

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 4 ประเด็นหลัก คือ

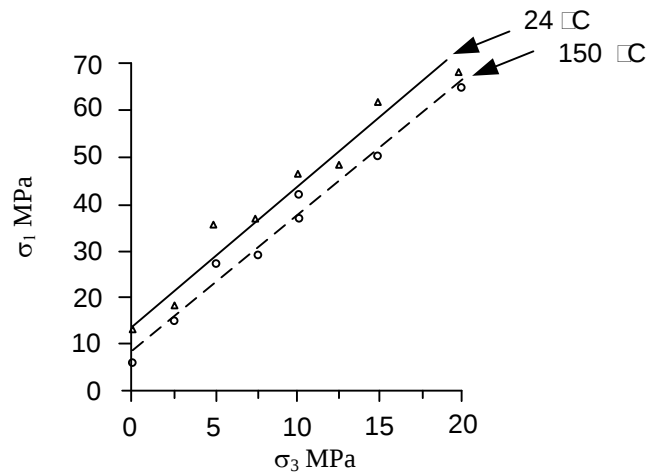
2.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการรับแรงเฉือนของรอยแตก

Garanmayeh et al. (2010) ได้ศึกษากำลังรับแรงเฉือนที่อุณหภูมิสูงของ Sn-Sb-Ag (Monolithic) และ Sn-Sb-Ag-Al₂O₃ (Composite) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของโลหะทั้งสองโดยการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนตรงแบบปั๊มเฉือน (Shear punch testing) ที่อุณหภูมิในช่วง 25–130°C ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 25–130°C ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่จุดครากและค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดมีค่าลดลง

Rodrigues et al. (2011) ได้ศึกษากำลังรับแรงเฉือนบริเวณจุดต่อของคานภายใต้สภาวะไฟไหม้ จุดมุ่งหมายหลักของงานวิจัยนี้คือการตรวจวัดผลกระทบจำนวนของรูเจาะในจุดต่อกับกำลังรับแรงเฉือนแบบ Perfobond ซึ่งวิธีการประเมินกำลังรับแรงเฉือนและความเหนียวของตัวอย่างที่จุดต่อที่อุณหภูมิสูงได้ทำการให้ความร้อนกับตัวอย่างจากอุณหภูมิห้องไปถึงอุณหภูมิสูงที่ต้องการ จากนั้นให้น้ำหนักกดทับจนกระทั่งตัวอย่างหินวิบัติ ทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมของจุดต่อเหล่านี้ที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง ผลปรากฏว่าการรับแรงเฉือนที่อุณหภูมิสูงของจุดต่อเหล่านี้ไม่ดีเท่ากับอุณหภูมิห้อง

2.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการรับแรงกดของหิน

Araujo et al. (1997) ได้ทำการวิจัยคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของแหล่งกักเก็บหินในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิห้อง โดยทำการทดสอบแบบสามแกนซึ่งควบคุมการกดให้คงที่กับตัวอย่างหิน Friable sandstone จากแอ่ง Potiguar ทางตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศบราซิล ตัวอย่างได้ถูกทดสอบที่อุณหภูมิ 24°C, 80°C และ 150°C โดยความเค้นล้อมรอบจะแปรผันระหว่าง 2.5–150 MPa ค่ากำลังรับแรงกดจากผลการทดสอบสามารถระบุได้ว่า ความสามารถในการรับแรงกดจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในรูปที่ 2.1 แสดงค่าเส้นถดถอยในระนาบ σ_1 - σ_3 สำหรับอุณหภูมิ 24°C และ 150°C ของชั้นหินทราย ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า โดยเฉลี่ยแล้วกำลังรับแรงกดจะลดลง 18% เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 24–150°C



รูปที่ 2.1 เกณฑ์การแตกจากการทดสอบ multiple failure ของชั้นหินทราย (Araujo et al., 1997)

Fall et al. (2009) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิสูงต่อกำลังและโครงสร้างขนาดเล็กของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ถม เช่น ความพรุน โครงสร้างของรูพรุน โดยชุดการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์หลังจากผ่านการบ่มที่เวลาต่างกันและอุณหภูมิต่างกัน ตัวอย่างที่ถูกทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C39 ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ การทดสอบกำลังรับแรงกดที่อัตราการเปลี่ยนรูปร่างคงที่ที่ 1 mm/min การเปลี่ยนรูปร่างแกนจะถูกบันทึกอัตโนมัติโดยระบบการเก็บข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์ ตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ชนิดต่างๆ ถูกทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C, 200°C, 400°C และ 600°C ในห้องปฏิบัติการ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิสูงมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ โดยทั่วไปเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 200°C จะทำให้ความแข็งแรงของซีเมนต์เพสต์ส่วนมากสูงขึ้น มีการกระจายตัวของความพรุนของซีเมนต์เพสต์เล็กน้อย เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 200°C ความแข็งแรงของซีเมนต์เพสต์จะลดลง ที่อุณหภูมิเกิน 400°C ค่ากำลังส่วนมากจะลดลงอย่างชัดเจน และยังสรุปได้ว่ากำลังรับแรงกดของซีเมนต์เพสต์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างขนาดเล็ก (ความพรุน การกระจายตัวของความพรุนและแร่)

Xu et al. (2009) ได้วิจัยผลกระทบของอุณหภูมิต่อลักษณะทางกลศาสตร์ของหินแกรนิตซึ่งถูกวิเคราะห์โดยใช้การสแกนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning electron microscope) การหักเหของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) การทดสอบโดยการส่งผ่านคลื่นเสียง (Acoustic emission) และการเปลี่ยนแปลงของกลไกขนาดเล็กแบบเปราะ-พลาสติก (The micromechanism of brittle-plastic transition) ในการทดสอบได้ใช้ตัวอย่างหินยาว 50 mm เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm ตัวอย่างแต่ละกลุ่มถูกเพิ่มความร้อน 25°C, 50°C, 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C, 800°C, 900°C, 1000°C, 1100°C, 1200°C และ

1300°C ในการทดสอบได้ควบคุมอัตราการกดที่ 0.0015 mm/s ผลการทดสอบด้วยการสแกนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวรอยแตกมีลักษณะการแตกแบบผสมของรอยร้าวที่เกิดผ่านผลึก ซึ่งเกิดการแตก การเลื่อน และเกิดรอยบวมที่ผิวที่อุณหภูมิ 800°C ผลการทดสอบการหักเหของรังสีเอ็กซแสดงให้เห็นว่าบางผลึกของหินแกรนิตมีการเปลี่ยนแปลง และเมื่อทดสอบโดยการส่งผ่านคลื่นเสียงแสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงกดมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นประมาณ 800°C การแตกของหินแกรนิตมีการเปลี่ยนแปลงจากการแตกแบบเปราะเป็นการแตกแบบกึ่งเปราะ กำลังรับแรงกดเฉลี่ยและโมดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่างๆ ในตารางที่ 2.1

Zhao et al. (2012) กล่าวว่าประสิทธิภาพและนวัตกรรมทางเทคโนโลยีของการพัฒนาเครื่องทดสอบหินแบบให้แรงสามแกน XPS-20MN ภายใต้อุณหภูมิสูงและความดัน ในรายงานนี้ได้นำเสนอผลการทดสอบตัวอย่างถ่านหินและหินแกรนิตที่อุณหภูมิสูงและที่ความดันสูง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นลักษณะของความเค้น-ความเครียดของตัวอย่างถ่านหินที่อุณหภูมิสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งลักษณะพลาสติกที่เพิ่มขึ้น ผลการทดสอบแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงในรูปของความร้อนและรูปแบบการแตกของตัวอย่างหินแกรนิตขนาดใหญ่ที่อุณหภูมิและความดันสูง เช่น โมดูลัสความยืดหยุ่นกับอุณหภูมิ และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวความร้อนเชิงเส้นตรงของหินแกรนิตที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในขณะที่โมดูลัสความยืดหยุ่นลดลง (ลดลงในลักษณะเอกซ์โพเนนเชียลฟังก์ชันกัณหอุณหภูมิ)

2.3 ผลกระทบของความเค้นล้อมรอบต่อกำลังรับแรงกดของหิน

Fuenkajorn and Kenkhunthod (2010) ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว และกำลังรับแรงกดในสามแกนโดยใช้โครงกดทดสอบหลายแกนเพื่อประเมินผลกระทบของอัตราการให้แรงต่อความแข็งแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหินทราย 3 ชนิด การเปลี่ยนแปลงความเค้นภายในแนวแกนถูกควบคุมด้วยอัตราคงที่ที่ 0.001, 0.01, 0.1, 1.0 และ 10 MPa/s โดยรักษาความดันล้อมรอบคงที่ที่ 0, 3, 7 และ 12 MPa ความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของหินทรายเพิ่มขึ้นเป็นทวีคูณกับอัตราการให้แรง โดยอัตราการให้แรงขึ้นอยู่กับสมการการคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและแรงเฉือน ซึ่งเป็นพื้นฐานต่อข้อสมมติฐานของพลังงานความเครียดเบี่ยงเบนคงที่ของหินที่แตกภายใต้ความเค้นตั้งฉาก จึงเป็นเหตุเป็นผลให้ได้สมการที่ขึ้นกับอัตราการให้แรงของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและแรงเฉือน ส่งผลให้เหมือนกับสมการ brittle isotropic in tact rock

ตารางที่ 2.1 กำลังต้านทานแรงกดเฉลี่ยและมอดูลัสความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่างๆ

(Xu et al., 2009)

Temperature (°C)	25	200	500	800	900	1000	1100	1200
Compressive strength σ_c (MPa)	191.90	135.96	151.90	185.22	89.94	71.61	77.98	36.09
Elastic modulus E (GPa)	38.37	28.68	31.25	25.11	11.02	8.39	6.61	2.87

Kapang et al. (2012) ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในสามแกนจริงเพื่อตรวจสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกที่ถูกจำลองขึ้นในหินทราย 3 ชนิดของประเทศไทย โดยโครงทดสอบแบบหลายแกนได้ถูกใช้เพื่อให้ความเค้นล้อมรอบ (σ_p และ σ_o) ตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นบล็อกสี่เหลี่ยมผืนผ้า และมีขนาด 76×76×126 mm ระบายของรอยแตกที่ถูกจำลองขึ้นทำมุมเอียง 59.1° กับความเค้นหลักในแนวแกน โดยผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความเค้นล้อมรอบที่ขนานกับระนาบรอยแตกสามารถปลดกำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกได้ภายใต้ความเค้นตั้งฉากเดียวกันรอยแตกที่อยู่ภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่ขนานกับระนาบรอยแตกที่มีค่าสูง พบว่ามีการขยายตัวของรอยแตกมากกว่าอยู่ภายใต้ความเค้นล้อมรอบที่ขนานกับระนาบรอยแตกที่มีค่าต่ำ จากเกณฑ์ของ Coulomb ค่าของมุมเสียดทานลดลงในเชิงเอกซ์โพเนนเชียลเมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนของความเค้นล้อมรอบ (σ_p/σ_o) และค่าความเค้นยึดติดมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มค่าความเค้นล้อมรอบที่ขนานกับระนาบรอยแตก ค่าความเค้นล้อมรอบ σ_p ไม่ส่งผลกระทบต่อค่ามุมเสียดทานพื้นฐานของรอยแตกพื้นผิวเรียบ และการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกภายใต้ $\sigma_p = 0$ พบว่ามีความสัมพันธ์กันเป็นอย่างดีกับผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบโดยตรง ดังนั้นอาจตั้งสมมติฐานได้ว่าเมื่อมีการให้แรงด้านข้างในทิศทางที่ขนานกับระนาบรอยแตก (σ_p) และเมื่อพื้นผิวของความขรุขระได้รับความเค้นดังกล่าวก็อาจเกิดความเครียดภายในพื้นผิวรอยแตก เป็นผลให้เกิดการเฉือนหรือการเลื่อนไหลได้ง่ายกว่ากรณีที่ไม่มีความเค้นล้อมรอบ

Song and Haimson (1997) ได้จำลองหลุมเจาะในตัวอย่างหินทรายและหินแกรนิตเพื่อศึกษาพฤติกรรมและความสัมพันธ์ด้านการแตกของหินในหลุมเจาะ (Borehole breakout) และความเค้นด้วยเครื่องทดสอบแรงกดในสามแกนจริง โดยใช้การสันนิษฐานที่ว่าสภาวะความเค้นที่ขอบเขตรอยแตกของผนังหลุมเจาะมีค่าความแข็งที่เท่ากัน ซึ่งกฎเกณฑ์ของ Mohr-Coulomb ไม่สามารถนำมาใช้ในการพิจารณาการแตกของหลุมเจาะได้ แต่กฎเกณฑ์ของแรงกดในสามแกนจริงใช้ได้ดีกว่าเนื่องจากผลของ σ_2 มีความเหมาะสมต่อขอบเขตของการแตก เช่น กฎเกณฑ์ของ Nadai ใช้สำหรับหินทราย และกฎเกณฑ์ของ Mogi ใช้สำหรับหินแกรนิต

$$\tau_{\text{oct}} = f_1 (\sigma_{\text{oct}}) \quad (2.1)$$

เมื่อ $\tau_{\text{oct}} = 1/3[(\sigma_1 - \sigma_3)/2 + (\sigma_2 - \sigma_3)/2 + (\sigma_3 - \sigma_1)/2]$

และ $\sigma_{\text{oct}} = 1/3(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$

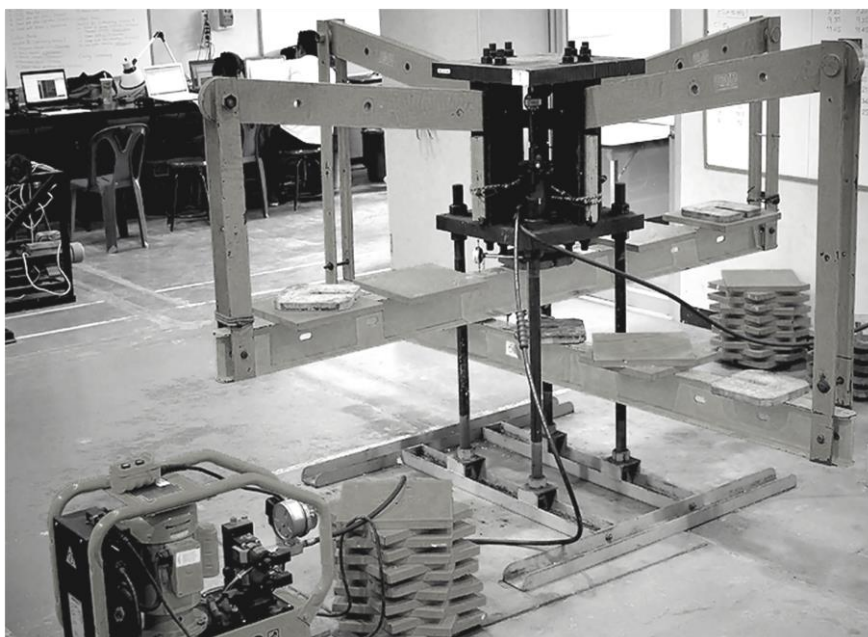
โดยที่ f_1 คือ ผลที่ได้จากการทดสอบ

$$\tau_{\text{oct}} = f_2 (\sigma_2^m) \quad (2.2)$$

เมื่อ $\sigma_{\text{oct}} = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$

โดยที่ f_2 คือฟังก์ชันที่เพิ่มขึ้นทางคณิตศาสตร์ขึ้นกับชนิดหิน การวิเคราะห์แผ่นหินบาง (Thin section) มีบทบาทสำคัญต่อกลไกทางกลศาสตร์ของการแตก และค่าความแข็งแรงขึ้นกับชนิดของหิน

Walsri et al. (2009) ได้ทำการพัฒนาโครงทดสอบในสามแกนจริง (รูปที่ 2.2) เพื่อหากล้ารับแรงกดและกำลังรับแรงดึงภายใต้ความเค้นในสามทิศทางจริงสำหรับการทดสอบหินทราย 3 ชนิด ภายใต้ความเค้นกดในสามแกนจริง ผลลัพธ์ที่ได้ของหินทรายเป็นแบบเท่ากันทุกทิศทาง (Transversely isotropic) โดยได้มีการตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นในทิศทางที่ขนานกับ การวางตัวของชั้นหิน แต่อัตราส่วนของปัวซองบนระนาบปกติมีค่าน้อยกว่าผลที่ได้ในทิศทางขนานกับการวางตัวของชั้นหิน ผลการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลภายใต้แรงกดในแกนเดียวมีผลกระทบต่อค่าความเค้นหลักกลางของค่ากำลังดึงสูงสุดของหิน ซึ่งการทดสอบตัวอย่างหินในสามแกนเป็นกิจกรรมสำคัญที่รวมอยู่ในการสำรวจ วิเคราะห์ และออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมในมวลหิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างที่อยู่ใต้ดิน เช่น อุโมงค์ และเหมืองใต้ดิน เป็นต้น อย่างไรก็ตามการทดสอบแรงกดในสามแกนนี้ส่วนใหญ่จะไม่สอดคล้องกับสภาวะของความเค้นที่เกิดขึ้นจริงในภาคสนาม กล่าวคือ ความเค้นในแกนหลักในสามทิศทางไม่จำเป็นต้องเท่ากัน คือ $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ เรียกว่า ความเค้นกดในสามแกนจริง แต่การทดสอบโดยการจำลองความเค้นกดในสามแกนจริงจะทำให้ยากและใช้เครื่องมือพิเศษที่มีราคาสูงมาก (อยู่ในระดับหลายล้านดอลลาร์) ดังนั้นการทดสอบแบบกดในสามแกนจริงจึงไม่เป็นที่นิยมและแพร่หลาย ซึ่งโดยสรุปแล้วข้อเสียของเครื่องกดในสามแกนจริงที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันคือ 1) มีราคาสูง 2) มีความซับซ้อนในการใช้งาน 3) ไม่สามารถทดสอบการเคลื่อนไหลของหินได้อย่างต่อเนื่อง 4) ใช้พลังงานไฟฟ้ามากเพื่อที่จะควบคุมแรงกดให้คงที่ (Servo-Control) และ 5) ยากที่จะรักษาระดับของแรงให้คงที่อย่างแท้จริงในช่วงเวลาการทดสอบที่ต้องการความเค้นคงที่ด้านข้าง



รูปที่ 2.2 โครงทดสอบในสามแกนจริง (Walsri et al., 2009)

2.4 การอัดของเสียในหลุมลึกในหินแกรนิต

Gibb (1999) กล่าวว่าความปลอดภัยในการกักเก็บของเสียกัมมันตรังสีโดยเฉพาะพลังงานที่ใช้แล้ว เป็นหนึ่งในความท้าทายของวงการวิทยาศาสตร์ในปัจจุบัน วิธีแก้ปัญหาที่แนะนำกันในระดับชาติก็คือการกำจัดทางธรณีวิทยา โดยการฝังในเหมืองและการออกแบบทางวิศวกรรมในพื้นที่กักเก็บแบบ Multi-barrier ถึงแม้จะเรียกว่าการกักเก็บในที่ลึกแต่ก็ถือว่าตื้นในทางธรณีวิทยา ของโครงการใหม่ๆ ในปัจจุบันภายใต้การพัฒนากักเก็บของเสียกัมมันตรังสีในหลุมที่ลึกมากๆ และมีอุณหภูมิสูง ความก้าวหน้าในองค์ความรู้เรื่องหินเปลือกโลกและของเหลวที่อยู่ระดับลึกหลายกิโลเมตรชี้ให้เห็นได้ชัดว่าการกักเก็บของเสียกัมมันตรังสีในที่ลึกมากๆ มีความปลอดภัยและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและของโครงการใหม่ๆ ได้มีความพยายามที่จะใช้ประโยชน์จากศักยภาพความร้อนที่ออกมาจากของเสียกัมมันตรังสี จึงได้มีการนำเสนอการใช้ประโยชน์จากเหมืองและหลุมเจาะ ความรู้ส่วนมากในการกักเก็บของเสียที่ประเทศสวีเดนจะทำการตรวจสอบที่ Aspo ในการกักเก็บของเสียอุณหภูมิข้างในและรอบๆ ภาชนะบรรจุของเสีย (วัสดุที่ทำจากทองแดงหรือโลหะอื่นๆ มีทั้งรูปทรงกระบอกหรือทรงลูกบาศก์ ใช้บรรจุของเสียก่อนที่จะนำไปทิ้งในหลุมเจาะหรือในเหมือง) อยู่ในระดับที่ต่ำ โดยปกติอุณหภูมิจะต่ำกว่า 150°C เพื่อลดการก่อก้อนของภาชนะบรรจุของเสียและป้องกันการพาความร้อนของน้ำบาดาลทั้งในและนอกพื้นที่กักเก็บของเสีย นอกจากนี้อุณหภูมิที่สูงกว่า 90°C สามารถทำให้เกิดปัญหากับเบนทอไนด์ที่ปิดผนึกล้อมรอบภาชนะบรรจุของเสียได้ ปริมาณการรังสีระดับสูงในแต่ละภาชนะบรรจุ

ของเสียและระยะห่างของภาชนะบรรจุของเสียจะถูกใช้เป็นเกณฑ์ในการเลือกสถานที่และสร้าง “ความปลอดภัย” สำหรับการกักเก็บในเมือง ไม่เพียงแค่สภาพทางธรณีวิทยาและธรณีเคมีที่ต้องตรวจสอบอย่างละเอียด แต่ผลกระทบเหล่านี้ต้องมีการคาดการณ์ไว้ด้วย แม้ว่าหินอัคนีและหินแปรส่วนมากจะมีความสามารถในการซึมผ่านไม่ได้ แต่การซึมผ่านของน้ำก็ถูกควบคุมด้วยชุดรอยแตก และเป็นไปได้ยากที่หินที่ตกผลึกในชั้นบนของเปลือกโลกจะไม่มีรอยแตก