

บทที่ 7

การวิเคราะห์เสถียรภาพของโพรงในเกลือหิน ด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (FLAC 4.0)

7.1 วัตถุประสงค์

การคำนวณโดยใช้คอมพิวเตอร์จะนำมาวิเคราะห์เพื่อการออกแบบเบื้องต้นเกี่ยวกับรูปร่าง ขนาด ความลึก แขนงของโพรง และอุโมงค์กักเก็บกากของเสียในชั้นเกลือหิน แนวคิดในการออกแบบมี 2 ลักษณะ คือ โพรงกักเก็บกากของเสียที่ถูกสร้างขึ้นโดยการละลาย (Solution Mining Cavern) และห้องกักเก็บกากของเสียที่ถูกสร้างขึ้นโดยการขุดเจาะใต้ดิน (Underground Excavation) การวิเคราะห์ห่มงประเด็นที่เสถียรภาพของเกลือหินที่อยู่รอบโพรงหรือห้องที่ใช้กักเก็บกากของเสียภายใต้อุณหภูมิสูงถึง 110°C

7.2 การกำหนดตัวแปรในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

ตัวแปรที่ส่งผลต่อความมีเสถียรภาพของการออกแบบโพรงและอุโมงค์ ได้แก่ ขนาดรูปร่าง ความลึก และระยะห่างระหว่างโพรงหรืออุโมงค์ เพื่อให้ได้รูปร่างโพรงหรืออุโมงค์ที่มีเสถียรภาพและปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับกักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมจึงจำเป็นต้องมีความลึกระดับหนึ่งเพื่อป้องกันการรั่วไหลของกากของเสียสู่สิ่งแวดล้อมหรือชั้นน้ำบาดาลบริเวณใกล้เคียง ดังนั้น ขนาดและรูปร่างของโพรงเกลือที่ใช้ในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ FLAC 4.0 (Itasca, 1994) สำหรับงานวิจัยนี้จะกำหนดให้โพรงเป็นรูปทรงกระบอกและอยู่ที่ระดับความลึก 500 เมตร จากผิวดิน มีรัศมี 25 เมตร และมีความสูงวัดจากหลังคาโพรงถึงพื้นโพรงเท่ากับ 200 เมตร (รูปร่างและความลึกนี้ได้มาจากการศึกษาเทคโนโลยีอากาศอัดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย) ผิวดินปิดทับด้วยชั้นดินมีความหนา 50 เมตร คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินที่ใช้ในแบบจำลองได้มาจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ความหนาแน่น (γ) ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) อัตราส่วนปัวร์ซอง (ν) ค่ามุมเสียดทาน (ϕ) และค่าความเค้นยึดติด (c) และคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของชั้นดินปิดทับอ้างอิงจากฐานข้อมูลที่มีในโปรแกรม FLAC 4.0 ทางด้านคุณสมบัติเชิงอุณหพลศาสตร์ของเกลือหินอ้างอิงจาก Phueakphum and Fuenkajorn (2010) และ Durham (1981) ภายในโพรงมีแรงดันที่เกิดจากอากาศ (Air pressure) ประมาณ 10% ของความเค้นที่หลังคาโพรง (ค่าความเค้นของหลังคาโพรงที่ 500 เมตร เท่ากับ 10.3 MPa) ซึ่งคุณสมบัติต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นได้แสดงอยู่ในตารางที่ 7.1 และโครงข่ายแบบจำลองที่ใช้เป็นตัวแทนเชิงกายภาพของโพรงที่สภาวะจริงในภาคสนาม

ตารางที่ 7.1 คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และอุณหพลศาสตร์ของวัสดุที่ใช้ในแบบจำลอง

คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์					
ชนิดของวัสดุ	ความหนาแน่น γ (kg/m ³)	ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น E (GPa)	อัตราส่วนปัวร์ซอง (ν)	ค่ามุมเสียดทาน ϕ (Degrees)	ค่าความเค้นยึดติด c (MPa)
Soil	2,100	0.4	0.25	35	0.001
Rock Salt	2,100	18.0	0.37	50	2.0
คุณสมบัติเชิงอุณหพลศาสตร์					
ชนิดหิน	Thermal conductivity, k (W/m·K)	Specific Heat, Cp (J/Kg·K)		Thermal expansion (K ⁻¹)	
Rock Salt	*5.8	*831		**4.5×10 ⁻⁵	

* จาก Phueakphum and Fuenkajorn (2010)

** จาก Durham (1981)

แสดงดังรูปที่ 7.1 โดยที่การจำลองนี้จะเป็นการจำลองแบบ Axisymmetry และไม่พิจารณาคุณสมบัติของเกลือหินในเชิงเวลา แต่จะพิจารณาแบบความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง (Linearly Elastic Behavior) และความแข็ง (Strength) นอกจากนี้ผลกระทบที่เกิดจากอุณหภูมิจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับโพรงที่ไม่มีอุณหภูมิเพื่อแสดงถึงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อโพรงกักเก็บ

ในกรณีของห้องหรือช่องเหมืองจะออกแบบจำลองให้ห้อง (อุโมงค์) มีความลึก 500 เมตร มีความสูงของโพรง 10 เมตร และกว้าง 10 เมตร ระยะห่างระหว่างห้องคือ 10 เมตร คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และอุณหพลศาสตร์ของเกลือหินที่ใช้ในแบบจำลองจะเหมือนกับการจำลองโพรงกักเก็บ รูปที่ 7.2 แสดงโครงข่ายของแบบจำลองและคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และอุณหพลศาสตร์ของเกลือหิน และในการจำลองจะทำการเปรียบเทียบห้องหรืออุโมงค์ที่มีอุณหภูมิสูงกับห้องหรืออุโมงค์ที่มีอุณหภูมิต่ำเพื่อแสดงถึงผลกระทบของอุณหภูมิ

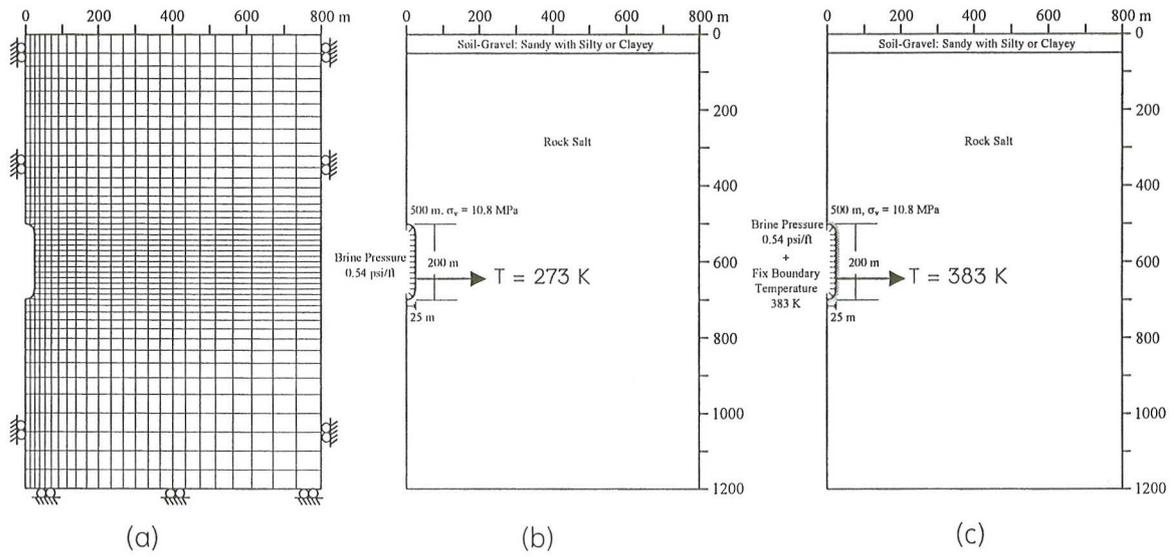
7.3 เสถียรภาพของโพรงกักเก็บกากของเสียภายใต้อุณหภูมิ

การวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพของโพรงกักเก็บของเสียในงานวิจัยนี้จะใช้หลักเกณฑ์ของค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ย (W_m) ที่สัมพันธ์กับค่าพลังงานความเครียดเบี่ยงเบน (W_d) ที่พัฒนาขึ้นมาในบทที่ 4 เพื่อคำนวณหาค่าปัจจัยความปลอดภัย ผลในเบื้องต้นที่ได้จากโปรแกรม FLAC 4.0 ด้วยการเปรียบเทียบค่าความเค้นในแกนหลัก ค่าความเค้นในแกนหลักรอง และค่าความเค้นเฉือนนั้นผลที่ได้บ่งชี้ว่าเมื่อโพรงมีอุณหภูมิสูงขึ้นค่าความเค้นที่อยู่รอบๆ โพรงจะมีค่าสูงขึ้น (รูปที่ 7.3) เมื่อเทียบกับแบบจำลองที่ไม่มีผลกระทบของอุณหภูมิ (รูปที่ 7.4) โดยเฉพาะค่าความเค้นเฉือนที่ส่งผลต่อความมีเสถียรภาพของโพรงกักเก็บและเมื่อนำมาคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยจากหลักเกณฑ์ของค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ย (W_m) ที่สัมพันธ์กับค่าพลังงานความเครียดเบี่ยงเบน (W_d) ในแต่ละจุดของโพรง ได้แก่ บริเวณหลังคาโพรง (Cavern roof) ผนังโพรง (Cavern wall) และพื้นโพรง (Cavern floor) ดังรูปที่ 7.5 ผลที่ได้ระบุว่าเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิของแบบจำลองที่บริเวณรอบๆ โพรงกักเก็บจะส่งผลให้ปัจจัยความปลอดภัยต่ำมีค่ากว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ไม่มีผลกระทบจากอุณหภูมิ (ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ และผลการคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยแสดงในตารางที่ 7.2) โดยที่ค่าปัจจัยความปลอดภัยคำนวณได้จากสมการ

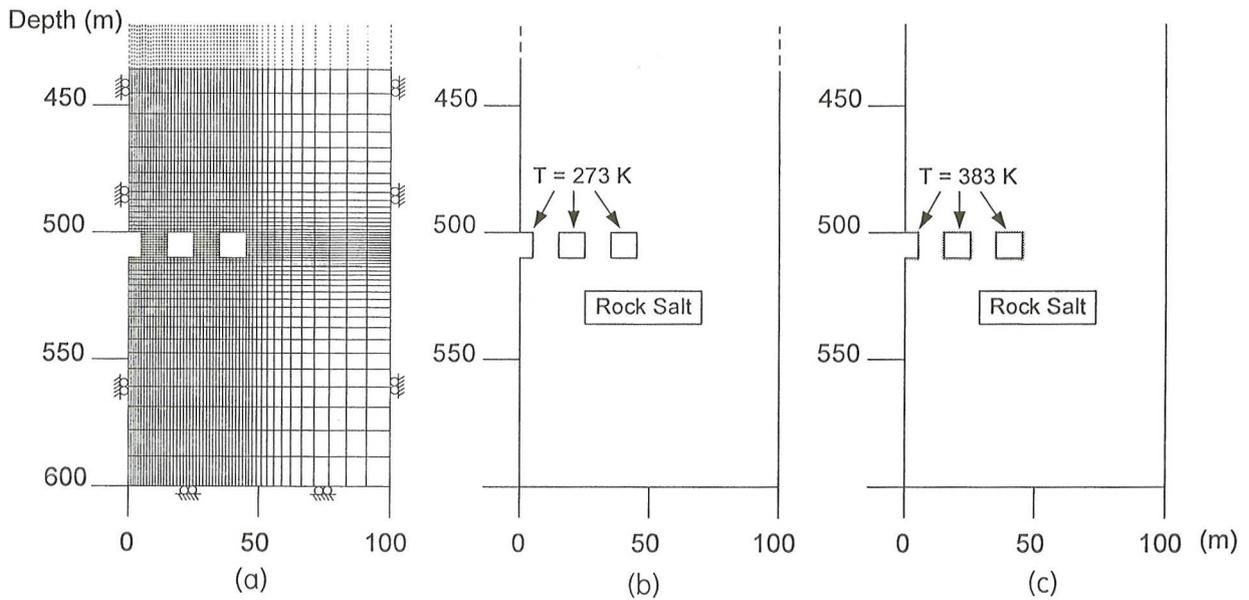
$$F.S. = W_{d,cri}/W_{d,model}$$

โดยที่ $W_{d,cri}$ คือ พลังงานความเครียดที่เกลือหินรับได้ (บทที่ 4)

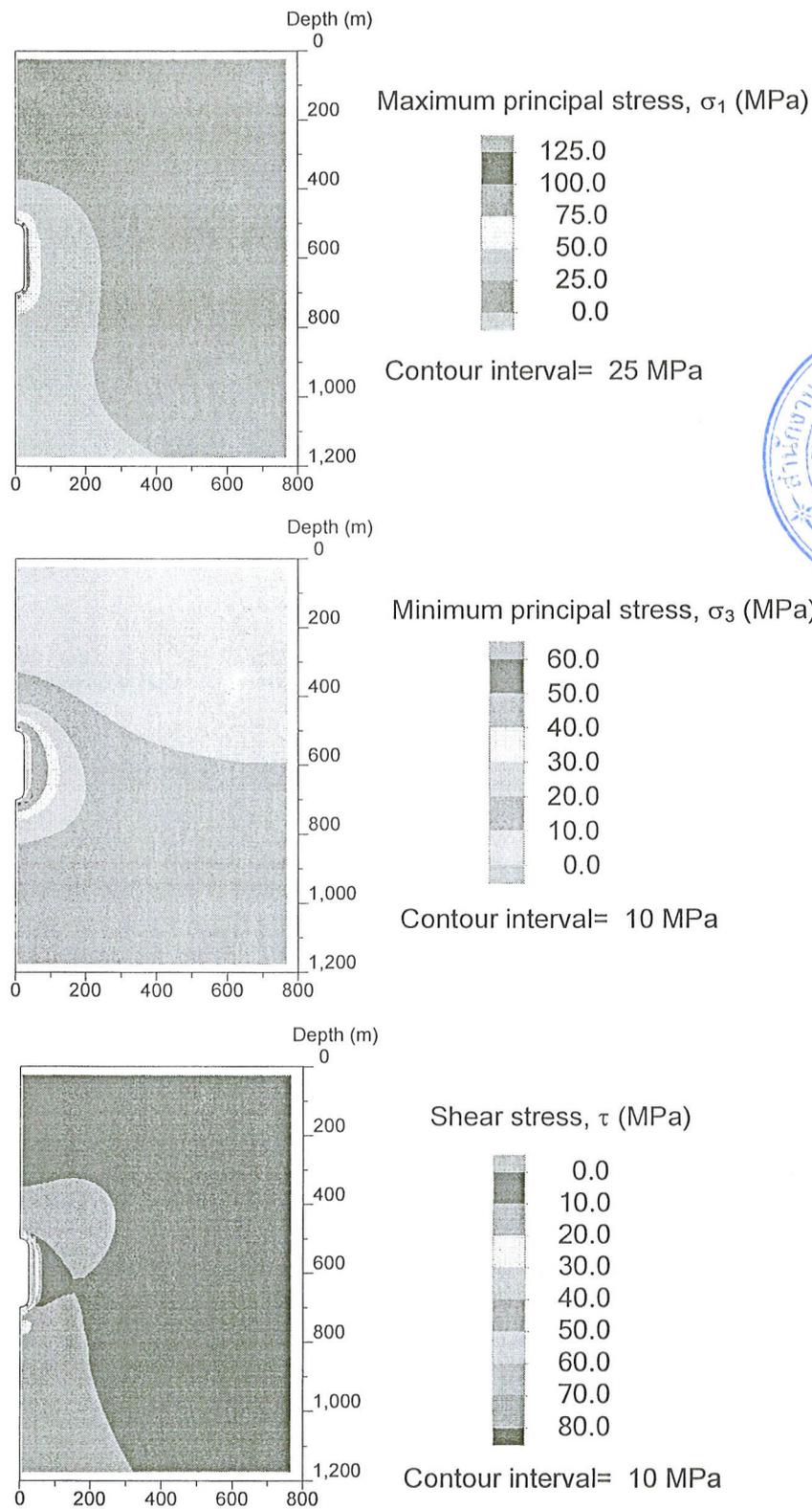
$W_{d,model}$ คือ พลังงานความเครียดที่คำนวณได้ที่จุดต่างๆ รอบโพรงหรือห้องกักเก็บกากของเสีย



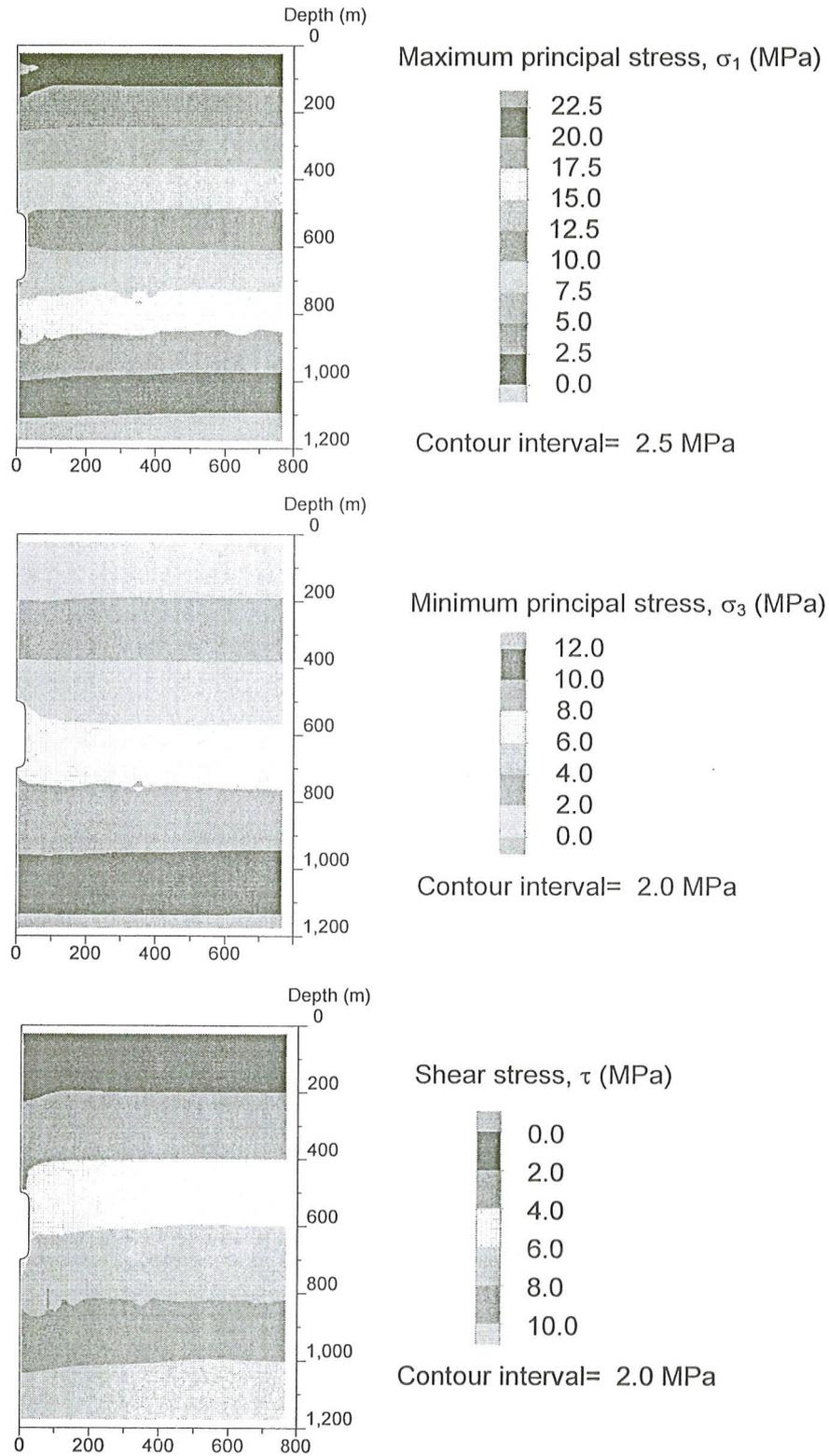
รูปที่ 7.1 โครงข่ายแบบจำลองของโพรงกักเก็บ (a) ตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองที่ไม่มีผลกระทบของอุณหภูมิ (b) และแบบจำลองที่มีผลกระทบของอุณหภูมিবริเวณรอบๆ โพรงกักเก็บ (c)



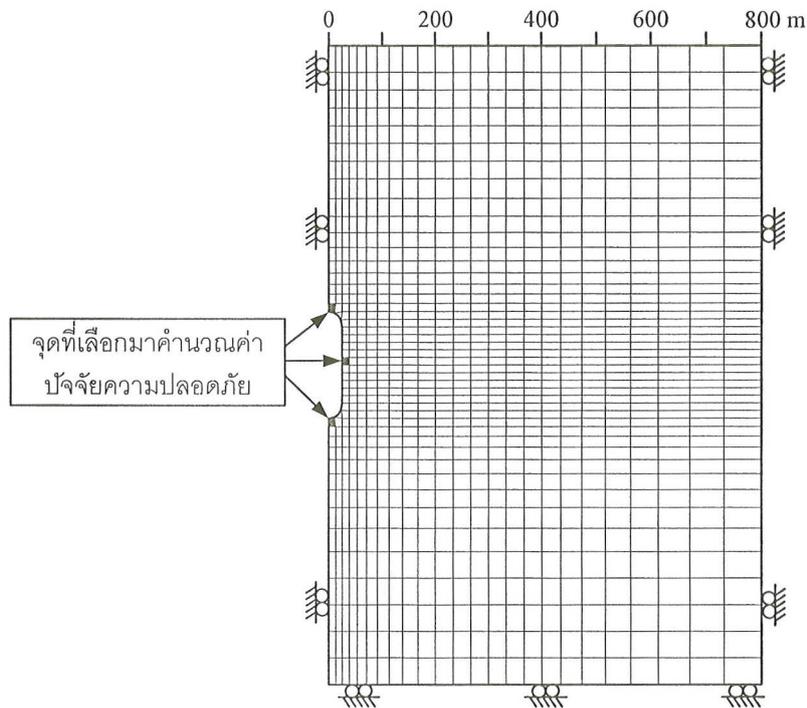
รูปที่ 7.2 โครงข่ายแบบจำลองของห้องหรืออุโมงค์ (a) รูปร่างแบบจำลองที่ไม่มีผลกระทบของอุณหภูมิ (b) และรูปร่างแบบจำลองที่มีผลกระทบของอุณหภูมিবริเวณรอบๆ อุโมงค์ (c)



รูปที่ 7.3 ความเค้นในแกนหลัก (a) ความเค้นในแกนหลักตรง (b) ความเค้นเฉือน (c) ภายใต้ อุณหภูมิ 383 K (110°C)



รูปที่ 7.4 ความเค้นในแกนหลัก (a) ความเค้นในแกนหลักรอง (b) ความเค้นเฉือน (c) ที่ไม่มีผลกระทบจากอุณหภูมิ



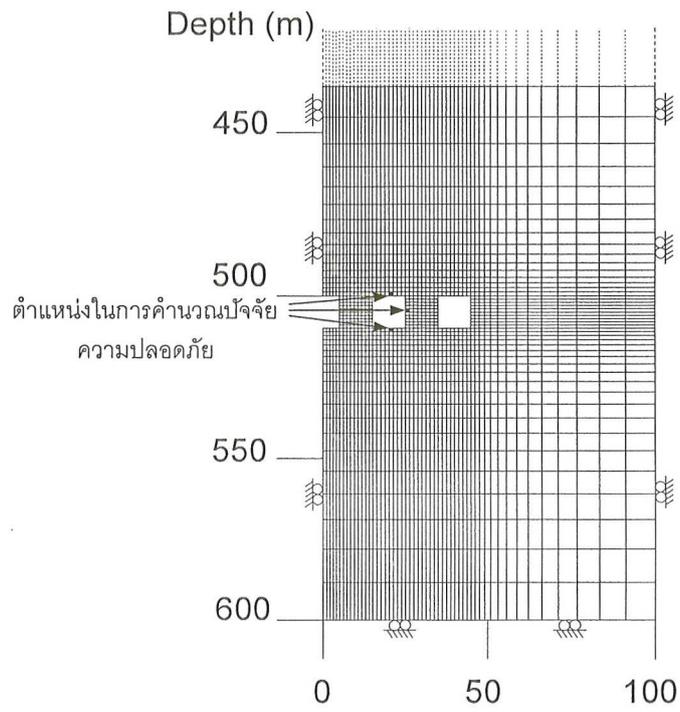
รูปที่ 7.5 จุดที่เลือกเพื่อคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยที่บริเวณหลังคาโครง ผนังโครง และ พื้นโครง

ตารางที่ 7.2 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณและผลการคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยที่ตำแหน่งต่างๆ สำหรับโครงกักเก็บกากของเสีย

ตำแหน่ง	σ_m (MPa)	τ_{oct} (MPa)	ϵ_m (millistrain)	γ_{oct}	$W_{d,model}$ (MPa)	$W_{d,cri}$ (MPa)		F.S.	
						25°C	110°C	25°C	110°C
Roof	82.84	16.41	2.06	2.011	49.5	669.4	402.1	13.5	8.1
Wall	71.69	35.10	2.72	141.674	141.7	727.7	459.7	5.1	3.2
floor	86.56	16.12	2.05	2.032	49.1	685.6	418.1	13.9	8.5

7.4 เสถียรภาพของห้อง (อุโมงค์) กักเก็บกากของเสียในชั้นเกลือหิน

การวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพของห้องหรืออุโมงค์สำหรับกักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมในงานวิจัยนี้จะใช้หลักเกณฑ์เดียวกันกับการวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพของโพรงกักเก็บ คือ ค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ย (W_m) ที่สัมพันธ์กับค่าพลังงานความเครียดเบี่ยงเบน (W_d) ที่พัฒนาขึ้นมาในบทที่ 4 เพื่อคำนวณหาค่าปัจจัยความปลอดภัย สำหรับการจำลองห้องหรืออุโมงค์นั้นจะกำหนดให้ความกว้างของโพรงเท่ากับความสูงของห้อง คือ 10 เมตร และมีเสาค้ำยันกว้าง 10 เมตร ผลที่ได้จากโปรแกรม FLAC 4.0 ด้วยเปรียบเทียบค่าความเค้นในแกนหลัก ค่าความเค้นในแกนหลักรอง และค่าความเค้นเฉือนนั้นผลที่ได้บ่งชี้ว่าเมื่อห้องหรืออุโมงค์มีอุณหภูมิสูงขึ้นค่าความเค้นที่อยู่รอบๆ โพรงจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับแบบจำลองที่ไม่มีผลกระทบของอุณหภูมิ การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยจากหลักเกณฑ์ของค่าพลังงานความเครียดเฉลี่ย (W_m) ที่สัมพันธ์กับค่าพลังงานความเครียดเบี่ยงเบน (W_d) จะทำในแต่ละจุดของโพรง ได้แก่ บริเวณหลังคาโพรง ผนังโพรง และพื้นโพรงดังรูปที่ 7.6 โดยผลการคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยรวมไปถึงตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณแสดงอยู่ในตาราง 7.3



รูปที่ 7.6 จุดที่เลือกเพื่อคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยที่บริเวณหลังคาห้อง ผนังห้อง และพื้นห้อง

ตารางที่ 7.3 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ และผลการคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัยที่ตำแหน่งต่างๆ ของห้องหรืออุโมงค์สำหรับกักเก็บกากของเสีย

ตำแหน่ง	σ_m (MPa)	τ_{oct} (MPa)	ϵ_m (milistrain)	γ_{oct}	$W_{d,model}$ (MPa)	$W_{d,cri}$ (MPa)		F.S.	
						25°C	110°C	25°C	110°C
Roof	7.43	4.81	22.13	37.47	270.57	654.43	387.33	2.42	1.43
Wall	3.00	2.45	15.31	23.20	85.24	371.53	108.00	4.36	1.26
floor	5.63	3.62	17.03	30.73	166.73	491.14	226.09	2.95	1.36