

การศึกษาตำแหน่งจุดเริ่มต้นของรอยแตกในหินเมื่อพิจารณาตาดับในของถังเก็บไฮโดรเจนใต้ดินแรงดันสูง A Study of Crack Initiation Locations in Rock Mass Considering Linings of High-Pressurized Hydrogen Storage Cavern

ธีรภัทร ชินราช^{1,*} พรเกษม จงประดิษฐ์² อภิวิชญ์ ทองรักษา³

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร

³ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: Pornkasem.jon@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

ไฮโดรเจนได้กลายเป็นองค์ประกอบสำคัญในการเปลี่ยนผ่านด้านพลังงาน เนื่องจากมีความสามารถในการกักเก็บพลังงานส่วนเกินจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนและลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อุโมงค์เก็บแก๊สใต้ดิน มีข้อได้เปรียบสำหรับการกักเก็บไฮโดรเจนขนาดใหญ่ สามารถเก็บแก๊สความดันสูงที่ระดับความลึกที่ไม่มาก และมีความยืดหยุ่นกับลักษณะธรณีวิทยา จากปรากฏการณ์ที่วัสดุโลหะหรือเหล็กเกิดการสูญเสียความเหนียวทำให้ความสามารถในการรับแรงดิ่งลดลงหลังจากการสัมผัสกับไฮโดรเจน ทำให้เกิดการวิบัติก่อนกำหนด ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่าปรากฏการณ์การเปราะเนื่องจากไฮโดรเจน ได้เกิดข้อสงสัยว่าสามารถนำองค์ความรู้ของระบบอุโมงค์เก็บแก๊สใต้ดินจากการศึกษาที่ผ่านมา มาใช้โดยตรงได้หรือไม่ การศึกษานี้เสนอการตรวจสอบความท้าทายที่สำคัญในการใช้อุโมงค์เก็บไฮโดรเจนใต้ดิน โดยมุ่งเน้นที่ผลกระทบของสถานะความเค้นในที่ต่อตำแหน่งจุดเริ่มต้นของรอยแตกในมวลหินโดยรอบอุโมงค์เก็บไฮโดรเจนใต้ดินแรงดันสูง และการนำระบบตาดับในมาร่วมพิจารณาในการวิเคราะห์ วิธีการเชิงตัวเลขถูกนำมาใช้เพื่อประเมินสถานะความเค้นที่ส่งผลต่อจุดเริ่มต้นรอยแตกในมวลหิน ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าเมื่อพิจารณาระบบตาดับในด้วย ตำแหน่งจุดเริ่มต้นวิบัติในมวลหินแตกต่างไปจากการวิเคราะห์ที่ไม่ได้พิจารณา นอกจากนี้การตัดคอนกรีตจะเกิดการวิบัติก่อนจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมสำหรับระบบกักเก็บความดันสูงใต้ดินสำหรับพลังงานไฮโดรเจน

คำสำคัญ: อุโมงค์เก็บแก๊สใต้ดิน, พลังงานหมุนเวียน, การกักเก็บไฮโดรเจน, จุดเริ่มรอยแตก

Abstract

Hydrogen has become an essential component of the energy transition because of its ability to store excess energy from renewable sources and reduce carbon emissions. Among underground storage options, Lined Rock Caverns (LRCs) offer unique advantages for large-scale hydrogen storage. They can operate at high pressures, even at shallow depths, and offer flexibility independent of geological formations, making them a promising candidate for large-scale hydrogen storage. From the phenomenon where metallic materials or steel lose ductility, causing reduced tensile strength after exposure to hydrogen, leading to premature failure, this phenomenon is

called hydrogen embrittlement. The hydrogen embrittlement phenomenon leads to a dispute about adopting the knowledge from past studies of high-pressure underground storage (for gas and compressed air) to store hydrogen. This study investigates critical challenges in utilizing LRCs for hydrogen storage, focusing on the effects of in-situ stress condition on the position of crack initiation in the rock mass under high internal pressure, together with lining system consideration. A numerical approach is used to evaluate how stress conditions influence the crack initiation position. The results indicate that, when considering the lining system in the analysis, the failure initiation locations in the rock mass significantly differ from those in previous studies (without linings). The failures would first appear in the concrete lining, indicating the necessity for future study for high-pressure hydrogen storage.

Keywords: Lined Rock Caverns (LRC), Renewable energy, Hydrogen storage, Crack Initiation Location

1. บทนำ

การแก้ไขปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นประเด็นสำคัญระดับโลก เนื่องจากเชื้อเพลิงเหล่านี้มีส่วนในการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่าร้อยละ 75 ซึ่งรวมถึงการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 90 [1] แม้ว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลจะให้พลังงานที่มีเสถียรภาพ แต่ก็สร้างความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพเช่นกัน จึงมีความจำเป็นอย่างมากในการหาพลังงานทางเลือกที่สะอาดกว่า เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานความร้อนใต้พิภพ และไฮโดรเจน [2] จากการตระหนักถึงความท้าทายเหล่านี้ประเทศต่างๆ เช่น ออสเตรเลียและแคนาดา กำลังศึกษาการใช้ไฮโดรเจนจากพลังงานหมุนเวียนอย่างจริงจังในฐานะผู้นำด้านพลังงาน ตัวอย่างเช่น ออสเตรเลียมีเป้าหมายที่ท้าทายในการเพิ่มการผลิตไฮโดรเจนให้ได้ร้อยละ 300 ภายในปี ค.ศ. 2030 โดยวางตำแหน่งให้ไฮโดรเจนเป็นหัวใจสำคัญของยุทธศาสตร์พลังงานยั่งยืน [3] ไฮโดรเจนโดดเด่นในฐานะพลังงานทางเลือกที่ยั่งยืน เนื่องจากของเสียที่ปล่อยออกมาหลังจากผลิตพลังงานคือน้ำ ทำให้ทั่วโลกกำลังศึกษาการประยุกต์ใช้ไฮโดรเจน ในการขนส่งและการกักเก็บพลังงาน การกักเก็บใต้ดินแบบความดันสูง เช่น อุโมงค์เก็บแก๊สใต้ดิน (Lined Rock Caverns) ดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นหนึ่งในทางเลือกที่ประสบความสำเร็จอย่างมากกับการกักเก็บก๊าซธรรมชาติและอากาศ

ในระบบพลังงานที่ผ่านมา เนื่องจากมีข้อได้เปรียบด้านการขยายขนาด การเข้าถึง และความยืดหยุ่นในการเลือกพื้นที่ เมื่อเทียบกับทางเลือกการกักเก็บใต้ดินแบบดั้งเดิม อุโมงค์เก็บแก๊สใต้ดินถูกใช้สำหรับการกักเก็บก๊าซธรรมชาติตั้งแต่ทศวรรษ 1980 ทั้งยังสามารถปรับเปลี่ยนเป็นสถานที่กักเก็บที่รองรับไฮโดรเจนได้ในปริมาณและความดันที่มีนัยสำคัญ [4]

อุโมงค์เก็บแก๊สใต้ดิน (Lined Rock Caverns) ได้แสดงประสิทธิภาพในการกักเก็บพลังงานขนาดใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบกักเก็บพลังงานอากาศอัด (CAES) สำหรับการผลิตไฟฟ้า ความเป็นไปได้ทางเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ของอุโมงค์เก็บแก๊สใต้ดินเพิ่มขึ้นจากความสามารถในการก่อสร้างที่ระดับความลึกไม่มากประมาณ 100 เมตรจากระดับผิวดิน ซึ่งช่วยลดต้นทุน ตลอดระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมา การวิจัยอย่างกว้างขวาง รวมถึงการจำลองเชิงตัวเลข การศึกษาเชิงทดลอง และแบบจำลองเชิงวิเคราะห์ ได้พัฒนาความเข้าใจเกี่ยวกับประสิทธิภาพของอุโมงค์เก็บแก๊สใต้ดิน ภายใต้สภาวะการกักเก็บแก๊สความดันสูง โดยมีการศึกษาที่สำคัญได้ตรวจสอบพื้นที่เสียหายจากการขุดเจาะ (Excavation Damaged Zones) เสถียรภาพทางธรณีกลศาสตร์ พฤติกรรมทางอุณหพลศาสตร์ และปฏิสัมพันธ์ของของไหลหลายเฟสภายในระบบกักเก็บพลังงานอากาศอัด [5] [6]

การตรวจสอบเชิงทดลองมีบทบาทสำคัญในการประเมินพฤติกรรมของอุโมงค์เก็บแก๊สใต้ดิน ภายใต้สภาวะรุนแรง การทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพได้ให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับการเริ่มต้นและการแพร่กระจายของรอยแตกในมวลหินโดยรอบอันเนื่องมาจากการเพิ่มความดันในอุโมงค์เก็บแก๊สใต้ดิน ผลการศึกษาเหล่านี้นำไปสู่การนำเทคนิคการจำลองเชิงตัวเลขมาใช้ เช่น วิธีเอลิเมนต์ฟิสิกส์ (EFEM) เพื่อจำลองการพัฒนาของรอยแตก การตรวจสอบความถูกต้องกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ได้เพิ่มความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองการคาดการณ์อย่างมีนัยสำคัญ [7] [8]

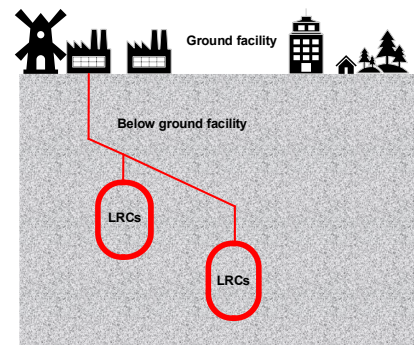
การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ได้พัฒนาความเข้าใจเกี่ยวกับประสิทธิภาพของอุโมงค์เก็บแก๊สใต้ดิน แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบต่าง ๆ ของอุโมงค์เก็บแก๊สใต้ดิน รวมถึงดาดเหล็กชั้นใน (Steel lining) ดาดคอนกรีตเสริมเหล็กชั้นใน (Concrete lining) และมวลหินโดยรอบ (Rock mass) แบบจำลองเหล่านี้ให้ข้อมูลเชิงลึกที่สำคัญเกี่ยวกับการกระจายความเค้น (Stress distribution) กลไกการเสียรูป (Deformation mechanisms) และรูปแบบการวิบัติ (Failure modes) ที่อาจเกิดขึ้นเพื่อให้มั่นใจในความสมบูรณ์ทางโครงสร้างในระยะยาวภายใต้สภาวะการกักเก็บความดันสูง [9] [10]

การศึกษาก่อนหน้านี้สำหรับระบบกักเก็บก๊าซธรรมชาติและอากาศส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่เสถียรภาพของมวลหินโดยรอบ (Stability of Rock mass) เนื่องจากความกังวลเกี่ยวกับการวิบัติจากการยกตัวของมวลหิน (Uplift failure) เหนือหลังคาอุโมงค์ การออกแบบระบบดาดชั้นใน (Lining system) จะถูกออกแบบให้มีหน้าที่ถ่ายเทแรงจากความดันภายในไปยังมวลหินที่อยู่โดยรอบและเป็นชั้นกันก๊าซหรืออากาศรั่วไหล หรืออีกนัยคือมวลหินทำหน้าที่เป็นส่วนประกอบหลักในการรับแรง การตรวจสอบพฤติกรรมของมวลหินจึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการระบุการเริ่มต้นของรอยแตก (Crack initiation location) และการพัฒนาของรอยแตก (Fracture propagation) เพื่อกำหนดรอยแตกระดับมหภาคสำหรับการประเมินเสถียรภาพจากการยกตัว (Uplift failure) [7]

อย่างไรก็ตาม สำหรับระบบกักเก็บไฮโดรเจน การพิจารณาการวิบัติอาจไม่ได้จำกัดอยู่เฉพาะในมวลหินเท่านั้น เนื่องจากปรากฏการณ์ Hydrogen Embrittlement ในชั้นดาดเหล็กชั้นใน (Steel lining) ที่มีความเสี่ยงมากขึ้นหากมีการกระจุกตัวความเค้นเฉพาะที่ (Localization) การมองว่า

ดาดคอนกรีตเสริมเหล็กชั้นในถึงแม้ว่าจะยังช่วยถ่ายเทแรงดันแก๊สไปยังมวลหินต่อไปอาจจะไม่สมเหตุสมผลอีกต่อไป เพราะเมื่อชั้นนี้วิบัติในบางจุดจะทำให้เกิดการกระจุกตัวความเค้นเฉพาะที่ ในดาดเหล็กชั้นใน ซึ่งเพิ่มความเสี่ยงของการเปราะเนื่องจากไฮโดรเจน (Hydrogen Embrittlement) และส่งผลต่อการรั่วไหลของแก๊ส และนำไปสู่การสูญเสียพลังงานอย่างมีนัยสำคัญ [4]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การประเมินการวิบัติในชั้นดาดคอนกรีตเสริมเหล็กชั้นในที่มีค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตที่มักจะน้อยกว่ามวลหินโดยรอบ โดยเน้นที่จุดเริ่มวิบัติในบทความนี้ และพิสูจน์ว่าการมีอยู่ของดาดชั้นในทั้งสองจะส่งผลกระทบต่ออย่างไรกับจุดเริ่มวิบัติในมวลหินเมื่อเทียบกับการศึกษาที่ผ่านมาที่ไม่ได้พิจารณาการมีอยู่ของดาดชั้นในทั้งสอง โดยใช้การจำลองเชิงตัวเลขเพื่อตรวจสอบอิทธิพลของสภาวะความเค้นในที่ (In-situ stress condition) ที่แตกต่างกัน



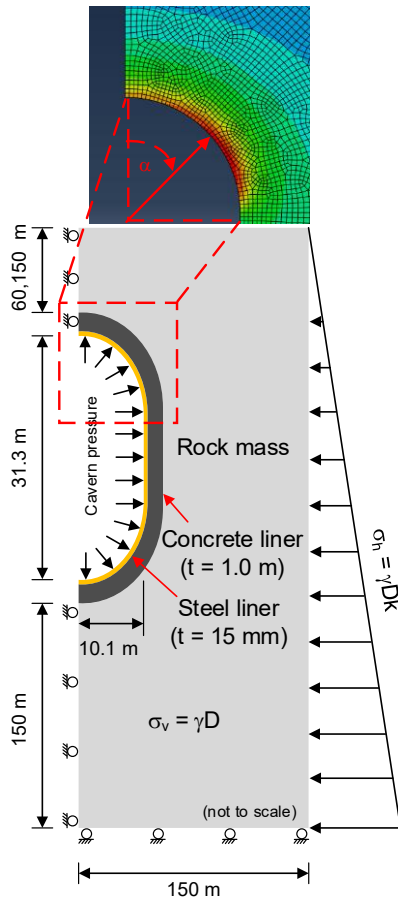
รูปที่ 1 ระบบอุโมงค์เก็บแก๊สใต้ดิน (Lined Rock Caverns)

2. ขั้นตอนการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

การศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสองมิติด้วยโปรแกรม ABAQUS 2D เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของอุโมงค์เก็บแก๊สใต้ดิน ซึ่งประกอบไปด้วยดาดเหล็กชั้นใน (Steel lining) ดาดคอนกรีตเสริมเหล็กชั้นใน (Concrete lining) และ มวลหินโดยรอบ (Rock mass) ดังแสดงในรูปที่ 2

2.1 สมมติฐานและการกำหนดกรณีศึกษา

ในการขุดเจาะอุโมงค์เก็บแก๊สใต้ดิน ปัจจัยทางธรณีวิทยาและธรณีกลศาสตร์มีบทบาทสำคัญอย่างมากต่อเสถียรภาพระยะยาว โดยทั่วไปมวลหินมักมีคุณสมบัติแบบแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic) และประกอบด้วยรอยแตกหรือรอยเลื่อนในหลากหลายทิศทาง อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัตินิยมเลือกตำแหน่งการก่อสร้างที่หลีกเลี่ยงรอยเลื่อนหรือรอยแตกขนาดใหญ่ นอกจากนี้เมื่อมีรอยแตกขนาดเล็กกระจุกกระจาย



รูปที่ 2 องค์ประกอบระบบค้ำยัน และขอบเขตของแบบจำลอง

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงตัวแปร

ความลึกของอุโมงค์เก็บแก๊สใต้ดิน (เมตร)	อัตราส่วนความเค้นในหิน
60	0.3, 0.8, 1.5, 3
150	0.3, 0.8, 1.5, 3

การพิจารณาสามารถจำลองให้มวลหินมีสมบัติแบบไอโซทรอปิก (Isotropic) โดยใช้สมบัติแบบเทียบเท่าได้โดยหาค่าสมบัติให้ต่ำลงในการศึกษาในครั้งนี้จึงพิจารณาให้มวลหินโดยรอบอุโมงค์เก็บแก๊ส มีสมบัติแบบไอโซทรอปิก เพื่อให้สะดวกต่อการศึกษากการวิบัติภายใต้สภาวะความดันภายในสูง สำหรับโครงสร้างที่รับแรงดึงอัตราส่วนของเหล็กเสริมในดาดคอนกรีตเสริมเหล็กชั้นใน ได้พิจารณาในค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) ของดาดคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$E_{RC} = 32860 + 194810\mu \quad (1)$$

$$\mu = \frac{A_s}{A_c - A_s} \quad (2)$$

โดยที่ μ คืออัตราส่วนการเสริมเหล็ก E_{RC} หมายถึงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดาดคอนกรีตเสริมเหล็ก (Elastic Modulus of reinforced concrete) A_s คือพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม และ A_c คือพื้นที่หน้าตัดคอนกรีต [11]

อุโมงค์ทางเข้าสนับสนุนจะไม่รวมอยู่ในการวิเคราะห์ และไม่พิจารณาชั้นตอนกระบวนการขุดในวิเคราะห์

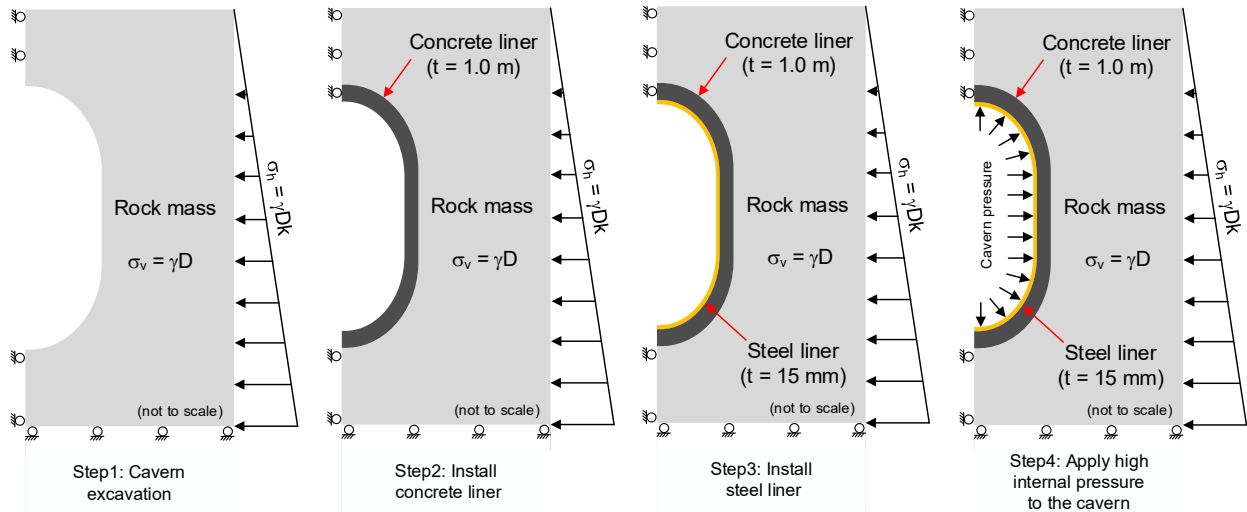
การศึกษาในครั้งนี้ทำการวิเคราะห์เชิงตัวแปร (Parametric study) สภาวะความเค้นในหิน (In-situ stress condition) โดยพิจารณาความลึกของอุโมงค์เก็บแก๊สใต้ดิน (Cavern depth) อยู่ลึกจากผิวดิน 60 และ 150 เมตร และอัตราส่วนความเค้นในหิน (In-situ stress ratio) 0.3, 0.8, 1.5 และ 3.0 ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยทั่วไปแล้วอัตราส่วนความเค้นในหินของมวลหินส่วนใหญ่จะมีค่ามากกว่า 1 ซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการทางธรณีวิทยาในพื้นที่นั้น ๆ อย่างไรก็ตามในช่วงความลึกที่ศึกษา อัตราส่วนความเค้นในหินที่ตรวจวัดได้จากข้อมูลในอดีตแสดงค่าที่กระจุกกระจายในช่วง 0.3-3.0 ในการศึกษาครั้งนี้ จึงได้หนดอัตราส่วนความเค้นในหินในช่วงที่กำหนดเพื่อสะท้อนพฤติกรรมที่หลากหลายทางธรณีวิทยา

2.2 การวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)

2.2.1 การจำลอง สมบัติของวัสดุระบบค้ำยันใน (Lining system) และมวลหินโดยรอบ (Rock mass)

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FE) ประกอบด้วยดาดเหล็กชั้นใน ดาดคอนกรีตเสริมเหล็กชั้นใน และมวลหินโดยรอบ โดยอุโมงค์เก็บแก๊สมีรูปทรงแบบไซโล (Silo shape) วางในแนวตั้ง มีรัศมี 10.1 เมตร สูง 31.3 เมตร ดาดเหล็กชั้นใน และดาดคอนกรีตเสริมเหล็กชั้นใน มีความหนา 15 มิลลิเมตร และ 1 เมตร ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2 สำหรับมวลหินโดยรอบ กำหนดให้ลึกจากฐานอุโมงค์เก็บแก๊ส 150 เมตร (y-axis) และกว้างออกไปในแนวรัศมี 150 เมตร (x-axis)

ในการศึกษากำหนดการวิเคราะห์ โดยใช้หลักการสมมาตรแนวแกน (Axis-symmetry) ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยสมบัติของดาดเหล็กชั้นใน ดาดคอนกรีตเสริมเหล็กชั้นใน และมวลหินโดยรอบ สมมติให้เป็นพฤติกรรมยืดหยุ่นเชิงเส้นโดยมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 3 ขั้นตอนในการวิเคราะห์

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
มวลหินโดยรอบ (Rock mass) [12]		
ความหนาแน่น	2651	kg/m ³
โมดูลัสยืดหยุ่น	6.66	GPa
อัตราส่วนปัวซอง	0.2	-
คาดคอนกรีตเสริมเหล็กชั้นใน (Concrete lining) [10]		
ความหนาแน่น	2500	kg/m ³
โมดูลัสยืดหยุ่น	37.7	GPa
อัตราส่วนปัวซอง	0.2	-
กำลังอัดสูงสุด 28 วัน	38	MPa
กำลังดึงสูงสุด	2.9	MPa
ความหนาคาดคอนกรีตเสริมเหล็ก	1000 (1)	mm (m)
คาดเหล็กชั้นใน (Steel lining) ชนิด S355 [10]		
ความหนาแน่น	8000	kg/m ³
โมดูลัสยืดหยุ่น	200	GPa
อัตราส่วนปัวซอง	0.3	-
กำลังคราก	355	MPa
กำลังดึงประลัย	490	MPa
ความหนาคาดเหล็กชั้นใน	15 (0.015)	mm (m)

โดยในการจำลองนี้จะพิจารณาขั้นตอนกระบวนการหลังจากการขุดเสร็จสิ้นแล้ว จึงทำการติดตั้งคาดคอนกรีตเสริมเหล็กชั้นใน และคาดเหล็กชั้นในหลังจากนั้นจึงเพิ่มแรงดันภายในอุโมงค์เก็บแก๊สไปตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 3

2.2.2 การจำลองและการกำหนดขอบเขตของแบบจำลอง

การจำลองตาข่ายใช้แบบ Four-node axisymmetric quadrilateral element (CAX4R) การกำหนดขอบเขตของแบบจำลอง มีผลต่อการวิเคราะห์จึงจำเป็นต้องกำหนดให้มีความเหมาะสม โดยในการศึกษาในครั้งนี้ได้ใช้หลักการสมมาตรแนวแกนตั้ง (Y-Axis of symmetry) และกำหนดขอบเขตจำกัดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งที่ ด้านล่างของแบบจำลอง

และในด้านขวาของแบบจำลองปล่อยให้เคลื่อนที่ได้อิสระทุกทิศทาง

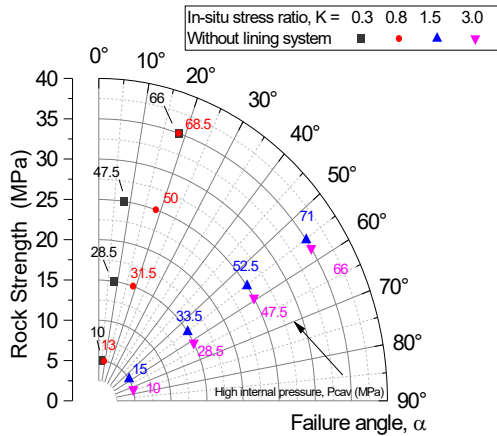
3. การวิเคราะห์ผลการศึกษา

3.1 อิทธิพลของสภาวะความเค้นในที่ต่อตำแหน่งจุดเริ่มต้นวิถีในมวลหินโดยรอบ แบบไม่พิจารณากระบวนคาดชั้นใน (Without lining system)

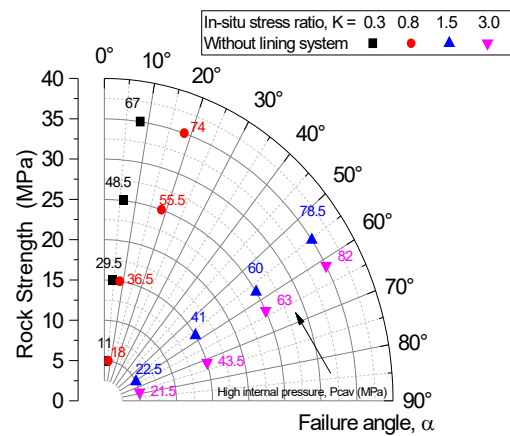
จากการวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (FE) เพื่อหาตำแหน่งจุดเริ่มวิถีในมวลหินโดยไม่พิจารณากระบวนคาดชั้นใน (Without lining system) สำหรับที่กรณีค่าอัตราส่วนความเค้นในที่ น้อยกว่า 1 ตำแหน่งจุดเริ่มวิถีที่มวลหินจะเกิดบริเวณด้านบนของอุโมงค์ ช่วงมุมวิถีต่ำ 0-20 องศา เมื่อเพิ่มกำลังของมวลหินส่งผลให้ตำแหน่งจุดเริ่มวิถีเปลี่ยนแปลงโดยมีมุมวิถีที่เพิ่มขึ้น

สำหรับในกรณีค่าอัตราส่วนความเค้นในที่ มากกว่า 1 นั้นอิทธิพลของแรงดันด้านข้างจะมากกว่าแรงดันด้านบน ทำให้ตำแหน่งจุดเริ่มต้นการวิถีที่มวลหินจะเกิดบริเวณด้านข้างของอุโมงค์ ช่วงมุมวิถี 55-65 องศา เมื่อเพิ่มกำลังของมวลหินส่งผลให้ตำแหน่งจุดเริ่มต้นการวิถีเปลี่ยนแปลงโดยมีมุมวิถีลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเมื่อความดันในอุโมงค์เก็บแก๊สได้เพิ่มขึ้น ทำให้อิทธิพลของอัตราส่วนความเค้นในที่ลดลงดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [12] ทั้งความลึก 60 เมตรและ 150 เมตร

อีกทั้งการเพิ่มขึ้นของความลึกอุโมงค์จะทำให้ค่าแรงดันในอุโมงค์ที่จะทำให้เกิดจุดเริ่มวิถีในมวลหินมีค่าที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเพิ่มความลึกอุโมงค์จะทำให้การเพิ่มขึ้นของแรงดันดินด้านบน และแรงดันดินด้านข้าง ซึ่งเห็นได้ชัดเจนสำหรับกรณีค่าอัตราส่วนความเค้นในที่มากกว่า 1 ดังแสดงในรูปที่ 4

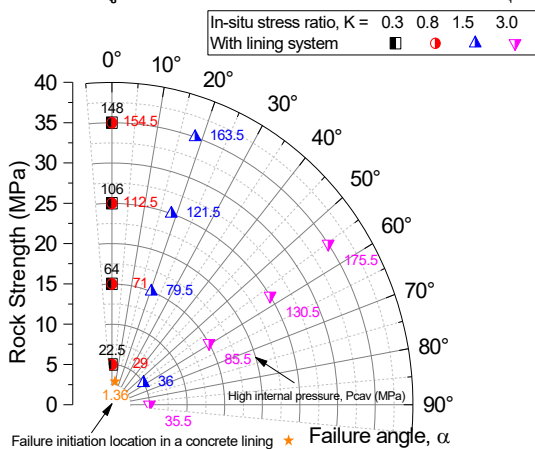


ก) ความลึก 60 เมตร

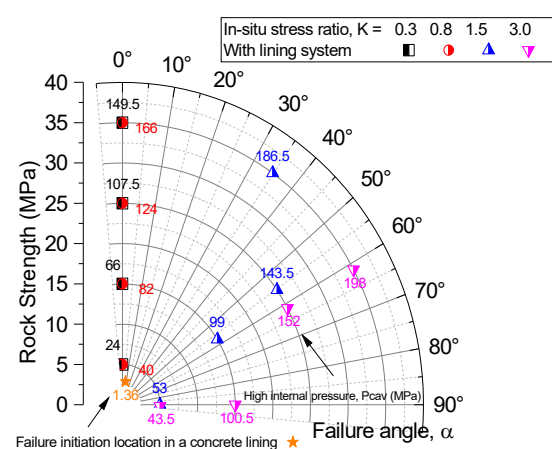


ข) ความลึก 150 เมตร

รูปที่ 4 อิทธิพลของสภาวะความเค้นในที่ต่อตำแหน่งจุดเริ่มต้นการวิบัติในมวลหินโดยรอบ แบบไม่พิจารณาการระบบค้ำยัน



ก) ความลึก 60 เมตร



ข) ความลึก 150 เมตร

รูปที่ 5 อิทธิพลของสภาวะความเค้นในที่ต่อตำแหน่งจุดเริ่มต้นการวิบัติในมวลหินโดยรอบ แบบพิจารณาการระบบค้ำยัน

3.2 อิทธิพลของสภาวะความเค้นในที่ต่อตำแหน่งจุดเริ่มต้นการวิบัติในมวลหินโดยรอบ แบบพิจารณาการระบบค้ำยัน (With lining system)

จากผลการวิเคราะห์ในหัวข้อ 3.1 พบว่าอัตราส่วนความเค้นในที่ที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อพฤติกรรมการกระจายตัวของความเค้นในมวลหินโดยรอบ อย่างไรก็ตามระบบค้ำยันในยังคงมีบทบาทสำคัญอย่างมากในการกระจายและถ่ายแรงดันจากแรงดันภายในอุโมงค์เก็บแก๊สไปสู่มวลหิน ระบบค้ำยันได้รับแรงดันก่อนแล้วจึงกระจายไปให้มวลหิน ทำให้ค่าแรงดันที่จะทำให้จุดเริ่มต้นการวิบัติในมวลหินมีค่าที่สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5

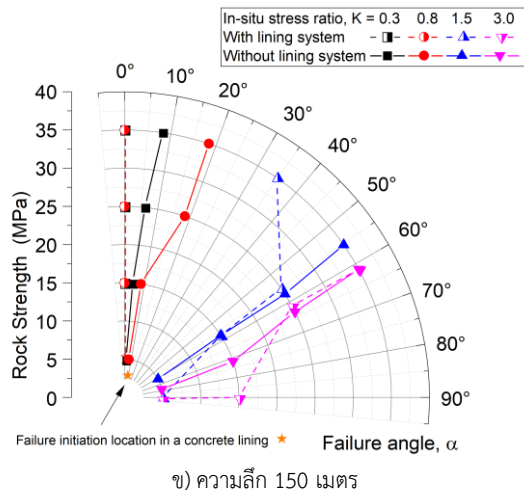
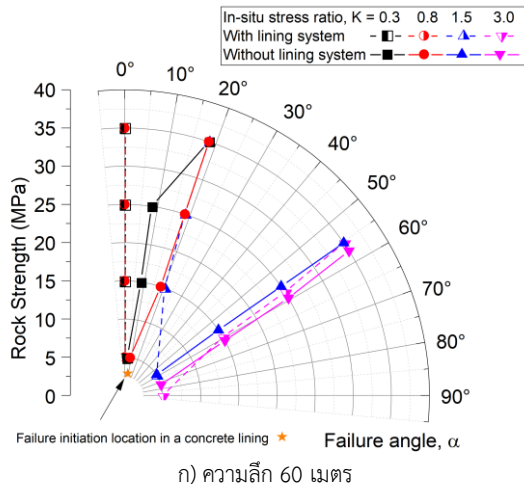
จากผลการวิเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 6 เห็นได้ชัดว่าตำแหน่งจุดเริ่มต้นการวิบัติสำหรับระบบอุโมงค์เก็บแก๊สใต้ดินที่พิจารณาการระบบค้ำยันใน จะให้ผลลัพธ์ที่ต่างออกไปจากระบบอุโมงค์เก็บแก๊สใต้ดินที่ไม่ได้พิจารณาการระบบค้ำยัน เนื่องจากระบบค้ำยันในทำให้เกิดการกระจายของความเค้นใหม่ ทำให้มุมการวิบัติในมวลหินลดลงไปจากเดิมอย่างมีนัยสำคัญ

แม้ว่าการพิจารณาการระบบค้ำยันในจะระบุระดับแรงดันในการกักเก็บแก๊สที่มวลหินโดยรอบจะเกิดการวิบัติจะมีค่ามากขึ้น เมื่อตรวจสอบค่า

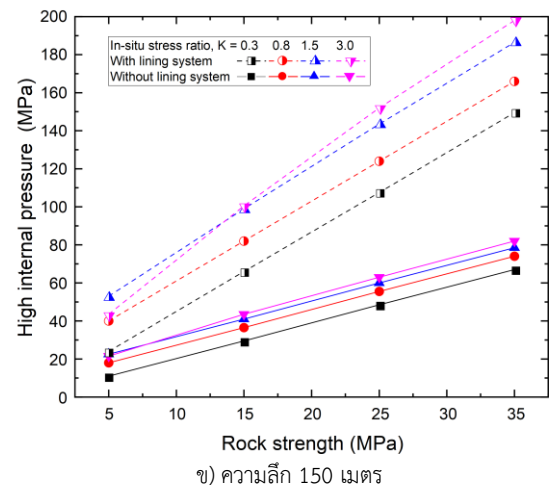
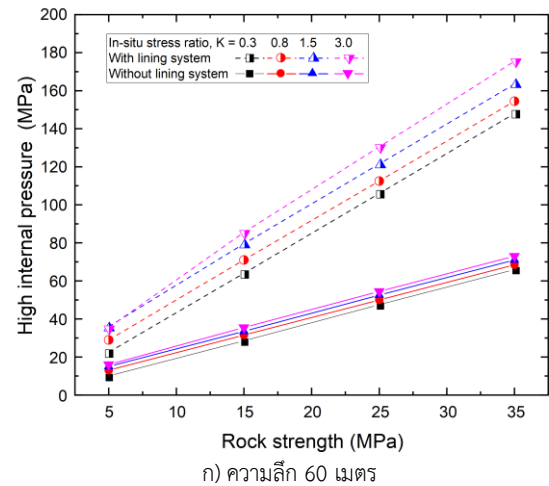
อิทธิพลของค่าอัตราส่วนความเค้นในที่ ไม่ได้ส่งผลต่อตำแหน่งจุดเริ่มต้นของรอยแตกเพียงอย่างเดียว แต่ยังส่งผลต่อระดับแรงดันของแก๊สที่เก็บภายในอุโมงค์อีกด้วย ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้สอดคล้องกัน ทั้งแบบที่พิจารณาและแบบไม่พิจารณาการระบบค้ำยัน ดังแสดงในรูปที่ 7

อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ได้ใช้แบบจำลองยืดหยุ่นเชิงเส้นกับระบบค้ำยันและมวลหินเพื่อให้สะดวกต่อการศึกษาลดความซับซ้อนในการคำนวณเชิงตัวเลข ซึ่งมีความสมเหตุสมผลเพียงพอในแง่ของการศึกษาขั้นต้นเพื่อระบุตำแหน่งจุดเริ่มต้นการวิบัติ โดยเน้นความสนใจไปที่ช่วงเริ่มต้นของการวิบัติ แนวทางดังกล่าวอาจไม่สะท้อนพฤติกรรมของวัสดุในสภาวะใกล้วิบัติได้อย่างถูกต้อง เนื่องจากคอนกรีตจะวิบัติก่อนและจะแสดงพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear behavior) โดยเฉพาะการแตกร้าวในแรงดึง

ความเค้นในค้ำยันทั้งสองแล้ว พบว่าค่าความเค้นดึงในค้ำยันคอนกรีตค้ำยันในสูงกว่าความสามารถรับแรงดึงของคอนกรีต โดยมุมวิบัติที่เกิดขึ้นจะอยู่บริเวณด้านบน อีกทั้งการเพิ่มกำลังรับแรงดึงของค้ำยันคอนกรีตค้ำยันในให้สูงขึ้น ไม่ได้ส่งผลต่อมุมการวิบัติของค้ำยันคอนกรีตค้ำยันใน



รูปที่ 6 การเปลี่ยนตำแหน่งเริ่มต้นวิถีสำหรับระบบอุโมงค์เก็บแก๊สใต้ดินที่พิจารณาการบดขยี้ใน และไม่พิจารณาการบดขยี้ใน



รูปที่ 7 ระดับแรงดันในอุโมงค์เก็บแก๊สของอุโมงค์แบบพิจารณาและไม่พิจารณาการบดขยี้ใน

ก่อนการเริ่มขุดในมวลหิน เพื่อเพิ่มความสมจริงในการวิเคราะห์ในอนาคต ควรพิจารณาการนำแบบจำลองพฤติกรรมวัสดุแบบไม่เป็นเชิงเส้น เช่น Concrete Damage Plasticity model สำหรับคานคองกรีตเสริมเหล็ก และอาจใช้ Hoek-Brown model สำหรับมวลหิน ในการวิเคราะห์ จากแนวคิดหลักของการศึกษาที่ผ่านมา ที่ไม่พิจารณาการบดขยี้ใน ในการวิเคราะห์เพราะสามารถยอมให้คานคองกรีตวิบัติได้ราบเท่าที่ยังช่วยถ่ายแรงดันไปยังมวลหินโดยรอบ แต่ผลการตรวจสอบนี้บ่งบอกว่า การวิบัติของคานคองกรีตไม่ได้เกิดพร้อมๆ กัน แต่เกิดเป็นเฉพาะที่ ก่อน (Localization) ดังนั้น 1) การออกแบบในอนาคตเพื่อป้องกันความเสี่ยงการกระจุกตัวของความเค้นในคานเหล็กที่อาจส่งผลต่อ Hydrogen Embrittlement ต้องพิจารณาเพิ่มความแกร่งและความแข็งแรงให้คานคองกรีต ซึ่งอาจอยู่ในรูปของการเพิ่มเหล็กเสริม 2) ตำแหน่งจุดเริ่มการแตกและการพัฒนารอยแตกในมวลหินเพื่อกำหนดวิธีการประเมิน Uplift จากงานวิจัยที่ผ่านมา จำเป็นต้องพิจารณาใหม่สำหรับ LRC ที่ใช้กักเก็บไฮโดรเจน

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการจำลองเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อตรวจสอบอิทธิพลของสภาวะความเค้นในที่ที่แตกต่างกัน เพื่อตรวจสอบตำแหน่งจุดเริ่มต้นของการวิบัติในมวลหินโดยรอบทั้งกรณีพิจารณาและไม่พิจารณาการบดขยี้ใน

จากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. อิทธิพลของสภาวะความเค้นในที่ ส่งผลต่อตำแหน่งจุดเริ่มต้นของการวิบัติอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งยังส่งผลต่อขีดจำกัดในการเก็บแรงดันภายในอุโมงค์เก็บแก๊ส
2. การเพิ่มขึ้นของความลึกอุโมงค์จะเพิ่มขีดความสามารถในการกักเก็บแก๊สในระดับแรงดันสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเห็นได้ชัดเจนสำหรับกรณีค่าอัตราส่วนความเค้นในที่ มากกว่า 1
3. ระบบคานคองกรีตทำให้เกิดการกระจายความเค้นใหม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนตำแหน่งจุดเริ่มต้นของการวิบัติในมวลหินโดยรอบ เมื่อเทียบกับการวิเคราะห์ในงานก่อนหน้าที่ไม่ได้พิจารณาการบดขยี้ใน ในการวิเคราะห์
4. แม้ว่าระบบคานคองกรีตมีส่วนช่วยในการกระจายและถ่ายแรงดันจากด้านในอุโมงค์เก็บแก๊สออกไปสู่มวลหินโดยรอบ อย่างไรก็ตามระบบคานคองกรีตจะถึงจุดวิบัติก่อน

5. อย่างไรก็ตาม การเพิ่มกำลังรับแรงดึงของดาดคอนกรีตชั้นในให้สูงขึ้น ไม่ได้ส่งผลต่อมุมการวิบัติในดาดคอนกรีตชั้นใน

การศึกษานี้ได้แสดงให้เห็นว่าองค์ความรู้จากงานวิจัยก่อนหน้าของระบบ LRC กักเก็บก๊าซหรืออากาศ ไม่สามารถนำมาใช้กับการกักเก็บไฮโดรเจนได้โดยตรง เนื่องจากแนวความคิดระบบ LRC ไม่สนใจการวิบัติของดาดคอนกรีตและการเสียรูปของดาดเหล็กชั้นในตรงตำแหน่งที่แรงดันภายในยังเข้าไปสู่มวลหินโดยรอบได้และดาดเหล็กไม่วิบัติ และยังช่วยป้องกันการรั่วไหลของแก๊ส แต่การนำมาใช้กักเก็บไฮโดรเจนโดยตรงนั้นหากดาดคอนกรีตวิบัติและทำให้เกิดการเสียรูปและความเค้นกระจุกตัว (Localization) จะนำไปสู่การเปราะเนื่องจากไฮโดรเจน ณ ตำแหน่งดังกล่าว และส่งผลให้ดาดเหล็กชั้นในสูญเสียความเหนียวทำให้ความสามารถในการรับแรงดึงลดลง และเกิดการวิบัติตามมาในที่สุด

การศึกษาในอนาคตควรมีการพิจารณาถึงความเหนียวของวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นระบบดาดชั้นใน เช่น อัตราส่วนการเสริมเหล็กในดาดคอนกรีตเสริมเหล็ก การใช้กลไกที่ซับซ้อนขึ้นในการวิเคราะห์รอยแตกร้าวในดาดคอนกรีตเสริมเหล็กให้การวิเคราะห์สะท้อนพฤติกรรมหลังการวิบัติของดาดคอนกรีต การตรวจสอบเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการและภาคสนามเพิ่มเติมเพื่อสนับสนุนผลลัพธ์ของแบบจำลอง ให้การประเมินความปลอดภัยของระบบอุโมงค์เก็บแก๊สใต้ดินสมบูรณ์ขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมสำหรับสนับสนุนทุนวิจัยผ่านทุนวิจัยมูลฐาน ปีงบประมาณ 2568 ผ่านโครงการนวัตกรรมและเทคโนโลยีขั้นสูงเพื่อการก่อสร้างอนาคตที่ยั่งยืน

เอกสารอ้างอิง

- [1] SEI, I., ODI, Climate Analytics, CICERO, and UNEP, *The Production Gap: The discrepancy between countries' planned fossil fuel production and global production levels consistent with limiting warming to 1.5°C or 2°C*. 2019.
- [2] REN21, (2023) *Renewables 2023 Global Status Report*. REN21 Secretariat, pp.
- [3] Hassan, Q., Viktor, P., J. Al-Musawi, T., Mahmood Ali, B., Algburi, S., Alzoubi, H.M., Khudhair Al-Jiboory, A., Zuhair Sameen, A., Salman, H.M. and Jaszczur, M. (2024). The renewable energy role in the global energy Transformations. *Renewable Energy Focus*, 48, pp. 100545.
- [4] Patanwar, Y.K., Kim, H.M., Deb, D. and Gujjala, Y.K. (2024). Underground storage of hydrogen in lined rock caverns: An overview of key components and hydrogen embrittlement challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, 50, pp. 116-133.
- [5] Rutqvist, J., Kim, H.M., Ryu, D.W., Synn, J.H. and Song, W.K. (2012). Modeling of coupled thermodynamic and geomechanical performance of underground compressed air energy storage in lined rock caverns. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 52, pp. 71-81.
- [6] Kim, H.M., Rutqvist, J., Jeong, J.H., Choi, B.H., Ryu, D.W. and Song, W.K. (2013). Characterizing Excavation Damaged Zone and Stability of Pressurized Lined Rock Caverns for Underground Compressed Air Energy Storage. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46, pp. 1113-1124.
- [7] Tunsakul, J., Jongpradist, P., Kongkitkul, W., Wonglert, A. and Youwai, S. (2013). Investigation of failure behavior of continuous rock mass around cavern under high internal pressure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 34, pp. 110-123.
- [8] Tunsakul, J., Jongpradist, P., Kim, H.M. and Nanakorn, P. (2018). Evaluation of rock fracture patterns based on the element-free Galerkin method for stability assessment of a highly pressurized gas storage cavern. *Acta Geotechnica*, 13, pp. 817-832.
- [9] Damasceno, D.R., Spross, J. and Johansson, F. (2023). Rock mass response for lined rock caverns subjected to high internal gas pressure. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15, pp. 119-129.
- [10] Damasceno, D.R., Spross, J. and Johansson, F. (2023). Effect of rock joints on lined rock caverns subjected to high internal gas pressure. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15, pp. 1625-1635.
- [11] Qu, T. and Xu, R. (2013). The Influence of Ratio of Reinforcement to Modulus of Elasticity of Reinforce Concrete Component. *Advanced Materials Research*, 859, pp. 233-237.
- [12] Thongraksa, A., Punya-in, Y., Jongpradist, P., Kim, H.M. and Jamsawang, P. (2021). Failure behaviors of rock masses around highly pressurized cavern: Initiation and modes of failure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 115, pp. 104058.