

## การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพฤติกรรมการคืบของหินดินเหนียวแม่เมาะ DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS OF CREEP BEHAVIOR'S MAE MOH CLAYSTONE

กตัญญู นิรันดร์กุลสิทธิ์<sup>1,\*</sup> และ พีรพงศ์ จิตเสงี่ยม<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, จังหวัดเชียงใหม่, ประเทศไทย

\*Corresponding author address: Katanyou\_ni@cmu.ac.th

### บทคัดย่อ

เหมืองถ่านหินแม่เมาะเป็นเหมืองเปิดที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในประเทศไทย ซึ่งในปัจจุบันเหมืองมีการดำเนินงานขุดเหมืองอย่างต่อเนื่องและจะมีการดำเนินการทำเหมืองต่อไปที่ระดับความลึกที่มากกว่า 300 เมตรในอนาคต ซึ่งจะต้องคำนึงถึงเสถียรภาพในระยะยาวของบ่อเหมือง ที่มีหินดินเหนียว (Claystone) เป็นองค์ประกอบหลักของลาดเหมืองแม่เมาะ โดยการคืบ (Creep) ซึ่งเป็นคุณสมบัติด้านการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่มีความเกี่ยวข้องกับเวลาของวัสดุ ภายใต้สภาวะความเค้นคงที่เป็นเวลานาน ดังนั้นการขุดเปิดเหมืองในระดับลึกจะส่งผลโดยตรงต่อการคืบของลาดเหมืองแม่เมาะและจะยังผลต่อเสถียรภาพของลาดเหมืองอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ บทความนี้เป็นการศึกษาและจำลองพฤติกรรมการคืบของหินดินเหนียวแม่เมาะบนพื้นฐานการทดสอบการคืบหลายระดับ (multi-stage creep tests) ที่ได้รับการออกแบบเพื่อทดสอบโดยเฉพาะ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการคืบถูกนำมาใช้ในการจำลองพฤติกรรมการคืบของหินดินเหนียวแม่เมาะ 3 แบบจำลอง ได้แก่ Maxwell model, Kelvin model และ Buggers Creep model จากการศึกษาพบว่าแบบจำลอง Buggers Creep model มีความสัมพันธ์ที่ดี มีความสอดคล้องกันระหว่างผลการทดสอบกับแบบจำลอง ซึ่งสามารถนำแบบจำลองนี้มาใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการคืบของหินดินเหนียวแม่เมาะได้

**คำสำคัญ:** หินดินเหนียว, พฤติกรรมการคืบ, แบบจำลองการคืบ

### Abstract

Mae Moh Coal Mine is the largest open-pit mine in Thailand. Nowadays, the mine is continuing mining operations with higher depth of more than 300 meters in the future. Therefore, the long-term stability associated with the creep behavior of the claystone which is the main component of Mae Moh mine slopes must be seriously considered. Creep is a time-dependent behavior of a material under the condition of constant stress for a certain time period. This paper aimed to develop a mathematical model of creep behavior of Mae Moh claystone based on the specially customized multi-stage creep tests. The creep mathematical models were used to simulate the creep behavior of Mae Moh claystone under a range of stress conditions of the Mae Moh mine. Three models of Maxwell model, Kelvin model, and Buggers Creep model were proposed in this study. The result showed that the Buggers Creep model had a good agreement between the test results and a model. This could be used to describe the creep behavior of Mae Moh claystone.

**Keywords:** Claystone, Creep Behavior, Creep Model

### 1. บทนำ

จากการดำเนินงานของเหมืองแม่เมาะแบบเปิดที่ผ่านมา ความลึกและปริมาณถ่านหินของเหมืองถ่านหินแบบเปิดนี้ได้มีการขุดเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยองค์ประกอบทางธรณีวิทยาที่สำคัญในการเปิดหน้าเหมืองนี้ก็คือหินดินเหนียว (Clay stone) ซึ่งการเปิดหน้าเหมืองนี้จะส่งผลให้สถานะความเค้น (Stress state) ในชั้นหินดินเหนียวมีการเปลี่ยนแปลงไปและเมื่อเวลาผ่านไปสักช่วงระยะเวลาหนึ่ง จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation) ของชั้นหินดินเหนียว ซึ่งอาจก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวและเสียเสถียรภาพของลาดหินดินเหนียวได้ โดยมักจะเกิดขึ้นพร้อมกับการคืบของชั้นหินดินเหนียวเอง เนื่องด้วยจากสภาพทางธรณีวิทยาที่มีความซับซ้อนและมีความหลากหลายในการก่อตัวกันเป็นมวลหินขนาดใหญ่ (Rock

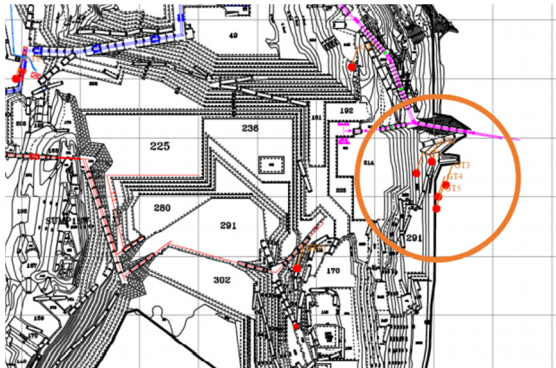
mass) ที่ภายในจะมีทั้งรอยแยก รอยเลื่อน และความไม่ต่อเนื่องของมวลหิน การเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่มีความสัมพันธ์กับเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลกระทบต่อมวลหินและเสถียรภาพโดยรวมของเหมืองแม่เมาะ และในปัจจุบันการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชั้นหินดินเหนียวดังกล่าวได้เริ่มมีการเคลื่อนตัวให้เห็นบ้างแล้วจากรายงานที่ได้จากเหมืองแม่เมาะ อีกทั้งทางเหมืองแม่เมาะยังมีโครงการที่จะทำการขุดเปิดเหมืองต่อเนื่องไปที่ความลึกในระดับ 300-600 เมตรในอนาคต ซึ่งยังไม่เคยขุดเกิน 300 เมตรมาก่อน โดยการขุดเปิดเหมืองจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสถานะความเค้นในมวลหินดินเหนียวในระดับที่มากขึ้น ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า เสถียรภาพของเหมืองเปิดแม่เมาะในอนาคตจะต้องเกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการคืบนี้มากยิ่งขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันยังไม่มีโครงการที่จะศึกษาถึงพฤติกรรมการคืบของมวลหินขนาดใหญ่ภายใต้สภาวะการรับแรงที่สอดคล้องกับการทำเหมืองเปิดแม่เมาะอย่างเป็นรูปธรรม เพื่อนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ใช้ในการประเมินเสถียรภาพความลาดของเหมืองเปิดแม่เมาะต่อไป ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะเริ่มศึกษาถึงพฤติกรรมการคืบของมวลหิน เพื่อจะได้เข้าใจถึงพฤติกรรมเชิงลึกภายใต้สภาวะที่สอดคล้องกับการทำเหมืองเปิดแม่เมาะ อันจะส่งผลต่อความน่าเชื่อถือที่เพิ่มมากขึ้นในการประเมินเสถียรภาพโดยรวมของเหมืองเปิดแม่เมาะในปัจจุบันและอนาคตอันใกล้ต่อไป

## 2. วัสดุและขั้นตอนการวิจัย

### 2.1. หินดินเหนียวแม่เมาะ

เหมืองเปิดแม่เมาะเป็นเหมืองที่ใช้ถ่านหินลิกไนต์ในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยมีหินดินเหนียวเป็นส่วนประกอบหลัก ตัวอย่างหินดินเหนียวแบบไม่รบกวนได้มาจากการเก็บตัวอย่างแบบ “Triple Tube Core Barrels” ที่ระดับความลึก 170 เมตรจากผิวดิน จากหลุมเจาะ GT1 ณ ตำแหน่ง N-8 ของเหมืองแม่เมาะ ดังรูปที่ 1 ตัวอย่างหินดินเหนียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 61 มิลลิเมตร มีลักษณะคล้ายดินแข็ง มีสีเทาน้ำตาล มีชั้นถ่านหินลิกไนต์บาง ๆ และบางส่วนมีรอยแตก ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 ตำแหน่งหลุมเจาะ GT1



รูปที่ 2 ตัวอย่างหินดินเหนียว

### 2.2. ขั้นตอนการวิจัย

การวิจัยเริ่มต้นจากการสำรวจเหมืองแม่เมาะเพื่อศึกษาคูณลักษณะของตัวอย่างหินดินเหนียว จากนั้นตัวอย่างหินดินเหนียวแบบไม่รบกวนถูกเก็บขึ้นมาเพื่อทำการทดสอบโดยเครื่องทดสอบดังรูปที่ 3 และได้มีการพัฒนาการทดสอบบีบอัดสามแกนเพื่อให้สามารถจำลองแรงดันในที่ของเหมืองแม่เมาะได้อย่างสมจริงยิ่งขึ้น โดยมีการทดสอบ 2 การทดสอบ คือ การทดสอบแรงกดสามแกน และการทดสอบการคืบของหินดินเหนียว โดยใช้ตัวอย่างจากที่เก็บจาก 3 ความลึกมาทดสอบ และใช้แรงอัดด้านข้าง (Confining Pressure) เท่ากับ 0.5MPa, 1.0MPa และ 1.5MPa ตามลำดับ แล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์พฤติกรรมการคืบของหินดินเหนียวแม่เมาะท้ายที่สุดผลการทดสอบจะถูกนำมาเปรียบเทียบกันในรูปแบบจำลองการคืบเพื่อดูความเหมาะสมของแต่ละแบบจำลอง

#### 2.2.1. การทดสอบแรงกดสามแกน

การทดสอบแรงอัดสามแกนอยู่บนพื้นฐานมาตรฐานการทดสอบ ASTM D2664 [1] ซึ่งเป็นวิธีการพื้นฐานในการกำหนดค่าความแข็งแรงของตัวอย่างดินหรือหิน โดยเครื่องมือทดสอบ (รูปที่ 2) นี้จะให้แรงดันไฮดรอลิกอย่างสม่ำเสมอที่รอบๆพื้นผิวโค้งของตัวอย่างทรงกระบอกเรียกว่า confining pressure และทำการให้แรงกดในแนวแกนเรียกว่า deviator stress อย่างต่อเนื่องจนเกิดการพังของตัวอย่าง โดยการทดสอบนี้จะให้แรงดัน confining pressure กับตัวอย่างที่ระดับต่างๆกัน มีค่าเท่ากับ 0.5MPa, 1.0MPa และ 1.5MPa (จากตัวอย่าง 3 ความลึก) เพื่อดูค่าความแข็งแรงของตัวอย่างที่ระดับความลึกและแรงดันด้านข้างต่างๆ

#### 2.2.2. การทดสอบการคืบของหินดินเหนียว

พฤติกรรมการคืบของหินดินเหนียวสามารถตรวจสอบได้ด้วย การทดสอบแรงกดสามแกนแบบหลายขั้นตอน (multi-stage triaxial creep test) โดยจะทำการให้แรงดันด้านข้าง confining pressure ที่คงที่ในแต่ละตัวอย่าง ซึ่งในที่นี้จะให้ความดันที่ 0.5, 1.0 และ 1.5 Mpa และให้ความเค้นเบี่ยงเบน (deviator stress) มีค่าคงที่เป็นช่วงเวลาหนึ่ง โดยในตัวอย่างเดียวกันนี้จะมีการเพิ่มความเค้นเบี่ยงเบน (deviator stress) หลายค่าไปในแต่ละระดับการทดสอบคงที่ไว้ (ระดับละ 24 ชั่วโมง) ซึ่งค่าความเค้นเบี่ยงเบน (deviator stress) นี้จะถูกจำกัดด้วยความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุเพื่อไม่ให้เกิดการทดสอบเกิดความล้มเหลวระหว่างการทดสอบ และค่าความเครียดที่ต้องการจะถูกวัดโดยใช้ strain gage ติดกับตัวอย่างขณะทดสอบ เพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของความเครียดในระดับไมโครของตัวอย่างทดสอบ

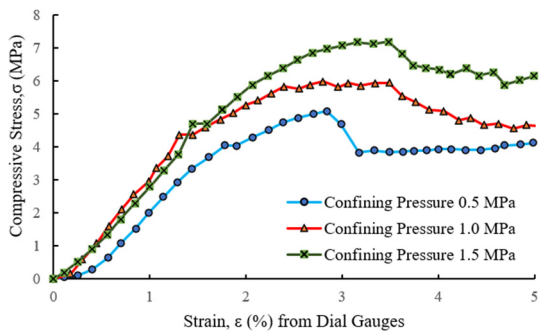


รูปที่ 3 ชุดเครื่องมือการทดสอบแรงกดสามแกนและการทดสอบการคืบของดินเหนียว

### 3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์

#### 3.1. การทดสอบแรงอัดสามแกน (TRIAXIAL TEST)

จากรูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบแรงกดสามแกน เพื่อหาค่าความแข็งแรงของตัวอย่างดินเหนียว ตามลักษณะของ Mohr-Coulomb โดยใช้ตัวอย่างทดสอบจาก 3 ค่าความลึกคือ 50, 100 และ 150 เมตร และใช้ค่าแรงดันด้านข้าง (Confining pressure) 0.5, 1.0 และ 1.5 MPa ตามลำดับ ความเค้นเบี่ยงเบน (Deviator stress) จะเพิ่มขึ้นจนตัวอย่างล้มเหลว หลังจากตัวอย่างล้มเหลวจะสังเกตเห็นได้ว่าความเค้นเบี่ยงเบนจะมีค่าลดลงในขณะที่การเคลื่อนตัวของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความเค้นเบี่ยงเบน (Deviator stress) มากที่สุดภายใต้แรงดันด้านข้าง (Confining pressure) ที่ 0.5, 1.0 และ 1.5 MPa มีค่าเท่ากับ 5.09, 5.99 และ 7.20 MPa และค่าความเครียด (Strain) ณ จุดล้มเหลวมีค่าเท่ากับ 2.84, 2.80 และ 3.48% ที่ค่าแรงดันด้านข้าง (Confining pressure) ที่ 0.5, 1.0 และ 1.5 MPa ตามลำดับ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ภายใต้ค่า Confining Pressure ที่มีค่าแตกต่างกัน

ตารางที่ 1 แสดงค่าพารามิเตอร์ความแข็งแรงของดินเหนียวตามเงื่อนไขของ Mohr-Coulomb failure criteria แสดงให้

เห็นว่า ค่าความเชื่อมแน่น ( $c'$ ) มีค่าเท่ากับ 1.2 MPa และค่ามุมเสียดทาน ( $\phi'$ ) เท่ากับ 30.96°

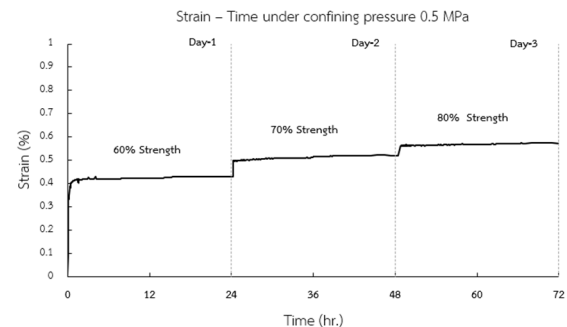
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ความแข็งแรงของดินเหนียวตามเงื่อนไขของ Mohr-Coulomb failure criteria

Parameters	Value
Unsaturated unit weight, $\gamma_{unsat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	20.4
Saturated unit weight, $\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	25.3
Elastic modulus, $E$ (kN/m <sup>2</sup> )	309,572
Poisson's ratio, $\nu$	0.15
Cohesion, $c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	1,200
Friction angle, $\phi'$ (°)	30.96

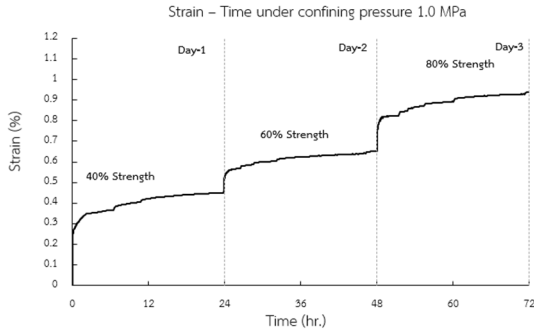
#### 3.2. การทดสอบการคืบของดินเหนียว (TRIAXIAL CREEP TEST)

การทดสอบการคืบของดินเหนียว ได้ทำการปรับปรุงเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนหรือ เรียกว่า "Triaxial Creep Test" ซึ่งยังไม่มีมาตรฐานการทดสอบ โดยการทดสอบนี้ได้อ้างอิงจากการทดสอบของนักวิจัยต่างประเทศและนำมาปรับปรุงให้เข้ากับดินเหนียวของเหมืองแม่เมาะ การทดสอบได้นำเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนแบบ Unconsolidated Undrain Triaxial Test ที่ใช้ในการทดสอบ Triaxial มาให้ความเค้นเบี่ยงเบนแบบ Multi-Stage Load ในแต่ละระดับให้ความเค้นคงที่ค้างไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และให้แรงดันด้านข้างคงที่ที่ 0.5 MPa, 1.0 MPa และ 1.5 MPa โดยการทดสอบได้อ้างอิงมาจาก [6]

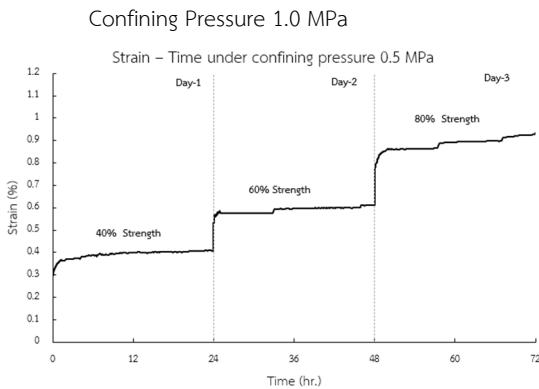
จากรูปที่ 5-7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลา ซึ่งใช้ในการอธิบายถึงพฤติกรรมการคืบ จะสังเกตเห็นว่าที่ระดับแรงดันด้านข้างที่มากขึ้น มีแนวโน้มที่จะทำให้ความเครียดในแต่ละระดับความเค้นมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Strain - Time ภายใต้ Confining Pressure 0.5 MPa



รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Strain - Time ภายใต้



รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Strain - Time ภายใต้  
Confining Pressure 1.5 MPa

### 3.3. การเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองการคืบ

จากรูปที่ 5-7 แสดงให้เห็นถึงเส้นโค้งการคืบของหินดินเหนียวเพียง 2 ช่วงคือ transient creep stage และ steady creep stage ภายใต้ความเค้นเบี่ยงเบนคงที่ในแต่ละระดับแรงทดสอบ โดยในช่วงแรกของการคืบอัตราการคืบจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แล้วจึงค่อยๆ ลดลงจนคงที่ในที่สุด ดังนั้นการเลือกแบบจำลองการคืบจึงมีความสำคัญและต้องสอดคล้องกัน ซึ่งการคืบของหินดินเหนียวแม้จะเป็นพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลา ทำให้มีลักษณะคล้ายกับวัสดุวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic material) โดยจะแสดงพฤติกรรมทั้งความยืดหยุ่นและความหนืดร่วมกัน แบบจำลองการคืบจึงสามารถจำลองได้จากแบบจำลองสปริงเชิงเส้น (ความยืดหยุ่น) กับแบบจำลองตัวหน่วง(ความหนืด) หรือที่รู้จักกันในชื่อแบบจำลองเชิงกล [8]

#### 3.3.1. MAXWELL MODEL

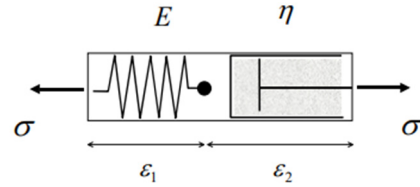
แบบจำลอง Maxwell ประกอบไปด้วยสปริงและตัวหน่วงนำมาต่อกันแบบอนุกรม จึงสามารถเขียนได้ว่าความเครียดรวมที่เกิดขึ้นจะมาจากสองส่วนรวมกัน คือความเครียดของสปริงรวมกับความเครียดของตัวหน่วง โดยที่ความเค้นที่กระทำของทั้งสองส่วนประกอบจะมีค่าเท่ากันดังรูปที่ 8

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E}, \varepsilon_2 = \frac{\sigma}{\eta}, \varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (1)$$

$$\sigma + \frac{\eta}{E} \dot{\sigma} = \eta \dot{\varepsilon} \quad (2)$$

นำสมการที่ (1),(2) มาเขียนในรูปของเวลาโดยวิธี Laplace transforms ได้ดังนี้

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left( \frac{t}{\eta} + \frac{1}{E} \right) \quad (3)$$



รูปที่ 8 แบบจำลอง Maxwell

#### 3.3.2. KELVIN MODEL

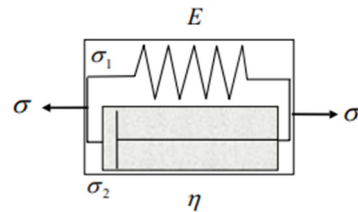
แบบจำลอง Kelvin ประกอบไปด้วยสปริงและตัวหน่วงนำมาต่อกันแบบขนาน จึงสามารถเขียนได้ว่าความเค้นรวมที่เกิดขึ้นจะมาจากสองส่วนรวมกัน คือความเค้นของสปริงรวมกับความเค้นของตัวหน่วง โดยที่ความเครียดที่เกิดขึ้นของทั้งสองส่วนประกอบจะมีค่าเท่ากันดังรูปที่ 9

$$\varepsilon = \frac{\sigma_1}{E}, \dot{\varepsilon} = \frac{\sigma_2}{\eta}, \sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (4)$$

$$\sigma = E\varepsilon + \eta\dot{\varepsilon} \quad (5)$$

นำสมการที่ (4),(5) มาเขียนในรูปของเวลาโดยวิธี Laplace transforms ได้ดังนี้

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E} \left( 1 - e^{-\frac{E}{\eta}t} \right) \quad (6)$$



รูปที่ 9 แบบจำลอง Kelvin

#### 3.3.3. BURGERS MODEL

แบบจำลอง Burgers ประกอบไปด้วยแบบจำลอง Maxwell และแบบจำลอง Kelvin โดยนำมาต่อกันแบบอนุกรม จึงสามารถเขียนได้ว่าความเครียดรวมที่เกิดขึ้นจะมาจากสองส่วนรวมกัน คือความเครียดของแบบจำลอง Maxwell รวมกับความเครียดของแบบจำลอง Kelvin โดยที่ความเครียดที่เกิดขึ้นของทั้งสองแบบจำลองจะมีค่าเท่ากันดังรูปที่ 10

$$\sigma_M = E_M \varepsilon_M = \eta_M \dot{\varepsilon}_M \quad (7)$$

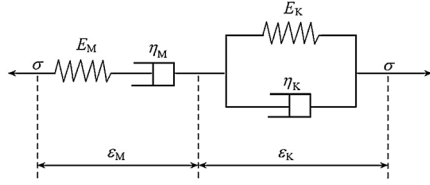
$$\sigma_K = E_K \varepsilon_K + \eta_K \dot{\varepsilon}_K \quad (8)$$

$$\sigma = \sigma_M = \sigma_K \quad (9)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_M + \varepsilon_K \quad (10)$$

นำสมการที่ (7)-(10) มาเขียนในรูปของเวลาโดยวิธี Laplace transforms ได้ดังนี้

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_M} + \frac{\sigma}{\eta_M} t + \frac{\sigma}{E_K} \left(1 - e^{-\frac{E_K}{\eta_K} t}\right) \quad (11)$$



รูปที่ 10 แบบจำลอง Burgers

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์การคืบของแบบจำลอง Maxwell ภายใต้แรงดันด้านข้างที่ต่างกัน

Confining pressure (MPa)	Deviator stress (MPa)	Maxwell model parameters		R <sup>2</sup>
		$E_M$ (MPa)	$\eta_M$ (MPa·h)	
0.5	3.25	8.10	1726.81	0.974
	3.75	8.01	2974.60	
	4.25	7.93	7724.36	
1	2.56	8.39	333.70	0.993
	3.58	7.95	797.79	
	4.81	9.59	752.81	
1.5	2.93	8.33	950.94	0.995
	4.36	8.29	2461.95	
	5.77	9.32	1313.60	
			avg. R <sup>2</sup>	0.987

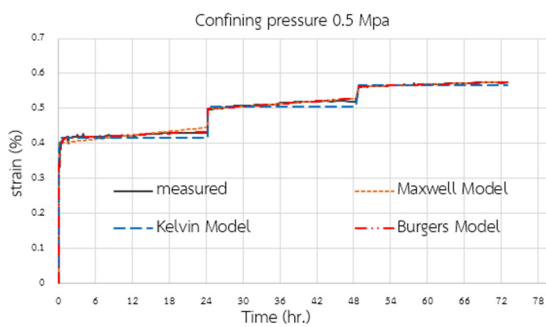
ตารางที่ 3 พารามิเตอร์การคืบของแบบจำลอง Kelvin ภายใต้แรงดันด้านข้างที่ต่างกัน

Confining pressure (MPa)	Deviator stress (MPa)	Kelvin model parameters		R <sup>2</sup>
		$E_K$ (MPa)	$\eta_K$ (MPa·h)	
0.5	3.25	7.82	0.39	0.973
	3.75	7.41	0.48	
	4.25	7.51	0.42	
1	2.56	6.61	2.07	0.947
	3.58	6.05	0.40	
	4.81	5.61	0.55	
1.5	2.93	7.76	0.33	0.981
	4.36	7.49	0.44	
	5.77	6.68	0.20	
			avg. R <sup>2</sup>	0.967

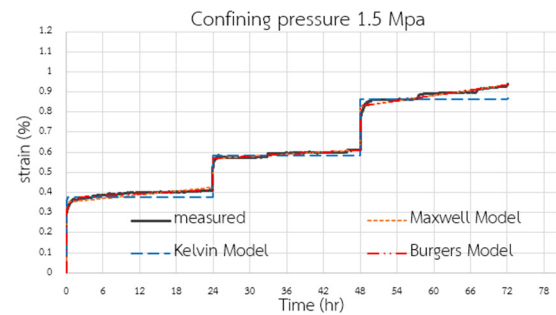
จากแบบจำลองการคืบที่กล่าวมาข้างต้น ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแต่ละแบบจำลองที่ค่าความเค้นเบี่ยงเบนต่างๆ เราใช้วิธีการถดถอยไม่เชิงเส้นในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแบบจำลอง Maxwell, Kelvin และ Burgers แสดงดังตารางที่ 2-4 และผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบกับแบบจำลองการคืบแสดงในรูปที่ 11-13

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์การคืบของแบบจำลอง Burgers ภายใต้แรงดันด้านข้างที่ต่างกัน

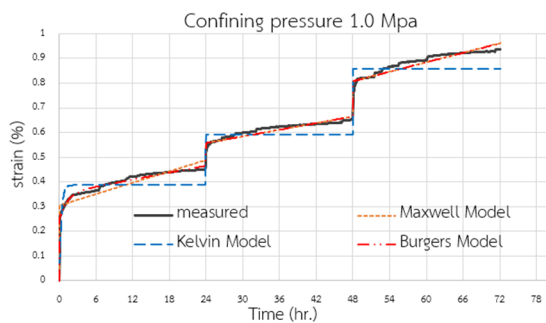
Burgers model parameters						
Confining pressure (MPa)	Deviator stress (MPa)	$E_M$ (MPa)	$E_K$ (MPa)	$\eta_M$ (MPa·h)	$\eta_K$ (MPa·h)	$R^2$
0.5	3.25	11.46	24.53	4562.62	5.82	0.998
	3.75	8.73	97.33	2975.53	3.77	
	4.25	9.57	46.29	7725.23	3.71	
1	4.75	10.26	24.67	545.86	32.00	0.997
	5.25	8.64	100.80	797.78	135.00	
	5.75	10.40	122.66	752.79	26.00	
1.5	6.25	9.86	37.62	1791.53	25.47	0.997
	6.75	9.26	79.21	2461.82	31.07	
	7.25	10.56	79.27	1313.57	28.73	
avg. $R^2$						0.997



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบกันระหว่างผลการทำนายของแบบจำลองการคืบกับผลการทดสอบ ที่แรงดันด้านข้าง 0.5 MPa



รูปที่ 13 การเปรียบเทียบกันระหว่างผลการทำนายของแบบจำลองการคืบกับผลการทดสอบ ที่แรงดันด้านข้าง 1.5 MPa



รูปที่ 12 การเปรียบเทียบกันระหว่างผลการทำนายของแบบจำลองการคืบกับผลการทดสอบ ที่แรงดันด้านข้าง 1.0 MPa

เส้นโค้งของการคืบที่ได้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองการคืบทั้ง 3 แบบจำลอง สามารถนำมาใช้ในการอธิบายพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลาของหินดินเหนียวแม่เมาะ ในช่วงการคืบชั่วคราวและช่วงการคืบคงที่ได้ ซึ่งแต่ละแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือ  $R^2$  ที่แตกต่างกัน โดยแบบจำลอง Burgers มีความน่าเชื่อถือมากที่สุดที่  $R^2=0.997$

#### 4. บทสรุป

เหมืองถ่านหินแม่เมาะเป็นเหมืองเปิดขนาดใหญ่ที่สุดในประเทศไทย ที่มีส่วนประกอบหลักเป็นหินดินเหนียว ปัจจุบันยังคงดำเนินการอย่างต่อเนื่องและมีแผนที่จะขุดเปิดเหมืองลึกลงไปกว่า 300 เมตรในอนาคต ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสถานะความเค้นของลาดเหมือง

อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ จากการศึกษาพฤติกรรมมารคิบบของหินดินเหนียวพบว่า

1. พฤติกรรมมารคิบบของหินดินเหนียวแม่เมาะ ศึกษาได้จากการทดสอบแรงกดสามแกนเพื่อหาค่ากำลังอัดสูงสุดภายใต้แรงดันด้านข้างที่ 0.5, 1.0 และ 1.5 MPa และการทดสอบมารคิบบของหินดินเหนียวแบบ Triaxial Creep Test (multi-stage) โดยการให้ความเค้นคงที่ค้างไว้ และเพิ่มขึ้นเมื่อครบ 24 ชั่วโมง พบว่ามีความเครียดเกิดขึ้นเล็กน้อยและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ

2. อัตราความเครียดของการคืบมีค่าแตกต่างกันไปตามค่าความเค้นต่างๆ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในตอนแรกแล้วคงที่จนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ที่ระดับความเค้นต่ำ อย่างไรก็ตามอัตราความเครียดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นเบี่ยงเบนเพิ่มขึ้น

3. จากผลการทดสอบที่ได้พบว่าแบบจำลองการคืบทั้ง 3 แบบจำลอง สามารถนำมาใช้ในการทำนายการเสียรูปของหินดินเหนียวที่มีอิทธิพลจากเวลาได้ โดยแบบจำลอง Burgers สามารถจำลองพฤติกรรมมารคิบบที่เกิดขึ้นได้เหมาะสมที่สุด

## 5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำในด้านวิชาการ ด้านการดำเนินงานวิจัย และให้การสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการทำวิจัยให้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดีมา ณ โอกาสนี้

## 6. การอ้างอิง

[1] ASTM D2664-95a. Standard Test Method for Triaxial Compressive Strength of Undrained 474 Rock Core Specimens Without Pore Pressure Measurements. West Conshohocken, 475 PA: ASTM International, 1995

[2] Betten J. Creep mechanics. 2nd ed. Springer Science & Business Media, 2008

[3] Bishop, A.W., (1966), The Strength of Soils as Engineering Materials, Geotechnique, Vol. 16, pp. 91-130.

[4] Ömer Aydan (2017) . Time-Dependency in Rock Mechanics and Rock Engineering. Department of Civil Engineering and Architecture, University of the Ryukyus, Nishihara, Okinawa, Japan, 5-83.

[5] Yongsheng Li\*, C. X. (1999). Time-dependent tests on intact rocks in uniaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 37 (2000) 467±475.

[6] Zhang Y, Xu W Y, Shao J F, Zhao H B, Wang W. Experimental investigation of creep 490 behavior of clastic rock in Xiangjiaba Hydropower Project. *Water Science and Engineering*, 2015, 8(1), 55-62. doi: 10.1016/j.wse.2015.01.005

[7] Zhang, Z. L., Xu, W. Y., Wang, W., & Wang, R. B. (2012). Triaxial creep tests of rock from the compressive zone of dam foundation in Xiangjiaba Hydropower Station. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 50, 133-139. doi:10.1016/j.ijrmms.2012.01.003

[8] สุขชูรุ ลิขิตเลอสรวง.(2553). ปฐพีกลศาสตร์ พลาสติกซิตี และทฤษฎีสถานะวิกฤต.สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย, 75-82.