

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้ได้เสนอผลสรุปที่ได้จากการทบทวนและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการคืบหรือการเคลื่อนไหล (Creep) ที่สัมพันธ์กับความหนืดทั้งในเชิงยืดหยุ่นและเชิงพลาสติกของเกลือหิน รวมทั้งปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินโดยสรุปดังต่อไปนี้

2.1 คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน

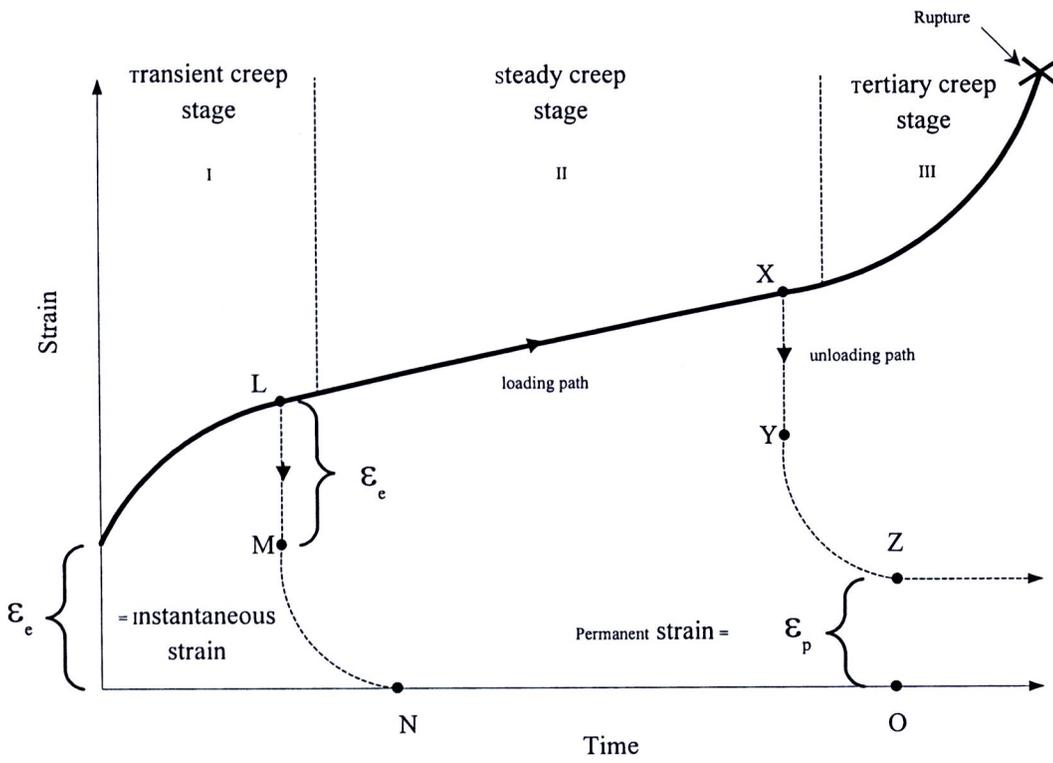
ผู้วิจัยหลายท่านเสนอว่าเกลือหินมีคุณสมบัติเหมือนโลหะและเซรามิก (Chokski and Langdon, 1991; Munson and Wawersik, 1993) แต่แท้จริงแล้วเกลือหินจัดเป็นหินชนิดหนึ่งประเภท Alkali halides ซึ่งมีคุณสมบัติไม่เหมือนกับโลหะ เซรามิก และหินอื่นๆ Aubertin (1996) และ Aubertin et al. (1992, 1993, 1999) ได้ศึกษาคุณสมบัติของเกลือหินและสรุปว่า เกลือหินมีคุณสมบัติแบบกึ่งเปราะกึ่งเหนียวหรือมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น-พลาสติก ซึ่งสอดคล้องกับ Fuenkajorn and Daemen (1988), Fokker and Kenter (1994) และ Fokker (1995, 1998)

Arieli et al. (1982) ได้ทำการทดสอบเกลือหินภายใต้อุณหภูมิตั้งแต่ 20 ถึง 200°C และพบว่า การเคลื่อนไหลภายในผลึก (Intracrystalline) ของ Synthetic salt จะถูกควบคุมโดยกระบวนการ Dislocation glide ซึ่งมีค่าความเค้นตั้งแต่ 10-20 MPa บริเวณจุดที่มีค่าความเค้นต่ำและมีอุณหภูมิสูง พบว่าการเคลื่อนไหลจะถูกควบคุมโดยกระบวนการ Dislocation climb และได้มีการทดสอบในเกลือหินที่เกิดตามธรรมชาติเพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมในช่วงที่เกิดอัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาขณะที่อุณหภูมิตั้งแต่ 20 ถึง 200°C โดยมีอัตราการความเครียดลดลงจาก 10^{-10} s^{-1} และความดันล้อมรอบเพิ่มขึ้นเป็น 30 MPa การทดสอบพบว่า การเกิดการไหลที่ความเค้นต่ำกว่า 15 MPa และอัตราการความเครียดต่ำกว่า 10^{-10} s^{-1} ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงการเคลื่อนไหลโดยกระบวนการ Dislocation glide และเพื่อศึกษาถึงอัตราที่ควบคุมทางด้านกลศาสตร์ Wawersik (1988) พบว่าการเกิด Cross-slip ของ Screw dislocations จะมีอัตราที่ค่อนข้างจำกัด Carter and Hansen (1983) สังเกตการเกิดรอยแตกเล็กๆ ในเนื้อหิน (Subgrain) ที่อุณหภูมิ 100 ถึง 200°C และได้แนะนำว่ากระบวนการ Dislocation climb จะเป็นตัวควบคุมอัตราในช่วงนี้ การทดสอบทางด้านแรงกดและแรงดึงกับ Synthetic salt พบว่าเมื่อมีแรงกดในแนว [001] ภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่า 200°C ผลึกจะแสดงลักษณะเป็น 3 ช่วง ของพฤติกรรมการแข็งตัว (Work hardening behavior) เมื่อเกิดการเคลื่อนใน Single [110]<110> system จะง่ายในการเกิด Glide stage หรือ Stage I ส่วนใน Stage II จะเกิดการ Hardening เนื่องจาก Second [110]<110> System ในขณะที่ Stage III จะมีลักษณะเช่นเดียวกับการเกิด Cross-slip ซึ่งผลึก

เดี่ยวจะแสดงการไหลที่ความเค้นต่ำกว่าผลึกชุด (Polycrystal) เนื่องจากยังมีการกระตุ้นจากการเลื่อนอยู่และไม่มีผลกระทบจาก Hardening และทิศทางของการกระจายตัว (Skrotzki and Haasen, 1988)

Jeremic (1994) พิจารณาลักษณะทางด้านกลศาสตร์ของเกลือหิน โดยแบ่งเป็นสามลักษณะคือ พฤติกรรมเชิงยืดหยุ่น (Elastic behavior) พฤติกรรมเชิงยืดหยุ่นพลาสติก (Elastic and plastic behavior) และพฤติกรรมเชิงพลาสติก (Plastic behavior) โดยพฤติกรรมเชิงยืดหยุ่นของเกลือหินจะถูกพิจารณาในลักษณะความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงและมีการวิบัติแบบเปราะ ความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงสามารถสังเกตได้เมื่อมีแรงกดต่ำกว่าแรงกดอ่อนตัว ในช่วงความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงจะขึ้นกับความเครียดเชิงยืดหยุ่นและสามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นได้ปกติแล้วเกลือหินจะมีสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นต่ำกว่าหินชนิดอื่นๆ ในส่วนของพฤติกรรมเชิงยืดหยุ่นพลาสติกจะเกิดขึ้นเมื่อแรงกดที่มากกระทำต่อเกลือหินยังไม่เกินจุดอ่อนตัว การเปลี่ยนรูปเมื่อปล่อยแรงกดจะทำให้เกลือหินกลับสู่สภาพเดิมหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เกลือหินมีการเปลี่ยนรูปไปชั่วคราวเท่านั้น แต่ในขณะที่เดียวกันเมื่อให้แรงกดที่สูงขึ้นเกลือหินจะเข้าสู่ช่วงที่เป็นพลาสติก กล่าวคือความเค้นจะเลยจุดความเค้นอ่อนตัวไปแล้วนั่นเอง เมื่อลดแรงกดเกลือหินจะไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ ถ้าให้แรงกดต่อไปเกลือหินจะไม่สามารถทนแรงกดที่สะสมไว้ได้และในที่สุดก็จะวิบัติ การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นและการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกจะพิจารณาแยกกัน ซึ่งเกลือหินจะแสดงคุณสมบัติทั้งทางด้านความเครียดแบบยืดหยุ่นและความเครียดแบบพลาสติก ความแตกต่างระหว่างพฤติกรรมเชิงยืดหยุ่นและพฤติกรรมเชิงพลาสติกคือ การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นจะเกิดขึ้นชั่วคราว (สามารถคืนตัวได้) ส่วนการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกจะเกิดขึ้นอย่างถาวร (ไม่สามารถคืนตัวได้) ระดับของการเปลี่ยนรูปแบบถาวรขึ้นกับอัตราส่วนของความเครียดแบบพลาสติกกับความเครียดทั้งหมด การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นและแบบพลาสติกสามารถสังเกตได้จากแรงกดในระยะสั้น (Short term loading) แต่ต้องมีขนาดของแรงกดสูงมาก ซึ่งพฤติกรรมเชิงพลาสติกของเกลือหินจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรจนกว่าแรงที่กระทำจะเกินจุดอ่อนตัว ที่แรงกดสูงเช่นนี้เกลือหินจะมีการเปลี่ยนรูปไปเรื่อยๆ ไม่มีที่สิ้นสุดหากแรงกดที่กระทำยังคงเท่ากับแรงกดคงที่ เมื่อถึงขีดจำกัดของความเครียดค่าหนึ่งเกลือหินจะไม่สามารถทนรับแรงกดต่อไปได้และจะวิบัติ การเปลี่ยนแปลงรูปของเกลือหินที่ได้รับอุณหภูมิในระดับสูงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนพฤติกรรมเป็นแบบกึ่งเปราะกึ่งเหนียว

การเปลี่ยนรูปมักจะขึ้นกับระยะเวลาที่อยู่ภายใต้แรงที่มากกระทำหรือการเคลื่อนไหล ซึ่งเป็นกระบวนการที่หินสามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างต่อเนื่องโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงความเค้น ความเครียดที่เกิดจากการเคลื่อนไหลซึ่งจะคืนตัวได้น้อยมากเมื่อมีการเอาแรงกดออกไป ดังนั้นเกลือหินจะแสดงการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก การเคลื่อนไหลหรือการเปลี่ยนรูปตามเวลาภายใต้แรงกดคงที่ของหินปรากฏเป็น 3 ช่วง (รูปที่ 2.1) คือ 1) ช่วงที่อัตราความเครียด



รูปที่ 2.1 ความเครียดที่เกิดขึ้นในเกลือหินกับระยะเวลาภายใต้แรงกดคงที่
(ดัดแปลงมาจาก Jeremic, 1994).

เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient phase, I) 2) ช่วงที่อัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาคงที่ (Steady-state phase, II) 3) ช่วงที่จะนำไปสู่การแตก (Tertiary phase, III) โดยเมื่อให้แรงกดในช่วงที่ 1 ที่จุด L จะทำให้ความเครียดลดลงไปยังจุด M อย่างรวดเร็ว และจะกลับไปสู่จุด O ที่จุด N ระยะ LM จะเท่ากับความเครียดที่ได้จากการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (Instantaneous strain, ϵ_e) เมื่อนำเอาความเค้นเพิ่มเข้าไปในช่วงอัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาคงที่ (Steady-state phase) จะทำให้เกิดความเครียดเชิงพลาสติกที่ได้จากการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Permanent strain, ϵ_p)

Wanten et al. (1996) ทำการศึกษาการเปลี่ยนรูปของผลึกเกลือเดี่ยว โดยผลึกที่มีความบริสุทธิ์สูงจะมีขนาด $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$ และทำการกดในแนว [001] การทดสอบจะทำในจุดที่มีอัตราความเครียดจาก 10^{-4} ถึง 10^{-7} s^{-1} ที่อุณหภูมิ 20 ถึง 200°C โดยผลึกมีอัตราส่วนความยาวแกนผลึกเท่ากับ 1:1:1 เพื่อศึกษาการเคลื่อนตัวหลายแนว ซึ่งตัวอย่างได้แสดงถึงลักษณะของ Work hardening behavior การศึกษาทางด้าน Microstructure พบว่าเกิดความหนาแน่นของ Dislocation ค่อนข้างสูงแต่ไม่มีการเกิดในลักษณะ Cross-slip หรืออาจมีน้อย การเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองทางด้าน Microphysics พบว่าข้อจำกัดของการเกิด Dislocation glide ขึ้นกับกลไกของการเปลี่ยนรูป

2.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินมีอยู่หลายประการ ซึ่งจะสะท้อนให้เห็นในรูปของการเปลี่ยนรูปหรือเกิดการเคลื่อนไหล รวมทั้งยังทำให้ความต้านทานต่อแรงกดหรือแรงดึงมีค่าลดลง ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การเคลื่อนไหลและความต้านทานของเกลือหินทั้งสถานะในชั้นเกลือหินและในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ขนาดผลึก แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึก อุณหภูมิ ความชื้น และสิ่งเจือปน เป็นต้น

ขนาดผลึกหรือขนาดเม็ดเกลือจะมีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนรูปร่างและการเคลื่อนไหลของเกลือหิน Fokker (1998) และ Aubertin (1996) อธิบายโดยการเปรียบเทียบขนาดผลึกกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 mm พบว่าผลึกที่มีขนาดใหญ่จะมีโอกาสเกิดแนวแตก (Cleavage plane) และระนาบเลื่อน (Slip plane) ได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาลักษณะทางด้านจุลภาค (Microscopic) โดย Langer (1984) ซึ่งได้ศึกษาและสรุปเกี่ยวกับผลกระทบของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกกับอัตราการเคลื่อนไหลของเกลือหิน โดยพบว่าเกลือหินที่มีผลึกหรือเม็ดเกลือขนาดเล็กที่ถูกกระทำภายใต้ความเค้นต่ำ การเคลื่อนไหลจะเกิดขึ้นจากการเลื่อนของรอยต่อระหว่างผลึกเกลือ (Dislocation climb) แต่สำหรับผลึกเกลือที่มีขนาดใหญ่ กระบวนการเปลี่ยนรูปจะเกิดจากการเลื่อนของรอยแตกและรอยร้าวในผลึกเกลือ (Dislocation glide)

Franssen and Spiers (1990), Raj and Pharr (1992) และ Senseny et al. (1992) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของผลึกและการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของเกลือหินพบว่า ความต้านแรงเฉือนและการเปลี่ยนแปลงรูปจะเกิดขึ้นตามแนวหรือทิศทางของผลึก ดังนั้นตัวอย่างเกลือหินที่มีขนาดเล็กเกินไปจะมีความต้านแรงกดที่ปรวนแปร ผลการทดสอบที่ได้จึงไม่สามารถเปรียบเทียบกับขนาดอื่นได้ ดังนั้น ASTM จึงได้ออกข้อกำหนดมาตรฐานสากลขึ้น (ASTM D2938, D2664, D3967) เพื่อที่จะกำหนดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างให้มีขนาดตามมาตรฐานและสามารถเทียบเคียงกันได้ กล่าวคือ เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างต้องมีขนาดมากกว่าสิบเท่าของขนาดเฉลี่ยของผลึก

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของเกลือหินในด้านความต้านทานของเกลือหิน เกลือหินที่มีลักษณะเนื้อต่างกันจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกต่ำกว่าบริเวณที่เป็นเนื้อเดียวกัน ลักษณะดังกล่าวนี้ Allemandou and Dusseault (1996) ได้สังเกตพฤติกรรมเกลือหินจากการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียนและการทดสอบแรงกดในแกนเดียวพบว่า ค่าความเค้นสูงสุดจะขึ้นกับแรงยึดเหนี่ยวภายในผลึกและรอยต่อระหว่างผลึกของเกลือหิน ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบโดย Fuenkajorn and Daemen (1988) ความเปราะเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของเกลือหินที่แสดงถึงความสามารถในการยึดเหนี่ยวระหว่างผลึก เช่น การเตรียมตัวอย่าง การตัดและการขัดตัวอย่างเกลือหิน จะพบว่าในบริเวณขอบของตัวอย่างอาจเกิดการแตกขึ้นได้ง่าย นั่นคือ เกลือหินมีความสามารถในการยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกค่อนข้างต่ำ

อัตราแรงกดที่กระทำต่อเกลือหินที่แตกต่างกันจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปตามเวลาหรือเปลี่ยนแปลงรูปร่างและใช้เวลาในการเปลี่ยนรูปไม่เท่ากัน กล่าวอีกนัยหนึ่งคือการเคลื่อนไหลของเกลือหินที่เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาในสภาวะแรงกดที่แตกต่างกัน ภายใต้อัตราความเค้นเกลือหินจะมีพฤติกรรมแบบเปราะ แต่ภายใต้อัตราแรงกดที่ต่ำจะทำให้พฤติกรรมของเกลือหินเป็นแบบพลาสติกมากขึ้น เป็นผลให้มีจุดอ่อนตัวของความต้านแรงกดที่ต่ำ ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวได้ศึกษาโดย Aubertin et al. (1993) และ Hardy (1996) พบว่าน้ำหนักกดทับในชั้นเกลือหินภายใต้ระยะเวลายาวแรงกดทับในเนื้อหินจะค่อยๆ ลดลง Hardy (1996) ได้ทำการทดสอบตัวอย่างเกลือหินด้วยแรงกด 10.3 MPa และรักษาระดับการเปลี่ยนรูปไว้ในระยะเวลา 12 เดือน พบว่าความต้านแรงกดจะลดลงไปถึง 21%

ผลกระทบของวิถึความเค้น (Stress history) ต่อพฤติกรรมเกลือหินได้มีผู้วิจัยหลายท่านตระหนักถึง (Lindner and Brady, 1984; Senseny, 1984; Nair and Boreasi, 1970; Lux and Heusermann, 1983; Versluis and Lindner, 1984; Munson and Dawson, 1984; Donath et al., 1988) สำหรับการทดสอบการเคลื่อนไหลแบบดั้งเดิมในห้องปฏิบัติการภายใต้ความเค้นคงที่ผลลัพธ์ที่ได้จะง่ายต่อการแปลความหมาย ซึ่งค่าที่ได้เหล่านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบในภาคสนามโดยต้องคำนึงถึงผลกระทบจากการเปลี่ยนรูปเนื่องจากวิถึความเค้นที่กระทำ ในการทดสอบพบว่าตัวอย่างเกลือหินที่ถูกกระทำด้วยความเค้นเดียวกันจะมีการเคลื่อน

โหลที่ต่างกันถ้าตัวอย่างเกลือหินนั้นมีวิถีความเค้นที่มากกระทำแตกต่างกัน แต่เกลือหินมีความจำที่ไม่ถาวรโดยเมื่อถูกกระทำในเวลาที่นานขึ้นจะพบว่าพฤติกรรมของเกลือหินจะมีลักษณะเหมือนกันโดยไม่คำนึงถึงวิถีความเค้น Wawersik and Hannum (1980) ทำการทดสอบแรงกดสามแกนแบบดั้งเดิม (Conventional triaxial tests) กับเกลือหิน โดยกำหนดตามวิถีความเค้นที่ต่างกันสามรูปแบบประกอบด้วยการให้แรงดันด้านข้างคงที่ ให้ความเค้นเฉื่อยคงที่ และแรงในแนวแกนคงที่ ซึ่งการทดสอบทั้งหมดจะถูกให้แรงภายใต้แรงกดสามแกนแบบขั้นบันได ผลการทดสอบพบว่าทั้งค่าความเครียดหลักน้อยที่สุดและความเครียดหลักมากที่สุด มีค่ามากที่สุดภายใต้การทดสอบตามวิถีความเค้นแบบให้แรงดันด้านข้างคงที่ และมีค่าน้อยที่สุดตามวิถีความเค้นแบบให้แรงในแนวแกนคงที่ จากผลการทดสอบดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าความแตกต่างของวิถีความเค้นมีผลต่อพฤติกรรมของเกลือหิน Lux and Rokahr (1984) ทำการเปรียบเทียบผลจากการทดสอบสามแกนแบบดั้งเดิมกับการทดสอบสามแกนแบบแรงดึง (Extension triaxial tests) ผลจากการทดสอบสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ผลการทดสอบในช่วงระยะสั้นและระยะยาว สำหรับช่วงการทดสอบระยะสั้นค่ากำลังรับแรงของเกลือหินจะขึ้นกับสถานะของความเค้นและความเค้นเฉื่อย ในส่วนของผลการทดสอบระยะยาวพบว่าค่าการยุบตัวของเกลือหินเนื่องจากการคืบของการทดสอบในสามแกนแบบแรงดึงจะให้ค่าน้อยกว่าการทดสอบแรงกดสามแกนแบบดั้งเดิม นอกจากนี้งานวิจัยยังพบว่าการวิบัติของตัวอย่างเกลือหินภายใต้การทดสอบสามแกนแบบแรงดึงจะมีลักษณะคล้ายกับการวิบัติในภาคนามรอบโพรงเกลือ Hunsche and Albrecht (1990) ทำการศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นสถิต (Hydrostatic stress) อุณหภูมิ ค่ากำลังรับแรงคงค้าง (Residual strength) และวิถีความเค้น โดยทำการทดสอบกับเกลือหินภายใต้แรงกดสามแกนแบบให้แรงเป็นจริง ผลจากการทดสอบพบว่าค่าตัวแปรสัมประสิทธิ์โหลด (Load parameter) ที่ถูกใช้วัดเป็นตัวกลางการเปรียบเทียบได้ให้ผลต่างจากการทดสอบวิถีความเค้นที่ต่างกัน ซึ่งตัวแปรสัมประสิทธิ์โหลดดังกล่าวเป็นค่าตัวแปรที่บ่งบอกความสามารถของกำลังรับแรงของวัสดุ ดังนั้นจากผลการทดสอบดังกล่าวจึงสามารถกล่าวได้ว่าค่ากำลังรับแรงของเกลือหินขึ้นกับวิถีความเค้น Allemandou and Dusseault (1993) ทำการทดสอบเกลือหินด้วยวิธีการคืบแบบวัฏจักรภายใต้แรงกดสามแกน (Triaxial cyclic creep tests) จุดประสงค์ของการทดสอบได้มุ่งเน้นไปที่ผลกระทบของวิถีความเค้น Octahedral stress และ Deveriatoric stress ที่มีต่อพฤติกรรมการคืบของเกลือหิน ในส่วนผลกระทบของวิถีความเค้นได้ใช้การทดสอบสามแกนแบบดั้งเดิมและสามแกนแบบลดแรงดันด้านข้าง (Radial-unloading triaxial test) พบว่าการทดสอบสามแกนแบบดั้งเดิมจะให้ค่าการยุบตัวมากกว่าวิธีลดแรงดันด้านข้าง แต่ค่ากำลังรับแรงที่ตำแหน่งความเครียดสูงสุดนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน Aubertin et al. (1999) และ Yahya et al. (2000) ทำการทดสอบแบบอัตราความเครียดโดยเกลือหินจะถูกกระทำภายใต้แรงสามแกนแบบดั้งเดิม และแบบลดแรงดันด้านข้าง (Reduced triaxial extension) ซึ่งแรงกดดังกล่าวจะถูกให้แรงดันด้านข้างค่อนข้างสูงโดยจะพิจารณาให้เกลือหินมีพฤติกรรมความเป็นพลาสติกสูง (Fully plastic) จากผลการทดสอบพบว่าความแตกต่างของวิถีความเค้นมี

ผลกระทบต่อพฤติกรรมกรให้แรงแบบวัฏจักรของเกลือหิน Jandakaew (2003) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของวิถีความเค้นต่อพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของเกลือหินโดยการทดสอบการเคลื่อนไหลในสามแกนแบบดั้งเดิมและแบบลดความดันด้านข้าง และศึกษาพฤติกรรมของมวลเกลือรอบโพรงเกลือโดยใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อประเมินผลความสำคัญของผลกระทบของวิถีความเค้นต่อโพรงกักเก็บในมวลเกลือหิน ผลการทดสอบระบุว่าที่ความเค้นเท่ากันตัวอย่างเกลือหินที่ทดสอบแบบดั้งเดิมมีการเปลี่ยนรูปร่างมากกว่าตัวอย่างที่ทดสอบแบบลดความดันด้านข้าง โดยความเหนียวยืดหยุ่นและความเหนียวพลาสติกของเกลือหินที่สอบเทียบได้จากวิธีการทดสอบแบบลดความดันด้านข้างมีค่าสูงกว่าคุณสมบัติที่ได้จากการทดสอบแบบดั้งเดิมเล็กน้อย สำหรับการหลุดตัวของผิวดินและการหลุดตัวของโพรงที่คำนวณได้จากการทดสอบแบบลดความดันด้านข้างมีค่าน้อยกว่าจากการทดสอบแบบดั้งเดิมร้อยละ 31.6 และร้อยละ 25.7 สำหรับแบบจำลองรูปทรงกลม ส่วนแบบจำลองรูปทรงกระบอกมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 30.1 และร้อยละ 23.3 ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของตัวอย่างเกลือหินจะขึ้นกับวิถีความเค้น โดยการทดสอบแบบลดความดันด้านข้างให้ผลที่สอดคล้องกับความเค้นในภาคสนามมากกว่าวิธีการแบบดั้งเดิม แต่วิธีการทดสอบแบบดั้งเดิมแสดงผลการเคลื่อนไหลและคุณสมบัติของตัวอย่างเกลือหินเป็นไปในเชิงอนุรักษ์มากกว่า

ความร้อนหรืออุณหภูมิจะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนรูปของเกลือหินอย่างมาก โดยจะทำให้ช่วงเวลากการเคลื่อนไหลยาวนานมากขึ้นและทำให้ความเหนียวของเกลือหินลดลง (Broek and Heilbron, 1998) การศึกษาเกี่ยวกับอุณหภูมิและความลึกในชั้นหินมีผู้วิจัยหลายท่านได้ศึกษาไว้แล้ว (Franssen and Spiers, 1990; Raj and Pharr, 1992; Senseny et al., 1992; Carter et al., 1993; Schneefub and Droste, 1996; Berest et al., 1998) การศึกษาดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า ระดับความลึกของชั้นหินที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มีความร้อนสูงขึ้น ความร้อนจะทำให้เกลือหินมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับพลาสติกมากยิ่งขึ้นและทำให้ความต้านแรงกดลดลง โดยปกติเกลือหินจะมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 800°C แต่การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600°C ตลอดระยะเวลาเพียง 8 ชั่วโมง ก็สามารถทำให้เกลือหินสูญเสียความต้านแรงกดไปได้ การทดสอบในห้องปฏิบัติการเกี่ยวกับอุณหภูมิ Cristescu and Hunsche (1996) ได้แนะนำว่าการทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C ควรใช้อัตราการยวบตัวที่ต่ำกว่า 10^{-8} s^{-1} และที่อุณหภูมิ 200°C ควรใช้อัตราการยวบตัวต่ำกว่า 10^{-7} s^{-1} เพราะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกลือหินเกิดการเคลื่อนไหลเร็วขึ้น กล่าวคือ จะทำให้เกลือหินมีการเปลี่ยนรูปได้ง่าย (Hamami et al., 1996) นอกจากนั้นแล้วอัตราการเคลื่อนไหลของเกลือหินที่มีการเปลี่ยนรูปในช่วงที่อัตราความเครียดเปลี่ยนแปลงตามเวลาและช่วงที่อัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาคงที่จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Senseny et al., 1986; Handin et al., 1984; Lama and Vutukuri, 1978, Dreyer, 1973) ซึ่งกฎพฤติกรรมของเกลือหินที่ได้จะตระหนักถึงผลกระทบที่เกิดจากอุณหภูมิโดยพิจารณาเป็นตัวแปรหนึ่งที่อยู่ในสมการความสัมพันธ์ แต่จะไม่คำนึงถึงผลกระทบของอุณหภูมิถ้าทำการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นอุณหภูมิที่จะทำการทดสอบควรจะควบคุมให้มีค่าคงที่

ความชื้นจะทำให้คุณสมบัติเกลือหินเปลี่ยนไป โดยความต้านแรงกดของเกลือหินจะลดลง (Hunsche and Schulze, 1996; Cleach et al., 1996) เนื่องจากเกลือหินจะมีความไวต่อความชื้นในอากาศ ความชื้นจะทำปฏิกิริยาเคมีกับเกลือหินทำให้เกิดการละลายเกลือและมีน้ำเกลือเอี่ยมขึ้นมา สำหรับการเตรียมตัวอย่างเกลือหินในห้องปฏิบัติการจะต้องป้องกันความชื้นด้วยการนำตัวอย่างเกลือหินมาห่อหุ้มด้วยพลาสติกกันความชื้น ซึ่งความชื้นสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายเมื่อมีอุณหภูมิเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของความชื้นต่อความต้านแรงกดได้ศึกษาโดย Billiotte et al. (1996); Bonte (1996) และ Adler et al. (1996) โดยการทดสอบหาความต้านแรงกดกับตัวอย่างเกลือหินที่มีความชื้นสูงด้วยการนำตัวอย่างเกลือหินแช่ในน้ำเกลือ พบว่าเกลือจะมีความต้านแรงกดลดลงซึ่งจากเดิมเกลือหินที่แห้งปกติมีกำลัง 30 MPa ก็มีกำลังลดลงเหลือเพียง 1 MPa เมื่อมีความชื้นในเกลือหินเพียง 7% Varo and Passaris (1977) ได้ทำการทดสอบการเคลื่อนไหลในแกนเดียว (Uniaxial creep tests) ของตัวอย่างเกลือหินบริสุทธิ์ภายใต้การผันแปรของค่าความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidities, R. H.) ต่างๆ กัน ระดับของความชื้นถูกควบคุมโดยใช้ท่อปิดที่บรรจุสารเคมีประเภทแคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride) และลิเทียมไนเตรต (Lithium nitrate) อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 60°C โดยค่าของความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่าง 13 ถึง 87% ผลที่ได้จากการทดสอบพบว่า ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่บรรยากาศจะมีผลกระทบต่ออัตราการเคลื่อนไหลของเกลือหิน โดยเฉพาะที่ความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 75% เมื่อเกลือหินเกิดกระบวนการละลายทำให้เกิดการเคลื่อนไหลมากขึ้น ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าเมื่อค่าความชื้นสูงขึ้นจะทำให้อัตราการเปลี่ยนรูปของเกลือหินมากขึ้น และเมื่อนำตัวอย่างเกลือหินไปแช่ในน้ำเกลือพบว่าอัตราการเคลื่อนไหลที่เกิดขึ้นจะสูงกว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% โดยตัวอย่างจะเกิดการวิบัติได้อย่างรวดเร็วเนื่องจากกระบวนการละลาย

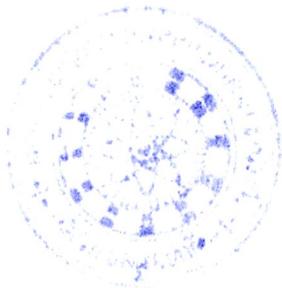
สิ่งเจือปนหรือสิ่งสกปรกในเนื้อหินเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อความต้านแรงกดของเกลือหิน สิ่งเจือปนเหล่านี้ได้แก่ Anhydrite และตะกอนอื่นๆ ที่มีการกระจายตัวในเกลือหิน บางกรณีจะลดความต้านแรงกดและทำให้เกลือหินมีพฤติกรรมการเคลื่อนไหลที่ต่างกันออกไป (Peach, 1996; Hunsche and Schulze, 1996; Hansen et al., 1987) สิ่งเจือปนในเกลือหินจะมีผลต่อพฤติกรรม การเคลื่อนไหลแม้จะมีจำนวนเพียงเล็กน้อยก็ตามเพราะสิ่งเจือปนในเนื้อหินจะเป็นตัวกีดขวางแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกและการเคลื่อนไหลของเกลือหิน ทำให้เกิดการแปรผันในเชิงกลศาสตร์โดยจะทำให้แรงกดมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอและไม่ต่อเนื่องกัน (Franssen and Spiers, 1990; Raj and Pharr, 1992; Senseny et al., 1992) สิ่งเจือปนหรือสิ่งสกปรกที่พบในเกลือหินจะมีขนาดและปริมาณที่ต่างกัน โดยตัวอย่างที่มีขนาดเล็ก เช่น ขนาดของตัวอย่างที่นำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ สิ่งเจือปนที่พบจะเป็นแร่เหล็กและแร่ดินซึ่งแทรกอยู่ระหว่างผลึกหรือชั้นหิน นอกจากนั้นได้มีผู้วิจัยเสนอว่าลักษณะของสิ่งเจือปนที่พบอยู่ในเกลือหินตามธรรมชาติประกอบด้วย 3 รูปแบบ ด้วยกัน คือ 1) สิ่งเจือปนที่กระจายอยู่ระหว่างผลึกเกลือหรือแทรกตัวเป็นกลุ่ม 2) น้ำที่แทรกอยู่ในโครงสร้างของผลึกเกลือหรือปรากฏในลักษณะน้ำเกลือแทรกอยู่ระหว่างผลึก และ 3) ประจุไอออนของ K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Br^- และ I^- ซึ่งตรึงอยู่ในโครงสร้างผลึก นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบตัวแปรที่ได้จากการทดสอบเกลือ

หินบริสุทธิ์ในช่วงที่อัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาที่ รวมทั้งเกลือหินที่มี $MgCl_2$ 0.6% และเกลือหินที่มี KCl 0.1% เป็นองค์ประกอบ เพื่อศึกษาผลกระทบต่ออัตราการเคลื่อนไหลของเกลือหิน แต่ไม่สามารถหาความสัมพันธ์ได้เนื่องจากข้อมูลไม่เพียงพอ (Handin et al., 1984) ขนาดของตัวอย่างที่นำมาทดสอบเป็นอีกปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของเกลือหิน โดย Senseny (1984) ศึกษาผลกระทบของขนาดตัวอย่างกับการเคลื่อนไหลของเกลือหินที่มีการเปลี่ยนรูปในช่วงที่อัตราความเครียดเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient phase) และช่วงที่อัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาที่ (Steady-state phase) ซึ่งทำการศึกษาโดยใช้ตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มม. และ 50 มม. โดยสัดส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (Length to diameter ratio, L/D) เท่ากับสาม จากนั้นทำการทดสอบแรงกดในสามแกนภายใต้อุณหภูมิต่างๆ ผลจากการทดสอบพบว่าขนาดของตัวอย่างมีผลกระทบในช่วง Transient phase แต่ไม่มีผลกระทบในช่วง Steady-state phase ซึ่งความเครียดที่ได้ในช่วง Transient phase ของตัวอย่างที่มีขนาดเล็กจะมีค่ามากกว่าตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นกฎพฤติกรรมเกลือหินที่พัฒนาได้จากข้อมูลในห้องปฏิบัติการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากสมการความสัมพันธ์ที่ได้จากช่วง Transient creep จะมีค่าการเปลี่ยนรูปของเกลือหินสูง Mirza (1984) และ Mirza et al. (1980) ได้ทำการเปรียบเทียบอัตราความเครียดที่ได้จากช่วงที่อัตราการเปลี่ยนความเครียดต่อช่วงเวลาที่เช่นกัน โดยทำการทดสอบเกลือหินที่ได้จากเสาค้ำยัน (Pillars) จากการทดสอบพบว่าผลกระทบของขนาดตัวอย่างมีการเปลี่ยนรูปน้อยมาก โดยเฉพาะเกลือหินที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันมากๆ ซึ่งตามธรรมชาติของเกลือหินมักไม่ปรากฏรอยแตกหรือรอยร้าวในเนื้อหิน แต่หากเนื้อหินมีรอยแตกหรือรอยร้าวสิ่งเหล่านี้จะสามารถประสานตัวโดยกระบวนการ Recrystallization

ข้อสังเกตประการหนึ่งคือ ยังไม่มีนักวิจัยท่านใดแม้แต่ในต่างประเทศที่ได้เคยทำการทดสอบการคืบของเกลือหินในสามแกนจริง ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$) แม้จะมีนักวิจัยหลายท่านตระหนักว่าผลกระทบของความเค้นที่ไม่เท่ากัน (Anisotropic Stress Field) และวิถีของความเค้น (Stress Path) จะมีผลกระทบต่อความเครียดในเชิงเวลาของเกลือหิน



สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 2...6...11...8... 2555
เลขทะเบียน 250493
เลขเรียกหนังสือ



Մ. Գրքերի և պարբերականների
կենտրոն
ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ
ԱՆՏՐԱԿՆԵՐԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅԱՆ
ԳՐԱԴԱՐԱՆ