

> > > เหมาะสำหรับนักศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์
สาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมปฐพี
วิศวกรรมธรณีเทคนิค วิศวกรรมอุโมงค์
วิศวกรรมชลประทาน วิศวกรรมแหล่งน้ำ
และวิศวกรรมเหมืองแร่



กลศาสตร์ ของหิน และ งานอุโมงค์

(Rock Mechanics and Tunneling)

รศ.ดร. ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



กลศาสตร์ของหินและงานอุโมงค์

โดย รศ.ดร. ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข

สงวนลิขสิทธิ์ตามกฎหมาย © พ.ศ. 2565 โดย รศ.ดร. ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข

ห้ามคัดลอก ลอกเลียน ดัดแปลง ทำซ้ำ จัดพิมพ์ หรือกระทำการอื่นใด โดยวิธีการใดๆ ในรูปแบบใดๆ
ไม่ว่าส่วนหนึ่งส่วนใดของหนังสือเล่มนี้ เพื่อเผยแพร่ในสื่อทุกประเภท หรือเพื่อวัตถุประสงค์ใดๆ
นอกจากจะได้รับอนุญาต

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของหอสมุดแห่งชาติ

ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข.

กลศาสตร์ของหินและงานอุโมงค์. -- กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2565.
256 หน้า.

1. กลศาสตร์หิน. 2. อุโมงค์.

I. ชื่อเรื่อง.

624.15132

Barcode (e-book) : 9786160846108

ผลิตและจัดจำหน่ายโดย



บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน)
SE-EDUCATION PUBLIC COMPANY LIMITED

เลขที่ 1858/87-90 ถนนเทพรัตน แขวงบางนาใต้ เขตบางนา กรุงเทพฯ 10260
โทรศัพท์ 0-2826-8000

หากมีคำแนะนำหรือติชม สามารถติดต่อได้ที่ comment@se-ed.com



คำนำ

หนังสือ กลศาสตร์ของหินและงานอุโมงค์ (*Rock Mechanics and Tunneling*) เล่มนี้ มีเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับกลศาสตร์และพฤติกรรมทางวิศวกรรมของหิน โดยผู้อ่านสามารถใช้ในการศึกษาเพื่อเป็นพื้นฐานและนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านวิศวกรรมของหิน หนังสือเล่มนี้จึงเหมาะสำหรับนิสิต นักศึกษา วิศวกรโยธา และผู้สนใจในสาขาที่เกี่ยวข้องกับงานด้านวิศวกรรมปฐพี (Geotechnical Engineering) นอกจากนี้ยังเหมาะสำหรับใช้ประกอบการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา โดยผู้อ่านสามารถเรียนรู้เนื้อหาเพิ่มเติมเพื่อทำความเข้าใจในหลักวิชาทางด้านกลศาสตร์ของหินได้ด้วยตนเอง

เนื้อหาในหนังสือประกอบด้วยหัวข้อสำคัญต่างๆ ได้แก่ แร่องค์ประกอบในหิน วัฏจักรทางธรณี การผุพังย่อยสลายทางธรณีของหินกลายเป็นดินในรูปแบบต่างๆ ประเภทหินและวัฏจักรการเปลี่ยนแปลงของหิน สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางวิศวกรรมของหิน เป็นต้น ทั้งนี้ความรู้เบื้องต้นทางด้านกลศาสตร์ของหินและสมบัติของหินดังกล่าวมา จัดได้ว่าเป็นพื้นฐานในการจัดจำแนกกลุ่มหินเพื่อประโยชน์ทางวิศวกรรม ส่วนเนื้อหาทางด้านการประยุกต์ใช้งานด้านวิศวกรรมนั้น หนังสือเล่มนี้ได้กล่าวถึงเรื่องของกำลังและพฤติกรรมการบีบอัดของหิน การวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงบนผนังค้ำยันอุโมงค์ในหิน เพื่อนำไปสู่การออกแบบประเภทและขนาดของระบบค้ำยันผนังอุโมงค์ได้อย่างเหมาะสมและปลอดภัย เนื้อหาเหล่านี้เป็นสิ่งที่นิสิต นักศึกษา วิศวกรปฐพีธรณีเทคนิค และผู้สนใจ ควรมีความรู้เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมของหิน ทั้งนี้เพื่อความถูกต้องของรายชื่อคำศัพท์ของแร่และหิน หนังสือเล่มนี้อ้างอิงการสะกดชื่อแร่และชื่อหินจากศัพท์บัญญัติชื่อทางธรณีวิทยา ซึ่งกำหนดการสะกดชื่อโดยกองธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี

ปัจจุบันตำราและหนังสือภาษาไทยทางด้านกลศาสตร์ของหินและธรณีวิทยาทางวิศวกรรมมีจำนวนน้อย ผู้เขียนจึงเรียบเรียงหนังสือเล่มนี้ขึ้นโดยแบ่งเป็นบทเรียนจำนวนทั้งหมด 10 บท ซึ่งประกอบด้วยเนื้อหาต่างๆ ดังกล่าวข้างต้น โดยผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าหนังสือเล่มนี้จะเป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยให้นิสิต นักศึกษา และกลุ่มผู้สนใจในสาขาวิศวกรรมโยธา สามารถทำความเข้าใจ

เข้าใจในเนื้อหาวิชาได้จากการอ่านหนังสือเล่มนี้ และนำองค์ความรู้ไปประยุกต์ใช้ได้อย่างถูกต้อง รวมทั้งมีความปลอดภัยในเชิงวิศวกรรมที่เกี่ยวข้อง

สุดท้ายนี้ คุณประโยชน์อันมีจากหนังสือเล่มนี้ ผู้เขียนขอประกาศยกย่องถึงบุญคุณบิดา มารดา ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ขอขอบคุณครูอาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ให้โอกาส ให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือแก่ผู้เขียนเสมอมา

รศ. ดร. ทวีศักดิ์ บิติคุณพงศ์สุข

ตุลาคม 2558



คำนำ

พิมพ์ครั้งที่ 2

หนังสือ กลศาสตร์ของหินและงานอุโมงค์ (*Rock Mechanics and Tunneling*) จัดพิมพ์ขึ้นครั้งแรกเพื่อใช้ในการเรียนการสอนสำหรับนิสิต นักศึกษา สาขาวิศวกรรมโยธา ระดับชั้น ปริญญาตรีและระดับบัณฑิตวิทยาลัยสาขาวิศวกรรมปฐพีและธรณีเทคนิค โดยวิชาดังกล่าวจัดว่าเป็นวิชาเลือกเฉพาะทางสาขาวิศวกรรมปฐพีและธรณีเทคนิค หนังสือเล่มนี้จัดพิมพ์อย่างเป็นทางการครั้งแรกเมื่อประมาณปี พ.ศ. 2558 และได้รับการตอบรับที่ดีเรื่อยมา ผู้เขียนจึงได้เสนอต้นฉบับหนังสือและส่งมอบลิขสิทธิ์หนังสือเล่มนี้ให้กับบริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน) เป็นผู้จัดพิมพ์และจัดจำหน่าย อย่างไรก็ตาม ถ้าหากผู้อ่านหนังสือเล่มนี้แล้วพบว่าหนังสือยังมีความไม่สมบูรณ์ด้วยประการใดก็ตาม ผู้เขียนยินดีน้อมรับข้อเสนอแนะเพื่อนำไปปรับปรุงพัฒนาหนังสือให้ดีขึ้นเพื่อยังประโยชน์แก่วงการการศึกษาและขอร่วมเป็นส่วนหนึ่งในการสนับสนุนงานทางด้านวิชาชีพสาขาวิศวกรรมโยธา

คุณประโยชน์อันพึงมีจากหนังสือเล่มนี้ ผู้เขียนขออุทิศคุณงามความดีแด่บิดามารดา ผู้มีพระคุณสูงยิ่ง และขอขอบคุณครูอาจารย์ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาการให้ความรู้แก่ผู้เขียน รวมถึงการระลึกถึงผู้มีอุปการะคุณทุกท่านที่ได้ให้โอกาส ให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือสนับสนุนผู้เขียนเสมอมา

รศ. ดร. ทวีศักดิ์ ปิตุคุณพงศ์สุข
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



สารบัญ

บทที่ 1	แร่ประกอบหิน	9
1.1	ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับแร่และหิน	9
1.2	ความหมายของแร่และหิน	10
1.3	สมบัติของแร่	11
1.4	การจัดหมวดหมู่ของแร่	31
บทที่ 2	วัฏจักรทางธรณีและการเกิดดิน	38
2.1	วัฏจักรทางธรณีวิทยา	38
2.2	หินหนืดและการกำเนิดชั้นหินดั้งเดิม	41
2.3	การผุพังของหิน	42
2.4	การกำเนิดดิน	46
2.5	ชั้นดิน	49
บทที่ 3	ชนิดของหิน	52
3.1	วัฏจักรของหิน	52
3.2	หินอัคนี	52
3.3	หินตะกอน	60
3.4	หินแปร	67
บทที่ 4	สมบัติทางกายภาพของหิน	78
4.1	ลักษณะทั่วไปของหิน	78
4.2	สมบัติทางกายภาพของหิน	80
4.3	ความคงทนของหิน	92

บทที่ 5 สมบัติทางวิศวกรรมของหิน	111
5.1 การยอมให้ซึมผ่านได้	112
5.2 ความเร็วคลื่นในหิน	117
5.3 ดัชนีกำลังแบบบกดจุด	119
5.4 กำลังอัดแกนเดียว	124
5.5 กำลังอัดสามแกน	127
5.6 กำลังรับแรงดึงโดยตรง	128
5.7 กำลังรับแรงดึงทางอ้อม	130
บทที่ 6 การจำแนกหินทางวิศวกรรม	136
6.1 การจัดชั้นคุณภาพของหินคงสภาพหรือหินก้อน	138
6.2 การจำแนกมวลหิน	145
บทที่ 7 กำลังและหลักการพิบัติของหิน	164
7.1 รูปแบบการพิบัติของหิน	165
7.2 พฤติกรรมการเสียรูปของหินเมื่อได้รับหน่วยแรงกระทำ	166
7.3 หลักการพิบัติของหิน	173
บทที่ 8 การก่อสร้างอุโมงค์ในหินโดยวิธี Tunnel Boring Machine	191
8.1 การขุดเจาะมวลหิน	191
8.2 การก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นหินโดยวิธี TBM	194
บทที่ 9 การวิเคราะห์หน่วยแรงในชั้นหินและผนังอุโมงค์	201
9.1 ความหมายของอุโมงค์และงานอุโมงค์	201
9.2 หน่วยแรงในชั้นหิน	202
9.3 หน่วยแรงในมวลหินจากการตรวจวัดภาคสนาม	204
9.4 หน่วยแรงบนผนังช่องเปิดหรืออุโมงค์	209
บทที่ 10 การวิเคราะห์และออกแบบค้ำยันผนังอุโมงค์ในหิน	229
10.1 ค้ำยันผนังอุโมงค์	229
10.2 พฤติกรรมการตอบสนองของผนังอุโมงค์และวัสดุค้ำยัน	231
10.3 การวิเคราะห์และออกแบบค้ำยันผนังอุโมงค์	233
บรรณานุกรมและเอกสารอ้างอิง	251

1

แร่ประกอบหิน (Rock-forming Minerals)



ธรณีวิทยาทางวิศวกรรม (Engineering Geology) เป็นศาสตร์ประยุกต์ทางวิทยาศาสตร์ (Applied Science) แขนงหนึ่งที่นำความรู้ทางด้านธรณีวิทยา ซึ่งเป็นการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของหินและแร่ธาตุทางธรณีมาประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรม โดยในที่นี้ได้เน้นถึงการนำความรู้พื้นฐานด้านสมบัติของหินและแร่ มาใช้ประโยชน์ทางด้านกลศาสตร์ของดินและหิน (Rock and Soil Mechanics) และงานด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค (Geotechnical Engineering) ซึ่งวิศวกรโยธาที่ได้ศึกษาศาสตร์นี้ จะมีความเข้าใจยิ่งขึ้นในลักษณะปัญหาทางธรณีวิศวกรรมที่เกิดขึ้นและสามารถนำความรู้พื้นฐานจากบทเรียนต่าง ๆ ในหนังสือเล่มนี้ ไปใช้ประมวลผลข้อมูลที่ได้จากการสำรวจสภาพทางธรณีในพื้นที่ก่อสร้าง เพื่อช่วยในการออกแบบทางวิศวกรรมได้อย่างปลอดภัยและประหยัด รวมถึงการวางแผนงานด้านการก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย

1.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับแร่และหิน

สสาร (Substance) หรือสาร (Matters) ประกอบด้วย ธาตุ (Elements) เพียงธาตุเดียวหรือมากกว่า หนึ่งธาตุ สสารที่ประกอบด้วยธาตุมากกว่าหนึ่งธาตุ ที่เรียกว่า สารประกอบ (Compound) โดยที่ ธาตุ หมายถึง สิ่งที่ไม่สามารถแยกองค์ประกอบทางเคมีออกด้วยกระบวนการทางเคมีอย่างง่ายได้ เพราะธาตุเป็นส่วนย่อยที่สุดทางเคมี อย่างไรก็ตาม ส่วนย่อยที่สุดของธาตุที่ยังมีลักษณะความเป็นธาตุ คือ อะตอม ซึ่งสามารถมองเห็นได้โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูง (เราไม่ได้กล่าวในรายละเอียด เรื่องอะตอมของธาตุ ไว้ในบทเรียนนี้) บทเรียนนี้กล่าวถึงความรู้พื้นฐานทั่วไปเกี่ยวกับแร่และหิน รวมทั้งการศึกษาในเรื่องของสมบัติเบื้องต้นของแร่ ซึ่งนิสิต นักศึกษา และผู้สนใจ ควรทำความเข้าใจเบื้องต้นเพื่อเป็นพื้นฐานการเรียนรู้ในเรื่องกลศาสตร์ของหินเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางวิศวกรรมโยธาต่อไป

โดยทั่วไป แร่แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ **แร่ปฐมภูมิ (Primary Minerals)** และ **แร่ทุติยภูมิ (Secondary Minerals)** ซึ่งเป็นการแบ่งกลุ่มแร่โดยนักธรณีวิทยา โดยพิจารณาตามลำดับขั้นตอนในการกำเนิดของแร่ แร่ที่เกิดก่อน กล่าวคือ แร่ที่มีการเย็นตัวและเกิดการตกผลึกก่อนในขั้นแรก เรียกว่า แร่ปฐมภูมิ จากนั้นเมื่อแร่ประกอบในหินชุดปฐมภูมินี้ผ่านการผุพังสลายตัวไป โดยกระบวนการผุพังทางกลและทางเคมี แร่จะเปลี่ยนแปลงสภาพไปเป็นแร่ชนิดใหม่ เรียกว่า แร่ทุติยภูมิ อย่างไรก็ตาม ในทางวิศวกรรมโยธาซึ่งเป็นการนำศาสตร์ความรู้ทางด้านธรณีวิทยามาประยุกต์ใช้นั้น เราอาจกล่าวโดยง่ายได้ว่า **แร่ปฐมภูมิ** หมายถึง แร่ประกอบในหิน เช่น แร่ควอตซ์ (Quartz) แร่มัสโคไวต์ (Muscovite) แร่เฟลด์สปาร์ (Feldspar) แร่ไพรอกซีน (Pyroxene) และแร่แอมฟิโบล (Amphibole) เป็นต้น แร่ปฐมภูมิที่เป็นองค์ประกอบของหินส่วนใหญ่เป็นวงศ์แร่ประกอบซิลิเกต ที่พบมากในหินอัคนีซึ่งเป็นหินที่เกิดจากการเย็นตัวและตกผลึกเป็นขั้นตอนแรกของแมกมาหรือหินหนืดใต้เปลือกโลก ในทางเกษตรกรรม แร่ปฐมภูมิจัดว่าเป็นแร่ที่มีสารอาหารที่มีประโยชน์ต่อการเพาะปลูกพืชได้อีกด้วย ส่วน **แร่ทุติยภูมิ** หมายถึง แร่ประกอบในดิน ซึ่งเป็นแร่ที่เปลี่ยนแปลงกลายสภาพมาจากผลของการผุพังสลายตัวของแร่ปฐมภูมิ แล้วตกผลึกกลายเป็นแร่ชนิดใหม่โดยอนุภาคของแร่ทุติยภูมิจะมีขนาดเล็กลง โดยทั่วไปอาจหมายถึงแร่องค์ประกอบที่พบในดินเหนียว เช่น แร่เคโอลิไนต์ (Kaolinite) แร่อิลไลต์ (Illite) แร่ฮาลลอยไซต์ (Halloysite) เป็นต้น

1.2 ความหมายของแร่และหิน

แร่ (Minerals) คือ ธาตุหรือสารประกอบอนินทรีย์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (คำว่า ธาตุอนินทรีย์ หมายถึง ธาตุจากสิ่งไม่มีชีวิต) โดยทั่วไปแร่มีโครงสร้างเป็นผลึกที่มีองค์ประกอบทางเคมีคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนเฉพาะ มีโครงสร้างการเรียงตัวของธาตุต่างๆ อย่างเป็นระเบียบ แร่มีสมบัติเฉพาะตัวทางกายภาพ ทางเคมี และทางแสงที่แน่นอน ซึ่งสมบัติเฉพาะตัวเหล่านี้นำไปใช้ประโยชน์ในการจำแนกจัดกลุ่มประเภทแร่ได้ว่า แร่ที่เราากำลังศึกษาหรือตรวจสอบอยู่เป็นแร่อะไร และอยู่ในหมวดหมู่ของแร่ประเภทใด เป็นต้น อีกทั้งความรู้เรื่องสมบัติของแร่ยังนำไปใช้ตรวจสอบแร่ที่เป็นองค์ประกอบในหินได้ด้วย แร่อาจอยู่ในสถานะของเหลวหรือของแข็งก็ได้ ถ้าแร่ประกอบหินอยู่ในสถานะของเหลว เราเรียกว่า **หินหนืด (Molten Rocks)** อย่างไรก็ตาม สถานะของแร่ที่กล่าวถึงโดยทั่วไป หมายถึง ก่อนแร่ในสถานะของแข็งหรือหิน (Rocks) นอกจากนี้เรายังใช้ประโยชน์จากแร่ธาตุในด้านต่างๆ มากมาย เช่น การใช้แร่เป็นเครื่องประดับ การใช้แร่เป็นเครื่องมือเครื่องใช้ และการใช้งานในด้านพลังงานและเชื้อเพลิง เป็นต้น

หิน (Rocks) หมายถึง สสารหรือสารที่เป็นมวลแข็ง โดยมีองค์ประกอบของแร่ 2 ชนิด ขึ้นไป หรืออาจเป็นสสารผสมระหว่างแร่กับแก้วภูเขาไฟ กล่าวคือ หินประกอบขึ้นด้วยแร่ชนิดเดียวกันหรือหลายชนิดรวมตัวกันอยู่ เนื้อหาในบทเรียนนี้ ที่กำลังกล่าวถึงเรื่องของแร่ประกอบในหิน (Rock-forming Minerals) นั้น จึงเป็นการศึกษาสิ่งที่เกี่ยวข้องกับแร่ต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบทำให้เกิดหิน ซึ่งผู้อ่านควรสร้างความรู้ความเข้าใจพื้นฐานก่อนที่จะศึกษาเรื่องของกลศาสตร์หิน โดยทั่วไปวิศวกรและนักธรณีวิทยาแบ่งหินตามวิธีการกำเนิดได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ หินอัคนี (Igneous Rocks) หินชั้นหรือหินตะกอน (Sedimentary Rocks) และหินแปร (Metamorphic Rocks) รายละเอียดของหินแต่ละประเภทกล่าวไว้ในบทที่ 3 ต่อไป

1.3 สมบัติของแร่ (Properties of Minerals)

สมบัติของแร่ เป็นสมบัติเฉพาะตัวของแร่ชนิดใดชนิดหนึ่ง ในทางปฏิบัติเราจะทำการตรวจสอบสมบัติของแร่เบื้องต้นได้ในสนาม โดยการสังเกตลักษณะภายนอกด้วยตาเปล่า หรือการทดสอบแร่อย่างง่าย เพื่อวิเคราะห์และพิสูจน์ตรวจสอบชนิดของแร่เบื้องต้นโดยการใช้เครื่องมืออย่างง่ายที่สามารถพกพาไปได้ในสนาม จากนั้นตัวอย่างแร่จากสนามจะถูกเก็บมาทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาสมบัติของแร่โดยละเอียด ผลทดสอบแร่นำไปสู่การจำแนกชนิดของแร่ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ สมบัติของแร่สามารถแบ่งเป็น 3 หมวดหมู่ ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และสมบัติทางแสง

1.3.1 สมบัติทางกายภาพของแร่ (Physical Properties of Minerals)

สมบัติของแร่เป็นพื้นฐานสำคัญ และเป็นสิ่งที่ใช้บ่อยที่สุดในการจำแนกชนิดของแร่ ดังนั้นเราจึงต้องทำความเข้าใจถึงความสำคัญนี้ก่อนที่จะทำการศึกษาสมบัติของแร่แต่ละอย่าง สมบัติทางกายภาพของแร่ เป็นลักษณะภายนอกที่ทำการตรวจสอบได้ง่ายโดยการสังเกตและการทดสอบอย่างง่าย ข้อมูลทางด้านสมบัติทางกายภาพของแร่จะถูกรวบรวมไว้เพื่อนำไปใช้จัดกลุ่มแร่ได้อย่างดีในเบื้องต้น จากนั้นสมบัติทางเคมี เช่น การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบในแร่จะทำให้การจำแนกแร่มีความถูกต้องยิ่งขึ้น สมบัติทางกายภาพของแร่ที่ควรรู้ มีดังต่อไปนี้

1. สีของแร่ (Colors of Minerals) เป็นสมบัติกายภาพพื้นฐานที่ตรวจสอบได้ง่ายโดยการสังเกตด้วยตาเปล่า สีของแร่แต่ละชนิดขึ้นอยู่กับต้นกำเนิดของแร่และองค์ประกอบทางเคมีในแร่นั้น อีกทั้งสิ่งเจือปนที่ปะปนอยู่ในแร่ ส่งผลให้สีของแร่ที่ปรากฏมีลักษณะสีที่แตกต่างกันออกไป ข้อแนะนำในการดูสีของแร่ คือ ให้สังเกตโดยการดูสีแร่ที่เป็นสีแรสด (Fresh Minerals) หมายถึง แร่ที่เพิ่งถูกขุดออกมาใหม่ โดยยังไม่ได้ถูกวางทิ้งไว้หรือปะปนกับวัสดุอื่นๆ เนื่องจากแร่ที่ไม่สดหรือแร่ที่ถูกทิ้งไว้ในอากาศอาจมีผลให้แร่ทำปฏิกิริยากับอากาศ หรือแร่ที่

ปะปนกับสิ่งเจือปน ส่งผลให้สีผิวของแร่เปลี่ยนแปลงหรือเพี้ยนไปจากเดิม การรายงานผลทางด้านสีของแร่โดยใช้การถ่ายภาพเป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน

นอกจากนี้แร่บางชนิดมีหลายสี เช่น แร่ฟลูออไรต์หรือแร่ฟลอยอ่อน (Fluorite) เป็นแร่ที่มีหลายสี เช่น สีเขียว สีน้ำเงิน สีเหลือง สีชมพู สีม่วง และไม่มีสี เป็นต้น การที่แร่ฟลูออไรต์แสดงสีปรากฏ (Appearance Colors) ให้เห็นเป็นสีต่างๆ นั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณของแคลเซียมฟลูออไรต์ (CaF_2) ที่ผสมอยู่ในแร่ฟลูออไรต์นั่นเอง ดังนั้นการกำหนดว่าแร่ตัวอย่างมีสีอะไรนั้น เราจึงควรบันทึกสีของแร่สดที่ได้เก็บตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการขุดแร่นั้นขึ้นมา หากแร่ถูกวางทิ้งไว้ในสภาวะอื่นๆ แล้ว เมื่อเราทำการบันทึกสีของแร่ เราควรบันทึกด้วยว่าแร่เคยผ่านสภาวะแบบใดมา เป็นเวลานานเท่าใด ซึ่งอาจส่งผลถึงความชัดเจนของสีแร่ได้ ข้อเสนอแนะอีกประการหนึ่งในการบันทึกผลเรื่องสีของแร่ เราอาจใช้การบันทึกพร้อมกับการแสดงผลเรื่องสีของแร่โดยวิธีการถ่ายภาพ ก็ถือว่าเป็นวิธีการที่รายงานผลที่ดีอีกทางหนึ่งด้วย อีกทั้งปัจจุบันการบันทึกและแสดงผลโดยวิธีภาพถ่ายทำได้ง่ายกว่าในอดีตมาก



รูปที่ 1.1 การทดสอบโดยการขูดก้อนแร่บนแผ่นกระเบื้องเพื่อทดสอบสีผงของแร่

2. สีผง (Streak) เป็นสมบัติเฉพาะตัวของแร่อีกประการหนึ่งที่แสดงผลทดสอบได้ง่าย สีผงของแร่เป็นสีของผงละเอียดที่หลุดออกมาจากผิวแร่ (Mineral Surface) โดยการทดสอบนำแร่มาฝนหรือขูดลงบนแผ่นกระเบื้องสีขาวที่ไม่ได้เคลือบมัน (Streak Plate) ซึ่งเราอาจใช้ด้านขอบของกระเบื้องก็ได้ในการทดสอบดูสีผงของแร่ก็ได้ บางตำราเรียกสีผงของแร่ว่า รอยขีดของแร่ สีของแร่และสีผง (Streak) อาจมีสีเดียวกันหรือสีแตกต่างกันก็ได้ สีผงของแร่มีประโยชน์ในการวิเคราะห์แร่โลหะ เนื่องจากสีผิวของแร่โลหะบางชนิดอาจซีดจางหรือสีหมองเมื่อเวลาผ่านไป เช่น แร่เหล็กฮีมาไทต์ (Hematite) หรือที่รู้จักกันในชื่อของเหล็กไหลจะมีสีเป็นสีดำ แต่มีสีผงเป็นสีแดงเลือดหมู แร่ไพไรต์ (Pyrite) มีสีผิวแร่เป็นสีทองเหลือง (คล้าย

สีทองคำ) แต่สีผงของแร่ไพไรต์เป็นสีดำแกมเขียว เป็นต้น สำหรับแร่โลหะส่วนใหญ่ มีสีของแร่และสีผงที่ใกล้เคียงกัน เช่น กำมะถันมีสีของแร่และสีผงเป็นสีเหลืองเหมือนกัน รูปที่ 1.1 แสดงการทดสอบชุดก้อนแร่บนแผ่นกระเบื้องเพื่อพิสูจน์สีผงของแร่ สีของรอยขีดที่ปรากฏบนแผ่นกระเบื้อง คือ สีผงของแร่ นั่นเอง สีของแร่และสีผงของแร่ต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 สีของแร่และสีผงของแร่ต่างๆ

แร่	สีของแร่	สีผงของแร่
ฮีมาไทต์ (เหล็กไหล)	ดำ	แดงเลือดหมู
ทองคำ	ทองคำ	ทองคำ
เงิน	ขาวแบบเงิน	เงิน
ทองแดง	ทองแดง	ทองแดง
ไพไรต์	ทองเหลือง (คล้ายสีของทองคำ)	ดำแกมเขียว
แมกนีไทต์	ดำ	ดำ
ดีบุก	น้ำตาลเข้มออกดำ	ขาว
วุลแฟรม	น้ำตาล	น้ำตาลเกือบดำ
สฟาเลอไรต์	น้ำตาลปนดำ	น้ำตาลอ่อน
ทัลก์	ขาว เทา เขียว ฟ้า	สีอ่อนออกสีขาว
พลวงเงิน (แร่สตีบโนต์)	เทาตะกั่ว	เทาตะกั่ว
กำมะถัน	เหลือง	เหลือง
ฟลูออไรต์	ขาว เขียว น้ำเงิน เหลือง ชมพู	สีอ่อนออกสีขาว

3. รูปผลึก (Crystal Forms) การตกผลึกของแร่ (Crystallization of Minerals) หมายถึง การแปรสภาพของแร่จากสถานะของเหลวกลายเป็นก้อนแร่ที่มีสถานะเป็นของแข็งเมื่อแร่เย็นตัวลง แร่แต่ละชนิดจะมีรูปร่างของผลึกเฉพาะตัว ผลึกมีลักษณะเป็นของแข็งหลายเหลี่ยม 3 มิติโดยมีความราบเรียบที่ผิวหน้า

รูปผลึกของแร่ (Crystal Forms of Minerals) หมายถึง ลักษณะ (Appearance) หรือลักษณะรูปร่าง (Shapes) ของแร่ที่แสดงปรากฏออกมาเป็นรูปทรงภายนอก หากแร่มี **รูปผลึก** หรือลักษณะของผลึกเป็นรูปทรงเรขาคณิต ก็ช่วยให้การวิเคราะห์ชนิดของแร่ทำได้ง่ายขึ้นตามที่สมบัติทางด้านผลึกของแร่นั้นๆ อย่างไรก็ตาม แร่บางชนิดเมื่อเย็นตัวลงจากสถานะของเหลว กลายเป็นแร่ที่มีสถานะเป็นของแข็งแล้วนั้น ไม่มีรูปผลึกหรือลักษณะที่แน่นอน

เรียกแร่กลุ่มนี้ว่า **แร่อสัณฐาน (Amorphous Minerals)** ดังนั้นรูปผลึกเป็นสมบัติเฉพาะตัวของแร่ส่วนใหญ่ ส่วนขนาดผลึกของแร่นั้น ขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวและสภาพแวดล้อมในระหว่างการตกผลึกของแร่ แร่ที่มีการตกผลึกอย่างช้า ๆ หรือเย็นตัวลงอย่างช้า ๆ ทำให้แร่มีผลึกขนาดใหญ่และหยาบ (Coarse Grains) มีความแข็งแรงสูงกว่าแร่ที่ตกผลึกหรือเย็นตัวรวดเร็ว ซึ่งมีขนาดผลึกที่เล็กละเอียด (Fine Grains) ผลึกแร่ที่เกิดขึ้นโดยการเย็นตัวใต้พื้นโลกจะมีผลึกขนาดใหญ่และหยาบกว่าผลึกของแร่ที่เกิดการเย็นตัวบนพื้นโลกซึ่งจะได้ผลึกแร่ขนาดเล็กที่มีช่วงเวลาเย็นตัวรวดเร็ว

ในทางธรณีวิทยาทางด้านวิศวกรรม จะสนใจเรื่องการเย็นตัวของหินหนืด (Molten Rocks or Magma) โดยแรกเริ่มเมื่อหินหนืดยังมีสถานะเป็นแร่หลายชนิดที่หลอมละลายรวมกันอยู่นั้น หินหนืดมีสถานะเป็นของเหลวร้อน เมื่อหินหนืดเคลื่อนตัวเข้ามาใกล้ผิวโลก โดยอาจเป็นผลมาจากการระเบิดของภูเขาไฟ หรือเกิดจากผลของความดันภายใต้เปลือกโลก เป็นต้น หินหนืดจะมีการเย็นตัวลงและเกิดการตกผลึกของแร่ต่าง ๆ ซึ่งแร่แต่ละชนิดอาจตกผลึกหรือกลายสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิแตกต่างกัน เมื่อเกิดการตกผลึกของแร่ทั้งหลายซึ่งมีขนาดโตขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งขอบผลึกของแร่เจริญและมาชนกัน ทำให้ผลึกแร่แข็งตัวและยึดเกาะกัน การเติบโตของผลึกแร่ก็จะช้าและหยุดลง และการตกผลึกบริเวณอื่นก็จะเกิดขึ้นอีก โดยขึ้นอยู่กับสภาวะปัจจัยแวดล้อมทางด้านความดันและอุณหภูมิที่แร่นั้นอยู่ ในที่สุดแร่ในสถานะของเหลวทั้งหมดจะเกิดการตกผลึกเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งที่ประกอบด้วยผลึกแร่จำนวนมากประสานกันแน่นซึ่งหมายถึงหินนั่นเอง

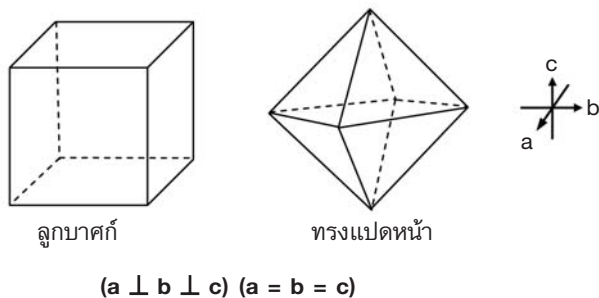
รูปผลึกของแร่ มีลักษณะปรากฏภายนอกเชิงเรขาคณิต ซึ่งมีส่วนประกอบที่ใช้กำหนดรูปร่างของผลึก คือ แกนผลึก (Crystal Axes) และมุมระหว่างแกนผลึก (Crystallographic Angle) โดยรูปผลึกมีรูปร่างต่างกันไป แบ่งออกได้ 6 ระบบ ดังนี้คือ

(1) ระบบสามแกนเท่า (Isometric System) เป็นระบบรูปผลึกของแร่ที่มีรูปร่างประกอบขึ้นด้วย 3 แกนผลึก โดยที่แต่ละแกนผลึกมีความยาวเท่ากัน ($a = b = c$) และมุมระหว่างแกนผลึกทุกแกนตั้งฉากโดยทำมุม 90 องศาซึ่งกันและกันทั้งสามแกน ($a \perp b \perp c$) ผลึกแร่ระบบสามแกนเท่า เป็นระบบผลึกที่มีความสมมาตรที่สุด รูปผลึกของแร่ในระบบนี้มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ตัวอย่างแร่ในระบบนี้ ได้แก่ การ์เน็ต (Garnet หรือ แร่โกเมน) เฮไลต์ (Halite) ฟลูออไรต์ (Fluorite) กาลีน่า (Galena) เพชร (Diamond) ไพไรต์ (Pyrite) แมกนีไทต์ (Magnetite) เป็นต้น

(2) ระบบสองแกนเท่า (Tetragonal System) เป็นระบบรูปผลึกของแร่ที่มีรูปร่างประกอบด้วย 3 แกนผลึก โดยที่แกนในแนวราบ 2 แกนมีความยาวเท่ากัน แต่ไม่เท่ากับความยาวของแกนผลึกในแนวตั้ง ($a = b \neq c$) มุมระหว่างแกนผลึกทุกแกนตั้งฉากโดยทำมุม 90

องศาซึ่งกันและกันทั้งสามแกน ($a \perp b \perp c$) รูปผลึกของแร่ในระบบนี้มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือรูปผลึกเป็นแบบพีระมิดคู่ ดังแสดงในรูปที่ 1.3 ตัวอย่างแร่ในระบบนี้ ได้แก่ แคลซิเทอไรต์ (Cassiterite หรือแร่ดีบุก) เซอร์คอน (Zircon) คาลโคไพไรต์ (Chalcopyrite) ไอโดเครส (Idocrase) ซีไลต์ (Scheelite) เป็นต้น

(3) ระบบสามแกนราบ (Hexagonal System) เป็นระบบรูปผลึกของแร่ที่ประกอบด้วย 4 แกนผลึก โดยมี 3 แกนอยู่ในระนาบหรือแนวราบเดียวกันและแกนผลึกทั้งสามแกนในแนวราบมีความยาวเท่ากัน แกนผลึกในระนาบนี้ทำมุมกัน 120 องศา แกนที่ 4 อยู่ในแนวตั้งมีความยาวไม่เท่ากับ ความยาวแกนทั้งสามแกนในแนวราบ รูปผลึกของแร่ในระบบนี้มีหน้าตัดเป็นรูปหกเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 1.4 ตัวอย่างแร่ในระบบนี้ ได้แก่ ควอตซ์ (Quartz) แคลไซต์ (Calcite) ควอรันดัม (Quorandum) ฮีมาไทต์ (Hematite) แกรไฟต์ (Graphite) เป็นต้น



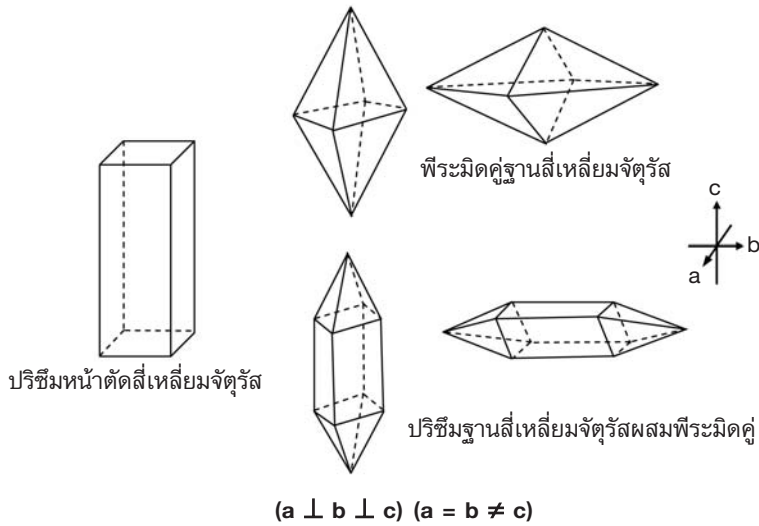
(ก) โกเมน



(ข) ฟลูออไรต์

รูปที่ 1.2 ระบบผลึกแบบสามแกนเท่า เช่น โกเมน ฟลูออไรต์

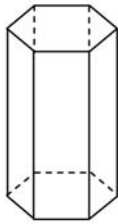
(4) ระบบสามแกนต่าง (Orthorhombic System) เป็นระบบรูปผลึกของแร่ที่มีรูปร่างประกอบด้วย 3 แกนผลึก โดยที่แกนทั้งสามมีความยาวไม่เท่ากัน ($a \neq b \neq c$) แต่มุมระหว่างแกนผลึกทุกแกนตั้งฉากโดยทำมุม 90 องศาซึ่งกันและกันทั้งสามแกน ($a \perp b \perp c$) รูปผลึกของแร่ในระบบนี้มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังแสดงในรูปที่ 1.5 ตัวอย่างแร่ในระบบนี้ ได้แก่ แบไรต์ (Barite) โอลิวีน (Olivine) โคลัมไบต์ (Columbite) บุษราคัม (Topaz) สติบไนต์ (Stibnite หรือแร่พลวงเงิน) เป็นต้น



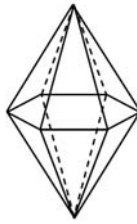
รูปที่ 1.3 ระบบผลึกแบบสองแกนเท่า เช่น แร่ไอดोเครส

(5) **ระบบหนึ่งแกนเอียง (Monoclinic System)** เป็นระบบรูปผลึกของแร่ที่มีรูปร่างประกอบด้วย 3 แกนผลึก โดยที่แกนทั้งสามมีความยาวไม่เท่ากัน ($a \neq b \neq c$) มุมระหว่างแกนผลึก 2 แกนทำมุมตั้งฉากกัน ($a \perp b$) ส่วนแกนที่สามเอียงไม่ตั้งฉากกับสองแกนแรก ดังแสดงในรูปที่ 1.6 ตัวอย่างแร่ในระบบนี้ ได้แก่ ฮอร์นเบลนด์ (Hornblende) ทัลก์ (Talc) ออไจต์ (Augite) ยิปซัม (Gypsum) ออร์โทเคลส (Orthoclase) และมัสโคไวต์ (Muscovite) เป็นต้น

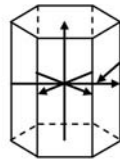
(6) **ระบบสามแกนเอียง (Triclinic System)** เป็นระบบรูปผลึกของแร่ที่มีรูปร่างประกอบด้วย 3 แกนผลึก โดยที่แกนทั้งสามมีความยาวไม่เท่ากัน ($a \neq b \neq c$) มุมระหว่างแกนผลึกทั้งสามมุมไม่มีแกนผลึกใดตั้งฉากซึ่งกันและกันเลย ดังแสดงในรูปที่ 1.7 ตัวอย่างแร่ในระบบนี้ ได้แก่ แพลจิโอเคลส (Plagioclase) โรโดไนต์ (Rhodonite) คาลแคนโทต์ (Chalcanthite) แอซไนต์ (Axinite) เป็นต้น



ปริซึมหน้าตัดหกเหลี่ยม



พีระมิดคู่ฐานหกเหลี่ยม



3 แกนราบทำมุม
กัน 120 องศา
และมีแกนแนวตั้ง

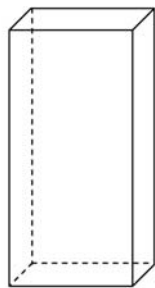


(ก) ควอตซ์

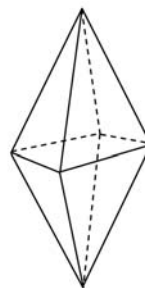


(ข) แคลไซต์

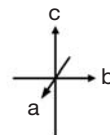
รูปที่ 1.4 ระบบผลึกแบบสามแกนราบ เช่น แร่ควอตซ์ แร่แคลไซต์



ปริซึมหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า



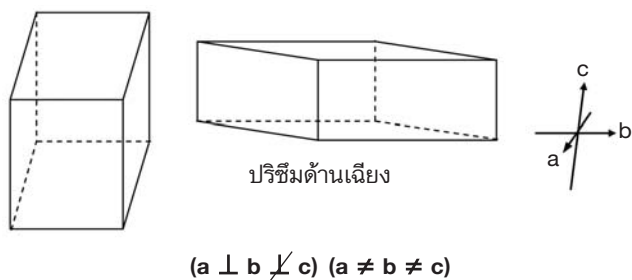
พีระมิดคู่ฐานสี่ด้านขนาน



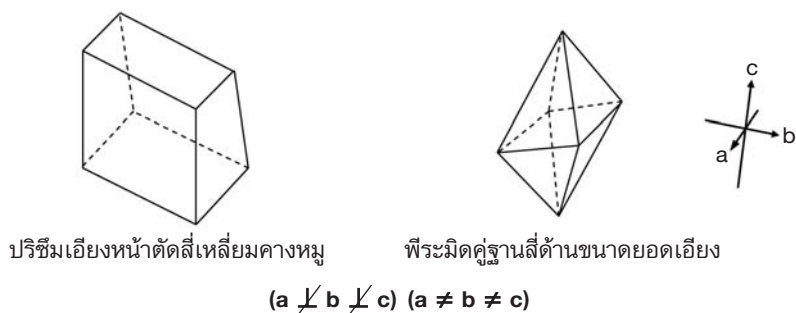
$$(a \perp b \perp c) \quad (a \neq b \neq c)$$



รูปที่ 1.5 ระบบผลึกแบบสามแกนต่าง เช่น แร่บุษราคัม (Topaz)



รูปที่ 1.6 ระบบผลึกแบบหนึ่งแกนเอียง เช่น แร่ออร์โทเคลส



รูปที่ 1.7 ระบบผลึกแบบสามแกนเอียง เช่น แร่แอกซิโนต์

4. ความแข็ง (Hardness) ความแข็งของแร่ คือ ความทนทานของแร่ต่อการถูกขูดขีด กล่าวคือ เมื่อแร่ที่กำลังตรวจสอบถูกขูดขีดโดยอาศัยแร่ที่มีค่าความแข็งสัมพัทธ์ที่แตกต่างกัน

ในการตรวจสอบความแข็งของแร่ นั้น ได้ใช้มาตรฐานหน่วยวัดเป็นความแข็งสัมพัทธ์ของโมส์ (Moh's Scale of Hardness) ที่เป็นชุดความแข็งของแร่มาตรฐาน 10 ชนิด โดยมีค่าระดับความแข็งของโมส์ระดับ 1 ถึงระดับ 10 ตามชนิดของแร่มาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 1.2 โดยเรียงตามลำดับความแข็งของโมส์จากน้อยที่สุดระดับ 1 โดยมีแร่มาตรฐาน คือ แร่ทัลก์ ไปถึงความแข็งของโมส์มากที่สุดระดับ 10 โดยมีแร่มาตรฐาน คือ เพชร

ตารางที่ 1.2 แร่มาตรฐานตามระดับความแข็งของโมส์

ค่าระดับความแข็งของโมส์	แร่มาตรฐาน	คุณลักษณะเทียบเคียงความแข็ง	วัตถุอื่นที่อาจใช้แทนเมื่อทดสอบภาคสนาม
1	ทัลก์	เล็บมือขีดเข้า	เล็บมือ
2	ยิปซัม	เล็บมือขีดเข้า	เล็บมือ
3	แคลไซต์	เหรียญขีดเข้า	เหรียญ ลวดทองแดง
4	ฟลูออไรต์	กระจกขีดเข้า	กระจก แผ่นกระเบื้อง
5	อะพาไทต์	กระจกขีดเข้า	กระจก แผ่นกระเบื้อง
6	ออร์โทเคลส	กระจกขีดเข้า	กระจก แผ่นกระเบื้อง
7	ควอตซ์	ก้อนแร่ขีดกระจกเป็นร่องได้	แผ่นกระจก
8	บุษราคัม	ก้อนแร่ขีดกระจกเป็นร่องได้	แผ่นกระจก
9	คอรัันดัม	ก้อนแร่ขีดกระจกเป็นร่องได้	แผ่นกระจก
10	เพชร	มีความแข็งสูงสุด ขีดวัตถุอื่นให้เป็นร่องหรือรอยขีดได้	

โดยแร่ที่มีค่าระดับความแข็งแบบโมส์ต่ำกว่า เมื่อถูกขีดขีดจะปรากฏเป็นรอยขีดหรือร่องลึกเกิดขึ้นบนผิวแร่ที่มีความแข็งต่ำกว่า ในทางกลับกัน แร่ที่มีค่าระดับความแข็งมากกว่า เมื่อถูกขีดขีดโดยแร่ที่มีระดับความแข็งต่ำ จะไม่แสดงรอยขีดขึ้นบนผิวแร่ที่มีความแข็งมากกว่า ลักษณะปรากฏดังกล่าว อาจเรียกว่าการขีดเข้าหรือการขีดไม่เข้าก็ได้ ค่าสัมพัทธ์กันด้านความแข็งของแร่แต่ละชนิดนั้น อาจดูผลทดสอบได้จากความลึกของร่องรอยขีดที่เกิดขึ้นโดยการส่องดูด้วยแว่นขยาย การทดสอบอย่างง่าย ๆ เช่นนี้ จะทำให้เราทราบถึงค่าระดับความแข็งซึ่งถือว่าเป็นลักษณะเฉพาะตัวของแร่

อย่างไรก็ตาม การกำหนดค่าระดับความแข็งแบบโมส์สเกลนี้ เราต้องเทียบกับแร่มาตรฐานซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นก้อนแร่ที่เก็บไว้ในห้องปฏิบัติการทางด้านธรณี ดังแสดงในตารางที่ 1.2 ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปแล้ว เราควรทราบถึงค่าระดับความแข็งของวัตถุรอบตัวที่หาได้โดยง่าย เพื่อสะดวกในการพกพาไปทดสอบภาคสนามและเพื่อหาค่าความแข็งของแร่ในเบื้องต้นได้โดยง่าย ซึ่งจัดเป็นข้อมูลสำคัญที่นักธรณีและวิศวกรสามารถใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ชนิดของแร่ในเบื้องต้นในขณะทำการสำรวจพื้นที่ภาคสนามได้อีกด้วย ทั้งนี้วัตถุที่สามารถพกพาไปในสนามที่ทราบค่าความแข็งแบบโมส์สเกล ได้แก่

- (1) เล็บมือ มีค่าระดับความแข็งประมาณ 2.5
- (2) ปลายดินสอกด มีค่าระดับความแข็งประมาณ 2.5
- (3) เหรียญหรือลวดทองแดง มีค่าระดับความแข็งประมาณ 3.5
- (4) ใบมีดคัตเตอร์ มีค่าระดับความแข็งประมาณ 3.5
- (5) แผ่นกระจก มีค่าระดับความแข็งประมาณ 5.5
- (6) มีดพกแบบแข็ง มีค่าระดับความแข็งประมาณ 5.5
- (7) ตะไบเหล็ก มีค่าระดับความแข็งประมาณ 6.5
- (8) แร่รัตนชาติจำพวกพลอย มีค่าระดับความแข็งประมาณ 6–7
- (9) แผ่นกระเบื้อง มีค่าระดับความแข็งประมาณ 6.5
- (10) เม็ดทราย มีค่าระดับความแข็งประมาณ 7

เมื่อประมาณระดับความแข็งเบื้องต้นจากข้อมูลภาคสนามแล้ว วิศวกรควรเก็บตัวอย่างแร่จากสนามมาทดสอบโดยละเอียดในห้องปฏิบัติการเพื่อทราบค่าระดับความแข็งที่แม่นยำขึ้น จากข้อสังเกตการใช้วัตถุเทียบเคียงความแข็ง อาจยกตัวอย่างได้อีกนัยหนึ่งว่า เล็บมือสามารถขีดขีดแร่ทัลก์และยิปซัมให้เป็นรอยขีดได้ หรือแผ่นกระจกสามารถขีดขีดแร่ที่มีระดับความแข็ง 1–6 ให้ปรากฏรอยขีดได้ เป็นต้น

5. ความวาว (Luster) คือ ลักษณะผิวแร่ที่เกิดการสะท้อนเมื่อกระทบแสง ความวาวของแร่มีลักษณะปรากฏเป็นประกายขึ้นบนผิวแร่ โดยเป็นผลมาจากพันธะ (Bonding) ของอะตอมต่างๆ ในผลึกของแร่ซึ่งส่งผลให้การหักเหของแสง การสะท้อนแสง และการกระจายแสงบนผิวแร่แตกต่างกันไป ทำให้ปริมาณและคุณภาพของความวาวที่ปรากฏบนผิวของแร่แต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ความวาวของแร่แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ ความวาวแบบโลหะและความวาวแบบอโลหะ ความวาวของแร่เป็นลักษณะเฉพาะตัวของแร่แต่ละชนิดซึ่งสามารถใช้เป็นสมบัติหนึ่งในการจำแนกแร่

(1) ความวาวแบบโลหะ (Metalic Luster) เป็นคุณลักษณะความวาวของพวกแร่โลหะ โดยทั่วไปเป็นแร่หนัก กล่าวคือ เป็นแร่ที่มีหน่วยน้ำหนักหรือความถ่วงจำเพาะสูง ซึ่งเป็นกลุ่มแร่ที่มีการสะท้อนแสงสูง โดยแร่ที่มีความวาวแบบโลหะทั่วไปจะทึบแสงทำให้การสะท้อนแสงที่ผิวแร่เกิดขึ้นได้ดี เช่น แร่แมกนีไทต์ แร่ทองคำ แร่เงิน แร่กาไลนา และแร่ไพไรต์ เป็นต้น

(2) ความวาวแบบอโลหะ (Non-metalic Luster) เป็นคุณลักษณะความวาวของพวกแร่อโลหะ แร่กลุ่มนี้มีการสะท้อนแสงค่อนข้างสูง แต่ไม่ทึบแสงโดยสมบูรณ์ เมื่อตัดแร่

กลุ่มนี้ให้เป็นแผ่นบางจะพบว่ามีความโปร่งแสงอยู่ โดยจะสังเกตเห็นการผ่านของแสงได้ ชัดบริเวณขอบแร่ ความวาวแบบโลหะนี้อาจบรรยายได้โดยจำแนกย่อยตามลักษณะของความวาวที่แตกต่างกันได้ดังนี้ คือ

- ความวาวแบบแก้ว (Vitreous Luster) มีลักษณะความวาวแบบแก้วแตก เช่น ควอตซ์ บุษราคัม แคลไซต์ และฟลูออไรต์ เป็นต้น
- ความวาวแบบเพชร (Adamantine Luster) มีลักษณะความวาวเป็นประกายผิวแร่ที่มีความวาวแบบเพชร มีค่าดัชนีการหักเหของแสงสูง และการกระจายแสงบนผิวแร่สูงมาก เช่น เพชร ดีบุก คอรันดัม และตะกั่ว เป็นต้น
- ความวาวแบบยางสน (Resinous Luster) มีลักษณะความวาวคล้ายน้ำเทียนไขที่กำลังติดไฟอยู่ แต่มีสีขุ่นแบบน้ำยาพารา เช่น สฟาเลอไรต์ วุลไฟไนต์ และกำมะถัน เป็นต้น
- ความวาวแบบมุก (Pearly Luster) มีลักษณะความวาวที่มีผิวแร่สีขุ่นแต่สะท้อนเหลือบสีมุก เช่น ทัลก์ ไมกา และแบไรต์ เป็นต้น
- ความวาวแบบอมน้ำมัน (Greasy Luster) มีลักษณะความวาวที่ดูคล้ายมีน้ำมันเคลือบอยู่ เช่น โอปอล เป็นต้น
- ความวาวแบบใยไหม (Silky Luster) มีลักษณะความวาวที่ผิวแร่มีลักษณะสีเหลือบๆ และแรมมีการเรียงตัวกันเป็นแนวยาวคล้ายใยไหม เช่น แร่ใยหิน ยิปซัม เป็นต้น
- ความด้านเหมือนดิน (Earthy Luster) มีลักษณะปรากฏที่ดูขุ่นมัวคล้ายดินเนื่องจากไม่มีปริมาณแสงสะท้อนที่ผิวของแร่เลย เช่น ดินขาว โลมอนด์ ซอล์ก แร่ดินเหนียว เป็นต้น

6. ความคงทนของแร่ (Tenacity) คือ ความทนทานของแร่ต่อแรงกระทำ เช่น การตี ทุบ หัก งอ หรือตัดให้เป็นชิ้น ความคงทนของแร่ขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมภายในของแร่ชนิดนั้นๆ โดยสามารถบรรยายแร่เรื่องความคงทนของแร่ ได้เป็นลักษณะต่างๆ ดังนี้ คือ

- (1) เปราะ (Brittle) เช่น กาลีน่า กำมะถัน ไพไรต์ โอลิวีน เป็นต้น
- (2) ตัดออกเป็นชิ้นได้ด้วยมีด (Sectile) เช่น ทัลก์ แกรไฟต์ ยิปซัม เป็นต้น
- (3) เหนียว ทุบให้แบนเป็นแผ่นบางได้ (Malleable) เช่น ทองคำ (ทองคำเปลว) ทองแดง เงิน เป็นต้น
- (4) ยืดได้หรือดึงเป็นเส้นได้ (Ductile) เช่น ทองคำ ทองแดง เงิน ตะกั่ว เป็นต้น
- (5) งอบิดได้ (Flexible) เช่น ทัลก์ โบโอไทต์ เป็นต้น
- (6) งอยืดหยุ่น (Elastic) เช่น ไมกา เป็นต้น

สมบัติทางด้านความคงทนของแร่ นั้น เป็นสมบัติที่ใช้จำแนกแยกแยะประเภทของแร่ ได้ ยกตัวอย่างเช่น ทองคำและไพไรต์ เป็นแร่ที่มีสีปรากฏของแร่ (Colors) และรูปผลึก (Crystals) รวมถึงสมบัติภายนอกหลายประการคล้ายคลึงกัน แต่สมบัติด้านความคงทนของทองคำและไพไรต์มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน กล่าวคือ เมื่อแร่ทั้งสองประเภทถูกทดลองทุบ แร่ทองคำเป็นแร่ที่มีความเหนียวจะแบนและแผ่ออกเป็นแผ่นบางได้ ส่วนแร่ไพไรต์จะแตกเป็นชิ้นตามแนวผลึกแร่ (Cleavage) เพราะแร่ไพไรต์มีความเปราะ ดังแสดงในรูปที่ 1.8 แสดงภาพแผ่นทองคำเปลวที่สามารถแผ่ออกเป็นแผ่นบางเพราะมีความเหนียว ส่วนก้อนแร่ไพไรต์ที่ดูภายนอกมีสีของแร่คล้ายแร่ทองคำ แต่แร่ไพไรต์เป็นแร่ที่มีความเปราะ



(ก) ทองคำเปลว



(ข) ไพไรต์

รูปที่ 1.8 ทองคำเปลวมีความเหนียวและแร่ไพไรต์มีความเปราะแต่สีของแร่คล้ายกัน

7. ความถ่วงจำเพาะของแร่ (Specific Gravity of Minerals) เป็นสมบัติของแร่ ที่แสดงถึงอัตราส่วนของหน่วยน้ำหนักของเม็ดแร่ต่อหน่วยน้ำหนักของน้ำที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส (4 °C) กล่าวคือ ความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) แสดงถึงแร่มีน้ำหนักเป็นกี่เท่าของน้ำเมื่อพิจารณาที่ปริมาตรเท่ากัน เช่น แร่ควอตซ์มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.65 หมายความว่า เมื่อแร่ควอตซ์และน้ำมีปริมาตรเท่ากัน ควอตซ์มีน้ำหนักมากกว่าเป็น 2.65 เท่าของน้ำที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นต้น โดยที่ค่าความถ่วงจำเพาะของแร่สามารถคำนวณได้โดยสมการที่ (1.1)

ดังนั้นความถ่วงจำเพาะของแร่บ่งบอกความรู้สึกถึงความหนักเบาของแร่ นั้นๆ แร่ที่มีความถ่วงจำเพาะสูงจะมีน้ำหนักมากกว่าแร่ที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำในขนาดปริมาตรที่เท่ากัน กล่าวคือ แร่ที่มีความถ่วงจำเพาะสูงเป็นแร่ที่มีหน่วยน้ำหนักสูง นั่นเอง ความถ่วงจำเพาะของแร่เป็นสมบัติเฉพาะของแร่ที่สำคัญอย่างหนึ่ง ซึ่งอาจใช้แสดงถึงความบริสุทธิ์ของแร่ในขั้นตอนของการแยกสินแร่ (Ore) ออกจากกากแร่ที่เจือปนมาในระหว่างขั้นตอนการสำรวจแร่ได้อีกด้วย

อย่างไรก็ตาม ในการปฏิบัติการทางธรณีวิทยาเพื่อตรวจวัดค่าความถ่วงจำเพาะของแร่ เราสามารถทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของแร่ที่ต้องการตรวจสอบ โดยวิธีการชั่งก้อนแร่เอกพันธ์ (Homogeneous Mass) โดยใช้เครื่องชั่งมาตรฐาน ชั่งน้ำหนักแร่ในน้ำและในอากาศ แล้วนำค่าน้ำหนักที่ชั่งได้มาคำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะของแร่ โดยใช้สมการที่ (1.2)

ก้อนแร่เอกพันธ์ หมายถึง แร่ที่มีลักษณะเป็นก้อนทึบประกอบด้วยแร่ชนิดใดชนิดหนึ่งเป็นหลัก แร่ที่เจือปนมาถือว่าเป็น **กากแร่ (Gangue)** ที่อาจต้องถูกคัดแยกในกระบวนการคัดแยกแร่ในภายหลัง เพื่อให้แร่ที่ต้องการนั้นเป็นแร่บริสุทธิ์ยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าค่าความถ่วงจำเพาะของแร่นั้น เป็นค่าหน่วยน้ำหนักของก้อนแร่เทียบกับหน่วยน้ำหนักของน้ำที่พิจารณาเมื่อก้อนแร่นั้นไม่มีช่องว่างเลย กล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าความถ่วงจำเพาะของแร่เป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของเม็ดแร่ั่นเอง ค่าความถ่วงจำเพาะของแร่ต่างๆ ที่ควรรู้จักดังแสดงในตารางที่ 1.3

ซึ่งมีข้อสังเกตด้วยว่าแร่โลหะจัดเป็นแร่เบา มีค่าความถ่วงจำเพาะค่อนข้างต่ำ โดยทั่วไปแร่โลหะมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า 5.0 เช่น แบไรต์มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 4.50 และควอตซ์มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.65 เป็นต้น ในขณะที่แร่โลหะอาจจัดอยู่ในกลุ่มของแร่หนัก มีค่าความถ่วงจำเพาะสูง เช่น ทองคำบริสุทธิ์ ซึ่งเป็นแร่โลหะมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงถึง 19.32 และดีบุกมีความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 6.80–7.10 เป็นต้น

$$G_i = \frac{\gamma_{m@4^\circ\text{C}}}{\gamma_{w@4^\circ\text{C}}} \quad \dots(1.1)$$

$$G_i = \frac{W_{\text{air}}}{W_{\text{air}} - W_{\text{wet}}} \quad \dots(1.2)$$

เมื่อ G_i	คือ ความถ่วงจำเพาะของแร่ที่ต้องการตรวจสอบ
$\gamma_{m@4^\circ\text{C}}$	คือ หน่วยน้ำหนักของแร่ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส
$\gamma_{w@4^\circ\text{C}}$	คือ หน่วยน้ำหนักของน้ำที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส
W_{air}	คือ น้ำหนักของแร่ในอากาศ
W_{wet}	คือ น้ำหนักของแร่ในน้ำ

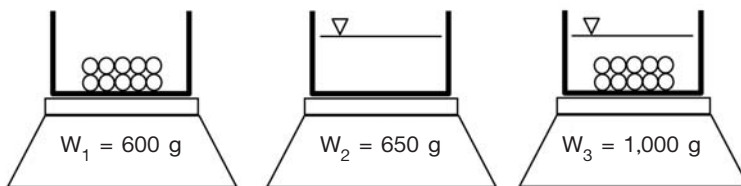
ตารางที่ 1.3 ค่าความถ่วงจำเพาะของแร่ต่างๆ

แร่	ความถ่วงจำเพาะของแร่
ควอตซ์ (เม็ดทราย)	2.65
แร่ดินเหนียว	2.60
ทองคำ	19.25–19.35
ทองคำบริสุทธิ์	19.32
เงิน	10.4–10.6
ทองแดง	8.95
ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์	1.50
แมกนีไทต์	4.9–5.2
ฮีมาไทต์	4.6–5.3
โลมอนด์	4.0–4.8
ดีบุก	6.8–7.1
เฟลด์สปาร์	2.5–2.6
สังกะสี	7.15
เฮไลต์	2.1–2.6
ยิปซัม	2.3–2.4
เซอร์เพนทีน	2.3–2.6
ออร์โทเคลส	2.5–2.6
แพลจิโอเคลส	2.6–2.8
คลอไรต์	2.6–3.0
อีลไลต์	2.6–3.0
เคโอลิไนต์	2.6
แคลไซต์	2.7
มัลโคไต์	2.7–3.0
ไบโอไทต์	2.8–3.1
โดโลไมต์	2.8–3.1
แอนไฮไดรต์	2.9–3.0
ไพรอกซีน	3.2–3.6
โอลิวีน	3.2–3.6

ตารางที่ 1.3 (ต่อ) ค่าความถ่วงจำเพาะของแร่ต่างๆ

แร่	ความถ่วงจำเพาะของแร่
แบไรต์	4.3–4.6
แมกนีไทต์	4.4–5.2
ไพไรต์	4.9–5.2
กาสิโน	7.4–7.6
แกรไฟต์	2.2
สตีบไนต์ (แร่พลวงเงิน)	4.5
เพชร	3.5
ซีโลต์	5.9–6.1

ตัวอย่างที่ 1.1 แร่ตัวอย่างจำนวนหนึ่งถูกนำมาทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะในห้องปฏิบัติการ ได้ผลการทดสอบค่าน้ำหนักต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 1.9 จงคำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ยของแร่ตัวอย่างนี้ กำหนดให้ภาตภาชนะที่ใช้ในการทดลองมีน้ำหนักเท่ากับ 100 กรัม



รูปที่ 1.9 ภาพประกอบตัวอย่างที่ 1.1

Solⁿ W_{tray} คือ น้ำหนักภาต = 100 กรัม

W_{air} คือ น้ำหนักแร่แห้งในอากาศ = $W_1 - W_{\text{tray}} = 600 - 100 = 500$ กรัม

W_{wet} คือ น้ำหนักแร่แห้งในน้ำ = $(W_3 - W_{\text{tray}}) - (W_2 - W_{\text{tray}}) = 350$ กรัม

จากสมการที่ (1.2)
$$G_s = \frac{W_{\text{air}}}{W_{\text{air}} - W_{\text{wet}}}$$

ดังนั้น
$$G_s = \frac{500}{500 - 350} = 3.33$$

ตอบ

หนังสือ **กลศาสตร์ของหินและงานอุโมงค์ (Rock Mechanics and Tunneling)** เล่มนี้ มีเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับกลศาสตร์และพฤติกรรมทางวิศวกรรมของหิน โดยผู้อ่านสามารถใช้ในการศึกษาเพื่อเป็นพื้นฐานและนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านวิศวกรรมของหิน จึงเหมาะสำหรับนิสิต นักศึกษา วิศวกรโยธา และผู้สนใจในสาขาที่เกี่ยวข้องกับงานด้านวิศวกรรมปฐพีและธรณีเทคนิค (Geotechnical Engineering) นอกจากนี้ ยังเหมาะสำหรับใช้ประกอบการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา โดยผู้อ่านสามารถเรียนรู้เนื้อหาเพิ่มเติมเพื่อทำความเข้าใจในหลักวิชาทางด้านกลศาสตร์ของหินได้ด้วยตนเอง มีเนื้อหา 10 บท ประกอบด้วย แร่ประกอบในหิน วัฏจักรทางธรณี และการเกิดดิน ชนิดของหิน สมบัติทางกายภาพของหิน สมบัติทางวิศวกรรมของหิน การจำแนก หินทางวิศวกรรม กำลังและหลักการพิบัติของหิน การก่อสร้างอุโมงค์ในหินโดยวิธี Tunnel Boring Machine การวิเคราะห์หน่วยแรงในชั้นหินและผนังอุโมงค์ รวมทั้งการวิเคราะห์และออกแบบค้ำยัน ผนังอุโมงค์ในหิน เป็นต้น



ประวัติผู้เขียน

รศ.ดร. ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข

อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษา

- พ.ศ. 2552 Ph.D. (Civil Engineering) University of Michigan, Ann Arbor, USA
- พ.ศ. 2548 M.Sc. (Civil Engineering) University of Colorado at Boulder, USA
- พ.ศ. 2546 M.Eng. (Civil Engineering) Kasetsart University, Bangkok, Thailand
- พ.ศ. 2544 วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ ประเทศไทย

ประวัติการทำงาน

- พ.ศ. 2559 **ถึงปัจจุบัน** การทำงานทางด้านบริหารองค์กร ดำรงตำแหน่งเป็น ผู้ช่วยคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ ฝ่ายกายภาพและสภาพแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ
- พ.ศ. 2558 **ถึงปัจจุบัน** รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ
- พ.ศ. 2554 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ
- พ.ศ. 2546 อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ



www.se-ed.com



sbc.fans



SE-ED Publisher

พร้อมจำหน่ายในรูปแบบ

- | | |
|--|---|
| ☒ e-book (PDF) | ☐ audiobooks |
| ☐ e-book (EPUB) | ☐ audio CD / MP3 |
| <hr/> | |
| ☒ ปกอ่อน | ☐ LARGE PRINT (ตัวอักษรขนาดใหญ่) |

ISBN 978-616-08-4610-8



9 786160 846108
309 บาท

คู่มือเรียน-สอบ/อุดมศึกษา-
วิศวกรรมศาสตร์