

## การใช้อุณหภูมิเพื่อเร่งการเกิดความเครียดคงค้างเมื่อตาข่ายเสริมกำลัง ชนิดโพลิโพรไพลีนรับแรงแบบวัฏจักร

### USE OF TEMPERATURE TO ACCELERATE CYCLIC RESIDUAL STRAIN OF A POLYPROPYLENE GEOGRID

วรกมล บัวแสงจันทร์<sup>1,\*</sup> และ วรัช ก้องกิจกุล<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

\*Corresponding author address: worakamol.bua@mail.kmutt.ac.th

#### บทคัดย่อ

ปัจจุบันงานก่อสร้างโครงสร้างดินเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์ได้รับความนิยมเป็นอย่างแพร่หลายในงานด้านวิศวกรรมเทคนิคธรณี เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพสูงเมื่อเทียบกับราคา แต่หากเปรียบเทียบกับวัสดุเสริมแรงชนิดอื่น อาทิ แถบเหล็กเสริมแรง จะเห็นได้ว่าวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์สามารถเกิดการเสียรูปได้สูงกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องรับแรงแบบวัฏจักร ความเครียดที่เกิดขึ้นในวัสดุเสริมแรงมีทั้งส่วนที่สามารถกลับคืนมาได้เมื่อมีการถอนแรงและส่วนที่ไม่สามารถกลับคืนได้แม้ทำการถอนแรงแล้ว หรือที่เรียกว่าความเครียดคงค้าง งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาเกี่ยวกับการใช้อุณหภูมิในการเร่งการเกิดความเครียดคงค้างของตาข่ายเสริมกำลังโพลิเมอร์ชนิดโพลิโพรไพลีน (PP) เมื่อรับแรงแบบวัฏจักร (Cyclic residual strain) โดยทำการทดสอบแรงดึงด้วยเงื่อนไขการให้แรงและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ดังนี้ 1. แรงกระทำแบบต่อเนื่อง (Monotonic loading, ML) ภายใต้อุณหภูมิคงที่ (Constant temperature, CT) (ML-CT) ที่ 30 องศาเซลเซียส 2. แรงกระทำแบบวัฏจักร (Cyclic loading, CL) ภายใต้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเป็นลำดับขั้น (Stepped by increased temperature, SIT) (CL-SIT) จาก 30→35→40→45→50 องศาเซลเซียส และ 3. แรงกระทำแบบวัฏจักร (CL) ภายใต้อุณหภูมิคงที่ (CT) (CL-CT) ที่ 30 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบว่าความเครียดคงค้างของตาข่ายเสริมกำลังโพลิเมอร์ชนิดโพลิโพรไพลีนเมื่อรับแรงแบบวัฏจักรที่ได้จากการทดสอบแบบ CL-SIT สามารถใช้ในการทำนายค่าความเครียดคงค้างเมื่อรับแรงแบบวัฏจักรในระยะยาว (CL-CT) ได้

**คำสำคัญ:** การทดสอบแรงดึง, ความเครียดคงค้าง, แรงแบบวัฏจักร, ตาข่ายเสริมกำลัง, อุณหภูมิ

#### Abstract

Presently, geosynthetic-reinforced soil (GRS) structures are widely used in geotechnical engineering works, due to their high performance and cost-effectiveness. However, when compared with other types of reinforcing materials such as metal strips, polymer geogrids are more deformable, especially when subjected to cyclic loadings. Generally, the geogrid's tensile strain consists of the part that is recoverable upon unloading and the part that is irreversible even after a full unloading. The latter part is known as the residual strain. This research aims to investigate the use of temperature to accelerate cyclic residual strain of a polypropylene (PP) geogrid. A tensile loading test series was performed with different loading and temperature histories as follows: i) Monotonic loading (ML) under different but constant temperature (CT) (ML-CT) at 30 °C ; ii) Cyclic loading (CL) test with stepped increased temperature (SIT) (CL-SIT) from 30→35→40→45→50 °C ;and iii) Cyclic loading test (CL-CT). From the results, it is found in that the cyclic residual strain from CL-SIT test can be used to predict the cyclic residual strain of the tested PP geogrid.

**Keywords:** Tensile testing, Residual strain, Cyclic, Geogrid, Temperature

#### 1. บทนำ

โครงสร้างดินเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์ (Geosynthetic-reinforced soil structure, GRS) ได้รับความนิยมเป็นอย่างแพร่หลาย ดังที่สามารถพบเห็นได้ในงานวิศวกรรมหลายประเภท อาทิ ถนน คันดิน กำแพงกันดินและอื่น ๆ จึงมีนักวิจัยหลายท่านศึกษาเกี่ยวกับการเสียรูปของตาข่ายเสริมกำลัง Hirakawa et al.[1] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติความหนืด

(Viscous properties) ของตาข่ายเสริมกำลังโดยศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อความเค้นเนื่องจากการคืบ พบว่าการคืบเป็นการตอบสนองในรูปแบบความหนืดของวัสดุไม่ใช่ปรากฏการณ์ที่ทำให้วัสดุเสื่อมคุณภาพลง และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดเป็นฟังก์ชันของความเครียดคงค้างฉับพลัน อัตราความเครียดคงค้างฉับพลันและประวัติความเค้น Tabsombut et al.[2] ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อ Elastic stiffness ของ PP, PET และ HDPE geogrid พบว่าอุณหภูมิมีผลกระทบต่อสมบัติ Elasto-

viscoplastic ของตาข่ายเสริมกำลังชนิดโพลิโพรไพลีนโดยจะทำให้กำลังรับแรงดึงสูงสุดของตาข่ายเสริมกำลังชนิดโพลิโพรไพลีนลดลง แต่โครงสร้างดินเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมกำลังสังเคราะห์นี้ไม่เพียงแต่รับแรงกระทำแบบคงที่เท่านั้น โครงสร้างเหล่านี้ยังต้องรับแรงกระทำแบบวัฏจักรทั้งจากแรงสั่นสะเทือนและจากการจลาจลอีกด้วย [3] Kongkitkul et al. [3] จึงศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของสมบัติความเหนียวที่มีต่อความเครียดคงค้างของตาข่ายเสริมกำลังที่รับแรงแบบวัฏจักร พบว่าความเครียดคงค้างที่เกิดขึ้นเมื่อรับแรงแบบวัฏจักรขึ้นกับสมบัติความเหนียวในวัสดุนั้น ๆ

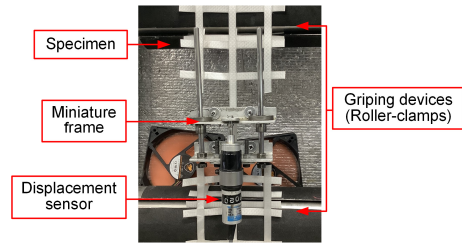
มากไปกว่านั้นการทดสอบการรับแรงดึงเพื่อหาค่าแฟกเตอร์ลดทอนการคืบของตาข่ายเสริมกำลังด้วยวิธี Conventional creep test โดยการสร้าง Creep-rupture curve แล้วหาค่า  $RF_{CR}$  ในปัจจุบันจำเป็นต้องใช้เวลานานมากในการทดสอบ จึงแทบจะเป็นไปไม่ได้เลยที่จะทำการทดสอบครอบคลุมตลอดระยะเวลาของอายุการใช้งานที่ได้ออกแบบไว้ (ประมาณ 50 ปี [1]) ด้วยเหตุผลนี้จึงมีการพัฒนา Accelerated creep test ขึ้นเพื่อลดระยะเวลาในการทดสอบ โดยอาศัยการเพิ่มอุณหภูมิรอบตัวอย่างให้สูงขึ้นขณะทดสอบการรับแรงดึงเพื่อเร่งอัตราการเกิดความเครียดเนื่องจากการคืบ งานวิจัยชิ้นนี้จึงนำ Accelerated creep test รูปแบบหนึ่งซึ่งเรียกว่า Stepped Isothermal Method (SIM) [4] มาประยุกต์ใช้กับการทดสอบการรับแรงดึงของตาข่ายเสริมกำลังโพลิเมอร์ชนิดโพลิโพรไพลีนเมื่อรับแรงแบบวัฏจักร โดยในการวิเคราะห์นี้จะประยุกต์ใช้หลักการที่ใช้ในการสร้างเส้นโค้งหลัก (Master curve) ซึ่งเป็นเส้นที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับลอการิทึมเวลา ( $\epsilon - \log_{10}(\text{time})$ ) [5] ที่ใช้กับการเร่งความเครียดการคืบ เพื่อศึกษาเกี่ยวกับการใช้อุณหภูมิในการเร่งการเกิดความเครียดคงค้างที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุเสริมกำลังสังเคราะห์รับแรงแบบวัฏจักรที่แอมพลิจูดและความถี่ต่างกัน

## 2. เครื่องมือและวัสดุ

การทดสอบในงานวิจัยชิ้นนี้จำเป็นต้องมีเครื่องมือที่ช่วยควบคุมแรงดึงและอุณหภูมิ รวมถึงเครื่องมือวัดต่าง ๆ ที่ใช้เก็บค่าแรงดึงและระยะการเสีรูปที่เกิดขึ้น รายละเอียดของเครื่องมือที่ใช้แสดงใน Tabsombut et al. [2]

### 2.1. เครื่องให้แรงและหน่วยควบคุมอุณหภูมิ

เครื่องให้แรงประกอบด้วยกระบอบกลที่ภายในบรรจุอากาศสามารถให้แรงได้ทั้งสองทิศทางคือการให้แรงกระทำและการถอนแรงกระทำ โดยอาศัยการแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นแรงดันลมอุณหภูมิรอบตัวอย่างภายในส่วนทดสอบแรงดึงจะถูกควบคุมโดยหน่วยควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งทำงานโดยการนำอากาศจากภายนอกส่งเข้ามาผ่านฮีตเตอร์แล้วส่งไปยังห้องทดสอบ (Chamber) ในขณะเดียวกันอากาศภายในส่วนทดสอบส่วนหนึ่งก็ถูกปล่อยออกสู่



รูปที่ 1 เซ็นเซอร์วัดระยะที่ติดตั้งบนโครงโลหะ

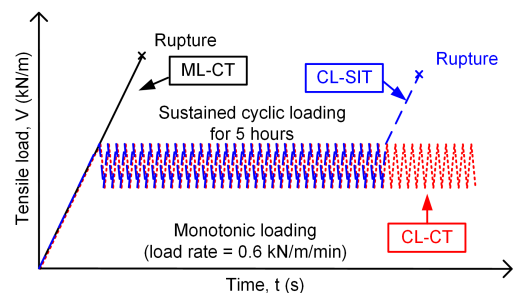
ภายนอกและอีกส่วนถูกดึงกลับผ่านฮีตเตอร์แล้วส่งเข้าห้องทดสอบ (Chamber) ดังเดิม

### 2.2. เครื่องมือวัด

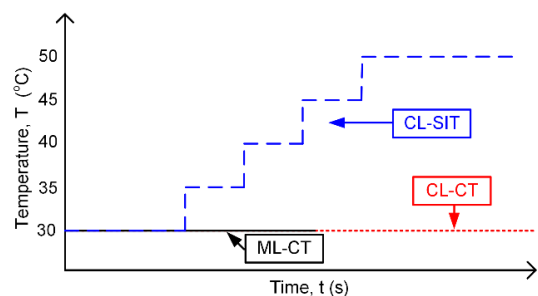
ในการทดสอบนี้ใช้เซลล์วัดแรงในการวัดแรงดึงที่กระทำกับตัวอย่าง มีการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิรอบตัวอย่างทดสอบ และใช้เซ็นเซอร์วัดระยะ (Displacement transducer) ในการวัดระยะยืดของตัวอย่างที่เกิดขึ้นแบบเฉพาะจุด โดยเซ็นเซอร์วัดระยะจะถูกติดอยู่กับโครงโลหะเพื่อประคองให้อยู่ในแนวศูนย์กลางของตัวอย่างที่นำมาทดสอบและโครงโลหะส่วนที่ยึดกับตัวอย่างทดสอบจะเคลื่อนที่ขึ้น-ลงตามแนวของแท่งเหล็กที่ตั้งฉากกับแนวราบได้อย่างอิสระดังแสดงในรูปที่ 1

### 2.3. วัสดุที่นำมาทดสอบ

วัสดุเสริมแรงสังเคราะห์ที่นำมาทดสอบหาความเครียดคงค้างเมื่อรับแรงแบบวัฏจักรในงานวิจัยนี้คือ ตาข่ายเสริมกำลังชนิดโพลิโพรไพลีน (PP Geogrid) ซึ่งตาข่ายเสริมกำลังชนิดนี้สามารถรับแรงได้ทั้งสองทิศทางโดยมีคุณสมบัติดังตารางที่ 1



รูปที่ 2 ประวัติเวลาของการให้แรงที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3 ประวัติเวลาของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 1 สมบัติของตาข่ายเสริมกำลังที่ใช้ในงานวิจัยนี้

Fibre material	Polypropylene
Abbreviated name	PP
Standard colour	White
Specimen condition	Virgin
Aperture size (MD/TD) (mm)	35 / 35
Max tensile strength (MD/TD) (kN/m)	≥ 40 / ≥ 40
Yield point elongation (MD) (%)	≤ 8
Long term design strength (MD) (kN/m)	-

#### 2.4. รายละเอียดรายการทดสอบ

ในงานวิจัยชิ้นนี้แบ่งประเภทการทดสอบออกเป็น 3 รูปแบบ ซึ่งประกอบด้วยการทดสอบแบบ ML-CT, CL-SIT และ CL-CT โดยแต่ละรูปแบบมีรายละเอียดดังนี้

1. ML-CT (Monotonic loading-Constant temperature) คือให้แรงกระทำอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราแรงเท่ากับ 0.6 กิโลนิวตัน/เมตร/นาที่ ภายใต้การควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่อุณหภูมิเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 4

2. CL-SIT (Cyclic loading-Stepped by increased temperature) คือการให้แรงกระทำอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราแรงเท่ากับ 0.6 กิโลนิวตัน/เมตร/นาที่ ภายใต้อุณหภูมิควบคุมเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส จนกระทั่งถึงค่าแรงดึงเป้าหมาย แล้วจึงให้แรงกระทำแบบวัฏจักรเป็นชุด แต่ละชุดนานเท่ากับ 1 ชั่วโมง จำนวน 5 ชุด เมื่อแรงกระทำแบบวัฏจักรเสร็จสิ้นในแต่ละชุดอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างทันทีเท่ากับ 5 องศาเซลเซียส ดังนั้นในชุดแรงวัฏจักรสุดท้ายจะทดสอบที่อุณหภูมิควบคุมเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 4

โดยในแต่ละชุดแรงกระทำแบบวัฏจักร จะทำการแปรผันความถี่ (Frequency, f) จำนวน 3 ค่า ได้แก่ 0.01, 0.02 และ 0.03 เฮิรตซ์ และแอมพลิจูด (Amplitude,  $\Delta V$ ) เท่ากับร้อยละ 10 และ 20 ของค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด ( $V_{ult}$ ) ดังนั้นจำนวนรอบ (Number of cycle,  $N_c$ ) และอัตราการให้และผ่อนแรงจะไม่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 3

3. CL-CT (Cyclic loading-Constant temperature) คือการให้แรงกระทำอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราแรงเท่ากับ 0.6 กิโลนิวตัน/เมตร/นาที่ จนถึงค่าแรงดึงเป้าหมายแล้วจึงให้แรงกระทำแบบวัฏจักรต่อเนื่องเป็นเวลาประมาณ 30 วัน โดยใช้ความถี่เท่ากับ 0.02 เฮิรตซ์ และแอมพลิจูดเท่ากับร้อยละ 10 ของค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด ( $V_{ult}$ ) การให้แรงทุกขั้นตอนจะอยู่ภายใต้การควบคุมอุณหภูมิให้คงที่เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 4

ตารางที่ 2 รายการทดสอบ

	Pattern	Temperature (°C)		
		30	30-50	
1	ML-CT	/	/	
2	CL-SIT	10% $V_{ult}$	0.01 Hz	/
			0.02 Hz	/
			0.03 Hz	/
	20% $V_{ult}$	0.01 Hz	/	
		0.02 Hz	/	
		0.03 Hz	/	
3	CL-CT (10% $V_{ult}$ @0.02 Hz)	/	/	

### 3. ขั้นตอนการทดสอบ

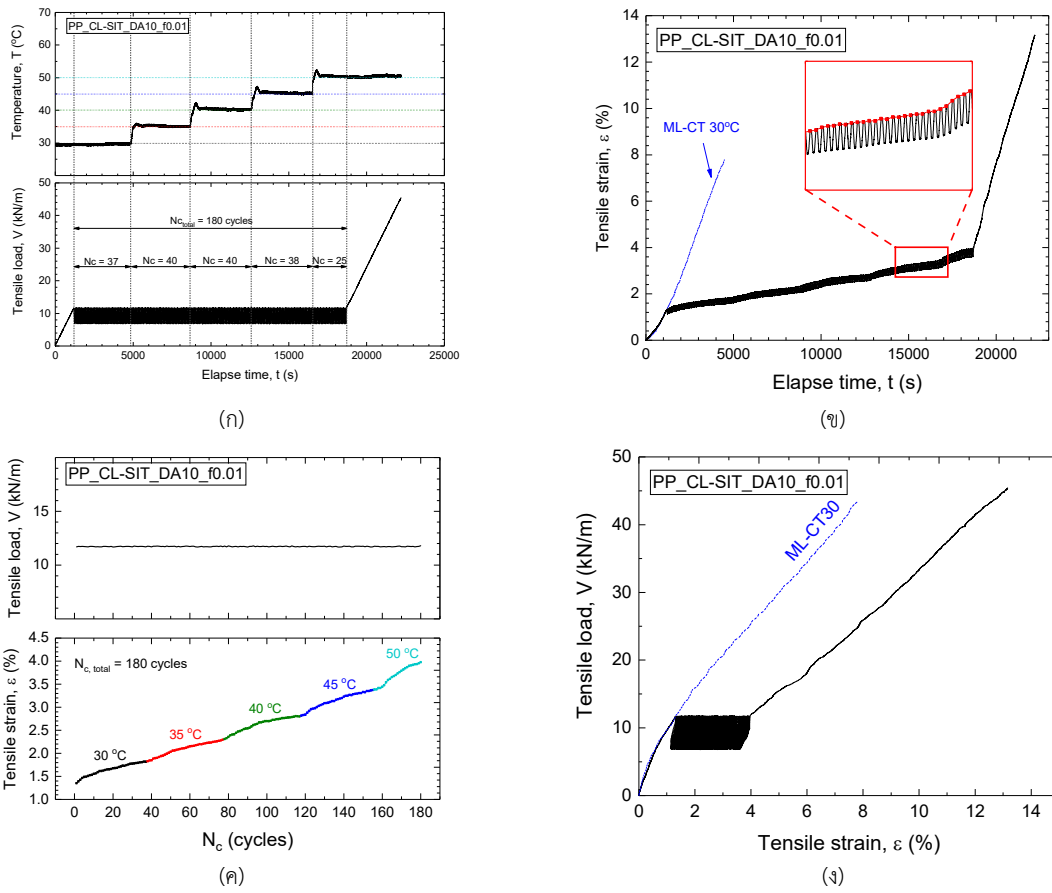
#### 3.1. การเตรียมตัวอย่าง

นำปลายด้านบนและล่างของตัวอย่างเข้าไปยังแท่นยึดตัวอย่างทรงกระบอกที่มีการบาร่องไว้ โดยติดตั้งในลักษณะพันไว้รอบ ๆ แล้วสอดเพลาลโลหะเพื่อยึดตัวอย่างไว้ตามวิธีการติดตั้งตัวอย่าง โดยที่แท่นยึดตัวอย่างทรงกระบอกมีการติดผ้าทรายไว้รอบนอก เพื่อให้ตัวอย่างไม่เลื่อนหลุดระหว่างการทดสอบ เมื่อติดตั้งตัวอย่างเรียบร้อยแล้วให้ดึงตัวอย่างด้วยแรงกระทำก่อนเท่ากับ 20 นิวตันเพื่อลดอิทธิพลจากการหย่อนของตัว และมีการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดระยะในการวัดระยะยึดของตัวอย่างที่เกิดขึ้นแบบเฉพาะจุด เนื่องจากในการติดตั้งตัวอย่างรูปแบบนี้จะทำให้ตัวอย่างยึดออกในระยะเท่า ๆ กันทั้งตัวอย่างในส่วนทดสอบ และแรงดึงประลัยจะทำให้ตัวอย่างขาดภายในช่วงของแท่นยึดตัวอย่างด้านบนและล่าง

### 4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

#### 4.1. ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึง-ความเครียด-อุณหภูมิ

รูปที่ 4(ก) แสดงประวัติเวลาแรงดึงและประวัติเวลาอุณหภูมิที่บันทึกได้จากการทดสอบ โดยรูปที่แสดงนี้เป็นผลการทดสอบการใช้อุณหภูมิเพื่อเร่งการเกิดความเครียดค้างในตาข่ายเสริมกำลังชนิดโพลีโพรไพลีนรับแรงแบบวัฏจักร โดยตัวอย่างนี้ทำการให้แรงแบบวัฏจักรแอมพลิจูดเท่ากับ 10% $V_{ult}$  หรือ 4.64 กิโลนิวตัน/เมตร ที่ความถี่ 0.01 เฮิรตซ์ จากนั้นทำการนับจำนวนรอบที่ได้จริงในแต่ละช่วงอุณหภูมิเพื่อใช้วิเคราะห์ต่อไป จากรูปที่ 4(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่เกิดขึ้นกับเวลา จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการให้แรงเป็นวัฏจักรความเครียดที่เกิดขึ้นก็จะมีลักษณะเป็นวัฏจักรเช่นเดียวกัน โดยที่จุดยอดด้านบนของแรงดึงที่ให้กับตัวอย่างจะมีความเครียดเท่ากับจุดยอดด้านบนของความเครียดเช่นเดียวกัน ทำการเก็บค่าความเครียดและแรงดึงที่จุดยอดเพื่อนำมาพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึง-จำนวนรอบ และความเครียด-จำนวนรอบดังรูปที่ 4(ค)



รูปที่ 4 ตัวอย่างผลการทดสอบที่ได้ : (ก) ประวัติเวลาของแรงดึงและอุณหภูมิ; (ข) ค่าความเครียดที่ได้จากการทดสอบเมื่อให้แรงแบบวัฏจักรแอมพลิจูดเท่ากับ 10%V<sub>ult</sub> ที่ความถี่ 0.01 Hz; (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึง-ความเครียด-รอบที่จุดยอดค่านับของแรงดึง; (ง) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและความเครียดที่เกิดขึ้นในตัวอย่าง

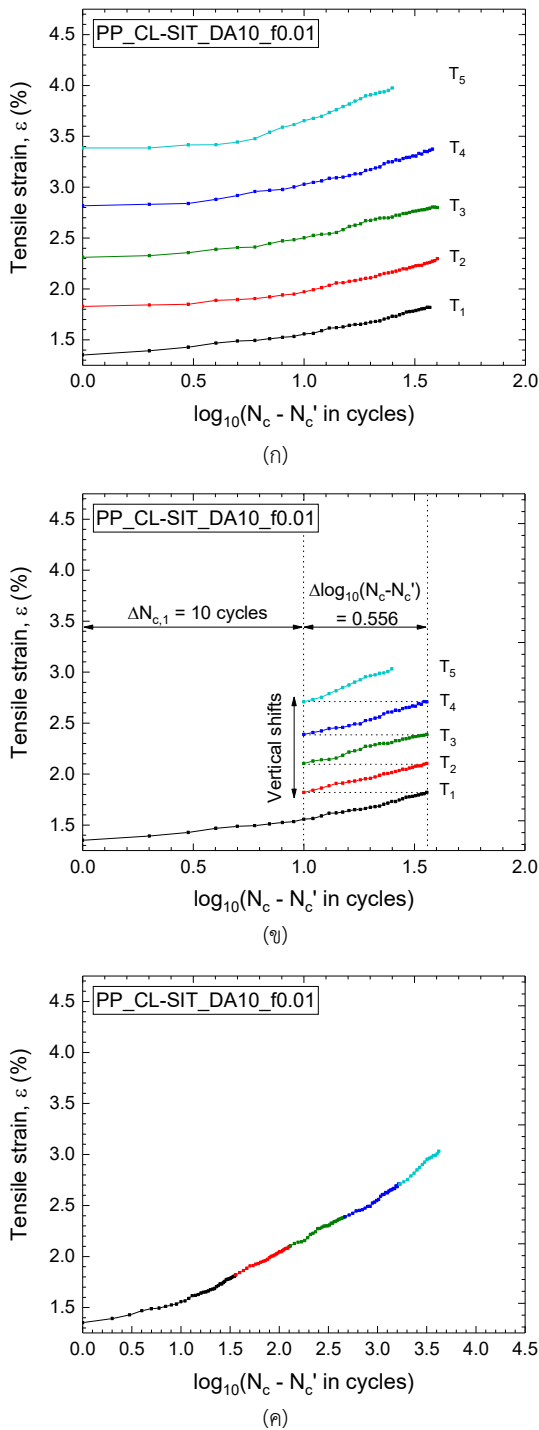
ตารางที่ 3 รายละเอียดจำนวนรอบและอัตราการให้แรงในแต่ละการทดสอบ

f (Hz)	N <sub>c</sub> ,target	Load rate (kN/m/min)				N <sub>c, success</sub>							
		DA = 10%V <sub>ult</sub> *	DA = 20%V <sub>ult</sub> *	DA = 10%V <sub>ult</sub> *		DA = 20%V <sub>ult</sub> *							
				30 °C	35 °C	40 °C	45 °C	50 °C	30 °C	35 °C	40 °C	45 °C	50 °C
0.01	36	± 5.568	± 11.136	37	40	40	38	25	36	37	38	36	33
0.02	80	± 12.373	± 24.747	80	81	85	82	72	82	82	84	80	72
0.03	120	± 18.560	± 37.120	111	117	114	115	143	117	116	116	115	136

\* เทียบจาก V<sub>ult</sub> = 1600 N = 46.4 kN/m, DA = 10%V<sub>ult</sub>\* = 4.64 kN/m, DA = 20%V<sub>ult</sub>\* = 9.28 kN/m

ตารางที่ 4 รายการค่า shift factor ที่ใช้ในแต่ละการทดสอบ

DA (%V <sub>ult</sub> )	f (Hz)	Vertical shift, Δε (%)				Horizontal shift factor			
		30 – 35 °C	35 – 40 °C	40 – 45 °C	45 – 50 °C	30 – 35 °C	35 – 40 °C	40 – 45 °C	45 – 50 °C
10	0.01	0.151	0.228	0.261	0.304	0.556	1.113	2.225	4.450
	0.02	0.123	0.221	0.228	0.382	0.581	1.162	2.323	4.647
	0.03	0.176	0.259	0.307	0.346	0.598	1.196	2.393	4.785
20	0.01	0.094	0.271	0.384	0.478	0.556	1.113	2.225	4.450
	0.02	0.310	0.351	0.356	0.419	0.581	1.162	2.323	4.647
	0.03	0.235	0.396	0.712	1.232	0.598	1.196	2.393	4.785



รูปที่ 5 ขั้นตอนการสร้างเส้นโค้งหลักจากการทดสอบให้แรงแบบวัฏจักรและเพิ่มอุณหภูมิ(CL-SIT): (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับลอการิทึมจำนวนรอบในแต่ละอุณหภูมิ; (ข) เลือกช่วงความเครียดที่ได้จากการทดสอบที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง; (ค) เส้นโค้งหลักที่ได้จากการเลื่อนแกน

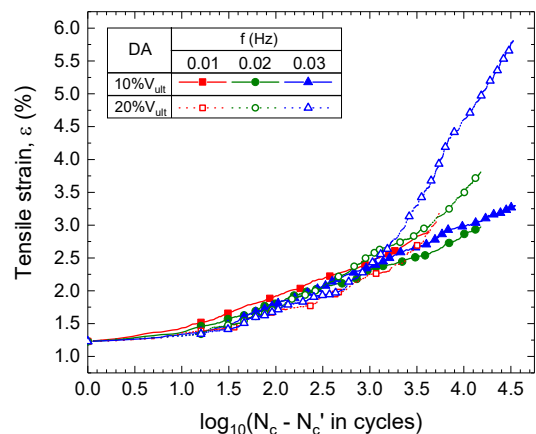
จากรูปที่ 4(ค) จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิมีความสัมพันธ์กับความเครียดที่เกิดขึ้น ทำการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่เกิดขึ้นกับลอการิทึมจำนวนรอบโดยให้เริ่มนับ 1 ใหม่ในทุกอุณหภูมิดังรูปที่ 5(ก) จากนั้นเลือกส่วนของเส้นแสดงความสัมพันธ์ที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง ทำการเลื่อนแกนในแนวตั้ง (Vertical shifts) และสุดท้ายทำการเลื่อนแกนในแนวนอน (Horizontal shifts) เพื่อสร้างเส้นโค้งหลัก (Master curve) (รูปที่ 5(ค)) ของการทดลองนั้น ๆ

#### 4.2. เส้นโค้งหลัก (MASTER CURVE)

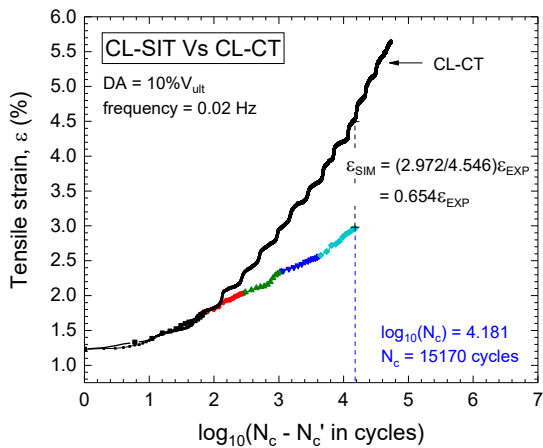
รูปที่ 6 แสดงเส้นโค้งหลักที่ได้จากการใช้หลักการเพิ่มอุณหภูมิ (Stepped Isothermal Method, SIM) แรงการเกิดความเครียดของตาข่ายเสริมกำลังสังเคราะห์ เลือกตัดช่วงที่มีความเป็นเส้นตรงแล้วเลื่อนแกนในแนวตั้งและแนวนอนเรียบร้อยแล้วทั้ง 6 การทดลอง โดยเป็นเส้นโค้งหลักของการทดลองที่ให้แรงแบบวัฏจักรที่มีความถี่ 0.01, 0.02 และ 0.03 เฮิรตซ์

รูปที่ 7 แสดงเส้นโค้งหลักของการทดสอบแบบเพิ่มอุณหภูมิที่ให้แรงแบบวัฏจักรแอมพลิจูด 10%V<sub>ult</sub> ที่ความถี่ 0.02 เฮิรตซ์ (CL-SIT) เทียบกับเส้นโค้งหลักของการทดสอบที่ให้แรงแบบวัฏจักรแอมพลิจูด 10%V<sub>ult</sub> ที่ความถี่ 0.02 เฮิรตซ์ ทดสอบภายใต้อุณหภูมิคงที่ 30 องศาเซลเซียส (CL-CT) จะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าความเครียดที่ได้จากจุดสุดท้ายของเส้นโค้งหลัก CL-SIT (ε<sub>SIM</sub>) กับความเครียดที่ได้จาก CL-CT (ε<sub>EXP</sub>) ณ จุดที่มีค่า log<sub>10</sub>(N<sub>c</sub> - N<sub>c</sub>') เท่ากับ 15170 รอบ ซึ่งเป็น N<sub>c</sub> สุดท้ายของเส้นโค้งหลักพบว่า

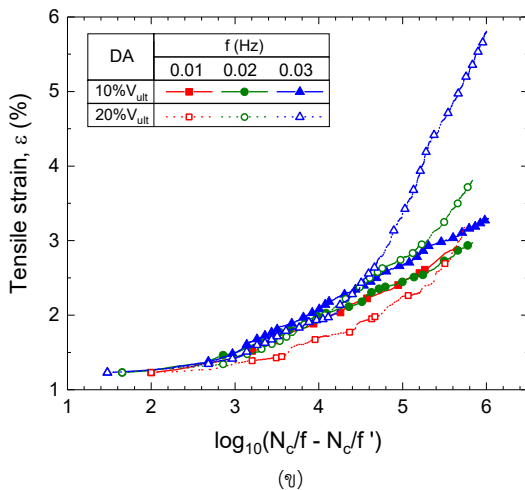
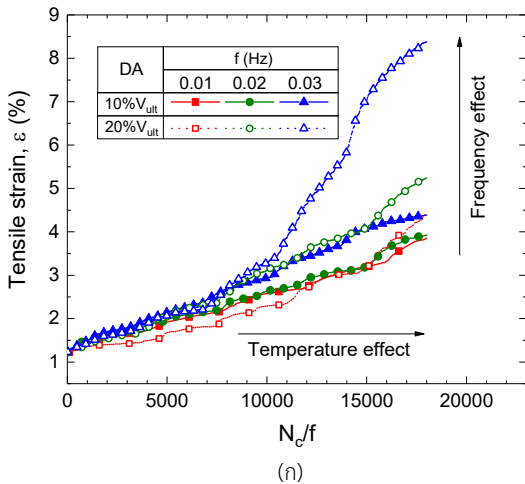
$$\varepsilon_{SIM} = \left( \frac{2.972}{4.456} \right) \varepsilon_{EXP} = 0.654 \varepsilon_{EXP} \quad (1)$$



รูปที่ 6 เส้นโค้งหลัก (Master curve)



รูปที่ 7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบเส้นโค้งหลักที่ได้จากการทดสอบแบบ CL-SIT และ CL-CT สำหรับ DA = 10%V<sub>ult</sub>, f = 0.02 Hz



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับจำนวนรอบต่อความถี่ ( $\epsilon-N_c/f$ ): (ก) ก่อน Horizontal shift; (ข) ภายหลัง Horizontal shift (Master curve)

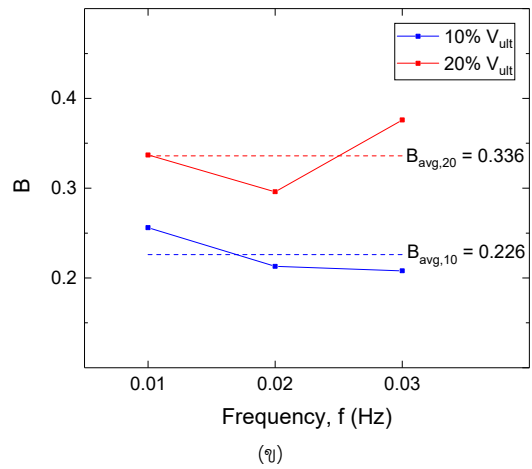
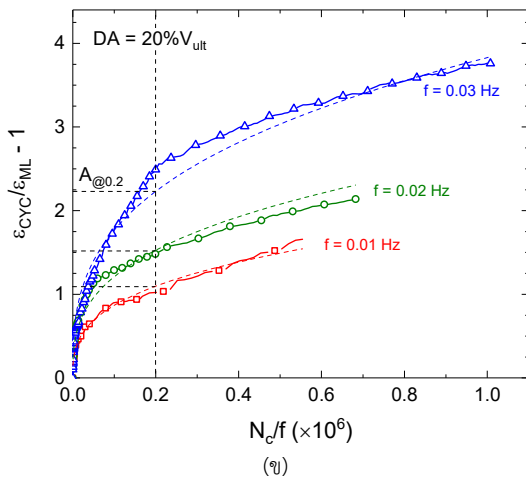
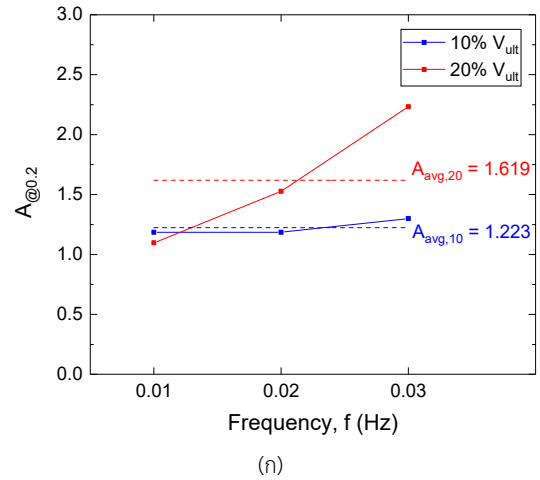
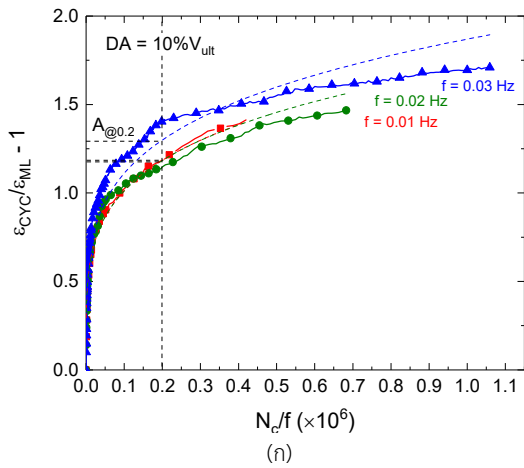
เส้นโค้งหลัก หรือ Master curve ของการทดลองที่ประยุกต์หลักการเพิ่มอุณหภูมิ (SIM) มาใช้กับการให้แรงแบบวัฏจักรกับดาข่ายเสริมแรงสังเคราะห์สามารถสร้างได้จากการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับลอการิทึมจำนวนรอบ ( $\epsilon-\log_{10}(N_c/N_c')$ ) โดยในรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่านอกจากอุณหภูมิแล้ว ค่าแอมพลิจูดที่มากขึ้นก็มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการเกิดความเครียด (Strain rate,  $\dot{\epsilon}$ ) แต่จะไม่สามารถเห็นอิทธิพลของความถี่ได้หากไม่ normalize (Normalize) โดยกำจัดความถี่ออกไปเสียก่อน ซึ่งหลังจากที่ normalize โดยกำจัดความถี่ออกไปแล้วจะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 8(ข) เห็นได้ว่าเมื่อทำให้ข้อมูลเป็นมาตรฐาน โดยกำจัดความถี่ออกไปแล้วจะทำให้ได้เส้นโค้งหลักที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับลอการิทึมจำนวนรอบต่อความถี่ ( $\epsilon-\log_{10}(N_c/f-N_c'/f')$ ) และเห็นได้ว่าความถี่ของการให้แรงแบบวัฏจักรก็มีผลต่อความเครียดเช่นเดียวกัน สามารถสังเกตได้จากรูปที่ 8(ก) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่เกิดขึ้นกับจำนวนรอบต่อความถี่ ( $\epsilon-N_c/f$ )

เมื่อนำเส้นโค้งหลัก (Master curve) ของทุกการทดลองในรูปที่ 8(ข) มาพิตด้วยสมการที่ (2) ดังแสดงในรูปที่ 9 ทำการเก็บค่าพารามิเตอร์ A และ B โดยจากการทดลองที่ได้ทำในงานวิจัยชิ้นนี้ทั้ง 6 การทดลองได้ค่าพารามิเตอร์ A และ B ดังตารางที่ 5 เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ A และ B มาพล็อตกับความถี่ที่ใช้ได้กราฟดังรูปที่ 10(ก) และ 10(ข) ทำการหาค่าเฉลี่ยของค่าพารามิเตอร์ A และ B เพื่อนำมาสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและจำนวนรอบ/ความถี่ ( $\epsilon-N_c/f$ ) โดยค่าพารามิเตอร์ A และ B จะทำการเฉลี่ยจากการทดลองที่แอมพลิจูดเท่ากัน เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีดังกล่าวแล้วพบว่าได้เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและจำนวนรอบ/ความถี่ ( $\epsilon-N_c/f$ ) จากสมการที่สร้างขึ้นข้างต้นดังรูปที่ 12

$$\frac{\epsilon_{cyc}}{\epsilon_{ML}} = A \left( \frac{N_c}{f} \right)^B + 1 \quad (2)$$

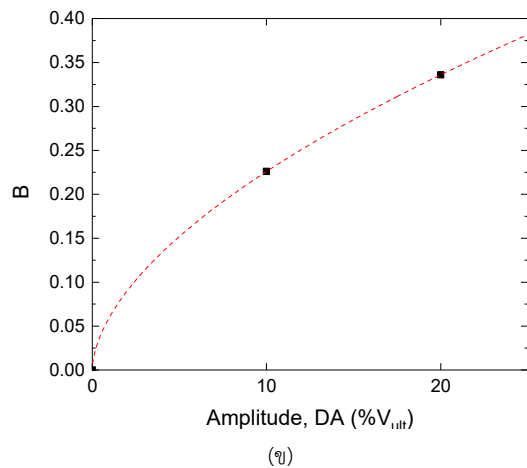
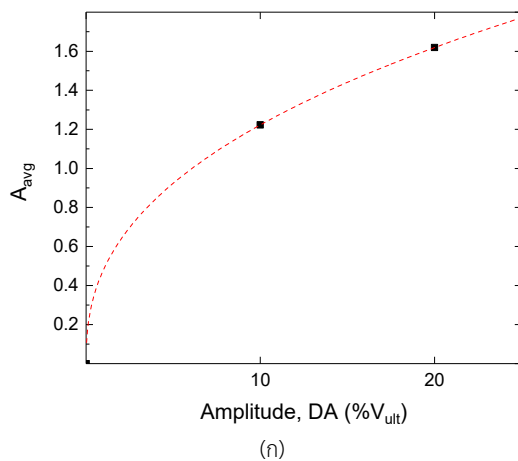
ตารางที่ 5 ค่าพารามิเตอร์ A และ B ที่ได้จากการทดสอบ

Amplitude (%V <sub>ult</sub> )	f (Hz)	Respective		Common	
		A <sub>@0.2</sub>	B	A <sub>@0.2</sub>	B <sub>avg</sub>
10	0.01	1.223	0.256	1.185	0.226
	0.02	1.174	0.213	1.185	0.226
	0.03	1.300	0.208	1.300	0.226
20	0.01	1.098	0.337	1.097	0.336
	0.02	1.520	0.296	1.527	0.336
	0.03	2.189	0.376	2.233	0.336

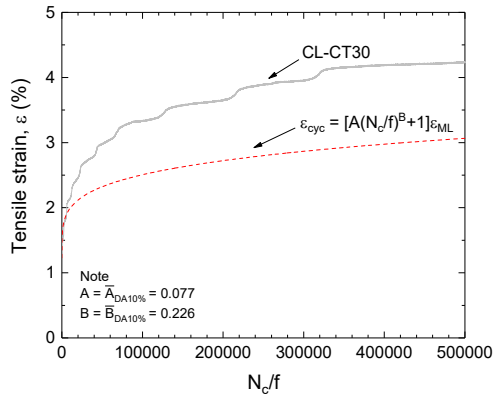


รูปที่ 9 การพิตเส้นโค้งหลักที่ได้จากการทดสอบ  
(ก) DA = 10%V<sub>ult</sub>; (ข) DA = 20%V<sub>ult</sub>

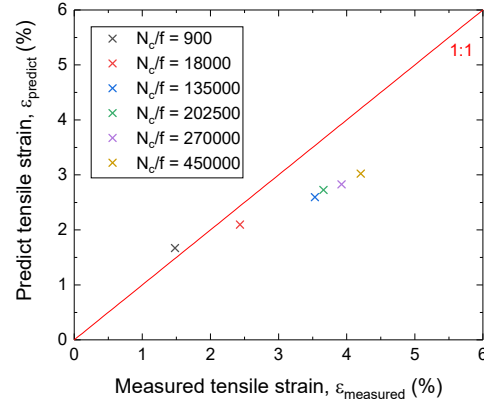
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ A และ B  
กับความถี่: (ก) A<sub>@0.2</sub>; (ข) B



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ A และ B กับแอมพลิจูด: (ก) A<sub>avg</sub>; (ข) B



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและจำนวนรอบ/ความถี่ ( $\epsilon-N_c/f$ ) จากสมการที่สร้างขึ้น และ CL-CT



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดที่ได้จากสมการเทียบกับค่าความเครียดที่ได้จากการทดสอบระยะยาว

## 5. สรุป

การศึกษานี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการใช้อุณหภูมิเพื่อเร่งการเกิดความเครียดคงค้างเมื่อถ่ายเสริมกำลังชนิดโพลีโพรไพลีนรับแรงแบบวัฏจักร พบว่า

1. อุณหภูมิช่วยเร่งอัตราการเกิดความเครียดเมื่อให้แรงแบบวัฏจักรได้ และสามารถประยุกต์ใช้หลักการของ Stepped Isothermal Method, SIM ในการเร่งระยะเวลาในการทดสอบความเครียดที่จะเกิดขึ้นในระยะยาวได้เช่นกัน ซึ่งสามารถนำวิธีการทดสอบดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับการทำนายการเสื่อยรูปเมื่อให้แรงแบบวัฏจักรระยะยาวในภาคอุตสาหกรรมได้อีกด้วย เนื่องจากสามารถลดระยะเวลาทดสอบได้เป็นอย่างมาก
2. เส้นโค้งหลัก (Master curve) เป็นฟังก์ชันของความถี่ แอมพลิจูดและอุณหภูมิ และจากผลของการทำการเลื่อนแกน เพื่อสร้างเส้นโค้งหลักแล้วนำมาเทียบกับการทดสอบระยะยาวของกรณีที่ทำถ่ายเสริมกำลังรับแรงแบบวัฏจักร แอมพลิจูด  $10\%V_{ult}$  ที่ความถี่ 0.02 เฮิรตซ์ พบว่าค่าความเครียดที่ได้จากการเพิ่มอุณหภูมิ ( $\epsilon_{SIM}$ ) มีค่าต่ำกว่าความเครียดจากการทดลองจริงระยะยาวที่อุณหภูมิคงที่ ( $\epsilon_{EXP}$ ) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะระยะเวลาที่ใช้กับแต่ละอุณหภูมิมีช่วงเวลาที่ต่ำกว่าที่แนะนำในมาตรฐาน (ASTM6992-16[6]) ซึ่งแนะนำไว้ว่าให้ใช้เวลาขั้นต่ำ 10,000 วินาทีต่อหนึ่งอุณหภูมิ
3. เส้นโค้งหลัก (Master curve) ที่เกิดจากสมการที่สร้างขึ้นจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการฟิตเส้นโค้งหลักของทุกการทดสอบมีค่าต่ำกว่าผลทดสอบระยะยาว ดังแสดงในรูปที่ 13 อาจเกิดจากระยะเวลาที่ใช้กับแต่ละอุณหภูมิต่ำเกินไปเช่นเดียวกับข้อสรุปที่ 2
4. การทดสอบที่มีแอมพลิจูดสูงกว่าจะมีค่า Vertical shift สูงกว่า และในการทดสอบที่มีความถี่สูงกว่าจะสามารถใช้ค่า Horizontal shift ได้สูงกว่า

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Hirakawa, D., Kongkitkul, W., Tatsuoka, F., & Uchimura, T. (2003). Time-dependent stress-strain behaviour due to viscous properties of geogrid reinforcement. *Geosynthetics International* **10**(6), 176–199. DOI: 10.1680/gein.10.6.176.37246
- [2] Kongkitkul, W., Tabsombut, W., Jaturapitakkul, C., & Tatsuoka, F. (2012). Effects of temperature on the rupture strength and elastic stiffness of geogrids. *Geosynthetics International* **19**(2), 106–123. DOI: 10.1680/gein.2012.19.2.106
- [3] Kongkitkul, W., Hirakawa, D., Tatsuoka, F., & Uchimura, T. (2002). Effects of Viscous Property on Residual Deformation of Geogrid Subjected to Cyclic Loading. *Geosynthetics Engineering Journal*, **17**(January), 159–166. DOI: 10.5030/jcigsjournal.17.159
- [4] J.S.Thornton. (1998). Conventional and Stepped Isothermal Methods for Characterizing Long Term Creep Strength of Polyester Geogrids. *Sixth International Conference on Geosynthetics*, 691–698.
- [5] Kongkitkul, W., & Tatsuoka, F. (2007). A theoretical framework to analyse the behaviour of polymer geosynthetic reinforcement in temperature-accelerated creep tests. *Geosynthetics International*, **14**(1), 23–38. DOI: 10.1680/gein.2007.14.1.23
- [6] ASTM D6992-16. (2018). Standard test method for accelerated compressive creep-rupture of geosynthetic materials based on time-temperature superposition using the stepped isothermal method. *astm D6992 - 16, i(Reapproved)*, 1–8