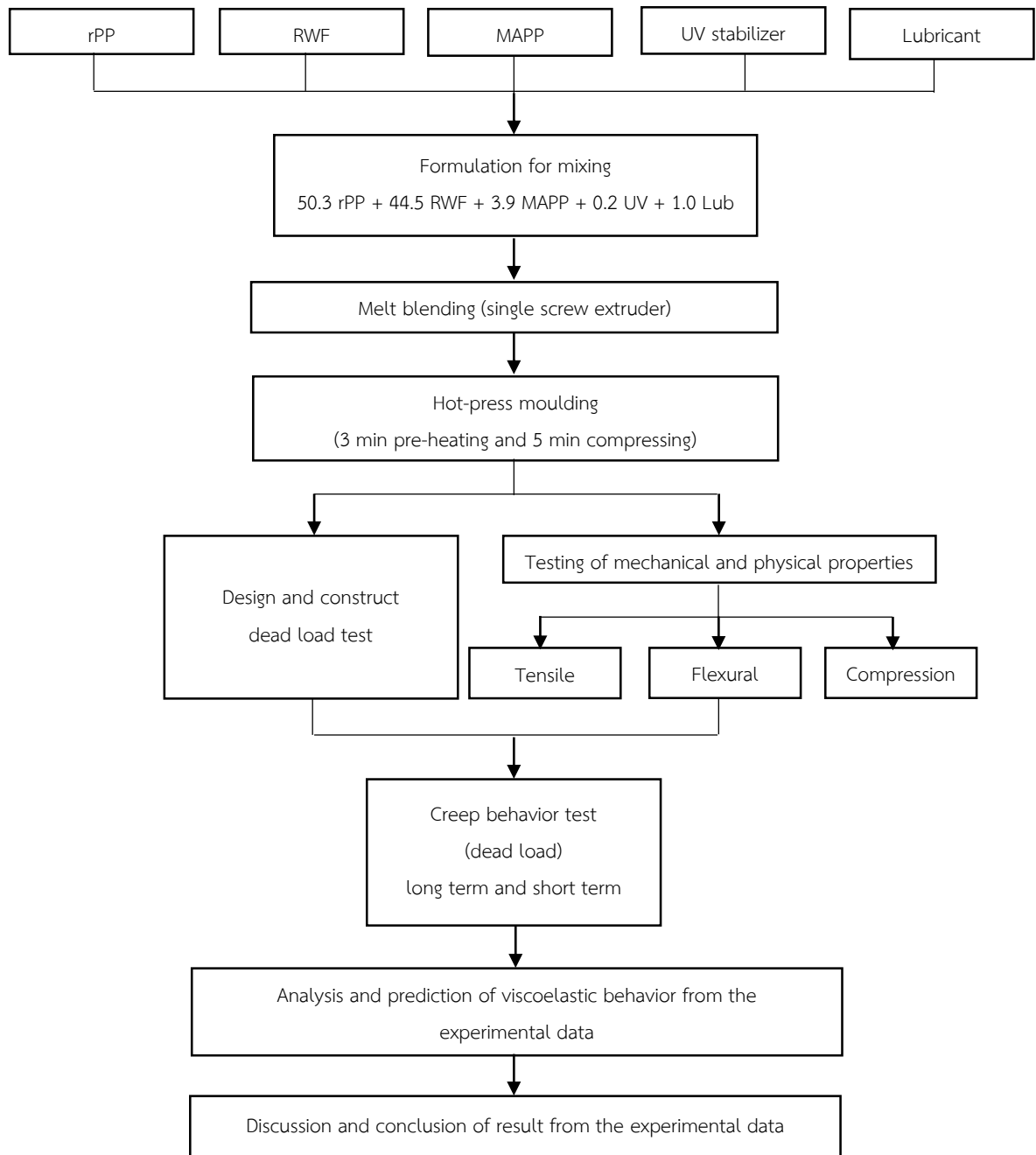
3) ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงอัด ใช้ชิ้นงานที่มีขนาด 4 มม. x 4 มม. x 8 มม. (กว้าง x ยาว x หนา) ตามมาตรฐานของการทดสอบความแข็งแรงอัด ASTM D638-99 ดังภาพที่ 3.27



ภาพที่ 3.27 ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงอัด

### 3.3 การออกแบบวิธีดำเนินงานวิจัย

การศึกษากิจกรรมการคืบของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีน และผงไม้ยางพาราได้ใช้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล และผงไม้ยางพาราในการขึ้นรูปไม้พลาสติกเช่นเดียวกับงานวิจัยก่อนหน้าของหน่วยวิจัยเทคโนโลยีไม้ยางพาราและการจัดการ [47] โดยผ่านการผสมเป็นเม็ดวัสดุผสมจากนั้นขึ้นรูปเป็นชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติทางกลด้านความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงอัด และตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพโดยใช้กล้องส่องอิเล็กตรอนในการวิเคราะห์ผล จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790-92 มาทดสอบพฤติกรรมการคืบโดยการดัดแบบ 3 จุด แบ่งเป็นการทดสอบระยะสั้นเป็นระยะเวลา 100 นาที โดยใช้อุณหภูมิช่วยเร่งการเสียรูปของชิ้นงานทดสอบ และการทดสอบระยะยาวเป็นระยะเวลา 1,000 ชั่วโมง โดยทดสอบการคืบที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้เทียบความเหมาะสมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และทำนายอายุการใช้งานของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพาราในแต่ละระดับของภาระ ดังผังการดำเนินงานแสดงตามภาพที่ 3.28



rPP = recycled polypropylene

RWF = rubberwood flour

MAPP = maleic anhydride polypropylene

ภาพที่ 3.28 แผนผังการดำเนินงาน

### 3.4 วิธีการวิจัย

#### 3.3.1 ศึกษางานวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ศึกษาค้นคว้างานวิจัยในอดีต ทบทวนวรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เช่น สมบัติของวัสดุผสม พอลิโพรพิลีน ผงไม้ การทดสอบการคืบ และการทดสอบสมบัติทางกล เป็นต้น เพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินงานวิจัย โดยทำการศึกษาจากแหล่งข้อมูลต่าง ๆ เช่น หนังสือ บทความ และวารสาร เป็นต้น

#### 3.3.2 จัดหาวัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

1) จัดหาวัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมของวัสดุผสม เช่น พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล ผงไม้ ยางพารา สารเพิ่มการยึดเกาะ สารหล่อลื่น และสารต้านรังสียูวี

2) อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงาน และการทดสอบ เช่น เครื่องร่อนแยกขนาด เตาอบ เครื่องอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยว เครื่องย่อยพลาสติก เครื่องอัดรีดร้อน เครื่องทดสอบแรงดัด แรงดึง แรงอัด เตาอบสำหรับเครื่องทดสอบวัสดุ อุปกรณ์ทดสอบการคืบ และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด เป็นต้น

#### 3.3.3 เตรียมชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงดัด

1) ทำการเตรียมวัสดุก่อนการขึ้นรูปโดยการนำผงไม้ยางพาราที่ได้จากภาคอุตสาหกรรมมาทำการแยกขนาดโดยใช้ตะแกรงขนาด 80 เมช และนำผงไม้ที่ได้อบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วทำการจัดเก็บโดยการซีลเพื่อรอการผสม

2) ทำการผสมวัสดุต่าง ๆ ตามอัตราส่วนที่กำหนด และทำการคลุกเคล้าให้เข้า โดยการเขย่าเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำการจัดเก็บโดยการซีลเพื่อรอการขึ้นรูป

3) นำวัตถุดิบที่ได้จากการผสมไปทำการขึ้นรูปเป็นเม็ดผสมในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยว ซึ่งเครื่องอัดรีดที่ใช้ในการขึ้นรูปประกอบด้วย 4 ช่วงอุณหภูมิ และอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและผงไม้ยางพารามี 4 ช่วง ประกอบด้วยช่วงท้อเปิด (die) ถึงกรวยเติม (hopper) ซึ่งมีอุณหภูมิเป็น 170, 180, 190 และ 190°C ตามลำดับ โดยใช้ความเร็วหมุนของเกลียวที่ 50 รอบต่อนาที ซึ่งได้เส้นวัสดุผสมขนาด 3 มม. ตลอดทั้งหน้าตัดแสดงดังภาพที่ 3.29





ภาพที่ 3.29 เส้นวัสดุผสมที่ผ่านกระบวนการอัดรีด

4) นำเส้นวัสดุผสมที่ได้เข้าสู่เครื่องย่อยพลาสติกเพื่อทำให้ได้เม็ดพลาสติกผสมขนาดเล็กดังภาพที่ 3.30



ภาพที่ 3.30 เม็ดวัสดุผสม (wood plastic composite pellets)

5) นำเม็ดพลาสติกผสมที่ได้อบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ  $110^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วทำการจัดเก็บโดยการซีลเพื่อรอการขึ้นรูป

6) นำเม็ดพลาสติกผสมมาขึ้นรูปขึ้นงานโดยกระบวนการอัดรีดโดยขั้นแรกทำการอุ่นแม่พิมพ์ให้มีอุณหภูมิ  $170^{\circ}\text{C}$

7) เมื่อแม่พิมพ์ถึงอุณหภูมิที่กำหนดจึงเปิดแม่พิมพ์ออกแล้วใส่เม็ดวัสดุผสมในแม่พิมพ์แสดงดังภาพที่ 3.31 โดยรองแผ่นฟอยล์ทั้งด้านบน และด้านล่างของแม่พิมพ์อัดรีด เพื่อป้องกันชิ้นงานติดแผ่นประกบบน และแผ่นประกบล่าง โดยชิ้นงานที่ได้มีความหนาแน่นเท่ากับ  $1.094 \text{ g/cm}^3$



ภาพที่ 3.31 ขั้นตอนการใส่เม็ดวัสดุผสมลงแม่พิมพ์อัดร้อน

8) ปิดแม่พิมพ์อัดร้อนแล้วอุ่นชิ้นงานเป็นเวลา 3 นาที ที่อุณหภูมิ 170°C และกดอัดชิ้นงานด้วยแรงอัด 870 psi เป็นเวลา 5 นาที

9) หล่อเย็นชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอัดร้อนเป็นเวลา 10 นาที โดยให้ชิ้นงานเย็นตัวภายในแม่พิมพ์ ซึ่งได้เป็นชิ้นงานขนาด 6 มม. x 13 มม. x 110 มม. แสดงดังภาพที่ 3.32



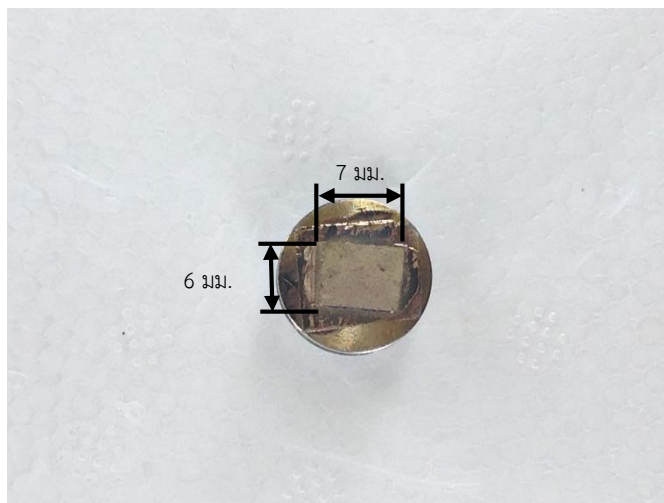
ภาพที่ 3.32 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดร้อน

10) นำชิ้นงานที่ได้มาเตรียมเป็นชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานของการทดสอบแรงดัดตาม ASTM D790-92 ขนาด 4.8 มม. x 13 มม. x 100 มม. ด้วยเครื่องกัดแนวตั้งดังภาพที่ 3.33



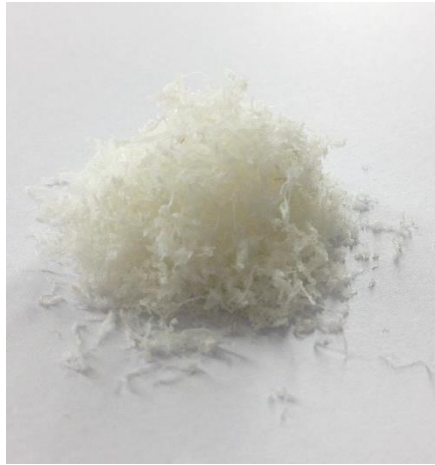
ภาพที่ 3.33 เตรียมชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องกัดแนวตั้ง

3.3.4 นำชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปมาเตรียมให้ได้ขนาด 7 มม. x 6 มม. สำหรับการทดสอบทางโครงสร้างพื้นฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยการเคลือบชิ้นงานให้เป็นตัวนำ (conductive coating) โดยใช้ทองในการเคลือบผิวแสดงดังภาพที่ 3.34



ภาพที่ 3.34 ชิ้นงานสำหรับการทดสอบทางโครงสร้างพื้นฐานวิทยา

3.3.5 เตรียมชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปมาเตรียมเป็นเศษผงขนาดเล็ก แสดงดังภาพที่ 3.35 ซึ่งประกอบด้วยพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล ผงไม้ยางพารา และวัสดุผสมพอลิโพรไพลีนและผงไม้ยางพารามาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (TGA) วิธีการทดสอบตาม WI-RES-TGA-001 สำหรับอุณหภูมิ 50°C ถึง 1,000°C ที่ 10°C/min



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 3.35 ชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติทางความร้อน

(ก) โพลีโพรพิลีนรีไซเคิล (ข) ฝั่มไ้ม่ยั้งพารา (ค) วัสดุผสมโพลีโพรไฟลีนและฝั่มไ้ม่ยั้งพารา

3.3.5 ทดสอบสมบัติทางกลด้านความแข็งแรงดัด ความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงอัด โดยเครื่องทดสอบสมบัติทางวัสดุ ยี่ห้อ Instron โมเดล 5582

1) ทดสอบแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM D 790 จากนั้นนำค่ามอดุลัสแตกร้าวม (MOR) ที่ได้มาคำนวณหาระดับภาระที่ 20%, 30% และ 40% จากสมการ (2.5) ปรับรูปสมการจะได้ดังสมการ (3.1)

$$F = \frac{(UFS) 2Wh^2}{3L} \quad (N) \quad (3.1)$$



เมื่อ	UFS = ความต้านทานแรงดัดสูงสุด (เมกกะปาสคาล)
	F = แรงที่กระทำบนชิ้นงานทดสอบ (นิวตัน)
	W = ความกว้างของชิ้นงานทดสอบ (มม.)
	h = ความหนาของชิ้นงานทดสอบ (มม.)
	L = ระยะห่างของบารองรับชิ้นงานทดสอบ (มม.)

จากสมการข้างต้นสามารถนำมาคำนวณหาน้ำหนักสูงสุดที่กระทำกับชิ้นงาน และคำนวณหาภาระที่ 20%, 30% และ 40%

3.3.6 ทำการทดสอบพฤติกรรมการคืบของชิ้นงานทดสอบด้วยการทดสอบแรงดัดตาม ASTM D790-92 โดยใช้ไดอัลเกจเป็นเครื่องมือในการวัดระยะการโก่งตัวของชิ้นงานทดสอบที่เพิ่มขึ้นของเวลาด้วยภาระตายตัวแบบคงที่ในแต่ละระดับการทดลอง

1) การทดสอบหาพฤติกรรมการคืบจะใช้ภาระเพียง 20%, 30% และ 40% ของภาระสูงสุดเพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้อุปกรณ์ทดสอบเกิดการแตกร้าวในขณะที่มีภาระกระทำซึ่งจะอยู่ในของเขตระยะแรก และระยะที่สองของการคืบ ผลที่ได้จะใช้ในการทำนายการเสียหายของชิ้นงานเมื่อได้รับภาระเป็นเวลานานตามมาตรฐาน ASTM D2990

2) ทดสอบหาพฤติกรรมการคืบระยะสั้นภายใต้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่ 28, 38, 48, 58 และ 68°C ระยะเวลา 100 นาที เป็นจำนวน 3 ซ้ำในแต่ละอุณหภูมิและระดับภาระ

3) ทดสอบหาพฤติกรรมการคืบระยะยาวภายใต้อุณหภูมิห้อง ระยะเวลา 1,000 ชั่วโมง เป็นจำนวน 3 ซ้ำในแต่ละระดับภาระ

3.3.7 การวิเคราะห์ผล และทำนายพฤติกรรมการคืบเป็นการใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ โดยเลือกใช้แบบจำลองของเบอร์เกอร์ และแบบจำลองสมการยกกำลังในการคำนวณพฤติกรรมการคืบของวัสดุที่มีสมบัติวิสโคอิลาสติก

### 3.3.8 สรุปผลการวิจัย

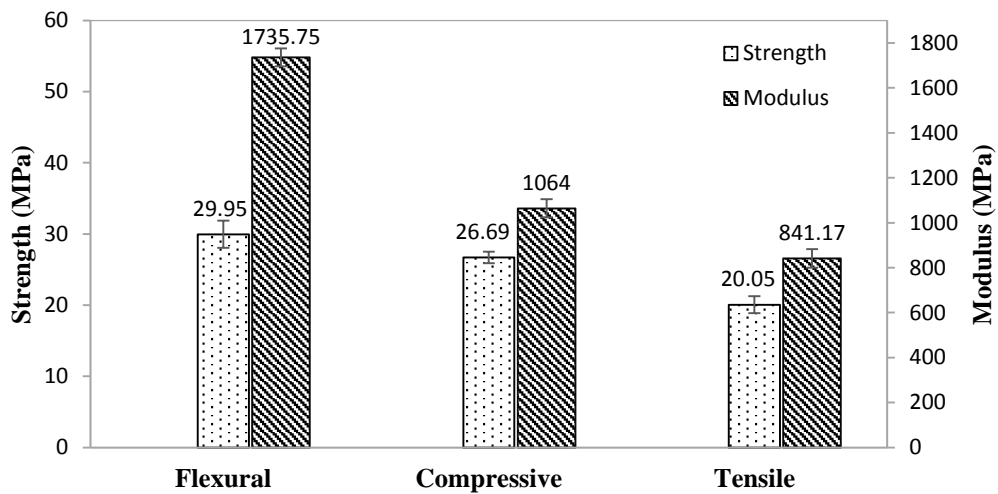
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลอง และอภิปรายผลการทดลอง ซึ่งได้แก่ผลการวิเคราะห์ผลกระทบต่อกระบวนการผสม และผลการทดสอบพฤติกรรมการคืบในระยะสั้น และระยะยาวของวัสดุผสมไม้พลาสติก

#### 4.1 สมบัติทางกลของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพาราที่ผ่านกระบวนการผสมโดยการอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยวและขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีด

วัสดุผสมไม้พลาสติกที่ได้จากการผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพาราด้วยกระบวนการอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยว และขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีดจะให้ค่าสมบัติทางด้านความแข็งแรงดัดที่ 29.95 MPa ความแข็งแรงอัดที่ 26.69 MPa และความแข็งแรงดึงที่ 20.05 MPa ดังแสดงในภาพที่ 4.1 ในขณะที่การผสมและขึ้นรูประหว่างพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพาราด้วยกระบวนการอัดรีดแบบเกลียวคู่จะให้ค่าสมบัติทางด้านความแข็งแรงดัดที่ 47.28 MPa ความแข็งแรงอัดที่ 17.11 MPa ความแข็งแรงดึงที่ 27.68 MPa [38] จะเห็นได้ว่าสมบัติทางกลด้านความแข็งแรงดัด และความแข็งแรงดึงของวัสดุผสมที่ผสมและขึ้นรูปจากกระบวนการอัดรีดแบบเกลียวคู่จะให้ค่าที่สูงกว่าการผสมโดยกระบวนการอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยวและขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีด เนื่องจากการผสมโดยกระบวนการอัดรีดแบบเกลียวคู่จะส่งผลให้ส่วนของพลาสติก และผงไม้มีการกระจายตัวได้ดีกว่า ดังเห็นได้จากโครงสร้างสัณฐานวิทยาของวัสดุผสมในภาพที่ 4.2 พบว่าการกระจายตัวของผงไม้ในพลาสติกเมทริกซ์จะมีความสม่ำเสมอหรือกระจายตัวได้เป็นอย่างดี (good homogeneous) เช่นเดียวกับโครงสร้างสัณฐานวิทยาของวัสดุผสมในภาพที่ 4.3(ค) จะเห็นได้ว่าตำหนิที่พบ คือ การกระจายตัวที่แยกเฟสระหว่างพลาสติกเมทริกซ์และผงไม้ เมื่อทดสอบสมบัติทางกลด้านความแข็งแรงดึงจะพบว่าจุดที่เกิดการเสียหายในกระบวนการทดสอบจะเกิดขึ้นในตำแหน่งที่มีการแยกเฟสระหว่างพลาสติกและผงไม้ยางพาราจึงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงจากการผสมด้วยกระบวนการอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยวมีค่าน้อยกว่ากระบวนการอัดรีดแบบเกลียวคู่

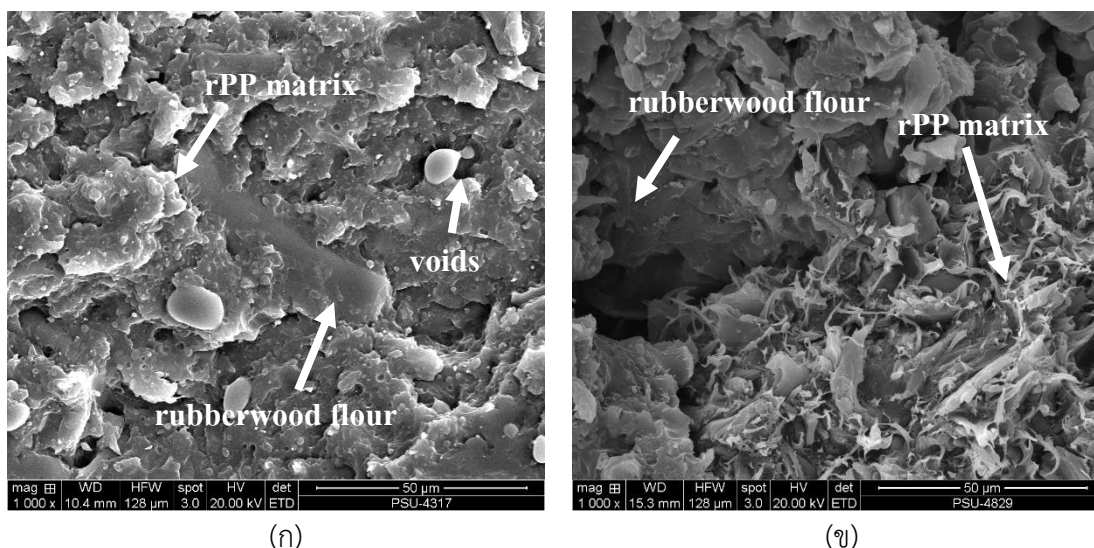


ภาพที่ 4.1 สมบัติทางกลของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพารา

ส่วนสมบัติทางกลด้านความแข็งแรงอัดที่ได้จากกระบวนการผสมโดยการอัดรีดแบบเกลียวคู่ ซึ่งมีความหนาแน่นที่  $1.085 \text{ g/cm}^3$  [63] จะให้ค่าที่ต่ำกว่ากระบวนการผสมโดยการอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยว และขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดร้อน แสดงดังภาพที่ 4.2 จะพบว่ารูพรุนในวัสดุผสมไม้พลาสติกที่ผ่านการผสมและขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีดแบบเกลียวคู่มีปริมาณมากกว่าวัสดุผสมไม้พลาสติกที่ผ่านการผสมด้วยกระบวนการอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยว และขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดร้อน และเมื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ 4.3(ก) จะพบรูพรุนในปริมาณน้อยเนื่องด้วยในกระบวนการอัดร้อนจะช่วยให้การดันช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการขึ้นรูปให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจึงส่งผลต่อสมบัติทางกลด้านความแข็งแรงอัดส่งผลต่อค่าความหนาแน่นที่ได้เท่ากับ  $1.094 \text{ g/cm}^3$



ภาพที่ 4.2 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพารา ที่ผสมและขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีดแบบเกลียวคู่



(ก)

(ข)

ภาพที่ 4.3 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพาราที่ผสมด้วยกระบวนการอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยวและขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดร้อน

(ก) ชิ้นงานก่อนการทดสอบสมบัติทางกล (ข) ตำแหน่งที่พบจากการทดสอบความแข็งแรงดึง

จากกระบวนการผสมและขึ้นรูปวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพาราในสูตรส่วนผสมเดียวกันด้วยกระบวนการที่แตกต่างกันนั้นจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกลที่ได้โดยสามารถยืนยันผลด้วยค่าสมบัติทางกลและโครงสร้างสัณฐานวิทยาของวัสดุ ซึ่งพบว่าการผสมพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและผงไม้ยางพาราเพื่อให้ค่าสมบัติทางกล และโครงสร้างสัณฐานวิทยาที่เหมาะสมควรผสมและขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีดแบบเกลียวคู่ แต่กระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีนี้ยังมีข้อเสียเปรียบในด้านการแปรรูปชิ้นงานส่งผลให้สูญเสียวัสดุมากเมื่อเทียบกับกระบวนการอัดร้อนซึ่งสามารถให้ชิ้นงานที่ใกล้เคียงกับขนาดของชิ้นงานทดสอบทำให้สูญเสียวัสดุจากกระบวนการแปรรูปที่น้อยกว่า ในส่วนต่อไปได้นำชิ้นงานทดสอบวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพาราที่ผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยวและขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดร้อนนำมาทำสอบพฤติกรรมการคืบโดยนำค่าความแข็งแรงดัดสูงสุด (UFS) จากกระบวนการทดสอบแรงดัดโดยเครื่องทดสอบสมบัติทางวัสดุ ยี่ห้อ Instron โมเดล 5582 ตามมาตรฐาน ASTM D 790 ได้ค่าความแข็งแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 29.95 MPa จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาระดับภาระที่ 20%, 30% และ 40% จากสมการ (3.1) จากสมการข้างต้นจะสามารถคำนวณหาภาระสูงสุดที่กระทำกับชิ้นงาน และคำนวณหาภาระที่ 20%, 30% และ 40% แสดงดังตารางที่ 4.1

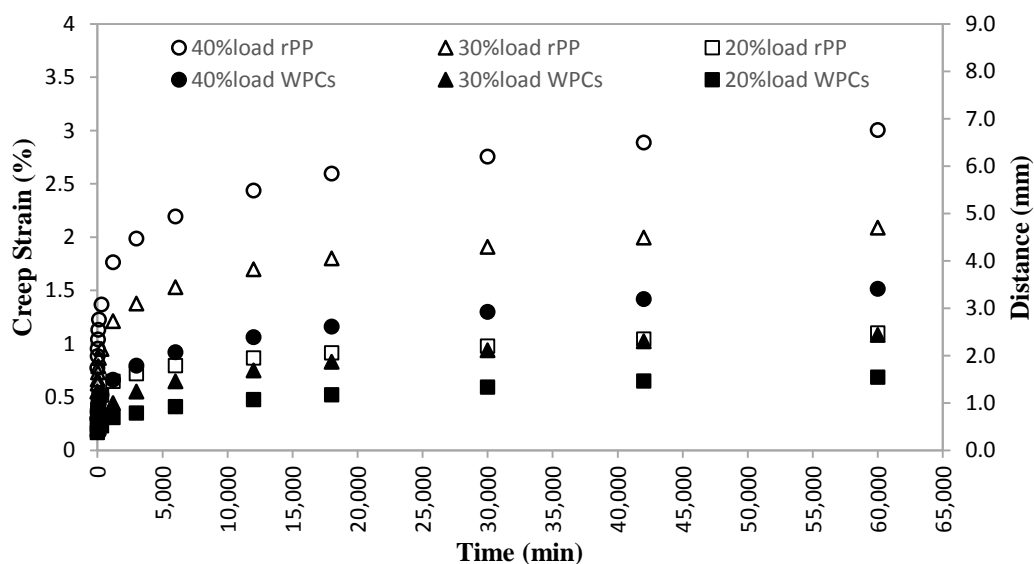


ตารางที่ 4.1 ระดับของภาระที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบ

Load (%)	Strength response (MPa)	Weight (Kg)
20	5.99	1.524
30	8.99	2.286
40	11.98	3.048

เนื่องด้วยวัสดุผสมไม้พลาสติกมีความไม่เหมาะสมต่อการใช้งานบางประเภทภายใต้การรับภาระเป็นระยะเวลายาว ส่งผลให้เกิดความเค้นสะสม และความเครียดต่อชิ้นงานส่งผลให้ชิ้นงานที่อยู่ภายใต้การรับภาระเกิดการเสียรูป และแตกหักได้ จึงได้ศึกษาถึงพฤติกรรมการคืบที่ส่งผลต่อวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพาราเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อภาระรวมถึงใช้ในการทำนายอายุการใช้งานของวัสดุผสมชนิดนี้

#### 4.2 การวิเคราะห์แบบจำลองสำหรับพฤติกรรมการคืบระยะยาวของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพารา



ภาพที่ 4.4 ค่าความเครียดของการคืบของ WPCs และ rPP

พฤติกรรมการคืบที่เกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบระหว่างวัสดุผสมจากพอลิโพรพิลีนกับผงไม้ยางพารา (WPCs) และพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (rPP) ที่ได้รับภาระกระทำคงที่เป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง (60,000 นาที) เมื่อเริ่มให้ภาระแก่ชิ้นงานทดสอบ ชิ้นงานทดสอบจะเกิดการโก่งตัวอย่างรวดเร็ว ในขณะที่เริ่มให้ภาระจนถึงช่วงเวลา 1,200 นาที จากนั้นจะเกิดการโก่งตัวขึ้นอย่างช้า ๆ สังเกตได้จากที่

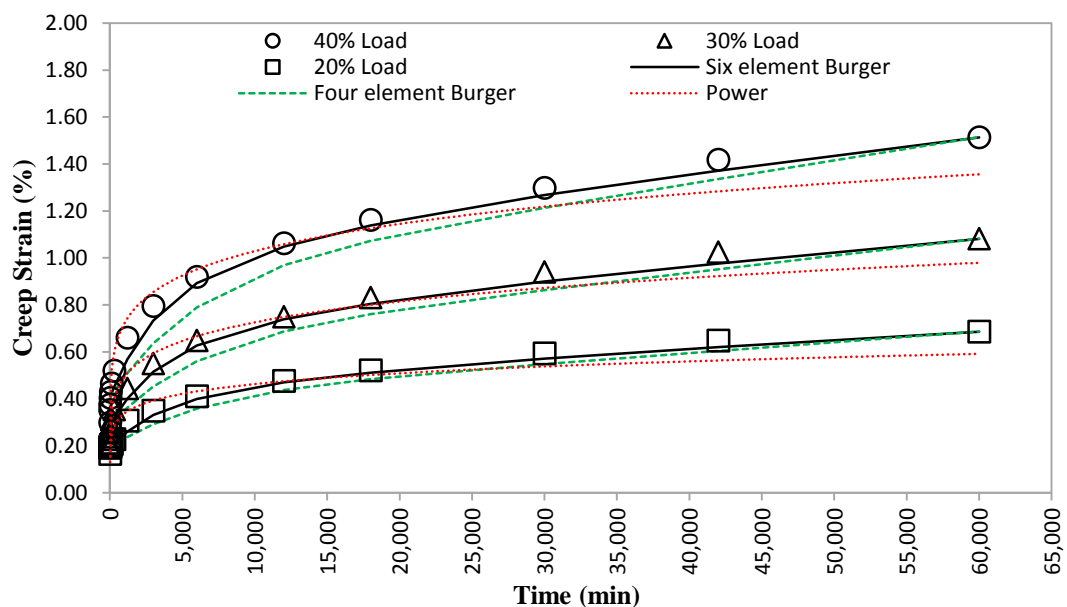
เวลา 50 ชั่วโมง (3,000 นาที) จนกระทั่งครบ 1,000 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 4.4 นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดของภาระที่ให้แก่อุปกรณ์ทดสอบมีอิทธิพลต่อระยะเวลาการโก่งงอของชิ้นงานทดสอบ ถ้าหากภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบเพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดระยะเวลาการโก่งงอมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งค่าระยะเวลาการโก่งงอของชิ้นงานทดสอบพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลที่ภาระขนาด 20%, 30% และ 40% ของภาระสูงสุดมีค่าเท่ากับ 2.45 มม. 4.65 มม. และ 6.68 มม. ตามลำดับ และค่าระยะเวลาการโก่งงอของชิ้นงานทดสอบวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพารามีค่าเท่ากับ 1.53 มม. 2.41 มม. และ 3.37 มม. ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบเส้นโค้งพฤติกรรมการคืบในแต่ละระดับของภาระสูงสุด พบว่าที่ระดับของภาระกระทำที่เท่ากันพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลจะเกิดการคืบที่สูงกว่าวัสดุผสมไม้พลาสติก เนื่องมาจากการเติมผงไม้ยางพาราเข้าสู่เนื้อพลาสติกเมทริกซ์จะส่งผลให้แนวโน้มของการคืบลดลง อาจเกิดจากการเพิ่มขึ้นของมอดูลัสยืดหยุ่น (MOE) ของวัสดุผสมที่มีเนื้อผงไม้ยางพาราผสมอยู่ [64] โดยค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลมีค่าเท่ากับ 1,354.93 MPa แสดงดังตาราง ก-2 ส่วนวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพารามีค่าเท่ากับ 1,735.75 MPa โดยปกติพลาสติกจะเกิดการคืบที่มากกว่าเมื่อเทียบกับไม้ที่เกิดการคืบน้อยในขณะที่ได้รับภาระ เมื่อนำผงไม้ใส่เข้าแทนที่ของพลาสติกเมทริกซ์ผงไม้ที่กระจายอยู่จะได้รับความเค้นที่สม่ำเสมอจากพลาสติกเมทริกซ์อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดการคืบที่ต่ำลงเนื่องจากผงไม้ยางพาราเป็นวัสดุที่มีค่ามอดูลัสสูงเมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกเมทริกซ์ [65] ซึ่งค่ามอดูลัสยืดหยุ่นจะเพิ่มขึ้นด้วยการเติมผงไม้ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ C. Homkhiew [16] ในสภาวะการใช้งานปกติภาระจะไม่สูงมากอยู่ในช่วงไม่เกิน 40% ของภาระสูงสุด และความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด และเวลาที่ได้มีความสอดคล้องกับค่าการเสียรูปที่เกิดขึ้น

พฤติกรรมการคืบระยะยาวของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพาราแสดงดังภาพที่ 4.5 ค่าความเครียดของการคืบอย่างทันที (instantaneous creep strain;  $C_e$ ) ความเครียดของการคืบหยุ่นหนืดหลัง 60,000 นาที (viscoelastic creep strain;  $C_{ve60000}$ ) และความเครียดของการคืบรวมหลัง 60,000 นาที (total creep strain;  $C_{t60000}$ ) แสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งจะเห็นว่าพฤติกรรมการคืบจากกระบวนการทดสอบจะมีแนวโน้มของความเครียดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มภาระกระทำสังเกตได้จากค่าความเครียดเริ่มต้นขณะที่เริ่มปล่อยภาระ ที่ภาระ 20% ค่าความเครียดที่ได้เท่ากับ 0.19 แต่เมื่อเพิ่มภาระเป็น 40% ค่าความเครียดที่ได้เท่ากับ 0.41 ซึ่งมีค่าที่เพิ่มขึ้นสูงมากขึ้นเนื่องจากการเสียรูปของชิ้นงานทดสอบ พฤติกรรมนี้เกิดขึ้นจากชิ้นงานทดสอบได้รับภาระกระทำที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง แสดงให้เห็นว่าอัตราการคืบส่งผลโดยตรงกับภาระ หลังจากนั้นเส้นโค้งการคืบของทั้งสามระดับภาระจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ อย่างคงที่จนถึงสิ้นสุดการทดลองที่ 1,000 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.2 ค่าความเครียดของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพารา

Load (%)	Wight (N)	Creep strain (%)		
		$C_e$	$C_{ve60000}$	$C_{t60000}$
20	14.95	0.19	0.50	0.69
30	22.43	0.29	0.79	1.08
40	29.90	0.41	1.11	1.52

เพื่ออธิบายและทำนายพฤติกรรมการคืบหลาย ๆ แบบจำลองได้มีการพัฒนา และประยุกต์ใช้ส่วนประกอบที่เป็นความสัมพันธ์ของวัสดุพอลิเมอร์ แบบจำลองสมการยกกำลังเป็นหนึ่ง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถุกนำมาใช้วิเคราะห์ความหนืดของพอลิเมอร์ค่าสัมประสิทธิ์ และเลขยกกำลังได้รับผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญโดยระดับความเครียด [56] อีกหนึ่งแบบจำลองนี้เป็นการรวมกันของแบบจำลองแมกซ์เวลล์ และเคลวิน 4 องค์ประกอบของแบบจำลองเบอร์เกอร์ [47] ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการเผยแพร่ และให้การคาดการณ์ที่น่าพอใจ ซึ่งประกอบด้วยสมบัติยืดหยุ่น และสมบัติวิสโคอีลาสติกแสดงดังภาพที่ 2.14 ส่วนแบบจำลองพฤติกรรมหยุ่นหนืดด้วย 6 องค์ประกอบของแบบจำลองเบอร์เกอร์แสดงดังภาพที่ 2.15 ได้มาจากการพัฒนาด้วยการเพิ่มขึ้นส่วนทางกลเข้าในส่วนโค้งของการคืบ เป็นการต่อพ่วงกันของแบบจำลองเคลวินสองชุดแทรกอยู่ระหว่างการต่ออนุกรมชิ้นส่วนสปริง และชิ้นส่วนตัวหน่วงของแบบจำลองแมกซ์เวลล์ ซึ่งคาดว่าแบบจำลองนี้อาจจะให้ผลการคาดการณ์ที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น



ภาพที่ 4.5 เส้นโค้งการคืบแรงดัดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองของเบอร์เกอร์และแบบจำลองสมการยกกำลังที่ระดับภาระที่แตกต่างกัน

จากภาพที่ 4.5 เส้นทึบแสดงค่าที่ได้จากการจำลองข้อมูลการลองผ่านแบบจำลองของเบอร์เกอร์ 6 องค์ประกอบ ส่วนเส้นประเกิดขึ้นจากการจำลองข้อมูลผ่านแบบจำลองของเบอร์เกอร์ 4 องค์ประกอบ และจุดประเกิดขึ้นจากการจำลองข้อมูลผ่านแบบจำลองสมการยกกำลัง ซึ่งสามารถสังเกตได้ถึงความเหมาะสมของการใช้แบบจำลองของเบอร์เกอร์ 6 องค์ประกอบ ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าแบบจำลองของเบอร์เกอร์ 6 องค์ประกอบ ซึ่งให้ความเหมาะสมกับข้อมูลการทดลองของแต่ละระดับของภาระ ซึ่งสรุปได้ถึงแบบจำลองเบอร์เกอร์ที่เหมาะสมสำหรับเส้นโค้งการคืบของวัสดุผสม

การวิเคราะห์พฤติกรรมการคืบของแบบจำลองเบอร์เกอร์ 4 องค์ประกอบในช่วงแรกของเส้นโค้งการคืบจะเกิดการตอบสนองที่รวดเร็วต่อความยืดหยุ่นของวัสดุ ( $E_M$ ) จะมีค่ามอดุลัสเริ่มต้นของภาระที่ต่ำจะมีค่าสูง และลดต่ำลงเมื่อระดับของภาระเพิ่มขึ้นซึ่งมีค่าเท่ากับแบบจำลองของเบอร์เกอร์ 6 องค์ประกอบ ส่วนการโค้งตัวของชิ้นงานที่ขึ้นกับเวลาซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันของสปริง 1 ชั้น ( $E_K$ ) และแดชพ็อต 1 ชั้น ( $\eta_K$ ) ซึ่งเส้นโค้งการทำนายในตำแหน่งนี้จะมีความเหมาะสมกับข้อมูลการทดลองที่น้อยกว่าแบบจำลองของเบอร์เกอร์ 6 องค์ประกอบ ช่วงสุดท้ายเป็นการเสีรูปจากความหนืดของแดชพ็อต ( $\eta_M$ ) จากแบบจำลองที่ระดับภาระ 20% มีค่าเท่ากับ  $1.31 \times 10^6$  MPa\*min และมีค่าลดต่ำลงเมื่อเพิ่มขึ้นของภาระเป็น 40% มีค่าเท่ากับ  $1.21 \times 10^6$  MPa\*min แสดงดังตารางที่ 4.3 ค่าความหนืดจะลดต่ำลงเมื่อมีการเพิ่มภาระเพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกับการจำลองด้วยแบบจำลองของเบอร์เกอร์ 6 องค์ประกอบ ส่วนแบบจำลองสมการยกกำลังค่าตัวแปร  $r_0$  สำหรับความเครียดอย่างทันทีทันใด และเกี่ยวข้องกับ การตอบสนองต่อความหนืดเริ่มต้น ขณะที่ตัวแปร  $n$  ที่เกี่ยวข้องกับการตอบสนองต่อค่าความหนืดจากการคืบที่ขึ้นกับเวลา [54] ซึ่งตัวแปรทั้งสองเพิ่มขึ้นด้วยระดับความเค้นจากการปรับเปลี่ยนภาระกระทำที่ให้กับชิ้นงานทดสอบ

แบบจำลองเบอร์เกอร์แบบ 4 องค์ประกอบสามารถคำนวณได้ตามขั้นตอนดังนี้

1) เส้นโค้งการคืบระยะสั้นถูกแบ่งออกเป็นสามขั้นตอน ได้แก่ ค่าความเครียดของการคืบอย่างทันที ( $C_e$ ) ค่าความเครียดของการคืบหยุ่นหนืด ( $C_{ve}$ ) และค่าความเครียดของการคืบรวม ( $C_t$ ) สำหรับตัวอย่างเส้นโค้งการคืบของวัสดุผสมจากพอลิโพรพีลีนและผงไม้อย่างพาราที่ภาระ 40% ซึ่งมีค่า  $C_e$  เท่ากับ 0.41%,  $C_{ve}$  เท่ากับ 1.11% และ  $C_t$  เท่ากับ 1.52%

2) ช่วงเวลาของ  $C_e$  (ณ ตำแหน่งที่เกิดความเครียดอย่างทันทีแบบเชิงเส้น),  $C_{ve}$  (ณ ตำแหน่งที่เกิดความเครียดในช่วงวิสโคอีลาสติกแบบไม่เป็นเชิงเส้น) และ  $C_t$  (ณ ตำแหน่งที่เกิดความเครียดตำแหน่งสุดท้ายแบบเชิงเส้น) ซึ่งมีค่าเป็น 30, 6,000 และ 60,000 ตามลำดับ

3) ค่าของตัวแปรในของรูปแบบจำลองเบอร์เกอร์แต่ละตัวแปรสามารถแสดงได้ดังนี้

$$E_M = \frac{\sigma}{\epsilon_{Ce}} = \frac{11.98}{0.41} = 29.58 \text{ MPa}$$

$$E_K = \frac{\sigma}{\epsilon_{Cve}} = \frac{11.98}{0.51} = 23.28 \text{ MPa}$$

$$\eta_K = \frac{\sigma(t_{Cve})}{\epsilon_{Cve}} = \frac{11.98(6000)}{0.51} = 139708.45 \text{ MPa}$$

$$\eta_M = \frac{\sigma(t_{Ct})}{\epsilon_{Ct}} = \frac{11.98(60000)}{0.59} = 1207053.89 \text{ MPa}$$

การวิเคราะห์พฤติกรรมการคืบของแบบจำลองเบอร์เกอร์ 6 องค์ประกอบในช่วงแรกของเส้นโค้งการคืบจะเกิดการตอบสนองที่รวดเร็วต่อความยืดหยุ่นของวัสดุ ( $E_0$ ) ค่ามอดุลัสเริ่มต้น ( $E_0$ ) ที่ระดับของภาระต่ำสุดที่ 20% ของภาระสูงสุดจะมีค่าสูงเท่ากับ 31.19 MPa และมีค่าลดต่ำลงเมื่อระดับของภาระเพิ่มขึ้นที่ 40% มีค่าเท่ากับ 29.58 MPa แสดงดังตารางที่ 4.4 ส่วนการโค้งตัวของชิ้นงานที่ขึ้นกับเวลาซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันของสปริง 2 ชั้น ( $E_1, E_2$ ) และแดชพ็อต 2 ชั้น ( $\eta_1, \eta_2$ ) เนื่องด้วยการเพิ่มขึ้นของส่วนประกอบในตำแหน่งนี้ส่งผลให้แบบจำลองมีความละเอียดเพิ่มมากขึ้นทำให้การทำนายเส้นโค้งของแบบจำลอง และผลการทดลองมีความแม่นยำเพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน และในช่วงสุดท้ายเป็นการเสีรูปจากความหนืดของชิ้นส่วนแดชพ็อต ( $\eta_0$ ) จากแบบจำลองที่ระดับภาระ 20% มีค่าเท่ากับ  $1.71 \times 10^6$  MPa\*min และมีค่าลดต่ำลงเมื่อเพิ่มขึ้นของภาระเป็น 40% มีค่าเท่ากับ  $1.59 \times 10^6$  MPa\*min สามารถสรุปได้ว่ายิ่งภาระเพิ่มขึ้นยิ่งส่งผลให้เกิดความเสียหายเพิ่มมากขึ้นด้วย

แบบจำลองเบอร์เกอร์แบบ 6 องค์ประกอบสามารถคำนวณได้ตามขั้นตอนดังนี้

1) เส้นโค้งคืบระยะสั้นถูกแบ่งออกเป็นสามขั้นตอน ได้แก่ ค่าความเครียดของการคืบอย่างทันที ( $C_e$ ) ค่าความเครียดของการคืบหยุ่นหนืด ( $C_{ve}$ ) และค่าความเครียดของการคืบรวม ( $C_t$ ) สำหรับตัวอย่างเส้นโค้งการคืบของวัสดุผสมจากพอลิโพรพิลีนและผงไม้อย่างพาราที่ภาระ 40% ซึ่งมีค่า  $C_e$  เท่ากับ 0.41%,  $C_{ve}$  เท่ากับ 1.11% และ  $C_t$  เท่ากับ 1.52%

2) ค่า  $C_{ve}$  จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ช่วง

3) ช่วงเวลาของ  $C_e$  (ณ ตำแหน่งที่เกิดความเครียดอย่างทันทีแบบเชิงเส้น),  $C_{ve1}$  (ณ ตำแหน่งที่เกิดความเครียดที่เพิ่มสูงขึ้นในช่วงวิสโคอีลาสติกแบบไม่เป็นเชิงเส้น),  $C_{ve2}$  (ณ ตำแหน่งที่เกิดความเครียดเริ่มคงที่ในช่วงวิสโคอีลาสติกแบบไม่เป็นเชิงเส้น) และ  $C_t$  (ณ ตำแหน่งที่เกิด

ความเครียดตำแหน่งสุดท้ายเป็นแบบเชิงเส้น) ซึ่งมีค่าเป็น 30, 3,000, 12,000 และ 60,000 ตามลำดับ

4) ค่าของตัวแปรในของรูปแบบจำลองเบอร์เกอร์แต่ละตัวแปรสามารถแสดงได้ ดังนี้

$$E_0 = \frac{\sigma}{\epsilon_{Ce}} = \frac{11.98}{0.41} = 29.58 \text{ MPa}$$

$$E_1 = \frac{\sigma}{\epsilon_{Cve1}} = \frac{11.98}{0.39} = 30.66 \text{ MPa}$$

$$E_2 = \frac{\sigma}{\epsilon_{Cve2}} = \frac{11.98}{0.27} = 44.74 \text{ MPa}$$

$$\eta_1 = \frac{\sigma(t_{Cve1})}{\epsilon_{Cve1}} = \frac{11.98(3000)}{0.39} = 91976.97 \text{ MPa}$$

$$\eta_2 = \frac{\sigma(t_{Cve2})}{\epsilon_{Cve2}} = \frac{11.98(12000)}{0.27} = 536918.77 \text{ MPa}$$

$$\eta_0 = \frac{\sigma(t_{Ct})}{\epsilon_{Ct}} = \frac{11.98(60000)}{0.45} = 1592026.58 \text{ MPa}$$

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการทำนายเส้นโค้งการคืบด้วยแบบจำลองเบอร์เกอร์แบบ 6 องค์ประกอบ ให้ผลการทำนายที่เหมาะสมกับเส้นโค้งการคืบจากการทดลองมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองสมการยกกำลังเช่นเดียวกับการทดลองของ M. A. Mosiewicki et al. [54] และ C. Homkhiew [47] รวมทั้งผลการทำนายยังมีความเหมาะสมกับเส้นโค้งการคืบมากกว่าแบบจำลองเบอร์เกอร์แบบ 4 องค์ประกอบ ตั้งแต่จุดเริ่มต้นของส่วนโค้งการคืบจนกระทั่งที่เวลา 1,000 ชั่วโมง เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นส่วนทางกลในแบบจำลองของเบอร์เกอร์เป็นการเพิ่มตัวแปรที่ช่วยในการทำนายพฤติกรรมการคืบเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เส้นโค้งของพฤติกรรมการคืบมีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองซึ่งค่าที่ได้ยังสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผล และอธิบายถึงพื้นฐานเบื้องต้นเกี่ยวกับพฤติกรรมของวัสดุผสมไม้พลาสติกได้อย่างชัดเจน

ตารางที่ 4.3 ค่าตัวแปรของแบบจำลองเบอร์เกอร์ 4 องค์ประกอบและแบบจำลองสมการยกกำลัง

Load (%)	Four element burger model				Power law model	
	$E_M$ (MPa)	$E_K$ (MPa)	$\eta_K$ (Pa*min)	$\eta_M$ (Pa*min)	$r_0$	$n$
20	31.19	27.26	$1.64 \times 10^{11}$	$1.31 \times 10^{12}$	0.132	0.137
30	31.04	25.03	$1.50 \times 10^{11}$	$1.24 \times 10^{12}$	0.155	0.149
40	29.58	23.28	$1.39 \times 10^{11}$	$1.21 \times 10^{12}$	0.249	0.154

ตารางที่ 4.4 ค่าตัวแปรของแบบจำลองเบอร์เกอร์ 6 องค์ประกอบ

Load (%)	Six element burger model					
	$E_0$ (MPa)	$E_1$ (MPa)	$E_2$ (MPa)	$\eta_1$ (Pa*min)	$\eta_2$ (Pa*min)	$\eta_0$ (Pa*min)
20	31.19	37.67	47.54	$1.13 \times 10^{11}$	$5.70 \times 10^{11}$	$1.71 \times 10^{12}$
30	31.04	34.33	45.21	$1.03 \times 10^{11}$	$5.42 \times 10^{11}$	$1.62 \times 10^{12}$
40	29.58	30.66	44.74	$9.19 \times 10^{10}$	$5.37 \times 10^{11}$	$1.59 \times 10^{12}$

เพื่อความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองสามารถพิจารณาได้จากค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (mean absolute percent error, MAPE) ทั้งนี้ใช้ในการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นระหว่างแบบจำลองที่สร้างขึ้น และค่าจริงจากการทดลอง ถ้าหากค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนที่ได้น้อย แสดงว่าการพยากรณ์ยังมีความแม่นยำซึ่งคำนวณได้จากสมการ (2.17) [59]

จากตารางที่ 4.5 พบว่าเส้นโค้งการคืบที่ได้จากแบบจำลองเบอร์เกอร์ 6 องค์ประกอบ ทั้ง 3 ระดับของภาระ มีค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนที่น้อยกว่าแบบจำลองเบอร์เกอร์ 4 องค์ประกอบ และแบบจำลองสมการยกกำลัง และพบว่าเมื่อระดับภาระเพิ่มขึ้นยังส่งผลให้การทำนายเส้นโค้งการคืบด้วยแบบจำลองเบอร์เกอร์ 4 องค์ประกอบ เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นตามลำดับ สังเกตได้จากที่เวลา 6,000 นาที (100 ชั่วโมง) ที่ระดับภาระ 20%, 30% และ 40% ดังตารางที่ 4.5, 4.5 และ 4.6 พบว่ามีค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนเป็น 12.95%, 13.65% และ 14.10% ตามลำดับ และพบความคลาดเคลื่อนที่เห็นได้ชัดเจนของแบบจำลองสมการยกกำลังที่เวลา 60,000 นาที (1,000 ชั่วโมง) มีค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนเป็น 13.83%, 9.52% และ 10.53% ตามลำดับ แต่ค่าความคลาดเคลื่อนที่เวลา 18,000 นาที (300 ชั่วโมง) จะให้ค่าที่ใกล้เคียงการทดลองมากที่สุด เนื่องจากเป็นบริเวณที่เกิดการพลิกกลับเส้นโค้งการคืบที่ได้จากการทำนายสามารถสังเกตได้จากภาพที่ 4.5 จากการยืนยันผลของแบบจำลองทั้งสามแบบจำลองพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจะพบหลังจากการเกิดความเครียดของการคืบอย่างทันทีซึ่งเป็นส่วนโค้งการคืบที่มีความชันสูง แต่เมื่อมีการเพิ่มขึ้นส่วนทางกลเข้าไปในส่วนโค้งของการคืบจะส่งผลให้เส้นโค้งที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองเบอร์

เกอร์ 6 องค์กรประกอบมีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองมากยิ่งขึ้นเช่นเดียวกันหากต้องการความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองในแต่ละตำแหน่งไม่เกิน 10% ซึ่งสามารถลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นของแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดสอบได้โดยการเพิ่มขึ้นส่วนทางกลให้แก่แบบจำลองเพื่อเพิ่มตัวแปรในการวิเคราะห์ส่งผลต่อค่าความแม่นยำ และความละเอียดของแบบจำลองในช่วงวิสโคอีลาสติก ยกตัวอย่างเช่นการเพิ่มแบบจำลองของเคลวินหนึ่งชุดซึ่งประกอบด้วยการต่อขนานกันของชิ้นส่วนสปริง และตัวหน่วงเข้าสู่แบบจำลองของเบอร์เกอร์แบบ 6 องค์กรประกอบ ซึ่งจะทำให้ได้เป็นแบบจำลองที่มีความละเอียดเพิ่มขึ้นหรือเรียกได้ว่าเป็นแบบจำลองของเบอร์เกอร์แบบ 8 องค์กรประกอบ

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ระดับภาระ 20%

Time (min)	Exp (% strain)	Model (% strain)			MAPE (%)		
		Burger 6	Burger 4	Power	Burger 6	Burger 4	Power
120	0.209	0.199	0.197	0.253	4.32	5.76	21.08
300	0.229	0.211	0.204	0.287	7.69	10.83	25.28
1,200	0.308	0.261	0.237	0.347	15.45	23.00	12.44
6,000	0.412	0.400	0.358	0.432	2.84	12.95	4.89
18,000	0.522	0.511	0.483	0.502	2.03	7.41	3.84
30,000	0.594	0.572	0.548	0.538	3.78	7.78	9.39
60,000	0.687	0.686	0.687	0.592	0.12	0.01	13.83

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ระดับภาระ 30%

Time (min)	Exp (% strain)	Model (% strain)			MAPE (%)		
		Burger 6	Burger 4	Power	Burger 6	Burger 4	Power
120	0.312	0.302	0.297	0.346	3.07	4.65	10.95
300	0.355	0.204	0.211	0.287	9.52	12.84	13.74
1,200	0.444	0.237	0.261	0.347	9.60	18.18	14.60
6,000	0.648	0.358	0.400	0.432	3.24	13.65	2.74
18,000	0.832	0.483	0.511	0.502	3.30	8.58	3.80
30,000	0.940	0.548	0.572	0.538	4.29	8.21	7.26
60,000	0.108	0.687	0.686	0.592	0.12	0.01	9.52

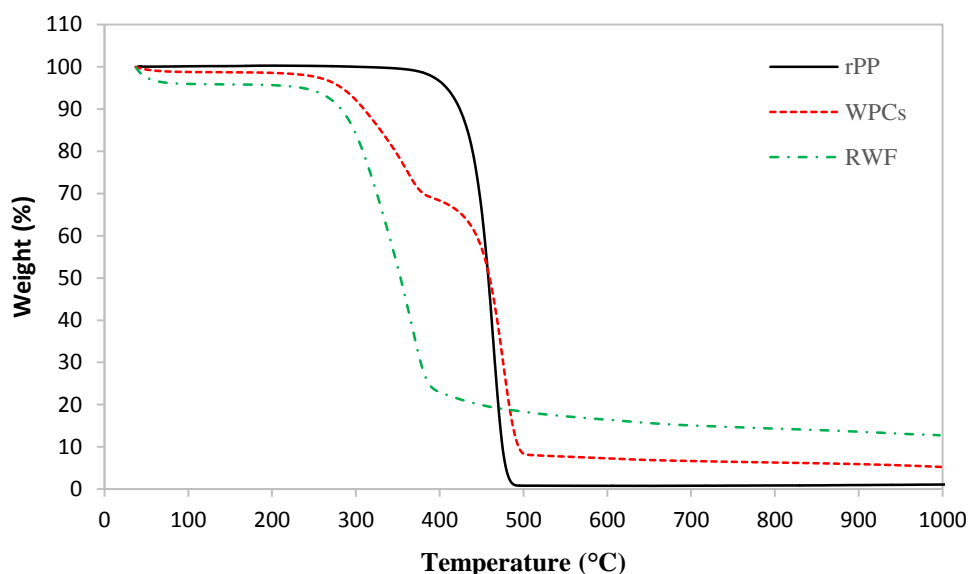


ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ระดับภาระ 40%

Time (min)	Exp (% strain)	Model (% strain)			MAPE (%)		
		Burger 6	Burger 4	Power	Burger 6	Burger 4	Power
120	0.467	0.424	0.416	0.521	9.16	10.77	11.61
300	0.521	0.451	0.433	0.599	13.34	16.79	15.22
1,200	0.662	0.568	0.510	0.742	14.08	22.87	12.22
6,000	0.919	0.893	0.789	0.950	2.84	14.10	3.42
18,000	1.163	1.138	1.072	1.126	2.08	7.74	3.12
30,000	1.299	1.267	1.213	1.218	2.44	6.56	6.21
60,000	1.515	1.513	1.514	1.355	0.11	0.01	10.53

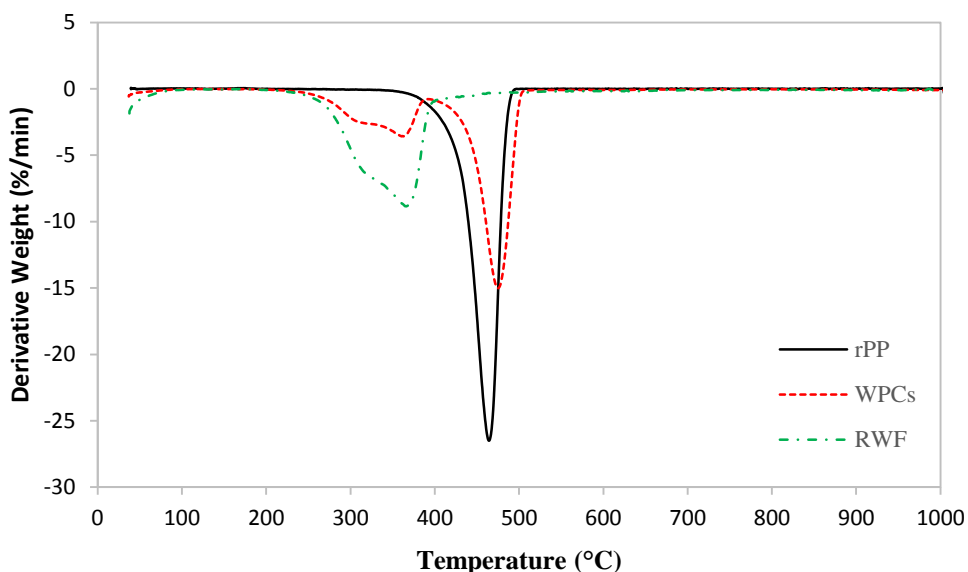
### 4.3 การวิเคราะห์สมบัติทางเทอร์โมแกราวิเมตริก

เนื่องจากการปรับปรุงสมบัติการคืบของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลด้วยการเติมผงไม้ยางพาราเข้าสู่พลาสติกเมทริกซ์ส่งผลให้ค่าการคืบลดลง จึงได้ทำการทดสอบสมบัติทางความร้อนระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล และวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนกับผงไม้ยางพาราเพื่อเปรียบเทียบช่วงอุณหภูมิการสลายตัวซึ่งคาดว่าผงไม้ยางพาราที่เติมเข้าสู่พลาสติกเมทริกซ์อาจมีส่วนช่วยในการสลายตัวจากการเผาไหม้ทางความร้อนของวัสดุผสมไม้พลาสติกให้ช้าลง ซึ่งการวิเคราะห์สมบัติทางเทอร์โมแกราวิเมตริก (thermogravimetric analysis; TGA) เป็นการวัดการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปจากการให้ความร้อน ซึ่งพิสูจน์ให้เห็นได้ว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสำหรับการประเมินเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ และการวิเคราะห์สมบัติทางเดอริเวทีฟเทอร์โมแกราวิเมตริก (derivative thermogravimetric; DTG) เป็นการวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก [66] จากภาพที่ 4.6 แสดงพฤติกรรมของการสลายตัวทางความร้อนของวัสดุผสมจากพอลิโพรพิลีนกับผงไม้ยางพารา (เส้นประ) พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (เส้นทึบ) และผงไม้ยางพารา (RWF) ซึ่งสามารถสังเกตเห็นช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล ในช่วงอุณหภูมิ 390-510°C โดยมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักสูงสุดที่ 463°C และเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุผสมที่มีเส้นใยธรรมชาติเป็นตัวเสริมแรงจะพบการสูญเสียน้ำหนักสองช่วงในการทดสอบทางความร้อน ช่วงแรกเกี่ยวข้องกับการย่อยสลายเส้นใยธรรมชาติที่เกี่ยวข้องกับสองกระบวนการที่แตกต่างกัน คือ ที่ช่วงอุณหภูมิต่ำ และที่ช่วงอุณหภูมิสูง ช่วงที่สองเป็นการสลายตัวของเมทริกซ์พอลิเมอร์ และสารอนินทรีย์ [67]



ภาพที่ 4.6 เส้นโค้ง TGA ของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล และวัสดุผสมจากพอลิโพรพิลีนกับผงไม้ยางพารากับพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล

จากภาพที่ 4.6 แสดงถึงอุณหภูมิการสลายตัวของวัสดุผสมจากพอลิโพรพิลีนกับผงไม้ยางพารา (WPCs) ในช่วงแรกของการสูญเสียน้ำหนักเป็นการย่อยสลายตัวของผงไม้ในช่วงอุณหภูมิ 300-390°C และมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักสูงสุด (maximum weight loss rates) ที่อุณหภูมิ 363°C แสดงดังภาพที่ 4.7 ซึ่งเกี่ยวข้องกับขั้นตอนการย่อยสลายที่อุณหภูมิต่ำของเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส และขั้นตอนของการย่อยสลายที่อุณหภูมิสูงของลิกนิน [66, 68] โดยสามารถเปรียบเทียบผลการสูญเสียน้ำหนักโดยการย่อยสลายตัวของผงไม้ยางพารา (RWF) ในช่วงอุณหภูมิ 300-420°C และมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักสูงสุดที่อุณหภูมิ 367°C ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิเดียวกับการย่อยสลายตัวของผงไม้ในวัสดุผสมไม้พลาสติก ส่วนในช่วงที่สองเป็นการย่อยสลายตัวของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล และผงไม้ยางพาราบางส่วนในช่วงอุณหภูมิ 390-520°C และมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักสูงสุดที่ 475°C ซึ่งสรุปได้ว่าการย่อยสลายตัวของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและผงไม้ยางพารามีค่าที่สูงกว่าการย่อยสลายของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล เนื่องจากการเติมผงไม้เข้าไปในพลาสติกเมทริกซ์อาจทำให้ผงไม้ยางพาราบางส่วนอาจย่อยสลายร่วมกับพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลในช่วงที่สอง ซึ่งมีการซ้อนทับกันระหว่างการสลายมวลของผงไม้ และพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล [69]



ภาพที่ 4.7 เส้นโค้ง DTG ของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล และวัสดุผสมจากพอลิโพรพิลีนกับผงไม้ยางพารากับพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล

#### 4.4 การวิเคราะห์แบบจำลองสำหรับพฤติกรรมการคืบระยะสั้นของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพารา

เนื่องด้วยวัสดุผสมไม้พลาสติกสามารถเกิดการคืบได้อันเนื่องจากพฤติกรรมวิสโคอีลาสติกเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งจะส่งผลให้วัสดุชนิดนี้เกิดความอ่อนแออง ทำให้มีลักษณะที่อ่อนนิ่มลงเมื่ออุณหภูมิสูงเปรียบเสมือนการเร่งให้เกิดความเสียหายให้แก่ชิ้นงานทดสอบ รวมทั้งการรับภาระกระทำภายใต้แรงที่คงที่ซึ่งส่งผลให้เกิดพฤติกรรมการคืบที่รวดเร็วยิ่งขึ้นจึงได้ทดสอบพฤติกรรมการคืบที่เกิดขึ้นต่ออุณหภูมิ และความเค้นที่เพิ่มขึ้น

พฤติกรรมการคืบระยะสั้นที่เกิดขึ้นของวัสดุผสมจากพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพาราที่ได้รับภาระกระทำคงที่เป็นเวลา 100 นาที (6,000 วินาที) ค่าความเครียดของการคืบอย่างทันที (instantaneous creep strain;  $C_e$ ) ความเครียดของการคืบหนืดหลัง 6,000 วินาที (viscoelastic creep strain;  $C_{ve6000}$ ) และความเครียดของการคืบรวมหลัง 6,000 วินาที (total creep strain;  $C_{t6000}$ ) แสดงดังตารางที่ 4.8 จะเห็นว่าการคืบจากกระบวนการทดสอบจะมีแนวโน้มของความเครียดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ สังเกตได้จากค่าความเครียดเริ่มต้นขณะที่เริ่มปล่อยภาระ เช่น กรณีที่อุณหภูมิ 28°C และภาระสูงสุด (40%) ค่าความเครียดของการคืบอย่างทันที ( $C_e$ ) ที่ได้เท่ากับ 0.28 แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 68°C ค่าความเครียดของการคืบอย่างทันที ( $C_e$ ) ที่ได้เท่ากับ

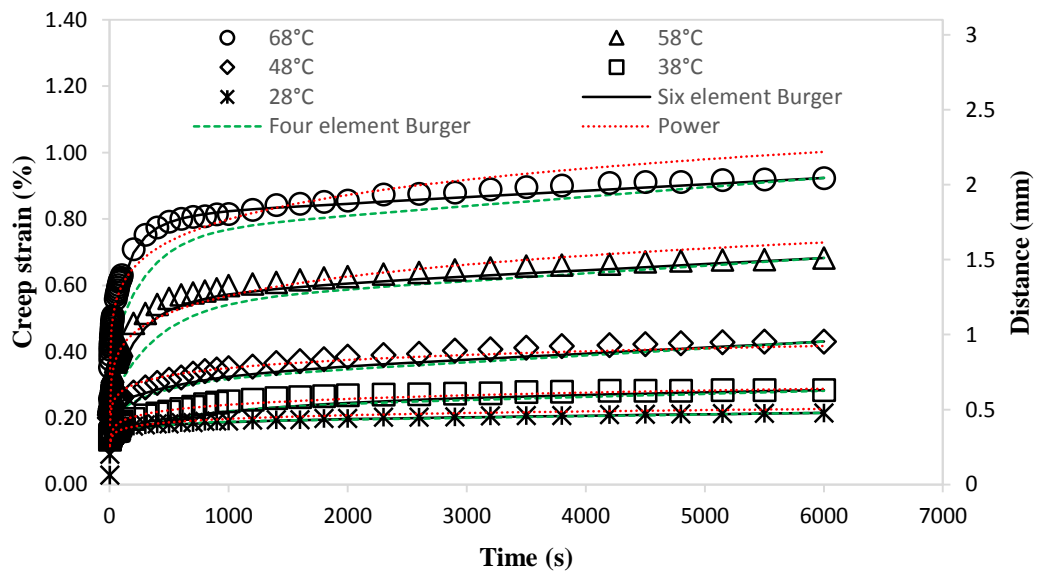
1.31 ซึ่งมีค่าที่เพิ่มขึ้นสูงมากขึ้นเนื่องจากการเสียรูปของชิ้นงานทดสอบ พฤติกรรมนี้เกิดขึ้นจากชิ้นงานทดสอบได้รับอุณหภูมิที่เพิ่มมากขึ้นเป็นการเร่งให้ชิ้นงานเกิดก่อนเสียรูปขึ้นอย่างรวดเร็วส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง หลังจากนั้นเส้นโค้งของพฤติกรรมการคืบของทั้ง 5 อุณหภูมิที่แตกต่างกันจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ อย่างคงที่จนสิ้นสุดการทดลองที่ 100 นาที (6,000 วินาที) พบว่าค่าความเครียดของการคืบรวมหลัง 6,000 วินาที ( $C_{t6000}$ ) มีค่าเท่ากับ 0.4 และ 2.31 ตามลำดับ และในทางเดียวกันค่าความเครียดจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มภาระ แสดงให้เห็นว่าอัตราการคืบส่งผลโดยตรงกับอุณหภูมิ เวลา และความเค้น

ตารางที่ 4.8 ค่าความเครียดของการคืบของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

Temp (°C)	Load (%)								
	20			30			40		
	Creep strain (%)								
	$C_e$	$C_{ve6000}$	$C_{t6000}$	$C_e$	$C_{ve6000}$	$C_{t6000}$	$C_e$	$C_{ve6000}$	$C_{t6000}$
28	0.13	0.09	0.22	0.15	0.18	0.33	0.28	0.12	0.40
38	0.14	0.15	0.29	0.32	0.34	0.66	0.47	0.35	0.82
48	0.20	0.23	0.43	0.33	0.50	0.83	0.57	0.78	1.35
58	0.25	0.43	0.68	0.50	0.57	1.07	0.72	0.94	1.66
68	0.39	0.53	0.92	0.56	0.84	1.40	1.31	1.00	2.31

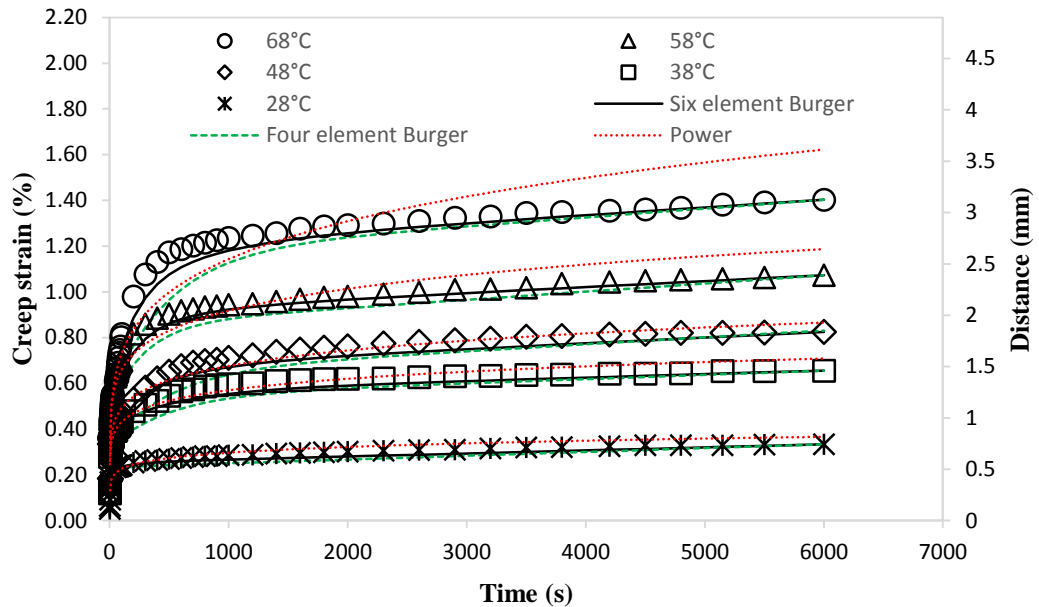
เพื่ออธิบายและทำนายพฤติกรรมการคืบระยะสั้นหลาย ๆ แบบจำลองได้มีการพัฒนา และประยุกต์ใช้ส่วนประกอบที่เป็นความสัมพันธ์ของวัสดุพอลิเมอร์ แบบจำลองสมการยกกำลังเป็นหนึ่งในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกนำมาใช้วิเคราะห์ความหนืดของพอลิเมอร์ค่าสัมประสิทธิ์ และเลขยกกำลังได้รับผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญโดยระดับความเครียด [55] อีกหนึ่งแบบจำลองนี้เป็นการรวมกันของแบบจำลองแมกซ์เวลล์ และแบบจำลองเคลวินได้เป็น 4 องค์ประกอบของแบบจำลองเบอร์เกอร์ [47] ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการเผยแพร่และให้การคาดการณ์ที่น่าพอใจ ซึ่งประกอบด้วยสมบัติยืดหยุ่น และสมบัติวิสโคอีลาสติกแสดงดังภาพที่ 2.14 ส่วนแบบจำลองพฤติกรรมหยุ่นหนืดด้วย 6 องค์ประกอบของแบบจำลองเบอร์เกอร์แสดงดังภาพที่ 2.16 ได้มาจากการพัฒนาด้วยการเพิ่มขึ้นส่วนทางกลเข้าในส่วนโค้งของการคืบ เป็นการต่อพ่วงกันของแบบจำลองเคลวิน สองชุดแทรกอยู่ระหว่างการต่ออนุกรมขึ้นส่วนสปริง และขึ้นส่วนตัวหน่วงของแบบจำลองแมกซ์เวลล์ทำให้เส้นโค้งบริเวณหลังช่วงความเครียดของการคืบอย่างทันทีเกิดความละเอียดของข้อมูลเพิ่มมากยิ่งขึ้นจึงสามารถทำนายได้แม่นยำขึ้น ซึ่งคาดว่าแบบจำลองนี้อาจจะให้ผลการคาดการณ์ที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้นกับอุณหภูมิที่สูงขึ้นตามลำดับ

เส้นโค้งการคืบระยะสั้นของภาระ 20% ที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันแสดงดังภาพที่ 4.8 พบว่าอุณหภูมิที่ให้แก่ชิ้นงานทดสอบมีอิทธิพลต่อการโก่งของชิ้นงานทดสอบ ถ้าหากอุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดการโก่งมากขึ้นตามไปด้วยเนื่องจากชิ้นงานทดสอบเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากความร้อนส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการอ่อนตัวมากขึ้นเมื่อได้รับภาระกระทำ ซึ่งค่าการโก่งของชิ้นงานทดสอบวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพาราที่อุณหภูมิ 28°C, 38°C, 48°C, 58°C และ 68°C มีค่าเท่ากับ 0.48 มม. 0.63 มม. 0.96 มม. 1.52 มม. และ 2.05 มม. ตามลำดับ โดยระยะการโก่งงอที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียลซึ่งมีประสิทธิภาพในการพยากรณ์  $R^2 = 99.3\%$  แสดงดังภาพที่ 4.11



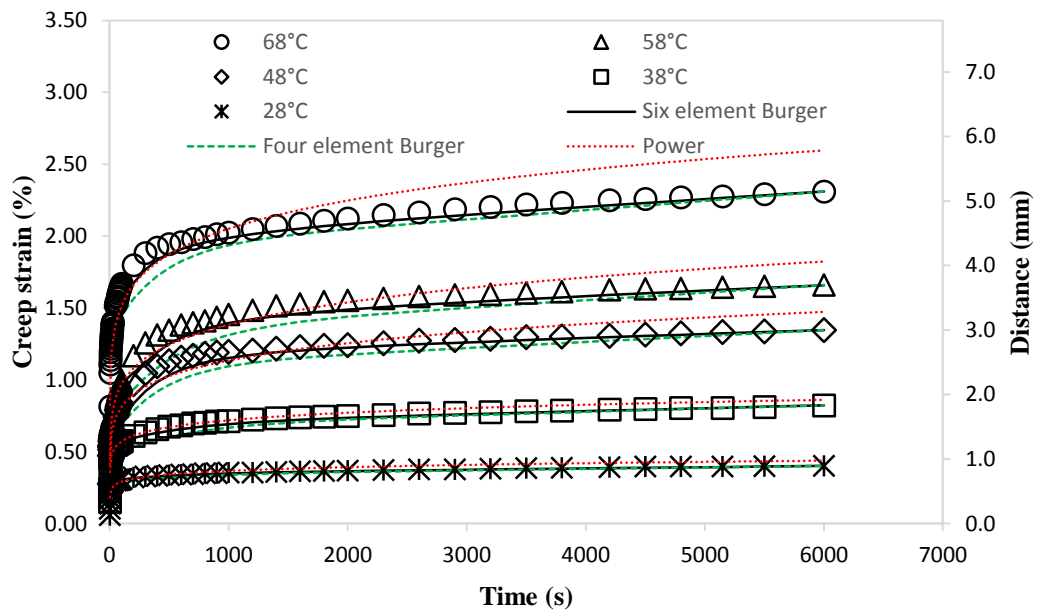
ภาพที่ 4.8 เส้นโค้งการคืบระยะสั้นของภาระ 20% ที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

เส้นโค้งการคืบระยะสั้นของภาระ 30% ที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันแสดงดังภาพที่ 4.9 พบว่าอุณหภูมิที่ให้แก่ชิ้นงานทดสอบมีอิทธิพลต่อการโก่งของชิ้นงานทดสอบ ถ้าหากอุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดการโก่งมากขึ้นตามไปด้วยเนื่องจากชิ้นงานทดสอบเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากความร้อนส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการอ่อนตัวมากขึ้นเมื่อได้รับภาระกระทำ ซึ่งค่าการโก่งของชิ้นงานทดสอบวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพาราที่อุณหภูมิ 28°C, 38°C, 48°C, 58°C และ 68°C มีค่าเท่ากับ 0.74 มม. 1.46 มม. 1.83 มม. 2.38 มม. และ 3.12 มม. ตามลำดับ โดยระยะการโก่งงอที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นเป็นแบบเส้นตรงซึ่งมีประสิทธิภาพในการพยากรณ์  $R^2 = 98.9\%$  แสดงดังภาพที่ 4.11

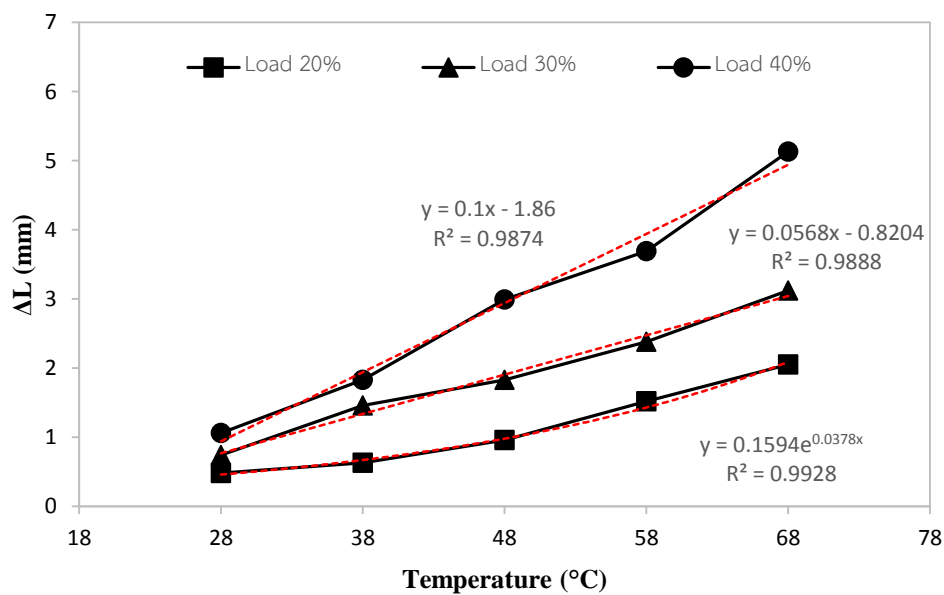


ภาพที่ 4.9 เส้นโค้งการคืบระยะสั้นของภาวะ 30% ที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

เส้นโค้งการคืบระยะสั้นของภาวะ 40% ที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันแสดงดังภาพที่ 4.10 พบว่าอุณหภูมิที่ให้แก่ชิ้นงานทดสอบมีอิทธิพลต่อการโก่งของชิ้นงานทดสอบ ถ้าหากอุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดการโก่งมากขึ้นตามไปด้วยเนื่องจากชิ้นงานทดสอบเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากความร้อนส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการอ่อนตัวมากขึ้นเมื่อได้รับภาระกระทำ ซึ่งค่าการโก่งของชิ้นงานทดสอบวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพาราที่อุณหภูมิ 28°C, 38°C, 48°C, 58°C และ 68°C มีค่าเท่ากับ 1.06 มม. 1.83 มม. 2.99 มม. 3.69 มม. และ 5.13 มม. ตามลำดับ โดยระยะการโก่งงอที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นเป็นแบบเส้นตรงซึ่งมีประสิทธิภาพในการพยากรณ์  $R^2 = 98.7\%$  แสดงดังภาพที่ 4.11 จากเส้นโค้งพฤติกรรมการคืบระยะสั้นของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพาราภายใต้ภาระกระทำที่คงที่ในระดับที่แตกต่างกันสามารถสรุปได้ว่าเมื่ออุณหภูมิและความเค้นสูงขึ้น ความแข็งแรงของวัสดุจะลดลงเกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างการจับยึดพันธะโมเลกุลที่คอยต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปลดน้อยลงส่งผลต่อพฤติกรรมการคืบที่เพิ่มสูงขึ้น



ภาพที่ 4.10 เส้นโค้งการคืบระยะสั้นของภาระ 40% ที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.11 แนวโน้มระยะการโก่งของวัสดุผสมไม้พลาสติกที่ระดับของภาระที่แตกต่างกัน

จากภาพที่ 4.8, 4.9 และ 4.10 เส้นทึบแสดงค่าที่ได้จากการจำลองข้อมูลการลองผ่านแบบจำลองของเบอร์เกอร์ 6 องค์ประกอบ ส่วนเส้นประเกิดขึ้นจากการจำลองข้อมูลผ่านแบบจำลองของเบอร์เกอร์ 4 องค์ประกอบ และจุดประเกิดขึ้นจากการจำลองข้อมูลผ่านแบบจำลองสมการยกกำลัง ซึ่งสามารถสังเกตได้ถึงถึงความเหมาะสมของการใช้แบบจำลองของเบอร์เกอร์ 6 องค์ประกอบ ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าแบบจำลองของเบอร์เกอร์ 6 องค์ประกอบ ซึ่งให้ความเหมาะสมกับ

ข้อมูลการทดลองในทุกช่วงอุณหภูมิของแต่ละระดับของภาระ ซึ่งสรุปได้ถึงแบบจำลองเบอร์เกอร์ที่เหมาะสมสำหรับเส้นโค้งการคืบของวัสดุผสม

ตารางที่ 4.9 ค่าตัวแปรของแบบจำลองที่ภาระ 20% ในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

Temp (°C)	Four element burger model				Power law model	
	$E_M$ (MPa)	$E_K$ (MPa)	$\eta_K$ (Pa*min)	$\eta_M$ (Pa*min)	$r_0$	$n$
28	42.94	129.65	$3.89 \times 10^{10}$	$1.19 \times 10^{12}$	0.122	0.074
38	42.66	68.38	$4.10 \times 10^{10}$	$6.66 \times 10^{11}$	0.119	0.101
48	29.36	58.73	$2.35 \times 10^{10}$	$2.89 \times 10^{11}$	0.179	0.097
58	24.20	20.27	$8.11 \times 10^9$	$2.58 \times 10^{11}$	0.218	0.139
68	15.30	16.57	$4.97 \times 10^9$	$2.10 \times 10^{11}$	0.333	0.127

Temp (°C)	Six element burger model					
	$E_0$ (MPa)	$E_1$ (MPa)	$E_2$ (MPa)	$\eta_1$ (Pa*min)	$\eta_2$ (Pa*min)	$\eta_0$ (Pa*min)
28	42.94	224.34	246.50	$1.46 \times 10^{10}$	$1.97 \times 10^{11}$	$1.41 \times 10^{12}$
38	42.66	210.18	75.35	$1.79 \times 10^{10}$	$9.04 \times 10^{10}$	$9.82 \times 10^{11}$
48	29.36	181.52	70.06	$3.45 \times 10^9$	$4.20 \times 10^{10}$	$3.33 \times 10^{11}$
58	24.20	25.12	70.06	$5.02 \times 10^9$	$4.20 \times 10^{10}$	$3.24 \times 10^{11}$
68	15.30	24.96	34.13	$2.49 \times 10^9$	$8.79 \times 10^9$	$3.07 \times 10^{11}$

ตารางที่ 4.10 ค่าตัวแปรของแบบจำลองที่ภาระ 30% ในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

Temp (°C)	Four element burger model				Power law model	
	$E_M$ (MPa)	$E_K$ (MPa)	$\eta_K$ (Pa*min)	$\eta_M$ (Pa*min)	$r_0$	$n$
28	58.16	113.02	$5.65 \times 10^9$	$5.43 \times 10^{11}$	0.1315	0.1178
38	27.99	39.93	$1.99 \times 10^{10}$	$4.92 \times 10^{11}$	0.247	0.121
48	26.86	28.39	$1.42 \times 10^{10}$	$2.99 \times 10^{11}$	0.261	0.138
58	17.88	25.27	$7.58 \times 10^{10}$	$2.51 \times 10^{11}$	0.339	0.144
68	16.19	14.54	$7.27 \times 10^9$	$2.35 \times 10^{11}$	0.296	0.196

Temp (°C)	Six element burger model					
	$E_0$ (MPa)	$E_1$ (MPa)	$E_2$ (MPa)	$\eta_1$ (Pa*min)	$\eta_2$ (Pa*min)	$\eta_0$ (Pa*min)
28	58.16	124.79	332.78	$2.99 \times 10^9$	$6.66 \times 10^{10}$	$6.76 \times 10^{11}$
38	27.99	89.40	62.39	$7.59 \times 10^9$	$3.74 \times 10^{10}$	$5.99 \times 10^{11}$
48	26.86	46.08	61.75	$9.22 \times 10^9$	$3.71 \times 10^{10}$	$3.59 \times 10^{11}$
58	17.88	28.66	88.09	$5.73 \times 10^9$	$5.29 \times 10^{10}$	$3.49 \times 10^{11}$
68	16.19	21.09	40.47	$4.22 \times 10^9$	$2.83 \times 10^{10}$	$2.70 \times 10^{11}$



ตารางที่ 4.11 ค่าตัวแปรของแบบจำลองที่ภาระ 40% ในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

Temp (°C)	Four element burger model				Power law model	
	$E_M$ (MPa)	$E_K$ (MPa)	$\eta_K$ (Pa*min)	$\eta_M$ (Pa*min)	$r_0$	$n$
28	43.41	184.02	$1.10 \times 10^{11}$	$1.20 \times 10^{12}$	0.185	0.099
38	25.59	55.08	$3.30 \times 10^{10}$	$5.21 \times 10^{11}$	0.359	0.100
48	21.02	22.82	$9.13 \times 10^9$	$2.85 \times 10^{11}$	0.416	0.145
58	16.71	19.06	$9.53 \times 10^9$	$2.29 \times 10^{11}$	0.478	0.154
68	9.15	19.58	$7.83 \times 10^9$	$1.85 \times 10^{11}$	0.826	0.132

	Six element burger model					
	$E_0$ (MPa)	$E_1$ (MPa)	$E_2$ (MPa)	$\eta_1$ (Pa*min)	$\eta_2$ (Pa*min)	$\eta_0$ (Pa*min)
28	43.41	469.80	249.58	$2.35 \times 10^{10}$	$1.49 \times 10^{11}$	$1.40 \times 10^{12}$
38	25.59	142.62	81.49	$7.84 \times 10^9$	$4.89 \times 10^{10}$	$5.77 \times 10^{11}$
48	21.02	25.19	88.74	$7.56 \times 10^9$	$7.09 \times 10^{10}$	$4.31 \times 10^{11}$
58	16.71	22.19	67.68	$6.66 \times 10^9$	$6.09 \times 10^{10}$	$3.19 \times 10^{11}$
68	9.15	24.49	60.97	$4.89 \times 10^9$	$4.88 \times 10^{10}$	$2.28 \times 10^{11}$

การวิเคราะห์พฤติกรรมการคืบของแบบจำลองเบอร์เกอร์ 4 องค์ประกอบ ในช่วงแรกของเส้นโค้งการคืบจะเกิดการตอบสนองที่รวดเร็วต่อความยืดหยุ่นของวัสดุ ( $E_M$ ) จะมีค่ามอดูลัสเริ่มต้นของอุณหภูมิที่ต่ำจะมีค่าสูง และลดต่ำลงเมื่อระดับของอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เช่น กรณีที่ระดับภาระต่ำสุด 20% ที่อุณหภูมิ 28°C มีค่ามอดูลัสเริ่มต้น ( $E_M$ ) เท่ากับ 42.94 MPa เมื่อระดับของอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเป็น 38°C, 48°C, 58°C และ 68°C มีค่ามอดูลัสเริ่มต้นเท่ากับ 42.66 MPa, 29.36 MPa, 24.20 MPa และ 15.30 MPa ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.9 ส่วนการโค้งตัวของชิ้นงานที่ขึ้นกับเวลาซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันของสปริง 1 ชิ้น ( $E_K$ ) และแดชพ็อต 1 ชิ้น ( $\eta_K$ ) ซึ่งเส้นโค้งการทำนายในตำแหน่งนี้จะมีค่าที่หยาบ และมีความเหมาะสมกับข้อมูลการทดลองที่น้อยกว่าแบบจำลองของเบอร์เกอร์แบบ 6 องค์ประกอบ และช่วงสุดท้ายเป็นการเสียรูปจากความหนืดของแดชพ็อต ( $\eta_M$ ) จากแบบจำลองของระดับภาระต่ำสุด 20% ที่อุณหภูมิ 28°C มีค่าเท่ากับ  $1.19 \times 10^6$  MPa\*min และมีค่าลดต่ำลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 68°C มีค่าเท่ากับ  $2.10 \times 10^5$  MPa\*min แสดงดังตารางที่ 4.9 ค่าความหนืดจะลดต่ำลงเมื่อมีการเร่งอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกับการจำลองด้วยแบบจำลองของเบอร์เกอร์แบบ 6 องค์ประกอบ ส่วนแบบจำลองสมการยกกำลังค่าตัวแปร  $r_0$  สำหรับความเครียดอย่างทันทีทันใด และเกี่ยวข้องกับการตอบสนองต่อความหนืดเริ่มต้น ขณะที่ตัวแปร  $n$  ที่เกี่ยวข้องกับการตอบสนองต่อค่าความหนืดจากการคืบที่ขึ้นกับเวลา [54] ซึ่งตัวแปรทั้งสองเพิ่มขึ้นด้วยระดับความเค้นจากการปรับเปลี่ยนภาระกระทำ และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่ให้กับชิ้นงานทดสอบ

แบบจำลองเบอร์เกอร์แบบ 4 องค์ประกอบสามารถคำนวณได้ตามขั้นตอนดังนี้

1) เส้นโค้งคืบระยะสั้นถูกแบ่งออกเป็นสามขั้นตอน ได้แก่ ค่าความเครียดของการคืบอย่างทันที ( $C_e$ ) ค่าความเครียดของการคืบหยุ่นหนืด ( $C_{ve}$ ) และค่าความเครียดของการคืบรวม ( $C_t$ ) สำหรับตัวอย่างเส้นโค้งการคืบของภาระ 40% ที่อุณหภูมิ 28°C ซึ่งมีค่า  $C_e$  เท่ากับ 0.28%,  $C_{ve}$  เท่ากับ 0.12% และ  $C_t$  เท่ากับ 0.40%

2) ช่วงเวลาของ  $C_e$  (ณ ตำแหน่งที่เกิดความเครียดอย่างทันทีแบบเชิงเส้น),  $C_{ve}$  (ณ ตำแหน่งที่เกิดความเครียดในช่วงวิสโคอีลาสติกแบบไม่เป็นเชิงเส้น) และ  $C_t$  (ณ ตำแหน่งที่เกิดความเครียดตำแหน่งสุดท้ายแบบเชิงเส้น) ซึ่งมีค่าเป็นเป็น 9, 600 และ 6,000 ตามลำดับ

3) ค่าของตัวแปรในของรูปแบบจำลองเบอร์เกอร์แต่ละตัวแปรสามารถแสดงได้ดังนี้

$$E_M = \frac{\sigma}{\epsilon_{C_e}} = \frac{11.98}{0.28} = 43.41 \text{ MPa}$$

$$E_K = \frac{\sigma}{\epsilon_{C_{ve}}} = \frac{11.98}{0.06} = 184.02 \text{ MPa}$$

$$\eta_K = \frac{\sigma(t_{C_{ve}})}{\epsilon_{C_{ve}}} = \frac{11.98(600)}{0.06} = 110414.75 \text{ MPa}$$

$$\eta_M = \frac{\sigma(t_{C_t})}{\epsilon_{C_t}} = \frac{11.98(6000)}{0.06} = 1204020.10 \text{ MPa}$$

การวิเคราะห์พฤติกรรมกรรมการคืบของแบบจำลองเบอร์เกอร์ 6 องค์ประกอบ ในช่วงแรกของเส้นโค้งการคืบที่ระดับภาระต่ำสุดที่ 20% ของภาระสูงสุดจะเกิดการตอบสนองที่รวดเร็วต่อความยืดหยุ่นของวัสดุ ค่ามอดุลัสเริ่มต้น ( $E_0$ ) ที่อุณหภูมิ 28°C มีค่าเท่ากับ 42.94 MPa และมีค่าลดต่ำลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ 68°C เท่ากับ 15.30 MPa แสดงดังตารางที่ 4.9 ส่วนการโค้งตัวของชิ้นงานที่ขึ้นกับเวลาซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันของสปริง 2 ชั้น ( $E_1, E_2$ ) และแดชพอต 2 ชั้น ( $\eta_1, \eta_2$ ) เนื่องด้วยการเพิ่มขึ้นของส่วนประกอบในตำแหน่งนี้ส่งผลให้แบบจำลองมีความละเอียดเพิ่มมากขึ้นทำให้การทำนายเส้นโค้งของแบบจำลอง และผลการทดลองมีความแม่นยำเพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน และในช่วงสุดท้ายเป็นการเสียรูปจากความหนืดของแดชพอต ( $\eta_0$ ) จากแบบจำลองที่อุณหภูมิ 28°C มีค่าเท่ากับ  $1.41 \times 10^6$  MPa\*min และมีค่าลดต่ำลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 68°C มีค่าเท่ากับ  $3.07 \times 10^5$  MPa\*min แสดงดังตารางที่ 4.9 สามารถสรุปได้ว่ายิ่งอุณหภูมิเพิ่มขึ้นยิ่งส่งผลให้เกิดความเสียหายเพิ่มมากขึ้นด้วย

แบบจำลองเบอร์เกอร์แบบ 6 องค์ประกอบสามารถคำนวณได้ตามขั้นตอนดังนี้

1) เส้นโค้งคืบระยะสั้นถูกแบ่งออกเป็นสามขั้นตอน ได้แก่ ค่าความเครียดของการคืบอย่างทันที ( $C_e$ ) ค่าความเครียดของการคืบหยุ่นหนืด ( $C_{ve}$ ) และค่าความเครียดของการคืบรวม ( $C_t$ ) สำหรับตัวอย่างเส้นโค้งการคืบของภาระ 40% ที่อุณหภูมิ 28°C ซึ่งมีค่า  $C_e$  เท่ากับ 0.28%,  $C_{ve}$  เท่ากับ 0.12% และ  $C_t$  เท่ากับ 0.40%

2) ค่า  $C_{ve}$  จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ช่วง

3) ช่วงเวลาของ  $C_e$  (ณ ตำแหน่งที่เกิดความเครียดอย่างทันทีแบบเชิงเส้น),  $C_{ve1}$  (ณ ตำแหน่งที่เกิดความเครียดที่เพิ่มสูงขึ้นในช่วงวิสโคอีลาสติกแบบไม่เป็นเชิงเส้น),  $C_{ve2}$  (ณ ตำแหน่งที่เกิดความเครียดเริ่มคงที่ในช่วงวิสโคอีลาสติกแบบไม่เป็นเชิงเส้น) และ  $C_t$  (ณ ตำแหน่งที่เกิดความเครียดตำแหน่งสุดท้ายเป็นแบบเชิงเส้น) มีค่าเป็น 9, 50, 800 และ 6,000 ตามลำดับ

4) ค่าของตัวแปรในของรูปแบบจำลองเบอร์เกอร์แต่ละตัวแปรสามารถแสดงได้ดังนี้

$$E_0 = \frac{\sigma}{\epsilon_{C_e}} = \frac{11.98}{0.276} = 43.41 \text{ MPa}$$

$$E_1 = \frac{\sigma}{\epsilon_{C_{ve1}}} = \frac{11.98}{0.03} = 469.80 \text{ MPa}$$

$$E_2 = \frac{\sigma}{\epsilon_{C_{ve2}}} = \frac{11.98}{0.05} = 249.58 \text{ MPa}$$

$$\eta_1 = \frac{\sigma(t_{C_{ve1}})}{\epsilon_{C_{ve1}}} = \frac{11.98(50)}{0.03} = 23490.19 \text{ MPa}$$

$$\eta_2 = \frac{\sigma(t_{C_{ve2}})}{\epsilon_{C_{ve2}}} = \frac{11.98(800)}{0.05} = 149750.00 \text{ MPa}$$

$$\eta_0 = \frac{\sigma(t_{C_t})}{\epsilon_{C_t}} = \frac{11.98(6000)}{0.05} = 1401169.59 \text{ MPa}$$

การทำนายเส้นโค้งการคืบด้วยแบบจำลองเบอร์เกอร์แบบ 6 องค์ประกอบ ให้ผลการทำนายที่เหมาะสมกับเส้นโค้งการคืบจากการทดลองมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองสมการยกกำลังเช่นเดียวกับการทดลองของ M. A. Mosiewicki et al. [54] และ C. Homkhiew [47]

รวมทั้งผลการทำนายยังมีความเหมาะสมกับเส้นโค้งการคืบมากกว่าแบบจำลองเบอร์เกอร์แบบ 4 องค์ประกอบ ตั้งแต่จุดเริ่มต้นของส่วนโค้งการคืบจนกระทั่งที่เวลา 100 นาที

เพื่อความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองสามารถพิจารณาได้จาก ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (mean absolute percent error, MAPE) ทั้งนี้ ใช้ในการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นระหว่างแบบจำลองที่สร้างขึ้น และค่าจริงจากการทดลอง ถ้าหากค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนที่ได้น้อย แสดงว่าการพยากรณ์ยังมีความแม่นยำซึ่งคำนวณได้จากสมการ (2.17) [59]

จากตารางที่ 4.12-4.15 แสดงถึงค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ในกรณีที่อุณหภูมิ 28°C ภาระ 20% พบว่าเส้นโค้งการคืบที่ได้จากแบบจำลองเบอร์เกอร์ 6 องค์ประกอบ ทั้ง 3 ระดับของภาระ มีค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนที่น้อยกว่าแบบจำลองเบอร์เกอร์ 4 องค์ประกอบ และแบบจำลองสมการยกกำลัง ที่เวลา 400 วินาที ซึ่งเป็นตำแหน่งหลังการเกิดความเครียดของการคืบอย่างทันทีผลที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองเบอร์เกอร์ 6 องค์ประกอบมีค่าเท่ากับ 3.06% แบบจำลองเบอร์เกอร์ 4 องค์ประกอบมีค่าเท่ากับ 4.08% และแบบจำลองสมการยกกำลังมีค่าเท่ากับ 3.84% และยังสภาวะอุณหภูมิในการทดสอบเพิ่มขึ้นจะสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนในกรณีที่อุณหภูมิ 68°C ผลที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองเบอร์เกอร์ 6 องค์ประกอบมีค่าเท่ากับ 0.29% แบบจำลองเบอร์เกอร์ 4 องค์ประกอบมีค่าเท่ากับ 13.72% และแบบจำลองสมการยกกำลังมีค่าเท่ากับ 8.26% โดยสามารถสังเกตความเหมาะสมของแบบจำลอง และผลการทดลองจริงได้ ณ ตำแหน่งหลังการเกิดความเครียดของการคืบอย่างทันทีแสดงได้ดังภาพที่ 4.8 ได้อย่างชัดเจน ในส่วนของแบบจำลองสมการยกกำลังเส้นโค้งที่ได้จากการทำนายจะมีความเหมาะสมในช่วงอุณหภูมิต่ำ และยังพบความคลาดเคลื่อนที่เห็นได้ชัดเจนของแบบจำลองสมการยกกำลังที่เวลา 6,000 วินาที (100 นาที) มีค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนเป็น 7.53%, 0.70%, 3.01%, 6.81% และ 8.45% ตามลำดับ โดยลักษณะของเส้นโค้งจะเบี่ยงเบนสูงขึ้นในช่วงปลาย แต่ค่าความคลาดเคลื่อนที่เวลา 1,600 วินาที จะให้ค่าที่ใกล้เคียงการทดลองมากที่สุด เนื่องจากเป็นบริเวณที่เกิดการพลิกกลับเส้นโค้งการคืบที่ได้จากการทำนายสามารถสังเกตได้จากภาพที่ 4.8 จากการยืนยันผลของแบบจำลองทั้งสามแบบจำลองพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจะพบหลังจากการเกิดความเครียดของการคืบอย่างทันทีซึ่งเป็นส่วนโค้งการคืบที่มีความชันสูง แต่เมื่อมีการเพิ่มขึ้นส่วนทางกลเข้าในส่วนโค้งของการคืบจะส่งผลให้เส้นโค้งที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองเบอร์เกอร์ 6 องค์ประกอบมีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 4.12 ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่อุณหภูมิ 28°C ภาระ 20%

Time (s)	Exp (% strain)	Model (% strain)			MAPE (%)		
		Burger 6	Burger 4	Power	Burger 6	Burger 4	Power
10	0.151	0.144	0.141	0.145	5.18	6.89	4.57
50	0.166	0.156	0.147	0.163	6.26	11.49	1.81
200	0.176	0.171	0.163	0.181	2.62	7.29	2.68
400	0.183	0.177	0.176	0.190	3.06	4.08	3.84
1,600	0.195	0.194	0.194	0.211	0.66	0.89	7.82
4,200	0.211	0.208	0.207	0.226	1.13	1.75	7.41
6,000	0.216	0.216	0.216	0.232	6E-03	4E-08	7.53

ตารางที่ 4.13 ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่อุณหภูมิ 38°C ภาระ 20%

Time (s)	Exp (% strain)	Model (% strain)			MAPE (%)		
		Burger 6	Burger 4	Power	Burger 6	Burger 4	Power
10	0.152	0.144	0.142	0.150	4.76	6.31	0.84
50	0.162	0.157	0.148	0.177	3.32	8.73	9.14
200	0.198	0.180	0.167	0.203	9.29	15.64	2.74
400	0.215	0.194	0.187	0.218	9.99	13.24	1.44
1,600	0.264	0.237	0.236	0.251	10.15	10.49	4.90
4,200	0.284	0.272	0.266	0.277	4.19	6.27	2.35
6,000	0.285	0.284	0.282	0.287	0.19	1.05	0.70

ตารางที่ 4.14 ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่อุณหภูมิ 48°C ภาระ 20%

Time (s)	Exp (% strain)	Model (% strain)			MAPE (%)		
		Burger 6	Burger 4	Power	Burger 6	Burger 4	Power
10	0.228	0.219	0.207	0.224	3.90	9.33	1.60
50	0.249	0.242	0.217	0.262	2.90	13.05	5.09
200	0.278	0.265	0.248	0.300	4.56	10.53	8.14
400	0.306	0.286	0.277	0.321	6.60	9.55	4.89
1,600	0.372	0.345	0.337	0.367	7.16	9.32	1.28
4,200	0.420	0.398	0.393	0.403	5.23	6.39	3.97
6,000	0.431	0.430	0.430	0.418	9E-04	1E-05	3.01

ตารางที่ 4.15 ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่อุณหภูมิ 58°C ภาระ 20%

Time (s)	Exp (% strain)	Model (% strain)			MAPE (%)		
		Burger 6	Burger 4	Power	Burger 6	Burger 4	Power
10	0.297	0.261	0.255	0.300	12.21	14.13	1.13
50	0.369	0.308	0.283	0.375	16.53	23.20	1.74
200	0.486	0.426	0.368	0.455	12.31	24.19	6.39
400	0.543	0.503	0.444	0.501	7.42	18.31	7.76
1,600	0.617	0.595	0.575	0.607	3.47	6.77	1.55
4,200	0.665	0.649	0.641	0.694	2.31	3.59	4.41
6,000	0.683	0.682	0.682	0.729	6E-04	1E-05	6.81

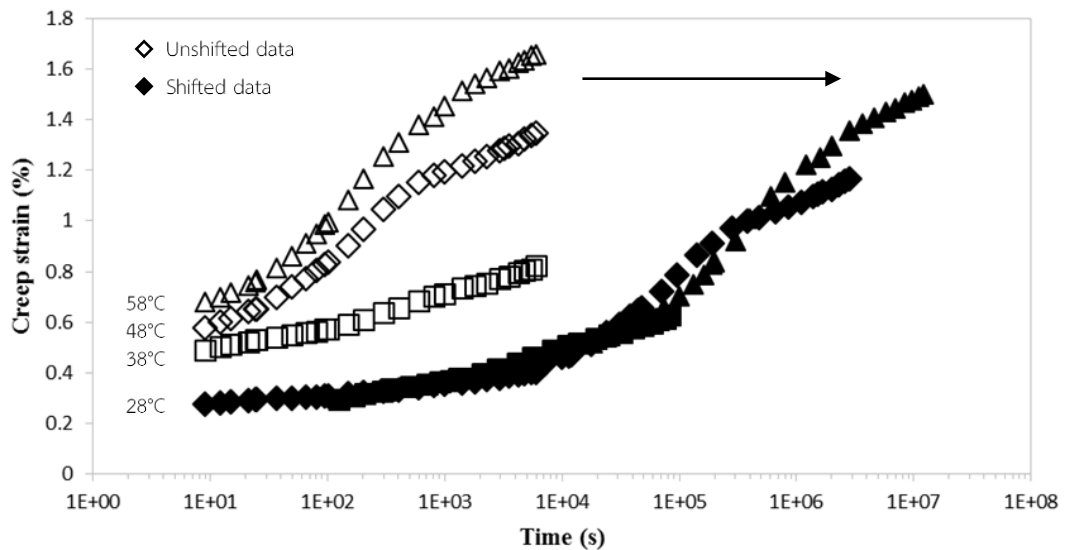
ตารางที่ 4.16 ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่อุณหภูมิ 68°C ภาระ 20%

Time (s)	Exp (% strain)	Model (% strain)			MAPE (%)		
		Burger 6	Burger 4	Power	Burger 6	Burger 4	Power
10	0.441	0.421	0.404	0.446	4.49	8.47	1.16
50	0.559	0.518	0.448	0.547	7.44	19.85	2.26
200	0.709	0.698	0.573	0.652	1.66	19.22	8.15
400	0.776	0.773	0.669	0.711	0.29	13.72	8.26
1,600	0.846	0.838	0.797	0.848	0.96	5.81	0.21
4,200	0.909	0.889	0.873	0.958	2.21	3.99	5.38
6,000	0.924	0.924	0.924	1.002	1E-08	1E-07	8.45

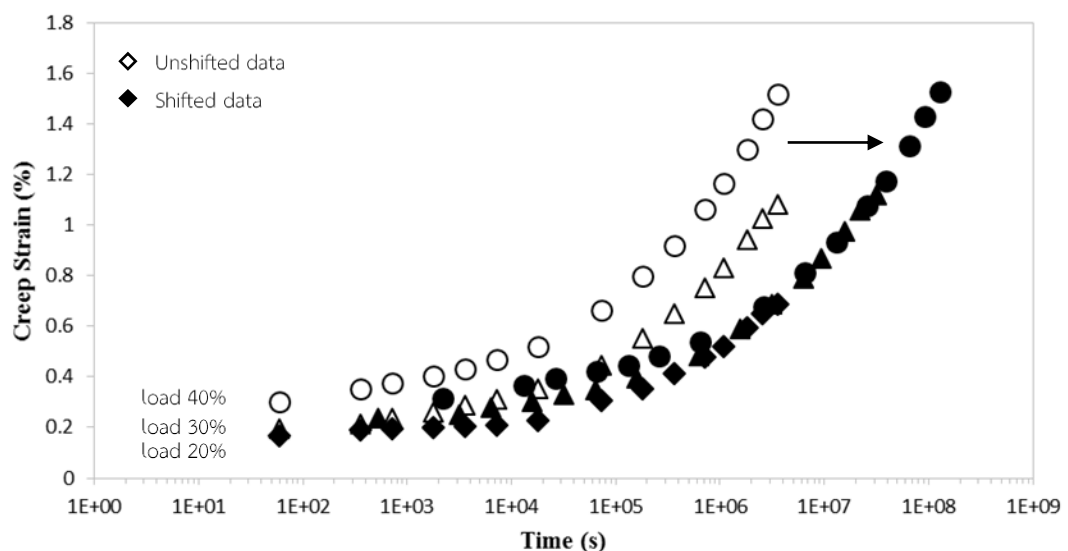
#### 4.5 หลักการซ้อนทับกันระหว่างเวลา อุณหภูมิและความเค้น

การทดสอบพฤติกรรมการคืบจะมีสภาพการทดสอบที่ใกล้เคียงกับสภาวะจริงในการใช้งานมาก แต่ยังคงมีข้อจำกัดในด้านของช่วงเวลาที่ใช้ในทดสอบกับอายุการใช้งานจริง เนื่องจากไม่สามารถรอผลการทดสอบได้นานเป็นเวลาหลายสิบปี จึงได้ค้นหาทางออกของปัญหานี้คือการทำการทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ กันแล้วนำมาสร้างเป็นเส้นโค้งหลัก เพื่อทำนายพฤติกรรมการคืบระยะยาวของวัสดุผสมจากพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพารา หลักการซ้อนทับกันระหว่างเวลาและอุณหภูมิ (time-temperature superposition; TTS) และหลักการซ้อนทับกันระหว่างเวลาและความเค้น (time-stress superposition; TSS) โดยใช้หลักการนำเส้นโค้งต้นแบบที่ได้จากการทดสอบการคืบโดยการเร่งให้วัสดุเกิดการเสียรูปขึ้นอย่างรวดเร็วด้วยอุณหภูมิ และความเค้นแสดงดังภาพที่ 4.12 ข้อมูลการคืบระยะสั้นที่ได้จากอุณหภูมิที่แตกต่างกันถูกนำมาวางซ้อนทับกันโดยการเลื่อนแกนทั้งแกน

นอน และแกนตั้งเพื่อให้ได้เส้นโค้งต้นแบบที่ราบเรียบ [56] โดยอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นที่ 38°C, 48°C และ 58°C ได้ถูกเลื่อนเข้าสู่อุณหภูมิอ้างอิงที่สภาวะอุณหภูมิห้อง (28°C) ซึ่งเส้นโค้งหลักที่ได้แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการคืบในระยะยาวที่อุณหภูมิอ้างอิง ในทางเดียวกันเส้นโค้งหลักสามารถสร้างได้จากการวางซ้อนทับกันของความเค้นที่เพิ่มสูงขึ้นที่ระดับภาระ 20%, 30% และ 40% ของภาระสูงสุด แสดงดังภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.12 เส้นโค้งหลักจากการคืบระยะสั้นที่ภาระ 40% อ้างอิงที่อุณหภูมิ 28°C



ภาพที่ 4.13 เส้นโค้งหลักจากการคืบระยะยาวที่ระดับภาระที่แตกต่างกัน  
อ้างอิงที่ระดับของภาระ 20%

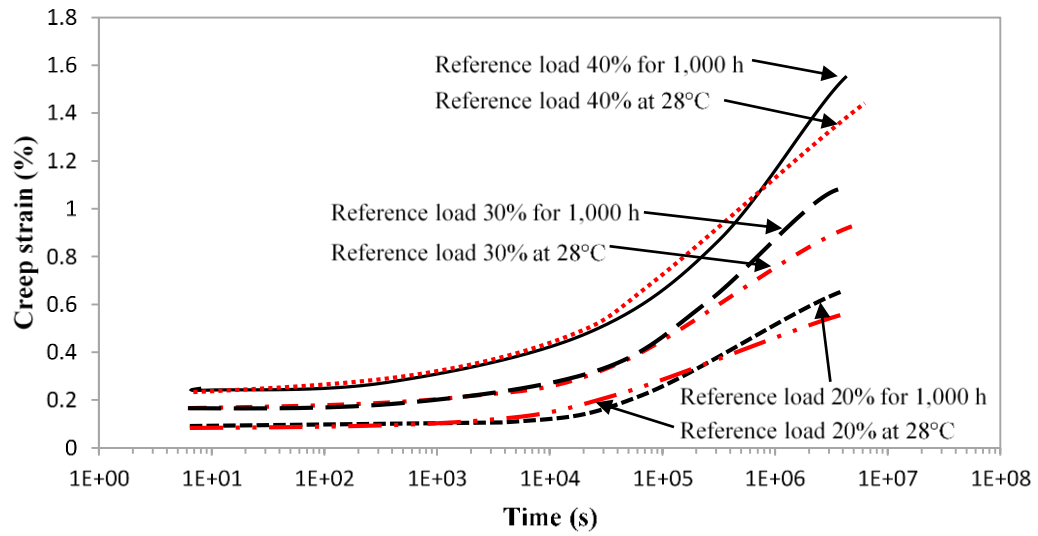
จากการเปรียบเทียบเส้นโค้งหลักที่ได้จากการซ้อนทับกันของเวลาและอุณหภูมิ (TTS) และเส้นโค้งการคืบระยะยาวที่ได้จากการทดลองเป็นระยะเวลา 1,000 ชั่วโมง ( $3.6 \times 10^6$  วินาที) แสดงดัง

ภาพที่ 4.14 ซึ่งเส้นโค้งหลักที่ถูกสร้างขึ้นสามารถทำนายอายุการใช้งานได้ใกล้เคียงกับการคืบจากการทดลองจริงโดยสามารถสังเกตได้จากทุกระดับภาระที่ระยะเวลา 10 วินาที ซึ่ง TTS สามารถให้เส้นโค้งหลักที่เหมาะสมกับข้อมูลจากการทดลองจริงจนกระทั่งที่ระยะเวลา  $1 \times 10^6$  วินาที หลังจากนั้นเส้นโค้งหลักจะเกิดการเบี่ยงเบนอย่างเห็นได้ชัด ยกตัวอย่างการเปรียบเทียบเส้นโค้งที่ระยะเวลา 1,000 ชั่วโมง ( $3.6 \times 10^6$  วินาที) ของระดับภาระ 40% ค่าความเครียดที่ได้จากการทดลองจริงมีค่าเท่ากับ 1.5% แต่ค่าความเครียดที่ได้จากเส้นโค้งต้นแบบมีค่าเท่ากับ 1.4% ซึ่งส่งผลให้ค่าความเครียดที่ได้ในระยะเวลานั้นมีค่าที่น้อยกว่าความเครียดที่ได้จากการทดลองจริงโดยให้ผลที่ใกล้เคียงกับทุกระดับภาระที่ 20% และ 30% เนื่องจากเส้นโค้งที่ได้จากการเร่งอุณหภูมิสูงสุดของการทดสอบส่งผลให้เกิดความเครียดที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว [47]

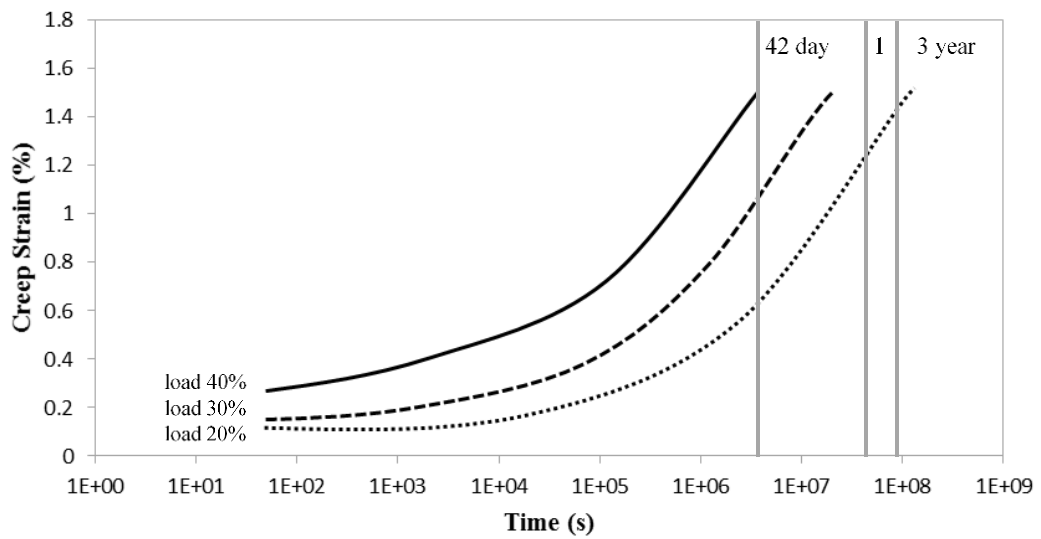
จากภาพที่ 4.15 แสดงถึงอายุการใช้งานของวัสดุผสมไม้พลาสติกที่สามระดับของภาระสูงสุดซึ่งได้มาจากหลักการซ้อนทับกันระหว่างเวลา และระดับความเค้นที่แตกต่างกัน (TSS) ทำให้ได้เส้นโค้งหลักที่สามารถใช้ในการทำนายอายุการใช้งานได้ โดยเส้นที่แสดงถึงอายุการใช้งานของวัสดุผสมไม้พลาสติกที่ระดับ 40% ของภาระสูงสุดซึ่งให้ค่าความเครียดที่ 1.5% ภายในระยะเวลา 42 วัน เส้นประแสดงถึงอายุการใช้งานของวัสดุผสมไม้พลาสติกที่ระดับ 30% โดยให้ค่าความเครียดที่ 1.5% ภายในระยะเวลาประมาณ 10 เดือน และจุดประแสดงถึงอายุการใช้งานของวัสดุผสมไม้พลาสติกที่ระดับ 20% โดยให้ค่าความเครียดที่ 1.5% ภายในระยะเวลาประมาณ 3 ปี

จะเห็นได้ว่าผลการทำนายอายุการใช้งานของวัสดุผสมจากพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพาราบนหลักการซ้อนทับกันของเวลาและอุณหภูมิ (TTS) จากข้อมูลการคืบระยะสั้น มีค่าที่ใกล้เคียงกับผลจากการทดลองจริง แต่เมื่อระยะเวลาในการการใช้งานเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าที่ได้จากการทำนายเริ่มเบี่ยงเบนออกจากผลการทดลองจริงที่สภาวะอุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นเพราะการเพิ่มขึ้นของสภาวะอุณหภูมิของการทดสอบส่งผลให้เกิดความเครียดที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เพื่อความแม่นยำในการทำนายอายุการใช้งานจึงควรมีการทดสอบพฤติกรรมกรรมการคืบระยะยาวร่วมด้วยเพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์ผลกระทบต่อการใช้งานของผลิตภัณฑ์ในระยะยาว ซึ่งค่าที่ได้จากการทำนายอายุการใช้งานในภาพที่ 4.15 ของวัสดุผสมไม้พลาสติกสามารถนำไปใช้ในการคาดการณ์ระยะเวลาความเสียหาย ตำแหน่งความเครียดที่เกิดขึ้นของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ภายใต้ภาระกระทำ และนำมาปรับปรุงความไม่เหมาะสมของพฤติกรรมกรรมการคืบที่เกิดขึ้นได้





ภาพที่ 4.14 การเปรียบเทียบเส้นโค้งต้นแบบจาก TTS และเส้นโค้งจากการคืบระยะยาว  
ที่ 1,000 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.15 อายุการใช้งานของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและผงไม้ยางพารา  
จากเส้นโค้งหลัก TSS

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

วัสดุผสมพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและผงไม้ยางพาราเป็นการผสมกันของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล และผงไม้ยางพาราเป็นหลัก ซึ่งการใช้ไม้ยางพาราเป็นการประหยัดต้นทุนในการผลิตเนื่องจากไม่ต้องนำเข้าไม้จากต่างประเทศ เป็นการนำเศษวัสดุไม้เหลือใช้จากกระบวนการผลิตในโรงงานมาผลิตเป็นวัสดุทดแทนไม้แล้วยังถือเป็นการรักษาสีสิ่งแวดล้อมด้วยการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับเศษวัสดุที่ไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ รวมถึงเป็นการส่งเสริมให้เกิดการพัฒนานวัตกรรมผลิตภัณฑ์ใหม่ของกลุ่มวัสดุผสม และสิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือวัสดุผสมไม้พลาสติกชนิดนี้สามารถขึ้นรูปได้หลากหลายวิธี แต่จะวิธีจะให้สมบัติทางกลของวัสดุที่แตกต่างกัน และเพื่อหาพฤติกรรมการคืบของขึ้นทดสอบที่ผลิตจากวัสดุผสมพอลิโพรพิลีน และผงไม้ยางพารา โดยมีจุดมุ่งหมายในการศึกษาพฤติกรรมการคืบของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพารา เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการทำนายความเสียหายของชิ้นงานเมื่อได้รับการกระทำที่คงที่ในระดับที่แตกต่างกัน และใช้เป็นพื้นฐานในงานวิจัยการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพาราต่อไปในอนาคต

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

สำหรับการดำเนินงานวิจัยได้นำวัสดุผสมไม้พลาสติกที่ประกอบด้วย พอลิโพรพิลีนรีไซเคิล 50.3% โดยน้ำหนัก ผงไม้ยางพารา 44.5% โดยน้ำหนัก สารคู่ควบ 3.9% โดยน้ำหนัก สารต้านรังสียูวี 0.2% โดยน้ำหนัก และสารหล่อลื่น 1% โดยน้ำหนัก ถูกใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบของการผสมส่วนผสมโดยวิธีการอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยว และขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีดโดยทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและผงไม้ยางพาราซึ่งมีค่าสมบัติทางด้านความแข็งแรงดัดที่ 29.95 MPa ความแข็งแรงอัดที่ 26.69 MPa และความแข็งแรงดึงที่ 20.05 MPa จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) พบว่ากระบวนการผสมโดยใช้การอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยวมีการกระจายตัวที่แยกเฟสระหว่างพลาสติกเมทริกซ์ และผงไม้อย่างชัดเจน อีกทั้งยังพบรูพรุนในเนื้อชิ้นงานน้อย เนื่องมาจากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีดส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของวัสดุมีผลให้สมบัติทางกลทางด้านความแข็งแรงอัดมีค่าที่สูง ผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางกลด้านความแข็งแรงดัดถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการคืบต่อระดับของภาระ 20%, 30% และ 40% ตามลำดับ ของชิ้นงานทดสอบพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล และชิ้นงานทดสอบวัสดุ

ผสมพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับผงไม้ยางพาราในระยะเวลา 1,000 ชั่วโมง ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง (28°C) จากการทดลองพบว่าพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลจะเกิดการคืบที่สูงกว่าวัสดุผสมไม้พลาสติกที่ระดับของภาระที่เท่ากัน ส่วนพฤติกรรมการคืบของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและผงไม้ยางพาราที่ระดับของภาระที่แตกต่างกันพบว่าค่าความเครียดของการคืบมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มภาระขึ้นตามลำดับ ในกรณีที่ระดับของภาระที่เท่ากันพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลจะเกิดการคืบที่สูงกว่าวัสดุผสมไม้พลาสติกเช่นในกรณีที่ระดับของภาระสูงสุด (40%) ระยะการโก่งตัวของชิ้นงานทดสอบพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลมีค่าเท่ากับ 6.68 มม. และชิ้นงานทดสอบวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับผงไม้ยางพารามีค่าเท่ากับ 3.37 มม. ซึ่งการคืบจากกระบวนการทดสอบจะมีแนวโน้มของความเครียดเพิ่มขึ้นตามระดับภาระที่ 20%, 30% และ 40% ตามลำดับ ดังในกรณีการคืบของชิ้นงานทดสอบวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลกับผงไม้ยางพาราที่เวลา 1,000 ชั่วโมง มีค่าความเครียดเท่ากับ 0.69%, 1.08% และ 1.52% ตามลำดับ โดยชิ้นงานทดสอบจะเกิดพฤติกรรมการโก่งตัวอย่างรวดเร็วจากนั้นจะเกิดการโก่งตัวขึ้นอย่างช้า ๆ ขึ้นอยู่กับเวลา เนื่องจากการปรับปรุงสมบัติการคืบของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลด้วยการเติมผงไม้ยางพาราเข้าสู่พลาสติกเมทริกซ์ส่งผลให้ค่าการคืบลดลง จึงได้ทำการทดสอบสมบัติทางความร้อนระหว่างพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล และวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนกับผงไม้ยางพาราเพื่อเปรียบเทียบช่วงอุณหภูมิการสลายตัวผ่านการวิเคราะห์สมบัติทางเทอร์โมแกรวิเมตริก (TGA) ซึ่งพบว่าชิ้นงานทดสอบพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลมีอุณหภูมิการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 390-510°C โดยมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักสูงสุดที่ 463°C เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิการสลายตัวของวัสดุผสมจากพอลิโพรพิลีนกับผงไม้ยางพาราจะพบการสูญเสียน้ำหนักสองช่วงในการทดสอบทางความร้อน ช่วงแรกเกี่ยวข้องกับการย่อยสลายของผงไม้ยางพาราในช่วงอุณหภูมิ 300-390°C และมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักสูงสุดที่อุณหภูมิ 363°C และช่วงที่สองเป็นการย่อยสลายตัวของพอลิโพรพิลีนในช่วงอุณหภูมิ 390-520°C และมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักสูงสุดที่ 475°C โดยอุณหภูมิการย่อยสลายในขั้นสุดท้ายของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนกับผงไม้ยางพาราจะให้อุณหภูมิในการย่อยสลายที่ช้าขึ้น

การทดสอบพฤติกรรมการคืบระยะสั้นของวัสดุผสมไม้พลาสติกที่ระดับความเค้นและอุณหภูมิแตกต่างกัน 5 อุณหภูมิ คือ 28°C, 38°C, 48°C, 58°C และ 68 °C เพื่อนำมาเปรียบเทียบพฤติกรรมการคืบจากการทดสอบแบบระยะยาว พบว่าที่ระดับภาระเดียวกันเมื่อสภาวะอุณหภูมิในการทดสอบเพิ่มขึ้นระยะการโก่งงอจะเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากการเสื่อยรูปของชิ้นงานทดสอบดังกรณีที่ระดับภาระ 20% พบว่ามีค่าระยะการโก่งตัวเท่ากับ 0.48 มม. 0.63 มม. 0.96 มม. 1.52 มม. และ 2.05 มม. ตามลำดับ และในทางเดียวกันค่าความเครียดจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มภาระ เนื่องมาจากที่อุณหภูมิสูงขึ้นความแข็งแรงของวัสดุจะลดลงเกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างการจับยึดพันธะโมเลกุลที่คอยต้านทานการเปลี่ยนรูปที่มีน้อยลง รวมถึงค่าความเค้นที่เพิ่มสูงขึ้นยังอุณหภูมิสูงขึ้นวัสดุผสมไม้พลาสติกก็ยิ่งอ่อนตัวลงส่งผลต่อค่ามอดูลัสยืดหยุ่นให้มีค่าลดลงเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลง

โครงสร้างทางเคมีเพราะอุณหภูมิและความเค้นมีผลกระทบกับพฤติกรรมวิสโคอิลาสติกเป็นอย่างมาก แสดงให้เห็นว่าอัตราการคืบส่งผลโดยตรงกับอุณหภูมิ เวลา และความเค้น และผลการทำนายเส้นโค้งการคืบที่ได้จากแบบจำลองของเบอร์เกอร์ 6 องค์ประกอบ จะได้การทำนายที่เหมาะสม และแม่นยำ เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองของเบอร์เกอร์ 4 องค์ประกอบ และแบบจำลองสมการยกกำลัง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของชิ้นส่วนในแบบจำลองของเบอร์เกอร์จะช่วยให้ความละเอียดของข้อมูลมีเพิ่มมากขึ้นส่งผลต่อการทำนายที่เหมาะสมต่อพฤติกรรมการคืบที่ได้จากการทดลอง โดยเฉพาะบริเวณส่วนโค้งหลังการเกิดความเครียดของการคืบอย่างทันทีซึ่งสามารถยืนยันผลของการทำนายพฤติกรรมการคืบที่เกิดขึ้นได้ด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างผลจากการทดลอง และค่าที่ได้จากแบบจำลองดังในกรณีการทดสอบพฤติกรรมการคืบระยะยาว 1,000 ชั่วโมง ของระดับภาระ 20% สามารถสังเกตได้จากที่เวลา 6,000 นาที (100 ชั่วโมง) พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองของเบอร์เกอร์ 6 องค์ประกอบ มีค่าเท่ากับ 2.84% แบบจำลองของเบอร์เกอร์ 4 องค์ประกอบ มีค่าเท่ากับ 12.95% และแบบจำลองสมการยกกำลังมีค่าเท่ากับ 4.89% ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองของเบอร์เกอร์ 6 องค์ประกอบ สามารถให้ความเหมาะสมกับข้อมูลจากการทดลองรวมถึงยังสามารถใช้อธิบายถึงสมบัติความหยุ่นหนืดได้อย่างแม่นยำ

ผลที่ได้จากการทำนายอายุการใช้งานของวัสดุผสมพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและผงไม้ยางพาราเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างเส้นโค้งหลักจากข้อมูลการคืบระยะสั้นโดยใช้หลักการซ้อนทับกันของเวลา และอุณหภูมิ (TTS) ให้ผลการทำนายที่ใกล้เคียงกับผลทดลองจริงในระยะเวลาหนึ่ง และจะเริ่มเบี่ยงเบนออกเล็กน้อยในช่วงสุดท้ายของการทดลอง โดยอายุการใช้งานของวัสดุผสมไม้พลาสติกที่ระดับ 40% ของภาระสูงสุดซึ่งมีค่าความเครียดที่ 1.5% ภายในระยะเวลา 42 วัน อายุการใช้งานของวัสดุผสมไม้พลาสติกที่ระดับ 30% ให้ค่าความเครียดที่ 1.5% ภายในระยะเวลาประมาณ 10 เดือน และอายุการใช้งานของวัสดุผสมไม้พลาสติกที่ระดับ 20% โดยให้ค่าความเครียดที่ 1.5% ภายในระยะเวลาประมาณ 3 ปี

## 5.2 ข้อเสนอแนะในการดำเนินงานวิจัย

สำหรับสมบัติที่ได้ทดสอบและผ่านการวิเคราะห์มานั้นเป็นเพียงการทดสอบระยะสั้น ๆ ซึ่งอาจไม่ถูกต้องและเที่ยงตรงเหมือนกับการทดสอบเป็นระยะเวลานาน ๆ อันเนื่องมาจากสมบัติของพลาสติกที่เป็นแบบยืดหยุ่นหนืด ซึ่งสมบัติต่าง ๆ เช่น โมดูลัส ความแข็งแรง และความอ่อนตัวที่ขึ้นอยู่กับอัตราความเครียด เวลา ขนาดและการรับแรง ตลอดถึงอุณหภูมิ เป็นต้น ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจมีสมบัติต่างจากผลิตภัณฑ์ตัวอย่างที่ทำจากชิ้นงานทดสอบได้ ทั้งนี้ที่อุณหภูมิห้อง

ขนาดของพลาสติกมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในขณะที่ความเค้นคงอันเนื่องมาจากสมบัติการคืบของพลาสติก ด้วยเหตุนี้มอดูลัสของพลาสติกจึงไม่คงที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

ค่าสมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบสามารถนำมาใช้ในการเปรียบเทียบกระบวนการผลิตที่จะใช้ในการขึ้นรูปวัสดุผสมระหว่างพลาสติกและผงไม้อย่างพารา ซึ่งวัสดุผสมไม้พลาสติกชนิดนี้สามารถขึ้นรูปได้หลากหลายวิธี แต่ละวิธีก็ให้ข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับรูปแบบการใช้งาน และควรคำนึงถึงพฤติกรรมการคืบซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญในการสร้างผลิตภัณฑ์จากวัสดุผสมไม้พลาสติก

### บรรณานุกรม

- [1] K. B. Adhikary. "Development of wood flour-recycled polymer composite panels as building materials." Ph.D. Dissertation, University of Canterbury, 2008.
- [2] ณิชฐ์ชญาภา ฌนวัฒนาศิริกุล, ฌเนศ รัตนาวิไล และกลางเดือน โปชนา. "วัสดุไม้พลาสติกจากไม้ปา้ล์มและ HDPE." วิศวกรรมสาร มข ปีที่ 38 ฉบับที่ 3, หน้า 285 –296, 2554.
- [3] ปีนสุภา ปิติรักษ์สกุล. "คอมโพสิทไม้-พลาสติกวัสดุใหม่สำหรับงานก่อสร้าง." วารสารรามคำแหง ฉบับวิศวกรรมศาสตร์, ปีที่ 2 ฉบับที่ 1, หน้า 20–25, 2551.
- [4] J. A. Youngquist, G. E. Myers, J. H. Muehl, Krzysik, and C. M. Clemons. "Composites from recycled wood and plastics." Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1995.
- [5] ภาณุมาศ ต้นสกุล. "การศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุผสมระหว่างพลาสติกกับขี้เถ้าไม้." การประชุมวิชาการ ด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ ครั้งที่ 1, 2549.
- [6] A. Ashori and A. Nourbakhsh. "Characteristics of wood-fiber plastic composites made of recycled materials." Waste Manag., vol. 29(4), pp. 1291–1295, Apr. 2009.
- [7] J. J. Balatinecz and M. M. Sain. "The influence of recycling on the properties of wood fibre-plastic composites." Macromol. Symp., vol. 135(1), pp. 167–173, Dec. 1998.
- [8] C. Clemons. "Wood-plastic composites in the united states : The interfacing of two industries." For. Prod. J., vol. 52, pp. 10–18, Jun. 2002.
- [9] A. J. Schildmeyer. "Temperature and time dependent behaviors of a wood-polypropylene composite." Master of Science in Civil Engineering, Washington State University, 2006.
- [10] J. Bodig and B. A. Jayne. Mechanics of wood and wood composites. Van Nostrand Reinhold, 1982.
- [11] C. Homkhiew, T. Ratanawilai, and W. Thongruang. "Flexural creep behavior of composites from polypropylene and rubberwood flour." Appl. Mech. Mater., vol. 368–370, pp. 736–740, Aug. 2013.

- [12] C. X. Dong, S. J. Zhu, M. Mizuno, and M. Hashimoto. “Modeling and prediction of compressive creep of silane-treated TiO<sub>2</sub>/high-density polyethylene.” *J. Mater. Sci.*, vol. 45(13), pp. 3506–3513, Jul. 2010.
- [13] S. Y. Lee, H. S. Yang, H. J. Kim, C. S. Jeong, B. S. Lim, and J. N. Lee. “Creep behavior and manufacturing parameters of wood flour filled polypropylene composites.” *Compos. Struct.*, vol. 65, pp. 459–469, Sep. 2004.
- [14] จักริน พรหมจิรสุข. “การออกแบบวัตถุดิบและการผลิตผลิตภัณฑ์จากวัสดุผสมซีลีเนียมและพีวีซีในกระบวนการอัดรีด.” *วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี*, 2546.
- [15] S. Rimdusit, W. Smittakorn, S. Jittarom, and S. Tiptipakorn. “Highly filled polypropylene rubber wood flour composites.” *Eng. J.*, vol. 15(2), pp. 17–30, Feb. 2011.
- [16] C. Homkhiew, T. Ratanawilai, and W. Thongruang. “Composites from recycled polypropylene and rubberwood flour: Effects of composition on mechanical properties.” *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, vol. 28, pp. 179-194, Feb. 2013.
- [17] ชาตรี หอมเขียว. “การพัฒนาและการประยุกต์ใช้วัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกและเส้นใยธรรมชาติเชิงอุตสาหกรรม.” *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ 10 ฉบับที่ 2, พฤษภาคม – สิงหาคม, หน้า 97–110*, 2557.
- [18] “Global trends in wood-plastic composites (WPC)-The portal for bio-based economy and industrial biotechnology.” *Bio-based News*. สืบค้นจาก (ออนไลน์) <http://news.bio-based.eu/global-trends-in-wood-plastic-composites-wpc/> [3 กุมภาพันธ์ 2015].
- [19] A. A. Klyosov. *Wood-plastic composites*. 1 edition. Hoboken, N.J: Wiley-Interscience, 2007.
- [20] P.-Y. Kuo, S.-Y. Wang, J.-H. Chen, H.-C. Hsueh, and M.-J. Tsai. “Effects of material compositions on the mechanical properties of wood-plastic composites manufactured by injection molding.” *Mater. Des.*, vol. 30(9), pp. 3489–3496, Oct. 2009.
- [21] P. Nygard, B. S. Tanem, T. Karlsen, P. Brachet, and B. Leinsvang. “Extrusion-based wood fibre-PP composites: Wood powder and pelletized wood fibres – a comparative study.” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 68, pp. 3418–3424, Dec. 2008.

- [22] K. B. Adhikary, S. Pang, and M. P. Staiger. "Dimensional stability and mechanical behaviour of wood-plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE)." *Compos. Part B-Eng.*, vol. 39(5), pp. 807–815, 2008.
- [23] ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ, ศิรินทร ทองแสง และ วิชัย โรชาพิทักษ์. "สูตรส่วนผสมสำหรับผลิตภัณฑ์จากวัสดุผสมพีวีซีกับซีลื้อยไม้." เลขที่สิทธิบัตร 22706, 2550.
- [24] K. P. Gohr, W. E. Neese, and A. Savanuzzi. "Plastic wood-fiber pellets." EP5938994, 1999.
- [25] N. Intawong, C. Kantala, W. Lotaisong, and N. Sombatsompop. "A die rotating system for moderations of extrusion load and pressure drop profiles for molten PP and wood/polypropylene composites in extrusion processes." *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 120(2), pp. 1006–1016, Apr. 2011.
- [26] H. Gao, Y. Song, Q. Wang, Z. Han, and M. Zhang. "Rheological and mechanical properties of wood fiber-PP/PE blend composites." *J. For. Res.*, vol. 19(4), pp. 315–318, Dec. 2008.
- [27] El-Haggar, Salah M., and Kamel, Mokhtar A. *Wood plastic composites*. INTECH Open Access Publisher, 2011.
- [28] H. Wang, R. Chang, K. Sheng, M. Adl, and X. Qian. "Impact response of bamboo-plastic composites with the properties of bamboo and polyvinylchloride (PVC)." *J. Bionic Eng.*, vol. 5, pp. 28–33, Sep. 2008.
- [29] D. P. Kamdem, H. H. Jiang, W. N. Cui, J. Freed, and L. M. Matuana. "Properties of wood plastic composites made of recycled HDPE and wood flour from CCA-treated wood removed from service." *Compos. Part -Appl. Sci. Manuf.*, vol. 35(3), pp. 347–355, 2004.
- [30] จารุธรรม สังข์ปาน. "การวิเคราะห์สมบัติวิสโคไฮเปอร์อีลาสติกของยางคางรูปที่อุณหภูมิต่างกัน." *วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 2550.
- [31] B. A. Acha, M. M. Reboredo, and N. E. Marcovich. "Creep and dynamic mechanical behavior of PP-jute composites: Effect of the interfacial adhesion." *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 38(6), pp. 1507–1516, Jun. 2007.
- [32] J. Lai and A. Bakker. "Analysis of the non-linear creep of high-density polyethylene." *Polymer*, vol. 36(1), pp. 93–99, Jan. 1995.



- [33] สิทธิชัย แสงอาทิตย์. “รายงานการวิจัยการพัฒนาสมการออกแบบชิ้นส่วนพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทรีดชั้นหน้าตัดรูปตัวซีภายใต้แรงดัดที่มีจุดรองรับแบบง่ายและแบบยึดแน่น.” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2555.
- [34] Mosallam and Ayman S. “Technique for prestressing composite members and related apparatuses.” US20070175583, 2006.
- [35] อนุรักษ์ สุวรรณชีวะศิริ, ทวิช พูลเงิน, สมชาย ชูชีพสกุล, ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ, และ วิชัย โรชาพิทักษ์. “พฤติกรรมการคืบและการล้าของคานที่ทำจากวัสดุผสมพลาสติกและซีลี้อยไม้ (WPC).” การประชุมทางวิชาการระดับชาติด้านครุศาสตร์อุตสาหกรรม ครั้งที่ 1, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2551.
- [36] ธวัชชัย อุ้นใจจุม และ เวชยันต์ รางศรี. “พฤติกรรมคืบของไม้ไผ่หก.” การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26 ME-Nett 26, จ.เชียงใหม่, 2555.
- [37] S. Panthapulakkal, S. Law, and M. Sain. “Properties of recycled high-density polyethylene from milk bottles.” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 43(11), pp. 2147–2150, 1991.
- [38] C. Homkhiew, T. Ratanawilai, and W. Thongruang. “The optimal formulation of recycled polypropylene/rubberwood flour composites from experiments with mixture design.” *Compos. Part B Eng.*, vol. 56, pp. 350–357, Jan. 2014.
- [39] K. G. N. C. Alwis and C. J. Burgoyne. “Time-temperature superposition to determine the stress-rupture of aramid fibres.” *Appl. Compos. Mater.*, vol. 13(4), pp. 249–264, Jun. 2006.
- [40] M. Nakada, Y. Miyano, H. Cai, and M. Kasamori. “Prediction of long-term viscoelastic behavior of amorphous resin based on the time-temperature superposition principle.” *Mech Time-Depend Mater*, vol. 15, pp. 309–316, 2011.
- [41] V. P. W. Shim, L. M. Yang, and J. Yuan. “A thermo-visco-hyperelastic approach to model the constitutive behaviour of polyester elastomer.” *JSME Mater. Process. Conf. MP*, vol. 10(1), pp. 36–41, 2002.
- [42] เข็มชัย เหมาะะจันทร์. “พลาสติกเสริมแรง.” *วารสารพลาสติก*, ฉบับที่ 7(9), 2536.
- [43] J. A. Brydson. *Plastics materials*. Butterworth Heinemann: Oxford, 2000.
- [44] แมน อมรสิทธิ์, สมชัย อัครทิวา และ ธรรมบุญ อุดมมัน. *วัสดุวิศวกรรม*. พิมพ์ครั้งที่ 4, สำนักพิมพ์แมคกรอ-ฮิล, 2551.

- [45] วิริยะ ทองเรือง. วิศวกรรมพอลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 1, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2554.
- [46] วราภรณ์ ขจรไชยกูล. “ผลิตภัณฑ์ยาง : กระบวนการผลิตและเทคโนโลยี.” สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย พิมพ์ครั้งที่ 2, 2554.
- [47] C. Homkhiew. “Optimal formulation of recycled polypropylene/rubberwood flour composites on mechanical and creep behaviors.” Ph.D. Dissertation, Prince of Songkla University, 2013.
- [48] นิทัศน์ จิระอรุณ. วัสดุพอลิเมอร์. ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม, คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2543.
- [49] “นาโนเทคโนโลยี : เทคโนโลยีการสร้างระดับนาโน.” สืบค้นจาก (ออนไลน์) <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>. [11 มีนาคม 2015].
- [50] เฉลิมชัย ไชยจรรัตน์. “การวิเคราะห์ปัจจัยทางความร้อนที่มีผลต่อวัสดุพอลิคาร์บอนเนตผสม.” วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2553.
- [51] J. Ronald. “Dynamics properties rubber.” Rubber World, vol. 2, pp. 43–45, 1994.
- [52] นิรภัฏ ห้วยเรไร. “การทดลองและจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษากระบวนการฉีดเป่าแบบดึงยืดของพีอีที.” วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2550.
- [53] H. Kraus. Creep analysis. John Wiley & Sons Inc, 1980.
- [54] M. A. Mosiewicki, N. E. Marcovich, and M. I. Aranguren. “Creep behavior of wood flour composites made from linseed oil-based polyester thermosets.” J. Appl. Polym. Sci., vol. 121(5), pp. 2626–2633, Sep. 2011.
- [55] C. Subramanian and S. Senthilvelan. “Short-term flexural creep behavior and model analysis of a glass-fiber-reinforced thermoplastic composite leaf spring.” J. Appl. Polym. Sci., vol. 120(6), pp. 3679–3686, Jun. 2011.
- [56] M. Hadid, S. Rechak, and A. Tati. “Long-term bending creep behavior prediction of injection molded composite using stress–time correspondence principle.” Mater. Sci. Eng. A, vol. 385, pp. 54–58, Nov. 2004.
- [57] R. Li. “Time-temperature superposition method for glass transition temperature of plastic materials.” Mater. Sci. Eng. A, vol. 278, no. 1–2, pp. 36–45, Feb 2000.
- [58] A. V. Tobolsky, Properties and structure of polymers. New York, Wiley, 1960.

- [59] นุชรี ธรรมโชติ. “การพัฒนากระบวนการประมวลผลภาพสำหรับกระบวนการคัดแยกขนาดและสายพันธุ์ของหมึก กัลวี่แปรรูป.” วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ และระบบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2557.
- [60] ชาตรี หอมเขียว และ ธเนศ รัตนวิไล. “ส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพารา หลังการแช่น้ำโดยใช้การออกแบบการทดลอง.” วารสารวิจัย มข ปีที่ 19 ฉบับที่ 6 พฤศจิกายน - ธันวาคม, หน้า 780–793, 2014.
- [61] “ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์-Scientific equipment center, Prince of Songkla University.” สืบค้นจาก (ออนไลน์) <http://www.sec.psu.ac.th/home/about.php?page=eqp>. [25 พฤษภาคม 2015].
- [62] F.-C. Chang. “Creep behaviour of eood-plastic composites.” Ph.D. Dissertation, The University of British Columbia, 2011.
- [63] T. Ratanawilai, W. Thongruang, and C. Homkhiew. “Effect of extruded density on mechanical properties of recycled polypropylene composites reinforced with rubberwood flour.” Int. Conf. Eng. Appl. Sci., Sapporo, pp. 107–115, July 2014.
- [64] N. E. Marcovich and M. A. Villar. “Thermal and mechanical characterization of linear low-density polyethylene/wood flour composites.” J. Appl. Polym. Sci., vol. 90(10), pp. 2775–2784, Dec. 2003.
- [65] C. Homkhiew, T. Ratanawilai, and W. Thongruang. “Optimizing the formulation of polypropylene and rubberwood flour composites for moisture resistance by mixture design.” J. Reinf. Plast. Compos., vol. 33(9), pp. 810–823, May 2014.
- [66] T. Ratanawilai, N. Thanawattanasirikul, and C. Homkhiew. “Mechanical and thermal properties of oil palm wood sawdust reinforced post-consumer polyethylene composites.” ScienceAsia, vol. 38(3), pp. 289, 2012.
- [67] H. Liu, Q. Wu, and Q. Zhang. “Preparation and properties of banana fiber-reinforced composites based on high density polyethylene (HDPE)/Nylon-6 blends.” Bioresour. Technol., vol. 100(23), pp. 6088–6097, Dec. 2009.
- [68] E. F. J. Pascual. “Influence of the compatibilizer/nanoclay ratio on final properties of polypropylene matrix modified with montmorillonite-based organoclay.” Polym. Bull., vol. 62(3), pp. 367–380, 2009.

- [69]S. S. Ndlovu. "Wood-polymer composites utilizing degraded polyolefins as compatibilizers." Master of Science in Chemistry, University of the Free State (Qwaqwa Campus), 2011.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

## ข้อมูลการทดสอบสมบัติทางกลโดยเครื่องทดสอบสมบัติทางวัสดุ

ตาราง ก-1 สมบัติทางกลทางด้านความแข็งแรงดัด ความแข็งแรงอัด และความแข็งแรงดึงของวัสดุผสมไม้พลาสติกพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพารา

Run No.	Flexural		Compressive		Tensile	
	Strength (MPa)	Modulus (MPa)	Strength (MPa)	Modulus (MPa)	Strength (MPa)	Modulus (MPa)
1	28.47	1741.27	26.11	1102.92	20.57	819.52
2	32.58	1833.42	25.77	1088.42	19.89	787.73
3	28.57	1862.43	26.82	1072.91	20.73	871.01
4	30.19	1632.66	27.83	1059.17	18.04	893.07
5	26.69	1608.97	26.93	998.78	21.03	834.52

ตาราง ก-2 สมบัติทางกลทางด้านความแข็งแรงดัด ความแข็งแรงอัด และความแข็งแรงดึงของพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล

Run No.	Flexural		Compressive		Tensile	
	Strength (MPa)	Modulus (MPa)	Strength (MPa)	Modulus (MPa)	Strength (MPa)	Modulus (MPa)
1	38.56	1195.93	19.95	879.66	26.17	549.93
2	38.42	1216.49	23.92	941.80	27.54	609.39
3	37.99	1188.54	23.26	950.92	24.14	483.49
4	36.83	1981.28	19.26	854.17	23.31	395.64
5	38.13	1192.43	18.26	843.21	27.04	571.14

## ภาคผนวก ข

## ข้อมูลระยะเวลาการโค้งงอและค่าความเครียดของการคืบ

ตาราง ข-1 ระยะเวลาการโค้งงอจากการคืบของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลที่อุณหภูมิห้อง (28°C) ระยะเวลาทดสอบ 1,000 ชั่วโมง

load (%)  time (min)	20			30			40		
	ระยะการโค้งงอขึ้นงาน (มม.)								
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3
1	0.58	0.62	0.45	1.36	1.47	0.84	1.79	1.82	1.55
6	0.67	0.71	0.54	1.52	1.64	1.01	2.03	2.08	1.79
12	0.77	0.82	0.64	1.60	1.73	1.10	2.17	2.26	1.93
30	0.89	0.93	0.76	1.74	1.89	1.26	2.37	2.45	2.13
60	1.00	1.13	0.87	1.85	2.02	1.39	2.57	2.65	2.33
120	1.09	1.20	0.96	2.02	2.20	1.57	2.78	2.87	2.54
300	1.16	1.27	1.03	2.21	2.38	1.75	3.08	3.21	2.84
1200	1.44	1.57	1.31	2.77	2.97	2.34	3.97	4.06	3.73
3000	1.59	1.74	1.46	3.12	3.35	2.72	4.45	4.59	4.21
6000	1.75	1.92	1.62	3.45	3.69	3.06	4.91	5.04	4.67
12000	1.91	2.09	1.78	3.80	3.80	4.08	5.45	5.60	5.21
18000	2.01	2.20	1.88	4.03	4.03	4.30	5.80	5.95	5.56
30000	2.15	2.36	2.02	4.28	4.28	4.54	6.15	6.31	5.91
42000	2.29	2.51	2.16	4.47	4.47	4.74	6.44	6.61	6.20
60000	2.41	2.65	2.28	4.69	4.69	4.94	6.70	6.88	6.46

ตาราง ข-2 ระยะการโก่งงอจากการคืบของวัสดุผสมไม้พลาสติกพอลิโพรพีลีนและผงไม้ยางพาราที่อุณหภูมิห้อง (28°C) ระยะเวลาทดสอบ 1,000 ชั่วโมง

load (%)	20			30			40		
	ระยะโก่งงอขึ้นงาน (มม.)								
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3
time (min)									
1	0.34	0.40	0.37	0.50	0.41	0.40	0.69	0.7	0.61
6	0.37	0.51	0.40	0.51	0.47	0.44	0.77	0.86	0.72
12	0.38	0.52	0.41	0.58	0.52	0.49	0.82	0.92	0.77
30	0.38	0.52	0.42	0.63	0.57	0.54	0.88	0.99	0.83
60	0.39	0.53	0.44	0.69	0.62	0.62	0.93	1.05	0.89
120	0.40	0.53	0.46	0.71	0.67	0.70	1.03	1.12	0.97
300	0.45	0.57	0.51	0.80	0.76	0.80	1.13	1.25	1.09
1200	0.61	0.76	0.68	1.04	0.95	0.97	1.45	1.55	1.41
3000	0.70	0.83	0.81	1.23	1.24	1.21	1.73	1.86	1.72
6000	0.83	0.97	0.95	1.40	1.49	1.43	1.95	2.17	2.01
12000	0.97	1.13	1.08	1.61	1.74	1.65	2.24	2.51	2.34
18000	1.07	1.25	1.16	1.78	1.94	1.83	2.45	2.74	2.56
30000	1.22	1.43	1.31	1.98	2.22	2.07	2.71	3.07	2.88
42000	1.34	1.56	1.43	2.14	2.42	2.27	2.96	3.36	3.14
60000	1.42	1.67	1.49	2.25	2.58	2.39	3.13	3.60	3.37

ตาราง ข-3 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความเครียดของพอลิโพรพีลีนและวัสดุผสมไม้พลาสติกพอลิโพรพีลีนกับผงไม้ยางพาราที่อุณหภูมิห้อง (28°C) ระยะเวลาทดสอบ 1,000 ชั่วโมง

load (%)	20		30		40	
	Creep strain (%)		Creep strain (%)		Creep strain (%)	
	RPP	WPCs	RPP	WPCs	RPP	WPCs
time (min)						
300	0.5190	0.2289	0.9507	0.3547	1.3695	0.5205
1200	0.6480	0.3083	1.2117	0.4440	1.7640	0.6615
3000	0.7185	0.3510	1.3782	0.5513	1.9875	0.7958
6000	0.7935	0.4118	1.5297	0.6483	2.1930	0.9195
12000	0.8670	0.4770	1.6992	0.7500	2.4390	1.0635
18000	0.9135	0.5220	1.7997	0.8322	2.5965	1.1625



ตาราง ข-3 (ต่อ) ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความเครียดของพอลิโพรพิลีนและวัสดุผสมไม้พลาสติกพอลิโพรพิลีนกับผงไม้ยางพาราที่อุณหภูมิห้อง (28°C) ระยะเวลาทดสอบ 1,000 ชั่วโมง

load (%) \ time (min)	20		30		40	
	Creep strain (%)		Creep strain (%)		Creep strain (%)	
	RPP	WPCs	RPP	WPCs	RPP	WPCs
30000	0.9795	0.5940	1.9092	0.9402	2.7555	1.2990
42000	1.0440	0.6495	1.9977	1.0245	2.8875	1.4187
60000	1.1010	0.6867	2.0907	1.0823	3.0060	1.5150

ตาราง ข-4 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความเครียดของวัสดุผสมไม้พลาสติกพอลิโพรพิลีนกับผงไม้ยางพาราที่อุณหภูมิ 28°C ระยะเวลาทดสอบ 100 นาที

Time (s)	Creep strain (%)			time (s)	Creep strain (%)		
	load 20%	load 30%	load 40%		load 20%	load 30%	load 40%
1	0.0285	0.0510	0.0585	24	0.1628	0.2265	0.2940
2	0.0915	0.0630	0.1035	25	0.1628	0.2280	0.2955
3	0.1350	0.0915	0.1395	50	0.1659	0.2340	0.3015
4	0.1395	0.1185	0.1755	55	0.1661	0.2349	0.3024
5	0.1410	0.1410	0.2055	60	0.1662	0.2370	0.3045
6	0.1455	0.1545	0.2220	65	0.1662	0.2370	0.3045
7	0.1455	0.1680	0.2355	70	0.1692	0.2370	0.3045
8	0.1470	0.1860	0.2535	75	0.1692	0.2370	0.3045
9	0.1485	0.2085	0.2760	80	0.1694	0.2382	0.3057
10	0.1515	0.2100	0.2775	85	0.1694	0.2394	0.3069
11	0.1530	0.2106	0.2781	90	0.1695	0.2400	0.3075
12	0.1545	0.2115	0.2790	95	0.1695	0.2415	0.3090
13	0.1545	0.2139	0.2814	100	0.1695	0.2430	0.3105
14	0.1560	0.2160	0.2835	200	0.1758	0.2535	0.3210
15	0.1560	0.2160	0.2835	300	0.1797	0.2610	0.3285
16	0.1575	0.2160	0.2835	400	0.1830	0.2655	0.3330
17	0.1575	0.2166	0.2841	500	0.1833	0.2691	0.3366
18	0.1596	0.2181	0.2856	600	0.1868	0.2736	0.3411
19	0.1626	0.2187	0.2862	700	0.1872	0.2775	0.3450
20	0.1628	0.2190	0.2865	800	0.1905	0.2820	0.3495
21	0.1628	0.2208	0.2883	900	0.1913	0.2820	0.3495
22	0.1628	0.2229	0.2904	1000	0.1917	0.2867	0.3542
23	0.1628	0.2244	0.2919	1200	0.1950	0.2872	0.3547

ตาราง ข-4 (ต่อ) ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความเครียดของวัสดุผสมไม้พลาสติกพอลิโพรพิลีนกับผงไม้  
 ยางพาราที่ อุณหภูมิ 28°C ระยะเวลาทดสอบ 100 นาที

Time (s)	Creep strain (%)			time (s)	Creep strain (%)		
	load 20%	load 30%	load 40%		load 20%	load 30%	load 40%
1400	0.1953	0.2925	0.3600	3500	0.2078	0.3195	0.3870
1600	0.1953	0.2962	0.3637	3800	0.2078	0.3210	0.3885
1800	0.1991	0.2988	0.3663	4200	0.2106	0.3255	0.3930
2000	0.1995	0.3015	0.3690	4500	0.2115	0.3294	0.3969
2300	0.2034	0.3060	0.3735	4800	0.2129	0.3300	0.3975
2600	0.2036	0.3090	0.3765	5150	0.2142	0.3300	0.3975
2900	0.2039	0.3105	0.3780	5500	0.2145	0.3330	0.4005
3200	0.2075	0.3150	0.3825	6000	0.2160	0.3333	0.4008

ตาราง ข-5 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความเครียดของวัสดุผสมไม้พลาสติกพอลิโพรพิลีนกับผงไม้ยางพาราที่  
 อุณหภูมิ 38°C ระยะเวลาทดสอบ 100 นาที

Time (s)	Creep strain (%)			time (s)	Creep strain (%)		
	load 20%	load 30%	load 40%		load 20%	load 30%	load 40%
1	0.1362	0.1200	0.1515	20	0.1575	0.3615	0.5235
2	0.1404	0.2790	0.2415	21	0.1575	0.3630	0.5235
3	0.1440	0.3000	0.3795	22	0.1575	0.3645	0.5280
4	0.1455	0.3165	0.4515	23	0.1575	0.3660	0.5295
5	0.1493	0.3210	0.4650	24	0.1605	0.3675	0.5295
6	0.1515	0.3225	0.4680	25	0.1620	0.3720	0.5325
7	0.1515	0.3300	0.4770	50	0.1620	0.3930	0.5490
8	0.1515	0.3330	0.4860	55	0.1620	0.3975	0.5520
9	0.1515	0.3375	0.4905	60	0.1635	0.4095	0.5550
10	0.1515	0.3420	0.4950	65	0.1635	0.4110	0.5580
11	0.1530	0.3420	0.4995	70	0.1635	0.4110	0.5625
12	0.1536	0.3465	0.5040	75	0.1635	0.4155	0.5640
13	0.1553	0.3480	0.5070	80	0.1688	0.4170	0.5640
14	0.1554	0.3495	0.5085	85	0.1770	0.4215	0.5685
15	0.1556	0.3510	0.5115	90	0.1800	0.4275	0.5685
16	0.1556	0.3540	0.5145	95	0.1860	0.4320	0.5730
17	0.1556	0.3555	0.5175	100	0.1905	0.4335	0.5745
18	0.1556	0.3555	0.5190	200	0.1980	0.4800	0.6120
19	0.1560	0.3570	0.5235	300	0.2088	0.5070	0.6360

ตาราง ข-5 (ต่อ) ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความเครียดของวัสดุผสมไม้พลาสติกพอลิโพรพิลีนกับผงไม้  
 ยางพาราที่ อุณหภูมิ 38°C ระยะเวลาทดสอบ 100 นาที

Time (s)	Creep strain (%)		
	load 20%	load 30%	load 40%
400	0.2151	0.5235	0.6570
500	0.2202	0.5460	0.6750
600	0.2280	0.5655	0.6855
700	0.2355	0.5745	0.6990
800	0.2427	0.5865	0.7035
900	0.2475	0.5925	0.7110
1000	0.2517	0.5970	0.7140
1200	0.2565	0.6015	0.7245
1400	0.2610	0.6105	0.7335
1600	0.2640	0.6150	0.7410
1800	0.2673	0.6195	0.7440
2000	0.2700	0.6210	0.7500

time (s)	Creep strain (%)		
	load 20%	load 30%	load 40%
2300	0.2715	0.6225	0.7560
2600	0.2730	0.6270	0.7665
2900	0.2745	0.6315	0.7710
3200	0.2760	0.6330	0.7755
3500	0.2790	0.6375	0.7815
3800	0.2805	0.6390	0.7875
4200	0.2835	0.6435	0.7935
4500	0.2835	0.6435	0.7980
4800	0.2835	0.6450	0.8040
5150	0.2850	0.6540	0.8055
5500	0.2850	0.6540	0.8115
6000	0.2850	0.6555	0.8235

ตาราง ข-6 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความเครียดของวัสดุผสมไม้พลาสติกพอลิโพรพิลีนกับผงไม้ยางพาราที่  
 อุณหภูมิ 48°C ระยะเวลาทดสอบ 100 นาที

Time (s)	Creep strain (%)		
	load 20%	load 30%	load 40%
1	0.2010	0.1200	0.2775
2	0.2100	0.2790	0.4725
3	0.2130	0.3000	0.5145
4	0.2160	0.3165	0.5325
5	0.2181	0.3210	0.5370
6	0.2205	0.3225	0.5415
7	0.2211	0.3300	0.5460
8	0.2238	0.3330	0.5700
9	0.2265	0.3375	0.5775
10	0.2280	0.3420	0.5865
11	0.2304	0.3420	0.5940
12	0.2310	0.3465	0.6000
13	0.2310	0.3480	0.6090
14	0.2331	0.3495	0.6105
15	0.2355	0.3510	0.6165

time (s)	Creep strain (%)		
	load 20%	load 30%	load 40%
16	0.2361	0.3540	0.6210
17	0.2364	0.3555	0.6225
18	0.2370	0.3555	0.6315
19	0.2370	0.3570	0.6345
20	0.2385	0.3615	0.6360
21	0.2388	0.3630	0.6405
22	0.2391	0.3645	0.6420
23	0.2394	0.3660	0.6465
24	0.2415	0.3675	0.6495
25	0.2421	0.3720	0.6525
50	0.2496	0.3930	0.7395
55	0.2505	0.3975	0.7470
60	0.2520	0.4095	0.7560
65	0.2526	0.4110	0.7740
70	0.2553	0.4110	0.7860

ตาราง ข-6 (ต่อ) ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความเครียดของวัสดุผสมไม้พลาสติกพอลิโพรพิลีนกับผงไม้  
 ยางพาราที่ อุณหภูมิ 48°C ระยะเวลาทดสอบ 100 นาที

Time (s)	Creep strain (%)		
	load 20%	load 30%	load 40%
75	0.2565	0.4155	0.7965
80	0.2571	0.4170	0.8070
85	0.2574	0.4215	0.8175
90	0.2610	0.4275	0.8220
95	0.2634	0.4320	0.8295
100	0.2640	0.4335	0.8370
200	0.2775	0.4800	0.9690
300	0.2925	0.5070	1.0455
400	0.3060	0.5235	1.0950
500	0.3165	0.5460	1.1310
600	0.3225	0.5655	1.1550
700	0.3345	0.5745	1.1670
800	0.3420	0.5865	1.1805
900	0.3465	0.5925	1.1895
1000	0.3510	0.5970	1.1940
1200	0.3561	0.6015	1.2045

time (s)	Creep strain (%)		
	load 20%	load 30%	load 40%
1400	0.3660	0.6105	1.2165
1600	0.3720	0.6150	1.2285
1800	0.3780	0.6195	1.2360
2000	0.3855	0.6210	1.2405
2300	0.3900	0.6225	1.2540
2600	0.3945	0.6270	1.2720
2900	0.4035	0.6315	1.2765
3200	0.4080	0.6330	1.2855
3500	0.4125	0.6375	1.2975
3800	0.4170	0.6390	1.3020
4200	0.4200	0.6435	1.3065
4500	0.4230	0.6435	1.3140
4800	0.4260	0.6450	1.3230
5150	0.4290	0.6540	1.3320
5500	0.4305	0.6540	1.3365
6000	0.4305	0.6555	1.3470

ตาราง ข-7 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความเครียดของวัสดุผสมไม้พลาสติกพอลิโพรพิลีนกับผงไม้ยางพาราที่  
 อุณหภูมิ 58°C ระยะเวลาทดสอบ 100 นาที

Time (s)	Creep strain (%)		
	load 20%	load 30%	load 40%
1	0.2040	0.1845	0.1650
2	0.2475	0.3345	0.3075
3	0.2580	0.3540	0.4320
4	0.2655	0.3585	0.4410
5	0.2745	0.3600	0.4440
6	0.2790	0.3645	0.4470
7	0.2835	0.3660	0.4545
8	0.2895	0.3690	0.4605
9	0.2925	0.3705	0.4680
10	0.2970	0.3750	0.4785
11	0.3015	0.3750	0.4845

time (s)	Creep strain (%)		
	load 20%	load 30%	load 40%
12	0.3045	0.3765	0.4920
13	0.3075	0.3765	0.4995
14	0.3090	0.3765	0.5025
15	0.3120	0.3810	0.5115
16	0.3150	0.3810	0.5160
17	0.3195	0.3810	0.5205
18	0.3225	0.3825	0.5250
19	0.3255	0.3855	0.5295
20	0.3300	0.3855	0.5355
21	0.3315	0.3870	0.5400
22	0.3345	0.3870	0.5445

ตาราง ข-7 (ต่อ) ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความเครียดของวัสดุผสมไม้พลาสติกพอลิโพรพิลีนกับผงไม้  
 ยางพาราที่ อุณหภูมิ 58°C ระยะเวลาทดสอบ 100 นาที

Time (s)	Creep strain (%)		
	load 20%	load 30%	load 40%
23	0.3390	0.3900	0.5565
24	0.3390	0.3900	0.5625
25	0.3405	0.3900	0.5670
50	0.3690	0.4200	0.6285
55	0.3750	0.4215	0.6375
60	0.3795	0.4260	0.6480
65	0.3840	0.4305	0.6540
70	0.3900	0.4335	0.6630
75	0.3945	0.4380	0.6720
80	0.3990	0.4425	0.6810
85	0.4050	0.4470	0.6885
90	0.4095	0.4500	0.6915
95	0.4140	0.4545	0.6960
100	0.4185	0.4590	0.7005
200	0.4860	0.5295	0.8160
300	0.5160	0.5820	0.8580
400	0.5430	0.6225	0.8850
500	0.5610	0.6510	0.9030
600	0.5715	0.6750	0.9180
700	0.5775	0.6900	0.9255

time (s)	Creep strain (%)		
	load 20%	load 30%	load 40%
800	0.5835	0.6975	0.9345
900	0.5895	0.7035	0.9390
1000	0.6000	0.7110	0.9435
1200	0.6045	0.7230	0.9480
1400	0.6090	0.7380	0.9585
1600	0.6165	0.7485	0.9675
1800	0.6225	0.7560	0.9765
2000	0.6270	0.7620	0.9810
2300	0.6345	0.7740	0.9900
2600	0.6390	0.7815	0.9990
2900	0.6465	0.7890	1.0095
3200	0.6525	0.7950	1.0125
3500	0.6585	0.8040	1.0185
3800	0.6615	0.8070	1.0365
4200	0.6645	0.8145	1.0440
4500	0.6705	0.8160	1.0485
4800	0.6735	0.8205	1.0530
5150	0.6765	0.8205	1.0575
5500	0.6780	0.8220	1.0635
6000	0.6825	0.8250	1.0725

ตาราง ข-8 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความเครียดของวัสดุผสมไม้พลาสติกพอลิโพรพิลีนกับผงไม้ยางพาราที่  
 อุณหภูมิ 68°C ระยะเวลาทดสอบ 100 นาที

Time (s)	Creep strain (%)		
	load 20%	load 30%	load 40%
1	0.2595	0.1740	0.2130
2	0.3540	0.3240	0.5265
3	0.3765	0.3645	0.8160
4	0.3915	0.4110	1.0500
5	0.4065	0.4275	1.1070
6	0.4155	0.4320	1.1385
7	0.4215	0.4410	1.1655

time (s)	Creep strain (%)		
	load 20%	load 30%	load 40%
8	0.4275	0.4455	1.1940
9	0.4335	0.4530	1.2165
10	0.4410	0.4605	1.2360
11	0.4440	0.4695	1.2540
12	0.4485	0.4785	1.2600
13	0.4530	0.4860	1.2735
14	0.4575	0.4950	1.2870

ตาราง ข-8 (ต่อ) ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความเครียดของวัสดุผสมไม้พลาสติกพอลิโพรพิลีนกับผงไม้  
 ยางพาราที่ อุณหภูมิ 68°C ระยะเวลาทดสอบ 100 นาที

Time (s)	Creep strain (%)			time (s)	Creep strain (%)		
	load 20%	load 30%	load 40%		load 20%	load 30%	load 40%
15	0.4650	0.5025	1.3005	400	0.7755	1.1310	1.9215
16	0.4710	0.5115	1.3095	500	0.7920	1.1730	1.9440
17	0.4785	0.5160	1.3215	600	0.8010	1.1880	1.9590
18	0.4830	0.5235	1.3275	700	0.8070	1.2030	1.9815
19	0.4860	0.5280	1.3380	800	0.8085	1.2150	1.9950
20	0.4875	0.5325	1.3470	900	0.8145	1.2270	2.0130
21	0.4920	0.5370	1.3560	1000	0.8160	1.2360	2.0250
22	0.4950	0.5415	1.3815	1200	0.8280	1.2465	2.0490
23	0.4995	0.5460	1.3875	1400	0.8430	1.2570	2.0715
24	0.5040	0.5505	1.3920	1600	0.8460	1.2765	2.0880
25	0.5085	0.5550	1.4040	1800	0.8520	1.2870	2.1075
50	0.5595	0.6120	1.5195	2000	0.8565	1.2930	2.1225
55	0.5715	0.6270	1.5390	2300	0.8745	1.2990	2.1480
60	0.5790	0.6450	1.5465	2600	0.8760	1.3110	2.1660
65	0.5865	0.6690	1.5660	2900	0.8805	1.3245	2.1870
70	0.5940	0.6900	1.5825	3200	0.8895	1.3305	2.2035
75	0.6015	0.7125	1.5990	3500	0.8970	1.3455	2.2200
80	0.6105	0.7335	1.6155	3800	0.9015	1.3500	2.2320
85	0.6150	0.7470	1.6320	4200	0.9090	1.3560	2.2500
90	0.6195	0.7620	1.6440	4500	0.9120	1.3605	2.2590
95	0.6240	0.8025	1.6560	4800	0.9120	1.3680	2.2710
100	0.6315	0.8160	1.6695	5150	0.9180	1.3815	2.2770
200	0.7095	0.9810	1.7985	5500	0.9195	1.3920	2.2920
300	0.7530	1.0770	1.8825	6000	0.9240	1.4025	2.3100

## ภาคผนวก ค

## ค่าความผิดพลาดของแบบจำลอง

ตาราง ค-1 ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ระดับภาระ 20%

Time (min)	Exp (% strain)	Model (% strain)			MAPE (%)		
		Burger 6	Burger 4	Power	Burger 6	Burger 4	Power
1	0.1665	0.1921	0.1920	0.1315	15.36	15.34	21.02
6	0.1920	0.1924	0.1922	0.1680	0.21	0.13	12.50
12	0.1960	0.1928	0.1925	0.1847	1.66	1.81	5.79
30	0.1976	0.1940	0.1932	0.2093	1.80	2.19	5.97
60	0.2052	0.1960	0.1945	0.2301	4.49	5.23	12.16
120	0.2090	0.1999	0.1969	0.2530	4.33	5.77	21.09
300	0.2289	0.2113	0.2041	0.2868	7.69	10.84	25.29
1200	0.3083	0.2606	0.2373	0.3466	15.46	23.01	12.45
3000	0.3510	0.3309	0.2922	0.3929	5.74	16.75	11.93
6000	0.4118	0.4000	0.3584	0.4319	2.85	12.96	4.90
12000	0.4770	0.4697	0.4370	0.4748	1.54	8.39	0.45
18000	0.5220	0.5114	0.4833	0.5019	2.03	7.41	3.85
30000	0.5940	0.5715	0.5477	0.5382	3.79	7.79	9.39
42000	0.6495	0.6200	0.6040	0.5635	4.54	7.00	13.23
60000	0.6867	0.6859	0.6867	0.5917	0.12	1E-03	13.83

ตาราง ค-2 ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ระดับภาระ 30%

Time (min)	Exp (% strain)	Model (% strain)			MAPE (%)		
		Burger 6	Burger 4	Power	Burger 6	Burger 4	Power
1	0.1965	0.2896	0.2896	0.1554	47.38	47.36	20.92
6	0.2130	0.2902	0.2899	0.2097	36.22	36.10	1.54
12	0.2385	0.2908	0.2903	0.2355	21.93	21.72	1.26
30	0.2610	0.2928	0.2915	0.2745	12.17	11.69	5.18
60	0.2895	0.2960	0.2935	0.3083	2.25	1.38	6.48
120	0.3120	0.3024	0.2975	0.3462	3.08	4.66	10.95
300	0.3547	0.3210	0.3092	0.4035	9.52	12.85	13.75

ตาราง ค-2 (ต่อ) ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ระดับภาระ 30%

Time (min)	Exp (% strain)	Model (% strain)			MAPE (%)		
		Burger 6	Burger 4	Power	Burger 6	Burger 4	Power
1200	0.4440	0.4014	0.3633	0.5089	9.61	18.19	14.61
3000	0.5513	0.5155	0.4524	0.5932	6.48	17.92	7.60
6000	0.6483	0.6273	0.5598	0.6661	3.25	13.65	2.74
12000	0.7500	0.7385	0.6867	0.7480	1.53	8.44	0.27
18000	0.8322	0.8047	0.7608	0.8005	3.31	8.59	3.81
30000	0.9402	0.8998	0.8630	0.8719	4.30	8.22	7.26
42000	1.0245	0.9766	0.9518	0.9224	4.68	7.10	9.97
60000	1.0823	1.0809	1.0822	0.9791	0.12	2E-03	9.53

ตาราง ค-3 ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ระดับภาระ 40%

Time (min)	Exp (% strain)	Model (% strain)			MAPE (%)		
		Burger 6	Burger 4	Power	Burger 6	Burger 4	Power
1	0.2999	0.4052	0.4051	0.2493	35.12	35.10	16.86
6	0.3525	0.4060	0.4056	0.3285	15.17	15.06	6.82
12	0.3759	0.4069	0.4061	0.3654	8.25	8.05	2.78
30	0.4050	0.4098	0.4079	0.4208	1.18	0.71	3.90
60	0.4305	0.4145	0.4107	0.4681	3.71	4.60	8.74
120	0.4666	0.4239	0.4164	0.5208	9.16	10.77	11.61
300	0.5205	0.4511	0.4331	0.5997	13.34	16.80	15.22
1200	0.6615	0.5683	0.5102	0.7423	14.08	22.88	12.22
3000	0.7958	0.7338	0.6372	0.8548	7.78	19.92	7.42
6000	0.9195	0.8934	0.7898	0.9510	2.84	14.11	3.43
12000	1.0635	1.0481	0.9690	1.0581	1.44	8.89	0.51
18000	1.1625	1.1382	1.0725	1.1262	2.09	7.74	3.12
30000	1.2990	1.2673	1.2138	1.2183	2.44	6.56	6.21
42000	1.4187	1.3715	1.3359	1.2830	3.33	5.84	9.56
60000	1.5150	1.5132	1.5150	1.3554	0.12	2E-03	10.53



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายวิระ ลีลาศิลปศาสตร์

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5610120032

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (สาขาวิศวกรรมการผลิต)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2555

#### ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนอุดหนุนการทำวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ประจำปีการศึกษา 2557 ได้รับจากคณะบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ทุนสนับสนุนการวิจัยจากเงินอุดหนุนทั่วไป โครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ (NRU) ประจำปีงบประมาณ 2558

#### การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

วิระ ลีลาศิลปศาสตร์ และ ธเนศ รัตนวิไล. "สมบัติทางกลของวัสดุผสมพอลิโพรพีลีนและผงไม้ยางพารา ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยวและแบบเกลียวคู่." งานประชุมนำเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาระดับชาติ ครั้งที่ 8 มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี, 13-14 ธันวาคม 2557