



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาคุณสมบัติต้านทำลายและการเสียรูปที่ขึ้นอยู่กับเวลาของวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์

โดย พต.ดร.วรัญ ท้องทิวกุล

มีนาคม 2554

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาคุณสมบัติต้านการอักเสบและการเสียรูปที่ขึ้นอยู่กับเวลาของวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์

สังกัดผู้วิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. และ สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

สารบัญ

1. บทคัดย่อ:	1
2. บทสรุปผู้บริหาร	3
3. วัตถุประสงค์	4
4. วิธีการทดสอบ	4
4.1 บทนำ	4
4.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	4
4.3 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบ	6
4.3.1 อุปกรณ์จับตัวอย่าง	6
4.3.2 ระบบให้แรงดึง	6
4.3.3 ตู้ควบคุมอุณหภูมิ	7
4.3.4 ระบบให้ลมร้อนและระบบควบคุมอุณหภูมิ	7
4.4 ตัวอย่างทดสอบ	10
4.5 โปรแกรมการทดสอบ	11
4.5.1 การทดสอบการเร่งการคืบ	11
4.5.2 การทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดึงสูงสุดและคุณสมบัติอีลาสติก	12
5. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์	12
5.1 บทนำ	12
5.2 การทดสอบ Stepped Isothermal Method (SIM)	13
5.2.1 บทนำ	13
5.2.2 การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบ SIM	13
5.2.3 การเปรียบเทียบสำหรับ Creep Rupture Curve และค่า Creep Reduction Factor	29
5.3 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อกำลังรับแรงดึงสูงสุด	30
5.3.1 บทนำ	30
5.3.2 การทดสอบด้วยการดึงตัวอย่างอย่างต่อเนื่องภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน	30
5.3.3 พารามิเตอร์ผลกระทบอุณหภูมิ, A_f	39
5.4 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่าอีลาสติกสตีฟเนส	42
5.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและความเครียดสำหรับการดึงเป็นวงรอบ	42
5.4.2 ค่าอีลาสติกสตีฟเนสเทียบเท่า (k_{eq})	44
5.4.3 การเปรียบเทียบระหว่างค่า k_{eq} และอุณหภูมิ	71
6. บทสรุป	74
7. ผลลัพธ์จากโครงการวิจัย	74

รหัสโครงการ: MRG5280049

ชื่อโครงการ: การศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังและการเสียรูปที่ขึ้นอยู่กับเวลาของวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์

ชื่อนักวิจัย และสถาบัน: ผศ.ดร.วรัช ก้องกิจกุล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

อีเมล: warat.kon@kmutt.ac.th

ระยะเวลาโครงการ: 16 มีนาคม 2552 ถึง 15 มีนาคม 2554

1. บทคัดย่อ:

ในการวิจัยนี้ ได้พัฒนาเครื่องมือทดสอบแรงดึงแผ่นใยสังเคราะห์จีโอกริดขึ้นมาใหม่เพื่อการทดสอบการคืบด้วยวิธีการเร่งอัตราการคืบด้วยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิแวดล้อมตัวอย่าง จากการทดสอบด้วยเครื่องมือดังกล่าว พบว่า แรงดึงฉีกขาดของแผ่นใยสังเคราะห์จีโอกริดลดลงอย่างมากมีนัยสำคัญเมื่ออุณหภูมิแวดล้อมตัวอย่างเพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งบอกว่า อุณหภูมิแวดล้อมตัวอย่างมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติเนื้อแท้หรือคุณสมบัติพลาสติกของแผ่นใยสังเคราะห์จีโอกริดซึ่งมีลักษณะเป็นวัสดุจำพวกอีลาสโตวิสโคพลาสติก จากนั้นจึงได้ทำการทดสอบหาค่าอีลาสติกสตีเฟนสของแผ่นใยสังเคราะห์จีโอกริดด้วยการดึงและผ่อนแบบเป็นวงจรด้วยแอมพลิฟายด์แรงดึงขนาดเล็ก ซึ่งกระทำต่อจากการคืบที่ค่าแรงดึงหลายค่าซึ่งสอดคล้องระหว่างการดึงด้วยอัตราแรงดึงคงที่ภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน จากการทดสอบด้วยวิธีดังกล่าว พบว่า ที่ค่าอุณหภูมิเท่ากัน ค่าอีลาสติกสตีเฟนสมีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อแรงดึงสูงขึ้น แต่กระนั้น ที่ค่าแรงดึงเท่ากัน ค่าอีลาสติกสตีเฟนสมีค่าลดลงเป็นอย่างมากเมื่ออุณหภูมิแวดล้อมตัวอย่างสูงขึ้น จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบทั้งหมดสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการหาค่าอีลาสติกสตีเฟนสสำหรับแผ่นใยสังเคราะห์จีโอกริดแต่ละประเภท เมื่อทราบค่าแรงดึงและอุณหภูมิแวดล้อมต่อไปได้

คำสำคัญ: จีโอกริด, อุณหภูมิ, อีลาสติกสตีเฟนส, การคืบ, การทดสอบการคืบแบบเร่ง, อีลาสโตวิสโคพลาสติก

Abstract:

An automated tensile loading system to perform creep loading tests on a geogrid at elevated ambient temperatures was developed aiming at shortening the time required to develop a given creep strain. The followings were found from the results from experiments using this system. The tensile rupture strength of geogrid used in this study decreases significantly with an increase in the temperature. This result implies that the temperature affects the intrinsic (plastic) stress-strain property of polymer geogrid, which is known to be an elasto-viscoplastic material. The elastic stiffness of the geogrid that were evaluated by small unload/reload cycles after a certain period of sustained loading applied during otherwise monotonic loading at a constant load rate increases with an increase in the load level at a fixed temperature, while it decreases with an increase in the temperature at the same load level. Mathematical expressions are proposed to express these trends of the elastic stiffness described above.

Keyword: Geogrid, Temperature, Elastic Stiffness, Creep, Accelerated Creep Test, Elasto-Viscoplastic

2. บทสรุปผู้บริหาร

โครงการวิจัยเรื่อง การศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังและการเสียดทานที่ขึ้นอยู่กับเวลาของวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์ ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยและคณะกรรมการการอุดมศึกษา ภายใต้โครงการนักวิจัยรุ่นใหม่ประจำปี 2552 โดยทำการวิจัยระหว่างวันที่ 16 มีนาคม พ.ศ. 2552 ถึงวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ. 2554

โครงการวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่เกิดจากเวลา ซึ่งโดยหมายถึงการเสื่อมของวัสดุเมื่อถูกใช้งาน สำหรับแผ่นใยสังเคราะห์ที่ใช้ในงานวิศวกรรมโยธาเป็นวัสดุที่ผลิตจากโพลิเมอร์ ซึ่งเมื่อนำมาใช้งานจะต้องพิจารณาคุณสมบัติคงเหลือที่อายุการใช้งาน ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเสื่อมของแผ่นใยสังเคราะห์โพลิเมอร์ได้แก่ การคืบ, การเกิดปฏิกิริยาทางเคมี และ/หรือ ชีวภาพ เป็นต้น กระนั้นการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติคงเหลือที่ระยะเวลานานมีค่าใช้จ่ายสูงมาก ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นการเร่งให้เกิดเสื่อมด้วยการเพิ่มอุณหภูมิแวดล้อมตัวอย่าง ซึ่งเริ่มมาจากการทดสอบการเร่งการคืบด้วยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาเครื่องมือทดสอบแรงดึงแผ่นใยสังเคราะห์ขึ้นมาใหม่ ที่สามารถควบคุมได้ทั้งประวัติแรงดึงและประวัติอุณหภูมิแวดล้อม แล้วจึงทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องด้วยการทดสอบการเร่งการคืบและเปรียบเทียบผลกับค่าแนะนำจากมาตรฐาน จากนั้น เนื่องจากวัสดุแผ่นใยสังเคราะห์โพลิเมอร์มีคุณสมบัติประเภทอีลาสโตวิโคพลาสติก ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาเชิงลึกถึงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติอีลาสติกของแผ่นใยสังเคราะห์จีโอกรีตประเภทต่าง ๆ

จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่า เครื่องมือทดสอบที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่ มีประสิทธิภาพในการควบคุมประวัติแรงดึงและประวัติอุณหภูมิเป็นอย่างดี โดยเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบการเร่งการคืบพบว่า มีความใกล้เคียงกันกับค่าที่แนะนำในมาตรฐาน นอกจากนั้นจากการทดสอบศึกษาผลกระทบของแรงดึงและอุณหภูมิแวดล้อมที่มีต่อคุณสมบัติอีลาสติกของแผ่นใยสังเคราะห์จีโอกรีตประเภทต่าง ๆ พบว่า เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมคงที่ ค่าอีลาสติกสตีเฟนจะเพิ่มขึ้นกับค่าแรงดึงที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ เมื่อเปรียบเทียบที่ค่าแรงดึงเท่ากัน ค่าอีลาสติกสตีเฟนจะลดลงกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวสามารถที่จะอธิบายให้อยู่ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์เดียวกันสำหรับแผ่นใยสังเคราะห์จีโอกรีตต่างประเภทกันได้

สำหรับผลงานทางด้านวิชาการของงานวิจัยนี้ ได้ตีพิมพ์ในเอกสารการประชุมวิชาการนานาชาติ จำนวน 1 บทความ ปัจจุบัน กำลังเตรียมบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติที่มีอมแพคแฟกเตอร์ต่อไป

3. วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาเครื่องทดสอบแรงดึงแผ่นใยสังเคราะห์จีโอกรีตขึ้นมาใหม่ ให้สามารถควบคุมประวัติการให้แรงและอุณหภูมิได้
2. เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องมือทดสอบที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ โดยทำการทดสอบการเร่งการคืบ แล้ววิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองกับค่าที่แนะนำในมาตรฐาน
3. เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติอีลาสติกและค่าแรงดึงฉีกขาดของแผ่นใยสังเคราะห์จีโอกรีตประเภทต่างๆ

4. วิธีการทดสอบ

4.1 บทนำ

งานวิจัยนี้แบ่งได้เป็นสามส่วน ส่วนที่หนึ่งคือการพัฒนาเครื่องมือทดสอบแรงดึงที่สามารถควบคุมแรงดึงและอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำ ซึ่งประกอบด้วยการพัฒนาอุปกรณ์หลายๆ ส่วนมาประกอบกัน ประกอบไปด้วยชุดจับตัวอย่างแผ่นใยสังเคราะห์จีโอกรีตประเภทม้วนตัวอย่าง, ชุดให้แรงดึงด้วยกระบอกลม, ตัวควบคุมอุณหภูมิทดสอบ, ระบบให้ลมร้อนและระบบควบคุมอุณหภูมิ ส่วนที่สองคือการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องทดสอบที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่ดังกล่าว โดยการทดสอบการเร่งการคืบแบบ Stepped Isothermal Method (SIM) ตัวอย่างตัวแทนวัสดุแผ่นใยสังเคราะห์จีโอกรีตประเภท Polypropylene (PP) ซึ่งผลการทดสอบที่ผ่านกระบวนการวิเคราะห์แล้วจะเปรียบเทียบกับค่าแนะนำมาตรฐาน ส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดึงฉีกขาดและคุณสมบัติอีลาสติกของแผ่นใยสังเคราะห์จีโอกรีตประเภทต่างๆ

4.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

งานวิจัยนี้ เลือกใช้แผ่นใยสังเคราะห์จีโอกรีตสามประเภทที่เป็นที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป และมีค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดใกล้เคียงกัน โดยมีชื่อเรียกดังนี้

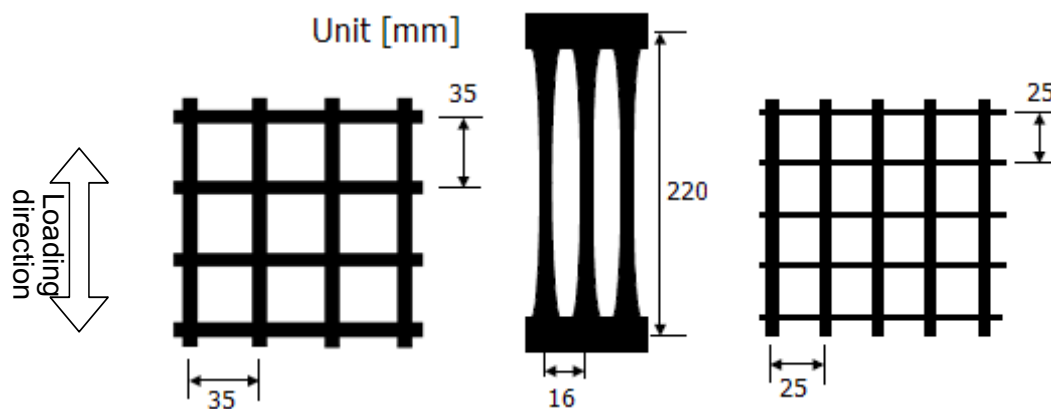
1. จีโอกรีตประเภทที่ 1 (Reinforcement 1) ซึ่งทำจาก Polypropylene (PP)
2. จีโอกรีตประเภทที่ 2 (Reinforcement 2) ซึ่งทำจาก High-density Polyethylene (HDPE)
3. จีโอกรีตประเภทที่ 3 (Reinforcement 3) ซึ่งทำจาก Polyester (PET)

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพ, มิติ (รูปที่ 1) และข้อมูลทางเทคนิคจากผู้ผลิต ส่วนรูปที่ 2 แสดงตัวอย่างแผ่นใยสังเคราะห์จีโอกรีตประเภทต่างๆ ซึ่งถูกติดตั้งกับอุปกรณ์จับตัวอย่างและติดตั้งชุดเฟรมเพื่อวัดการยืดตัวแล้ว

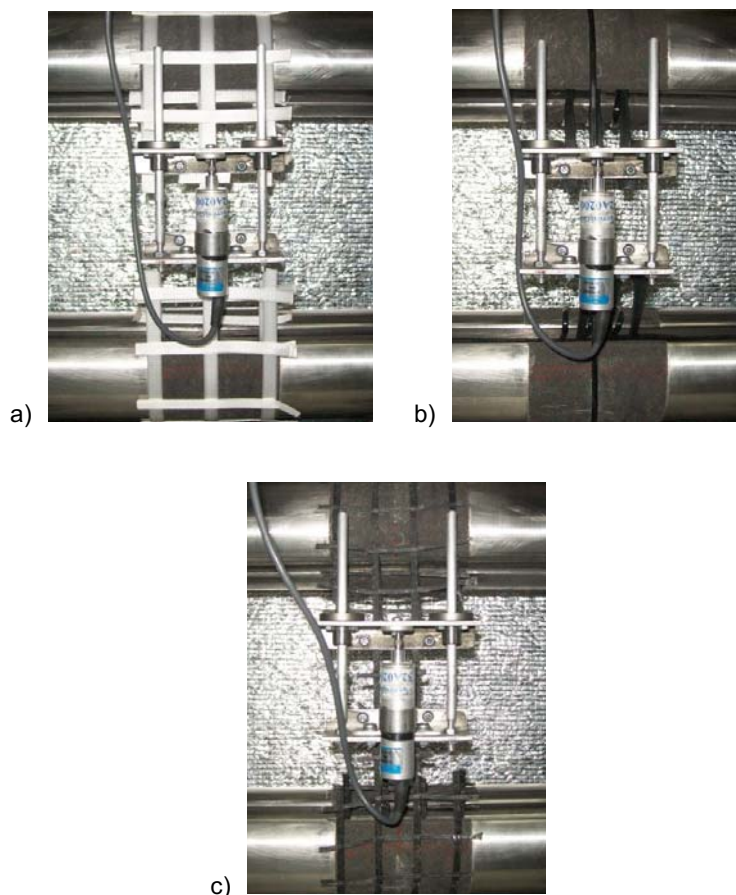
ตารางที่ 1 แผ่นใยสังเคราะห์จีโอกรีตประเภทต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

No.	Unit	1	2	3
Fiber material		Polypropylene	High-density polyethylene	Polyester
Abbreviated name		PP	HDPE	PET
Standard color		White	Black	Black
Specimen conditions		Virgin	Virgin	Virgin
Aperture size (MD/TD)**	mm	35 / 35	220 / 16	25 / 25
Max tensile strength* (MD/TD)	kN/m	≥ 80 / ≥ 80	90 / -	80 / 30
Yield point elongation* (MD)	%	≤ 8	13	11

*Test method based on ISO 10319 for reinforcement 1 (Polypropylene) and 2 (High-density polyethylene; HDPE), and ISO 10319, ASTM D4595 and AS 3706.2 for reinforcement 3 (Polyester; PET) and **MD=machine direction (longitudinal to the roll)/TD=transverse directions (across roll width)



รูปที่ 1 มิติของแผ่นใยสังเคราะห์จีโอกรีตประเภทต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 2 ตัวอย่างทดสอบเมื่อถูกจับยึดด้วย Roller-clamp และติดตั้งกับเฟรมวัดการยึดตัวสำหรับ: a) reinforcement 1 (Polypropylene); b) reinforcement 2 (High-density polyethylene; HDPE); และ c) reinforcement 3 (Polyester)

4.3 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบ

4.3.1 อุปกรณ์จับตัวอย่าง

อุปกรณ์จับตัวอย่างแผ่นใยสังเคราะห์จีโอกริด (รูปที่ 2) ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่ในงานวิจัยนี้ โดยทำจากแท่งสแตนเลสสตีลรูปทรงกระบอก เมื่อนำมาใช้จับตัวอย่าง จะต้องพันตัวอย่างล้อมรอบผิวนอกของทรงกระบอกแล้วสอดปลายตัวอย่างเข้าไปในร่อง ซึ่งตัวอย่างจะถูกยึดติดกับร่องของทรงกระบอกด้วยแท่งสแตนเลสสตีลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร

4.3.2 ระบบให้แรงดึง

ระบบให้แรงดึงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (รูปที่ 3 และ 4) ก็ได้รับการพัฒนาขึ้นมาใหม่เช่นกัน ระบบดังกล่าวสามารถควบคุมประวัติการให้แรงได้อย่างแม่นยำ โดยมีความสามารถให้แรงดึงสูงสุดเท่ากับ 9 kN (900 กิโลกรัม) แรงดึงถูกสร้างจากส่วนต่างของแรงดันอากาศระหว่างห้องทางด้านล่างและด้านบนของกระบอกลมแบบ Double-Action ซึ่งแรงดันอากาศในห้องด้านล่างของกระบอกลมจะถูกควบคุมด้วยทรานสดิวเซอร์ Electro-Pneumatic (EP) ในขณะที่แรงดันอากาศในห้องด้านบนของกระบอกลมจะถูกควบคุมให้คงที่ผ่านทางเรกูเลเตอร์ เพื่อให้การตอบสนองเป็นไปอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องเปลี่ยนอัตราการให้แรงหรือเปลี่ยนทิศทางการ

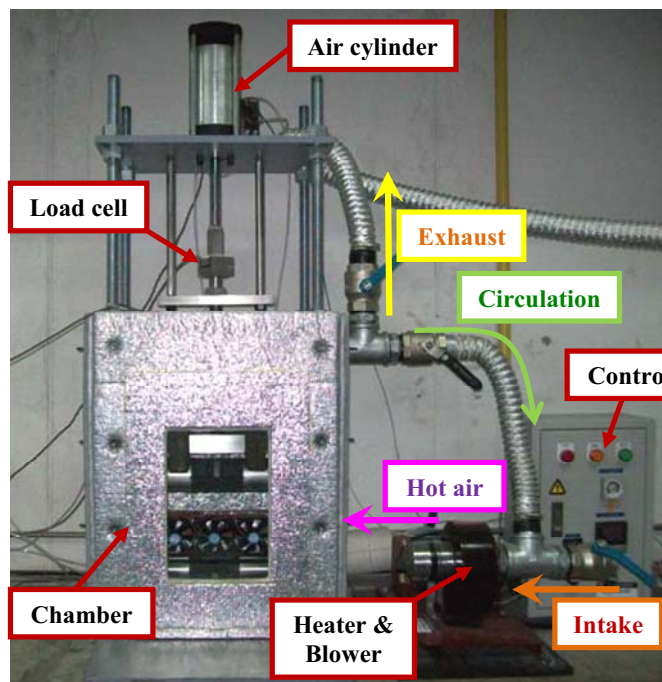
ให้แรง การไหลของอากาศที่ห้องด้านล่างจะถูกขยายด้วย Air-Booster ในการทดสอบจะวัดแรงดึงด้วยโหลดเซลล์ที่ต่อเข้ากับอุปกรณ์จับตัวอย่าง

4.3.3 ตู้ควบคุมอุณหภูมิ

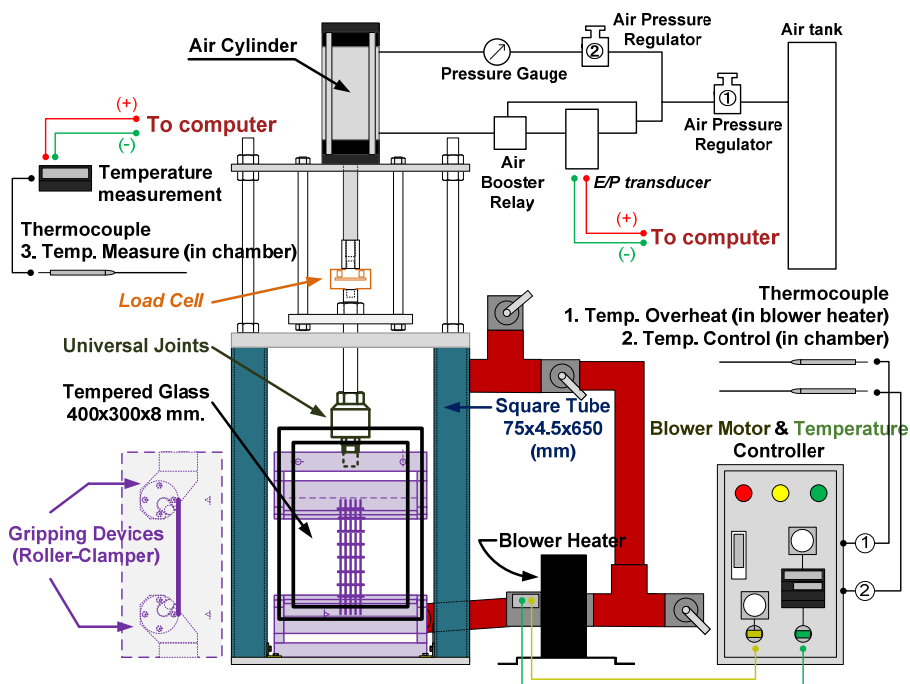
ตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (รูปที่ 3 และ 4) ก็ได้รับการพัฒนาขึ้นมาใหม่เช่นกัน โดยสร้างประกอบเข้าไปกับเฟรมที่ใช้ดังตัวอย่าง ตู้ควบคุมอุณหภูมินี้มีขนาดกว้าง x ยาว x สูงเท่ากับ 35 x 50 x 64 เซนติเมตร สร้างโดยติดตั้งเหล็กกล่องเข้าไปครอบกับเสาทั้งสี่ต้นของเฟรมเครื่องดังตัวอย่าง และใช้แผ่นไม้อัดหนา 10 เซนติเมตร สร้างเป็นกำแพงล้อมรอบ แผ่นไม้อัดที่นำมาใช้จะถูกประกบด้วยฉนวนกันความร้อนที่ทำจากโฟม PE ที่มีแผ่นอลูมิเนียมประกบกันทั้งสองด้าน บริเวณด้านหน้าของตู้ควบคุมอุณหภูมิจะติดตั้งกระจกนิรภัยเข้าไปเพื่อใช้ในการสังเกตตัวอย่างระหว่างการทดสอบ

4.3.4 ระบบให้ลมร้อนและระบบควบคุมอุณหภูมิ

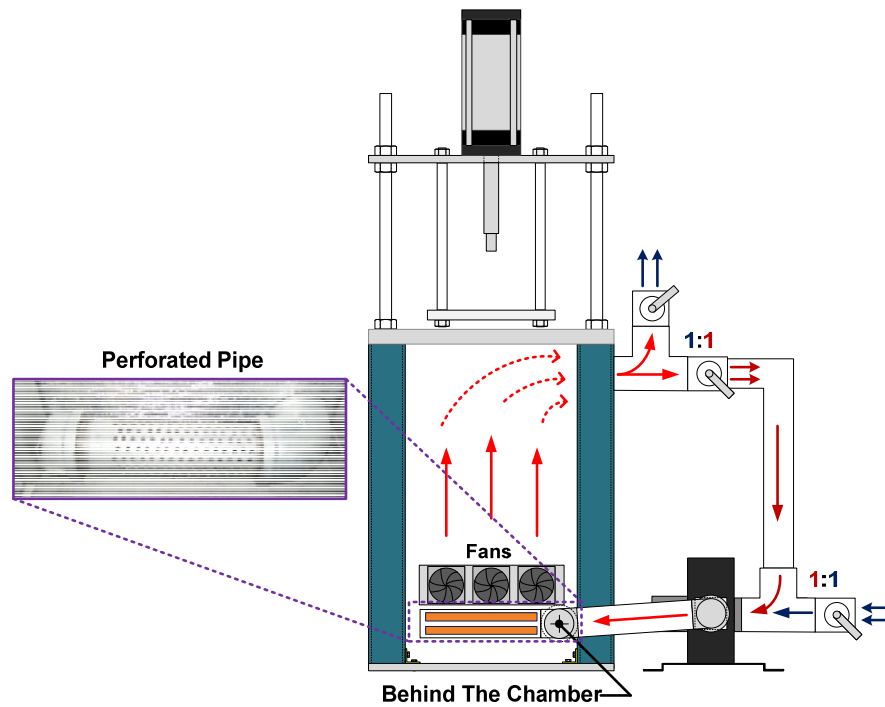
ระบบให้ลมร้อนที่พัฒนาขึ้นเพื่องานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วยโบวเวอร์, ฮีทเตอร์, ชุดควบคุมอุณหภูมิแบบย้อนกลับ และเครือข่ายของท่อลมดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 ระบบดังกล่าวมีหลักการทำงานดังนี้ เริ่มจากอากาศจะถูกส่งมายังโบวเวอร์และส่งต่อไปยังฮีทเตอร์ แล้วอากาศร้อนที่ได้จะถูกถ่ายเทไปยังตู้ควบคุมอุณหภูมิผ่านทางท่อที่ติดตั้งทางด้านล่าง จากนั้นลมร้อนจะถูกกระจายผ่านท่อพรุน (รูปที่ 5) อากาศร้อนภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิจะถูกกระจายอย่างสม่ำเสมอด้วยชุดพัดลม จากนั้นอากาศร้อนจะถูกระบายออกจากตู้ควบคุมอุณหภูมิทางด้านบน โดยที่อากาศร้อนประมาณครึ่งหนึ่งจะถูกระบายทิ้ง ส่วนอีกครึ่งหนึ่งจะถูกผสมกับอากาศเย็นในอัตราส่วน 1:1 ก่อนที่จะถูกส่งกลับยังโบวเวอร์ เพื่อให้การควบคุมอุณหภูมิทำได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ ซึ่งก่อนการทดลองจริงได้ทำการตรวจสอบการกระจายความร้อนภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิด้วยการอ่านค่าอุณหภูมิจากเทอร์โมมิเตอร์ที่ติดตั้งหลายๆ บริเวณภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิ (รูปที่ 6) ซึ่งพบว่าความแตกต่างที่มากที่สุดมีค่าน้อยกว่า 1 องศาเซลเซียส ค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิล (อธิบายที่หลัง) ซึ่งติดตั้งภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิ จะถูกนำมาใช้ในการควบคุมฮีทเตอร์แบบย้อนกลับผ่านทางระบบควบคุม จากการทดสอบด้วยระบบควบคุมอุณหภูมิและตู้ควบคุมอุณหภูมิที่พัฒนาขึ้น พบว่า ประสิทธิภาพของตู้ควบคุมอุณหภูมิภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิจะถูกวัดจากเทอร์โมคัปเปิลอีกอันหนึ่งที่ติดตั้งใกล้ๆ กันกับอันที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิ (ทั้งสองอันเป็นอิสระจากกัน) และถูกบันทึกด้วยคอมพิวเตอร์ รูปที่ 7 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิกับเวลา จากรูปดังกล่าวจะเห็นได้ว่า อุณหภูมิที่วัดได้มีความใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายมาก



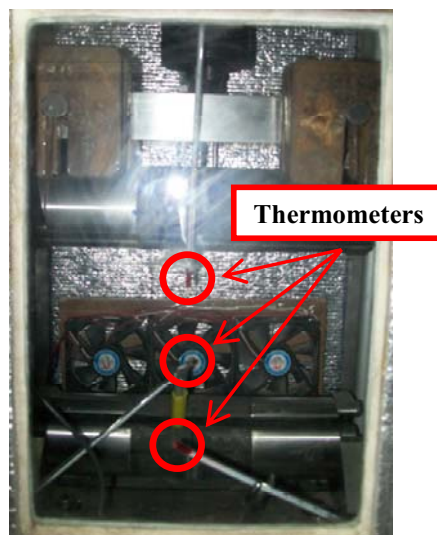
รูปที่ 3 ตู้ควบคุมอุณหภูมิและระบบให้ลมร้อนที่พัฒนาขึ้นมาเพื่องานวิจัยนี้



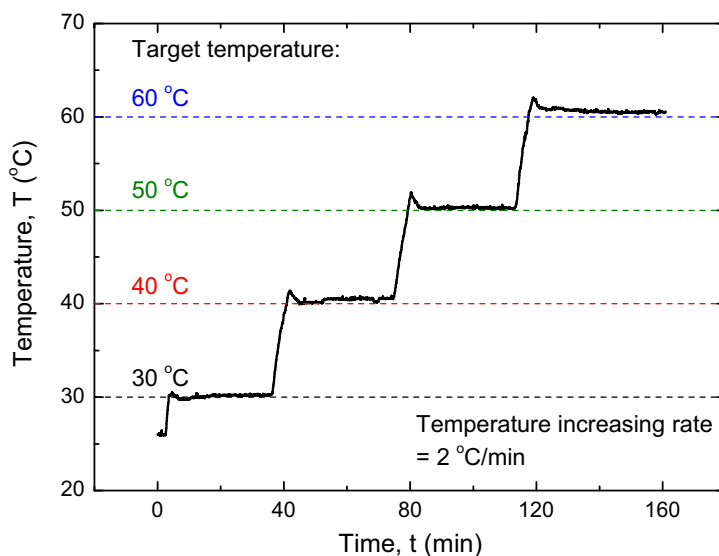
รูปที่ 4 แผนภาพแสดงรายละเอียดเครื่องทดสอบแรงดึงที่สามารถควบคุมประวัติแรงดึงและอุณหภูมิได้



รูปที่ 5 แผนภาพแสดงการไหลเวียนของอากาศร้อนภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 6 การติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์หลายๆ ตำแหน่งภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิเพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ



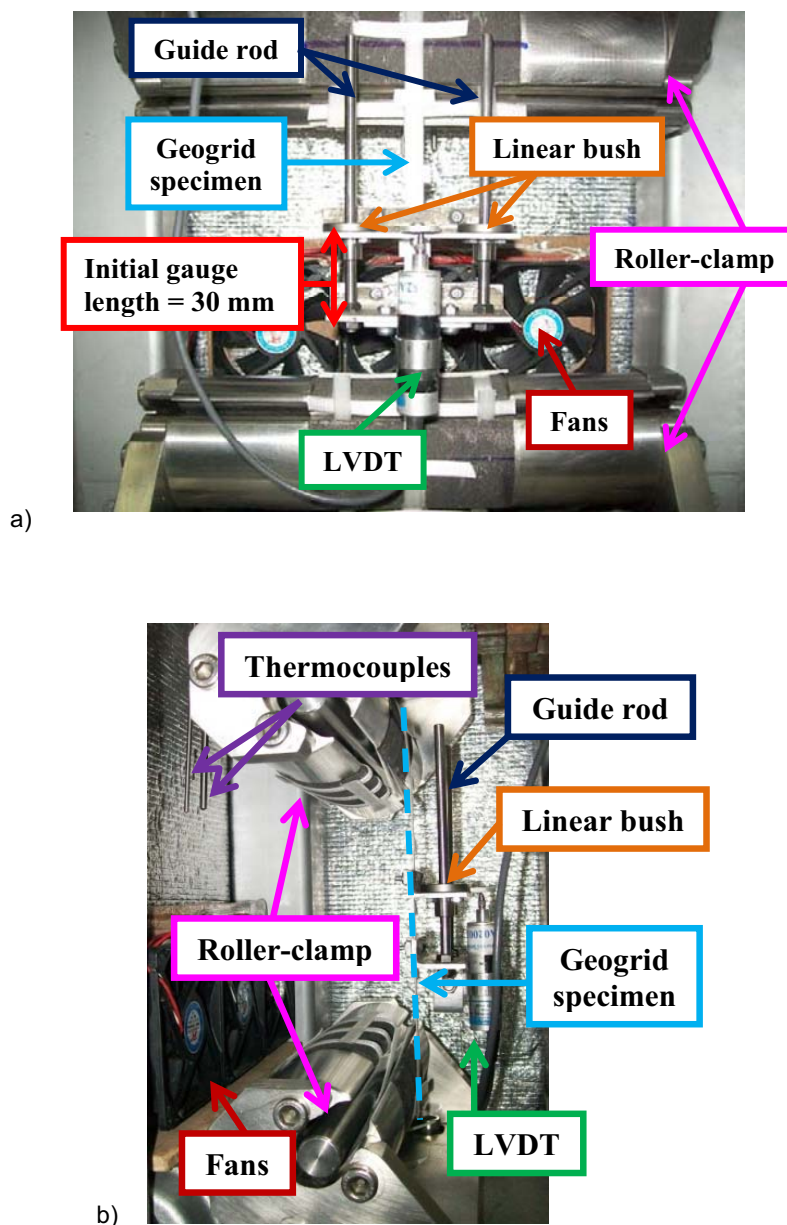
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิและเวลา

4.4 ตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างแผ่นใยสังเคราะห์จีโอกริดประกอบไปด้วยหนึ่งหรือสองเส้น ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าแรงดึงสูงสุดที่พึงได้จากตัวอย่างเมื่อเทียบกับความสามารถในการให้แรงดึงของเครื่องทดสอบ ทั้งนี้ ตัวอย่างทั้งหมดมีความยาวเริ่มต้นที่ประมาณ 900 มิลลิเมตร และมีความยาวเมื่อติดตั้งกับอุปกรณ์จับตัวอย่างแล้วประมาณ 24 เซนติเมตร

ความเครียดดึงที่เกิดจากการยึดวัดได้ด้วย LVDT ที่ติดตั้งเข้ากันกับชุดเฟรมขนาดเล็กที่ยึดเข้ากับตัวอย่างเพื่อวัดการยืดตัวเฉพาะจุดด้วย Gage Length เท่ากับ 3 เซนติเมตร (รูปที่ 8a และ 8b) ชุดเฟรมจะช่วยให้เกิดการยึดและหดตัวในแนวแกนเท่านั้น โดยบังคับไม่ให้เกิดการหมุน จึงทำให้ค่าการยืดตัวที่อ่านได้มีความแม่นยำ LVDT ที่ใช้สามารถใช้งานได้ภายใต้อุณหภูมิระหว่าง -10 ถึง 70 องศาเซลเซียสโดยไม่ต้องปรับแก้ตามคำแนะนำของผู้ผลิต

แรงดึงในตัวอย่างจะวัดโดยโหลดเซลล์ที่ติดตั้งเข้ากับอุปกรณ์จับตัวอย่างทางด้านบน ตัวอย่างจะถูกดึงด้วยแรงดึงเบื้องต้นเท่ากับ 20 นิวตัน เพื่อลด Bedding Errors ระหว่างผิวตัวอย่างและผิวของอุปกรณ์จับตัวอย่าง การทดสอบจะดำเนินไปภายใต้การควบคุมอุณหภูมิภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิซึ่งมีค่าระหว่าง 25 ถึง 70 องศาเซลเซียส ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดสอบประกอบไปด้วย: 1) แรงดึง, 2) ระยะยืด และ 3) อุณหภูมิ ซึ่งจะถูกจัดบันทึกโดยอัตโนมัติผ่านทางคอมพิวเตอร์



รูปที่ 8 รายละเอียดแสดงการติดตั้งตัวอย่างเข้ากับอุปกรณ์จับตัวอย่างและการติดตั้ง LVDT เพื่อการวัดระยะยืด: a) ด้านหน้า และ b) ด้านข้าง

4.5 โปรแกรมการทดสอบ

4.5.1 การทดสอบการแรงการคืบ

การทดสอบการแรงการคืบ ใช้วิธีการแบบ Stepped Isothermal Method (SIM) ซึ่งทดสอบตามวิธีการที่ระบุในมาตรฐาน ASTM D 6992 – 03 (Standard Test Method for Accelerated Tensile Creep and Creep-Rupture of Geosynthetic Materials Based on Time-Temperature Superposition Using the Stepped Isothermal Method) และ GRI Test Method GS10 (Accelerated Tensile Creep and Creep-Rupture of Geosynthetic Materials Based on Time-Temperature Superposition Using the Stepped Isothermal

Method) ประเภทของแผ่นใยสังเคราะห์ที่ใช้ทดสอบคือ Reinforcement 1 (Polypropylene) โดยเลือกทดสอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 27, 35, 43 และ 51 องศาเซลเซียส เมื่อต้องการเพิ่มอุณหภูมิจากชั้นหนึ่งไปยังอีกชั้นหนึ่งจะควบคุมอัตราให้คงที่ที่ 2 องศาเซลเซียสต่อนาที

ในการทดสอบ SIM จะต้องควบคุมประวัติการให้แรงดึงและอุณหภูมิสองรูปแบบดังนี้

1. การให้แรงดึงอย่างต่อเนื่องที่อัตรา 3 kN/m/min ในขณะที่ควบคุมอุณหภูมิคงที่ที่ 27 องศาเซลเซียสจนกระทั่งถึงค่าแรงดึงเป้าหมาย จากนั้นจึงเริ่มกระบวนการทดสอบ SIM ด้วยการรักษาอุณหภูมิและเพิ่มอุณหภูมิเป็นขั้นๆ ในขณะที่ควบคุมให้แรงดึงที่กระทำต่อตัวอย่างคงที่ การทดสอบแบบนี้กระทำที่ค่าแรงดึงเป้าหมายที่แตกต่างกันสามค่า
2. การให้แรงคงค้าง (Sustained Loading) เป็นระยะเวลา 10,000 วินาทีภายหลังจากที่เพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 2 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งถึงค่าอุณหภูมิเป้าหมายค่าถัดไป โดยที่อุณหภูมิภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิจะเพิ่มเป็นขั้นๆ อีกสามครั้งระหว่าง 35, 43 และ 51 องศาเซลเซียส ในระหว่างที่ไม่มีการเพิ่มอุณหภูมิ อุณหภูมิจะถูกควบคุมให้คงที่เป็นระยะเวลา 10,000 วินาที

การทดสอบ SIM ทำขึ้นเพื่อสร้างชุดของ Master Curves จาก Master Curves ด้วยการสมมติให้ตัวอย่างแผ่นใยสังเคราะห์ที่โอกริดเกิดการฉีกขาดเมื่อค่าความเครียดดึงเท่ากับค่าความเครียดที่จุดฉีกขาดที่อุณหภูมิอ้างอิง จะทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับเวลาหรือ Creep Rupture Curve

4.5.2 การทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดึงสูงสุดและคุณสมบัติอีลาสติก

ในการทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดึงสูงสุดและคุณสมบัติอีลาสติก อุณหภูมิภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิห้องไปยังอุณหภูมิเป้าหมายที่อัตรา 2 องศาเซลเซียสต่อนาที จากนั้นจะควบคุมอุณหภูมิให้คงที่เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อจะทำให้ตัวอย่างแผ่นใยสังเคราะห์ที่โอกริดอยู่ในภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใหม่ เมื่อครบเวลาค่าความเครียดจะถูกตั้งให้เท่ากับศูนย์แล้วจึงเพิ่มแรงดึงที่กระทำต่อตัวอย่างตามรูปแบบที่กำหนดและได้โปรแกรมเอาไว้แล้ว สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกอุณหภูมิเป้าหมายไว้ที่ 30, 35, 40, 45 และ 50 องศาเซลเซียส สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene) และ Reinforcement 2 (High-density polyethylene; HDPE) และที่ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส สำหรับ Reinforcement 3 (Polyester) ซึ่งจะควบคุมให้คงที่ตลอดการทดสอบในขณะที่การให้แรงดึงกระทำดังต่อไปนี้

1. การให้แรงดึงอย่างต่อเนื่องที่อัตรา 0.6 kN/m/min จนกระทั่งตัวอย่างแผ่นใยสังเคราะห์ที่โอกริดฉีกขาด
2. ในระหว่างการดึงตัวอย่างอย่างต่อเนื่อง ให้แรงกระทำแบบวัฏจักรด้วยดัมเบลแอมพลิจูดขนาดเท่ากับ 2 kN/m ภายหลังจากการให้แรงคงค้าง (Sustained Loading) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่ค่าแรงดึงหลายๆ ค่าเพื่อหาค่าอีลาสติกสตีเฟนส์ที่ระดับแรงดึงและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

5. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

5.1 บทนำ

เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องทดสอบแรงดึงแผ่นใยสังเคราะห์ที่สามารถควบคุมได้ทั้งประวัติการให้แรงและประวัติการให้อุณหภูมิ จึงได้ทำการทดสอบ Stepped Isothermal Method (SIM) กับตัวอย่างแผ่นใยสังเคราะห์ Reinforcement 1 (Polypropylene) จากนั้นจึงได้ทำการทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติอีลาสติกและกำลังรับแรงดึงสูงสุดต่อไป

5.2 การทดสอบ Stepped Isothermal Method (SIM)

5.2.1 บทนำ

ในการออกแบบการใช้งานแผ่นใยสังเคราะห์จีโอกริด จะต้องพิจารณาให้ค่ากำลังรับแรงดึงลดลงกับเวลาเสมอ ซึ่งวิธีปฏิบัติในปัจจุบัน ได้ถูกเสนอขึ้นมาเพื่อป้องกันการประลัยของโครงสร้างดินเสริมแรงเมื่อออกแบบสำหรับการใช้งานในระยะยาว โดยทั่วไป หากทราบน้ำหนักที่ติดตั้งอย่างแผ่นใยสังเคราะห์จีโอกริดและระยะเวลาที่ต้องคงค้ำน้ำหนักเอาไว้จนกว่าจะเกิดการฉีกขาด ก็จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงและล็อกการไถ้มของเวลา หรือที่เรียกว่า Creep-Rupture Curve ซึ่งเส้นโค้งนี้ได้จากการทดสอบ Conventional Creep Rupture ซึ่งเป็นการทดสอบที่ไม่ซับซ้อน แต่ใช้เวลานานมากๆ อาจเป็นปีๆ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาวิธีการทดสอบการเร่งการคืบด้วยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิแวดล้อมที่ใช้ในการติดตั้งตัวอย่าง หรือที่เรียกว่า Stepped Isothermal Method (SIM) ซึ่งการทดสอบด้วยวิธีนี้สามารถทำได้ด้วยเวลาที่สั้นกว่ามากๆ ดังนั้นจึงได้รับความนิยมมากขึ้นตามลำดับ

ในงานวิจัยนี้ การทดสอบ SIM ทำขึ้นเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องมือทดสอบแรงดึงที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่ โดยการแปลงผลในรูปของค่าลดทอนเนื่องจากการคืบ (Creep Reduction Factor) แล้วทำการเปรียบเทียบกับค่าที่แนะนำในมาตรฐานโดย FHWA (2001)

5.2.2 การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบ SIM

ตารางที่ 2 แสดงรายละเอียดค่าแรงดึงเป้าหมายและอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ SIM และตารางที่ 3 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบ SIM ขั้นตอนในการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบ SIM มีดังนี้

- 1) คำนวณและสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงและค่าโมดูลัส (Modulus) กับค่าความเครียดดึง ดังแสดงในรูปที่ 9
- 2) สร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึง (Tensile Load) และค่าความเครียดการคืบ (Creep Strain) กับเวลา และความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึง (Tensile Load) ดังแสดงในรูปที่ 10 และค่าโมดูลัสการคืบ (Secant or Creep Modulus) กับเวลาดังแสดงในรูปที่ 11
- 3) สร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดดึงที่วัดได้กับเวลา ก่อน Rescaling ที่ค่าแรงดึงที่แตกต่างกันตามที่ทดสอบที่ $V = 54.3, 58.6$ and 62.9 kN/m แสดงในรูปที่ 12a, b และ c ตามลำดับ ในรูปดังกล่าว t' คือเวลาที่จุดเริ่มต้นของการให้แรงดึงคงค้างในแต่ละอุณหภูมิ ดังนั้น t'_0, t'_1, t'_2 และ t'_3 คือเวลาที่จุดเริ่มต้นของการให้แรงดึงคงค้างที่อุณหภูมิเท่ากับ 27, 35, 43 และ 51 องศาเซลเซียส และ $t-t'$ คือระยะเวลาที่ล่วงผ่านระหว่างการให้แรงดึงคงค้างในแต่ละอุณหภูมิ
- 4) สร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดการคืบ (Creep Strain) และค่าโมดูลัสการคืบ (Creep Modulus) กับเวลาในสเกลล็อกการไถ้มโดยเรียงข้อมูลเวลาใหม่ (Rescaling) ให้แต่ละการคืบในแต่ละช่วงอุณหภูมิเริ่มที่เวลาเริ่มต้นการคืบเท่ากับ $t-t'$ ดังแสดงในรูปที่ 13 และ 14 ตามลำดับ
- 5) ทำการปรับแก้ค่าความเครียดการคืบ (Creep Strain) และค่าโมดูลัสการคืบ (Creep Modulus) โดยเลื่อนค่าความสัมพันธ์ที่ได้ก่อนหน้านี้เฉพาะส่วนที่เป็นเส้นตรงเท่านั้นในแนวตั้ง (Vertical Shift) กล่าวคือให้ตัดค่าที่ไม่เป็นเส้นตรงออกไปก่อน เพื่อให้ค่าความเครียดการคืบกับค่าโมดูลัสการคืบที่จุดสุดท้ายของอุณหภูมิก่อนหน้านี้ เท่ากับค่าที่จุดเริ่มต้นของอุณหภูมิถัดไปภายหลังการเพิ่มอุณหภูมิแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 15 และ 16 ตามลำดับ
- 6) ทำการปรับแก้เวลาโดยเลื่อนค่าความสัมพันธ์ที่ได้ก่อนหน้านี้ในแนวนอน (Horizontal Shift) โดยเลื่อนความสัมพันธ์จากส่วนที่ได้จากอุณหภูมิสูงกว่าไปทางขวา ผลลัพธ์ที่ได้คือ Master Curve จากการ

ทดสอบ SIM ที่ค่าแรงดึงเป้าหมายที่กำหนดในรูปของค่า Creep Strain และค่า Creep Modulus ดังแสดงในรูปที่ 17a และ 17b ตามลำดับ

- 7) ทำการหาระยะเวลาที่ทำให้วัสดุโพลิโพรไพลีนแตกหัก (Time to Rupture) โดยสมมุติว่าให้วัสดุโพลิโพรไพลีนเกิดการแตกหักเมื่อความเครียดดึงมีค่าเท่ากับค่าความเครียดดึงที่จุดแตกหัก (Tensile Strain at Rupture) ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงสูงสุดสำหรับวัสดุโพลิโพรไพลีน ซึ่งเท่ากับ 8 % สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene) จากนั้นจึงสร้างความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและระยะเวลาที่ทำให้วัสดุโพลิโพรไพลีนแตกหัก (Creep Rupture Curve) ดังแสดงในรูปที่ 18

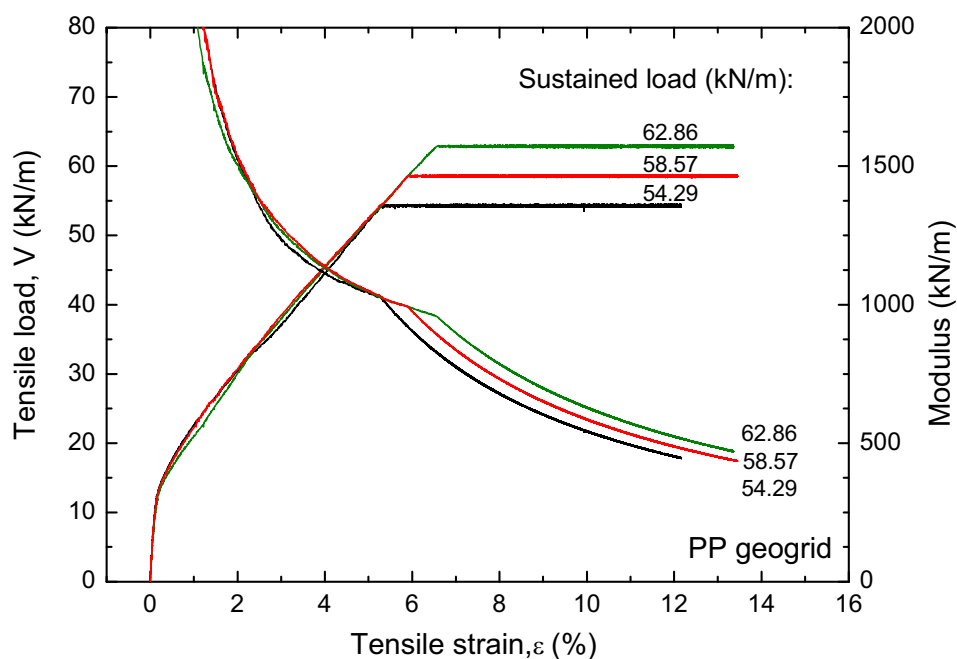
ตารางที่ 2 รายละเอียดของค่าแรงดึงเป้าหมายและอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ SIM กับตัวอย่างแผ่นโพลิโพรไพลีน Reinforcement 1 (Polypropylene)

Test No.	Tensile load, V		Temperature, T (°C)
	(kN/m)	% of V_{ult}^*	
1	54.3	67.9	27, 35, 43 and 51
2	58.6	73.3	27, 35, 43 and 51
3	62.9	78.6	27, 35 and 43

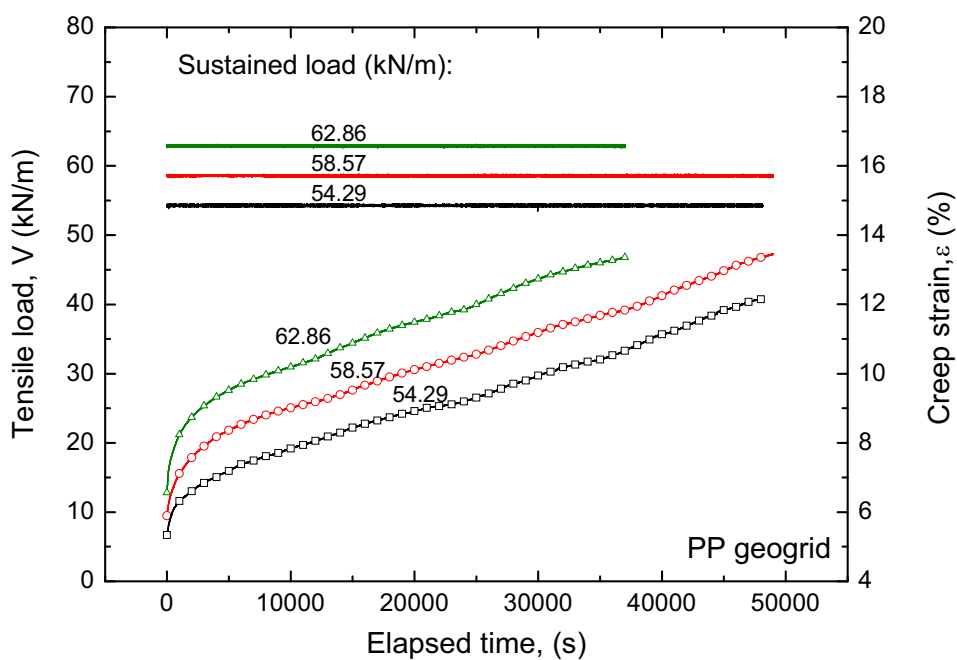
* $V_{ult} = 80$ kN/m

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ SIM กับตัวอย่างแผ่นโพลิโพรไพลีน Reinforcement 1 (Polypropylene)

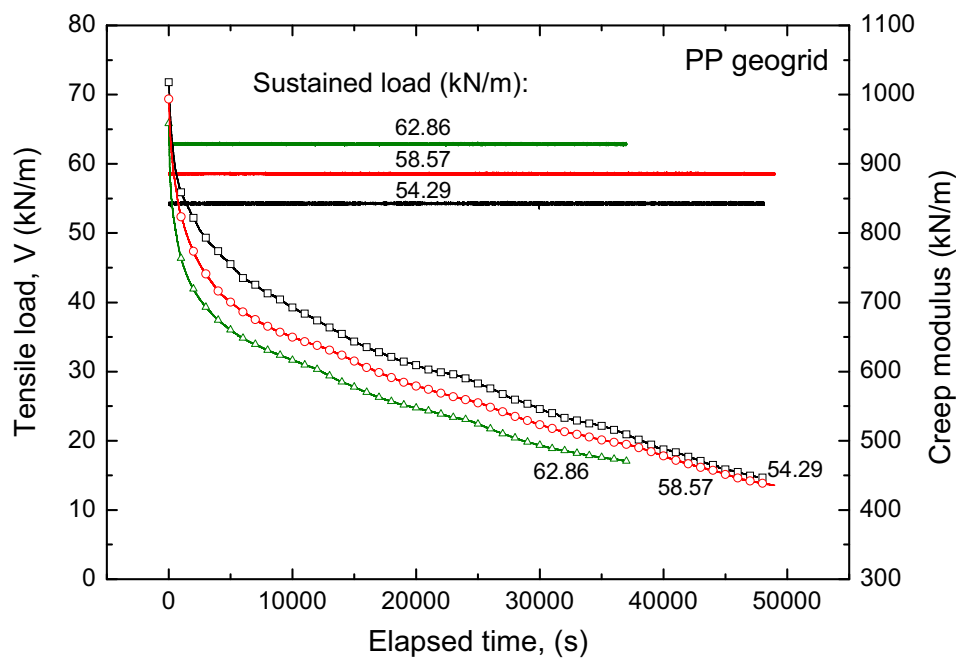
Tensile load, V (kN/m)	Parameters	Values			Average
		27→35 °C	35→43 °C	43→51 °C	
54.3	Modulus shifts	42.125	34.984	28.379	35.163
	Strain shifts	0.521	0.569	0.61	0.566
	Δt_i	3848	4705	3862	4138
	$\Delta (t - t')$	8000	8000	8000	8000
	$\Delta \log_{10}(t - t')$	0.4884	0.4314	0.4873	0.469
58.6	Modulus shifts	33.2	26.252	23.759	27.737
	Strain shifts	0.512	0.522	0.595	0.543
	Δt_i	4080	4075	4094	4083
	$\Delta (t - t')$	8000	8000	8000	8000
	$\Delta \log_{10}(t - t')$	0.4717	0.4717	0.4704	0.4713
62.9	Modulus shifts	33.903	31.254	-	32.578
	Strain shifts	0.617	0.742	-	0.679
	Δt_i	4104	4671	-	4388
	$\Delta (t - t')$	8200	8200	-	8200
	$\Delta \log_{10}(t - t')$	0.4768	0.4402	-	0.4585



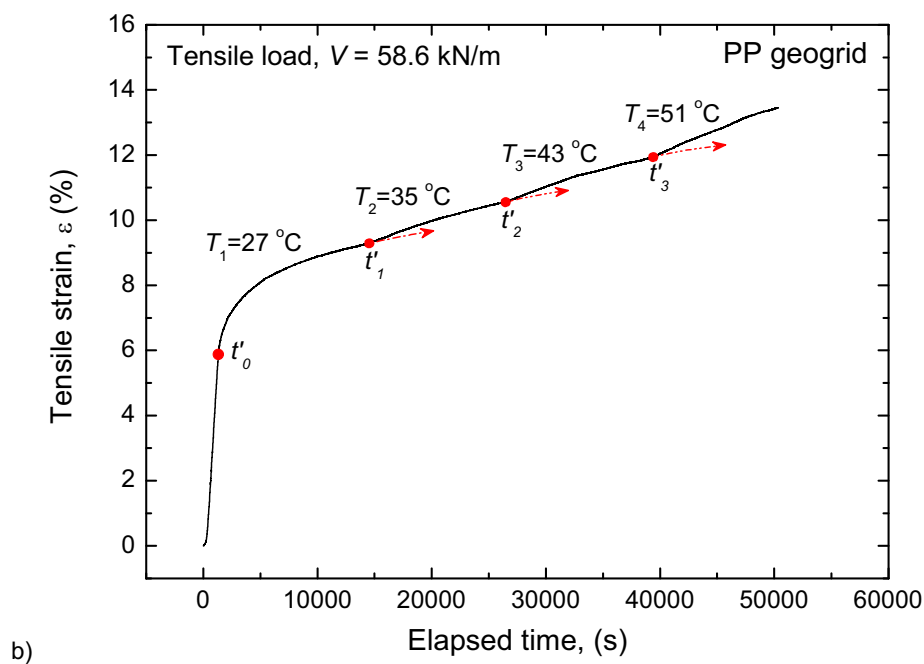
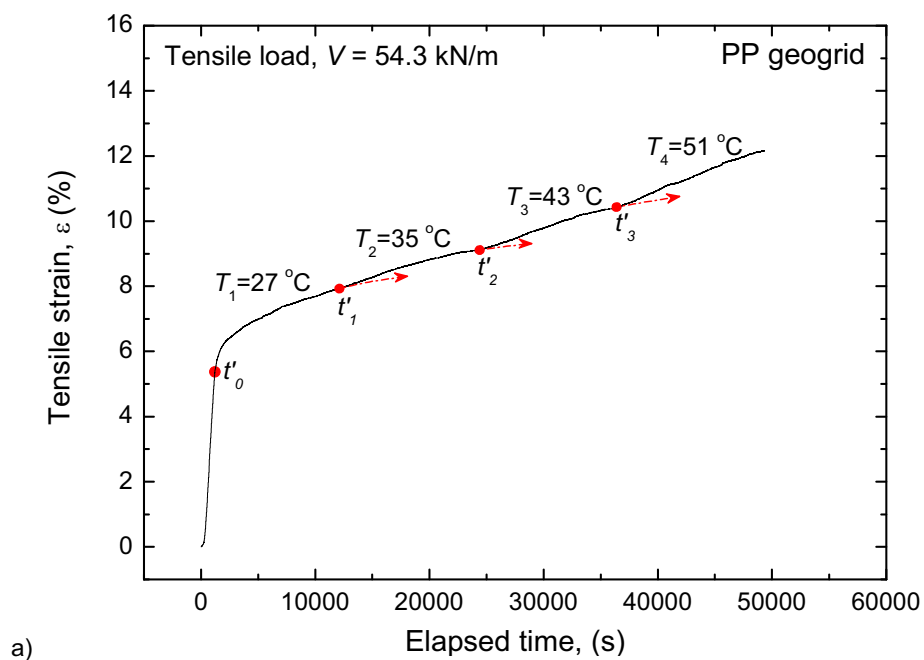
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงกับค่าโมดูลัสที่วัดได้กับค่าความเครียดดึงสำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene)



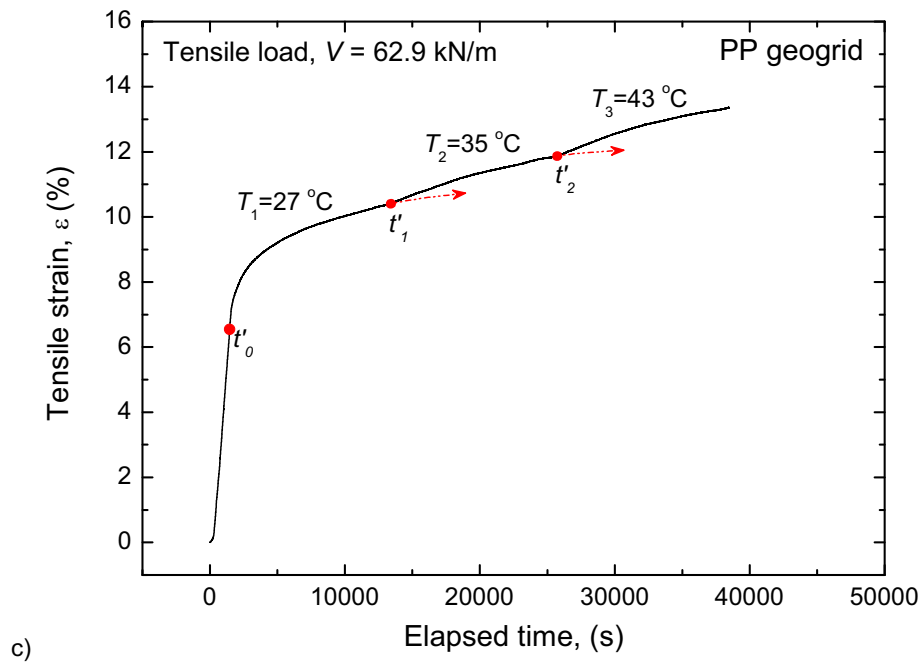
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงกับค่าความเครียดการคืบที่วัดได้กับเวลาสำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene)



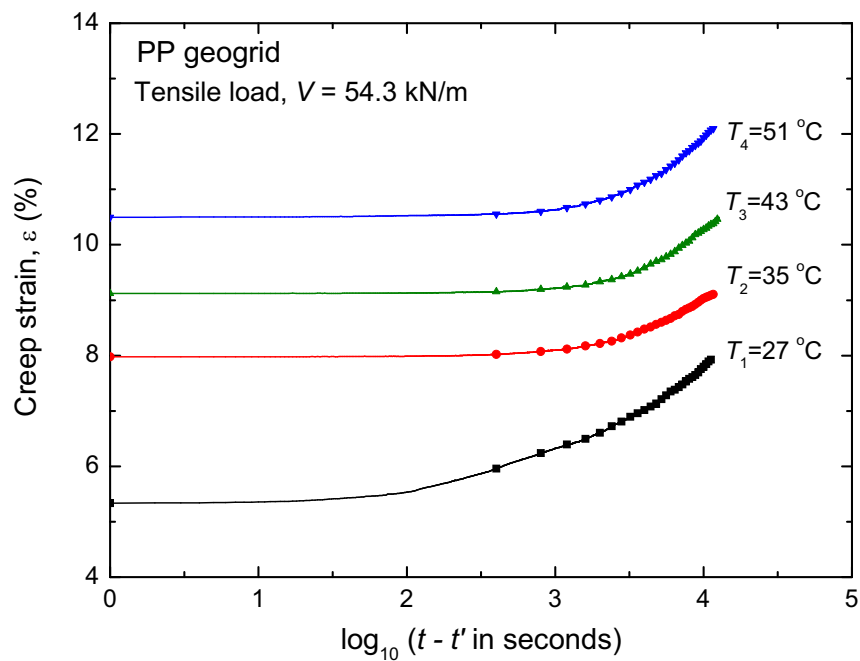
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงกับค่าโมดูลัสการคืบที่วัดได้กับเวลาสำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene)



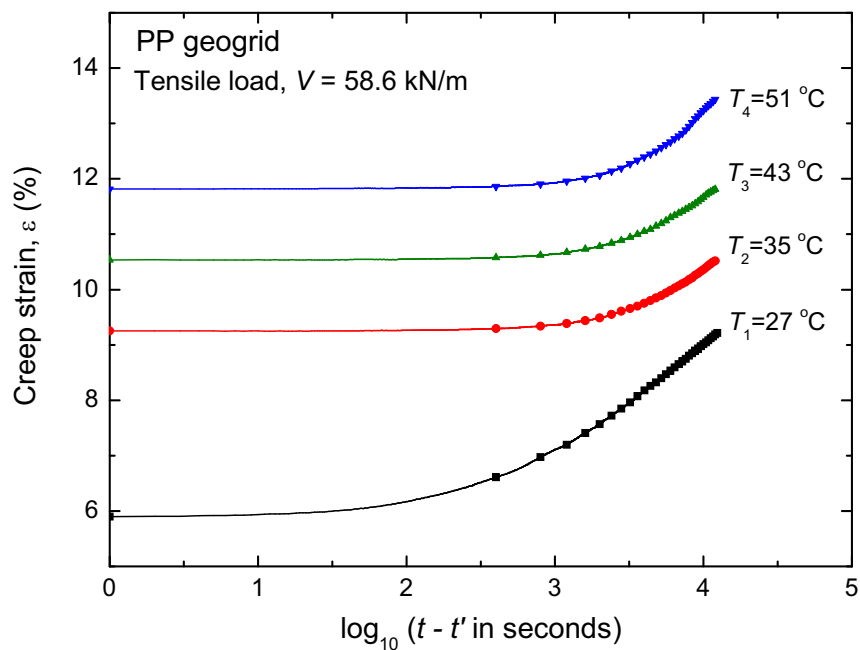
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดดึงที่วัดได้กับเวลา ก่อน Rescaling ที่: a) $V = 54.3 \text{ kN/m}$ และ b) $V = 58.6 \text{ kN/m}$ สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene)



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดดึงที่วัดได้กับเวลา ก่อน Rescaling ที่: c) $V = 62.9 \text{ kN/m}$ สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene)

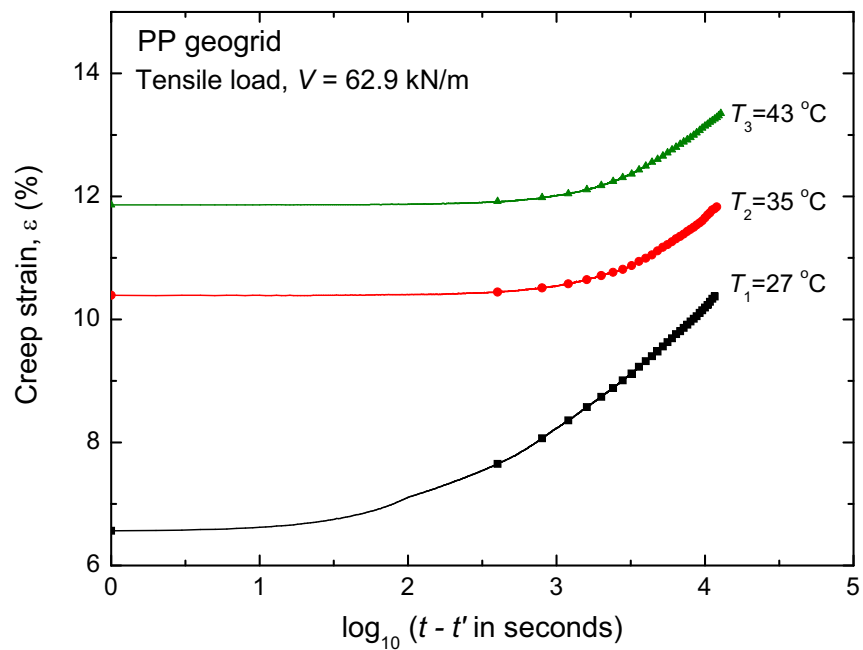


a)



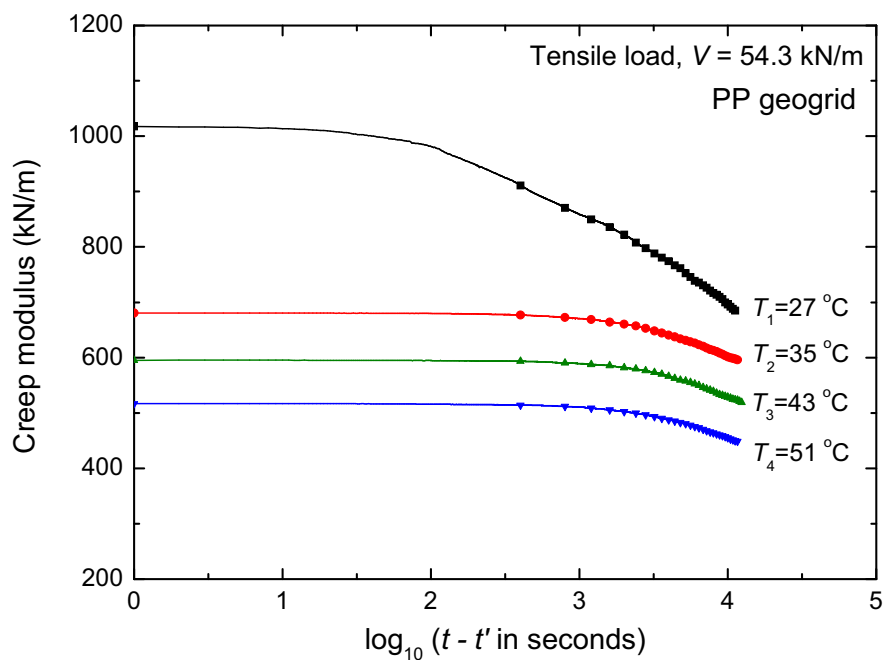
b)

รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดการคืบที่วัดได้กับเวลาในสเกลล็อกการิทึมภายหลัง Rescaling ที่: a) $V = 54.3 \text{ kN/m}$ และ b) $V = 58.6 \text{ kN/m}$ สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene)

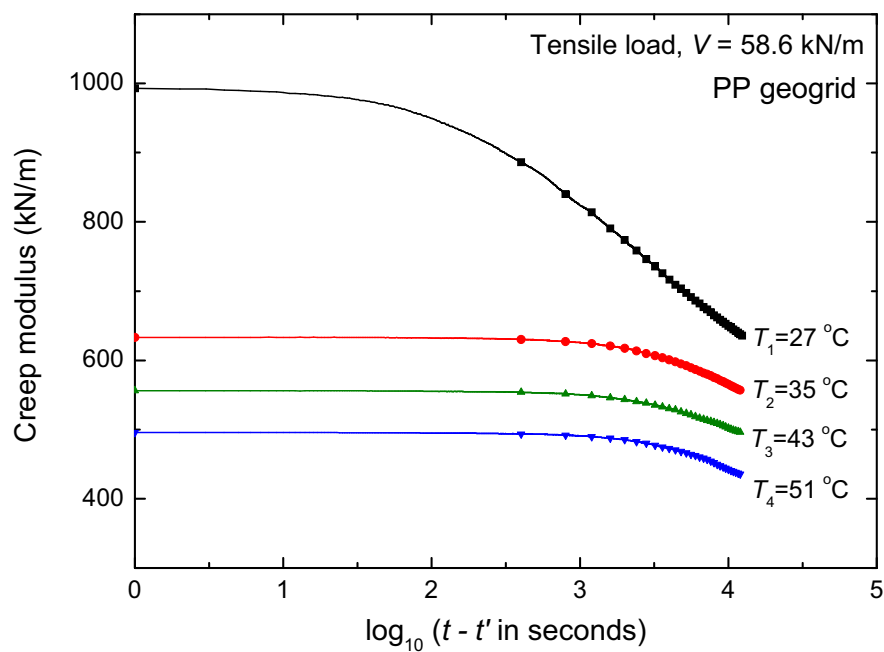


c)

รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดการคืบที่วัดได้กับเวลาในสเกลล็อกการิทึมภายหลัง Rescaling ที่: c) $V = 62.9 \text{ kN/m}$ สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene)

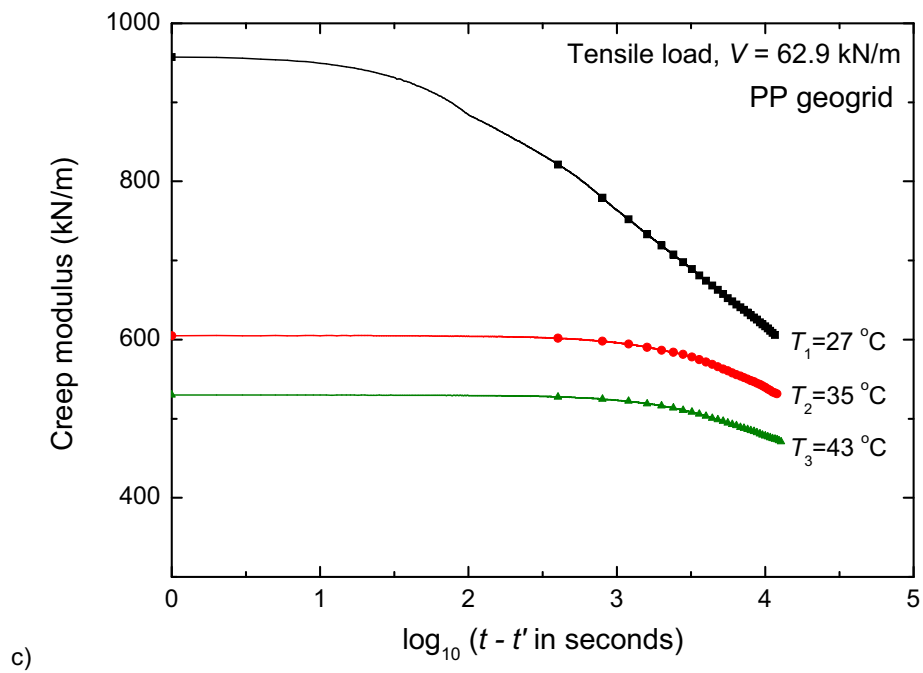


a)

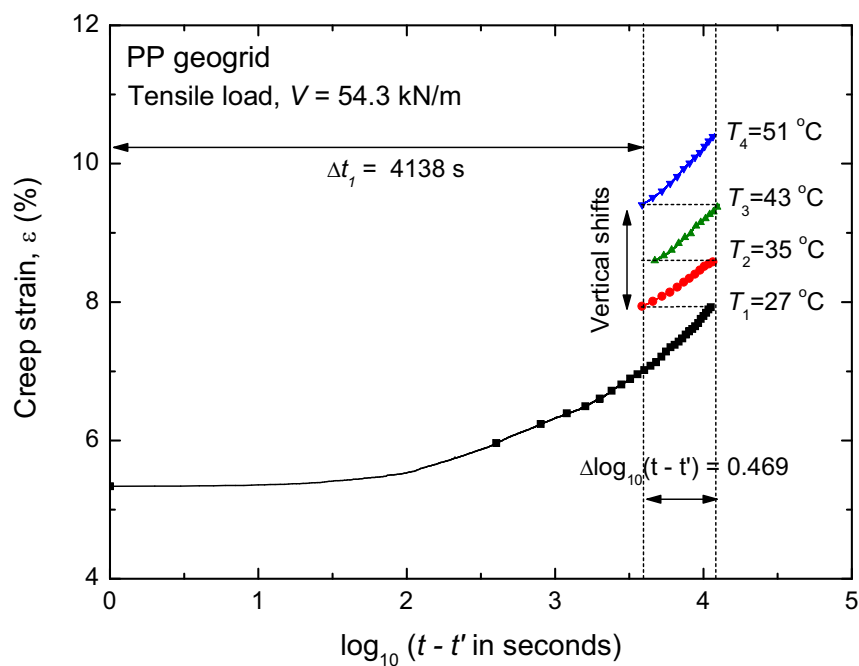


b)

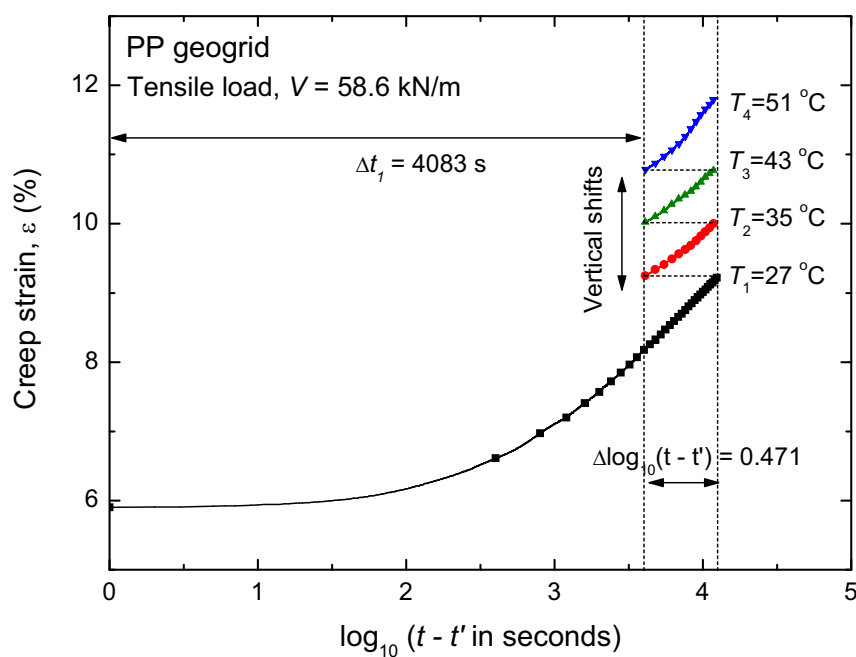
รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสการคืบที่วัดได้กับเวลาในสเกลล็อกการิทึมภายหลัง Rescaling
ที่: a) $V = 54.3 \text{ kN/m}$ และ b) $V = 58.6 \text{ kN/m}$ สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene)



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสการคืบที่วัดได้กับเวลาในสเกลล็อกการิทึมภายหลัง Rescaling
ที่: c) $V = 62.9 \text{ kN/m}$ สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene)

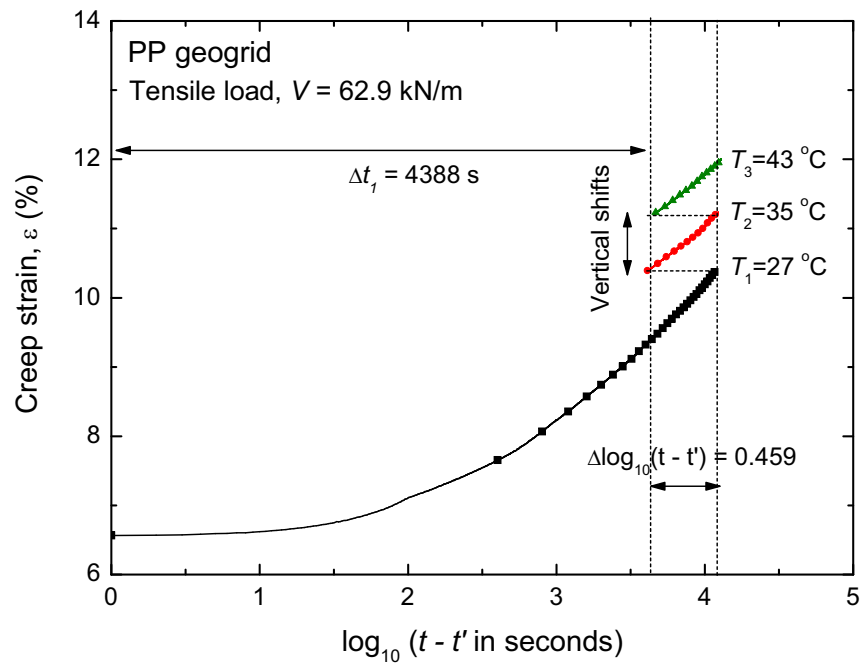


a)



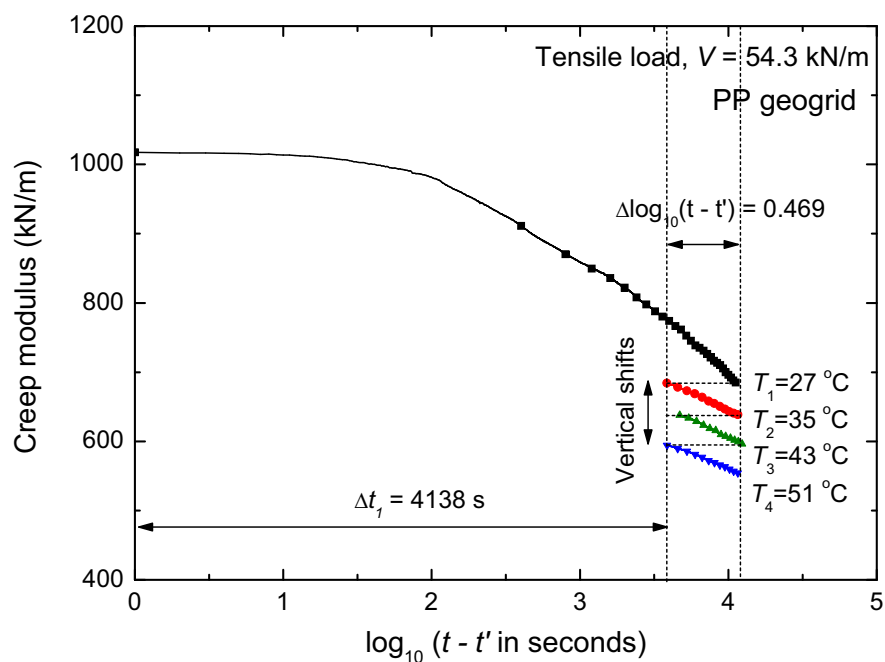
b)

รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดการคืบที่วัดได้กับเวลาในสเกลล็อกการที่มภายหลัง
Vertical shift ที่: a) $V = 54.3 \text{ kN/m}$ และ b) $V = 58.6 \text{ kN/m}$ สำหรับ Reinforcement 1
(Polypropylene)

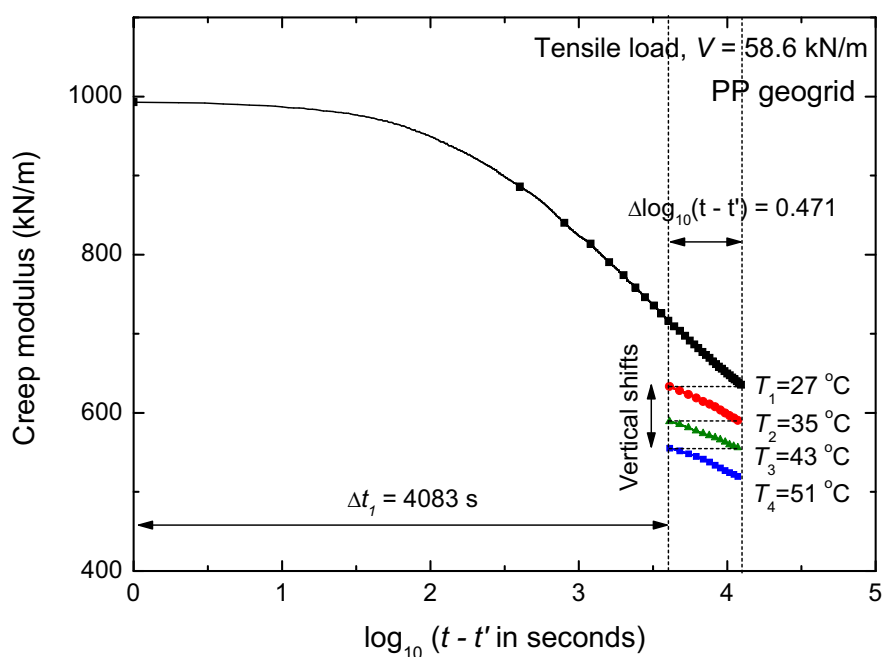


c)

รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดการคืบที่วัดได้กับเวลาในสเกลล็อกการิทึมภายหลัง
Vertical shift ที่: c) $V = 62.9 \text{ kN/m}$ สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene)

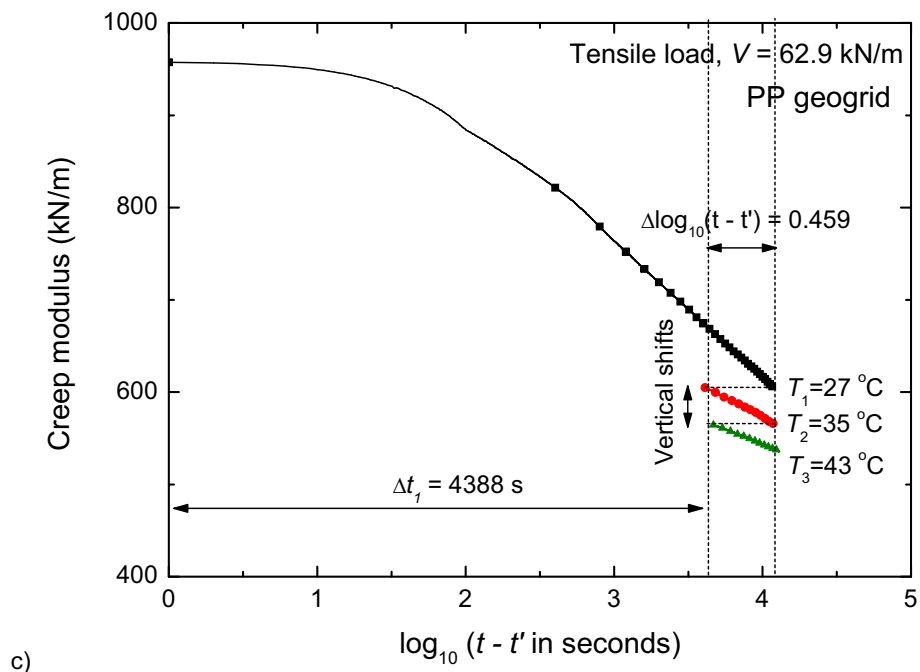


a)

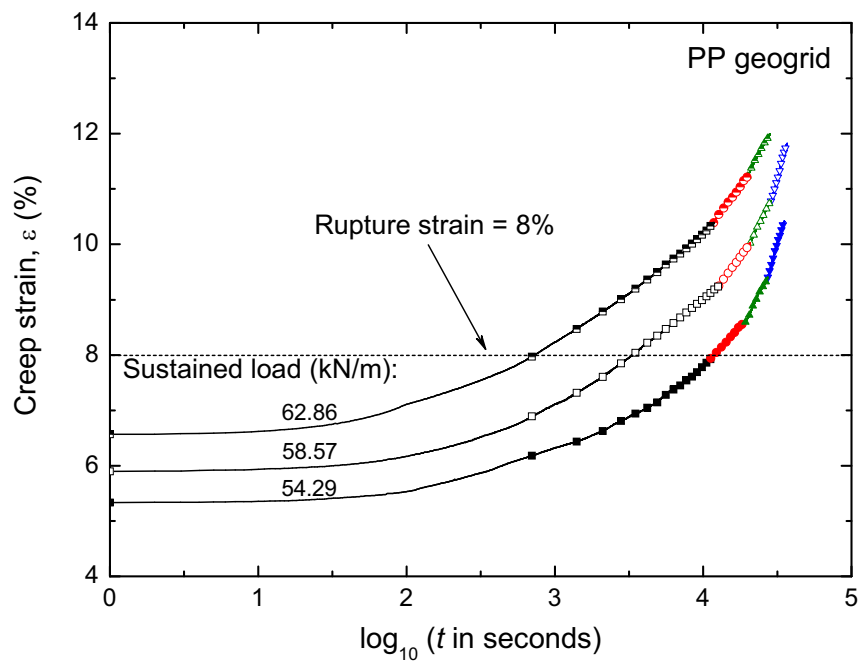


b)

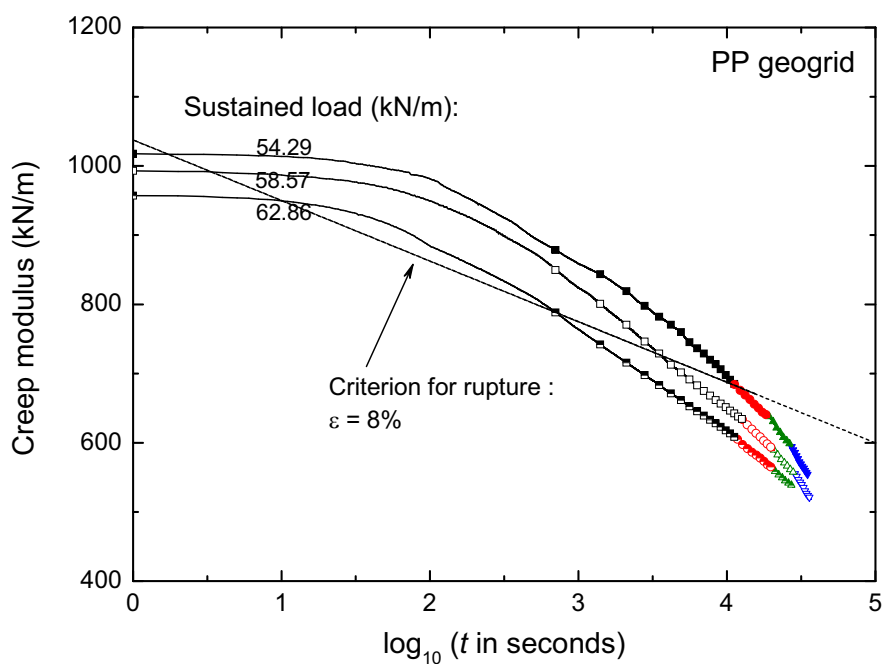
รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสการคืบที่วัดได้กับเวลาในสเกลล็อกการิทึมภายหลังจาก Vertical Shift ที่: a) $V = 54.3 \text{ kN/m}$ และ b) $V = 58.6 \text{ kN/m}$ สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene)



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสการคืบที่วัดได้กับเวลาในสเกลล็อกการิทึมภายหลังจาก Vertical Shift ที่: c) $V = 62.9 \text{ kN/m}$ สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene)

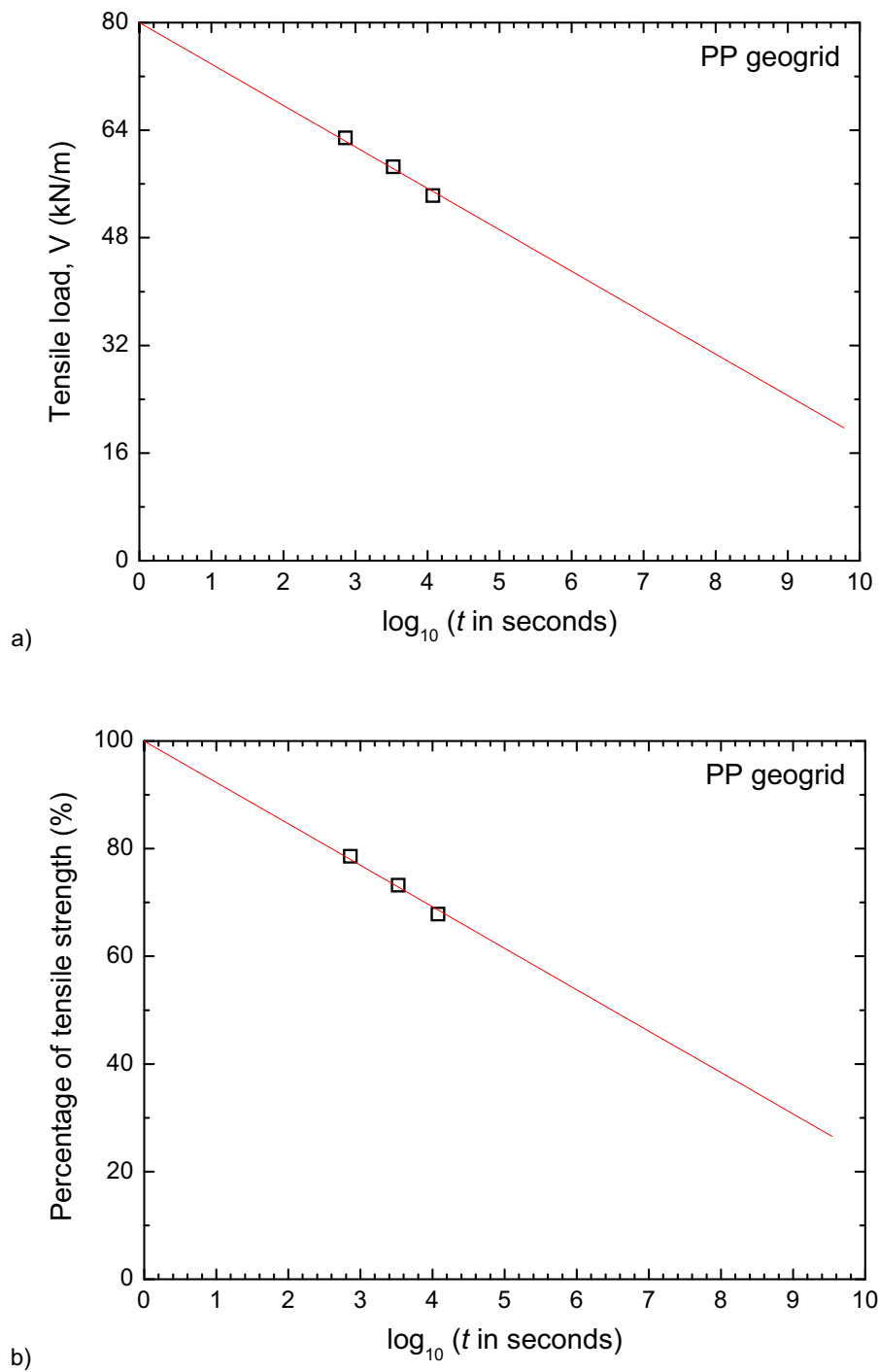


a)



b)

รูปที่ 17 Master curves ในรูปแบบของ: a) Creep Strain และ b) Creep Modulus สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene)

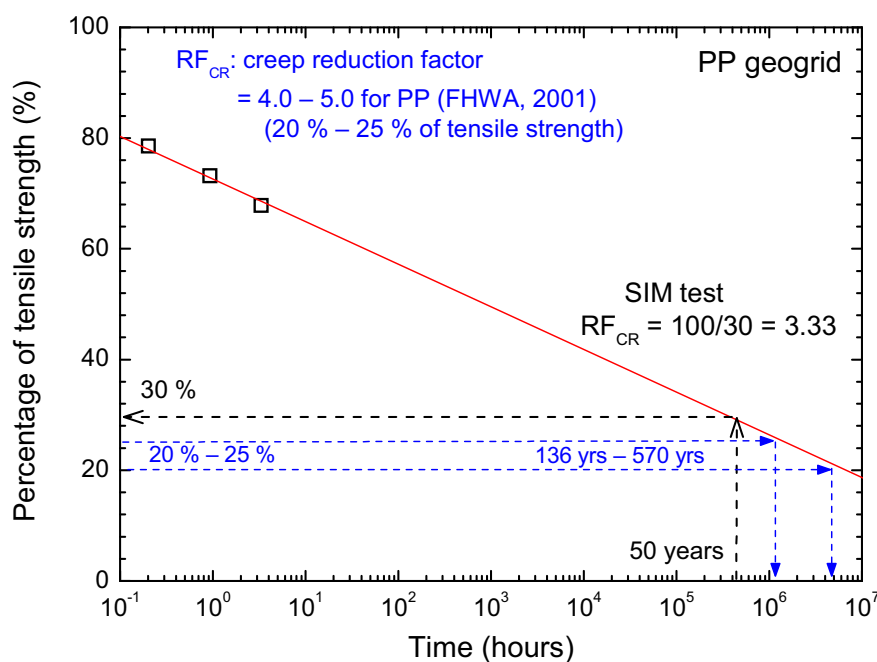


รูปที่ 18 Creep-rupture curves ในรูปแบบของ: a) ค่าแรงดึง และ b) เปอร์เซนต์ของค่าแรงดึง สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene)

5.2.3 การเปรียบเทียบสำหรับ Creep Rupture Curve และค่า Creep Reduction Factor

สำหรับการเปรียบเทียบสำหรับ Creep Rupture Curve และค่า Creep Reduction Factor (RF_{CR}) ที่ได้จาก การทดสอบ SIM Federal Highway Administration (FHWA) แห่งสหรัฐอเมริกาได้เสนอสมการเพื่อลดทอน ค่าแรงดึงสูงสุดที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อเป็นค่าแรงดึงคงเหลือในการออกแบบเพื่อการใช้งาน ระยะยาวโดยคำนึงถึงการเสื่อมเนื่องจากการติดตั้ง, การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและชีวภาพ และการคืบ สำหรับ การคืบ FHWA (2001) ได้เสนอค่า Creep Reduction Factor (RF_{CR}) เท่ากับ 4.0-5.0 สำหรับ Polypropylene (PP) และ 2.6-5.0 สำหรับ High-Density Polyethylene (HDPE) ดังนั้นจึงได้เปรียบเทียบค่า Creep Reduction Factor (RF_{CR}) ที่ได้จาก การทดสอบ SIM จากงานวิจัยนี้กับค่าที่แนะนำโดย FHWA (2001) ดัง แสดงในรูปที่ 19

จากรูปที่ 19 จะได้ว่า หากต้องการออกแบบเพื่อการใช้งานเท่ากับ 50 ปี จะได้ค่า Creep Reduction Factor (RF_{CR}) เท่ากับ 3.33 สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันกับค่าที่แนะนำ โดย FHWA (2001) ซึ่งแสดงว่าการทดสอบ SIM ด้วยเครื่องมือทดสอบที่ได้พัฒนาขึ้นมาในการศึกษานี้มี ประสิทธิภาพ

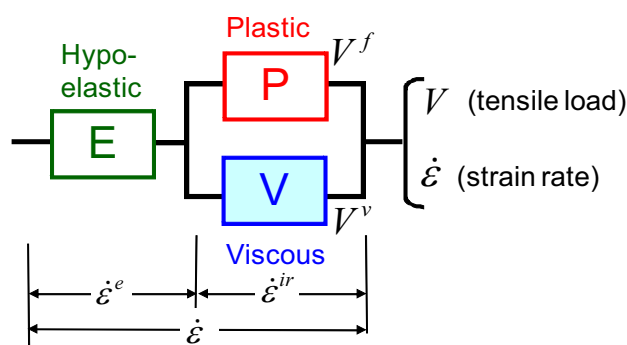


รูปที่ 19 Creep-rupture curve ในรูปแบบของค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดึงสูงสุดที่ได้จากการทดสอบ SIM สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene)

5.3 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อกำลังรับแรงดึงสูงสุด

5.3.1 บทนำ

คุณสมบัติด้านกำลังและการเสียรูปของแผ่นใยสังเคราะห์โพลีเมอร์มีลักษณะเป็นอีลาสโต-วิสโคพลาสติก (Elasto-Viscoplastic) และสามารถจำลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้อย่างแม่นยำด้วย Non-Linear Three-Component Model ดังแสดงในรูปที่ 20 (อาทิจีน Hirakawa et al., 2003; Kongkitkul et al., 2004; Tatsuoka et al., 2004; Kongkitkul et al., 2007a)

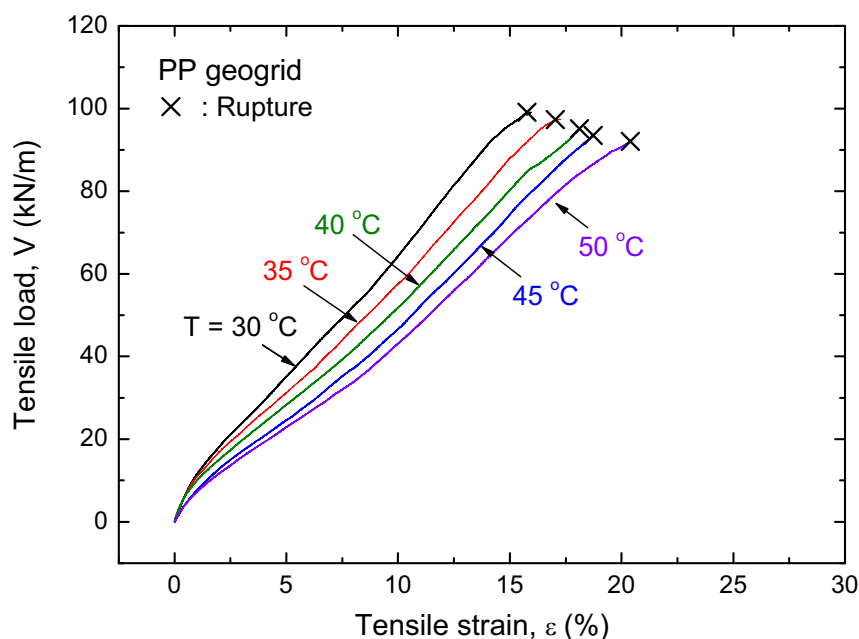


รูปที่ 20 Non-Linear Three-Component Model สำหรับแผ่นใยสังเคราะห์โพลีเมอร์ (Hirakawa et al., 2003; Kongkitkul et al., 2004) (V คือ Tensile Load; และ ε คือ Tensile Strain)

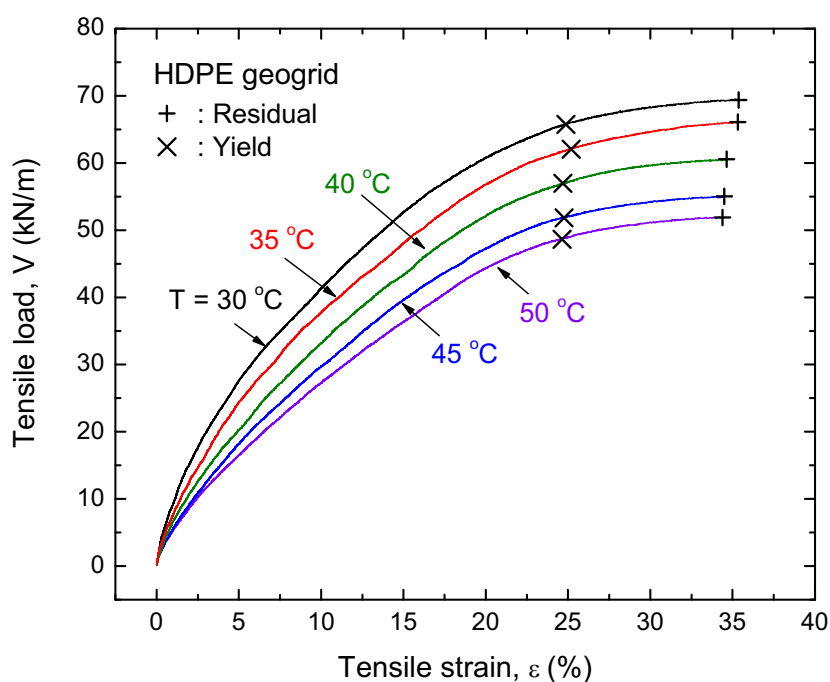
ในการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าว จะต้องพิจารณาถึงผลกระทบทางปัจจัยหลายๆ อย่าง กล่าวคือ ก) ผลกระทบจากคุณสมบัติด้านความเหนียวของวัสดุ (แสดงด้วยบอดี้ V ในรูปที่ 20) และ ข) การเสื่อมของคุณสมบัติเนื้อแท้ของวัสดุเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (แสดงด้วยบอดี้ P ในรูปที่ 20) ผลกระทบเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติด้านกำลังและการเสียรูปของแผ่นใยสังเคราะห์โพลีเมอร์ตั้นเทียบเท่ากับผลกระทบที่เกิดจากการเสื่อมของการเสื่อมของวัสดุตรงที่ทำให้เกิดการลดลงของค่ากำลัง และคุณสมบัติอีลาสติก (แสดงด้วยบอดี้ E ในรูปที่ 20) ซึ่งจะได้รับผลกระทบเช่นกันจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

5.3.2 การทดสอบด้วยการดึงตัวอย่างอย่างต่อเนื่องภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

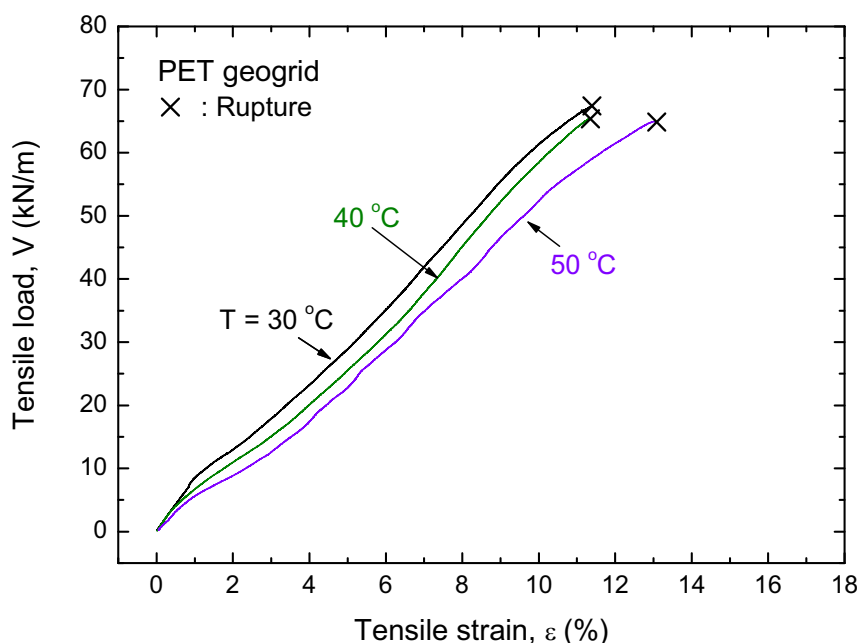
รูปที่ 21, 22 และ 23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงและค่าความเครียดดึงที่ได้จากการทดสอบด้วยการดึงตัวอย่างแผ่นใยสังเคราะห์โพลีเมอร์อย่างต่อเนื่องด้วยอัตราเท่ากับ 0.6 kN/m/min จนกระทั่งตัวอย่างฉีกขาดหรือวิบัติ ภายใต้อุณหภูมิแวดล้อมที่แตกต่างกันสำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene), Reinforcement 2 (High-density polyethylene; HDPE) และ Reinforcement 3 (Polyester) ตามลำดับ จากรูปดังกล่าวจะเห็นได้ว่า ไม่ใช่เฉพาะค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดเท่านั้นแต่รวมถึงค่าสตีฟเนสของค่าสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและความเครียดลดลงเมื่ออุณหภูมิแวดล้อมสูงขึ้น



รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและความเครียดที่ได้จากการดึงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งตัวอย่างวิบัติภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene)



รูปที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและความเครียดที่ได้จากการดึงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งตัวอย่างวิบัติภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน สำหรับ Reinforcement 2 (High-density polyethylene; HDPE)



รูปที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและความเครียดที่ได้จากการดึงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งตัวอย่างวิบัติภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน สำหรับ Reinforcement 3 (Polyester)

เนื่องจากอัตราในการดึงตัวอย่างมีค่าเท่าๆ กันระหว่างตัวอย่างทดสอบคนละตัวอย่างซึ่งทดสอบภายใต้ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ดังนั้นค่าอัตราความเครียด (Strain Rate) จึงแปรผันกับระดับแรงดึง (Load Level, V/V_{max}) และอุณหภูมิ ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่ค่าสตีเฟนส์สัมพัทธ์ของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและความเครียด ดึงถูกควบคุมโดย: ก) ลักษณะของเส้นความสัมพันธ์เนื้อแท้ระหว่างแรงดึงและความเครียดดึงและผลกระทบ จากความเหนียวของวัสดุที่ตามมาโดยการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียด และ ข) ผลกระทบของอุณหภูมิ แต่ กระนั้น สตีเฟนส์สัมพัทธ์ของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและความเครียดดึงก่อนที่จะเกิดการวิบัติของตัวอย่าง ก็ไม่ได้แตกต่างกันมากนักระหว่างตัวอย่างต่างๆ ที่ทดสอบด้วยการดึงอย่างต่อเนื่องภายใต้อุณหภูมิแวดล้อมที่ แตกต่างกันในอีกทางหนึ่ง เนื่องจากผลกระทบจากคุณสมบัติความเหนียวของวัสดุ หากมีการเพิ่มขึ้นของอัตรา ความเครียด 10 เท่า ค่าแรงดึงจะกระโดดไปเป็นปริมาณเท่ากับ $\Delta V = \beta \times V$ โดยที่ β คือค่าสัมประสิทธิ์ความ อ่อนไหวต่ออัตราการดึง และ V คือค่าแรงดึงปัจจุบัน (Kongkitkul et al., 2007) ค่า β สำหรับวัสดุแผ่นใย สังเคราะห์โพลิเมอร์ประเภทต่างๆ ได้เรียบเรียงในตารางที่ 4 และ 5 (Tatsuoka et al., 2004; Kongkitkul et al., 2007)

ตารางที่ 4 สรุปค่าสัมประสิทธิ์ความอ่อนไหวต่ออัตราการดึง β (Kongkitkul, 2004)

No.	Reinforcement's name	Specimen condition	Ruptured strength (kN/m)*	β value
1	Polyester	Virgin	39.2	0.1428
2	Polyarylate	Virgin	88.0	0.0732
3	Vinylon	Virgin	60.8	0.1319
4	Aramid	Virgin	56.0	0.0665
5	HDPE	Virgin	50.0	0.1132
6	Aged Vinylon	Aged (8 yrs)	59.0	0.1595
7	PET yarn	Virgin	157.0	0.080
8	V-3000	Virgin	33.3	0.1345

* at a strain rate = 1.0 %/min

ตารางที่ 5 สรุปค่าสัมประสิทธิ์ความอ่อนไหวต่ออัตราการดึง β ที่ประมาณได้จากข้อมูลจากงานวิจัยในอดีต

Reinforcement type	Range of strain rate (%/min)	Viscosity: β	References
HDPE	0.2 - 20 (0.2, 1, 10, 20)	0.2256	Hirai and Yatsu (2000)
HDPE	1 - 300 (1, 10, 60, 300)	0.3336	Bathurst and Cai (1994)
HDPE	0.1 - 98.1 (0.1, 1, 10.1, 98.1)	0.2524	Shinoda et al. (2002)
PET	1 - 125 (1, 10, 125)	0.1272	Bathurst et al. (1994)
PP	0.1 - 99.3 (0.1, 1, 10, 99.3)	0.2326	Shinoda et al. (2002)

ตารางที่ 6 แสดงค่าอัตราความเครียด ณ จุดที่เกิดการวิบัติในแต่ละตัวอย่าง จากตารางดังกล่าวจะเห็นได้ว่าอัตราความเครียด ณ จุดวิบัติเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ทดสอบเพิ่มขึ้นทุกๆ ที่อัตราแรงดึงคงที่เท่ากับ $\dot{V} = 0.6 \text{ kN/min}$ ทั้งนี้เนื่องจากการลดลงของค่าสตีเฟนส์สัมผัส E_{tan} ของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและความเครียดดึง จากการที่อัตราความเครียดหาได้จาก: $\dot{\epsilon} = \dot{V}/E_{tan}$ ตารางที่ 7 แสดงวิธีการปรับแก้ค่าแรงดึงสูงสุดที่ได้จากแต่ละตัวอย่างเพื่อให้เป็นค่าที่อัตราความเครียด $\dot{\epsilon}$ เท่ากับ $0.1 \text{ \%/min}$ ส่วนตารางที่ 8 แสดงค่า β ที่ใช้สำหรับการปรับแก้ค่าแรงดึงสูงสุดที่ได้จากการทดสอบในงานวิจัยนี้

สำหรับ Reinforcement 2 (High-density polyethylene; HDPE) อาจจะสังเกตได้จากตารางที่ 6 ว่าค่าอัตราความเครียดที่สถานะคงเหลือค่อนข้างกระจายตัว ดังนั้นจึงไม่เสถียร ในอีกทางหนึ่ง ค่าอัตราความเครียดที่จุดครากค่อนข้างใกล้เคียงกัน ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้สมมุติว่า Reinforcement 2 (HDPE) เกิดการวิบัติที่จุดคราก และใช้ค่าดังกล่าวสำหรับการปรับแก้ให้เป็นค่าที่อัตราความเครียดเท่ากับ $0.1 \text{ \%/min}$ การนิยามจุดครากทำโดยการหาจุดที่ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและความเครียดดึงมีความโค้งมากที่สุด (มีรัศมีความโค้งน้อยที่สุด) การหาจุดดังกล่าวสำหรับผลการทดสอบที่อุณหภูมิแตกต่างกันแสดงในรูปที่ 24 ตารางที่ 9 สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จุดคราก

ตารางที่ 6 ผลกระทบจากอัตราความเครียดที่มีต่อค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด

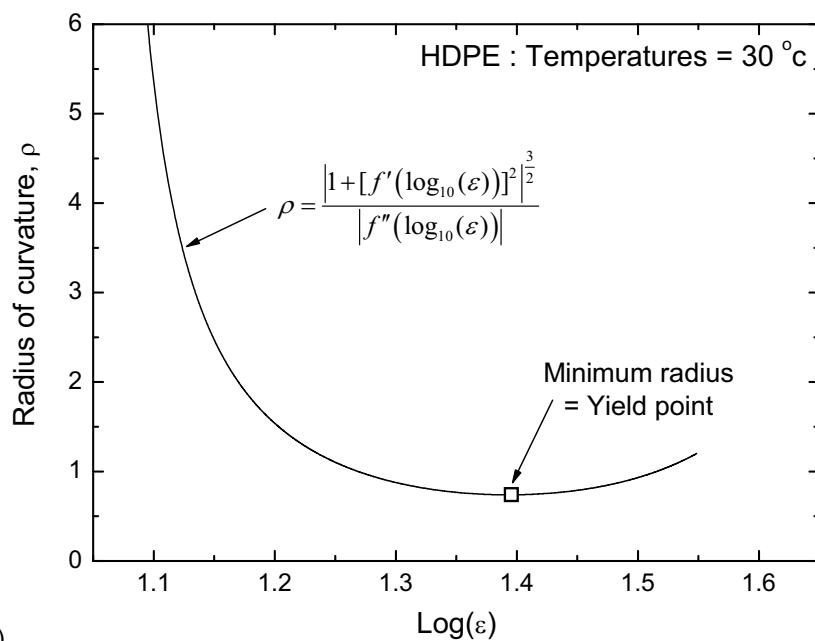
T (°C)	Strain rate (%/min), for reinforcement			
	1 (PP)	2 (HDPE) at yield	2 (HDPE) at residual	3 (PET)
30	0.098	0.659	> 2.188	0.086
35	0.110	0.608	> 1.652	-
40	0.114	0.653	> 1.505	0.083
45	0.115	0.791	> 2.275	-
50	0.122	0.768	> 2.242	0.100

ตารางที่ 7 ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดที่ได้จากการทดสอบด้วยการดึงอย่างต่อเนื่องที่อัตราแรงดึงเท่ากับ 0.6 kN/m/min ภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกันและการปรับแก้ให้เป็นค่าที่อัตราความเครียดเท่ากับ 0.1 %/min

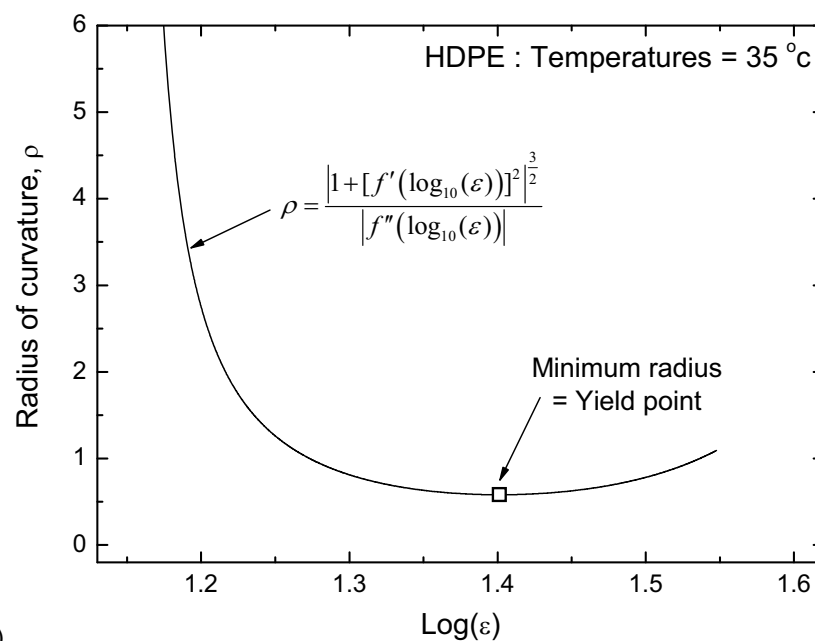
No.	Material type	T (°C)	V_{max} (kN/m)	Factor of strain rate	ΔV_{max} (kN/m)	V_{max} after correction for $d\varepsilon/dt = 0.1$ %/min (kN/m)
1	Polypropylene (PP)	30	99.137	0.984	-0.162	99.298
		35	97.312	1.098	0.919	96.393
		40	95.110	1.140	1.259	93.851
		45	93.477	1.146	1.287	92.190
		50	92.037	1.224	1.879	90.158
2	High-density polyethylene (HDPE) (at yield)	30	65.756	6.588	6.094	59.661
		35	62.053	6.084	5.509	56.545
		40	56.977	6.534	5.258	51.720
		45	51.856	7.908	5.272	46.584
		50	48.621	7.680	4.873	43.748
3	Polyester (PET)	30	67.429	0.864	-0.611	68.041
		40	65.390	0.828	-0.765	66.155
		50	64.863	1.002	0.008	64.855

ตารางที่ 8 ค่า β ที่ใช้ในการปรับแก้ค่าแรงดึงสูงสุดให้เป็นค่าที่อัตราความเครียดเท่ากับ 0.1 %/min ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

Reinforcement type	β value	References
PP	0.2326	Shinoda et al. (2002)
HDPE	0.1132	Kongkitkul et al. (2007)
PET	0.1428	Kongkitkul et al. (2007)

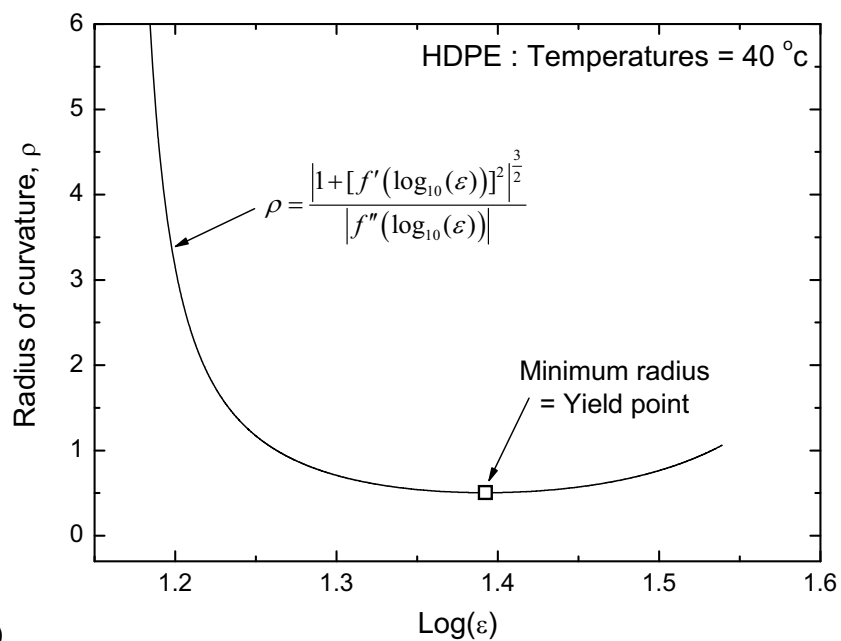


a)

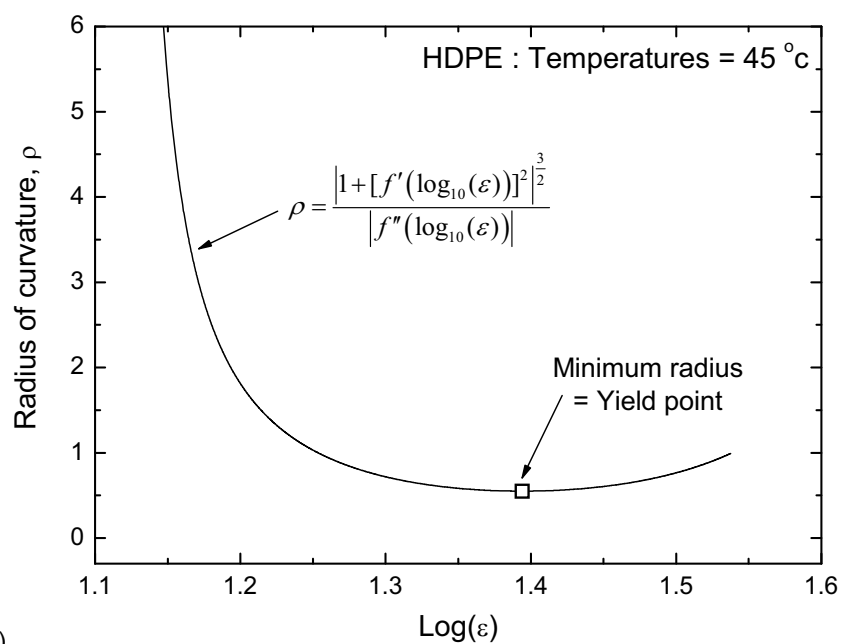


b)

รูปที่ 24 วิธีการหาจุดครากจากค่ารัศมีความโค้งของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและความเครียดดึงในล็กการที่มัสเกลจากการทดสอบแบบดึงต่อเนื่อง ภายใต้อุณหภูมิเท่ากับ: a) 30 °C; และ b) 35 °C

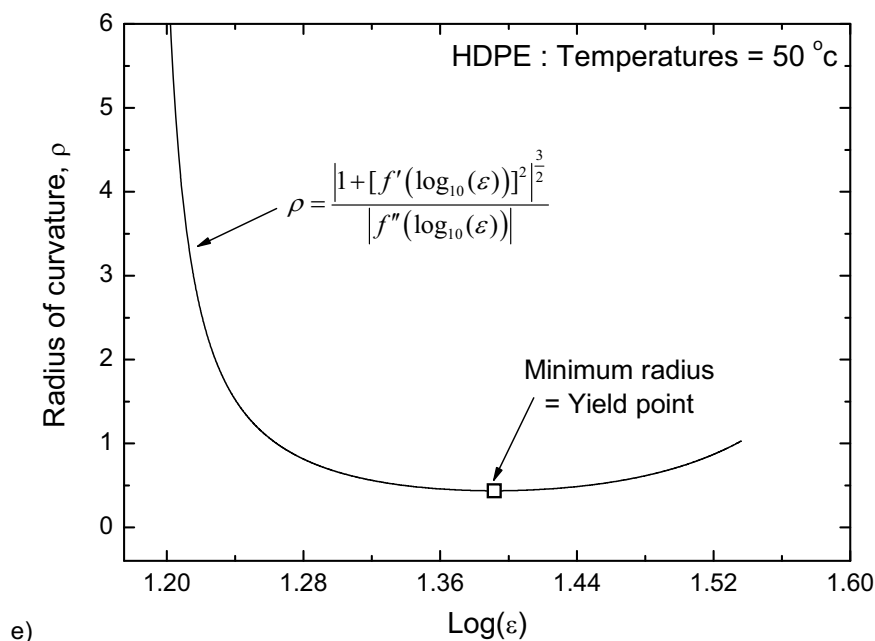


c)



d)

รูปที่ 24 วิธีการหาจุดครากจากค่ารัศมีความโค้งของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและความเครียดดึงในล็กการที่หิมสเกลจากการทดสอบแบบดึงต่อเนื่อง ภายใต้อุณหภูมิเท่ากับ: c) 40 °C; และ d) 45 °C



รูปที่ 24 วิธีการหาจุดครากจากค่ารัศมีความโค้งของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและความเครียดดึงในลักษณะการหาค่าจุดครากจากการทดสอบแบบดึงต่อเนื่อง ภายใต้อุณหภูมิเท่ากับ: e) 50 °C

ตารางที่ 9 สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จุดครากที่นิยามจากจุดที่มีความโค้งมากที่สุดสำหรับ Reinforcement 2 (High-density polyethylene; HDPE)

T (°C)	ε_y (%)	V_y (kN/m)	Log(ε_y)	Log(V_y)	f_y'	f_y''	ρ_{min}
30	24.862	65.756	1.396	1.818	0.276	-1.510	0.739
35	25.189	62.053	1.401	1.793	0.299	-1.958	0.581
40	24.683	56.977	1.392	1.756	0.320	-2.295	0.504
45	24.765	51.856	1.394	1.715	0.323	-2.108	0.550
50	24.630	48.621	1.391	1.687	0.341	-2.704	0.436

5.3.3 พารามิเตอร์ผลกระทบอุณหภูมิ, A^f

รูปที่ 25, 26 และ 27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงดึงสูงสุดต่อแรงดึงสูงสุดที่อุณหภูมิอ้างอิง ($V_{\max}/V_{\max o}$) กับอุณหภูมิแวดล้อม (T) สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene), Reinforcement 2 (HDPE) และ Reinforcement 3 (Polyester) ตามลำดับ สมการที่ 1 สามารถ Fit ข้อมูลการทดสอบได้อย่างเหมาะสมดังแสดงในรูปที่ 25, 26 และ 27

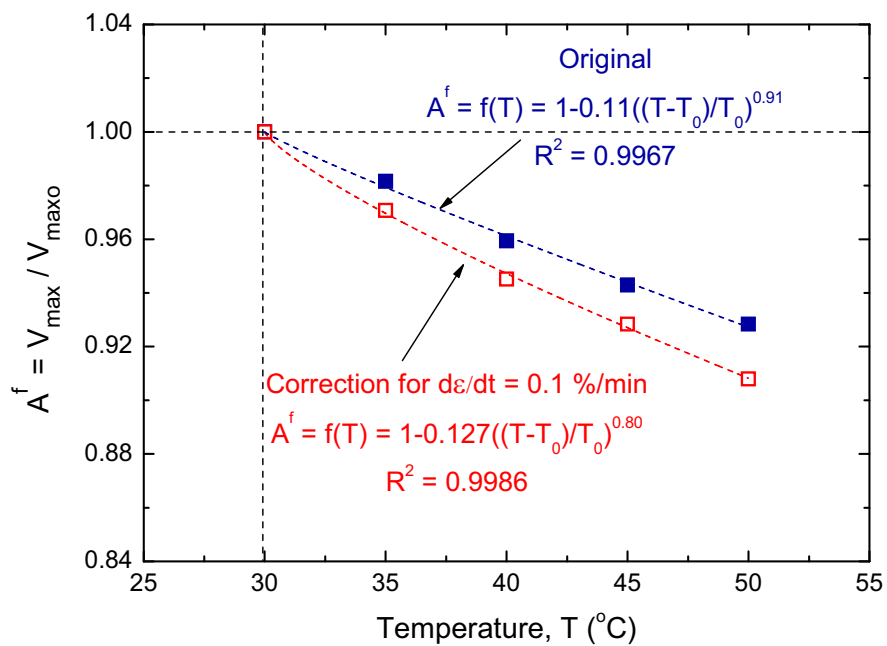
$$A^f = \frac{V_{\max}}{V_{\max o}} = 1 - a \left(\frac{T - T_0}{T_0} \right)^b, T \geq T_0 \quad (1a)$$

$$A^f = \frac{V_{\max}}{V_{\max o}} = 1 + a \left(\frac{T_0 - T}{T_0} \right)^b, T < T_0 \quad (1b)$$

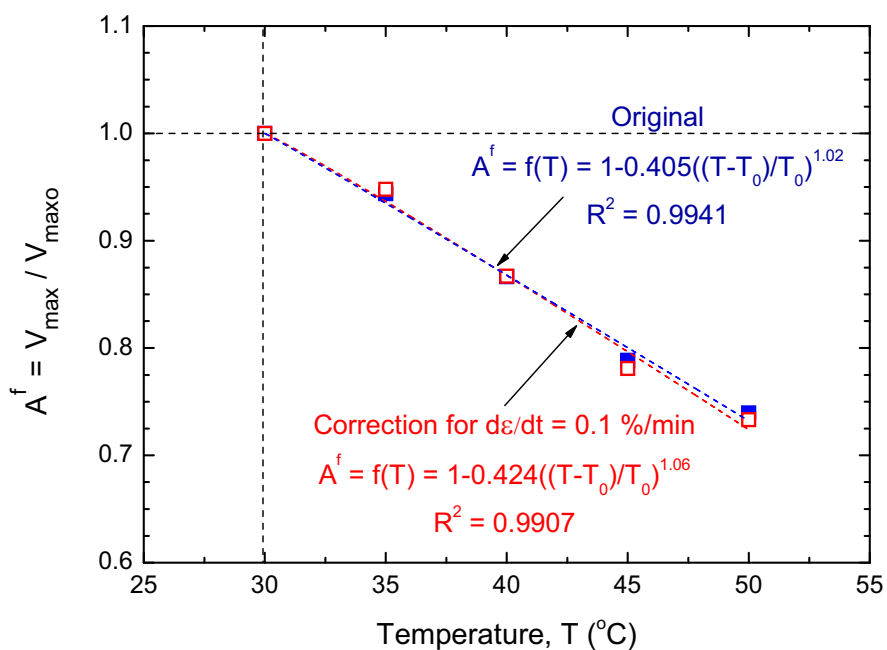
โดยที่ T_0 คือค่าอุณหภูมิอ้างอิง (เท่ากับ 30°C), $V_{\max o}$ คือค่าแรงดึงสูงสุดจากการทดสอบที่อุณหภูมิเท่ากับ T_0 , A^f คือ พารามิเตอร์ผลกระทบอุณหภูมิ ซึ่งมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และ a และ b คือค่าคงที่ดังแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ค่าคงที่ a และ b ในสมการที่ 1 ก่อนและภายหลังการปรับแก้สำหรับค่าอัตราความเครียดที่ $0.1\%/\text{min}$

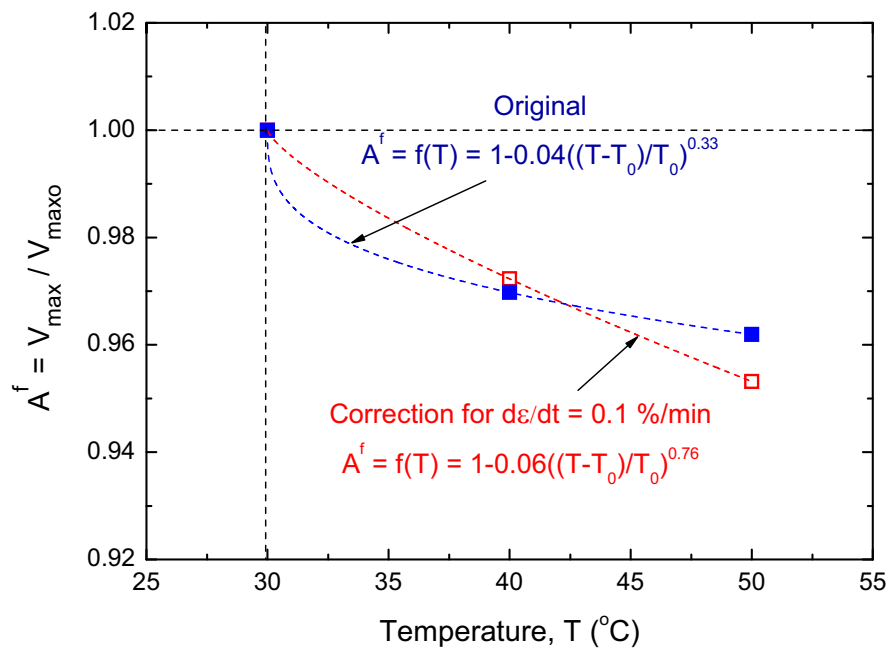
Reinforcement type	Original		Correction for $\dot{\epsilon} = 0.1\%/\text{min}$	
	a	b	a	b
PP	0.11	0.91	0.127	0.8
HDPE	0.405	1.02	0.424	1.06
PET	0.04	0.33	0.06	0.76



รูปที่ 25 พารามิเตอร์ผลกระทบอุณหภูมิ, A^f สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene)



รูปที่ 26 พารามิเตอร์ผลกระทบอุณหภูมิ, A^f สำหรับ Reinforcement 2 (HDPE)



รูปที่ 27

พารามิเตอร์ผลกระทบอุณหภูมิ, A^f สำหรับ Reinforcement 3 (Polyester)

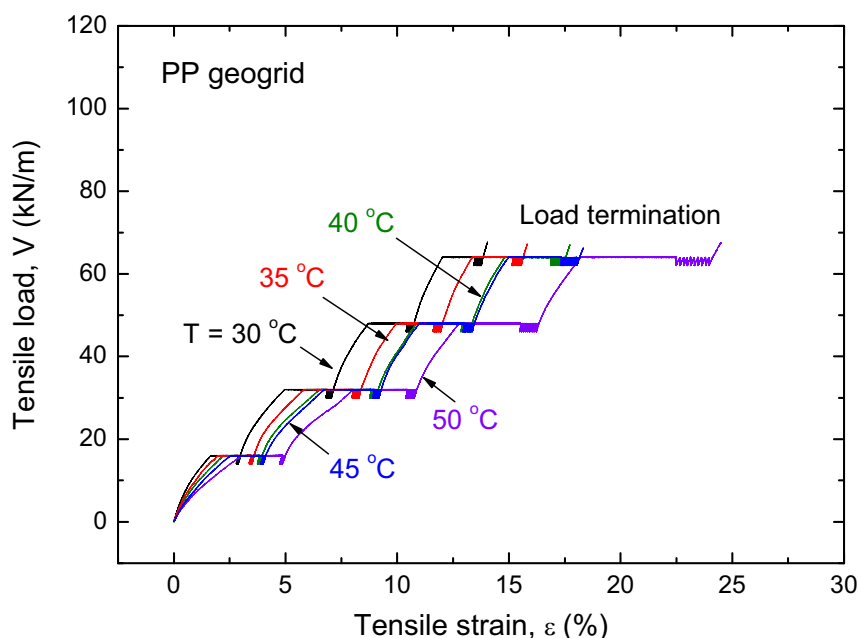
5.4 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่าอีลาสติคตีฟเนส

5.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและความเครียดสำหรับการดึงเป็นวงรอบ

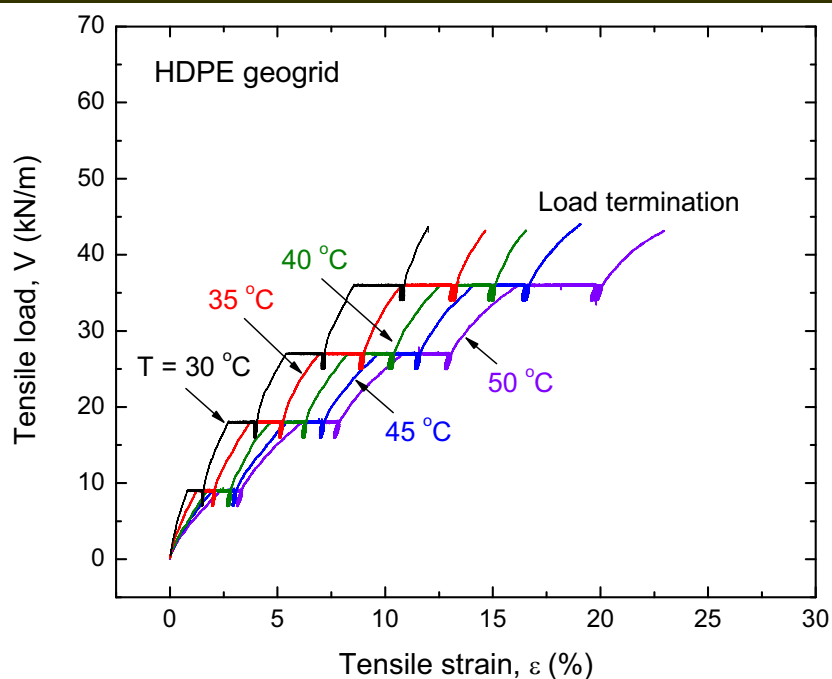
รูปที่ 28, 29 และ 30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและความเครียดที่ได้จากการให้แรงกระทำเป็นวงรอบด้วยแอมพลิจูดขนาดเล็กเพื่อศึกษาพฤติกรรมอีลาสติคของแผ่นใยสังเคราะห์โพลิเมอร์ที่ทดสอบภายใต้ อุณหภูมิแวดล้อมที่แตกต่างกัน สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene), Reinforcement 2 (HDPE) และ Reinforcement 3 (Polyester) ตามลำดับ ค่าระดับแรงดึงที่ซึ่งการให้แรงดึงเป็นวงรอบกระทำมีค่าดังแสดงใน ตารางที่ 11 ก่อนที่จะให้แรงกระทำเป็นวงรอบ จะให้แรงคงค้าง (Sustained Loading) กระทำก่อนเป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมงเพื่อลดผลกระทบจากการพัฒนาของความเครียดคงเหลือที่เกิดขึ้นโดยคุณสมบัติด้าน ความหนืดของแผ่นใยสังเคราะห์โพลิเมอร์ ดังนั้น คุณสมบัติของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและความเครียดดึงในระหว่างการให้แรงกระทำเป็นวงรอบจึงเป็นค่อนข้างเป็นอีลาสติค การใช้เทคนิคดังกล่าวเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางในการศึกษาคุณสมบัติอีลาสติคของวัสดุทางวิศวกรรมเทคนิคธรณีด้วยการ ทดสอบกำลังแรงอัดแบบสามแกน (อาทิเช่น Shibuya et al., 1992; Tatsuoka et al., 1994; Hoque and Tatsuoka, 1998)

ตารางที่ 11 ค่าระดับแรงดึงที่ใช้ให้แรงกระทำเป็นวงรอบเพื่อศึกษาคุณสมบัติอีลาสติค

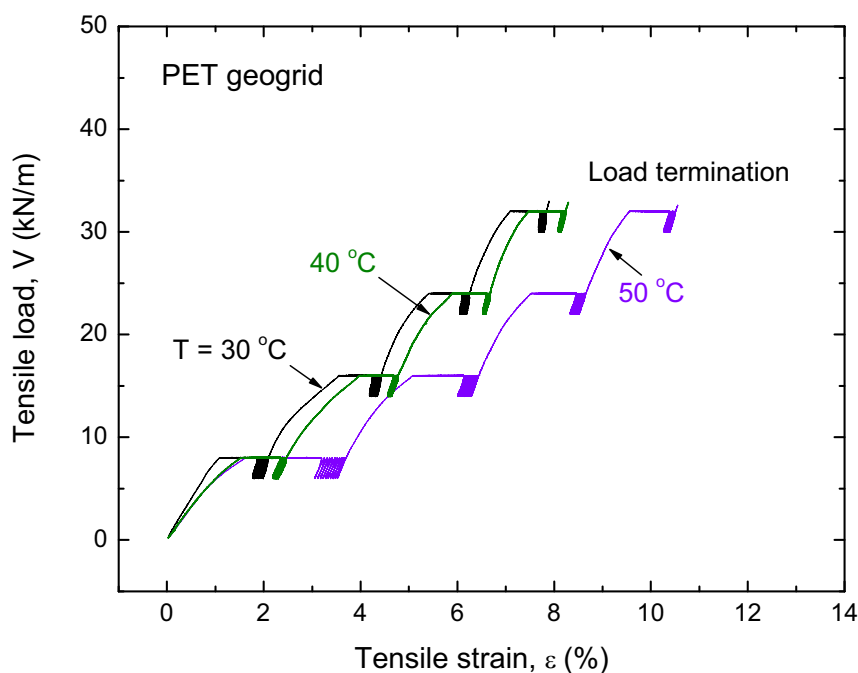
No.	Reinforcements type	Tensile load, V (kN/m)
1	Polypropylene (PP)	16, 32, 48 and 64
2	HDPE	9, 18, 27 and 36
3	Polyester (PET)	8, 16, 24 and 32



รูปที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและความเครียดดึงจากให้แรงกระทำเป็นวงรอบระหว่างการดึง ตัวอย่างภายใต้อุณหภูมิแวดล้อมต่างๆ สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene)



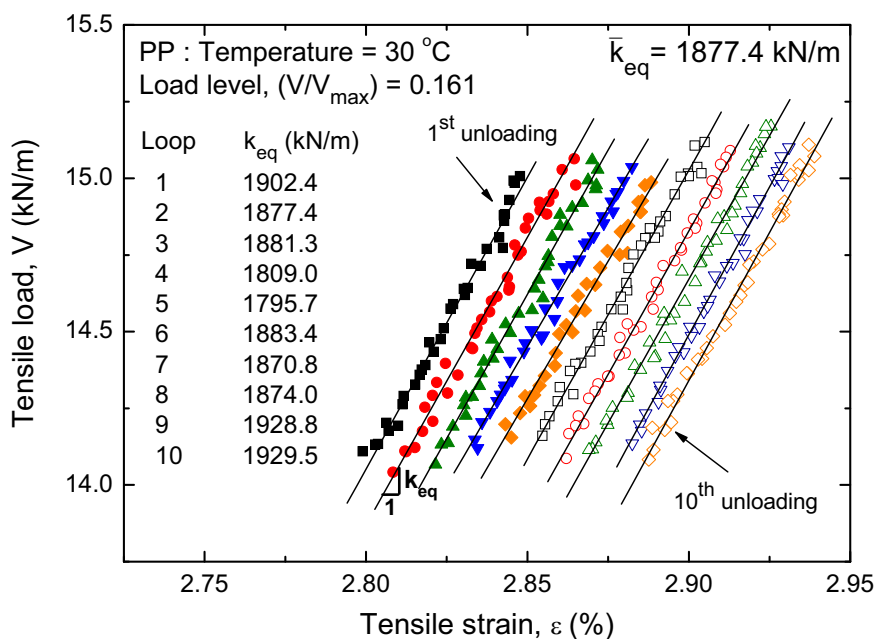
รูปที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและความเครียดดึงจากให้แรงกระทำเป็นวงรอบระหว่างการดึงตัวอย่างภายใต้อุณหภูมิแวดล้อมต่างๆ สำหรับ Reinforcement 2 (HDPE)



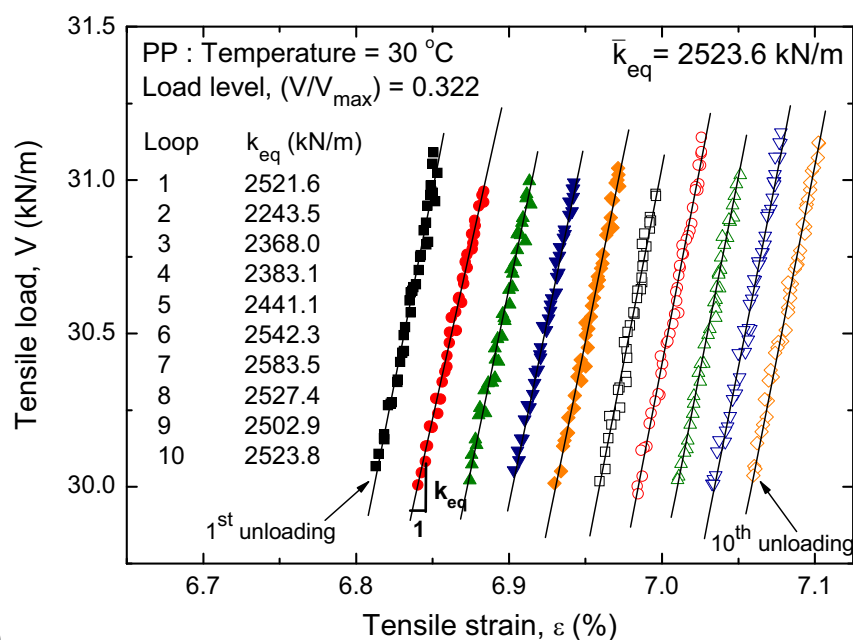
รูปที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและความเครียดดึงจากให้แรงกระทำเป็นวงรอบระหว่างการดึงตัวอย่างภายใต้อุณหภูมิแวดล้อมต่างๆ สำหรับ Reinforcement 3 (Polyester)

5.4.2 ค่าอีลาสติคสตีฟเนสเทียบเท่า (k_{eq})

รูปที่ 31 ถึง 35, รูปที่ 36 ถึง 40 และรูปที่ 41 ถึง 43 แสดงการหาค่าอีลาสติคสตีฟเนสเทียบเท่า (k_{eq}) จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและความเครียดในช่วงที่ Unloading ของการให้แรงดึงเป็นวงรอบที่ค่าระดับแรงดึง (V/V_{max}) แตกต่างกัน และทดสอบภายใต้อุณหภูมิ (T) ที่แตกต่างกัน สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene), Reinforcement 2 (HDPE) และ Reinforcement 3 (Polyester) ตามลำดับ

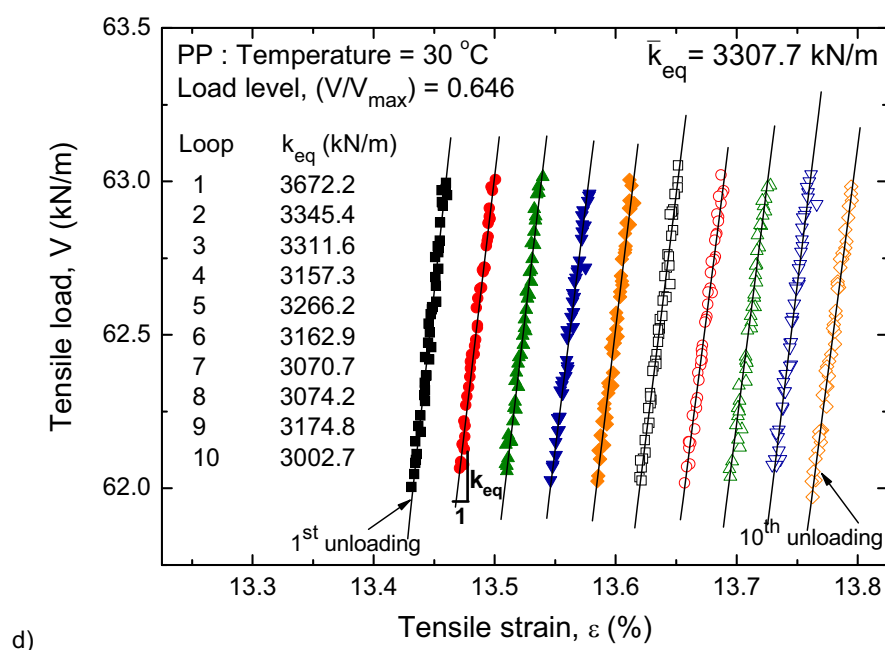
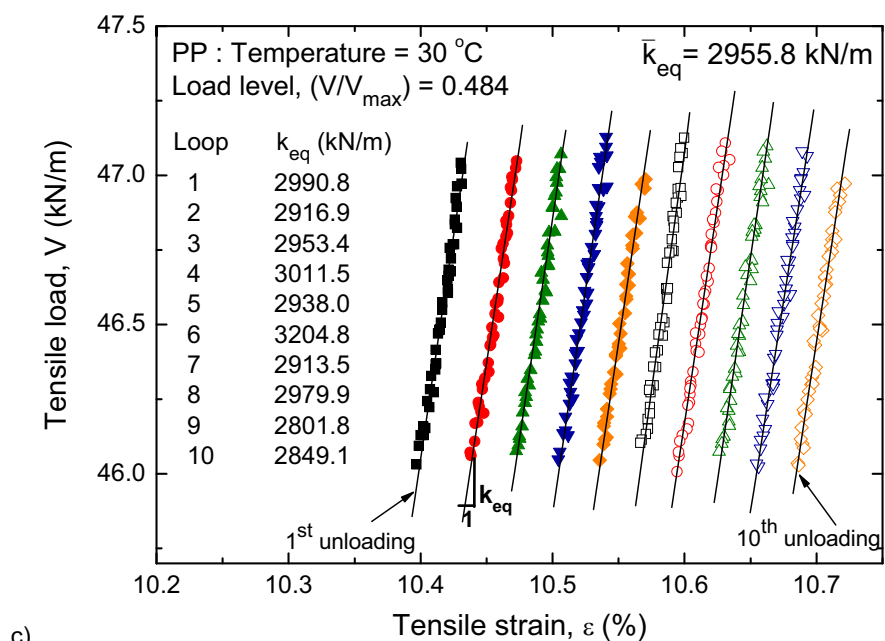


a)

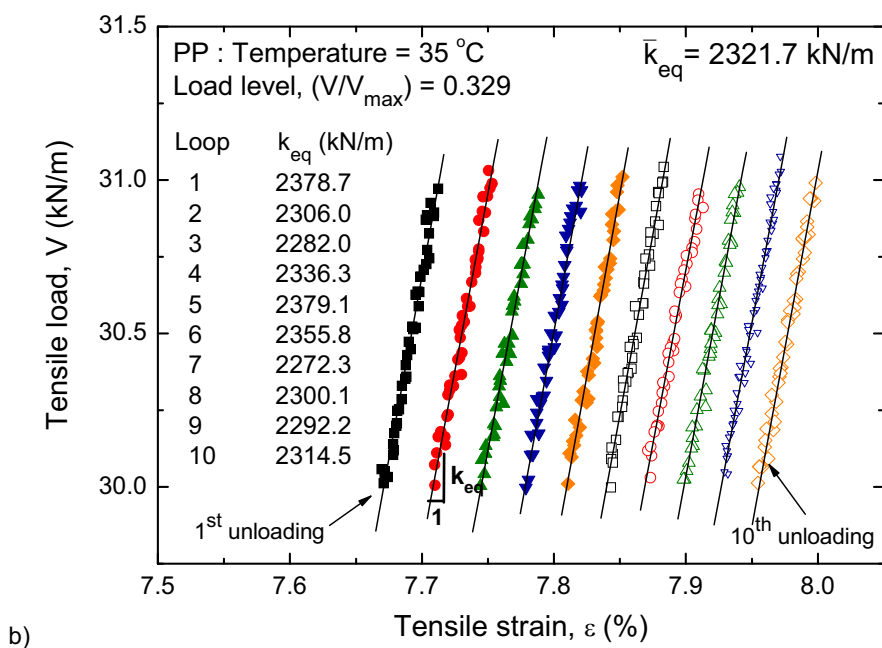
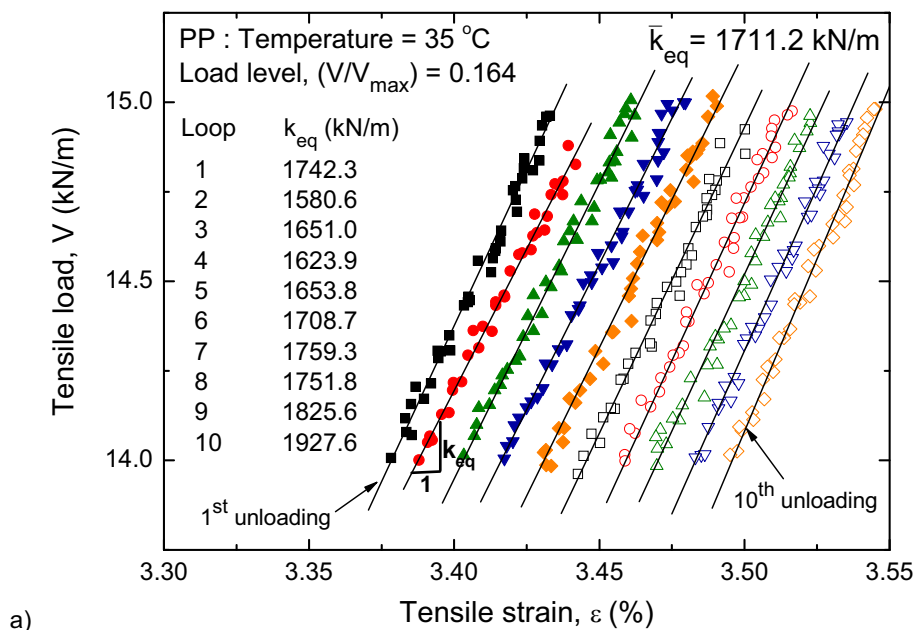


b)

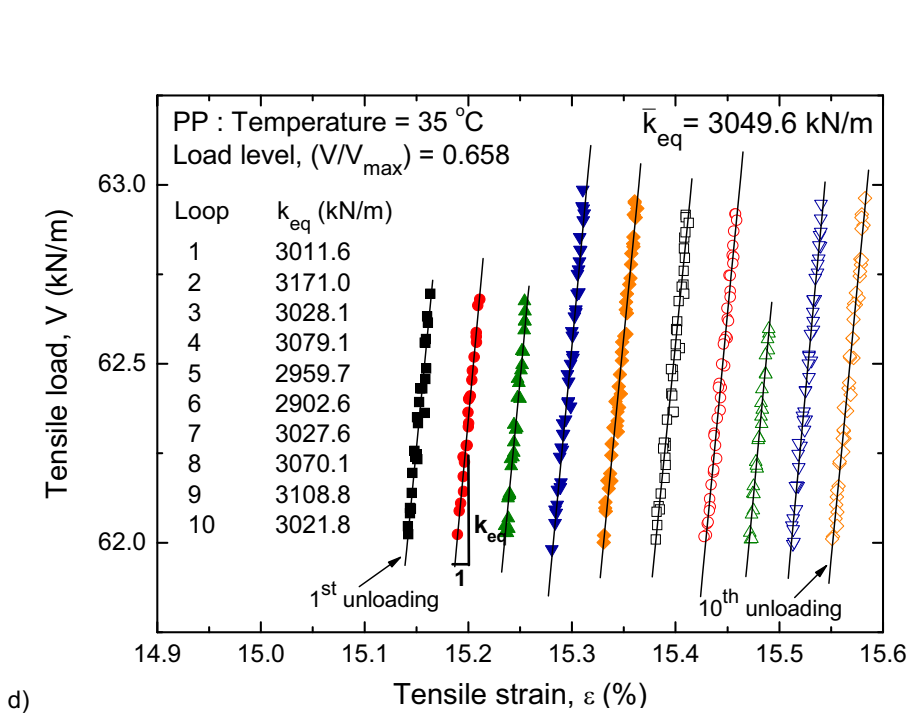
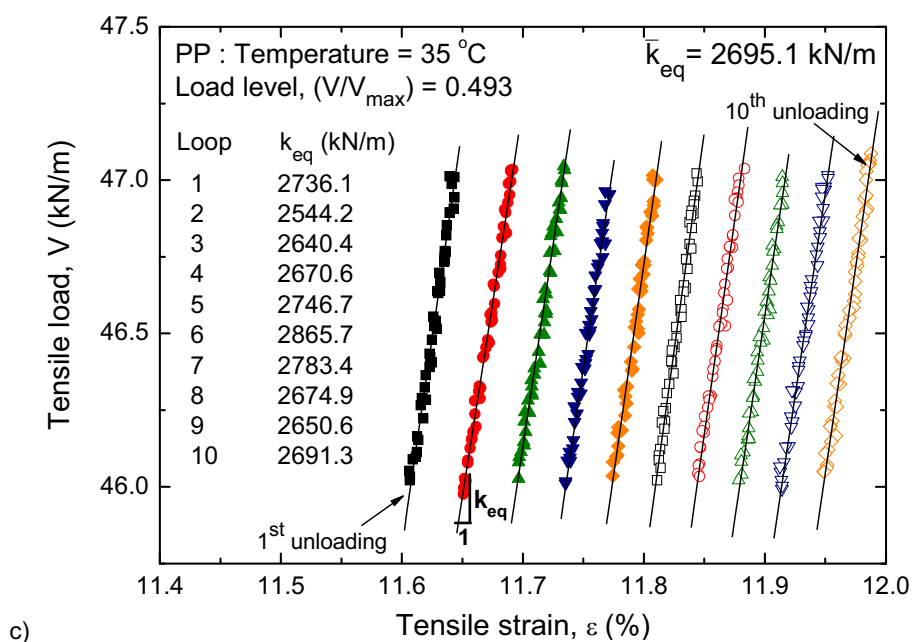
รูปที่ 31 การหาค่าอีลาสติคสตีฟเนสเทียบเท่า (k_{eq}) จากการให้แรงเป็นวงรอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 30 °C และที่ระดับแรงดึง (V/V_{max}) เท่ากับ: a) 0.161; และ b) 0.322 สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene)



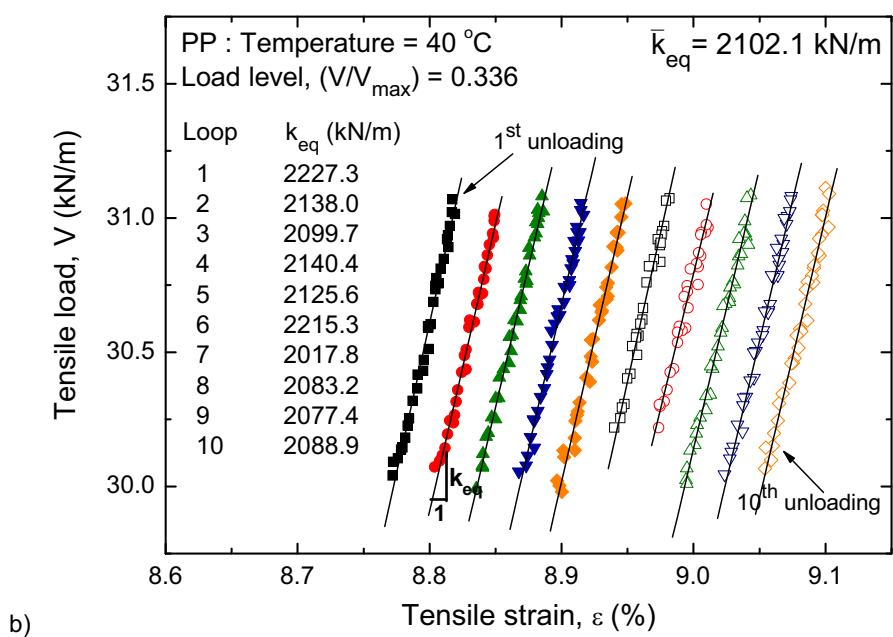
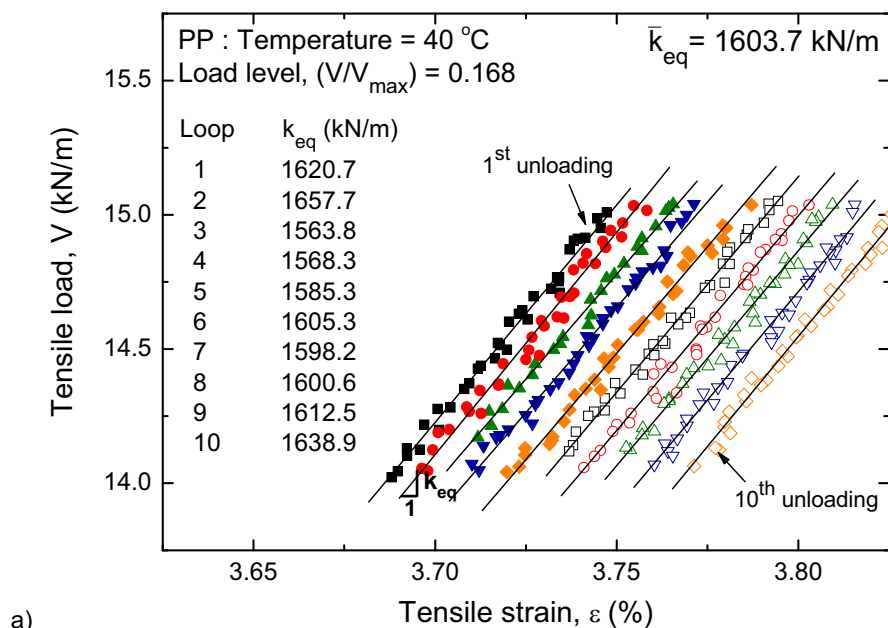
รูปที่ 31 การหาค่าอีลาสติคสตีฟเนสเทียบเท่า (k_{eq}) จากการให้แรงเป็นวงรอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 30 °C และที่ระดับแรงดึง (V/V_{max}) เท่ากับ: c) 0.484; and d) 0.646 สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene)



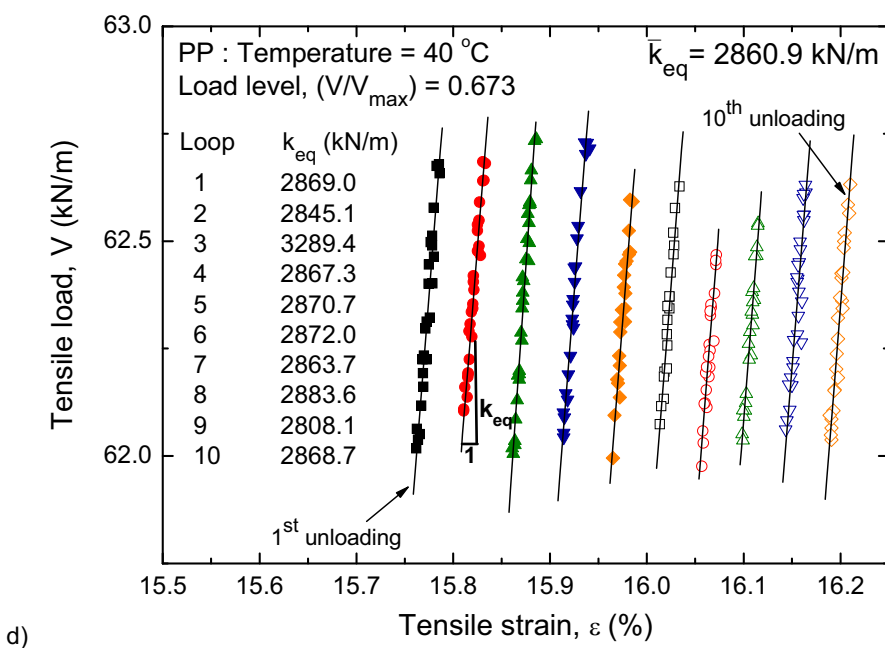
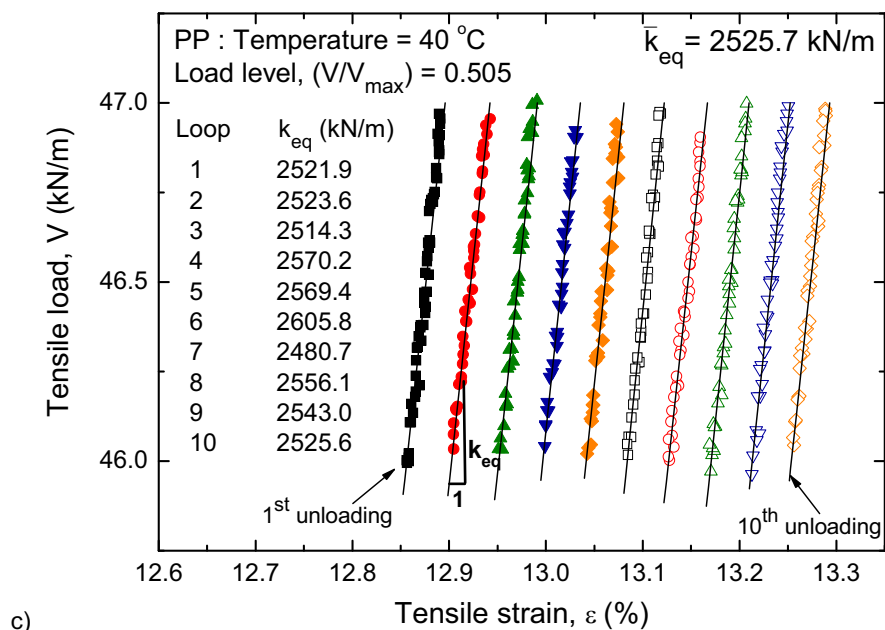
รูปที่ 32 การหาค่าอีลาสติคสตีฟเนสเทียบเท่า (k_{eq}) จากการให้แรงเป็นวงรอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 35 °C และที่ระดับแรงดึง (V/V_{max}) เท่ากับ: a) 0.164; และ b) 0.329 สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene)



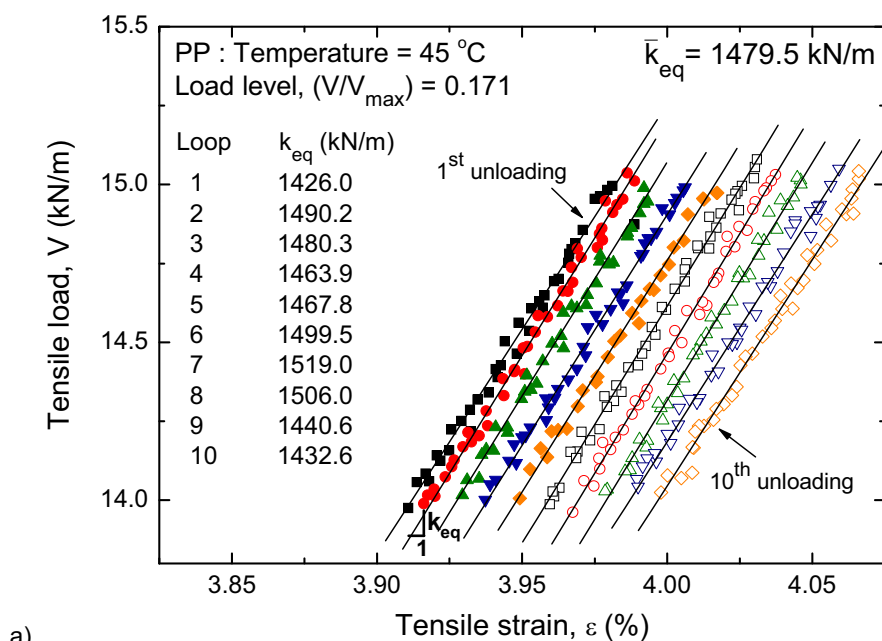
รูปที่ 32 การหาค่าอีลาสติคสตีเฟนสเทียบเท่า (k_{eq}) จากการให้แรงเป็นวงรอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 35 °C และที่ระดับแรงดึง (V/V_{max}) เท่ากับ: c) 0.493; และ d) 0.658 สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene)



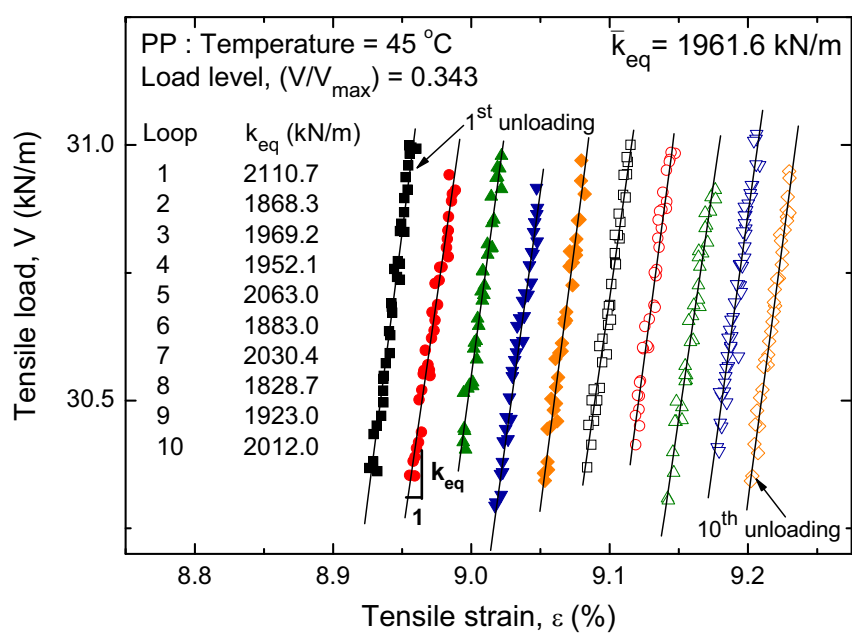
รูปที่ 33 การหาค่าอีลาสติคสตีเฟเนสเทียบเท่า (k_{eq}) จากการให้แรงเป็นวงรอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 40 °C และที่ระดับแรงดึง $(V/V_{\max})$ เท่ากับ: a) 0.168; และ b) 0.336 สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene)



รูปที่ 33 การหาค่าอีลาสติคสตีเฟนสเทียบเท่า (k_{eq}) จากการให้แรงเป็นวงรอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 40 °C และที่ระดับแรงดึง (V/V_{max}) เท่ากับ: c) 0.505; และ d) 0.673 สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene)



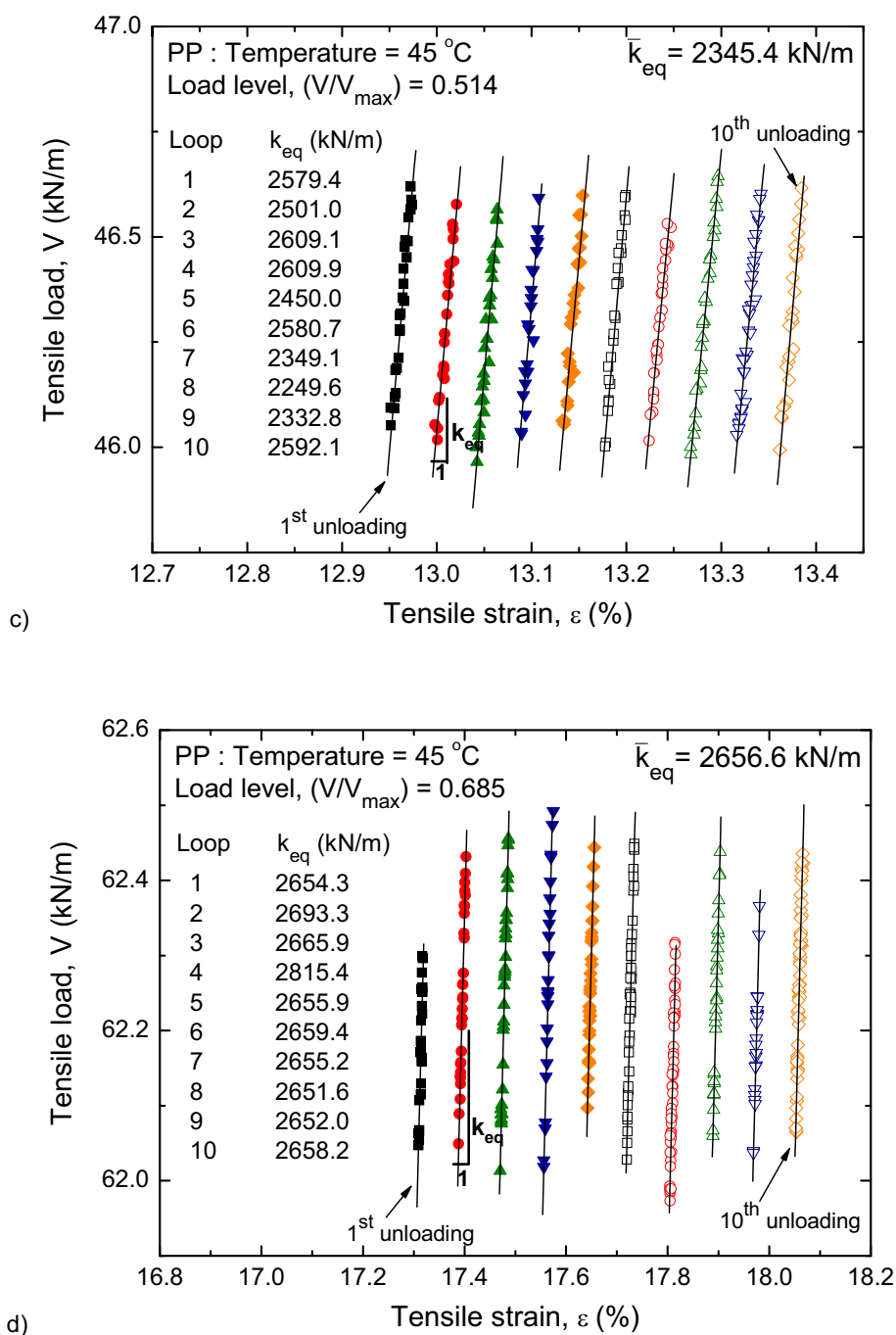
a)



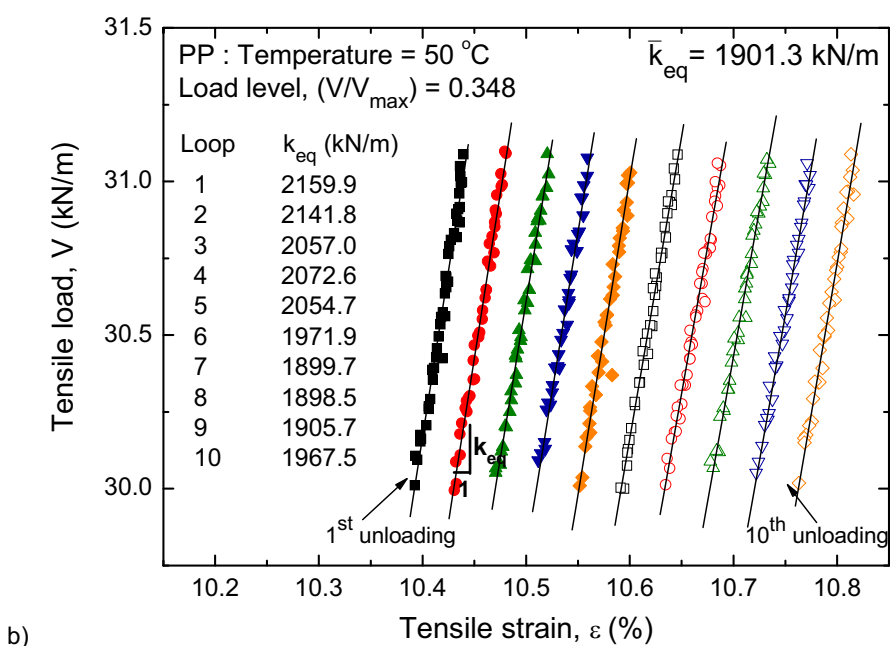
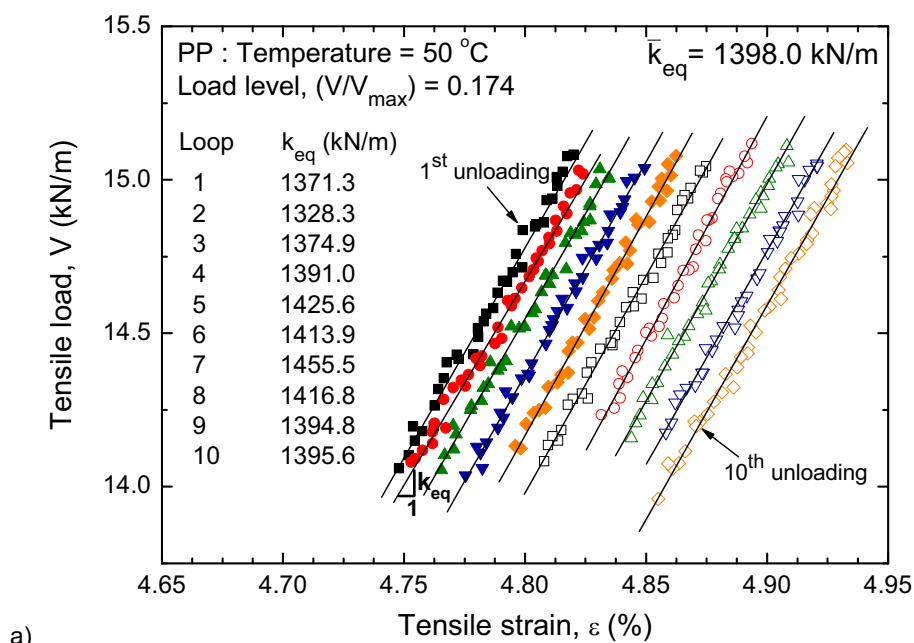
b)

รูปที่ 34

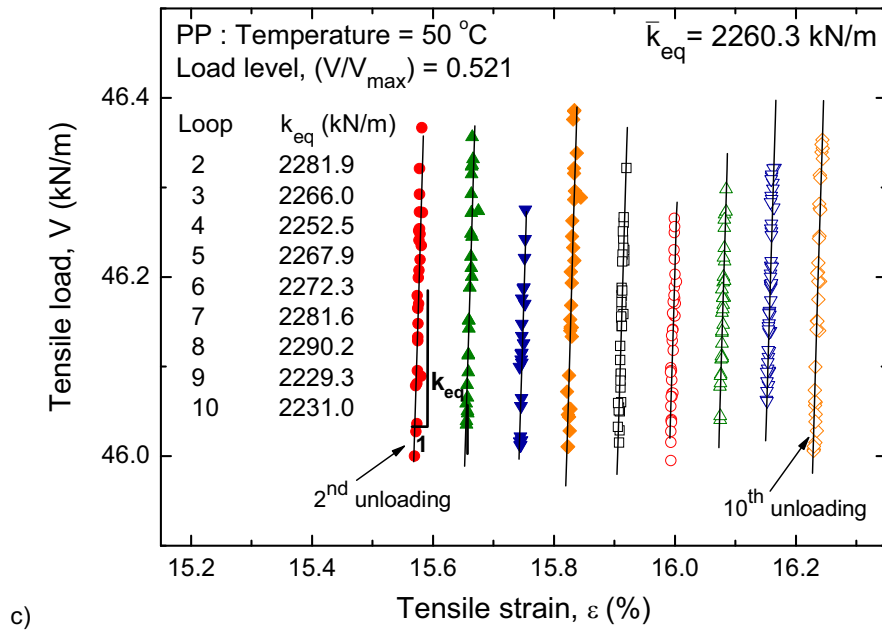
การหาค่าอีลาสติคสตีเฟนเทียมเท่า (k_{eq}) จากการให้แรงเป็นวงรอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 45 °C และที่ระดับแรงดึง (V/V_{max}) เท่ากับ: a) 0.171; และ b) 0.343 สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene)



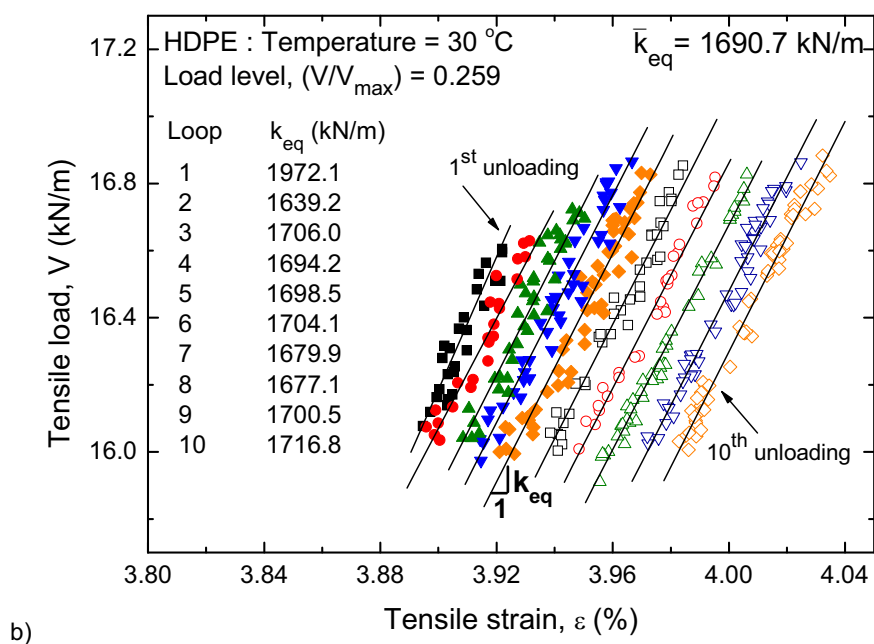
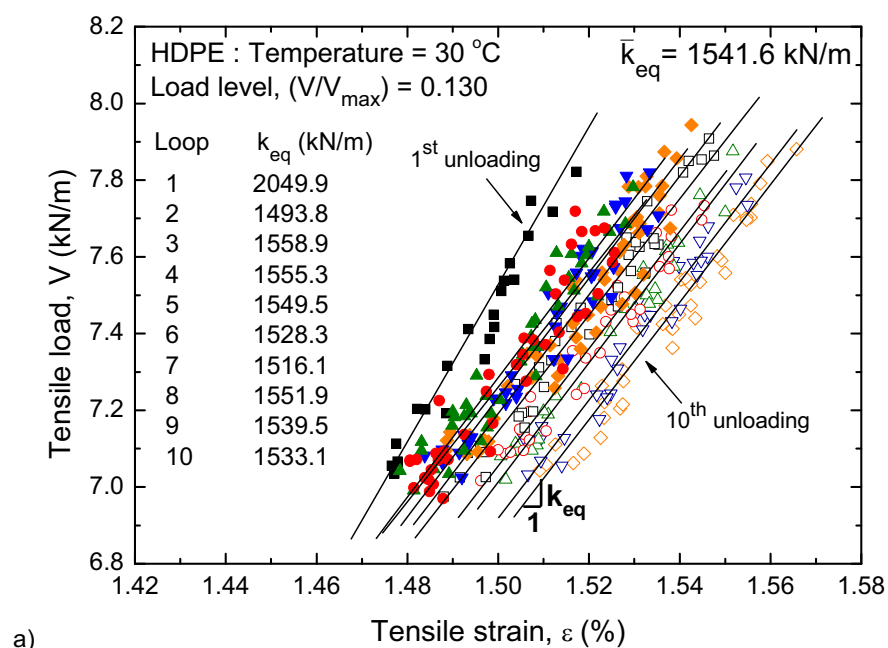
รูปที่ 34 การหาค่าอีลาสติคสตีเฟนสเทียบเท่า (k_{eq}) จากการให้แรงเป็นวงรอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 45 °C และที่ระดับแรงดึง (V/V_{max}) เท่ากับ: c) 0.514; และ d) 0.685 สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene)



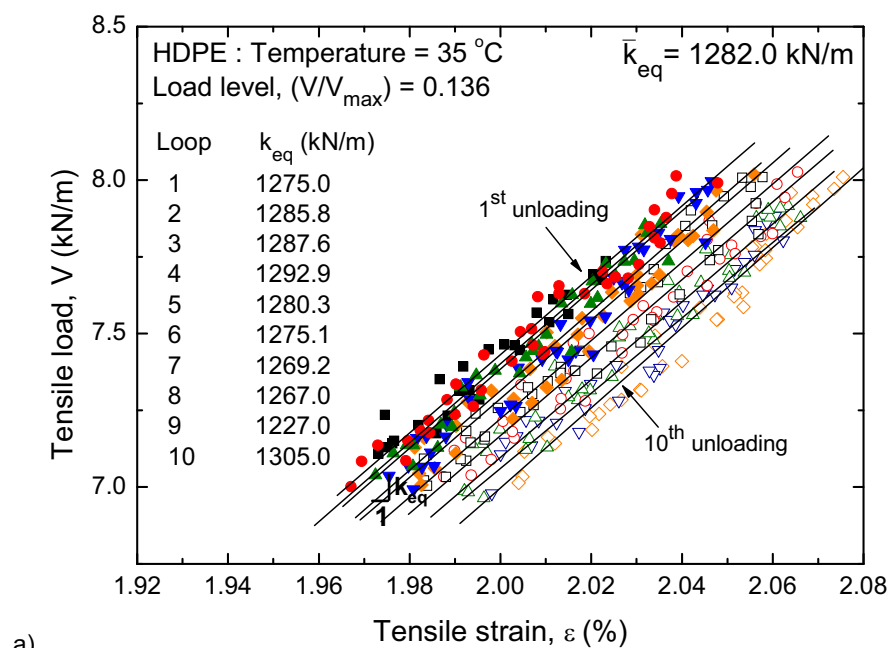
รูปที่ 35 การหาค่าอีลาสติคสตีฟเนสเทียบเท่า (k_{eq}) จากการให้แรงเป็นวงรอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 50 °C และที่ระดับแรงดึง (V/V_{max}) เท่ากับ: a) 0.174; และ b) 0.348 สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene)



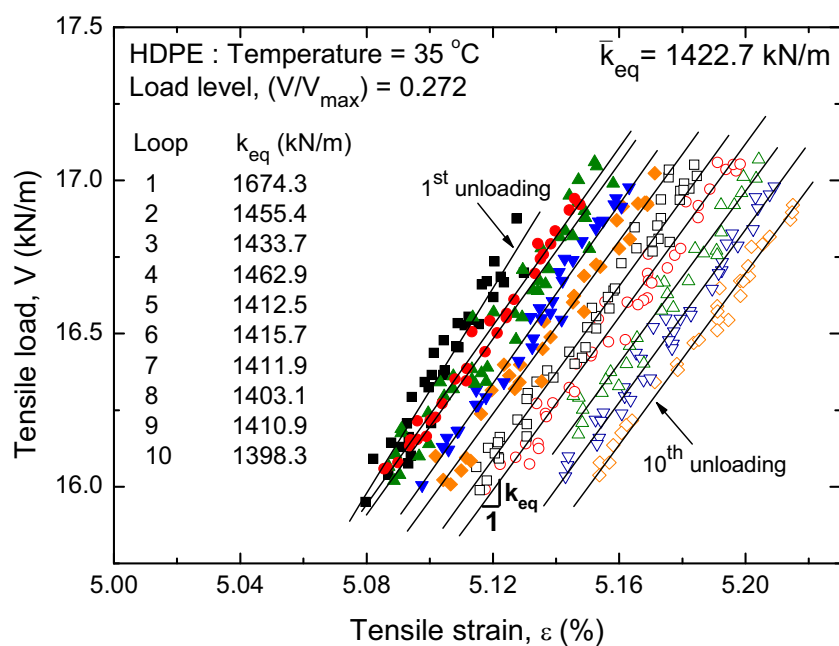
รูปที่ 35 การหาค่าอีลาสติคสตีฟเนสเทียบเท่า (k_{eq}) จากการให้แรงเป็นวงรอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 50 °C และที่ระดับแรงดึง (V/V_{max}) เท่ากับ: c) 0.521 สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene)



รูปที่ 36 การหาค่าอีลาสติคิตีฟเนสเทียบเท่า (k_{eq}) จากการให้แรงเป็นวงรอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 30 °C และที่ระดับแรงดึง (V/V_{max}) เท่ากับ: a) 0.130; และ b) 0.259 สำหรับ Reinforcement 2 (HDPE)



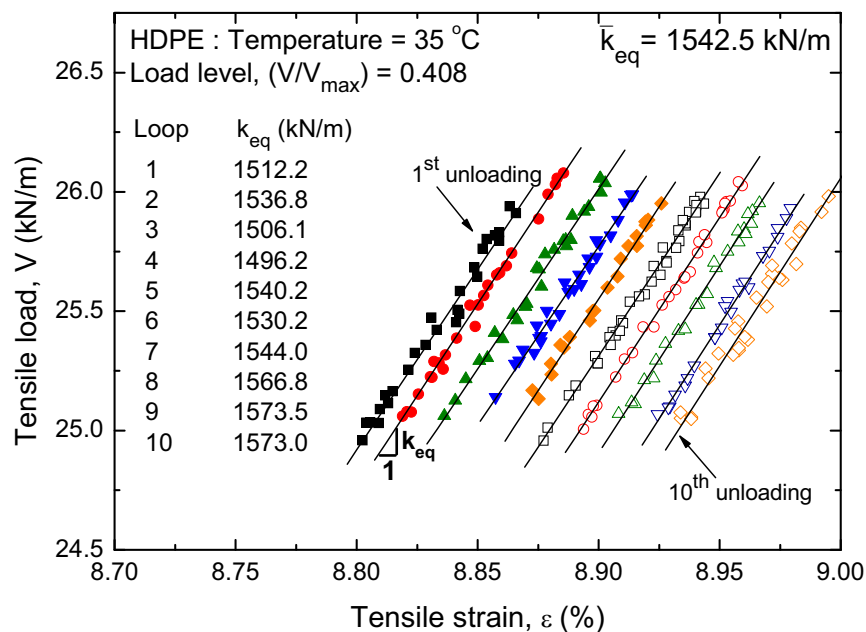
a)



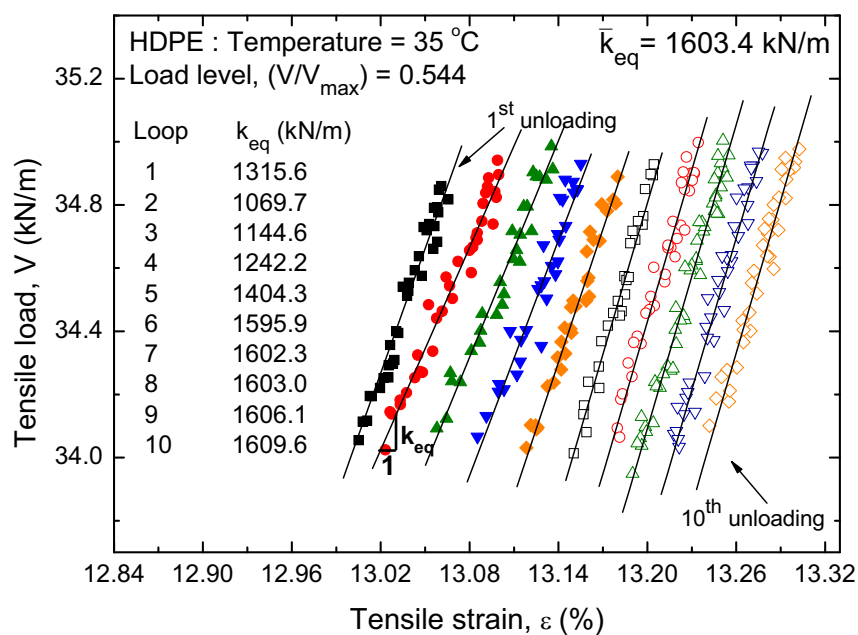
b)

รูปที่ 37

การหาค่าอีลาสติคสทิฟเนสเทียบเท่า (k_{eq}) จากการให้แรงเป็นวงรอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 35 °C และที่ระดับแรงดึง (V/V_{max}) เท่ากับ: a) 0.136; และ b) 0.272 สำหรับ Reinforcement 2 (HDPE)



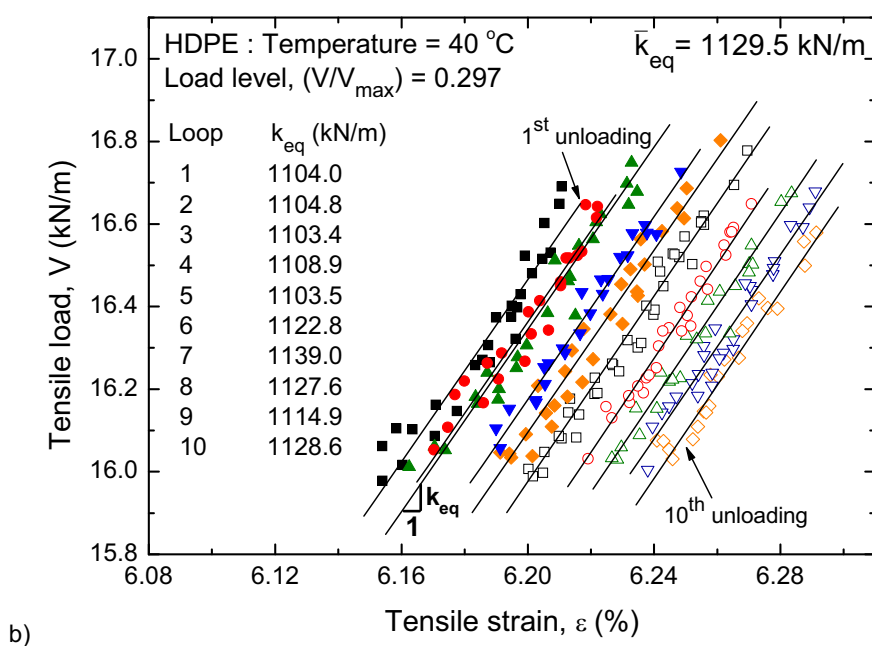
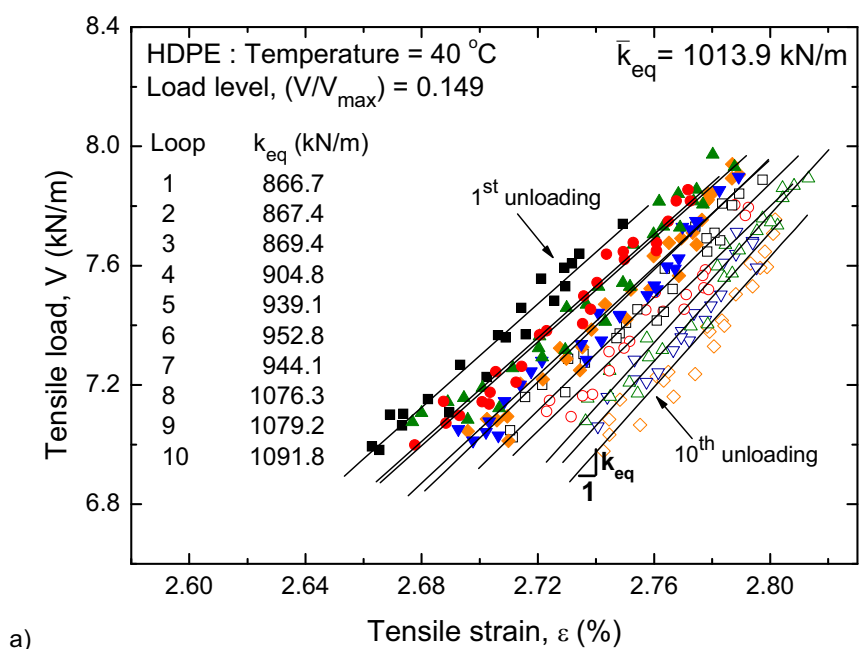
c)



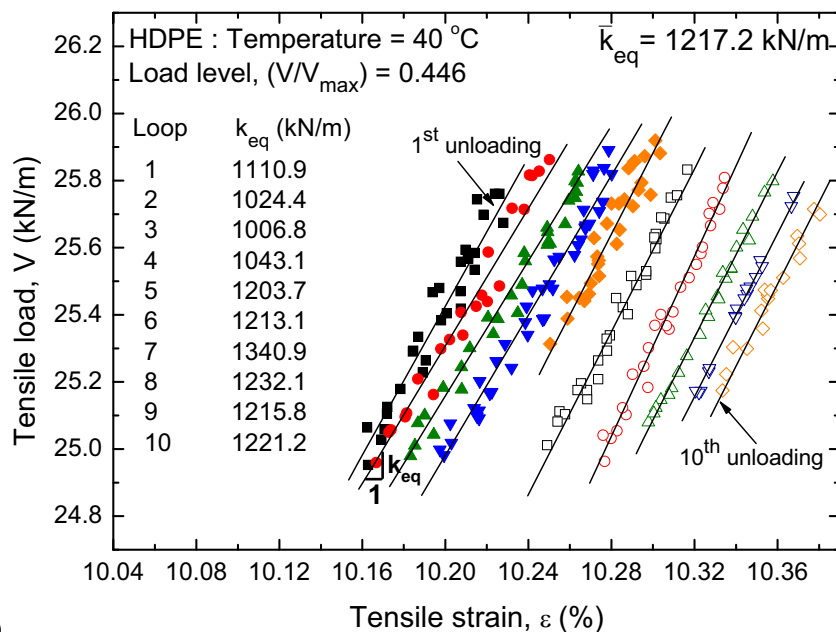
d)

รูปที่ 37

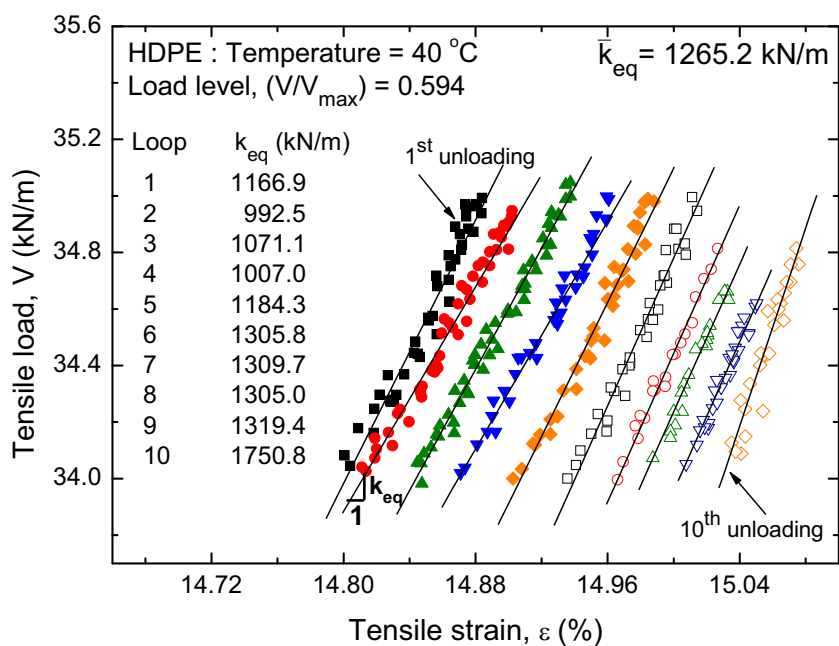
การหาค่าอีลาสติคสตีเฟนสเทียบเท่า (k_{eq}) จากการให้แรงเป็นวงรอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 35 °C และที่ระดับแรงดึง $(V/V_{\max})$ เท่ากับ: c) 0.408; และ d) 0.544 สำหรับ Reinforcement 2 (HDPE)



รูปที่ 38 การหาค่าอีลาสติคสตีฟเนสเทียบเท่า (k_{eq}) จากการให้แรงเป็นวงรอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 40 °C และที่ระดับแรงดึง (V/V_{max}) เท่ากับ: a) 0.149; และ b) 0.297 สำหรับ Reinforcement 2 (HDPE)



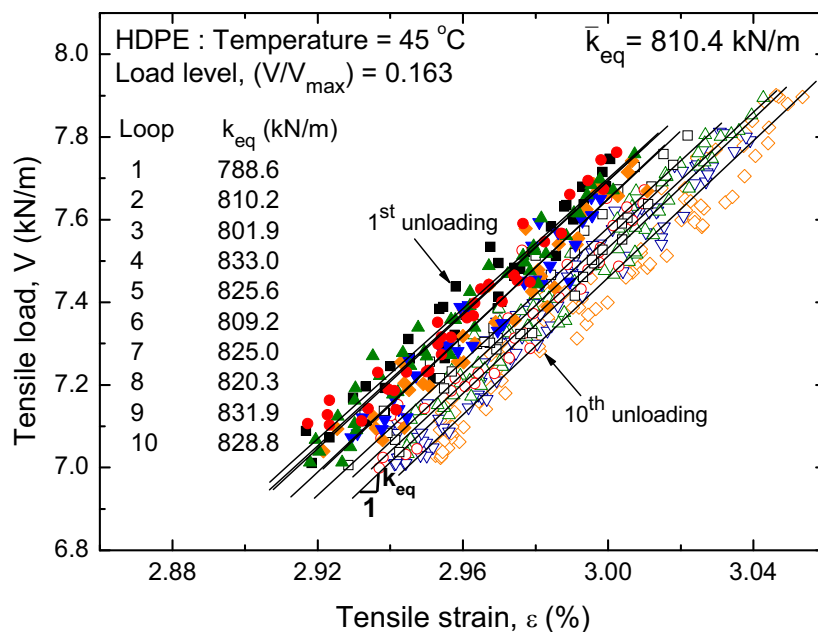
c)



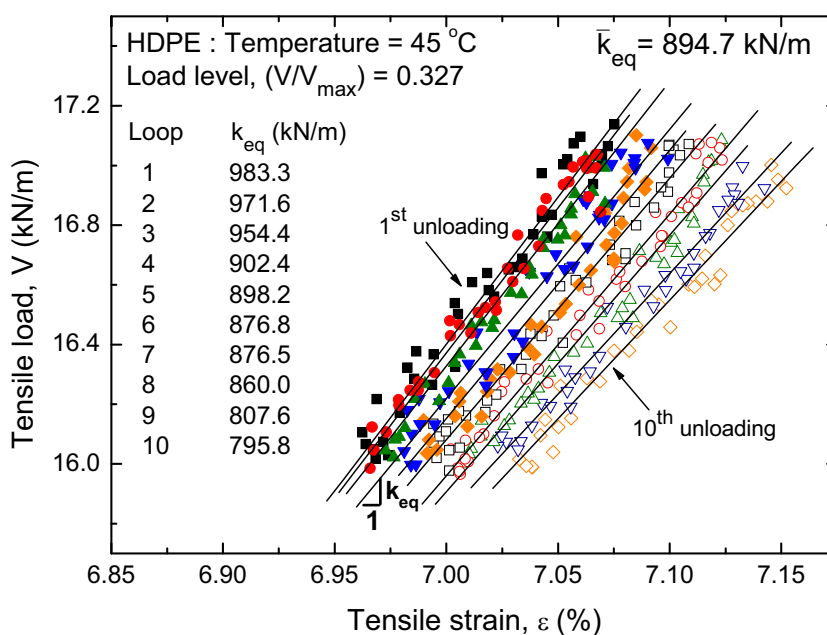
d)

รูปที่ 38

การหาค่าอีลาสติคสตีฟเนสเทียบเท่า (k_{eq}) จากการให้แรงเป็นวงรอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 40 °C และที่ระดับแรงดึง (V/V_{max}) เท่ากับ: c) 0.446; และ d) 0.594 สำหรับ Reinforcement 2 (HDPE)

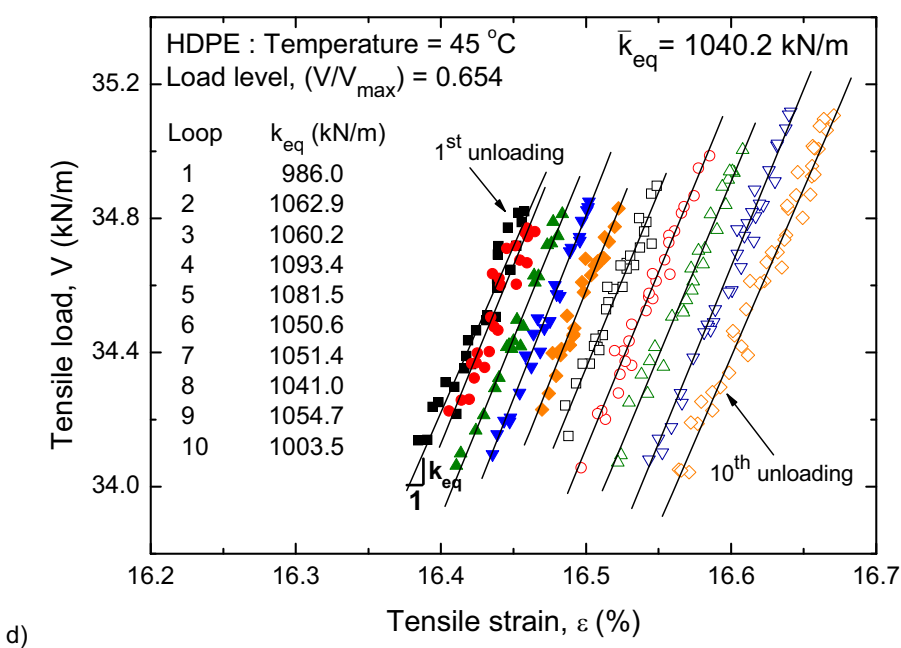
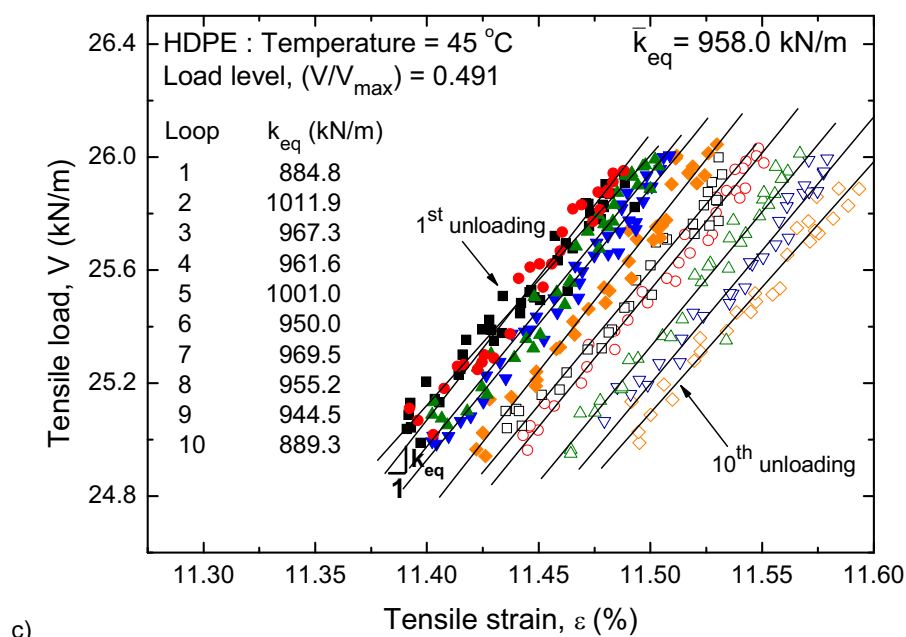


a)

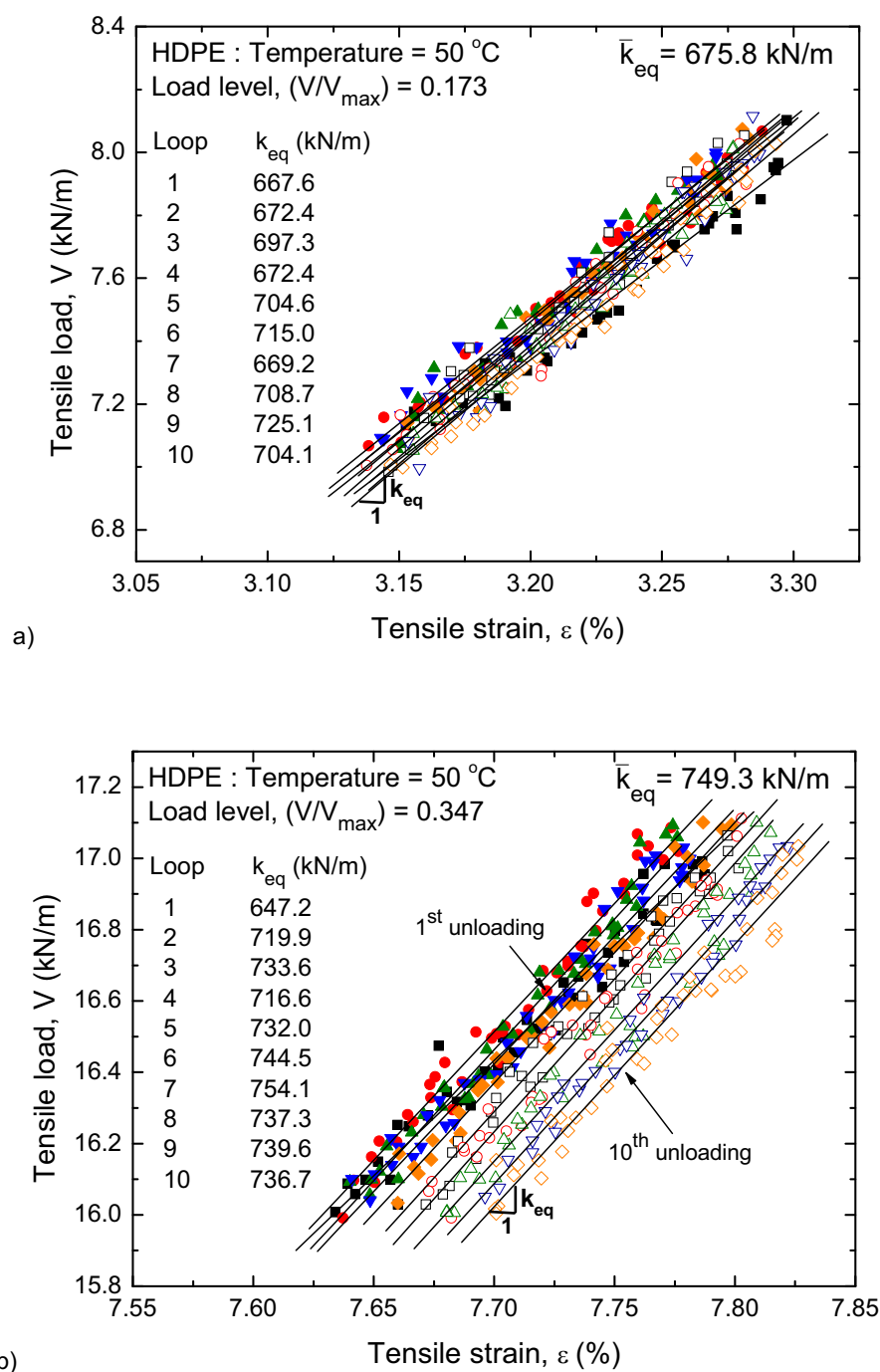


b)

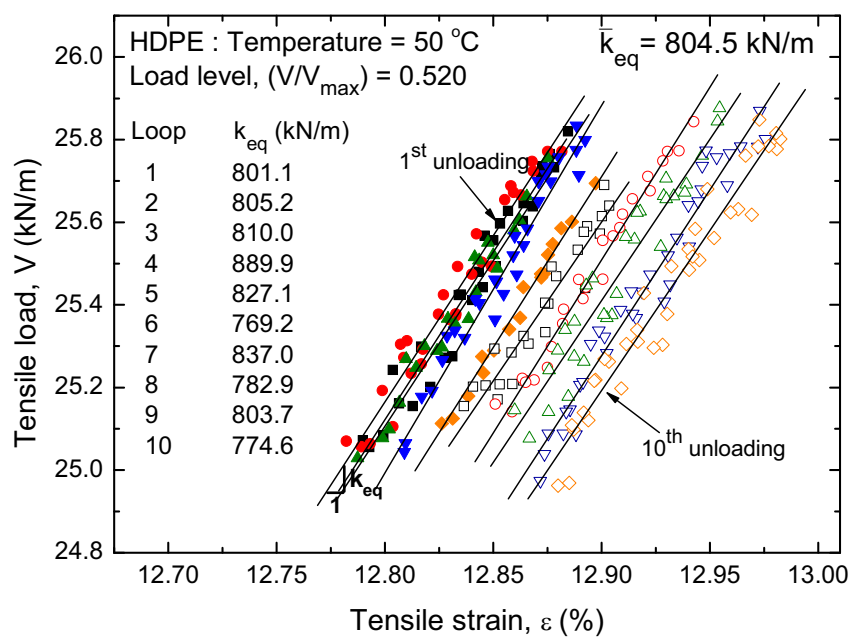
รูปที่ 39 การหาค่าอีลาสติคสตีฟเนสเทียบเท่า (k_{eq}) จากการให้แรงเป็นวงรอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 45 °C และที่ระดับแรงดึง (V/V_{max}) เท่ากับ: a) 0.163; และ b) 0.327 สำหรับ Reinforcement 2 (HDPE)



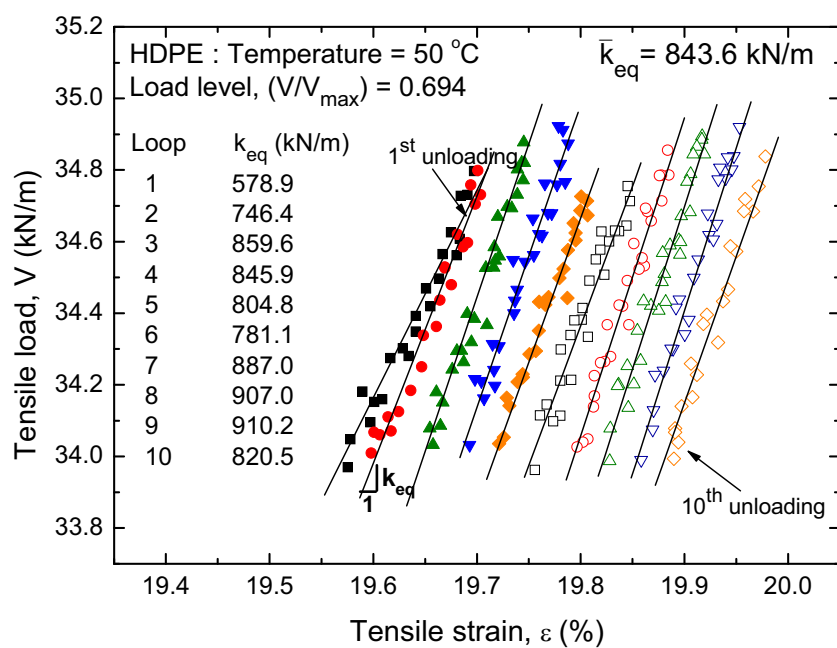
รูปที่ 39 การหาค่าอีลาสติคิตีฟเนสเทียบเท่า (k_{eq}) จากการให้แรงเป็นวงรอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 45 °C และที่ระดับแรงดึง (V/V_{max}) เท่ากับ: c) 0.491; และ d) 0.654 สำหรับ Reinforcement 2 (HDPE)



รูปที่ 40 การหาค่าอีลาสติคสตีฟเนสเทียบเท่า (k_{eq}) จากการให้แรงเป็นวงรอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 50 °C และที่ระดับแรงดึง (V/V_{max}) เท่ากับ: a) 0.173; และ b) 0.347 สำหรับ Reinforcement 2 (HDPE)



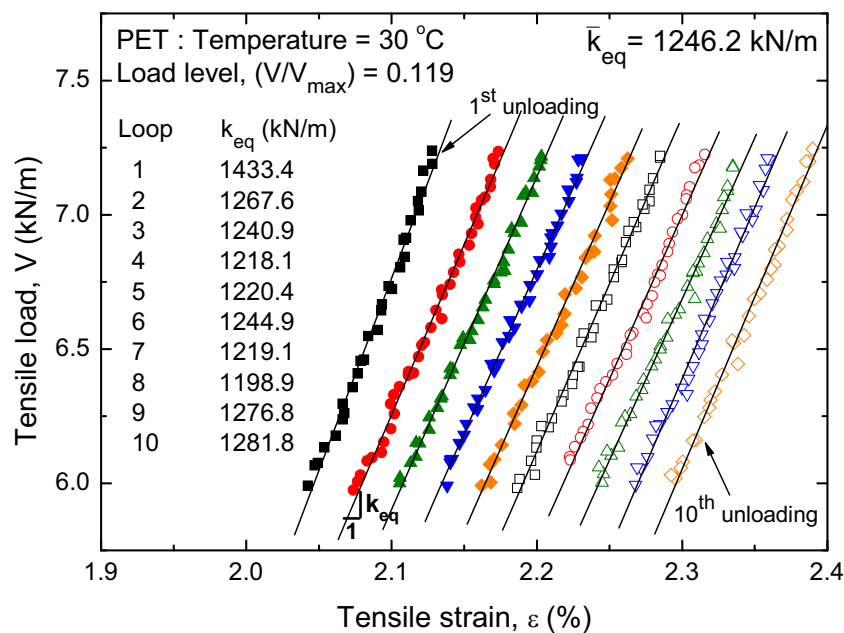
c)



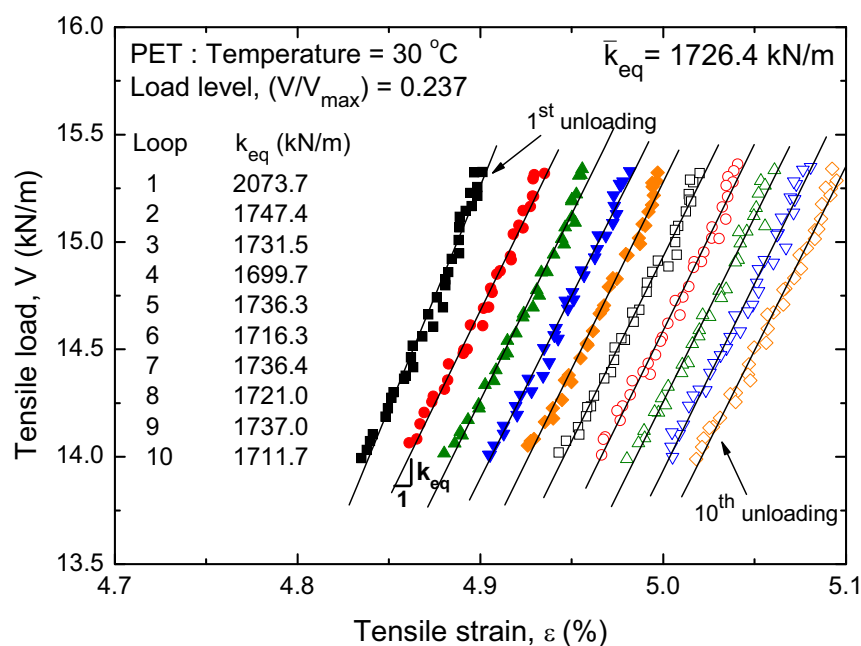
d)

รูปที่ 40

การหาค่าอีลาสติคสตีฟเนสเทียบเท่า (k_{eq}) จากการให้แรงเป็นวงรอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 50 °C และที่ระดับแรงดึง (V/V_{max}) เท่ากับ: c) 0.520; และ d) 0.694 สำหรับ Reinforcement 2 (HDPE)



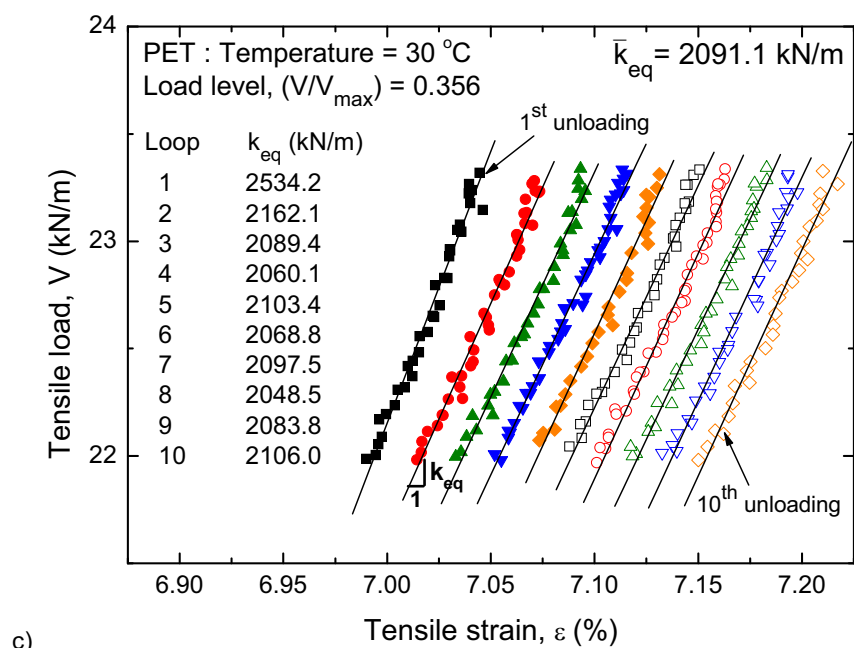
a)



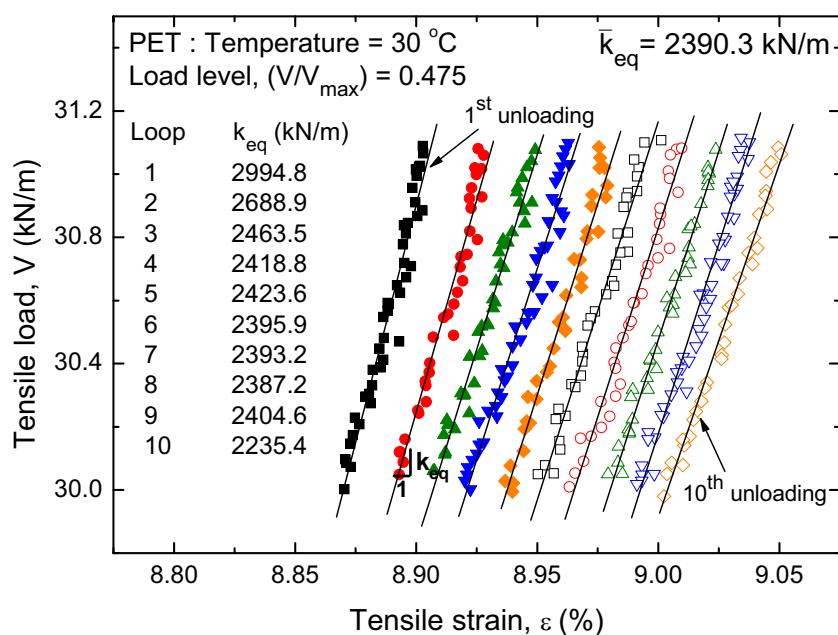
b)

รูปที่ 41

การหาค่าอีลาสติคสทิฟเนสเทียบเท่า (k_{eq}) จากการให้แรงเป็นวงรอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 30 °C และที่ระดับแรงดึง (V/V_{max}) เท่ากับ: a) 0.119; และ b) 0.237 สำหรับ Reinforcement 3 (Polyester)

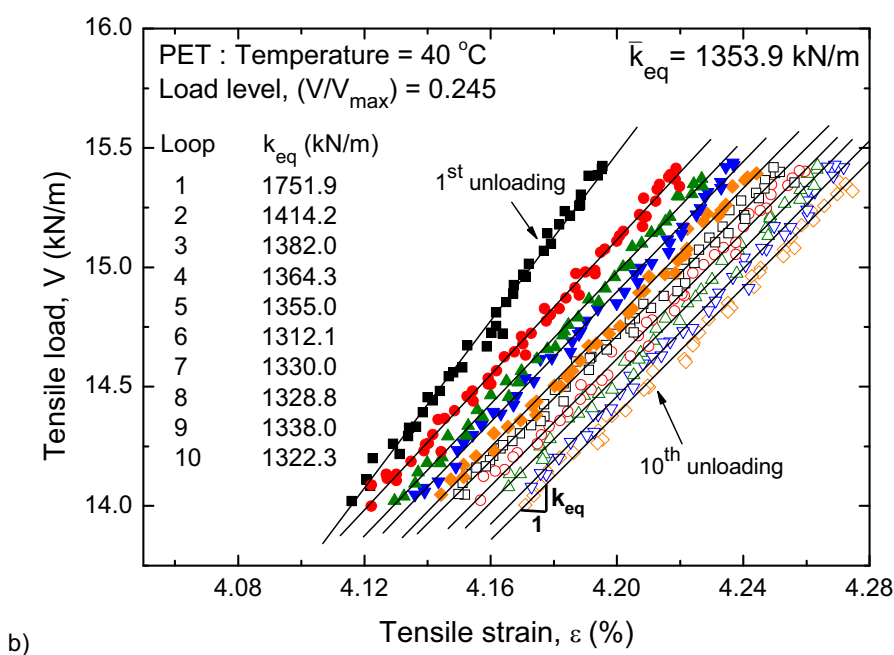
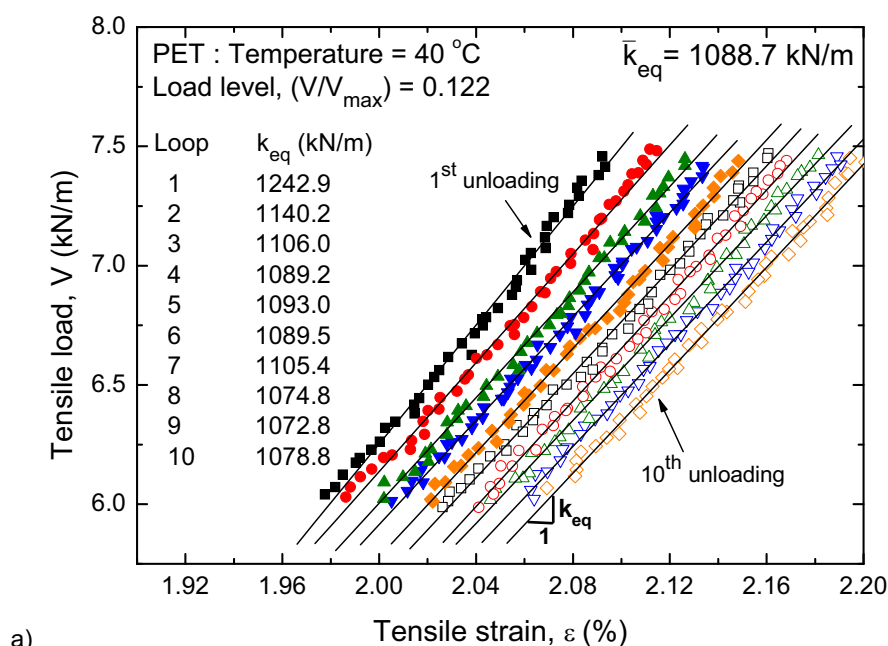


d)



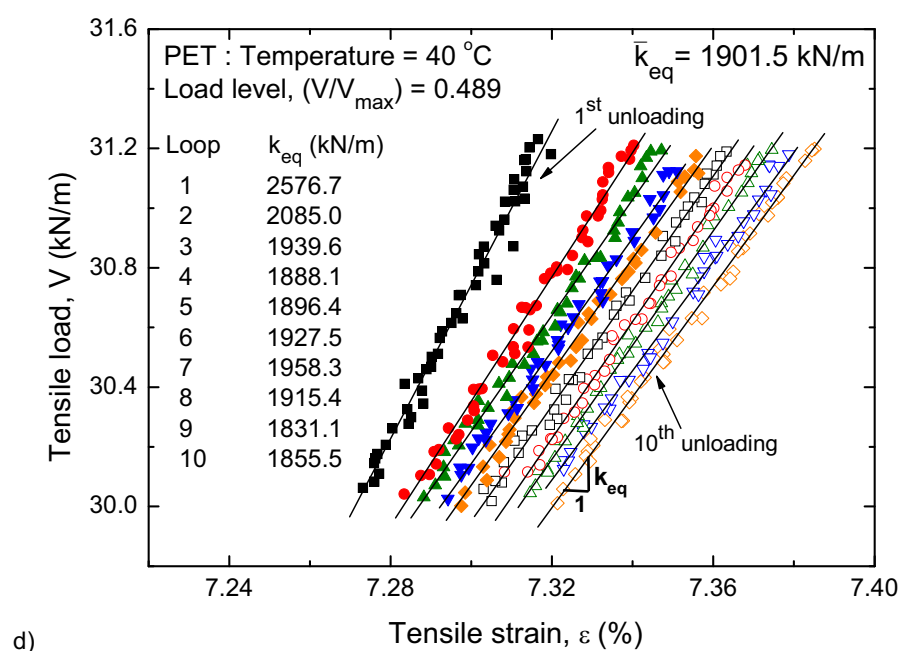
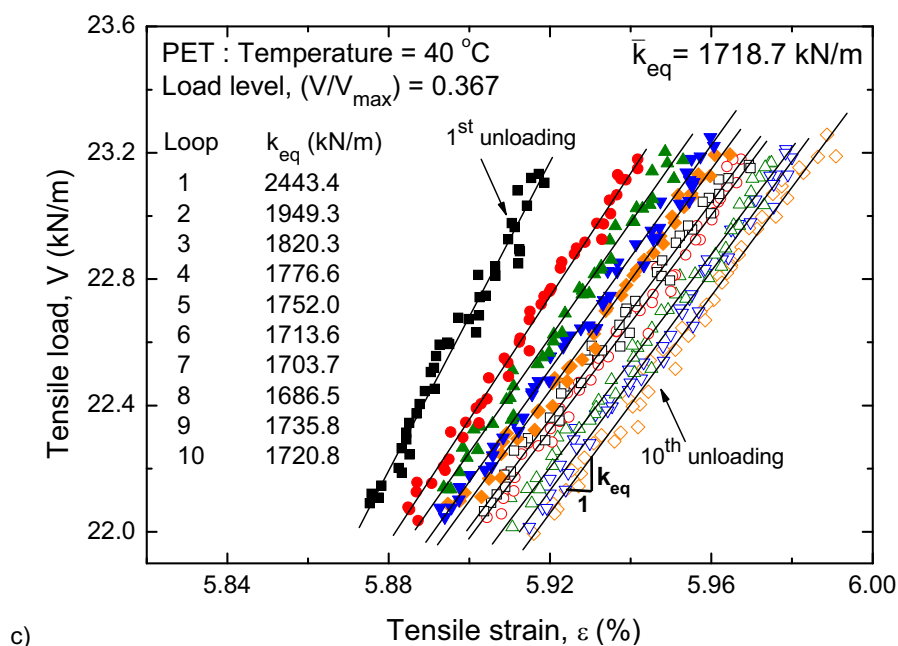
รูปที่ 41

การหาค่าอีลาสติคสตีฟเนสเทียบเท่า (k_{eq}) จากการให้แรงเป็นวงรอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 30 °C และที่ระดับแรงดึง (V/V_{max}) เท่ากับ: c) 0.356; และ d) 0.475 สำหรับ Reinforcement 3 (Polyester)

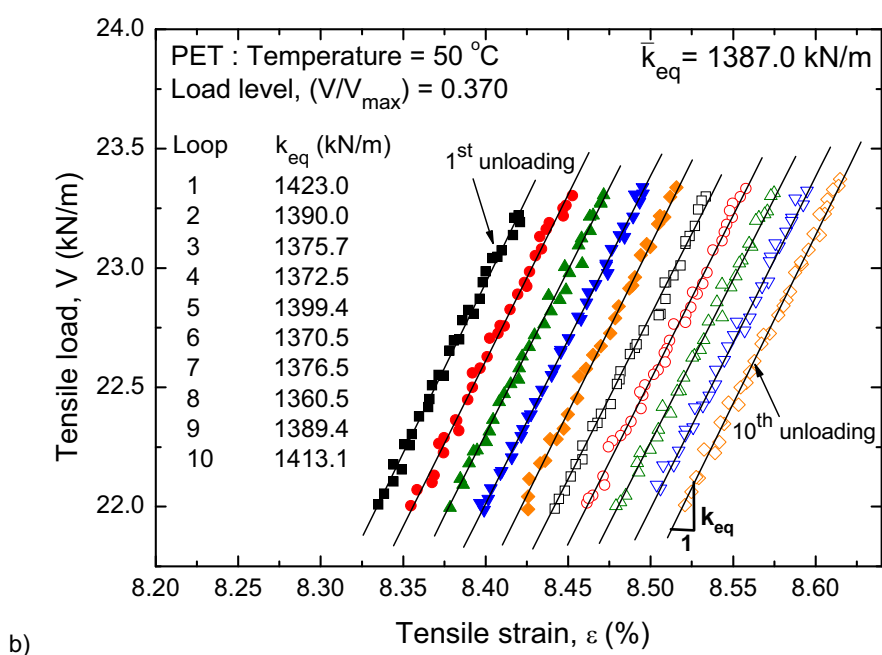
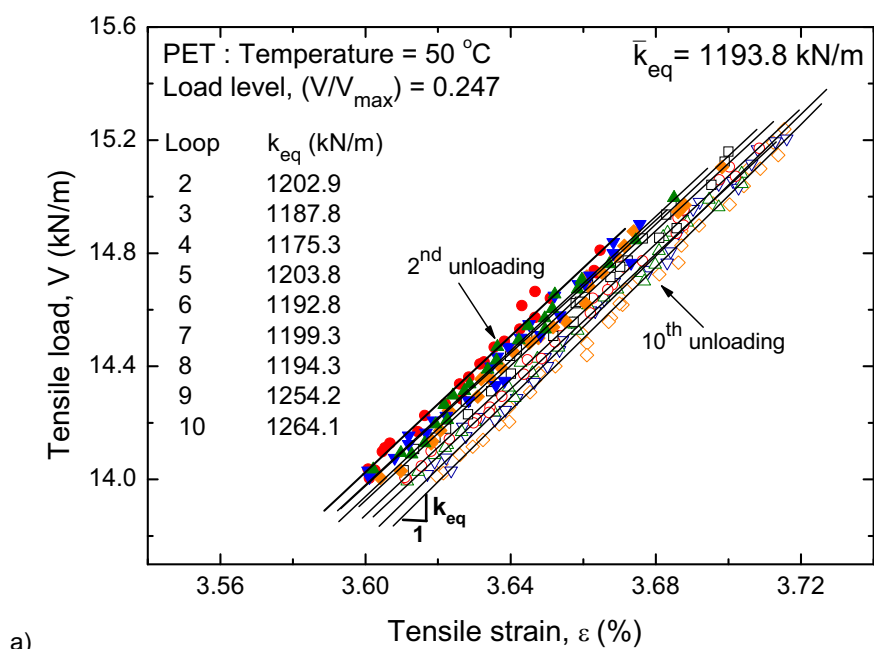


รูปที่ 42

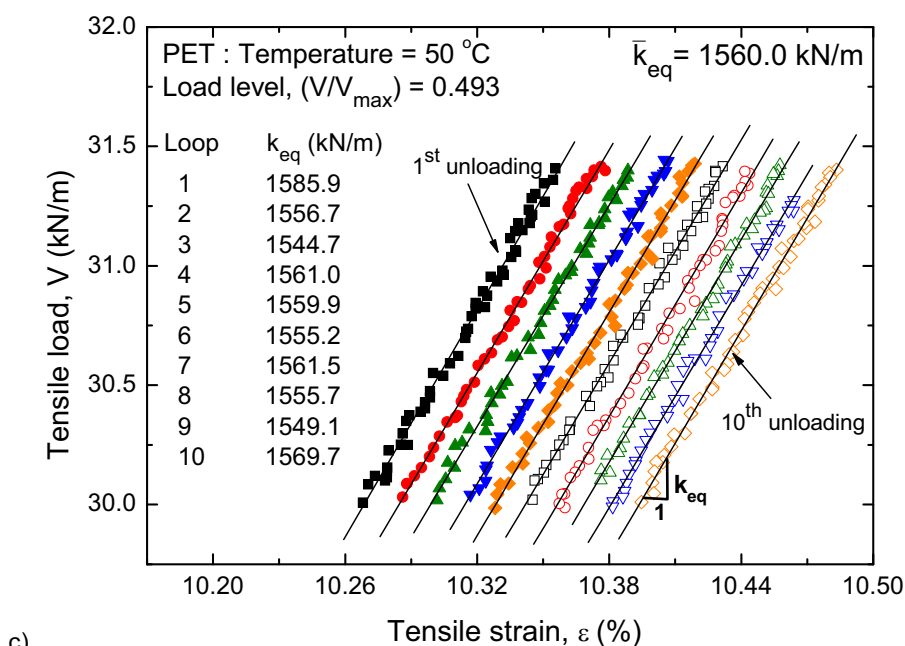
การหาค่าอีลาสติคสตีฟเนสเทียบเท่า (k_{eq}) จากการให้แรงเป็นวงรอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 40 °C และที่ระดับแรงดึง (V/V_{max}) เท่ากับ: a) 0.122; และ b) 0.245 สำหรับ Reinforcement 3 (Polyester)



รูปที่ 42 การหาค่าอีลาสติคสตีเฟนสเทียบเท่า (k_{eq}) จากการให้แรงเป็นวงรอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 40 °C และที่ระดับแรงดึง (V/V_{max}) เท่ากับ: c) 0.367; และ d) 0.489 สำหรับ Reinforcement 3 (Polyester)



รูปที่ 43 การหาค่าอีลาสติคสตีฟเนสเทียบเท่า (k_{eq}) จากการให้แรงเป็นวงรอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 50 °C และที่ระดับแรงดึง ($V/V_{\max}$) เท่ากับ: a) 0.247; และ b) 0.370 สำหรับ Reinforcement 3 (Polyester)

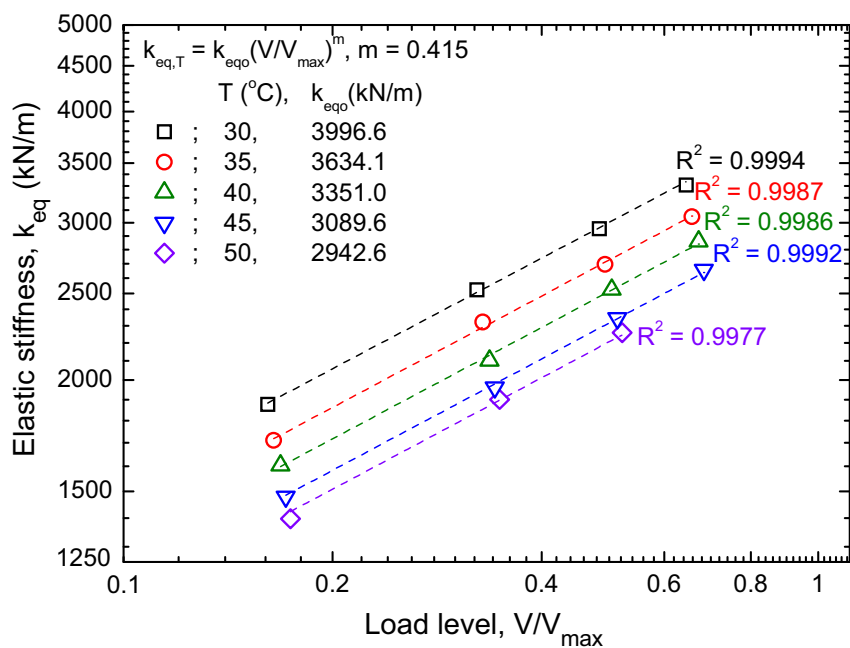


รูปที่ 43 การหาค่าอีลาสติคสตีฟเนสเทียบเท่า (k_{eq}) จากการให้แรงเป็นวงรอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 50 °C และที่ระดับแรงดึง (V/V_{max}) เท่ากับ: c) 0.493 สำหรับ Reinforcement 3 (Polyester)

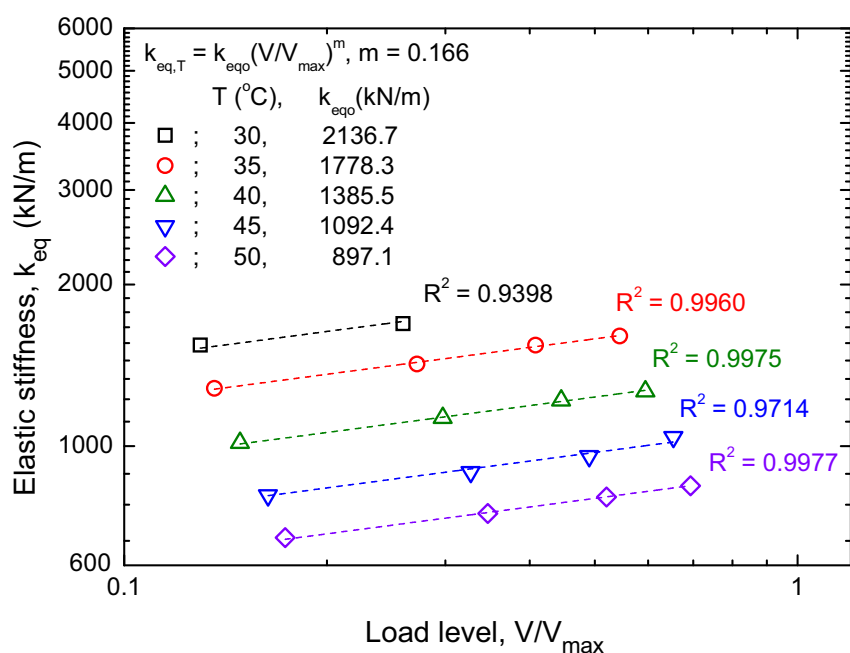
ค่าอีลาสติคสตีฟเนสเทียบเท่าที่ค่าระดับแรงดึงและอุณหภูมิอื่นๆ ที่ไม่ได้แสดงในรูปที่ 31 ถึง 43 สามารถหาได้ในแบบเดียวกันกับที่แสดงในรูปที่ 31 ถึง 43 จากจำนวนรอบจำนวน 10 รอบที่ให้แรงกระทำซ้ำในแต่ละระดับแรงดึงและอุณหภูมิ จะหาค่าอีลาสติคสตีฟเนสเทียบเท่าจากความชันในส่วน Unloading โดยเอาค่าที่น้อยที่สุดและค่าที่มากที่สุดออกไปแล้วทำการหาค่าเฉลี่ยของค่าความชันที่เหลือ รูปที่ 44, 45 และ 46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอีลาสติคสตีฟเนสเทียบเท่า (k_{eq}) และค่าระดับแรงดึง (V/V_{max}) ในสเกลล็อกการิทึมทั้งสองแกน สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene), Reinforcement 2 (HDPE) และ Reinforcement 3 (Polyester) ตามลำดับ จากรูปดังกล่าวจะเห็นได้ว่า ค่า k_{eq} เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อระดับแรงดึงเพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติอีลาสติคของแผ่นใยสังเคราะห์โพลีเมอร์ที่ได้ทดสอบมีลักษณะเป็น Hypo-Elasticity ในอีกทางหนึ่ง หากเปรียบเทียบที่ระดับแรงดึงเท่ากันแล้วจะพบว่า ค่า k_{eq} ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเพิ่มขึ้น ทั้งนี้พบว่าสมการที่ 2 สามารถ Fit เข้ากับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบที่แต่ละอุณหภูมิ

$$k_{eq,T} = k_{eqo} \left(\frac{V}{V_{max}} \right)^m \quad (2)$$

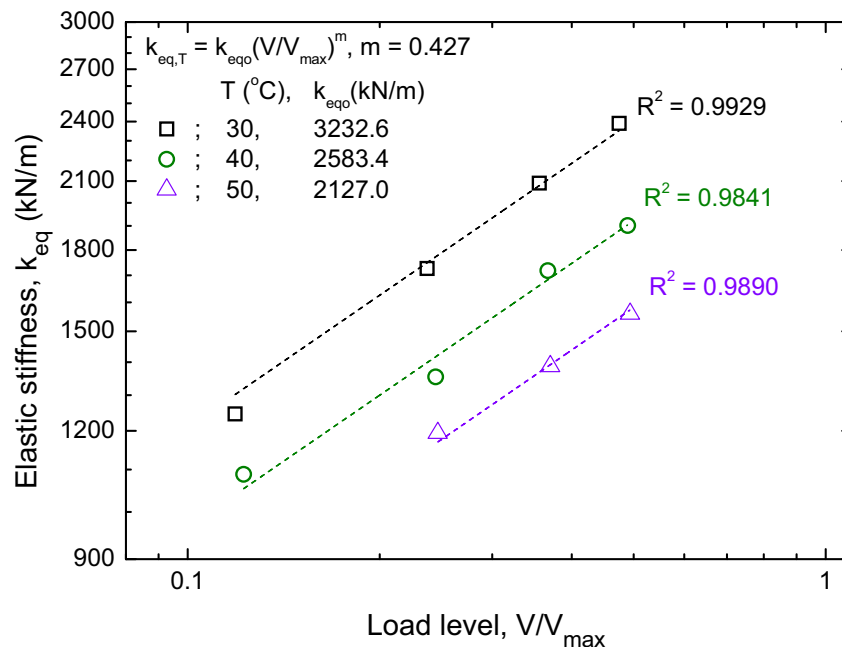
เมื่อ $k_{eq,T}$ คือ ค่า k_{eq} เมื่ออุณหภูมิเท่ากับ T; k_{eqo} คือ ค่า $k_{eq,T}$ เมื่อ $V = V_{max}$; และ m คือค่าคงที่ซึ่งเป็นอิสระจากค่าอุณหภูมิแวดล้อม ค่าเฉลี่ยของค่า m ที่แสดงในรูปที่ 44, 45 และ 46 มีค่าเท่ากับ 0.415, 0.166 และ 0.427 ตามลำดับ



รูปที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอีลาสติคสทิฟเนสเทียบเท่าและค่าระดับแรงดึงที่อุณหภูมิแวดล้อมต่างๆ กัน สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene)



รูปที่ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอีลาสติคสทิฟเนสเทียบเท่าและค่าระดับแรงดึงที่อุณหภูมิแวดล้อมต่างๆ กัน สำหรับ Reinforcement 2 (HDPE)



รูปที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอีลาสติคสทิฟเนสเทียบเท่าและค่าระดับแรงดึงที่อุณหภูมิแวดล้อมต่างๆ กัน สำหรับ Reinforcement 3 (Polyester)

5.4.3 การเปรียบเทียบระหว่างค่า k_{eq} และอุณหภูมิ

ค่า k_{eq} สำหรับอุณหภูมิที่แตกต่างกันแสดงในรูปที่ 44, 45 และ 46 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่า k_{eq} ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังที่แสดงในรูปที่ 25, 26 และ 27 ค่าพารามิเตอร์ผลกระทบอุณหภูมิ A^f ซึ่งนิยามด้วยอัตราส่วนระหว่างแรงดึงสูงสุด (V_{max}) ต่อแรงดึงสูงสุดที่ทดสอบที่อุณหภูมิอ้างอิง (V_{max0}) ซึ่งมีค่าเท่ากับ T_0 ($= 30\text{ }^{\circ}\text{C}$) ก็มียาลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นด้วย รูปที่ 47, 48 และ 49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า k_{eq} และ A^f สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene), Reinforcement 2 (HDPE) และ Reinforcement 3 (Polyester) ตามลำดับ จากรูปดังกล่าวพบว่า สมการที่ 3 สามารถใช้ Fit ข้อมูลได้อย่างเหมาะสม

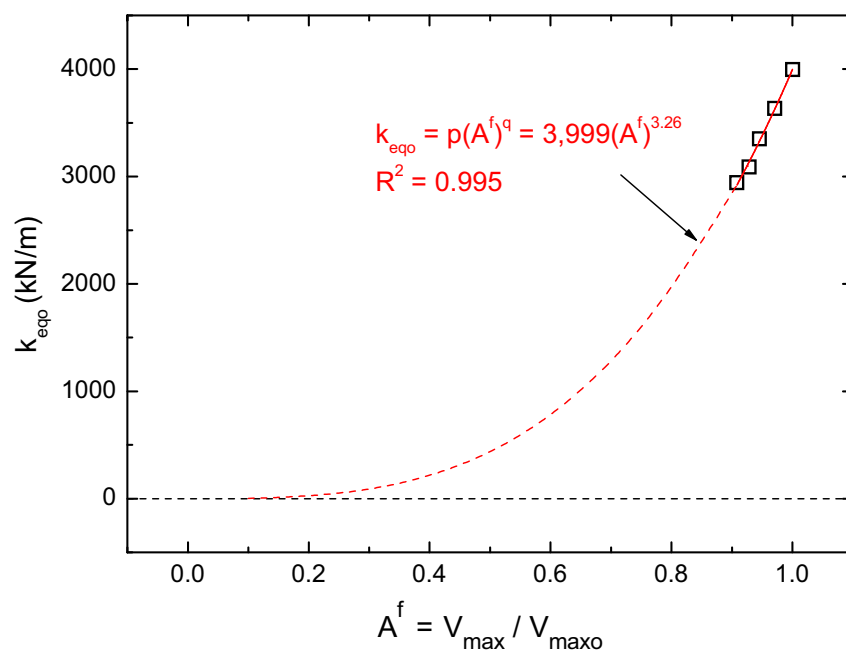
$$k_{eq} = p(A^f)^q \quad (3)$$

เมื่อ p และ q คือค่าคงที่ดังแสดงในตารางที่ 12 สมการที่ 3 บ่งบอกถึงการลดลงของค่าอีลาสติคสตีฟเนสสอดคล้องกับการลดลงของค่าแรงดึงสูงสุด เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

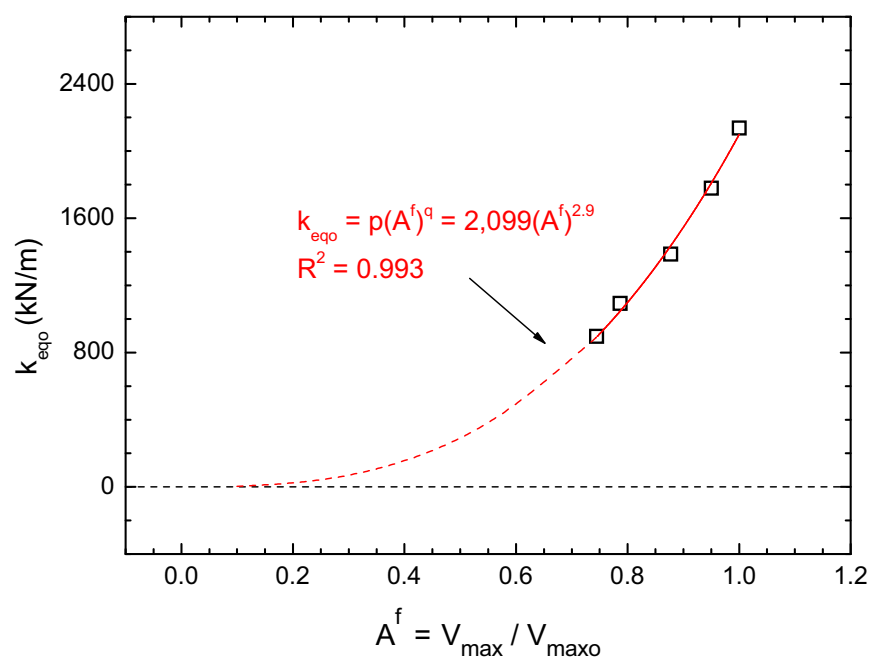
โดยสรุป ค่าอีลาสติคสตีฟเนสเพิ่มขึ้นเมื่อระดับแรงดึงสูงขึ้นในขณะที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิแวดล้อมสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกันกับแนวโน้มของค่าแรงดึงสูงสุด พฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 1, 2 และ 3 ซึ่งอยู่ในรูปของระดับแรงดึง (V_{max}/V_{max0}) และพารามิเตอร์ผลกระทบอุณหภูมิ (A^f) สมการที่ 1, 2 และ 3 สามารถที่จะนำมาใช้ใน non-linear three-component model เพื่อการจำลองพฤติกรรมของแผ่นใยสังเคราะห์โพลิเมอร์ที่ได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิต่อไปได้

ตารางที่ 12 ค่าคงที่ p และ q สำหรับแผ่นใยสังเคราะห์โพลิเมอร์ที่แตกต่างกันที่ใช้ในงานวิจัยนี้

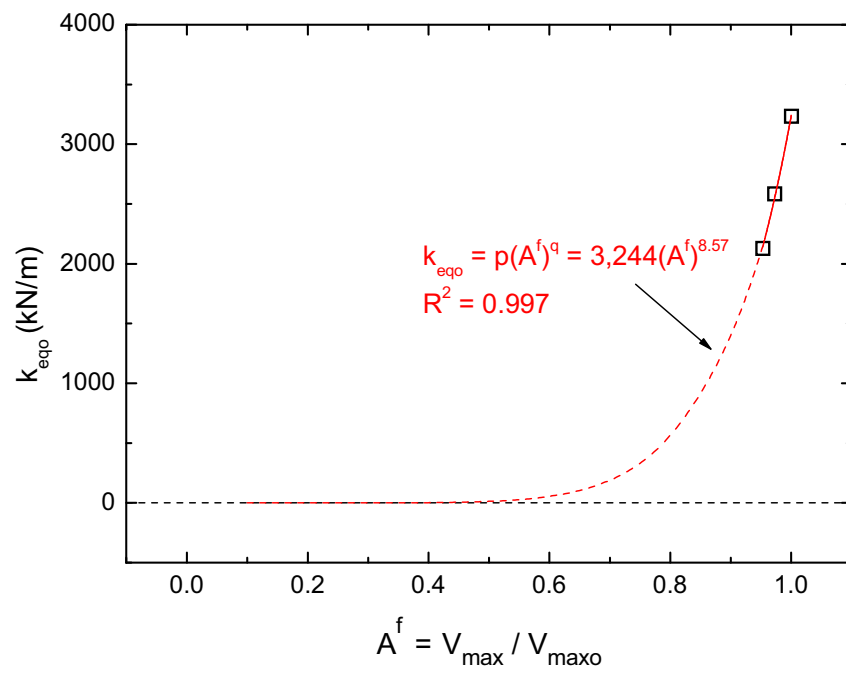
Reinforcement type	p	q
PP	3999	3.26
HDPE	2099	2.90
PET	3244	8.57



รูปที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k_{eqo} และค่า A^f สำหรับ Reinforcement 1 (Polypropylene)



รูปที่ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k_{eqo} และค่า A^f สำหรับ Reinforcement 2 (HDPE)



รูปที่ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k_{eqo} และค่า A^f สำหรับ Reinforcement 3 (Polyester)

6. บทสรุป

จากการทดสอบและการวิเคราะห์ที่ได้ดำเนินงานในงานวิจัยนี้ สามารถเขียนข้อสรุปที่สำคัญได้ดังนี้

1. การทดสอบการเร่งการคืบสามารถดำเนินการได้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยเครื่องมือทดสอบที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่เพื่อใช้ในงานวิจัยนี้
2. Creep rupture curve และค่าลดทอนการคืบ (Creep Reduction Factor) สามารถหาและตรวจสอบได้อย่างรวดเร็วด้วยการทดสอบการเร่งการคืบ
3. กำลังรับแรงดึงสูงสุดของแผ่นใยสังเคราะห์โพลิเมอร์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออุณหภูมิแวดล้อมสูงขึ้น
4. ค่าอีลาสติคสตีเฟนสของแผ่นใยสังเคราะห์โพลิเมอร์เพิ่มขึ้นกับค่าระดับแรงดึงในขณะที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น
5. พฤติกรรมในข้อ 3 และ 4 สามารถอธิบายได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้

7. ผลลัพธ์จากโครงการวิจัย

-การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

Kongkitkul, W., Tabsombut, W., Tatsuoka, F. and Jaturapitakkul, C. (2010): "Effects of ambient temperature on the elastic property of a geogrid", *Proc. of International Symposium, Exhibition, and Short Course on Geotechnical and Geosynthetics Engineering : Challenges and Opportunities on Climate Change*, Bangkok, Thailand, 7 – 9 December 2010, pp.381-390.

-วารสารวิจัยนานาชาติ

Kongkitkul, W., Tabsombut, W., Tatsuoka, F. and Jaturapitakkul, C. (2011): "Temperature effects on the elastic property of polymer geogrids", *Geosynthetics International* (อยู่ระหว่างการจัดทำ)

8. บรรณานุกรม

ASTM D 5262 **Standard Test Method for Evaluating the Unconfined Tension Creep and Creep Rupture Behavior of Geosynthetics**, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D 6992 **Standard Test Method for Accelerated Tensile Creep and Creep-Rupture of Geosynthetic Materials Based on Time-Temperature Superposition Using the Stepped Isothermal Method**, ASTM International, West Conshohocken, PA.

Bueno, B.S., Costanzi, M.A. and Zornberg, J.G. (2005): "Conventional and accelerated creep tests on nonwoven needle-punched geotextiles", **Geosynthetics International**, Vol.12, No.6, pp.276-287.

Di Benedetto, H., Tatsuoka, F., Lo Presti, D., Sauzéat, C. and Geoffroy, H. (2005): "Time effects on the behaviour of geomaterials", **Deformation Characteristics of Geomaterials: Recent Investigations and Prospects**, Di Benedetto et al. (eds), Balkema, pp.59-123.

EN ISO 10319 **Geosynthetics – Wide-Width Tensile Test**.

Ferry, J.D. (1980): **Viscoelastic Properties of Polymers**, 3rd edition, New York

Greenwood, J.H., Kempton, G.T., Brady, K.C. and Watts, G.R.A. (2004): "Comparison between Stepped Isothermal Method and long-term creep tests on geosynthetics", **Proceeding of the 3rd European Geosynthetics Conference**, Munich, Vol.2, pp.527-532.

GRI 2000 **Standard Test Method for "Accelerated Tensile Creep and Creep-Rupture of Geosynthetic Materials Based on Time-Temperature Superposition Using the Stepped Isothermal Method"**, Geosynthetic Research Institute, Drexel University.

Hirakawa, D., Kongkitkul, W., Tatsuoka, F. and Uchimura, T. (2003): "Time-dependent stress-strain behaviour due to viscous properties of geogrid reinforcement", **Geosynthetics International**, Vol.10, No.6, pp.176-199.

Hoque, E. and Tatsuoka, F. (1998): "Anisotropy in elastic deformation of granular materials", **Soils and Foundations**, Vol.38, No.1, pp.163-179.

Hsieh, C., Lee, I. and Tain, Y. (2006): "Creep strains of high strength polyester geogrids measured by conventional and accelerated test methods", **Proceeding of the 8th International Conference on Geosynthetics**, Yokohama, Japan, Vol.4, pp.1581-1584.

- Jones, C.J.F.P. and Clarke, D. (2006): "The residual strength of geosynthetic reinforcement subjected to accelerated creep testing and simulated seismic events", **Geotextiles & Geomembranes**, Vol.25, No.3, pp.155-169.
- Kongkitkul, W., Hirakawa, D., Tatsuoka, F. and Uchimura, T. (2004a): "Viscous deformation of geosynthetic reinforcement under cyclic loading conditions and its model simulation", **Geosynthetics International**, Vol.11, No.2, pp.73-99.
- Kongkitkul, W., Siddiquee, M.S.A., Hirakawa, D. and Tatsuoka, F. (2004b): "FEM simulation of viscous behaviour of geogrid and geogrid-reinforced sand", **Proceeding of the 19th Geosynthetics Symposium (Japan Chapter of IGS)**, Tokyo, pp.237-244.
- Kongkitkul, W. and Tatsuoka, F. (2007): "A theoretical framework to analyse the behaviour of polymer geosynthetic reinforcement in temperature-accelerated creep Tests", **Geosynthetics International**, Vol.14, No.1, pp.23-38.
- Kongkitkul, W., Hirakawa, D. and Tatsuoka, F. (2007a): "Viscous behaviour of geogrids; experiment and simulation", **Soils and Foundations**, Vol.47, No.2, pp.265-283.
- Kongkitkul, W., Tatsuoka, F. and Hirakawa, D. (2007b): "Creep rupture curve for simultaneous creep deformation and degradation of geosynthetic reinforcement", **Geosynthetics International**, Vol.14, No.4, pp.189-200.
- Koo, H., Kim, D. and Kim, Y. (2006): "The Stepped Isothermal Method for lifetime prediction of PET geogrids sheathed in PP", **Proceeding of the 8th International Conference on Geosynthetics**, Yokohama, Japan, Vol.4, pp.1555-1558.
- Noguchi, T., Kongkitkul, W., Hirakawa, D. and Tatsuoka, F. (2006): "FE analysis on the rate-dependent behaviour of model geosynthetic-reinforced soil retaining wall", **Proceeding of the 8th International Conference on Geosynthetics**, Yokohama, Japan, Vol.4, pp.1357-1360.
- Shibuya, S., Tatsuoka, F., Teachavorasinskun, S., Kong, X.-J., Abe, F., Kim, Y.-S. and Park, C.-S. (1992): "Elastic deformation properties of geomaterials", **Soils and Foundations**, Vol.32, No.3, pp.26-46.
- Tatsuoka, F., Sato, T., Park, C.-S., Kim, Y.-S., Mukabi, J.N. and Kohata, Y. (1994): "Measurements of elastic properties of geomaterials in laboratory compression tests", **Geotechnical Testing Journal**, GTJODJ, Vol.17, No.1, pp.80-94.

- Tatsuoka, F., Hirakawa, D., Shinoda, M., Kongkitkul, W. and Uchimura, T. (2004): "An old but new issue; viscous properties of polymer geosynthetic reinforcement and geosynthetic-reinforced soil structures", Keynote Lecture, **Proceeding of the 3rd Asian Regional Conference on Geosynthetics**, Seoul, pp.29-77.
- Tatsuoka, F., Kongkitkul, W. and Hirakawa, D. (2006): "Viscous property and time-dependent degradation of geosynthetic reinforcement", **Proceeding of the 8th International Conference on Geosynthetics**, Yokohama, Japan, Vol.4, pp.1587-1590.
- Tatsuoka, F., Di Benedetto, H., Kongkitkul, W., Kongsukprasert, L., Nishi, T. and Sano, Y. (2008): "Modelling ageing effects on the elasto-viscoplastic behaviour of geomaterial", **Soils and Foundations**, No.48, Vol. 2, pp.155-174.
- Thornton, J.S., Paulson, J.N. and Sandri, D. (1998): "Conventional and Stepped Isothermal Methods for characterizing long term creep strength of polyester geogrids", **Proceeding of the 6th International Conference on Geosynthetics**, Atlanta, pp.691-698.
- Thornton, J.S. and Baker, T.L. (2002): "Comparison of SIM and conventional methods for determining creep-rupture behavior of a polypropylene geotextile", **Proceeding of the 7th International Conference on Geosynthetics**, Nice, France, Vol.4, pp.1545-1550.
- Wang, E.L., Xu, X.Y., Zhang, B., Zhong, H., Gao, Z.K. and Chang, J.D. (2008): "Experimental study on creep properties of plastic geogrid under low temperature", **Proceeding of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics**, Shanghai, China, pp.70-73.
- Zornberg, J.G., Byler, B.R. and Knudsen, J.W. (2004): "Creep of geotextiles using Time-Temperature Superposition methods", **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, Vol.130, No.11, pp.1158-1168.