



## การเปลี่ยนรูปของหินอ่อนเนื่องจากความแตกต่างตามชนิดของเหลวที่ถูกอัดฉีดสำหรับเทคโนโลยีในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

อวิรุทธิ์ พุฒิวงศ์รัักษ์\*

บัณฑิตวิทยาลัยสหวิทยาการวิทยาศาสตร์ระบบโลกและการจัดการภัยธรรมชาติอันดามัน มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตภูเก็ต

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-7627-6437 อีเมล: avirut.p@phuket.psu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2017.06.003

รับเมื่อ 20 มิถุนายน 2559 ตอรับเมื่อ 18 สิงหาคม 2559 เผยแพร่ออนไลน์ 14 มิถุนายน 2560

© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศมีอัตราสูงขึ้นและเป็นผลทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน ดังนั้นการอัดฉีดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อกักเก็บลงสู่แหล่งกักเก็บที่เหมาะสมใต้ดินเป็นหนึ่งในกระบวนการในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศ การยกตัวสูงขึ้นของผิวดินอันเนื่องมาจากการขยายตัวของชั้นหินจากการอัดฉีดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงสู่ชั้นใต้ดินจึงต้องมีการคำนึงถึง วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาและจำลองแบบการเปลี่ยนรูปของชั้นหินอันเนื่องมาจากการอัดฉีดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงสู่ชั้นหินซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของคุณสมบัติของของเหลว โดยการจำลองการเปลี่ยนรูปของหินจากการอัดฉีดของเหลวเข้าสู่ชั้นหินซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญสำหรับการกักเก็บและลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อลดสภาวะโลกร้อนด้วยการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการใช้แบบจำลองทางธรณีกลศาสตร์ ผลวิจัยพบว่าค่าคุณสมบัติที่แตกต่างกันของของเหลวที่อัดฉีดเข้าสู่แท่งทดสอบส่งผลถึงค่าการเปลี่ยนรูปของหินที่ต่างกัน ของเหลวที่มีคุณสมบัติเคลื่อนที่และแทรกซึมได้ดีจะทำให้หินเปลี่ยนรูปได้มากกว่า ดังนั้นค่าความดันของไหลที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเปลี่ยนรูปของหินไม่ควรเป็นปัจจัยหลักเพียงปัจจัยเดียวสำหรับการคำนวณการเปลี่ยนรูปของหิน ค่าคุณสมบัติของของเหลวที่อัดฉีดเข้าสู่ชั้นหินเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่จะต้องคำนึงถึงสำหรับการศึกษาการเปลี่ยนรูปของหิน

**คำสำคัญ:** การเปลี่ยนรูปของหิน, การอัดฉีดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, แบบจำลองธรณีกลศาสตร์, ความดันของไหลในชั้นหิน

การอ้างอิงบทความ: อวิรุทธิ์ พุฒิวงศ์รัักษ์, “การเปลี่ยนรูปของหินอันเนื่องจากความแตกต่างตามชนิดของเหลวที่ถูกอัดฉีดสำหรับเทคโนโลยีในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 27, ฉบับที่ 3, หน้า 481-491, ก.ค.-ก.ย. 2560

## Rock Deformation Caused by Different Fluid Injection for CO<sub>2</sub> Sequestration Technique

Avirut Puttiwongrak\*

The Interdisciplinary Graduate School of Earth System Science and Andaman Natural Disaster Management, Prince of Songkla University Phuket Campus, Phuket, Thailand

\* Corresponding Author, Tel. 0-7627-6437, E-mail: avirut.p@phuket.psu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2017.06.003

Received 20 June 2016; Accepted 18 August 2016; Published online: 14 June 2017

© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

The increase of CO<sub>2</sub> emission in the atmosphere has a consequence on the global warming. CCS (Carbon dioxide Capture and Storage) is an effective tool to mitigate CO<sub>2</sub> emission, but surface uplifting due to reservoir expansion is a problem caused by CSS project that needs to be concerned. This research aims to study and show a significant property of the fluids that are injected into suitable reservoirs in order to mitigate global warming problems. The laboratory tests and the geomechanical model are simulated rock deformations caused by CO<sub>2</sub> injection for CCS projects. The results show that the different fluid properties produce the different rock deformations. The fluids with high mobility and penetration resulted in better rock deformation. Consequently, the pore pressure is not a single related factor for the calculation of the rock deformations. The property of injected fluid also plays an important role for the rock deformation and should be paid more attention.

**Keywords:** Rock Deformation, CO<sub>2</sub> Injection, Geomechanical Simulation, Pore Pressure

## 1. บทนำ

สถาบันอุตสาหกรรมพลังงานทดแทนของประเทศไทยมีนโยบายการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกที่ทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน [1]–[4] ได้เพิ่มขึ้นสูงสุดเป็นสถิติใหม่ในปี พ.ศ. 2554 ที่ 34 ล้านตัน ดังนั้นการใช้เทคโนโลยีในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CCS or CO<sub>2</sub> Capture and Storage) ถูกพัฒนาและนำมาใช้อย่างกว้างขวางเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การอัดฉีดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อกักเก็บลงสู่แหล่งกักเก็บที่เหมาะสมใต้ดินเป็นหนึ่งในกระบวนการที่สำคัญของเทคโนโลยีในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศและเป็นการแก้ปัญหาสภาวะโลกร้อนที่มีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามการอัดฉีดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงสู่ชั้นหินใต้ดินเพื่อกักเก็บจะทำให้ค่าความดันของไหลในชั้นหินเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ค่าความเค้นสนามเปลี่ยนแปลง และเกิดการขยายตัวของหินนำมาซึ่งปัญหาการยกตัวของผิวดินซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งก่อสร้างที่ผิวดินและการรั่วซึมของชั้นหินปิดผนึก (Trapping or Sealing Rock Leakages)

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาและจำลองแบบการเปลี่ยนรูปของหินอันเนื่องมาจากการอัดฉีดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงสู่ชั้นหินใต้ดินเพื่อกักเก็บ โดยใช้การทดลองในห้องทดลองและแบบจำลองทางธรณีกลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงความเครียดของแท่งหินทดสอบในห้องปฏิบัติการเป็นการจำลองการเปลี่ยนรูปของหินสำหรับปัญหาการยกตัวของผิวดินเนื่องมาจากการอัดฉีดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนแบบจำลองทางธรณีกลศาสตร์ถูกใช้เพื่อการอธิบายและวิเคราะห์ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความพุนประสิทธิภาพและบัลคโมดูลัสของหินที่ถูกเสนอโดยรัสเซลและสมิท [5] รวมไปถึงสมการของกัมมันท์ [6], [7] สำหรับแบบจำลองทางธรณีกลศาสตร์เพื่ออธิบายและวิเคราะห์ผลลัพธ์จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะช่วยให้สามารถทำความเข้าใจการเปลี่ยนรูปของหินอันเนื่องมาจากการอัดฉีดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อกักเก็บในชั้นหินใต้ดิน

สำหรับลดปัญหาสภาวะโลกร้อนได้ดียิ่งขึ้น

## 2. วิธีดำเนินงานวิจัย

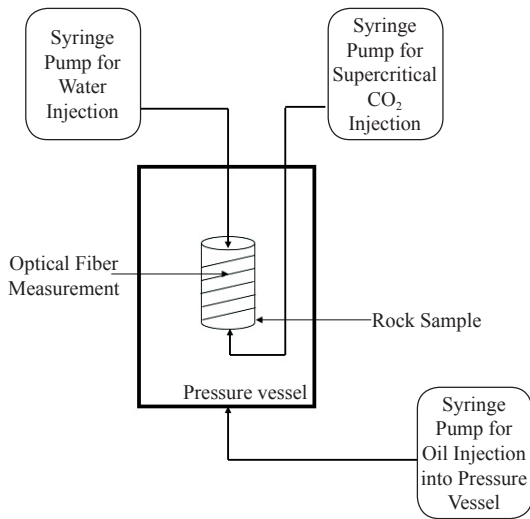
### 2.1 การวัดค่าความเครียดจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบในห้องปฏิบัติการถูกสร้างขึ้นเพื่อจำลองปัญหาการยกตัวของผิวดินอันเนื่องมาจากการใช้เทคโนโลยีการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในพื้นที่จริง โดยสังเกตการเคลื่อนตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังจากถูกอัดฉีดในแท่งทดสอบจากการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความเครียดของแท่งทดสอบ ด้วยการใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ [8], [9] ติดเข้ากับแท่งหินทดสอบ โดยหินทรายเบรียซึ่งเป็นหินเอกพันธ์ (Homogeneous) และมีคุณสมบัติสม่ำเสมอในทุกทิศทาง (Isotropic) ถูกนำมาทดสอบเพื่อเป็นตัวแทนของชั้นหินกักเก็บในอุดมคติ (Ideal Rock Sample) นอกจากนี้น้ำหนักแรงดันอุทกสถิต (Hydrostatic Loading) ถูกใช้เป็นแรงดันจำลองภายนอกที่กระทำต่อแท่งทดสอบและเพื่อป้องกันการเปลี่ยนรูปของหินจากผลกระทบของความร้อนในการทดลองครั้งนี้ อุณหภูมิในการทดสอบถูกรักษาให้คงที่ที่ 40 องศาเซลเซียสตลอดการทดสอบ

การทดสอบในห้องปฏิบัติการถูกแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้ 1) ช่วงการเปลี่ยนแปลงความดันปิดล้อม (Confining Pressure Changes) 2) ช่วงการอัดฉีดน้ำเข้าแท่งทดสอบหรือช่วงเปลี่ยนแปลงความดันของไหล (Water Injection or Pore Pressure Changes) 3) ช่วงการอัดฉีดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่แท่งทดสอบ (CO<sub>2</sub> Injection)

#### 2.1.1 การทดสอบช่วงการเปลี่ยนแปลงความดันปิดล้อม (Confining Pressure)

การทดสอบการเปลี่ยนแปลงความดันปิดล้อมเป็นการทดสอบขั้นตอนแรก โดยที่แรงดันปิดล้อมจะถูกประยุกต์เข้าสู่แท่งทดสอบด้วยสภาวะแรงดันอุทกสถิตจากน้ำมันที่ถูกอัดฉีดจากปั๊มกระบอกฉีด (Syringe Pump) เข้าสู่ถังความดัน (Pressure Vessel) เพื่อทำหน้าที่ควบคุมและเปลี่ยนแปลงความดันปิดล้อม (รูปที่ 1) แท่ง



รูปที่ 1 แบบแผนโครงสร้างการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ทดสอบจะถูกป้องกันการซึมผ่านของน้ำมันโดยการห่อหุ้มด้วยยางซิลิโคนและถูกทำให้อยู่ในสภาวะแห้ง (Dry Condition) ค่าความดันของไหลมีค่าเท่ากับค่าความดันอากาศ (มีค่าเท่ากับศูนย์) แรงดันปิดล้อมจะกระทำต่อแท่งทดสอบที่ค่าเริ่มต้นที่ 2 เมกะปาสคาล และทำการวัดค่าความเครียดที่เปลี่ยนไปตามตำแหน่งที่กำหนด หลังจากนั้นค่าแรงดันปิดล้อมจะเพิ่มขึ้นเป็น 4, 6, 8, 10 และ 12 เมกะปาสคาล ตามลำดับ โดยที่ค่าความเครียดในตำแหน่งต่างๆ จะถูกวัดทุกๆ ค่าแรงดันปิดล้อมที่เพิ่มขึ้น

2.1.2 การทดสอบช่วงการอัดฉีดน้ำเข้าแท่งทดสอบหรือช่วงเปลี่ยนแปลงความดันของไหล

หลังจากความดันปิดล้อมสิ้นสุดการทดสอบที่ 12 เมกะปาสคาล ความดันปิดล้อมจะถูกกำหนดให้คงที่และเริ่มการอัดฉีดน้ำเข้าสู่แท่งทดสอบเพื่อเป็นการเพิ่มแรงดันของไหลในแท่งทดสอบ โดยที่ค่าแรงดันที่อัดฉีดน้ำเข้าสู่แท่งทดสอบจะมีค่าเท่ากับค่าความดันของไหลในแท่งทดสอบ ค่าแรงดันน้ำเริ่มต้นจะถูกกำหนดไว้ที่ 2 เมกะปาสคาล และทำการวัดค่าความเครียดที่เปลี่ยนไปตามตำแหน่งที่กำหนด จากนั้นค่าแรงดันน้ำจะเพิ่มขึ้นจาก 2 เมกะปาสคาล ไปเป็น 4, 6, 8 และ 10 เมกะปาสคาล

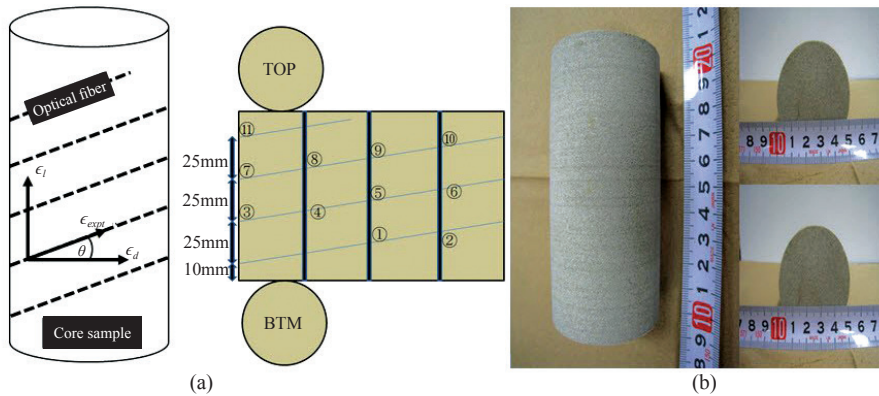
ตามลำดับ และทำการวัดค่าความเครียดที่เปลี่ยนไปในทุกๆ ค่าแรงดันน้ำที่เพิ่มขึ้น ในระหว่างการทดสอบประตูทางน้ำออกได้ถูกปิดตาย ดังนั้นแท่งทดสอบจะถือว่าอิมมัลด้วยน้ำในทุกการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันน้ำ

2.1.3 การทดสอบช่วงการอัดฉีดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่แท่งทดสอบ (CO<sub>2</sub> Injection)

หลังจากสิ้นสุดการทดสอบในช่วงการเปลี่ยนแปลงความดันปิดล้อมและช่วงการอัดฉีดน้ำเข้าสู่แท่งทดสอบโดยที่ค่าแรงดันปิดล้อมถูกกำหนดอยู่ที่ 12 เมกะปาสคาล และค่าแรงดันของไหลในแท่งทดสอบอยู่ที่ 10 เมกะปาสคาล ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะวิกฤตยิ่งยวด (Supercritical CO<sub>2</sub>) จะถูกอัดฉีดเข้าสู่แท่งทดสอบด้วยแรงอัดที่ 10.05 เมกะปาสคาล น้ำที่อิมมัลอยู่ก่อนในแท่งทดสอบจะถูกแทนที่ด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะวิกฤตยิ่งยวด และถูกขับออกจากแท่งทดสอบที่ประตูน้ำด้านบนของแท่งทดสอบ หนึ่งค่าความเครียดของแท่งทดสอบที่เปลี่ยนแปลงไปตามแต่ละช่วงการทดสอบจะถูกวัดในแต่ละตำแหน่งตามรูปที่ 2(a)

## 2.2 การวัดค่าความเครียดจากการใช้แบบจำลองทางธรณีกลศาสตร์

ในการวิจัยนี้ใช้โปรแกรม FLAC3D เวอร์ชัน 3.10 เป็นเครื่องมือในการสร้างแบบจำลองทางธรณีกลศาสตร์สำหรับจำลองเหตุการณ์การเปลี่ยนรูปของแท่งทดสอบที่ได้ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการทั้ง 3 ช่วงการทดสอบ แบบจำลองถูกสร้างบนพื้นฐานการคำนวณควบคู่ไปกับแบบจำลองทางกลศาสตร์และกลศาสตร์ของไหล ความเครียดที่เปลี่ยนไปของวัตถุจะถูกคำนวณผ่านค่าความเค้นของแท่งทดสอบที่เปลี่ยนไปอันเนื่องมาจากค่าแรงดันปิดล้อมและค่าแรงดันของไหลที่เปลี่ยนแปลงจากความไม่สัมพันธ์กันระหว่างค่าความเค้นและค่าการซึมได้ของหินทรายและเนื่องจากผลกระทบจากค่าแรงโน้มถ่วงของโลกไม่ส่งผลกระทบใดๆ ในการทดสอบ [10] ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของค่าการซึมผ่านได้ของหินและค่าแรงโน้มถ่วงของโลกจึงไม่จำเป็นต้องคำนึงถึง

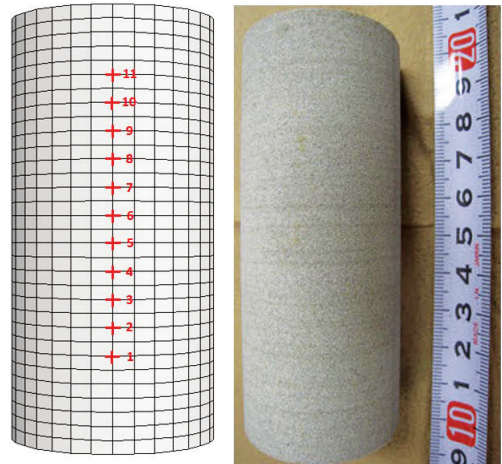


**รูปที่ 2** การวัดค่าความเครียดและขนาดของแท่งทดสอบ (a) ตำแหน่งการวัดค่าความเครียดของแท่งทดสอบ (b) ขนาดของแท่งทดสอบ

**ตารางที่ 1** ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้สำหรับแบบจำลองทางธรณีกลศาสตร์

ตัวแปร	ตัวเลข
<b>หินเบรีย</b>	
โมดูลัสของหินสภาวะแห้ง ( $K_{ds}$ , GPa)	8.3
โมดูลัสเฉือน ( $G$ , GPa)	7.0
ความหนาแน่น ( $\rho$ , kg/m <sup>3</sup> )	2100
ความซึมผ่านได้ ( $K$ , mD)	100
ความพรุน ( $\phi$ , %)	23
สัมประสิทธิ์ความแข็งแกร่งของช่องว่างในหิน ( $k$ )	0.05
ความแข็งแกร่งของช่องว่างในหิน ( $K_p$ , GPa)	1.8
<b>ของเหลว</b>	
โมดูลัสของน้ำ ( $K_w$ , GPa)	1.00
โมดูลัสของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะวิกฤตยิ่งยวด ( $K_{CO_2}$ , GPa)	0.05

แบบจำลองรูปทรงเรขาคณิตของแท่งทดสอบได้ถูกสร้างขึ้นให้สอดคล้องกับแท่งทดสอบที่ใช้จริงในห้องปฏิบัติการ ขนาดของแท่งทดสอบเป็นทรงกระบอกที่มีขนาดความยาว 10 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร [ตามรูปที่ 2(b)] แบบจำลองของแท่งทดสอบถูกแบ่งเป็นช่องตาข่ายเพื่อใช้ในการคำนวณ ในแกน x, y



**รูปที่ 3** แบบจำลองรูปทรงเรขาคณิตสำหรับใช้ในแบบจำลองทางธรณีกลศาสตร์เปรียบเทียบกับแท่งทดสอบในห้องปฏิบัติการ

และ z ที่ขนาด ดังแสดงในรูปที่ 3 คุณสมบัติของหินทรายเบรียแสดงในตารางที่ 1 ค่าความเครียดเชิงปริมาตร ( $\epsilon_v$ ) ที่ได้จากผลลัพธ์จากการคำนวณด้วยแบบจำลองทางธรณีกลศาสตร์จะถูกนำมาแปลงเป็นค่าความเครียดเชิงเส้นเพื่อใช้เปรียบเทียบกับค่าความเครียดที่เป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบ สมการที่ใช้ในการแปลงค่าความเครียดเชิงปริมาตรให้เป็นค่าความเครียดที่ได้จากการทดสอบ ( $\epsilon_{expl}$ ) เป็นไปตามสมการ

$$\epsilon_v = 2\epsilon_d + \epsilon_t$$

$$\epsilon_{\text{expt.}} = \frac{\epsilon_v}{(2 \cos \theta + \sin \theta)}$$

โดย  $\epsilon_d$  และ  $\epsilon_t$  คือค่าความเครียดตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง และความเครียดตามแนวยาว ตามลำดับ

การใช้แบบจำลองทางธรณีกลศาสตร์จำลองการทดสอบในห้องปฏิบัติการในช่วงของการเปลี่ยนแปลงความดันปิดล้อมที่ยังไม่มีการบรรจุของเหลวในแง่ทดสอบ ดังนั้นการคำนวณด้วยแบบจำลองจึงถูกคำนวณจากกระบวนการทางกลศาสตร์แต่เพียงอย่างเดียว โดยไม่ได้รับผลกระทบจากแรงดันของของเหลวในแง่ทดสอบ การเปลี่ยนรูปของหินหรือการเปลี่ยนแปลงค่าความเครียด ( $\epsilon$ ) เกิดจากความดันปิดล้อม ( $P_c$ ) และค่าบัลค์โมดูลัสในสถานะแห้ง ( $K_d$ ) เท่านั้น โดยสมการในการคำนวณมีดังนี้

$$\epsilon = \frac{P_c}{K_d}$$

การคำนวณค่าความเครียดด้วยโปรแกรม FLAC3D จะถูกคำนวณจากค่าความเร็วในแต่ละจุดเชื่อมของช่องตาข่าย โดยอัตราค่าความเครียดของแต่ละช่อง ( $\dot{\epsilon}_{ij}$ ) เป็นส่วนหนึ่งของค่าความเครียดเบี่ยงเบน ( $\dot{\epsilon}'_{ij}$ ) กับค่าความเครียดเชิงปริมาตร ( $\dot{\epsilon}_v$ ) ดังสมการ

$$\dot{\epsilon}'_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij} + \dot{\epsilon}_v \delta_{ij}$$

โดยที่  $\delta_{ij}$  คือค่าเดลตาไครเนกเกอร์ (Kronecker Delta)

ค่าความเครียดเชิงปริมาตรในแต่ละจุดเชื่อม ( $\dot{\epsilon}_{v,n}$ ) ที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองถูกคำนวณตามสมการ

$$\dot{\epsilon}_{v,n} = \frac{\sum_{e=1}^{m_n} \dot{\epsilon}_{v,e} V_e}{\sum_{e=1}^{m_n} V_e}$$

โดยที่  $m_n$  คือส่วนประกอบโดยรอบจุดเชื่อมที่  $n$  และ  $V_e$  คือปริมาตรของส่วนประกอบ

การจำลองการทดสอบช่วงการอัดฉีดน้ำเข้าสู่ทางทดสอบคำนวณโดยใช้กระบวนการทางกลศาสตร์ควบคุมไปกับกระบวนการทางกลศาสตร์ของไหล ด้วยโปรแกรม FLAC3D ดังสมการ

$$\frac{1}{M} \frac{\partial P_p}{\partial t} + \frac{\phi}{S} \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{1}{S} \frac{\partial \xi}{\partial t} - \alpha \frac{\partial \epsilon_v}{\partial t}$$

โดยที่  $M$  คือค่าโมดูลัสของบีโอท์

$\phi$  คือค่าความพรุนของหิน

$\alpha$  คือค่าสัมประสิทธิ์บีโอท์

$\xi$  คือค่าความแปรปรวนของชนิดของเหลว

$\partial P_p$  คือค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันของของเหลวในหิน

$\partial S$  คือค่าการเปลี่ยนแปลงความอิ่มตัวของของเหลวในหิน

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่าค่าของความเครียดของแง่ทดสอบจะแปรเปลี่ยนไปตามตัวแปรคือค่าโมดูลัสของบีโอท์ ค่าความพรุนของหิน ค่าสัมประสิทธิ์บีโอท์ ค่าความแปรปรวนของชนิดของเหลว ค่าความดันของของเหลว และค่าความอิ่มตัวของของเหลว โดยค่าสัมประสิทธิ์บีโอท์จะมีค่าเท่ากับ 1 ในหินตะกอนหยาบ (ยกตัวอย่างเช่นหินทราย) ตลอดการเปลี่ยนแปลงของค่าความเค้นประสิทธิผล [11]

สมการดังกล่าวถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางธรณีกลศาสตร์เพื่อจำลองค่าการเปลี่ยนรูปของหินในการวิจัยนี้โดยเปลี่ยนค่าคุณสมบัติของน้ำเป็นค่าคุณสมบัติของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสถานะวิกฤตยิ่งยวด

### 2.2.1 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าบัลค์โมดูลัส

ในสถานะแห้งและค่าความพรุนประสิทธิผลของหิน

ค่าบัลค์โมดูลัสของหินนอกจากจะขึ้นอยู่กับค่าบัลค์โมดูลัสของแร่ในหิน หรือ  $K_m$  (แร่ส่วนใหญ่ของหินทรายคือแร่ควอตซ์ หรือ Quartz) แล้ว ยังขึ้นอยู่กับค่าสภาพการอัดตัวได้ของช่องว่างในหิน (Pore Space Compressibility) ด้วยเช่นกัน กล่าวคือค่าความเค้นประสิทธิผลของหินมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้หินเกิดการหดตัว มวลของหินเคลื่อนที่เข้าหากันทำให้ช่องว่างลดลง ในทางตรงกันข้ามเมื่อค่าความเค้นประสิทธิผลลดลง ช่องว่างในหินคืนตัวและขยายตัวเปิดกว้างขึ้น (จากแรงดันของไหลที่เพิ่มขึ้น) [12]

สภาพการอัดตัวได้ของช่องว่างในหินสำหรับการใช้หาค่าบัลคโมดูลัสในสภาวะแห้งและค่าความพรุนประสิทธิผลของหินคือวิธีการความแข็งแกร่งของช่องว่างในหิน (Pore Space Stiffness Approach) ให้ผลลัพท์ (ค่าบัลคโมดูลัสในสภาวะแห้งและค่าความพรุนประสิทธิผลของหิน) สอดคล้องกับข้อมูลที่เก็บตัวอย่างจากหินทรายจากหลายพื้นที่ [5]

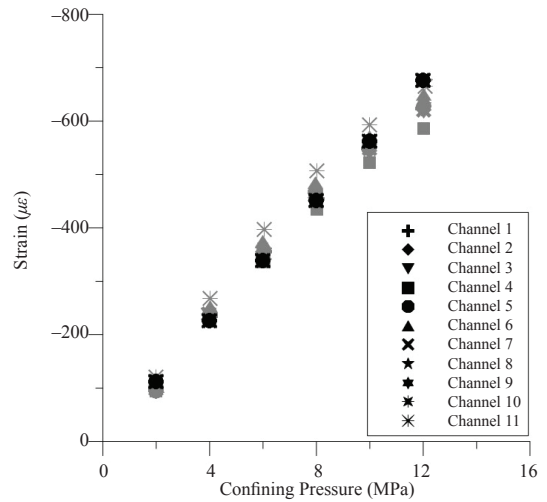
งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการความแข็งแกร่งของช่องว่างในหิน โดยการหาค่าบัลคโมดูลัสในสภาวะแห้งของหิน จากการเปลี่ยนแปลงช่องว่างในหินซึ่งเป็นผลมาจากค่าความเค้นประสิทธิผลที่เปลี่ยนแปลงไป (ในงานวิจัยนี้ค่าความเค้นประสิทธิผลเปลี่ยนแปลงเนื่องจากค่าความเค้นปิดล้อมเพิ่มขึ้น และค่าความดันของไหลเพิ่มขึ้น) ค่าบัลคโมดูลัสในสภาวะแห้งของหินที่เปลี่ยนแปลง ( $K_{d(new)}$ ) เปลี่ยนแปลงตามสมการ

$$K_{d(new)} = \left[ \frac{1}{K_m} + \frac{\Delta\phi}{K_\phi} \right]^{-1}$$

เมื่อ  $\Delta\phi$  คือค่าความพรุนของหินที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าความเค้นประสิทธิผลของหินที่เปลี่ยนแปลงไปในการทดสอบ  $K_\phi$  คือค่าความแข็งแกร่งของช่องว่างในหิน ซึ่งสามารถประมาณค่าได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของค่าบัลคโมดูลัสในสภาวะแห้งกับค่าบัลคโมดูลัสของแร่หลักในหิน ( $K_d/K_m$ ) [5] หลังจากนั้นใช้สมการของกัมมันท์ [6] เพื่อหาค่าบัลคโมดูลัสของหินที่อัดตัวจากของเหลวเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากช่องว่างในหินเปลี่ยนแปลง (ในงานวิจัยนี้  $K_{d(new)}$ ) ถูกใช้เป็นตัวแปรเพื่อสะท้อนการเปลี่ยนแปลงของช่องว่างในหินเปลี่ยนแปลง) สมการของกัมมันท์ดังสมการ

$$\frac{K_{sat}}{K_m - K_{sat}} = \frac{K_d}{K_m - K_d} + \frac{K_f}{\phi(K_m - K_f)}$$

โดยที่  $K_f$  คือค่าบัลคโมดูลัสของของเหลว ซึ่งในการทดสอบช่วงการอัดฉีดน้ำเข้าสู่แท่งทดสอบ ค่า  $K_f$  คือค่าบัลคโมดูลัสของน้ำ ( $K_w$ ) ขณะที่ในช่วงการทดสอบ



รูปที่ 4 ค่าความเครียดของแท่งทดสอบที่เปลี่ยนแปลงเมื่อค่าความดันปิดล้อมเพิ่มขึ้น

อัดฉีดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะวิกฤติที่ยาวเข้าสู่แท่งทดสอบ ขณะที่ค่าบัลคโมดูลัสของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะวิกฤติที่ยาว ( $K_{CO_2}$ ) โดยค่า  $K_w$  และ  $K_{CO_2}$  ที่ใช้สำหรับการคำนวณแสดงในตารางที่ 1

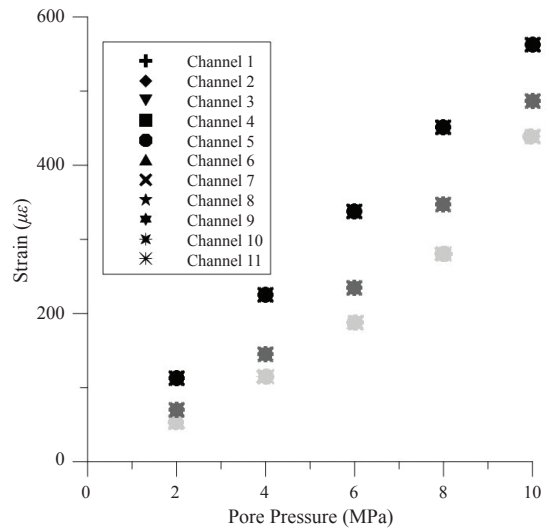
### 3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

#### 3.1 ค่าความเครียดจากการเปลี่ยนแปลงความดันปิดล้อม

เมื่อค่าความดันปิดล้อมเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าความเครียดในแต่ละตำแหน่งที่ทำการวัดมีค่าที่เพิ่มขึ้นซึ่งค่าที่เป็นลบ (รูปที่ 4) บ่งบอกถึงพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปของแท่งทดสอบเป็นไปในรูปของการหดตัว จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าผลลัพท์จากการใช้แบบจำลองทางธรณีกลศาสตร์คำนวณค่าความเครียด (สัญลักษณ์สีดำ) ให้ผลสอดคล้องใกล้เคียงกันกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (สัญลักษณ์สีเทา) ยกตัวอย่างเช่น ที่ความดันปิดล้อมที่ 8 เมกะปาสคาล ผลค่าความเครียดของแบบจำลองทางกลศาสตร์เฉลี่ยเท่ากับ  $-451.1$  ไมโครสเตรน เปรียบเทียบกับผลค่าความเครียดของการทดสอบในห้องปฏิบัติการเฉลี่ยเท่ากับ  $-464.7$  ไมโครสเตรน เป็นต้น

### 3.2 ค่าความเครียดจากการเปลี่ยนแปลงความดันของไหล

เมื่อมีการอัดฉีดน้ำเข้าสู่แท่งทดสอบทำให้ค่าความดันของไหลเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ความดันปิดล้อมคงที่ที่ 12 เมกะปาสคาล ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าความเค้นประสิทธิผลของแท่งทดสอบมีค่าลดลงทุกๆ การเพิ่มขึ้นของค่าความดันของไหล ค่าความเค้นประสิทธิผลของแท่งทดสอบลดลง หมายถึงค่าความเครียดของแท่งทดสอบที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับกฎของฮุก (Hooke's Law) ที่ว่าพฤติกรรม การเปลี่ยนรูปของแท่งทดสอบเป็นไปในรูปของการขยายตัว จะเห็นได้จากรูปที่ 5 ค่าความเครียดที่เปลี่ยนไปในช่วงทดสอบนี้มีค่าเป็นบวกและแสดงให้เห็นว่า ผลลัพธ์จากแบบจำลองทางธรณีกลศาสตร์เมื่อไม่มีการประยุกต์สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าบัลค์โมดูลัสในสภาวะแห้งและค่าความพรุนประสิทธิผลของหินเข้าไปในแบบจำลอง (สัญลักษณ์สีดำ) ผลลัพธ์ที่ได้จะไม่ใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (สัญลักษณ์สีเทาอ่อน) แต่เมื่อมีการประยุกต์สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าบัลค์โมดูลัสในสภาวะแห้งและค่าความพรุนประสิทธิผลของหินเข้าไปในแบบจำลอง (สัญลักษณ์สีเทาเข้ม) ค่าผลลัพธ์ที่ได้ จะเริ่มเข้าใกล้ค่าผลลัพธ์จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ยกตัวอย่างเช่น ที่ค่าความดันของไหลเท่ากับ 10 เมกะปาสคาล ผลค่าความเครียดจากการแบบจำลองทางธรณีกลศาสตร์เมื่อไม่มีการประยุกต์สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าบัลค์โมดูลัสในสภาวะแห้งและค่าความพรุนประสิทธิผลของหินเข้าไปในแบบจำลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 562.3 ไมโครสเตรน ขณะที่ผลค่าความเครียดจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 438.7 ไมโครสเตรน และเมื่อมีการประยุกต์สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าบัลค์โมดูลัสในสภาวะแห้งและค่าความพรุนประสิทธิผลของหินเข้าไปในแบบจำลอง ค่าความเครียดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 487.0 ไมโครสเตรน อย่างไรก็ตามค่าผลลัพธ์จากแบบจำลองไม่สามารถคำนวณให้เท่ากับค่าที่ได้จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้เนื่องจากการคำนวณในช่วงการทดสอบนี้ ขึ้นอยู่กับตัวแปรมากกว่าหนึ่งตัวแปร ดังแสดงในสมการ



รูปที่ 5 ค่าความเครียดของแท่งทดสอบที่เปลี่ยนไปเมื่อค่าความดันของไหลเพิ่มขึ้น

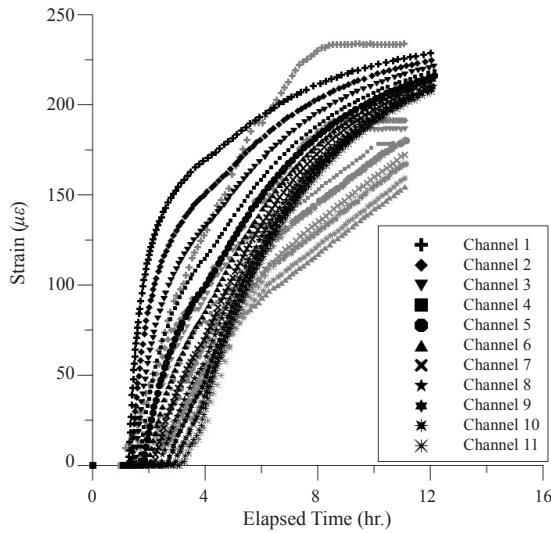
$$\frac{1}{M} \frac{\partial P_p}{\partial t} + \frac{\phi}{S} \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{1}{S} \frac{\partial \xi}{\partial t} - \alpha \frac{\partial \epsilon_v}{\partial t}$$

ซึ่งตัวแปรอื่นๆ ถูกกำหนดให้คงที่ในงานวิจัยนี้และนอกจากนี้แบบจำลองถูกคำนวณบนพื้นฐานของแท่งทดสอบในอุดมคติ (Ideal Core Sample) ซึ่งในความเป็นจริงแล้วแท่งทดสอบมีความซับซ้อนตามธรรมชาติมากกว่าแท่งทดสอบในอุดมคติ

### 3.3 ค่าความเครียดจากการอัดฉีดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ด้วยการประยุกต์สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าบัลค์โมดูลัสในสภาวะแห้งและค่าความพรุนประสิทธิผลของหินเข้าไปในแบบจำลองทางธรณีกลศาสตร์ จะพบว่าค่าผลลัพธ์ที่ได้ (สัญลักษณ์สีดำ) มีความใกล้เคียงอย่างมากกับค่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (สัญลักษณ์สีเทา) ดังแสดงในรูปที่ 6 ค่าการเพิ่มขึ้นของค่าความเครียดเทียบกับเวลาในแต่ละเส้นกราฟสามารถแสดงถึงการเคลื่อนที่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในแท่งทดสอบหลังจากถูกอัดฉีดเข้าสู่แท่งทดสอบ สำหรับหินทรายเบรียนั้น





รูปที่ 6 ค่าความเครียดของแท่งทดสอบที่เปลี่ยนไปเมื่อมีการอัดฉีดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะวิกฤตยิ่งยวด

การเพิ่มขึ้นของค่าความเครียดในแท่งทดสอบมีความสอดคล้องกับการอัดฉีดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของค่าความเครียดเพิ่มขึ้นมาจากตำแหน่งที่วัดจาก 1 ถึง 11 ตามลำดับ

### 3.4 การขยายตัวของแท่งทดสอบอันเนื่องมาจากความแตกต่างของคุณสมบัติของของเหลว

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าในช่วงการทดสอบการอัดฉีดน้ำเข้าสู่แท่งทดสอบด้วยแรงดันสูงสุดที่ 10 เมกะปาสคาล ค่าความเครียดมีค่าประมาณ 450 ไมโครสเตรน เกิดจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันเท่ากับ 10 เมกะปาสคาล ( $\Delta P = P_{p \text{ at } 10 \text{ MPa}} - P_{p \text{ at } 0 \text{ MPa}}$ ) แต่เมื่อเทียบค่าความเครียดที่เพิ่มขึ้นจนถึงอิมิตัวด้วยการอัดฉีดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (กราฟเริ่มคงที่) ในช่วงของการทดสอบการอัดฉีดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่แท่งทดสอบ จะเห็นได้ว่าค่าความเครียดสูงสุดประมาณ 230 ไมโครสเตรน เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความดันเพียง 0.05 เมกะปาสคาล ( $\Delta P = P_{CO_2 \text{ at } 10.05 \text{ MPa}} - P_{p \text{ at } 10 \text{ MPa}}$ ) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่าแรงดันที่เปลี่ยนไปไม่ได้เป็นปัจจัยหลัก

เพียงปัจจัยเดียวที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของหิน ในงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองทางธรณีกลศาสตร์หาคำตอบว่าปัจจัยหลักอื่นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของหินคือค่าคุณสมบัติของของเหลวที่อัดฉีดเข้าไปในหิน กล่าวคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะวิกฤตยิ่งยวดนั้นมีคุณสมบัติทั่วไปคล้ายของเหลวแต่มีคุณสมบัติการเคลื่อนที่ได้ดีเทียบเท่าก๊าซและมีความหนืดต่ำกว่าน้ำ [13] ดังนั้นเมื่ออัดฉีดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะวิกฤตยิ่งยวดเข้าสู่แท่งทดสอบ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงสามารถแทรกเข้าครอบครองช่องว่างในหินที่ขยายออก ในขณะที่การอัดฉีดน้ำก่อนหน้าไม่สามารถเข้าไปครอบครองช่องว่างเหล่านั้นได้ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไปครอบครองช่องว่างที่น้ำไม่สามารถเข้าครอบครองได้มีผลให้ค่าความเครียดในช่วงการอัดฉีดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดจากค่าบัลค์โมดูลัสที่อิมิตัวของหินจากปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จากการวัดปริมาณน้ำที่อัดฉีดเข้าสู่แท่งทดสอบในห้องปฏิบัติการ (ตารางที่ 2) เป็นการยืนยันว่าช่วงการทดสอบการอัดฉีดน้ำเข้าสู่แท่งทดสอบนั้น น้ำไม่สามารถเข้าครอบครองช่องว่างทั้งหมดของหิน ทั้งนี้เนื่องมาจากช่องว่างได้ถูกบีบอัดให้แคบลงจากช่วงทดสอบการเพิ่มขึ้นของแรงดันปิดล้อม ดังนั้นปริมาณน้ำที่เข้าสู่แท่งทดสอบจึงขึ้นอยู่กับปริมาณแรงดันน้ำที่อัดฉีดเข้าสู่แท่งทดสอบ แต่อย่างไรก็ตามทุกช่วงแรงดันน้ำจะปรากฏช่องว่างที่น้ำไม่สามารถเข้าครอบครองได้ ( $\phi_{ineff}$ ) เหลืออยู่

จากข้อมูลในตารางที่ 2 ทำให้การใช้แบบจำลองทางธรณีกลศาสตร์ให้ความกระจ่างได้ว่า เพราะเหตุใดการเพิ่มขึ้นของค่าความเครียดจึงมีปริมาณสูง ทั้งๆ ที่ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันมีค่าเพียง 0.05 เมกะปาสคาล จึงสรุปได้ว่าค่าความเครียดที่เปลี่ยนแปลงไปไม่ได้เกิดมาจากการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปแทนที่น้ำ แต่ค่าความเครียดที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเกิดจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แทรกซึมเข้าสู่ช่องว่างในหินที่น้ำไม่สามารถเข้าครอบครองได้ ด้วยเหตุนี้ค่าความเครียดในช่วงการอัดฉีดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่แท่ง

ตารางที่ 2 ข้อมูลปริมาณน้ำที่มีการอัดฉีดเข้าสู่แท่งทดสอบในห้องปฏิบัติการ

แรงดันน้ำ (เมกะปาสกาล)	ปริมาณน้ำที่อยู่ในแท่งทดสอบ (มิลลิลิตร)		ค่าความพรุนที่ถูกครอบครอง ด้วยน้ำ ( $\phi_w(\%) = \frac{V_{H_2O}}{V_{rock}^*}$ )		ค่าความพรุนที่เพิ่มจาก การขยายตัวของหิน (%)	
	เบเรีย	ทาโกะ	เบเรีย	ทาโกะ	เบเรีย	ทาโกะ
2	34.02	40.67	17.3	20.7	-	-
4	35.20	41.56	17.9	21.2	0.6	0.5
6	35.93	42.14	18.3	21.5	0.4	0.3
8	36.65	42.73	18.8	21.8	0.5	0.3
10	37.30	43.36	19.0	22.1	0.2	0.3

\*ปริมาตรของแท่งทดสอบ ( $V_{rock}$ ) มีค่าเท่ากับ 196.35 ลูกบาศก์เซนติเมตร

ทดสอบ (รูปที่ 6) จึงถูกคำนวณจากการเสมือนการอัดฉีด ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่แท่งทดสอบซึ่งมีช่องว่างของหิน (ค่าความพรุน) เท่ากับ 4% (23%–19%) ด้วยแรงดันที่เปลี่ยนไปเท่ากับ 10.05 เมกะปาสกาล ( $\Delta P = P_{CO_2 \text{ at } 10.05 \text{ MPa}} - P_p \text{ at } 0 \text{ MPa}$ ) และเนื่องจากค่าความพรุนที่ 4% สามารถคำนวณค่าบัลค์โมดูลัสที่อ้อมตัวด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าบัลค์โมดูลัสในสภาวะแห้งและค่าความพรุนประสิทธิผลของหินที่ได้กล่าวไปข้างต้นมีค่าเท่ากับ 19.65 จิกกะปาสกาล

#### 4. สรุป

การเปลี่ยนรูปของหินอ่อนเนื่องมาจากการอัดฉีดของเหลวเข้าสู่ชั้นหินมีความสำคัญอย่างมากสำหรับเทคโนโลยีการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อเป็นการลดปัญหาสภาวะโลกร้อน การเปลี่ยนรูปของหินเป็นผลมาจากการเปลี่ยนค่าแรงดันในชั้นหินเป็นปัจจัยหลักที่เข้าใจกันอย่างแพร่หลายในวงวิชาการ อย่างไรก็ตามคุณสมบัติของของเหลวก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญที่จะต้องคำนึงถึงเมื่อเกิดการเปลี่ยนรูปของหิน ของเหลวที่มีคุณสมบัติเคลื่อนตัวและแทรกซึมได้ดีมีโอกาสทำให้หินเปลี่ยนรูปได้มากกว่าของเหลวที่มีคุณสมบัติที่ต่ำกว่า แม้จะอยู่ในค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่เท่ากัน สมการ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าบัลค์โมดูลัสในสภาวะแห้งและค่าความพรุนประสิทธิผลของหินถูกใช้แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของของเหลวที่มีคุณสมบัติเคลื่อนตัวและแทรกซึมได้ดีสามารถเข้าครอบครองช่องว่างในหินที่ของเหลวอื่นไม่สามารถเข้าครอบครองได้ เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปของหินจากการเข้าครอบครองช่องว่างในหิน

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศาสตราจารย์โทชิฟูมิ มัสซุโอกะ และมหาวิทยาลัยเกียวโตที่สนับสนุนข้อมูลวิจัยรวมถึงวัสดุและอุปกรณ์สำหรับงานวิจัย

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Gale, “Geological storage of CO<sub>2</sub>: what do we know, where are the gaps, and what more needs to be done?,” *Energy*, vol. 29, no. 9–10, pp. 1329–1338, 2004.
- [2] R. P. Hepple and S. M. Benson, “Geologic storage of carbon dioxide as a climate change mitigation strategy: Performance requirements and the implications of surface seepage,” *Environmental*



- Geology*, vol. 47, pp. 576–585, 2005.
- [3] S. Holloway, “An overview of the joule II project: The underground disposal of carbon dioxide,” *Energy Convers Manages*, vol. 37, no. 6–8, pp. 1149–1154, 1996.
- [4] E. S. Rubin, *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005, pp. 429.
- [5] B. H. Russell and T. Smith, “The relationship between dry rock bulk modulus and porosity-An empirical study,” CREWES Research Report, vol. 19, 2007.
- [6] F. Gassmann, “Elastic waves through a packing of spheres,” *Geophysics*, vol. 16, pp. 673–685, 1951.
- [7] G. Mavko, T. Mukerji, and J. Dvorkin, *The Rock Physics Handbook*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [8] B. Culshaw, “Measuring strain using optical fibres,” *Strain*, vol. 36, no. 3, pp. 105–113, 2000.
- [9] C. M. Lawrence, D. V. Nelson, E. Udd, and T. Bennett, “A fiber optic sensor for transverse strain measurement,” *Experiment Mechanics*, vol. 39, no. 3, pp. 202–209, 1999.
- [10] J. Q. Shi, Z. Xue, and S. Durucan, “Supercritical CO<sub>2</sub> core flooding and imbibition in Tako sandstone – Influence of sub-core scale heterogeneity,” *International Journal of Greenhouse Gas Control*, pp. 1–13, 2010.
- [11] M. M. Alam, I. L. Fabricius, K. Hedegaard, B. Rogen, Z. Hossain, and A. S. Krogsboll, “Biot’s coefficient as an indicator of strength and porosity reduction - Calcereous sediments from Kerguelen Plateau,” *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 70, pp. 282–297, 2010.
- [12] G. Mavko and T. Mukerji, “Seismic pore space compressibility and Gassman’s relation,” *Geophysics*, vol. 60, no. 6, pp. 1743–1749, 1995.
- [13] M. H. Chowdhury and D. R. Schmitt, “Seismic behavior of CO<sub>2</sub> saturated Fontainebleau sandstone under in situ conditions,” in *Proceedings Second International Workshop on Rock Physics*, 2012, pp. 1–6.