* * * *

*

* *

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพฯ

Corresponding author; E-mail address: Rawiwan.733@mail.kmutt.ac.th

ในปัจจุบันโครงสร้างดินเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์โพลีเมอร์ในการใช้งานส่วนใหญ่จะรับแรงกระทำคงค้าง ดังนั้นพฤติกรรมที่ควรให้ความสำคัญคือพฤติกรรมการคืบ การทดสอบการคืบด้วยวิธีปกติทำเพื่อศึกษาพฤติกรรมการคืบของวัสดุ แต่วิธีนี้ใช้ระยะเวลาในการทดสอบนาน จึงได้มีการพัฒนาวิธีการทดสอบที่ใช้อุณหภูมิเพื่อเร่งการคืบการทดสอบแบบนี้หากใช้ระยะเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง จะสามารถทำนายประวัติเวลาความเครียดการคืบระยะยาวได้ นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอวิธีการทำนายประวัติเวลาการคืบของวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์โพลีเมอร์จากความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้นอีกด้วย ผลการวิจัยในอดีตพบว่า ประวัติเวลาการคลายความเค้น 3 ชั่วโมง สามารถทำนายประวัติเวลาการคืบได้ถึง 8 ชั่วโมง ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ทั้งวิธีการเร่งการเกิดพฤติกรรมการคืบด้วยอุณหภูมิและวิธีการทำนายประวัติเวลาการคืบจากประวัติเวลาความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้นใช้ระยะเวลาการทดสอบที่สั้นแต่สามารถทำนายประวัติเวลาการคืบระยะยาวได้ ในงานวิจัยนี้จึงได้นำทั้งสองวิธีมาประยุกต์รวมกัน โดยทำการทดสอบการคืบแบบเร่งด้วยอุณหภูมิด้วยวิธี Stepped isothermal method (SIM) และทำการทดสอบการคลายความเค้นแบบเร่งด้วยอุณหภูมิด้วยวิธี Time-temperature superposition (TTS) จากผลการทดสอบและวิเคราะห์พบว่า การทดสอบการคลายความเค้นที่เร่งด้วยอุณหภูมิด้วยระยะเวลาการทดสอบรวม 12 ชั่วโมง จะได้ประวัติเวลาความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้นประมาณ 115 ชั่วโมง ซึ่งทำให้สามารถทำนายประวัติเวลาความเครียดการคืบได้เท่ากับ 348 ชั่วโมง หรือสามารถประหยัดเวลาการทดสอบได้ประมาณ 29 เท่า

คำสำคัญ: การคลายความเค้น, การคืบ, การเร่งด้วยอุณหภูมิ, ตาข่ายเสริมกำลัง

Nowadays, geosynthetic-reinforced soil (GRS) structures have been widely adopted. The most important concern on durability characteristic of geosynthetic reinforcements is creep behaviour. Conventional creep test is normally used to determine the creep behaviour of polymer geosynthetic reinforcements, but it is highly time-consumed. As a result, a temperature-accelerated technique has been introduced. The results of short-term creep test (~ 24 hours) can predict long-term creep behaviour. Furthermore, a concept to predict creep behaviour of geosynthetic reinforcements from their stress relaxation behaviour was introduced from the past studies. The results showed that the time history of creep strain (~ 8 hours) can be predicted from the results of stress relaxation tests performed for a much shorter period (~ 3 hours). In this study, the combination between temperature-accelerated test (i.e., Stepped isothermal method (SIM) for creep and Time-temperature superposition method (TTS) for stress relaxation) and prediction of creep behaviour from stress relaxation behaviour was conducted. The results of the temperature-accelerated stress relaxation for the total time-consumed period of 12 hours can predict time history of irreversible strain for about 115 hours. After that, this result can predict the time history of creep strain of 348 hours. With the combined method introduced in this study, the consumed time can be saved for about a factor of 29.

Keywords Stress Relaxation, Creep, Temperature-Acceleration, Geogrid

ในปัจจุบันโครงสร้างดินเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลาย โดยจะพบเห็นได้ในงานวิศวกรรมหลายประเภท อาทิ ถนน คันดิน กำแพงกันดิน และอื่น ๆ ซึ่งพฤติกรรมที่ควรให้ความสำคัญคือพฤติกรรมการคืบของวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์โพลีเมอร์เพื่อนำไปหาค่าแฟกเตอร์ลดทอนการคืบ RF_{CR} ด้วยการสร้าง Creep-rupture curve โดยที่อายุการใช้งานของวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์โพลีเมอร์ที่ได้ออกแบบไว้จะอยู่ที่ประมาณ 50 ปี [1]

การทดสอบการคืบของวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์โพลีเมอร์นิยมทำการทดสอบอยู่ 2 วิธี วิธีแรกคือการทดสอบการคืบโดยตรง Conventional creep test ซึ่งจะทำโดยให้ความเค้นคงที่ ส่วนความเครียดจะเพิ่มขึ้นตามเวลา ดังนั้นจึงต้องใช้ระยะเวลาที่นานเพื่อทำการทดสอบให้ครอบคลุมตลอดระยะเวลาของอายุการใช้งานที่ได้ออกแบบไว้ ต่อมาจึงได้เกิดวิธีการทดสอบอีกแบบขึ้น นั่นก็คือ วิธีการเร่งพฤติกรรมการคืบด้วยอุณหภูมิ โดยเริ่มแรกเป็นการทดสอบที่เรียกว่า Conventional time-temperature superposition (TTS) [2] ในการทดสอบนี้ใช้ทำนายพฤติกรรมการคืบระยะยาวด้วยการใช้ข้อมูลจากการทดสอบการคืบระยะสั้นในแต่ละอุณหภูมิที่แตกต่างกันจากตัวอย่างคนละชิ้น จากนั้นกำหนดอุณหภูมิหนึ่งเป็นอุณหภูมิอ้างอิง แล้วทำการเลื่อนผลการทดสอบจากอุณหภูมิอื่น ๆ ที่สูงกว่าไปตามแกนเวลา ก็จะทำให้ได้เส้นโค้งหลักขึ้นมา การทดสอบนี้จะใช้ตัวอย่างการทดสอบหลายตัวอย่าง ดังนั้นอาจเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นในการสร้างเส้นโค้งหลัก เพื่อแก้ปัญหานี้ทำให้มีการทดสอบที่เรียกว่า Stepped isothermal method (SIM) [3] โดยการทดสอบนี้จะใช้การทดสอบเพียงตัวอย่างเดียวและทำการเพิ่มอุณหภูมิรอบตัวอย่างให้สูงขึ้นขณะทดสอบการคืบเพื่อเร่งอัตราการเกิดความเครียดการคืบ และใช้หลักการที่คล้ายคลึงกับการทดสอบ TTS ในการสร้างเส้นโค้งหลัก ทั้งสองวิธีใช้การทดสอบในระยะเวลาสั้นแต่สามารถทำนายประวัติเวลาการคืบระยะยาวได้

หลังจากนั้นเมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมา Nuntapanich et al. [4] ได้นำเสนอวิธีการทำนายการคืบด้วยพฤติกรรมการคลายความเค้นของวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์โพลีเมอร์ไว้ว่า ผลการทดสอบการคลายความเค้น 3 ชั่วโมง สามารถทำนายประวัติการคืบได้ 8 ชั่วโมง สามารถประหยัดเวลาการทดสอบได้เกือบ 3 เท่า ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้รวมทั้งสองวิธีมาประยุกต์รวมกัน เพื่อให้ได้ประวัติเวลาการคืบระยะยาวที่นานมากขึ้น โดยทำการเร่งการคลายความเค้นด้วยอุณหภูมิ จากนั้นนำผลที่ได้ไปทำนายพฤติกรรมการคืบของวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์โพลีเมอร์ ซึ่งในที่นี้คือพอลิโพรไพลีน

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุเสริมแรงสังเคราะห์ที่ใช้ในทดสอบการคืบและการคลายความเค้นในงานวิจัยนี้คือตาข่ายเสริมกำลังชนิดพอลิโพรไพลีน (PP Geogrid) ซึ่งสามารถรับแรงได้ทั้งสองทิศทางโดยมีสมบัติแสดงในตารางที่ 1

สมบัติของตาข่ายเสริมกำลังชนิดพอลิโพรไพลีน (PP Geogrid)

Fibre material	Polypropylene
Abbreviated name	PP
Standard colour	White
Specimen conditions	Virgin
Aperture size, mm (MD/TD) [2]	35 / 35
Max tensile strength, kN/m (MD/TD) [1] [3]	≥ 40 / ≥ 40
Yield point elongation, % (MD) [1] [3]	≤ 8

[1]Test method based on ISO 10319

[2]MD=machine direction (longitudinal to the roll)/TD=transverse directions (across roll width);

[3]tests performed using the temperature at 20 °C

2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบแสดงไว้ดังรูปที่ 1 และสามารถอธิบายส่วนประกอบต่าง ๆ ได้ดังนี้

2.2.1 เครื่องให้แรง

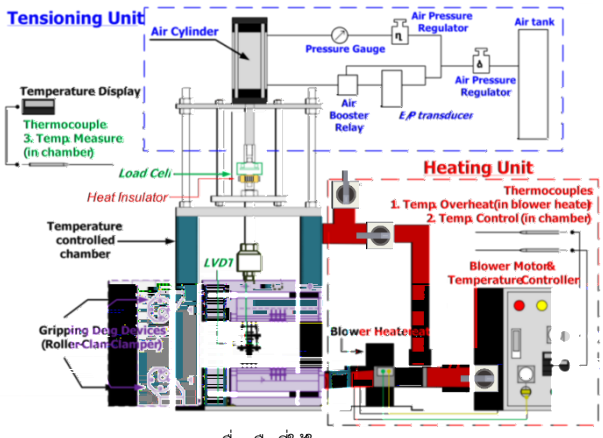
เครื่องให้แรงประกอบด้วยกระบอกลมที่บรรจุอากาศไว้ภายในมีหน้าที่ให้แรงกระทำและถอนแรงกระทำโดยอาศัยการแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นแรงดันลม

2.2.2 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ

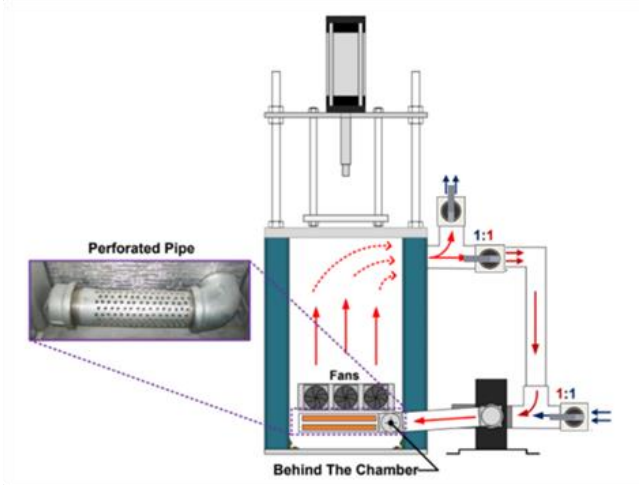
ในการทดสอบจะติดตั้งตัวอย่างไว้ภายใน Chamber และอุณหภูมิรอบตัวอย่างจะถูกควบคุมโดยเครื่องควบคุมอุณหภูมิซึ่งจะนำอากาศจากภายนอกผ่านฮีตเตอร์เข้ามาภายใน Chamber ซึ่งอากาศภายในจะมีอุณหภูมิเท่ากับที่ตั้งไว้ที่เครื่องควบคุมอุณหภูมิ ในขณะที่มีอากาศส่งผ่านเข้ามา ก็จะมีอากาศภายในบางส่วนหนึ่งก็จะถูกปล่อยออกและอีกส่วนหมุนเวียนกลับเข้ามาด้วยเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 2

2.2.3 เครื่องมือวัด

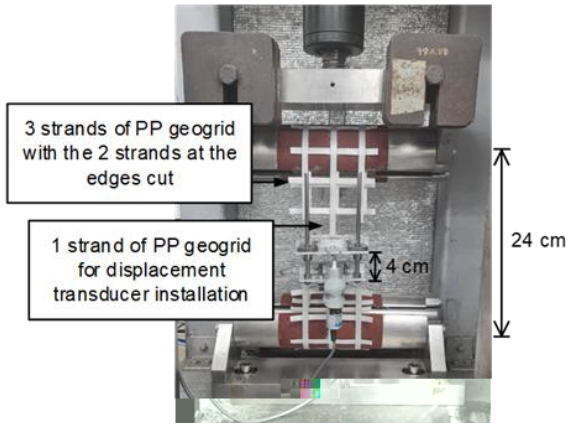
ในการสอบทดสอบนี้ทำการวัดแรงดึงที่กระทำกับตัวอย่างด้วยเซลล์วัดแรง (Load cell) ในส่วนของการเสียรูปจะใช้เซนเซอร์วัดระยะ (Displacement transducer) และอุณหภูมิโดยรอบตัวอย่างจะทำการวัดด้วยเทอร์โมคอปเปอร์ (Thermocouple)



เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ [5]



ระบบการหมุนเวียนอากาศภายใน Chamber [5]



การติดตั้งตัวอย่างการทดสอบ

3.1 รายละเอียดการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบที่ Tensile load เท่ากับ 50% ของ Ultimate tensile strength (20 กิโลนิวตัน/เมตร) เนื่องจากในช่วง Tensile load ประมาณนี้ขึ้นไป จะทำให้เห็นผลของการคืบและการคลายความที่เร่งด้วยอุณหภูมิที่ชัดเจนกว่าการทดสอบที่ Tensile load ค่าน้อย ๆ แต่ Tensile load ที่มีค่ามากกว่า 50% ของ Ultimate tensile strength วัสดุจะเกิดการฉีกขาดออกจากกันก่อนที่จะถึงอุณภูมิสูงสุดที่กำหนด (50 องศาเซลเซียส) ในขั้นตอนการทดสอบ CP-SIM การติดตั้งตัวอย่างการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3

ในการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 5 รูปแบบ ประกอบไปด้วย การให้แรงกระทำแบบต่อเนื่องภายใต้อุณหภูมิคงที่ (Monotonic loading-Constant temperature, ML-CT), การทดสอบการคืบด้วยการเร่งอุณภูมิแบบ SIM (CP-SIM), การทดสอบการคลายเค้นด้วยการเร่งอุณภูมิแบบ TTS (SR-TTS), การทดสอบการคืบโดยตรง (CP-CON) และการทดสอบการคลายความเค้น (SR-CON) โดยมีรายละเอียดของแต่ละการทดสอบดังต่อไปนี้

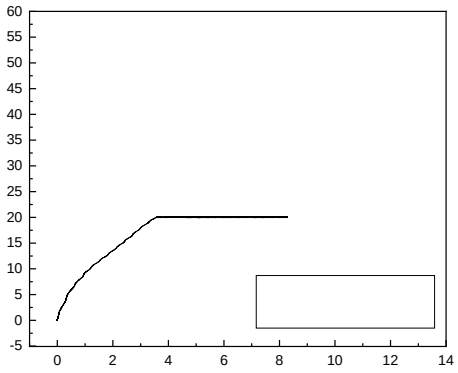
- ML-CT เป็นการทดสอบที่ให้แรงดึงต่อเนื่องกับตัวอย่างทดสอบ โดยมีอัตราการให้แรงเท่ากับ 0.6 กิโลนิวตัน/เมตร/นาที จนตัวอย่างทดสอบขาดจากกัน ภายใต้อุณหภูมิคงที่ที่แตกต่างกันเท่ากับ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส ตลอดการทดสอบ
- CP-SIM เป็นการทดสอบที่ให้แรงดึงต่อเนื่องกับตัวอย่างจนกระทั่งถึงแรงดึงเป้าหมายจากนั้นคงค้างแรงไว้ โดยกำหนดอุณหภูมิอ้างอิงที่ 30 องศาเซลเซียส และทำการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นแบบทันทีทีละ 5 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิสุดท้ายที่ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งจะใช้ระยะเวลา 4 ชั่วโมง ในแต่ละอุณหภูมิ
- SR-TTS เป็นการทดสอบที่ให้แรงดึงต่อเนื่องกับตัวอย่างจนกระทั่งถึงความเครียดเป้าหมายจากนั้นคงค้างความเครียดไว้ภายใต้อุณหภูมิคงที่ที่แตกต่างกันเท่ากับ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส
- CP-CON เป็นการทดสอบการคืบโดยตรง ที่อุณหภูมิคงที่เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส ตลอดการทดสอบ ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบเป็นระยะเวลา 10 วัน
- SR-CON เป็นการทดสอบการคลายความเค้นโดยตรง ที่อุณหภูมิคงที่เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส ตลอดการทดสอบ ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบเป็นระยะเวลา 10 วัน

ในการทดสอบนี้เลือกอุณหภูมิอ้างอิงเท่ากับที่ 30 องศาเซลเซียส เพื่อจำลองสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย ส่วนระยะเวลาการทดสอบในแต่ละอุณหภูมิกำหนดโดยอ้างอิงจาก ASTM D6992 [6]

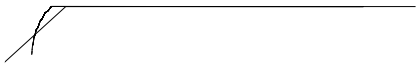
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับความเครียด

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับความเครียดจากการทดสอบ ML-CT, CP-SIM และ SR-TTS เมื่อพิจารณาจุดที่วัสดุขาดออกจากกันจากการทดสอบ ML-CT ที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันเท่ากับ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส จะพบว่าแรงดึงสูงสุดเมื่อทดสอบที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะมีค่ามากกว่า ในขณะเดียวกันความเครียดเมื่อวัสดุฉีกขาดออกจากกันจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามงานวิจัยของ Tabsombut et al. [5] ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อ Elastic stiffness ของวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์โพลีเมอร์

จากการทดสอบ CP-SIM จะเห็นได้ว่าในช่วงที่ให้แรงดึงกระทำกับตัวอย่างคงที่เท่ากับ 20 kN/m ค่าความเครียดการคืบจะเพิ่มขึ้นตลอดทั้งการทดสอบ สำหรับการทดสอบ SR-TTS ในช่วงการคลายความเค้นจะถูกควบคุมให้มีค่าความเครียดเท่ากันที่ 3.75 % เช่นเดียวกันกับตัวอย่างทดสอบทั้งสามตัวอย่างที่ทดสอบด้วยอุณหภูมิแตกต่างกันสามค่า เช่นเดียวกับการทดสอบ ML-CT ซึ่งจะสังเกตได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับความเครียดจากการทดสอบ SR-TTS จะทับกันกับ ML-CT สำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิเดียวกันจวบจนกระทั่งค่าความเครียดเท่ากับค่าเป้าหมาย จากนั้นแรงดึงในการทดสอบการคลายความเค้นจะลดลงเรื่อย ๆ



ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับความเครียดจากการทดสอบแบบ ML-CT, CP-SIM และ SR-TTS



ประวัติเวลาความเครียดการคืบจากการทดสอบการคืบที่เร่งด้วยอุณหภูมิ (CP-SIM)

4.2 การสร้างเส้นโค้งหลัก (Master curve)

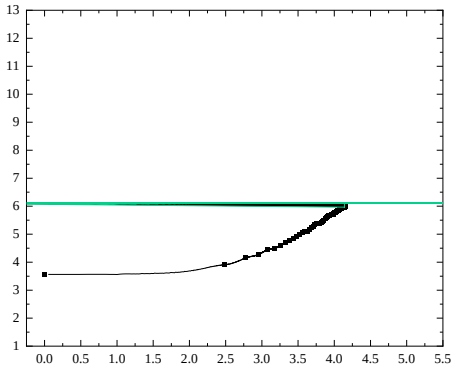
รูปที่ 5 แสดงประวัติเวลาความเครียดการคืบจากการทดสอบ CP-SIM จะเห็นได้ว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความเครียดการคืบจะเพิ่มขึ้นทันที จากนั้นนำข้อมูลดังกล่าวมาพล็อตประวัติเวลาความเครียดการคืบสำหรับแต่ละอุณหภูมิใน Semi-log scale ได้ดังรูปที่ 6 (ก) และทำหาค่า Horizontal shifting factor จาก WLF equation [7] ดังสมการที่ 1

$$\log\left(\alpha_T\right)=\frac{-C_1\left(T-T_1\right)}{C_2+T-T_1} \qquad (1)$$

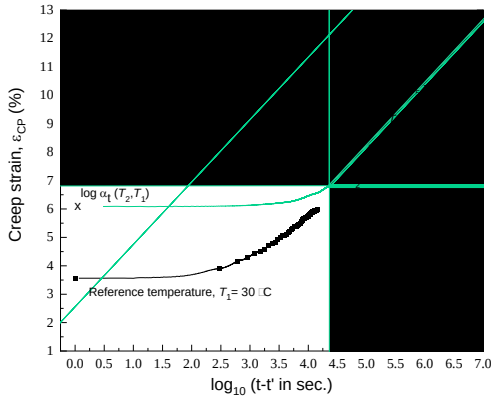
โดยที่ α_T คือ ค่า Horizontal shifting factor, C_1 และ C_2 คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับวัสดุและอุณหภูมิอ้างอิง ในที่นี้จะใช้ค่าเท่ากับ 8.86 และ 101.6 เคลวิน ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าคงที่สำหรับวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์โพลีเมอร์ใด ๆ เมื่อเลือกอุณหภูมิอ้างอิงอยู่เหนืออุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (Glass Transition Temperature, T_g) ประมาณ 43 เคลวิน [8] โดยค่า T_g ของ PP geogrid มีค่าเท่ากับ -25 องศาเซลเซียส, T คือ อุณหภูมิการทดสอบ และ T_1 คือ อุณหภูมิอ้างอิง

ค่า Horizontal shifting factor

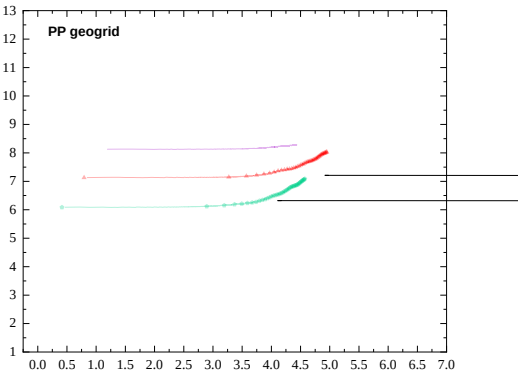
อุณหภูมิอ้างอิง, T_1 (°C)	อุณหภูมิการทดสอบ, T (°C)	Horizontal shifting factor	
		Log(α_T)	α_T
30	35	-0.416	2.604
	40	-0.794	6.222
	45	-1.140	13.797
	50	-1.457	28.657



(ก)



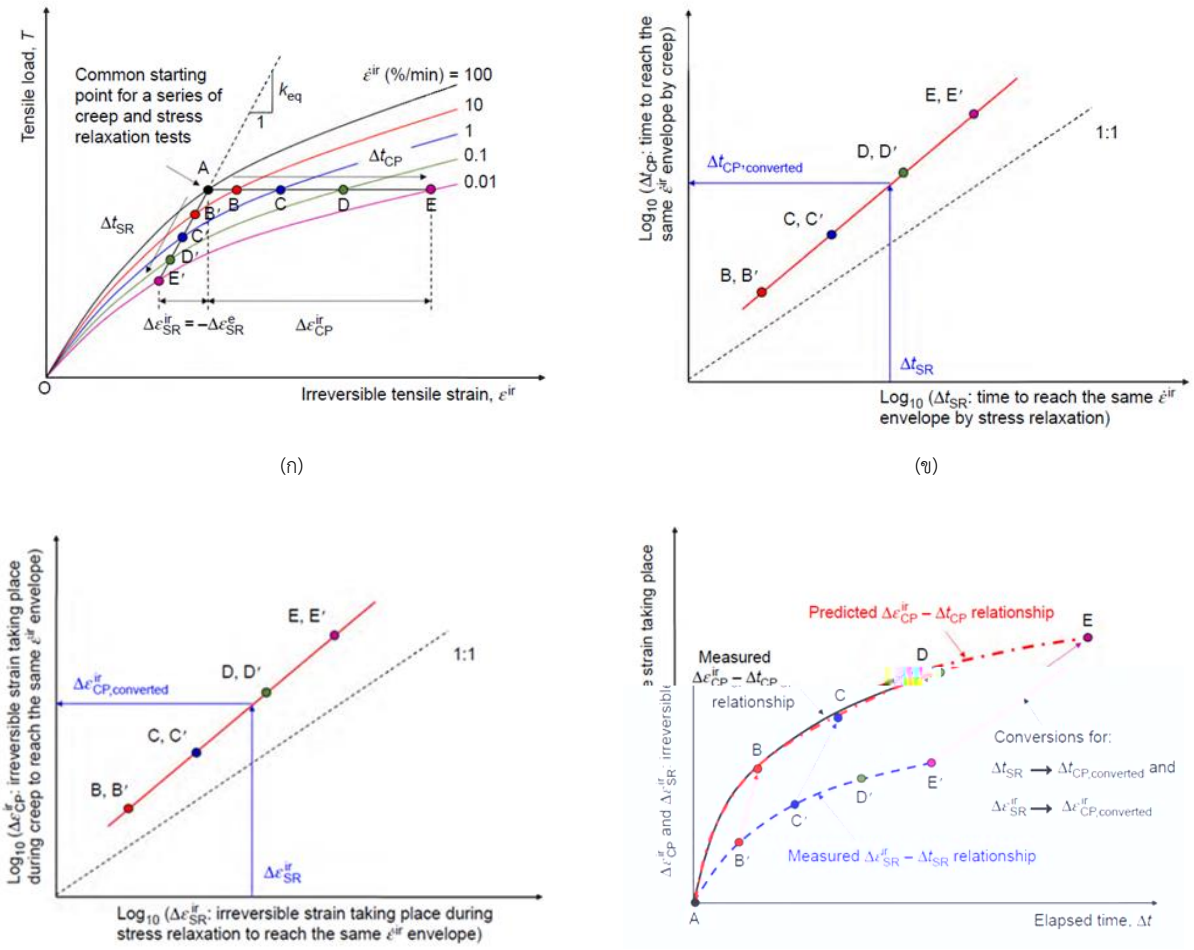
(ข)



(ค)

ขั้นตอนการสร้างเส้นโค้งหลักจากการทดสอบ CP-SIM ที่แรงดึงคงที่เท่ากับ 20 kN/m: (ก) ประวัติเวลาการคืบใน Semi-log scale ในแต่ละอุณหภูมิ; (ข) ประวัติเวลาการคืบในแต่ละอุณหภูมิที่ถูกเลื่อนไปตามแกนเวลา; และ (ค) เส้นโค้งหลักที่ได้จากการเลื่อนแกน

จากนั้น ประวัติเวลาความเครียด



ความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมการคืบและพฤติกรรมการคลายความเค้นของวัสดุที่มีสมบัติ isotach: (ก) ความสัมพันธ์แรงดึงและความเครียดไม่ คืนกลับ ในช่วงการคืบและการคลายความเค้นที่อัตราความเครียดไม่คืนกลับเท่ากัน; (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง Δt_{CP} - Δt_{SR} ; (ค) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta\varepsilon^{it}_{CP}$ - $\Delta\varepsilon^{it}_{SR}$; และ (ง) การทำนายพฤติกรรมการคืบด้วยพฤติกรรมการคลายความเค้น [4]

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเครียดไม่คืนกลับและเวลากับอัตราความเครียดไม่คืนกลับ

ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด ($\Delta\varepsilon$) ความเครียดไม่คืนกลับ ($\Delta\varepsilon^{ir}$) และความเครียดอิลาสติก ($\Delta\varepsilon^{e}$) แสดงได้ดังสมการที่ 2

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon^{ir} + \Delta\varepsilon^{e} = 0 \qquad (2)$$

และความเครียดอิลาสติกแสดงได้ดังสมการที่ 3

$$-\Delta\varepsilon^{e} = \Delta V \ / \ k_{eq}(V) \qquad (3)$$

โดยที่ $\Delta\varepsilon$ คือ การเปลี่ยนแปลงความเครียดรวม, $\Delta\varepsilon^{ir}$ คือ การเปลี่ยนแปลงความเครียดไม่คืนกลับ, $\Delta\varepsilon^{e}$ คือ การเปลี่ยนแปลงความเครียดอิลาสติก, ΔV คือ การเปลี่ยนแปลงแรงและ $k_{eq}(V)$ คือค่า Equivalent elastic stiffness เท่ากับ 1,109.87 kN/m

เมื่อพิจารณาการทดสอบการคืบซึ่งจะให้ค่าแรงดึงคงที่ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงแรงดึงจะมีค่าเป็นศูนย์ และทำให้ค่าความเครียดอิลาสติกเป็นศูนย์ด้วย ดังนั้นจากสมการที่ 2 จะพบว่า ค่าการเปลี่ยนแปลงความเครียดรวมในการทดสอบการคืบจะเท่ากับค่าการเปลี่ยนแปลงความเครียดไม่คืนกลับ ($\Delta\varepsilon_{CP} = \Delta\varepsilon^{ir}_{CP}$) ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดไม่คืนกลับการคืบกับการเปลี่ยนแปลงความเครียดไม่คืนกลับการคืบ ($\dot{\varepsilon}^{ir}_{CP} - \Delta\varepsilon^{ir}_{CP}$) ดังแสดงในรูปที่ 10 (ก)

ส่วนในการทดสอบการคลายความเค้น การเปลี่ยนแปลงความความเครียดรวมจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจากสมการที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความเครียดไม่คืนกลับจะมีค่าเท่ากับค่าการเปลี่ยนแปลงความเครียดอิลาสติกในทิศทางตรงกันข้าม ($\Delta\varepsilon^{ir}_{SR} = -\Delta\varepsilon^{e}_{SR}$) และสามารถหาค่าความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้นได้จากสมการที่ 3 จากนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้นกับการเปลี่ยนแปลงความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้น ($\dot{\varepsilon}^{ir}_{SR} - \Delta\varepsilon^{ir}_{SR}$) ดังแสดงในรูปที่ 10 (ข) จากนั้นจะสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตรา

ความเครียดไม่คืนกลับการคืบกับเวลาการคืบ ($\dot{\varepsilon}_{CP}^{ir} - \Delta t_{CP}$) และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้นกับเวลาการคลายความเค้น $\dot{\varepsilon}_{SR}^{ir} - \Delta t_{SR}$ ได้ดังรูปที่ 11 (ก) และ 11 (ข) ตามลำดับ

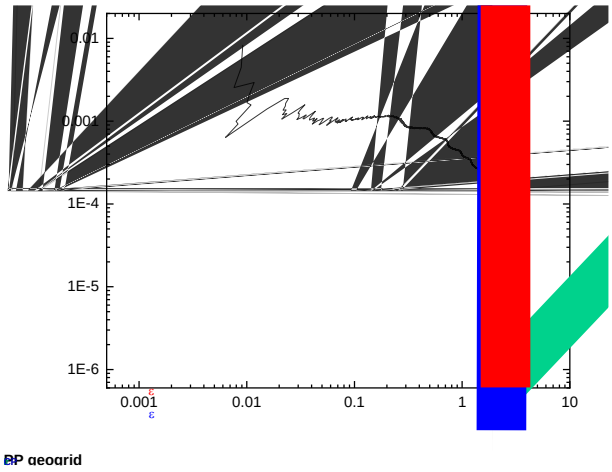
จากรูปที่ 10 และ 11 เมื่อพิจารณาอัตราความเครียดไม่คืนกลับค่าเดียวกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ค่าเท่ากับ 0.0002, 0.00008, 0.00004, และ 0.00002 %/s จะสามารถอ่านค่า $\Delta\varepsilon_{CP}^{ir}$, $\Delta\varepsilon_{SR}^{ir}$, Δt_{CP} และ Δt_{SR} ออกมาเพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta\varepsilon_{CP}^{ir}$ กับ $\Delta\varepsilon_{SR}^{ir}$ และความสัมพันธ์ระว่าง Δt_{CP} กับ Δt_{SR} ดังรูปที่ 12 และ 13 ตามลำดับ จากรูปสองรูปนี้พบว่า ความสัมพันธ์ทั้งสองมีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งสามารถเขียนในรูปของสมการได้ดังนี้

$$\log(\Delta\varepsilon_{CP}^{ir}) = S_{\varepsilon}.\log(\Delta\varepsilon_{SR}^{ir}) + \log(\Delta\varepsilon_{0}) \qquad (4)$$

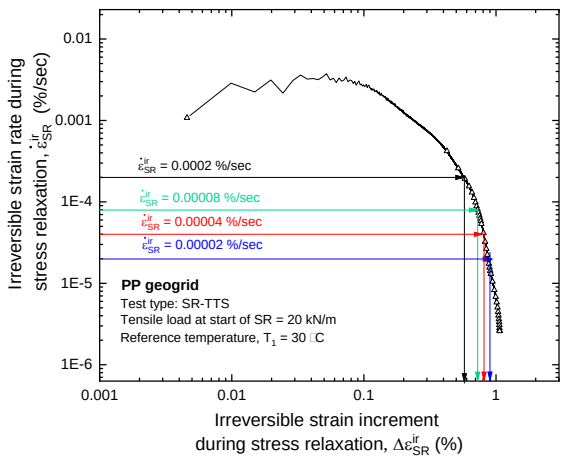
โดย S_{ε} คือความชันของความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta\varepsilon_{CP}^{ir}$ กับ $\Delta\varepsilon_{SR}^{ir}$ และ $\Delta\varepsilon_{0}$ คือค่าที่จุดตัดแกนตั้งของความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta\varepsilon_{CP}^{ir}$ กับ $\Delta\varepsilon_{SR}^{ir}$

$$\log(\Delta t_{CP}) = S_{t}.\log(\Delta t_{SR}) + \log(\Delta t_{0}) \qquad (5)$$

โดย S_{t} คือความชันของความสัมพันธ์ระหว่าง Δt_{CP} กับ Δt_{SR} และ Δt_{0} คือค่าคงที่จุดตัดแกนตั้งของความสัมพันธ์ระหว่าง Δt_{CP} กับ Δt_{SR}

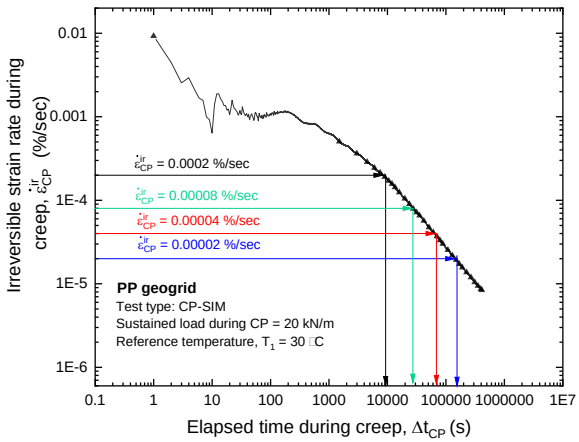


(ก)

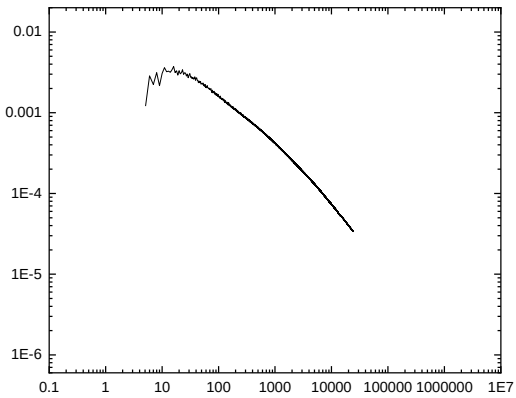


(ข)

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดไม่คืนกลับกับความเครียดไม่คืนกลับส่วนเพิ่ม: (ก) CP-SIM และ (ข) SR-TTS

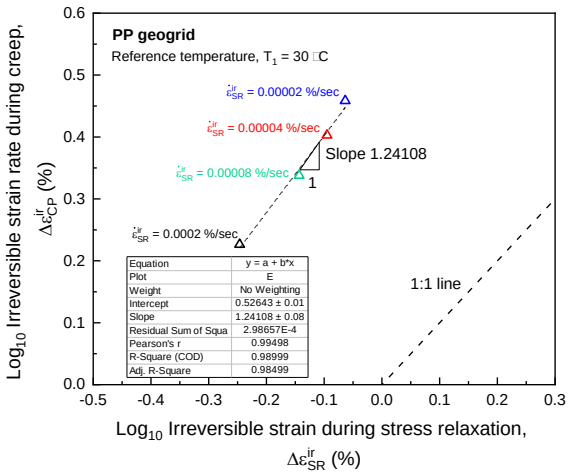


(ก)

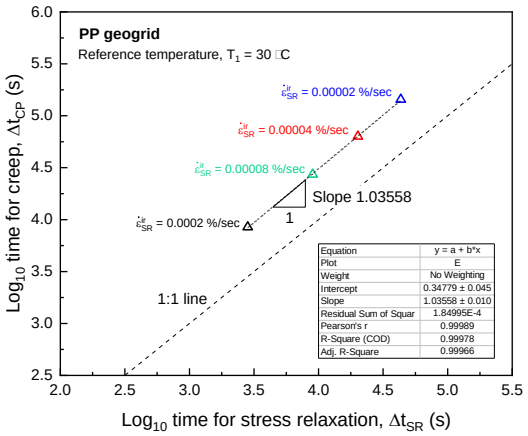


(ข)

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดไม่คืนกลับกับเวลา: (ก) CP-SIM และ (ข) SR-TTS



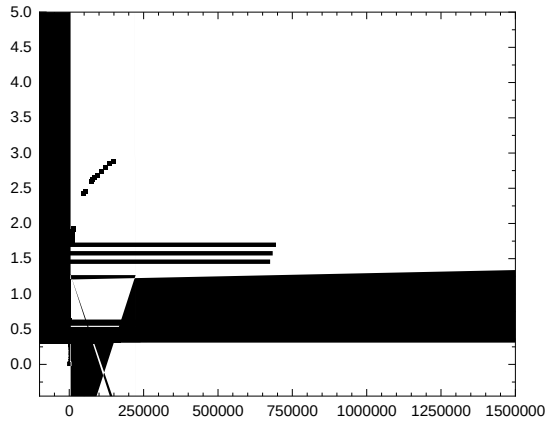
ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดไม่คืนกลับส่วนเพิ่มจาก CP-SIM กับความเครียดไม่คืนกลับส่วนเพิ่มจาก SR-TTS



ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาจาก CP-SIM กับเวลาจาก SR-TTS

4.5 การทำนายประวัติเวลาความเครียดการคืบด้วยประวัติเวลาการคลายความเค้น

เมื่อทราบค่าความชัน S_ε และค่าจุดตัดแกน $\Delta\varepsilon_0$ แล้ว แทนค่าการเปลี่ยนแปลงความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้นลงในสมการที่ 4 ก็จะสามารถหาค่า $\Delta\varepsilon^{ir}_{CP,Converted}$ ในทำนองเดียวกัน ประวัติเวลาการคลายความเค้นก็สามารถแปลงเวลาการคลายความเค้นเป็นค่า $\Delta t_{CP,Converted}$ ได้ด้วยการแทนลงในสมการที่ 5 พร้อมค่าความชัน S_t และ Δt_0 ที่ทราบค่าแล้ว ซึ่งจะทำให้ได้ประวัติเวลาความเครียดการคืบจากการทำนายด้วยประวัติเวลาการคลายความเค้นที่เร่งด้วยอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 14 และจะพบว่าการทดสอบการคลายความเค้นที่เร่งด้วยอุณหภูมิด้วยระยะเวลาการทดสอบรวมทั้งหมด 12 ชั่วโมง จะได้ประวัติเวลาความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้นประมาณ 115 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาทำนายประวัติเวลาความเครียดการคืบได้เท่ากับ 348 ชั่วโมง นั่นคือสามารถประหยัดเวลาการทดสอบได้ประมาณ 29 เท่า



ผลการทำนายประวัติเวลาความเครียดการคืบจากประวัติเวลาการคลายความเค้นที่เร่งด้วยอุณหภูมิ

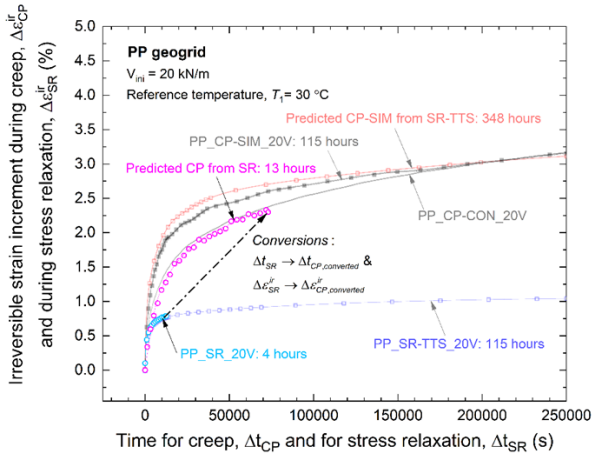
4.6 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทำนายความเครียดการคืบด้วยการคลายความเค้นที่เร่งด้วยอุณหภูมิกับการทดสอบการคืบแบบธรรมดา

รูปที่ 15 (ก) และ 15 (ข) แสดงการเปรียบเทียบระหว่างประวัติเวลาความเครียดการคืบที่ทำนายด้วยประวัติเวลาการคลายความเค้นที่เร่งด้วยอุณหภูมิ ประวัติเวลาความเครียดการคืบจากการทดสอบการคืบด้วยการเร่งอุณหภูมิ ประวัติเวลาความเครียดการคืบที่ทำนายด้วยประวัติเวลาการคลายความเค้นจากการทดสอบด้วยอุณหภูมิคงที่ และประวัติเวลาการคืบจากการทดสอบการคืบแบบธรรมดา จากรูปเหล่านี้จะพบว่า

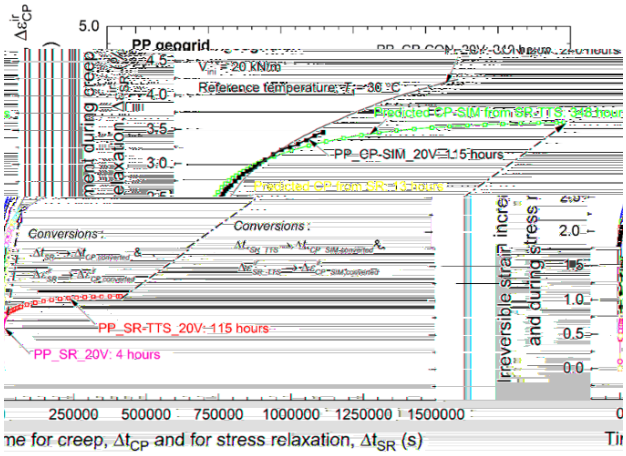
- เมื่อเปรียบเทียบผลการทำนายความเครียดการคืบจากผลการทดสอบการคลายความเค้นที่เร่งด้วยอุณหภูมิกับผลการทดสอบการคืบแบบธรรมดาจะเห็นได้ว่า มีความใกล้เคียงกันในช่วงที่ช่วงเวลา 0-250,000 วินาที หลังจากนั้นความเครียดที่ได้จากการทำนายจะมีค่าต่ำกว่าผลการทดสอบการคืบแบบธรรมดา
- เมื่อเปรียบเทียบระหว่างความเครียดการคืบที่ทำนายจากการคลายความเค้นที่เร่งด้วยอุณหภูมิกับความเครียดการคืบจากการทดสอบการคืบด้วยการเร่งด้วยอุณหภูมิพบว่า มีความใกล้เคียงกันมาก การทดสอบการคืบที่เร่งด้วยอุณหภูมิใช้เวลา 20 ชั่วโมง ได้เวลาการคืบ 115 ชั่งโมง แต่การทำนายความเครียดการคืบจากการคลายความเค้นที่เร่งด้วยอุณหภูมิใช้เวลาเพื่อการทดสอบการคลายความเค้นรวมทั้งหมด 12 ชั่วโมง แต่สามารถนำมาทำนายประวัติเวลาความเครียดการคืบได้ 348 ชั่วโมง
- เมื่อเปรียบเทียบระหว่างความเครียดการคืบที่ทำนายจากการคลายความเค้นที่เร่งด้วยอุณหภูมิกับความเครียดการคืบที่ทำนายจากการคลายความเค้นที่อุณหภูมิคงที่จะพบว่า การทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิคงที่ 4 ชั่วโมง สามารถนำมาทำนายความเครียดการคืบได้ 13 ชั่วโมง แต่การเพิ่มระยะเวลาการทดสอบจาก 4 เป็น 12 ชั่วโมง (3 ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส) สามารถในทำนาย

ประวัติเวลาความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้นที่ 115 ชั่วโมง จากนั้นสามารถนำไปทำนายประวัติเวลาการคืบได้ 348 ชั่วโมง

จากรูปที่ 15 สามารถนำมาสรุปผลการเปรียบเทียบระยะเวลาที่ทำนายได้กับระยะเวลาที่ต้องใช้ในการทดสอบในรูปแบบจำนวนเท่าของเวลา (Time factor) ดังแสดงในตารางที่ 3



(ก)



(ข)

การเปรียบเทียบการทำนายความเครียดการคืบจากผลการทดสอบการคลายความเค้นที่เร่งด้วยอุณหภูมิกับผลการทดสอบการคืบตรง ผลการทำนายการคืบด้วยการคืบที่เร่งด้วยอุณหภูมิ และการทำนายการคืบจากผลการทดสอบคลายความเค้นจากการทดสอบระยะสั้น: (ก) ที่ช่วงเวลา 0-250,000 วินาที; และ (ข) ช่วง 0-1,500,000 วินาที

จำนวนเท่าของเวลา (Time factor) จากวิธีการทดสอบต่าง ๆ

	*	*	
CP-SIM	20	115	5.75
SR-TTS	12	115	9.58
SR-to-CP	4	13	3.25
SR-TTS-to-CP-SIM	12	348	29

การศึกษาในครั้งนี้ทำให้ได้วิธีการทำนายประวัติเวลาความเครียดการคืบของวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์ที่ยาวนานมากขึ้นด้วยการใช้อุณหภูมิเข้าช่วยเร่งให้เกิดพฤติกรรมการคลายความเค้น โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

- การทดสอบพฤติกรรมการคลายความเค้นที่เร่งด้วยอุณหภูมิแบบ TTS (SR-TTS) ทำการทดสอบที่ 3 อุณหภูมิที่แตกต่างกัน (30 40 และ 50 องศาเซลเซียส) อุณหภูมิละ 4 ชั่วโมง รวมทั้งสิ้น 12 ชั่วโมง สามารถทำนายประวัติเวลาความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้นประมาณ 115 ชั่วโมง
- นำผลการทำนายประวัติเวลาความเครียดไม่คืนกลับการคลายความเค้น 115 ชั่วโมง มาทำนายประวัติเวลาการคืบได้ 348 ชั่วโมง
- การทำนายประวัติเวลาความเครียดการคืบของตาข่ายเสริมกำลังพอลิโพรไพลีนด้วยการทดสอบการคลายความเค้นที่เร่งด้วยอุณหภูมิ (SR-TTS to CP-SIM) สามารถประหยัดเวลาการทดสอบการคืบไปได้ถึง 29 เท่า ซึ่งมีค่าประมาณเท่ากับผลคูณระหว่างจำนวนเท่าของเวลาของวิธี SR-TTS (Time factor = 9.58) และวิธี SR-to-CP (Time factor = 3.25)

ทางผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท วิกเกอ เมอเจอร์ จำกัดที่ให้การสนับสนุนวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์โพลีเมอร์ชนิดพอลิโพรไพลีน (PP geogrid) สำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้

[1] Hirakawa, D., Kongkitkul, W., Tatsuoka, F., & Uchimura,T. (2003). Time-dependent stress-strain behaviour due to viscous properties of geogrid reinforcement. Geosynthetics International10(6), 176–199. DOI: 10.1680/gein. 10.6.176. 37246

[2] Vinogradov, G. V., Malkin, A. Y., Prozorovskaya, N. V., & Kargin, V. A. (1963). The rheology of polymers. A

temperature invariant characteristic of anomalously viscous systems. In Doklady Akademii Nauk (Vol. 150, No. 3, pp. 574-577). Russian Academy of Sciences.

[3] Thornton, J.S. (1998). Conventional and Stepped Isothermal Methods for Characterizing Long Term Creep Strength of Polyester Geogrids. *Sixth International Conference on Geosynthetics*, 691–698.

[4] Nuntapanich, N., Kongkitkul, W., Tatsuoka, F., & Jongpradist, P. (2018). Prediction of creep behaviour from load relaxation behaviour of polymer geogrids. *Geosynthetics International*, 25(3), pp.334–349.

[5] W., Tabsombut, Kongkitkul, W., Jaturapitakkul, C., & Tatsuoka, F. (2012). Effects of temperature on the rupture strength and elastic stiffness of geogrids. Geosynthetics International19(2),106–123. DOI:10.1680/gein.2012.19.2106

[6] ASTM D6992, (2009). 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, Pennsylvania, DOI: 1 10.1520/D6992-03R09.

[7] Ferry, J. D. (1980). Viscoelastic properties of polymers. 3rd. John Wiley & Sons. New York.

[8] Van Krevelen, D.W., (1976). Properties of Polymers. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam