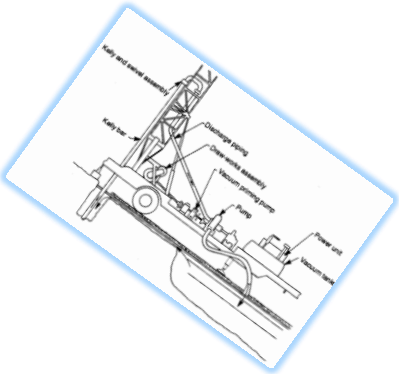
ประมวลวิธีปฏิบัติด้านการพัฒนาน้ำบาดาล

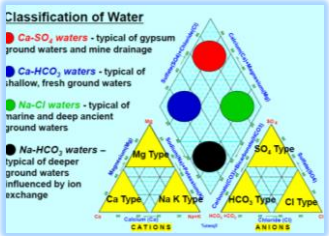
Codes of Practice on Groundwater Development

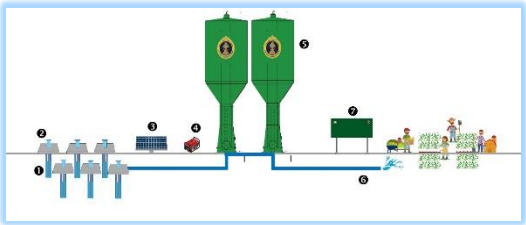
นายมหิปพงศ์ วรกุล

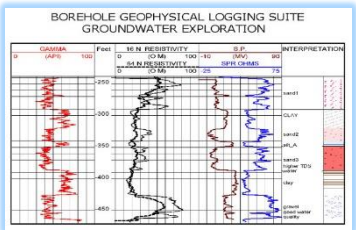
วท.บ. (ธรณีวิทยา) วท.ม. (เทคโนโลยีธรณี)

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล









พฤษภาคม 2564

ประมวลวิธีปฏิบัติด้านการพัฒนาน้ำบาดาล

Codes of Practice on Groundwater Development

นายมหิปพงศ์ วรกุล

พฤษภาคม 2564

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณท่านศักดิ์ดา วิเชียรศิลป์ อธิบดีกรมทรัพยากรน้ำบาดาล ที่สนับสนุนให้ผู้เขียนได้ดำเนินการเขียนหนังสือเล่มนี้ให้สมบูรณ์พร้อมกับให้คำปรึกษาและแนะนำในหลายด้านหลายประเด็น ผู้เขียนขอขอบพระคุณอาจารย์ชัยพร ศิริพรไพบูลย์ อดีตผู้ตรวจราชการกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นบุคคลต้นแบบของผู้เขียนที่ได้เขียนแนวทางการปฏิบัติทางวิชาการเกี่ยวกับการพัฒนาน้ำบาดาลอย่างเป็นระบบที่ผู้เขียนได้ใช้เค้าโครงมาประมวลแล้วเขียนลงลึกในรายละเอียด ผู้เขียนขอขอบคุณทุกกำลังใจที่ส่งให้กับผู้เขียนผ่านสื่อสังคมต่าง ๆ เมื่อท่านเหล่านั้นได้รับทราบว่าผู้เขียนกำลังจะเขียนหนังสือเรื่อง “ประมวลวิธีปฏิบัติในการพัฒนาน้ำบาดาล” เล่มนี้

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ดร.อรนุช หล่อเพ็ญศรี ผู้ตรวจราชการกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ที่ช่วยอ่านต้นฉบับในหลาย ๆ บท เพื่อที่จะได้ให้คำแนะนำในเนื้อหาสาระของคู่มือเล่มนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบคุณ ดร.ทัศนีย์ เนตรทัศน์ นักธรณีวิทยาชำนาญการพิเศษ กรมทรัพยากรน้ำบาดาล ที่ส่งไฟล์การบรรยายเกี่ยวกับอุทกเคมีของน้ำบาดาลให้ผู้เขียนได้ศึกษาและทำความเข้าใจ ขอขอบคุณคุณพรอุษา อุดมศิลป์ นักธรณีวิทยาชำนาญการพิเศษ กรมทรัพยากรน้ำบาดาล ที่ให้คำแนะนำในการปรับแก้ไขและเพิ่มเติมชื่อหัวข้อทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ผู้เขียนขอขอบคุณคุณพัสกร อาจศิริ นักธรณีวิทยาชำนาญการ กรมทรัพยากรน้ำบาดาล ที่แบ่งปันข้อเขียนและข้อมูลด้านการหยั่งธรณีฟิสิกส์หลุมเจาะ ขอขอบคุณคุณสัตยา อินตานำ นักธรณีวิทยาปฏิบัติการ กรมทรัพยากรน้ำบาดาล ที่ช่วยแปลงข้อมูลการวิเคราะห์น้ำบาดาลเป็นข้อมูลแบบแผนภูมิต่าง ๆ

ขอขอบคุณคุณสัมพันธ์ รักนาค วิศวกรปิโตรเลียม บริษัท ปตท.สผ. จำกัด ที่ช่วยแก้ไขและเพิ่มเติมเรื่องอุปกรณ์การเจาะและระบบการเจาะต่าง ๆ ขอขอบคุณสุดารัตน์ เดชภูมี ที่อนุเคราะห์ตำราด้านชลศาสตร์และกลศาสตร์ของไหล ขอขอบคุณคุณอนุศักดิ์ ประสมสิน วิศวกรปฏิบัติการ กรมทรัพยากรน้ำบาดาล ที่ช่วยให้คำปรึกษาแนะนำและแบ่งปันความรู้เกี่ยวกับวิชากลศาสตร์ของไหล ขอขอบคุณคุณวศินี ทวีธนวาณิชย์ วิศวกรชำนาญการ กรมทรัพยากรน้ำบาดาล ที่ช่วยจัดเตรียมรายละเอียดโครงการส่งน้ำรูปแบบต่าง ๆ ของกรมทรัพยากรน้ำบาดาลให้กับผู้เขียน ขอขอบคุณคุณแสงเดือน เรืองเศรษฐกิจ นักธรณีวิทยา กรมทรัพยากรน้ำบาดาล ที่ช่วยผู้เขียนในการจัดการหน้าสารบัญจนเรียบร้อยและสวยงาม ท้ายที่สุดนี้ผู้เขียนขอขอบคุณทุกกำลังใจที่ส่งมาจนทำให้หนังสือเล่มนี้เสร็จสิ้นโดยสมบูรณ์

ผู้เขียนขอขอบคุณผู้บังคับบัญชา และพี่ ๆ น้อง ๆ ในสายงานอาชีพธรณีวิทยา สายงานอุทกธรณีวิทยา สายงานธรณีฟิสิกส์ และกัลยาณมิตรทั้งในอดีตและปัจจุบันที่ถ่ายทอดและแบ่งปันความรู้ประสบการณ์ซึ่งกันและกันมาตลอด ผู้เขียนขอมอบคุณความดีของหนังสือเล่มนี้แก่บิดา-มารดา ผู้ให้กำเนิด และเป็นคุณครูคนแรก รวมถึงพี่-น้องร่วมอุทรผู้อยู่เคียงข้างกันตลอดมา ขอมอบให้ภรรยาที่คอยปลอบโยนและให้กำลังใจอยู่เสมอมา ขอมอบให้แก่บูรพคณาจารย์ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาทุกแขนงทุกท่านตั้งแต่ชั้นประถมศึกษาจนถึงระดับมหาวิทยาลัย จนถึงวัยทำงาน

คำนำ

เป็นระยะเวลาเกือบ 36 ปีที่ผู้เขียนได้ปฏิบัติงานด้านน้ำบาดาล เริ่มตั้งแต่จบปริญญาตรีใหม่ ๆ ในปี พ.ศ. 2528 ก็ได้เริ่มงานกับบริษัทเอกชนแห่งหนึ่งซึ่งตั้งอยู่ในกรุงเทพมหานคร เริ่มด้วยงานสำรวจธรณีฟิสิกส์เพื่อกำหนดจุดเจาะบ่อน้ำบาดาล ในปี พ.ศ. 2529 ผู้เขียนได้มีโอกาสทำงานเป็นลูกจ้างตำแหน่งนักธรณีวิทยาที่ฝ่ายพัฒนาน้ำบาดาลเพื่อการชลประทาน กองวิทยาการธรณี กรมชลประทาน ที่โครงการชลประทานจังหวัดพิจิตร เป็นโครงการร่วมระหว่างไทย-ออสเตรเลีย รับผิดชอบงานด้านวิเคราะห์ตัวอย่างดิน-หินจากหลุมเจาะ การแปลความหมายข้อมูลการหยั่งธรณีหลุมเจาะ การออกแบบก่อสร้างบ่อน้ำบาดาล และการพัฒนาบ่อน้ำบาดาล ต่อมาในปี พ.ศ. 2530 ผู้เขียนได้รับการบรรจุให้เป็นข้าราชการที่กองน้ำบาดาล กรมทรัพยากรธรณี รับผิดชอบงานวิเคราะห์ตัวอย่างดิน-หินจากหลุมเจาะ งานสำรวจธรณีฟิสิกส์ งานศึกษา สำรวจและจัดทำแผนที่น้ำบาดาลจังหวัดมาตราส่วน 1:100,000 บ้างในบางจังหวัด หลังจากทำงานได้ 11 ปี ผู้เขียนได้ลาศึกษาต่อปริญญาโทที่คณะเทคโนโลยีธรณี มหาวิทยาลัยขอนแก่น ซึ่งทำให้ผู้เขียนได้เรียนรู้เกี่ยวกับศาสตร์ด้านอุทกธรณีวิทยายุคใหม่ หรือ Modern Hydrogeology ซึ่งทำให้ผู้เขียนได้เรียนรู้มากขึ้น มีโอกาสได้ทำงานวิชาสัมมนาเรื่องการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล (Artificial Recharge to Aquifer) และก็มีความสนใจเรื่องนี้เรื่อยมา

ผู้เขียนยังมีโอกาสไปฝึกอบรมเรื่อง Groundwater Exploration and Assessment ที่ Roorkee University of Technology, India ในปี 2534 หลักสูตร Management of Water Supply in Urban Area ที่ Chalmers University of Technology ประเทศสวีเดนในปี พ.ศ. 2544 และหลักสูตร Exploration, Exploitation and Management of Groundwater Resources ในปี พ.ศ. 2546 ที่ The Hebrew University of Jerussalem ประเทศอิสราเอล นอกจากนั้นผู้เขียนยังได้รับมอบหมายให้บรรยายเรื่องการสำรวจน้ำบาดาล การประเมินศักยภาพน้ำบาดาลให้กับช่างเจาะน้ำบาดาล นักธรณีวิทยา และวิศวกร ที่สมัครอบรมเพื่อขอรับใบอนุญาตประกอบกิจการน้ำบาดาลอยู่หลายรุ่น ผู้เขียนยังมีโอกาสเป็นอาจารย์พิเศษสอนด้านการสำรวจน้ำบาดาล การเจาะน้ำบาดาล การบริหารจัดการน้ำบาดาลให้กับนิสิต นักศึกษาหลายมหาวิทยาลัย นอกจากนั้นยังสอนหัวข้อดังกล่าวเป็นภาษาอังกฤษให้กับนักธรณีวิทยาและวิศวกรจากประเทศบูทาน (Bhutan) ประเทศเคนยาโดยผ่านการประสานงานของ TICA (Thailand International Cooperation Agency) ผู้เขียนได้มีโอกาสเข้าฝึกอบรมด้านอุทกธรณีวิทยาเทือกเขาหินปูน (Karst Hydrogeology) ที่จัดโดยศูนย์วิจัยอุทกธรณีวิทยาเทือกเขาหินปูนนานาชาติ (International Research Center on Karst: IRCK) สังกัดสำนักสำรวจธรณีวิทยาแห่งสาธารณรัฐประชาชนจีน (China Geological Survey: CGS) อยู่หลายครั้ง ที่กล่าวมาทั้งหมดก็เพื่อจะนำเรียนผู้อ่านว่า จะเป็นเรื่องที่น่าเสียดายมากหากผู้เขียนเก็บความรู้และประสบการณ์ด้านวิชาการน้ำบาดาลที่ตนเองมีโดยไม่ถ่ายทอดออกมาเป็นตัวหนังสือ ดังนั้นเมื่อ 4 ปีที่แล้ว ผู้เขียนจึงได้ลงมือเขียนหนังสือที่ชื่อว่า “ประมวลวิธีปฏิบัติด้านการพัฒนาน้ำบาดาล (Codes of Practic on Groundwater Development)” ขึ้นมาเพื่อให้น้อง ๆ ในที่ทำงาน นิสิต นักศึกษา ประชาชน หรือผู้ที่เกี่ยวข้องหรือสนใจในงานวิชาการน้ำบาดาลได้นำไปใช้ประโยชน์ต่อไป และการเขียนก็เสร็จสิ้นลงโดยมีเนื้อหาค่อนข้างครบถ้วนตามที่ผู้เขียนตั้งใจไว้ ผู้เขียนต้องขออภัยผู้อ่านบางท่านด้วยที่ในเนื้อหาจะมีวงเล็บศัพท์ทางเทคนิค (technical terms) ที่ค่อนข้างมาก ทั้งนี้เนื่องจากผู้เขียนมีความประสงค์จะให้คู่มือเล่มนี้มีความเป็นสากลและใช้อ้างอิงทางวิชาการได้

สารบัญ

หัวข้อ	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
คำนำ	ข
สารบัญ	ค
สารบุญรูป	ฌ
สารบัญตาราง	ถ
บทที่ 1 บทนำ (Introduction)	1
1.1 น้ำบาดาล (Groundwater)	1
1.2 การนำน้ำบาดาลขึ้นมาใช้	1
1.3 วัฏจักรของน้ำ (Hydrologic Cycle/Water Cycle)	5
1.4 กำเนิดน้ำบาดาล (Groundwater Occurrence)	6
1.5 นิยามศัพท์ทางอุทกธรณีวิทยา (Definition of Hydrogeological Terms)	8
1.5.1 Aquifer (ชั้นหินให้น้ำ)	8
1.5.2 Aquiclude หรือ Aquifufe (ชั้นหินซึมน้ำ)	8
1.5.3 Aquitard (ชั้นหินต้านน้ำ)	8
1.5.4 Capillary Fringe (แถบอณูอากาศ)	9
1.5.5 Confined Aquifer (ชั้นหินให้น้ำภายใต้แรงดัน)	9
1.5.6 Confining Unit (หน่วยหินกั้นน้ำ)	9
1.5.7 Darcy (ดาร์ซี่)	10
1.5.8 Darcy’s Law (กฎของดาร์ซี่)	10
1.5.9 Drawdown (ระยะน้ำลด)	11
1.5.10 Effective Porosity (n_e) (ความพรุนประสิทธิผล)	11
1.5.11 Hydraulic Conductivity (ค่าความนำทางชลศาสตร์)	12
1.5.12 Hydraulic Head (ระดับเฮดของน้ำบาดาล)	12
1.5.13 Hydrostratigraphic Unit (หน่วยหินทางอุทกธรณีวิทยา)	12
1.5.14 Permeability (k) (ความสามารถในการยอมให้น้ำซึมผ่าน)	13
1.5.15 Perched Aquifer (ชั้นหินให้น้ำปลอม)	14
1.5.16 Porosity (*n*) (ความพรุน)	15
1.5.17 Potentiometric Surface (ระดับผิวแรงดันน้ำ)	17
1.5.18 Saturated Zone (แถบอิ่มตัวด้วยน้ำ)	17
1.5.19 Specific Capacity; S_c (ประสิทธิภาพการจ่ายน้ำจำเพาะ)	17
1.5.20 Specific Retention; S_r (การดูดค้างจำเพาะ)	17
1.5.21 Specific Storage; S_s (การกักเก็บจำเพาะ)	18
1.5.22 Specific Yield; S_y (ปริมาตรการให้น้ำจำเพาะ)	18
1.5.23 Static Water Level; S.W.L. (ระดับน้ำปกติ)	18

1.5.24 Storativity (*S*) สัมประสิทธิ์การกักเก็บ 18
1.5.25 Transmisivity (สัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำ) 19
1.5.26 Unconfined Aquifer (ชั้นหินให้น้ำแบบไร้แรงดัน) 20
1.5.27 Unsaturated Zone (แถบไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ) 21
1.5.28 Water Table (ระดับน้ำบาดาล) 21
1.5.29 Well Efficiency (ประสิทธิภาพของบ่อ) 21
1.5.30 Well Yield (ปริมาตรการให้น้ำของบ่อ) 21
1.6 ชนิดของชั้นหินให้น้ำจำแนกตามหน่วยหิน (Type of aquifers classified by rock types) 21
1.6.1 หินให้น้ำหินร่วน (unconsolidated aquifer) 21
1.6.2 หินให้น้ำหินแข็ง (consolidated or hard-rock aquifers) 25
1.7 ประเภทของชั้นหินให้น้าจ้าแนกตามคุณสมบัติทางชลศาสตร์ (Types of Aquifer classified by hydraulic properties) 31
บทที่ 2 การวางแผนงานและการจัดเตรียมข้อมูลเบื้องต้น (Planning and preparation for existing information) 32
2.1 การวางแผนดำเนินการ (Planning for actions) 32
2.2 การจัดเตรียมฐานข้อมูลเบื้องต้น (Desk study) 33
2.2.1 ข้อมูลบ่อน้ำบาดาล (records of wells) 33
2.2.2 ข้อมูลการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน-หินจากหลุมเจาะ (drilled logs of wells) 33
2.2.3 งานที่ทำมาก่อน (Previous work) 34
2.2.4 จัดเตรียมแผนที่ที่เกี่ยวข้อง (preparation for essential maps) 39
2.3 การจัดเตรียมอุปกรณ์การสำรวจภาคสนาม (preparation for field equipment) 65
2.3.1 อุปกรณ์สำรวจทางธรณีวิทยา (geological survey equipment) 65
2.3.2 อุปกรณ์สำรวจทางอุทกธรณีวิทยา (hydrogeological survey equipment) 68
2.3.3 อุปกรณ์สำรวจทางธรณีฟิสิกส์บนผิวดิน (surface geophysical survey equipment) 70
บทที่ 3 การสำรวจภาคสนาม 71
3.1 การสำรวจธรณีวิทยา (geological survey) 71
3.2 การสำรวจอุทกธรณีวิทยา (hydrogeological survey) 72
3.3 การสำรวจธรณีฟิสิกส์บนผิวดิน (surface geophysical survey) 73
3.4 การแปลความหมายข้อมูล (data interpretation) 92
3.5 การคัดเลือกพื้นที่ (site selection) 93
บทที่ 4 การสำรวจโดยวิธีการทางใต้ผิวดิน (Subsurface Investigation) 94
4.1 การเจาะสำรวจ (test well drilling) 94
4.2 การเจาะแบบเก็บตัวอย่างเศษหิน (cuttings or chipped samples drilling) 94
4.2.1 การเจาะแบบตัวอย่างเศษหิน (cuttings or chipped samples drilling) 94
4.2.2 การเจาะแบบหมุน (Rotary Drilling) 97
4.2.3 การเจาะแบบผสม (Combination Rig Drilling) 98
4.3 การเจาะแบบเก็บตัวอย่างแท่งหิน (core samples drilling) 120
4.4 การเจาะแบบลดขนาด (reducing borehole diameter drilling) 122

บทที่ 5 การวิเคราะห์ตัวอย่างดิน-หินจากหลุมเจาะ และการหยั่งธรณีฟิสิกส์หลุมเจาะ 123
(samples examination and geophysical borehole logging)
5.1 การวิเคราะห์ตัวอย่างดิน-หินจากหลุมเจาะ (samples examination) 123
5.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ดินหินตัวอย่าง (lithologic logging equipment) 124
5.1.2 อันดับของการเขียนบรรยายลักษณะดิน-หิน (order of description writing) 133
5.1.3 หลักการเขียนคำบรรยาย 149
5.1.4 การเก็บตัวอย่างดินหินจากหลุมเจาะ (sampling of rock samples) 151
5.1.5 ตัวอย่างการบรรยาย samples examination 153
5.2 การหยั่งธรณีฟิสิกส์หลุมเจาะ (geophysical borehole logging) 155
บทที่ 6 การออกแบบและก่อสร้างบ่อน้ำบาดาล 161
(Groundwater Well Design and Construction)
6.1 การออกแบบก่อสร้างบ่อน้ำบาดาล (well construction design) 161
6.2 แบบมาตรฐานการก่อสร้างบ่อน้ำบาดาล 162
6.2.1 แบบมาตรฐานของบ่อน้ำบาดาลในหินร่วน 162
6.2.2 แบบมาตรฐานของบ่อน้ำบาดาลในหินแข็ง 163
6.3 การก่อสร้างบ่อน้ำบาดาล (well construction) 167
6.4 แรงดันที่มีต่อท่อกรุและท่อกรอง (stress on well casing and screen) 171
6.5 ความคงทนต่อการพังทลายของท่อกรุและท่อรับน้ำ (collapse resistance of casing) 176
6.6 การเลือกใช้ท่อกรุและท่อรับน้ำ (Selection of Casing and Screen) 177
6.6.1 ท่อกรุปากบ่อ (Surface Casing) 178
6.6.2 ท่อควบคุม (conductor casing) 178
6.6.3 ท่อระยะกลางหรือท่อชั้นกลาง (intermediate casing) 178
6.6.4 ท่อกรองช่วงติดตั้งเครื่องสูบหรือช่วงผลิตน้ำบาดาล 178
(pump house casing/production casing)
บทที่ 7 การพัฒนาบ่อน้ำบาดาล และการสูบทดสอบ 179
(Groundwater Well Development and Pumping Test)
7.1 การพัฒนาบ่อน้ำบาดาล (well development) 179
7.2 วิธีการพัฒนาบ่อน้ำบาดาล (well development methods) 179
7.2.1 ระยะก่อนการพัฒนา (predevelopment phase) 179
7.2.2 ระยะการพัฒนาขั้นต้น (preliminary development) 179
7.2.3 วิธีขยายรอยแตกโดยใช้น้ำแรงดันสูง (hydrofracturing/hydrofracking) 183
7.3 การสูบทดสอบ (Pumping Test) 185
7.3.1 สมมติฐานหรือเงื่อนไขพื้นฐาน (basic assumptions) ในการสูบทดสอบ 185
7.3.2 คำศัพท์เกี่ยวกับการสูบทดสอบ (terminologies of pumping test analysis) 186
7.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการสูบทดสอบ (pumping test equipment) 188
7.5 วิธีการและขั้นตอนการสูบทดสอบ (pumping test procedures) 191
7.6 พฤติกรรมของระดับน้ำบาดาลขณะทำการสูบ 192
(behaviors of groundwater level while pumping)

7.7 การคำนวณปริมาณน้ำที่สูบได้ (calculation for yield) 193
7.8 วิธีการวิเคราะห์ในการสูบทดสอบ (method of pumping test analysis) 196
7.8.1 การสูบทดสอบในสภาวะไม่สมดุล (equilibrium/steady state condition) 196
7.8.2 การสูบทดสอบในสภาวะไม่สมดุล (non-equilibrium/transient state condition) 196
บทที่ 8 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลและการปรับปรุงคุณภาพน้ำ (Groundwater Analysis and Water Treatment) 202
8.1 อุทกเคมีของน้ำบาดาล (groundwater hydrochemistry) 200
8.1.1 สารที่ละลายอยู่ในน้ำบาดาล (dissolved constituents in groundwater) 200
8.1.2 วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์น้ำ (objectives of groundwater analysis) 203
8.2 การแปลความหมายผลการวิเคราะห์น้ำบาดาล (interpretation of groundwater analysis) 205
8.2.1 การแสดงผลแบบทั่วไป (General Display of Water Analysis Results) 205
8.2.2 การแสดงผลโดยใช้แผนภาพ (Diagram Display of Water Analysis Results) 208
8.3 วิวัฒนาการทางเคมีของน้ำบาดาลธรรมชาติ (Chemical Evolution of Natural Groundwater) 213
8.4 วิธีการปรับปรุงคุณภาพน้ำ (Water Treatment Methods) 215
8.4.1 การลดความขุ่น 215
8.4.2 การลดสีและกลิ่น 215
8.4.3 การขจัดความกระด้าง 215
8.4.4 การลดหรือกำจัดปริมาณเหล็ก 215
8.4.5 การลดปริมาณแมงกานีส 216
8.4.6 การลดปริมาณฟลูออไรด์ 217
8.4.7 การลดปริมาณไนเทรต 218
8.4.8 การลดหรือกำจัดปริมาณสารหนู 218
8.4.9 การลดปริมาณซัลเฟต 218
8.4.10 การลดปริมาณคลอไรด์ 218
บทที่ 9 ระบบกระจายน้ำ (Water Distribution System) 219
9.1 การไหลของน้ำในท่อ (flow in conduit) 219
9.2 การสูญเสียพลังงานในการไหลของน้ำในท่อ (energy losses of flow in conduit) 221
9.2.1 การสูญเสียพลังงานหลัก (major head losses, hloss,f) 221
9.2.2 การสูญเสียพลังงานรอง (minor Head Loss: $h_{loss,m}$) 222
9.2.3 การสูญเสียพลังงานรวม (total head loss: $h_{loss,t}$) 225
9.3 ความสัมพันธ์ของแรงดันน้ำกับการเปลี่ยนแปลงของระดับภูมิประเทศ (relationship of water pressure and elevation change) 225
9.4 ระบบกระจายน้ำของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล 226
9.4.1 ระบบกระจายน้ำโครงการน้ำบาดาลเพื่อการเกษตร 226
9.4.2 ระบบกระจายน้ำโครงการสำรวจและพัฒนาแหล่งน้ำบาดาลเพื่อสนับสนุนน้ำดื่มสะอาดให้กับโรงเรียนทั่วประเทศ 228
9.4.3 ระบบกระจายน้ำโครงการพัฒนาแหล่งน้ำบาดาลเพื่อสนับสนุนน้ำดื่มสะอาดให้กับสถานศึกษาและชุมชน (ขนาดกลางและขนาดใหญ่) 229

9.4.4 โครงการศึกษาสำรวจจุดจ่ายน้ำบาดาลเพื่อประชาชนตามถนนสายหลัก ทั่วประเทศ ปี พ.ศ. 2563 231
9.4.5 โครงการศึกษาสำรวจจุดจ่ายน้ำบาดาลเพื่อประชาชนตามถนนสายหลัก ทั่วประเทศ ปี พ.ศ. 2564 แบบใช้พลังงานแสงอาทิตย์ 231
9.4.6 โครงการศึกษาสำรวจจุดจ่ายน้ำบาดาลเพื่อประชาชนตามถนนสายหลัก ทั่วประเทศ ปี พ.ศ. 2564 แบบใช้ระบบไฟฟ้า 232
9.4.7 โครงการศึกษาการพัฒนาน้ำบาดาลเพื่อความมั่นคงระดับชุมชน ปี 2563 (งบกลาง) 233
9.4.8 โครงการศึกษาการพัฒนาน้ำบาดาลเพื่อความมั่นคงระดับชุมชน ปี 2563 (งบกองทุนพัฒนาน้ำบาดาล) 233
9.4.9 โครงการศึกษาการพัฒนาน้ำบาดาลเพื่อความมั่นคงระดับชุมชน ปี 2564 234
9.4.10 โครงการจัดหาแหล่งน้ำบาดาลที่มีคุณภาพเพื่อใช้ในการบรรเทาและแก้ไขปัญหาความขาดแคลนน้ำของประชาชนในพื้นที่แล้งซ้ำซากและมีปัญหาคุณภาพน้ำเค็มในภาคะวันออกเฉียงเหนือ 236
9.4.11 โครงการส่งน้ำบาดาลระยะไกลเพื่อแก้ไขปัญหาภัยแล้ง กรมทรัพยากรน้ำบาดาล 236
บทที่ 10 การบริหารจัดการน้ำบาดาลและการอนุรักษ์น้ำบาดาล (Groundwater Management and Groundwater Conservation) 237
10.1 แนวทางการบริหารโครงการที่ได้รับการส่งมอบจากกรมทรัพยากรน้ำบาดาล 237
10.2 พระราชบัญญัติน้ำบาดาล (Groundwater Acts) 237
10.2.1 สาระสำคัญของพระราชบัญญัติน้ำบาดาล พ.ศ. 2520 237
10.2.2 มาตราอื่นๆ ของ พ.ร.บ. น้ำบาดาล ซึ่งเป็นแผนแม่บทการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาล 238
10.2.3 เกณฑ์การเก็บค่าใช้น้ำ 240
10.3 สถานการณ์น้ำบาดาลในประเทศไทย 242
10.4 ผลกระทบที่เกิดจากการใช้น้ำบาดาลเกินสมดุล (Impacts of Groundwater Over-exploitation) 247
10.4.1 การเหือดแห้งของชั้นหินให้น้ำ (Groundwater Mining) 247
10.4.2 แผ่นดินทรุด (land subsidence) 247
10.4.3 การรุกล้ำของน้ำเค็ม (saltwater intrusion) 244
10.4.4 การเกิดหลุมยุบ (collapse sinkhole/salt depression sinkhole) 249
10.5 การปนเปื้อนในน้ำบาดาล (Groundwater Contamination) 250
10.6 การฟื้นฟูทรัพยากรน้ำบาดาล (Groundwater Remediation) 252
10.6.1 วิธีการสูบออกและบำบัด (Pump-and-Treat) 252
10.6.2 วิธีให้สารปนเปื้อนไหลผ่านและทำปฏิกิริยากับแนวกั้นที่ยอมให้ของเหลวซึมผ่าน (Permeable Reactive Barrier: PRB) 252
10.6.3 การเติมอากาศอยู่กับที่ (in-situ air sparging) 252
10.6.4 การชะล้างอยู่กับที่โดยใช้ (In-situ Flushing) 256
10.7 การอนุรักษ์น้ำบาดาล (groundwater conservation) 256

10.7.1 ไม่ใช้น้ำบาดาลเกินสมดุล (no overdraft of groundwater resources) 256
10.7.2 ไม่ทำให้เกิดการปนเปื้อนในน้ำบาดาล (avoid contaminating groundwater resources) 257
10.7.3 การจัดการด้านเติมน้ำน้ำบาดาล (Managed Aquifer Recharge: MAR) 257
10.7.4 ควบคุมการรุกล้ำของน้ำเค็ม (Control of saltwater Intrusion) 259
10.7.5 ซ่อมระบบท่อประปา (fixed plumbing) 261
10.7.6 ใช้น้ำอย่างชาญฉลาด (use water wisely) 261
10.7.7 จัดการของเสียที่เป็นสารเคมีอย่างเหมาะสม (manage chemical waste) 261
10.7.8 จัดการของเสียในครัวเรือนอย่างเหมาะสม (manage household waste) 261
10.7.9 นำกลับมาใช้อีกหากเป็นไปได้ (reuse whenever possible) 261
10.7.10 หลีกเลี่ยงหรือลดการใช้ยาฆ่าแมลง (avoid or reduse pesticides usuage) 261
10.7.11 บำรุงรักษาถังเกรอะอย่างเหมาะสม (maintain septic tanks properly) 261
10.7.12 อนุรักษ์หรือเก็บเกี่ยวน้ำฝน (conserve or harvest rainwater) 262
10.7.13 บำรุงรักษาสวนอย่างชาญฉลาด (maintain garden wisely) 262
10.7.14 ให้ความรู้แก่ผู้ใช้น้ำ (educate water users) 262
บรรณานุกรม (Biblyography) 263

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

รูปที่ 1-1 รูปแสดงการนำน้ำบาดาลมาใช้ผ่านระบบกานัท (Qanat) 2
รูปที่ 1-2 แสดงอุปกรณ์การนำน้ำขึ้นมาใช้ในระบบกานัท ที่เรียกว่าวงล้อแห่งเปอร์เซีย (Persian wheel) 2
รูปที่ 1-3 (a) เครื่องสูบน้ำแบบมือโยก (b) องค์ประกอบของเครื่องสูบน้ำแบบมือโยก 3
รูปที่ 1-4 เครื่องสูบน้ำกังหันลมและองค์ประกอบ 3
รูปที่ 1-5 แสดงเครื่องสูบน้ำแบบเทอร์ไบน์ (turbine pump) ตามแบบของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล 4
รูปที่ 1-6 แสดงเครื่องสูบน้ำไฟฟ้าแบบจุ่มใต้น้ำ (submersible pump) 4
รูปที่ 1-7 แสดงการกระจายตัวและสัดส่วนของน้ำทั้งหมดที่อยู่บนโลก 6
รูปที่ 1-8 แสดงวัฏจักรของน้ำบนโลก (Water Cycle / Hydrologic Cycle) 6
รูปที่ 1-9 (a) แสดงระบบน้ำใต้ดิน 2 มิติ (b) แสดงระบบน้ำใต้ดิน 3 มิติ 8
รูปที่ 1-10 แสดงชั้นหินให้น้ำ (aquifer) และชั้นหินต้านน้ำ (aquitard) 9
รูปที่ 1-11 แสดงแถบอณูอากาศ (capillary fringe) และเขตน้ำใต้ดินที่สัมพันธ์กัน 9
รูปที่ 1-12 แสดงชั้นหินอุ้มน้ำภายใต้แรงดันและหน่วยหินกั้นน้ำ 10
รูปที่ 1-13 แผนภูมิองค์ประกอบของ Darcy’s Law (a) และอุปกรณ์แสดง Darcy’s Law (b) 10
รูปที่ 1-14 แสดงระยะน้ำลดในหินให้น้ำแบบไร้แรงดัน (a) และระยะน้ำลดในหินให้น้ำภายใต้แรงดัน (b) 11
รูปที่ 1-15 แสดงลักษณะของความพรุนที่ไม่ต่อเนื่อง (closed pores) และความพรุนที่ต่อเนื่อง Inter-connected pores) ซึ่งมีผลต่อค่าความพรุนประสิทธิผล (effective porosity) 11
รูปที่ 1-16 แสดงเฮดของน้ำบาดาล ซึ่งเป็นผลรวมของเฮดอันเนื่องมาจากการสูงจากระดับอ้างอิง หรือ datum (Elevation Head: z) กับเฮดอันเนื่องมาจากแรงดันน้ำ (Pressure Head) 13
รูปที่ 1-17 ภาพบน แสดงหน่วยหินทางธรณีวิทยาที่แตกต่างกัน 2 หน่วย (Formation 1 และ Formation 2) ซ้อนทับกันในแนวดิ่ง และภาพล่าง เมื่อจำแนกเป็นหน่วยหินทางอุทกธรณีวิทยา จะมี 2 หน่วยเช่นกัน แต่เป็น aquifer และ aquitard ต่อกันในแนวระนาบ 13
รูปที่ 1-18 แสดงแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่าง ความสามารถในการยอมให้น้ำซึมผ่านกับความพรุน 14
รูปที่ 1-19 แสดงค่าความสามารถในการยอมให้น้ำซึมผ่านของหินประเภทต่างๆ 14
รูปที่ 1-20 ภาพแสดงชั้นหินให้น้ำปลอมและระดับน้ำบาดาลปลอม 15
รูปที่ 1-21 แสดงร้อยละของความพรุนของตะกอนเมื่อ (ก) วางตัวซ้อนทับกันรูปลูกบาศก์ และ (ข) วางตัวซ้อนทับกันรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน 16
รูปที่ 1-22 ภาพบนแสดงช่องว่างแบบปฐมภูมิ ภาพบนซ้ายเป็นช่องว่างในหินเนื้อพรุน ภาพบนกลางช่องว่างในทรายที่มีการคัดขนาดดีภาพบนขวาช่องว่างในทรายที่มีการคัดขนาดไม่ดี และภาพล่างแสดงช่องว่างทุติยภูมิ ภาพล่างซ้ายเป็นรอยแตกในหิน ภาพล่างกลางเป็นรอยแตกในหินแกรนิต และภาพล่างซ้ายเป็นโพรงถ้ำในหินปูน 16

รูปที่ 1-23 ภาพแสดงระดับน้ำบาดาลในบ่อน้ำบาดาลจากชั้นหินให้น้ำไร้แรงดันซึ่งระดับน้ำบาดาลปกติในบ่อจะอยู่ระดับเดียวกับระดับน้ำบาดาล และผิวแรงดันน้ำของบ่อน้ำบาดาลที่เจาะในชั้นหินให้น้ำภายใต้แรงดัน ระดับน้ำในบ่อน้ำบาดาลจะอยู่สูงกว่าระดับชั้นหินให้น้ำ หากระดับปากบ่ออยู่ต่ำกว่าระดับผิวแรงดันบ่อน้ำบาดาลนั้นจะเรียกว่าบ่อน้ำบาดาลพุ 17
รูปที่ 1-24 ภาพแสดงสัมประสิทธิ์การกักเก็บในชั้นหินให้น้ำ 19
รูปที่ 1-25 ภาพแสดงที่มาของค่าสัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำ 20
รูปที่ 1-26 ภาพแสดงหน่วยหินทางอุทกธรณีวิทยา (Hydrostratigraphic units) 20
รูปที่ 1-27 ภาพตัดขวางแสดงลักษณะการสะสมตัวของตะกอนร่วนที่สะสมตัวตามที่ราบลุ่มน้ำท่วมถึง และลานตะพักลำน้ำ 23
รูปที่ 1-28 ภาพซ้ายแสดงลักษณะตะกอนตะพักลำน้ำต่ำ บริเวณบ้านสันปูเลย อ.สันป่าตอง จ.เชียงใหม่ ภาพขวาแสดงลักษณะลานตะพักลำน้ำสูง บริเวณบ้านห้วยส้มข้างวัดป่าอรัญวิเวก อ.แม่ริม จ. เชียงใหม่ 23
รูปที่ 1-29 ภาพซ้ายแสดงลักษณะการเกิดเนินตะกอนรูปพัดของระบบทางน้ำ และภาพขวาแสดงภาพถ่ายจากของจริงของเนินตะกอนรูปพัด 24
รูปที่ 1-30 ภาพซ้ายแสดงลักษณะการสะตะกอนแบบทรายชายหาด และภาพขวาลักษณะของสันทรายชายหาด 25
รูปที่ 1-31 ภาพแสดงตะกอนเศษหินเชิงเขาบริเวณบ่อดินสมชาย บ้านดงอ้อม อำเภอสันป่าตอง จังหวัดเชียงใหม่ 25
รูปที่ 1-32 แสดงลักษณะการเกิดของหินอัคนีประเภทต่างๆ ในรูปจะประกอบด้วยหินอัคนีระดับลึก หินอัคนีระดับตื้น และหินอัคนีพุ 27
รูปที่ 1-33 แสดงลักษณะการเกิดรอยแยกแบบกาบบางครั้งเรียกว่าการแตกแบบกลีบหัวหอม 28
รูปที่ 1-34 แสดงลักษณะการเกิดรอยแยกแบบแท่งหิน 28
รูปที่ 1-35 ภาพซ้าย แสดงลักษณะการเกิดรอยแตกในหินทราย และภาพขวาแสดงลักษณะรอยต่อระหว่างชั้นหิน 29
รูปที่ 1-36 แสดงวัฏจักรของหิน (Rocks Cycle) แสดงให้เห็นถึงวัฏจักรการเกิดหินทั้ง 3 ประเภท ได้แก่หินอัคนี หินตะกอน และหินแปร 30
รูปที่ 2-1 กระบวนการทางวิชาการที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาน้ำบาดาลให้มีประสิทธิผลอย่างยั่งยืน 32
รูปที่ 2-2 และรูปที่ 2-3 แสดงตัวอย่างข้อมูลบ่อน้ำบาดาลซึ่งได้ลงในระบบฐานข้อมูลเรียบร้อยแล้ว 35
รูปที่ 2-4 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์และบรรยายลักษณะดินหินแบบเศษหิน 36
รูปที่ 2-5 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์และบรรยายลักษณะดินหินแบบแท่งตัวอย่างหิน 37
รูปที่ 2-6 เป็นตัวอย่างรายงานการสำรวจของงานที่ทำมาก่อน (previous work) 38
รูปที่ 2-7 แสดงลักษณะของแผนที่ภูมิประเทศทั่วไปซึ่งบอกถึงข้อมูลพื้นฐานทั้งระดับชั้นข้อมูลทั้งหมด 42
รูปที่ 2-8 แสดงลักษณะของเส้นชั้นความสูงที่บอกลักษณะ รูปร่าง และทิศทางของพื้นที่รับน้ำ 43
รูปที่ 2-9 แสดงลักษณะเส้นชั้นความสูงที่บ่งบอกถึงลักษณะภูมิประเทศแบบเทือกเขาหินปูนสูงชัน 44

รูปที่ 2-10 แสดงรูปแบบทางน้ำ (1a, 1b) Dendritic drainage pattern (2a, 2b) Trellis drainage (3a, 3b) Radial drainage (4a, 4b) Rectangular Drainage Pattern 45
รูปที่ 2-11 แสดงแผนที่ภูมิประเทศที่มีหลุมยุบและ disappearing streams 46
รูปที่ 2-12 แสดงลักษณะต่าง ๆ ที่มองเห็นและจำแนกได้จากภาพถ่ายทางอากาศ 48
รูปที่ 2-13 แสดงภาพถ่ายทางอากาศ 2 ภาพที่มีพื้นที่ซ้อนทับกันประมาณ 60 % 48
รูปที่ 2-14 แสดงการใช้กล้อง Mirror Stereoscope ในการแปลความหมายภาพถ่ายทางอากาศ 49
รูปที่ 2-15 ภาพถ่ายดาวเทียมบริเวณที่เป็นเทือกเขาหินปูน (ซ้าย) และบริเวณที่เป็นแนวของหลุมยุบกระจายอยู่เต็มพื้นที่ (ขวา) 49
รูปที่ 2-16 แสดงองค์ประกอบของแผนที่ธรณีวิทยาที่ทั่วไป (มาตราส่วน 1:50,000) 52
รูปที่ 2-17 แสดงสัญลักษณ์ที่ปรากฏอยู่บนแผนที่ธรณีวิทยาที่บอกข้อมูลทั่วไปและสัญลักษณ์เกี่ยวกับลักษณะทางธรณีวิทยา (geological features) ที่พบในพื้นที่ 52
รูปที่ 2-18 แสดงการเทียบเคียงของหน่วยหินเรียงตามธรณีกาล (Geologic Time) 53
รูปที่ 2-19 แสดงรายละเอียดของหินของหน่วยหินต่าง ๆ เรียงตามธรณีกาล องค์ประกอบของหมวดหินและประเภทของหิน 53
รูปที่ 2-20 แสดงภาพตัดขวางทางธรณีวิทยาที่ปรากฏอยู่บนแผนที่ธรณีวิทยา ซึ่งสามารถบอกรายละเอียดถึงการวางตัวของหน่วยหินต่าง ๆ ความหนาโดยประมาณของหน่วยหิน ธรณีวิทยาโครงสร้างเช่นรอยเลื่อน ชั้นหินคดโค้ง และลักษณะภูมิประเทศที่แนวภาพตัดขวางลากผ่าน 54
รูปที่ 2-21 แสดงลักษณะของแผนที่น้ำบาดาล แสดงชนิดของชั้นหินให้น้ำ ลักษณะทางอุทกธรณีวิทยาและองค์ประกอบที่สำคัญอย่างครบถ้วน 59
รูปที่ 2-22 แสดงตัวอย่างของหน่วยหินให้น้ำตามธรณีกาล พร้อมคำอธิบายลักษณะหน่วยหินในแผนที่น้ำบาดาล 60
รูปที่ 2-23 แสดงคำอธิบายสัญลักษณ์ที่สำคัญต่าง ๆ ในแผนที่น้ำบาดาล ประกอบด้วยข้อมูลพื้นฐาน โครงสร้างทางอุทกธรณีวิทยา ข้อมูลเกี่ยวกับบ่อน้ำบาดาล และภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยา 60
รูปที่ 2-24 แสดงภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยาในแผนที่น้ำบาดาล 61
รูปที่ 2-25 ตารางสรุปชนิดของชั้นหินให้น้ำและความลึกของบ่อน้ำบาดาล 61
รูปที่ 2-26 แผนที่ขนาดเล็กในแผนที่น้ำบาดาลที่แสดงลักษณะสำคัญอื่น แต่ไม่ได้นำมาซ้อนทับในแผนที่หลัก 61
รูปที่ 2-27 แสดงลักษณะของแผนที่อุทกธรณีวิทยา แสดงชนิดของชั้นหินให้น้ำ ลักษณะทางอุทกธรณีวิทยา และองค์ประกอบที่สำคัญอย่างครบถ้วน 62
รูปที่ 2-28 แสดงตัวอย่างของหน่วยหินให้น้ำตามธรณีกาล พร้อมคำอธิบายลักษณะหน่วยหินในแผนที่อุทกธรณีวิทยา 63
รูปที่ 2-29 แสดงคำอธิบายสัญลักษณ์ที่สำคัญต่าง ๆ ในแผนที่อุทกธรณีวิทยา ประกอบด้วยข้อมูลพื้นฐาน โครงสร้างทางอุทกธรณีวิทยา ข้อมูลเกี่ยวกับบ่อน้ำบาดาล และภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยา 63
รูปที่ 2-30 แสดงข้อมูลสรุปประเภทของชั้นหินให้น้ำและปริมาณน้ำบาดาลในแผนที่ อุทกธรณีวิทยา 64

รูปที่ 2-31 แสดงภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยาในแผนที่อุทกธรณีวิทยา 64
รูปที่ 2-32 แผนที่ขนาดเล็กในแผนที่อุทกธรณีวิทยาที่แสดงลักษณะสำคัญอื่นแต่ไม่ได้นำมาซ้อนทับในแผนที่หลัก 64
รูปที่ 2-33 แสดงตัวอย่างของอุปกรณ์สำรวจด้านธรณีวิทยา 67
รูปที่ 2-34 แสดงตัวอย่างของอุปกรณ์สำรวจด้านอุทกธรณีวิทยา 69
รูปที่ 2-35 แสดงตัวอย่างของอุปกรณ์สำรวจด้านธรณีฟิสิกส์บนผิวดิน 70
รูปที่ 3-1 แสดงการสำรวจธรณีวิทยาภาคสนาม 71
รูปที่ 3-2 แสดงแผ่นอลูมิเนียมบางที่บันทึกชื่อและความลึกของบ่อน้ำบาดาล 73
รูปที่ 3-3 แสดงอุปกรณ์การเก็บตัวอย่างน้ำแบบ Flow Cell 73
รูปที่ 3-4 แสดงการวางอุปกรณ์สำรวจคลื่นไหวสะเทือนที่ประกอบด้วยจุดกำเนิดคลื่น (energy source/plate) และตัวรับคลื่น (geophone) 75
รูปที่ 3-5 แสดงลักษณะการเดินทางของคลื่นสั่นสะเทือน (seismic waves) 75
รูปที่ 3-6 แสดงลักษณะการเดินทางของคลื่นไหวสะเทือนเมื่อเกิดสัญญาณคลื่น 76
รูปที่ 3-7 แสดงลักษณะการแปลความหมายของการสำรวจวัดคลื่นสั่นสะเทือนแบบหักเห 76
รูปที่ 3-8 ภาพจำลองการประยุกต์สำรวจจัดค่าความเร่งโน้มถ่วง ในพื้นที่ที่มีสภาพใต้ผิวดินโดยมีมวลวัตถุรูปทรงกลม (ก) กร๊าฟของค่าความเร่งโน้มถ่วง (ข) สภาพธรณีวิทยาใต้ผิวดิน โดยมีค่าความหนาแน่น ρ_2 มากกว่า ρ_1 ลูกศรแสดงขนาดและทิศทางของเวคเตอร์ความเร่งโน้มถ่วง 78
รูปที่ 3-9 แสดงเส้นทางเดินของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากอุปกรณ์ปล่อยสัญญาณ (transmitter) ผ่านตัวนำไฟฟ้าใต้ดิน (conducting body) การเกิดกระแสเอ๊ดดี้ (Eddy Currents) และเดินทางไปยังเครื่องรับสัญญาณ (receiver) 80
รูปที่ 3-10 แสดงรูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ปล่อยสัญญาณ (transmitter) และรับสัญญาณ (receiver) ภาพ (a) transmitter และ receiver อยู่คนละโครงโลหะ (b) transmitter และ receiver อยู่โครงโลหะเดียวกันแต่อยู่หัวและท้ายของโครง 81
รูปที่ 3-11 แสดงชุดอุปกรณ์สำรวจคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนผิวดิน (surface electromagnetic) 81
รูปที่ 3-12 แสดงรูปแบบการวางห่วงขดลวด (coil) ในการสำรวจวัดค่าแม่เหล็กไฟฟ้าบนผิวดิน (a) ตั้งห่วงขดลวดในแนวตั้งฉากกับพื้น (vertical separation) และ (b) ตั้งห่วงขดลวดในแนวขนานกับพื้น (horizontal separation) 82
รูปที่ 3-13 ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะในหินประเภทต่าง ๆ 83
รูปที่ 3-14 วงจรไฟฟ้าของการสำรวจด้วยวิธีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ 84
รูปที่ 3-15 การจัดขั้วไฟฟ้าในการสำรวจด้วยวิธีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ 86
รูปที่ 3-16 แสดงตำแหน่งที่เป็นตัวแทนของค่าความต้านทานไฟฟ้าจะอยู่กึ่งกลางอยู่ที่ที่ความลึกเท่ากับ a ณ จุดตัดของเส้นตรงซึ่งวัดไป 45 องศาของจุดกึ่งกลางของขั้วกระแสไฟฟ้า 86
รูปที่ 3-17 แสดงการปักและขยับขั้วไฟฟ้าในการสำรวจแบบ Dipole-Dipole Configuration 87
รูปที่ 3-18 การแสดงผลสำรวจของวิธีจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบ Dipole-Dipole Configuration จะเป็นรูปแบบเส้น contour line ของค่าความต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติ 88
รูปที่ 3-19 แสดงตัวอย่างเส้นกร๊าฟการหยั่งหาค่าความต้านทางไฟฟ้าในแนวดิ่ง โดยใช้การจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบ Schlumberger Configuration 90

รูปที่ 3-20 แสดงลักษณะเส้นกร๊าฟต้นแบบของการหยั่งวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในแนวดิ่ง 91
รูปที่ 3-21 การนำเสนอข้อมูลในรูปของ Resistivity contour map 91
รูปที่ 3-22 การนำเสนอข้อมูลในรูปของ Resistivity profile map 91
รูปที่ 3-23 แสดงชุดอุปกรณ์การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติ 92
รูปที่ 3-24 แสดงตัวอย่างการแสดงผลของการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติ 92
รูปที่ 4-1 แสดงองค์ประกอบของเครื่องเจาะแบบกระแทก (Percussion/Cable Tool Rig) 96
รูปที่ 4-2 แสดงองค์ประกอบของเครื่องการเจาะหมุนแบบน้ำโคลนเจาะไหลเวียนตรง 97
รูปที่ 4-3 แสดงองค์ประกอบของเครื่องการเจาะหมุนแบบดูดกลับ 98
รูปที่ 4-4 ภาพบนแสดงลักษณะของเครื่องการเจาะแบบผสม 100
รูปที่ 4.5 (a) แสดงลักษณะเกลียวแบบเรียวแคบลง (tapering) ของก้านเจาะ 102
(b) แสดงการป้องกันการสกปรกของเกลียวก้านเจาะโดยการปิดฝาไว้ขณะไม่ได้ใช้งาน
รูปที่ 4-6 แสดงลักษณะทั่วไปของท่อถ่วง (drill collar) ซึ่งมีลักษณะเกลียวเหมือนกับก้านเจาะ 102
รูปที่ 4-7 แสดงชุดรวมอุปกรณ์การเจาะแบบหมุน (rotary drilling machine) 103
รูปที่ 4-8 แสดงหัวเจาะ Drag bits (a) 3-wing drag bits (b) Step drag Bit 104
รูปที่ 4-9 (a) แสดงองค์ประกอบของ Roller cutter bits (b) หัวเจาะ Roller cutter bits 105
สำหรับเจาะหินร่วน และ (c) หัวเจาะ Roller cutter bits สำหรับเจาะหินแข็ง
รูปที่ 4-10 (a) Polycrystalline Diamond Compact (PDC) Bits (b) Synthetic Diamond 105
Cutters Bits
รูปที่ 4-11 รูปซ้ายแสดงลักษณะของหัวเจาะเพชรแบบเก็บแท่งตัวอย่าง (diamond core drill bits) 105
และรูปขวาแสดงลักษณะเฉพาะของ down-the-hole hammer (DTH Bit)
รูปที่ 4-12 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบความหนาแน่นหรือน้ำหนักของโคลนเจาะ (mud scale) 107
รูปที่ 4-13 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบความหนืด (viscosity) ของโคลนเจาะ (Marsh Funnel) 108
รูปที่ 4-14 แสดงค่าความหนืดของน้ำโคลนเจาะที่เหมาะสมต่อการพาเศษดิน-หินจากก้นหลุมเจาะ 109
ขึ้นสู่ปากบ่อของตะกอนแต่ละขนาด
รูปที่ 4-15 แสดงเครื่องมือ Baroid Rhodeometer ซึ่งใช้หาค่า gel strength ของน้ำโคลน 109
รูปที่ 4-16 แสดงเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบคุณสมบัติด้านการซึมและการเกิดผนังซึมซาบของน้ำโคลน 110
รูปที่ 4-17 แสดงเครื่องกำจัดทราย (desander ซ้าย) และเครื่องกำจัดทรายแป้ง (desilter ขวา) 111
ที่ใช้ในการกำจัดตะกอนทั้ง 2 ขนาดตามลำดับ
รูปที่ 4-18 แสดงระบบบ่อน้ำโคลนที่ประกอบไปด้วยบ่อดักตะกอน และบ่อกักเก็บน้ำโคลน 112
รูปที่ 4-19 แสดงระบบถังน้ำโคลนที่ภายประกอบไปด้วยบ่อดักตะกอน และบ่อกักเก็บน้ำโคลน 112
รูปที่ 4-20 (a) ผังแสดงองค์ประกอบของ Mud Hopper (b) Mud Hopper 115
ที่ใช้ในการผสมน้ำโคลนทั่วไปในงานเจาะน้ำบาดาล
รูปที่ 4-21 แสดงผังจำลองของเวลาหน่วงของน้ำโคลน (lag time) ที่เกิดขึ้นในหลุมเจาะต่างๆ 116
รูปที่ 4-22 แสดงตาราง excel ที่สามารถแปลงหน่วยจาก Oilfield Unit เป็น Metric Unit 118
ของ Pump speed Pump Output Annular Volume และ Lag Time
รูปที่ 4-23 แสดงตาราง excel ที่สามารถแปลงหน่วยจาก Oilfield Unit เป็น Metric Unit 119
ของ Triplex Pump Output, Duplex Pump Output และ parameters ที่เกี่ยวข้อง

รูปที่ 4-24 แสดงลักษณะของความแตกต่างของปริมาตรของเหลวในหลุมเจาะ (annular volume) 119
รูปที่ 4-25 แสดงอุปกรณ์ชุดเก็บตัวอย่างแท่งหิน 121
รูปที่ 4-26 แสดงขนาดของแท่งตัวอย่างหิน 121
รูปที่ 5-1 แสดงตัวอย่างของแว่นขยาย (a) แบบพกพาในสนาม และ (b) แบบที่ใช้ประจำห้องปฏิบัติการ 124
รูปที่ 5-2 แสดงแผ่นเทียบสีโทนสีต่างๆ 126
รูปที่ 5-3 แผ่นเทียบขนาดตะกอน (Grain size comparator) แบบไม้บรรทัดมาตรฐานทั่วไป (a) และแบบแผ่นใสวงกลม (b) 127
รูปที่ 5-4 แผ่นเทียบลักษณะและรูปร่างของตะกอน บอกขนาดแบบสัมพัทธ์และการคัดขนาด (a) และบอกความกลมมนภาวะทรงกลม (b) 127
รูปที่ 5-5 แสดงมีดพับแบบอเนกประสงค์ 128
รูปที่ 5-6 แสดงตัวอย่างของแผ่นกระเบื้องหรือก้นชามกระเบื้องที่ใช้ทดสอบสีผงละเอียดของแร่ 128
รูปที่ 5-7 แสดงชุดอุปกรณ์ตรวจสอบส่วนประกอบหรือสารเชื่อมประสานของเม็ดแร่ โดยเฉพาะแร่ที่มีส่วนประกอบเป็นคาร์บอเนต (a) กระจกแก้วนาฬิกา (b) กรดเจือจาง และ (c) อุปกรณ์ดูดของเหลว 129
รูปที่ 5-8 ชุดอุปกรณ์ใบพาย พร้อมถาด 129
รูปที่ 5-9 แสดงกล้องจุลทัศน์แบบมอง 2 ตา (Binoculars microscope) 130
รูปที่ 5-10 แสดงไม้วัดมุมองศาซึ่งเป็นอุปกรณ์หนึ่งในการวิเคราะห์ดิน-หิน ตัวอย่าง 130
รูปที่ 5-11 แสดงตลับเมตรที่ใช้วัดความยาวของแท่งตัวอย่าง 131
รูปที่ 5-12 แสดงตัวอย่างของแบบฟอร์มบันทึกรายละเอียดตัวอย่างจากหลุมเจาะ 132
รูปที่ 5-13 ตัวอย่างหินอัคนีที่เย็นตัวใต้เปลือกโลก (intrusive igneous rock) ที่พบในประเทศไทย 133
รูปที่ 5-14 แสดงตัวอย่างของหินอัคนีที่เย็นตัวบนผิวโลกที่พบในเมืองไทย 134
รูปที่ 5-15 แสดงตัวอย่างของหินตะกอนที่สะสมตัวและแข็งตัวจากเม็ดตะกอนที่พบมากในเมืองไทย 135
รูปที่ 5-16 แสดงหินตะกอนที่เกิดจากการสะสมตัวทางเคมี 136
รูปที่ 5-17 แสดงตัวอย่างของหินตะกอนที่เกิดจากการสะสมตัวอินทรีย์สาร 136
รูปที่ 5-18 แสดงตัวอย่างของหินแปรที่มองเห็นการเรียงตัว 137
รูปที่ 5-19 แสดงหินแปรที่ไม่มีการเรียงตัว 137
รูปที่ 5-20 แสดง Wentworth grade scale สำหรับเรียกชื่อตะกอนขนาดต่าง ๆ 139
รูปที่ 5-21 แสดงตัวอย่างของตะกอนขนาดต่าง ๆ 140
รูปที่ 5-22 แสดงลักษณะของความกลมมนตามมาตรฐานที่เป็นที่นิยมใช้กันในหมู่นักธรณีวิทยา 142
รูปที่ 5-23 แสดงลักษณะภาวะทรงกลม และความกลมมนของเม็ดตะกอน 142
รูปที่ 5-24 แสดงตัวอย่างลักษณะเนื้อหินของหินอัคนี 145
รูปที่ 5-25 แสดงตัวอย่างลักษณะเนื้อหินของหินแปร 146
รูปที่ 5-26 แสดงลักษณะการวางตัวอย่างแบบเศษดินหินจากหลุมเจาะอย่างถูกต้อง 152
รูปที่ 5-27 แสดงลักษณะการวางตัวอย่างหินแบบแท่งหินจากหลุมเจาะอย่างถูกต้อง 152
รูปที่ 5-28 แสดงการบรรยายในการวิเคราะห์ตัวอย่างแบบเศษหิน (cuttings) 153
รูปที่ 5-29 แสดงการบรรยายในการวิเคราะห์ตัวอย่างแบบแท่งตัวอย่างหิน (core samples) 154
รูปที่ 5-30 แสดงองค์ประกอบของชุดเครื่องมือหยั่งธรณีฟิสิกส์หลุมเจาะ 156

รูปที่ 5-31 แสดงประเภท (type) ชนิดของการตรวจวัดและสภาพของการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าและวัดค่ารังสีแกมม่าธรรมชาติในหลุมเจาะ 156
รูปที่ 5-32 แสดงลักษณะการเกิด Spontaneous Potential ในหลุมเจาะ 159
รูปที่ 5-33 แสดงการจัดวางขั้วไฟฟ้าในหัววัดรูปแบบต่าง ๆ 159
รูปที่ 5-34 แสดงตัวอย่างเส้นกร๊าฟและการแปลความหมายการหยั่งธรณีฟิสิกส์หลุมเจาะโดยการ การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า และวัดค่ารังสีแกมม่าธรรมชาติในหลุมเจาะ 160
รูปที่ 6-1 แสดงแบบมาตรฐานการออกแบบก่อสร้างบ่อน้ำบาดาลในหินร่วน 164
รูปที่ 6-2 แสดงลักษณะการติดตั้งโครงบังคับท่อและรูปแสดงโครงบังคับท่อ (centralizer) 165
รูปที่ 6-3 แสดงอุปกรณ์ตะแกรงร่อนขนาดต่าง ๆ และเครื่องร่อนตะแกรง 165
รูปที่ 6-4 แสดงกร๊าฟการกระจายตัวของตะกอนขนาดต่างๆ เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของขนาดตะกอน (uniformity coefficient: CU) 166
รูปที่ 6-5 แสดงรูปแบบของการก่อสร้างบ่อน้ำบาดาลในหินแข็งทั้งแบบที่เป็นบ่อเปลือย (opened hole) และบ่อแบบลงท่อรับน้ำ (cased hole) 166
รูปที่ 6-6 การเติมกรวดกรุผ่านท่อเติมกรวด 169
รูปที่ 6-7 ป้ายรายละเอียดบ่อน้ำบาดาลที่ติดบนฐานบ่อน้ำบาดาล 171
รูปที่ 6-8 แสดงท่อกรุกรวดสำเร็จรูป (prepacked screen) รูปแบบต่าง ๆ 171
รูปที่ 6-8 แสดงประเภทของแรงที่กระทำต่อท่อกรุ และท่อรับน้ำทั้ง 2 แบบ 172
รูปที่ 6-9 แสดงองค์ประกอบของปัจจัยที่ก่อให้เกิดแรงดันต่างๆ ต่อท่อกรุและท่อรับน้ำในบ่อน้ำบาดาล 174
รูปที่ 6-10 แสดงภาพตัดขวางของชั้นหินให้น้ำประเภทต่างๆ 175
รูปที่ 6-11 แสดงการแปรเปลี่ยนรูปร่างของท่อกรุเมื่อเกิดความไม่สมดุลของแรงกดดันภายนอกท่อและแรงพยุงต้านจากภายในท่อ 177
รูปที่ 7-1 แสดงอุปกรณ์การพัฒนาบ่อโดยการตักน้ำ (Bailing) 180
รูปที่ 7-2 แสดงการพัฒนาบ่อแบบวิธีการสูบน้ำ 181
รูปที่ 7-3 แสดงอุปกรณ์การพัฒนาบ่อโดยการกวนน้ำโดยการใช้ surge block 181
รูปที่ 7-4 แสดงอุปกรณ์การพัฒนาบ่อโดยการเป่าล้างด้วยลม (air lifting) 182
รูปที่ 7-5 แสดงอุปกรณ์และลักษระการทำงานของการพัฒนาบ่อน้ำบาดาลโดยวิธีเป่าฉีดน้ำหรืออากาศความเร็วสูง 183
รูปที่ 7-6 แสดงลักษณะการพัฒนาชั้นน้ำบาดาลแบบ hydrofracking 184
รูปที่ 7-7 แสดงรูปแบบการทำ hydrofracking ในชั้นกักเก็บปิโตรเลียม 184
รูปที่ 7-8 แสดงการไหลของน้ำเข้าสู่บ่อสูบที่ลงท่อกรองตลอดความหนาและไม่ตลอดความหนาของชั้นหินให้น้ำ 186
รูปที่ 7-9 แสดงให้เห็นลักษณะของระยะน้ำลด ระดับน้ำคืนตัว และระดับน้ำคืนตัวคงเหลือ 187
รูปที่ 7-10 แสดงให้เห็นลักษณะของกรวยน้ำลด และรัศมีอิทธิพลในชั้นหินให้น้ำแบบไรแรงดันและในชั้นหินให้น้ำภายใต้แรงดัน 188
รูปที่ 7-11 แสดงเครื่องสูบน้ำแบบเทอร์ไบน์ (Turbine pump) 189
รูปที่ 7-12 ส่วนประกอบของเครื่องวัดปริมาณน้ำแบบออริฟิซ 189
รูปที่ 7-13 แสดงเครื่องวัดระดับน้ำในบ่อน้ำบาดาล (Electric Dipper) 190

รูปที่ 7-14 แสดงตารางบันทึกค่าระดับน้ำระหว่างการสูบทดสอบและระหว่างระดับน้ำคืนตัว 190
รูปที่ 7-15 แสดงภาพสเก๊ตช์ 3 มิติของกรวยน้ำลดที่เกิดจากการสูบน้ำบาดาล 3 บ่อพร้อมกัน 192
รูปที่ 7-16 กร๊าฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า K และอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางของออริฟิซกับท่อจ่ายน้ำ 193
รูปที่ 7-17 แสดงการวัดปริมาณน้ำจากการวัดระยะที่ไหลของน้ำจากท่อในแนวราบ 194
รูปที่ 7-18 แสดงการวัดปริมาณน้ำไหลของน้ำผ่านเวียร์ 195
รูปที่ 7-19 ภาพแสดงที่มาของค่าสัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำ (transmissivity; T) 198
รูปที่ 7-20 ภาพแสดงสัมประสิทธิ์การกักเก็บของชั้นหินให้น้ำไร้แรงดันและของชั้นหินให้น้ำภายใต้แรงดัน 199
รูปที่ 8-1 แสดงตัวอย่างเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาล 204
รูปที่ 8-2 แสดงตารางการแสดงผลวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำบาดาลที่อยู่ในรูปตารางแสดงผล 206
รูปที่ 8-3 เป็นตัวอย่างของตารางแสดงผลการวิเคราะห์น้ำเพื่อการนำน้ำไปใช้เพื่อการเกษตร 207
รูปที่ 8-4 แสดงแผนภาพวงกลมแสดงร้อยละของปริมาณธาตุประจุบวกและลบหลักที่เก็บวิเคราะห์ก่อนหน้ามรสุม และเก็บวิเคราะห์หลังหน้ามรสุม 208
รูปที่ 8-5 แสดงผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำโดยใช้แผนภาพสติ๊ฟฟ์ 209
รูปที่ 8-6 แสดงตำแหน่งที่พล็อทภาพรวมของคุณภาพน้ำเป็น meq/L วงกลมสีน้ำเงินเป็นตัวแทนของธาตุประจุบวก วงกลมสีส้มเป็นตัวแทนของธาตุประจุลบ 212
รูปที่ 8-7 แสดงการลากเส้นเพื่อหาจุดตัดของธาตุประจุบวกและธาตุประจุลบ 212
รูปที่ 8-8 แสดงการแปลความหมายหรือการระบุประเภทของน้ำซึ่งบ่งบอกว่าน้ำบาดาลที่มีผลวิเคราะห์ตามรูปที่ 8-2 ข้างต้น เป็นน้ำบาดาลระดับตื้น อายุน้อยและผ่านการไหลในชั้นดินชั้นหินเป็นระยะทางสั้น ๆ 213
รูปที่ 8-9 แสดงระยะเวลาเปรียบเทียบการไหลของน้ำบาดาลจากพื้นที่เติมน้ำไปจนถึงพื้นที่สูญเสียน้ำของทั้ง 3 ระบบการไหล 214
รูปที่ 8-10 แสดงธาตุต่างๆ ที่พบในพื้นที่รับน้ำ พื้นที่กลางน้ำและพื้นที่สูญเสียน้ำ 215
รูปที่ 8-11 แสดงระบบกำจัดออกซิเจนโดยใช้หอกรองอากาศ ซึ่งประกอบด้วยเครื่องเพิ่มออกซิเจนแบบถาดพร้อมถังกรอง 216
รูปที่ 8-12 แสดงรูปแบบการกำจัดเหล็กและแมงกานีสในน้ำบาดาลโดยใช้ถังกรองที่มี manganese greensand 217
รูปที่ 8-13 แสดงแผนภูมิการกำจัดไนเทรตออกจากน้ำบาดาลโดยใช้เรซิน ประเภท Dimethylamine Group 218
รูปที่ 9-1 แสดงเครื่องมือทดสอบการไหลและพฤติกรรมการไหลของเรย์โนลด์ 220
รูปที่ 9-2 แสดงทางเข้าและทางออกรูปแบบต่าง ๆ 223
รูปที่ 9-3 แสดงท่อลดและขยายขนาดรูปแบบต่าง ๆ 223
รูปที่ 9-4 แสดงข้อต่อและข้องอชนิดต่าง ๆ 224
รูปที่ 9-5 แสดงวาล์วประเภทต่าง ๆ 224
รูปที่ 9-6 แสดงองค์ประกอบของระบบกระจายน้ำโครงการเกษตรบาดาลเชิงระบบใช้พลังงานไฟฟ้า (ขนาดพื้นที่ 100 ไร่) 227

รูปที่ 9-7 แสดงองค์ประกอบของระบบกระจายน้ำโครงการเกษตรบาดาลแก้ไขปัญหาเร่งด่วน (ขนาดพื้นที่ 30 ไร่) 227
รูปที่ 9-8 แสดงองค์ประกอบของระบบกระจายน้ำโครงการเกษตรบาดาลเชิงระบบใช้พลังงานแสงอาทิตย์ (ขนาดพื้นที่ 80 ไร่) 228
รูปที่ 9-9 แสดงองค์ประกอบของระบบกระจายน้ำโครงการสำรวจและพัฒนาแหล่งน้ำบาดาลเพื่อสนับสนุนน้ำดื่มสะอาดให้กับโรงเรียนทั่วประเทศ 229
รูปที่ 9-10 แสดงระบบกระจายน้ำโครงการพัฒนาแหล่งน้ำบาดาลเพื่อสนับสนุนน้ำดื่มสะอาดให้กับสถานศึกษาและชุมชนขนาดกลาง 230
รูปที่ 9-11 แสดงระบบกระจายน้ำโครงการพัฒนาแหล่งน้ำบาดาลเพื่อสนับสนุนน้ำดื่มสะอาดให้กับสถานศึกษาและชุมชนขนาดใหญ่ 230
รูปที่ 9-12 แสดงองค์ประกอบของระบบในโครงการศึกษาสำรวจจุดจ่ายน้ำบาดาลเพื่อประชาชนตามถนนสายหลักทั่วประเทศ ปี พ.ศ. 2563 231
รูปที่ 9-13 แสดงองค์ประกอบของระบบในโครงการศึกษาสำรวจจุดจ่ายน้ำบาดาลเพื่อประชาชนแบบพลังงานแสงอาทิตย์ตามถนนสายหลักทั่วประเทศ ปี พ.ศ. 2564 232
รูปที่ 9-14 แสดงองค์ประกอบของระบบในโครงการศึกษาสำรวจจุดจ่ายน้ำบาดาลเพื่อประชาชนแบบใช้ระบบไฟฟ้าตามถนนสายหลักทั่วประเทศ ปี พ.ศ. 2564 232
รูปที่ 9-15 แสดงองค์ประกอบของระบบในโครงการศึกษาการพัฒนาน้ำบาดาลเพื่อความมั่นคงระดับชุมชน ปี 2563 (งบกลาง) 233
รูปที่ 9-16 แสดงองค์ประกอบของระบบในโครงการศึกษาการพัฒนาน้ำบาดาลเพื่อความมั่นคงระดับชุมชน ปี 2563 (งบกองทุนพัฒนาน้ำบาดาล) 234
รูปที่ 9-17 แสดงองค์ประกอบของระบบในโครงการศึกษาการพัฒนาน้ำบาดาลเพื่อความมั่นคงระดับชุมชน ปี 2564 (งบกลาง) 234
รูปที่ 9-18 แสดงหอถังกักเก็บและส่งน้ำและระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำในโครงการจัดหาแหล่งน้ำบาดาลที่มีคุณภาพเพื่อใช้ในการบรรเทาและแก้ไขปัญหาความขาดแคลนน้ำของประชาชนในพื้นที่แล้งซ้ำซากและมีปัญหาคุณภาพน้ำเค็มในภาคะวันออกเฉียงเหนือ 235
รูปที่ 9-19 แสดงองค์ประกอบของโครงการส่งน้ำบาดาลระยะไกล กรมทรัพยากรน้ำบาดาล 236
รูปที่ 10-1 แสดงรายละเอียดอัตราการจัดเก็บค่าใช้น้ำในนอกเขตวิกฤตการณ์น้ำบาดาล 241
รูปที่ 10-2 แสดงอัตราการจัดเก็บค่าใช้น้ำบาดาลในเขตวิกฤตการณ์น้ำบาดาล 7 จังหวัด 241
รูปที่ 10-3 แสดงรายละเอียดอัตราการจัดเก็บค่าอนุรักษ์น้ำบาดาลในเขตวิกฤตการณ์น้ำบาดาล 7 จังหวัด 242
รูปที่ 10-4 แสดงปริมาตรกักเก็บของน้ำบาดาลแยกเป็นรายภูมิภาคของประเทศไทย 244
รูปที่ 10-5 แสดงแผนที่น้ำบาดาลซึ่งรวบรวมและดัดแปลงมาจากแผนที่น้ำบาดาล มาตราส่วน 1:100;000 ของประเทศไทย 245
รูปที่ 10-6 แสดงปริมาณน้ำบาดาลของประเทศไทย ปริมาณการเติมน้ำบาดาลรายปี ปริมาณการใช้น้ำที่ปลอดภัยรายปี ปริมาณการใช้น้ำบาดาลรายปีและการจำแนกปริมาณการใช้ประโยชน์จากน้ำบาดาลของประเทศไทย 246
รูปที่ 10-7 แสดงลักษณะรอยต่อระหว่างน้ำบาดาลจืดกับน้ำบาดาลเค็มในสภาวะสมดุลตามธรรมชาติหรือในสภาวะที่ไม่มีการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ 248

รูปที่ 10-8 แสดงแสดงลักษณะรอยต่อระหว่างน้ำบาดาลจืดกับน้ำบาดาลเค็มในสภาวะที่สูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ ทำให้เกิดการรุกล้ำของน้ำเค็มและการรุกล้ำของน้ำเค็มในแนวดิ่ง 248
รูปที่ 10-9 แสดงลักษณะการละลายจนเกิดโพรงถ้ำใต้ดิน 249
รูปที่ 10-10 แสดงลักษณะการตัดผ่านชั้นหินด้านบนของโดมเกลือขึ้นมาใกล้ผิวดินและต่อมาถูกละลายโดยน้ำบาดาลไหลผ่านทำให้เกิดช่องว่างใต้ผิวดินและเกิดหลุมยุบแบบ Salt Depression ในที่สุด 250
รูปที่ 10-11 แสดงตัวอย่างของแหล่งปนเปื้อนที่มีผลต่อคุณภาพน้ำบาดาล 251
รูปที่ 10-12 แสดงตัวอย่างของแหล่งปนเปื้อนที่มีผลต่อคุณภาพน้ำบาดาล 251
รูปที่ 10-13 แสดงรูปแบบการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำบาดาลแบบสูบและบำบัด (pump-and-treat) 253
รูปที่ 10-14 แสดงรูปแบบการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำบาดาลแบบสูปและบำบัด (pump-and-treat) 254
รูปที่ 10-15 แสดงรูปแบบการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำบาดาลแบบสูปและบำบัด และตัวกำแพงถูกออกแบบให้ใช้สารเคมีเฉพาะเพื่อบำบัดสารปนเปื้อนเฉพาะตัว 254
รูปที่ 10-16 แสดงรูปแบบการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำบาดาลแบบ in-situ air sparging 255
รูปที่ 10-17 แสดงรูปแบบการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำบาดาลแบบ in-situ air sparging แบบง่าย 255
รูปที่ 10-18 แสดงรูปแบบวิธีการกำจัดสารปนเปื้อนแบบ In-situ Flushing 256
รูปที่ 10-19 แสดงวิธีการต่างๆ ในการจัดการด้านการเติมน้ำบาดาล (Manage Aquifer Recharge) 258
รูปที่ 10-20 แสดงรูปแบบของการเติมน้ำแบบ Injection Barrier 260
รูปที่ 10-21 แสดงลักษณะกำแพงใต้ดินกันน้ำเค็ม 260

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 6-1	ตัวอย่างบันทึกการติดตั้งท่อกรุ ท่อกรอง ท่อรับทราย และโครงบังคับสำหรับบ่อชนิดเติมกรวด	170
ตารางที่ 7-1	แสดงการหาปริมาณน้ำจากค่า H ที่อ่านได้จากความสูงของระดับน้ำในสายยางสำหรับการวัดปริมาณน้ำโดยใช้ Circular Orifice Plate	194
ตารางที่ 7-2	แสดงการคำนวณปริมาณน้ำจากท่อในแนวราบ	195
ตารางที่ 8-1	แสดงมาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก ปี พ.ศ. 2539	201
ตารางที่ 8-2	แสดงมาตรฐานน้ำดื่มของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล ปี พ.ศ. 2551	202
ตารางที่ 8-3	แสดงองค์ประกอบและผลรวมโดยน้ำหนักของธาตุหลักและธาตุรองที่มีอยู่ในน้ำบาดาล	210
ตารางที่ 8-4	แสดงการแปลงหน่วยจาก mg/L เป็นหน่วย meq/L ของผลวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำที่ปรากฏในรูปที่ 8-2	211
ตารางที่ 8-5	แสดงการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของธาตุประจุบวกจากหน่วย meq/L เป็นร้อยละ	211
ตารางที่ 8-6	แสดงการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของธาตุประจุบลบจากหน่วย meq/L เป็นร้อยละ	211
ตารางที่ 9-1	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานรองของอุปกรณ์ประเภทต่าง ๆ ในระบบการไหลของของไหลในท่อปิด	223

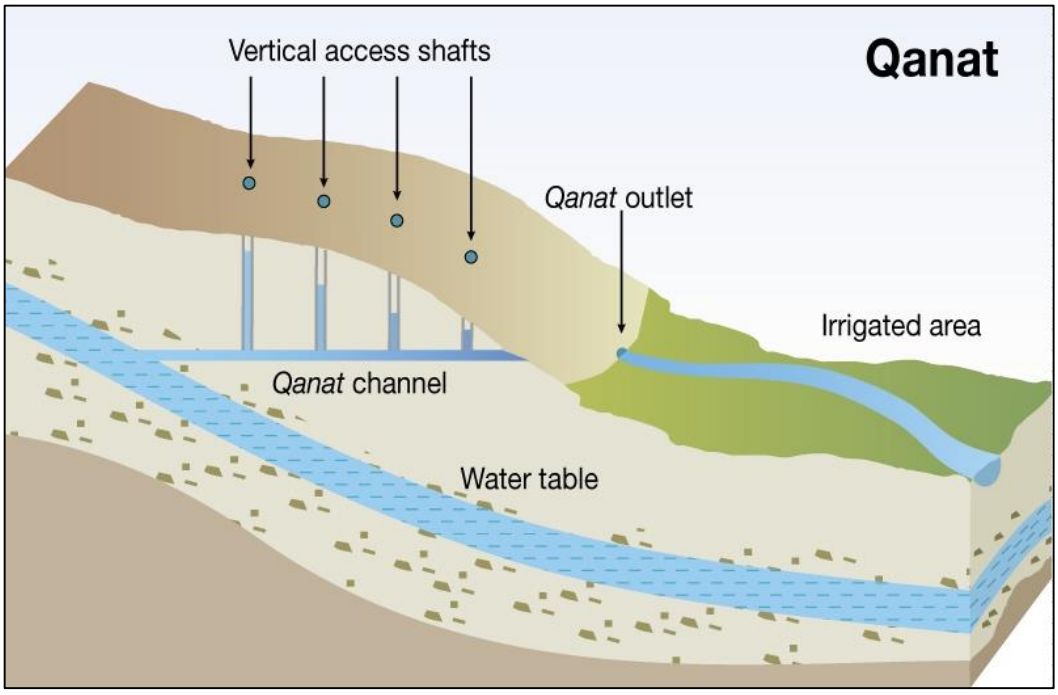
บทที่ 1
บทนำ
(Introduction)

1.1 น้ำบาดาล (groundwater)

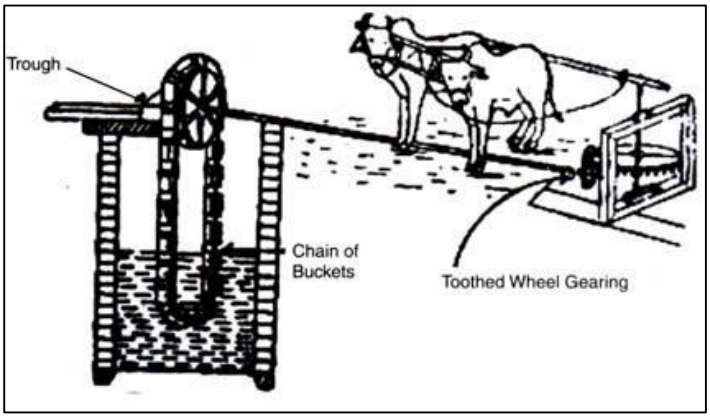
เป็นที่ทราบกันอยู่ทั่วไปว่าน้ำบาดาลนั้น เป็นแหล่งน้ำที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ และสิ่งมีชีวิตทั่วไป ในพื้นที่ที่ไม่มีแหล่งน้ำผิวดินเพียงพอหรือไม่มีแหล่งน้ำผิวดินเลย มนุษย์ก็ได้อาศัยน้ำบาดาลในการใช้ประโยชน์ และการดำรงชีวิต และรู้จักนำขึ้นมาใช้ตั้งแต่สมัยอดีตแล้ว “น้ำบาดาล” หากเป็นนิยามทางอุทกธรณีวิทยาแล้ว จะหมายถึงน้ำใต้ดินที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำบาดาล (water table) พบอยู่ในชั้นดิน หิน กรวด ทรายที่อิ่มตัวด้วยน้ำ แต่ “น้ำบาดาล” ตามพระราชบัญญัติน้ำบาดาล พ.ศ. 2520 มาตรา 3 แล้ว “น้ำบาดาล” หมายความว่า น้ำใต้ดินที่เกิดอยู่ในชั้นดิน กรวด ทราย หรือหิน ซึ่งอยู่ลึกจากผิวดินเกินความลึกที่รัฐมนตรีประกาศในราชกิจจานุเบกษา แต่จะกำหนดลึกน้อยกว่าสิบเมตรมิได้ นอกจากนั้นตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ได้กำหนดเพิ่มเติมว่า “น้ำบาดาล หมายความว่า น้ำใต้ดินที่เกิดอยู่ในชั้นดิน กรวด ทราย หรือหิน ซึ่งอยู่ลึกจากผิวดินเกิน 15 เมตร” ทั้งนี้เพื่อเป็นเกณฑ์ความลึกในการพิจารณาเก็บค่าใช้น้ำตามพระราชบัญญัติน้ำบาดาล นั่นเอง

1.2 การนำน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ (Groundwater Exploitation)

จากหลักฐานที่ปรากฏให้เห็นและจากการบันทึก มนุษย์รู้จักการนำน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ประโยชน์ตั้งแต่ 3,000 ปีที่แล้ว ในพื้นที่แถวเปอร์เซียจากระบบที่เรียกว่า **กานัท (qanat**) ซึ่งเป็นระบบที่นำน้ำขึ้นมาจากปล่องขุดในแนวดิ่ง (vertical shaft) โดยปล่องขุดนั้นจะขุดลงไปถึงอุโมงค์ในแนวนอนซึ่งขุดให้ตัดกับระดับน้ำบาดาลซึ่งมักจะเป็นน้ำบาดาลในหินร่วน (unconsolidated materials) และไร้แรงดัน (unconfined) ทำให้น้ำบาดาลจะไหลอยู่ภายในอุโมงค์ซึ่งมีความลาดเอียงเล็กน้อยสอดคล้องกับลักษณะภูมิประเทศที่อยู่ข้างบน เมื่ออุโมงค์ใต้ดินตัดกับพื้นผิวภูมิประเทศ น้ำบาดาลก็จะไหลออกสู่โลกภายนอก ซึ่งมักจะเป็นที่ราบที่คนในสมัยโบราณใช้เป็นพื้นที่สำหรับเกษตรกรรม (irrigated area) รูปที่ 1-1 แสดงการนำน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ผ่านระบบกานัท สำหรับการน้ำบาดาลที่นำขึ้นมาใช้จากปล่องในแนวดิ่งของระบบกานัท นั้นจะใช้วิธีหย่อนถังน้ำ (bucket) ที่ผูกโยงกับเชือกและผูกต่อ ๆ กันอย่างต่อเนื่องเป็นวง แล้วใช้กว้านเป็นตัวขับเคลื่อนเพื่อหมุนวงเชือกพร้อมถังน้ำลงไปตักน้ำจากบ่อแล้วนำขึ้นมาสู่ผิวดิน อุปกรณ์ตักน้ำแบบนี้เรียกว่าวงล้อแห่งเพอร์เชีย (Persian wheel) ดังแสดงในรูปที่ 1-2 ต้นกำลังของการหมุนอาจใช้แรงคน หรือแรงงานสัตว์ต่างเช่นม้าหรือวัว



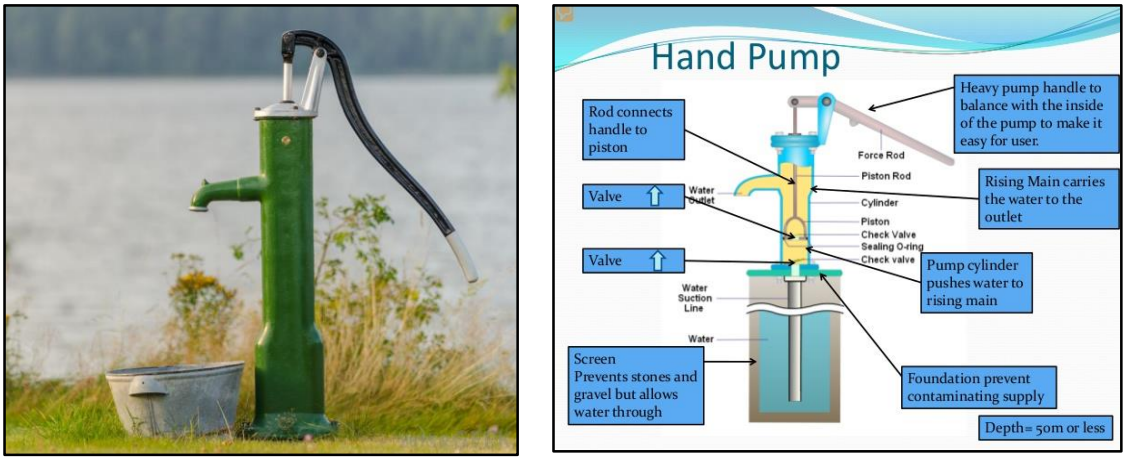
รูปที่ 1-1 รูปแสดงการนำน้ำบาดาลมาใช้ผ่านระบบกานัท (Qanat)
ที่มา: http://maps.grida.no/go/graphic/qanat



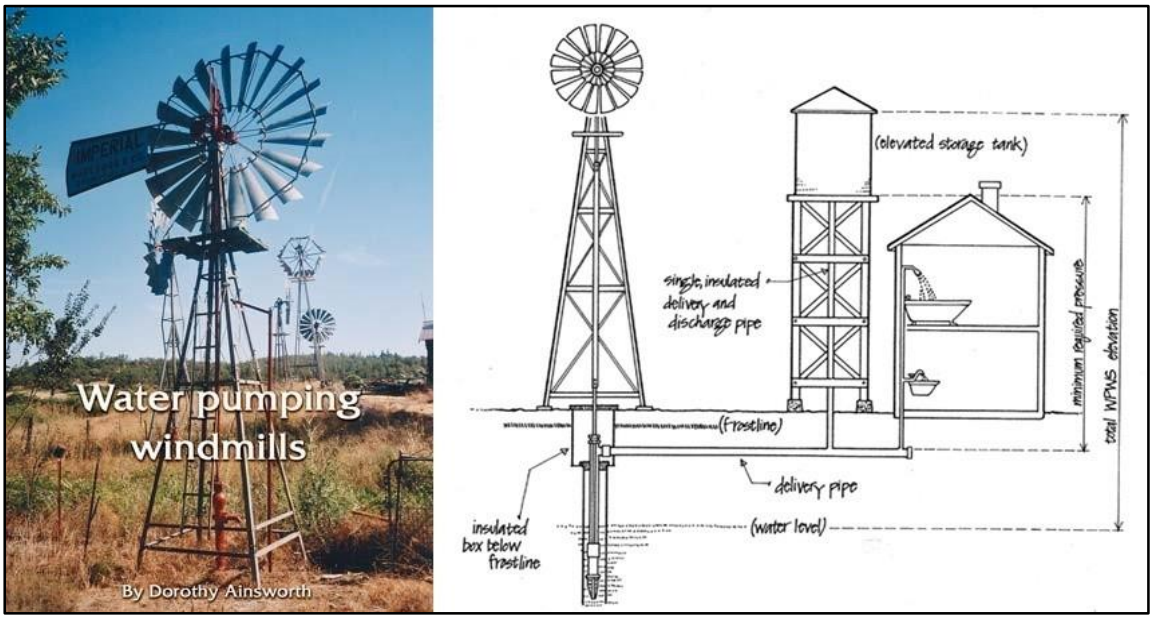
รูปที่ 1-2 แสดงอุปกรณ์การนำน้ำขึ้นมาใช้ในระบบกานัท ที่เรียกว่าวงล้อแห่งเปอร์เซีย (Persian wheel)

ต่อมาเมื่อมีการพัฒนาเทคโนโลยีขึ้นเรื่อยๆ มีการนำเครื่องจักรหรือเครื่องยนต์มาใช้ในการเจาะและพัฒนาน้ำบาดาล (จะกล่าวถึงรายละเอียดในบทที่ 4) มีการประดิษฐ์เครื่องสูบมือโยก (hand pump) ก็ได้อาศัยแรงคนไปขับเคลื่อนเครื่องสูบมือโยกแล้วน้ำบาดาลก็จะขึ้นมาสู่ปากบ่อ หากระดับน้ำบาดาลอยู่ตื้น การโยกก็จะโยกเพียงไม่กี่ครั้ง แต่หากระดับน้ำบาดาลอยู่ค่อนข้างลึก ก็จะใช้เวลานานกว่าในการโยกเพื่อให้น้ำบาดาลขึ้นสู่ปากบ่อ นอกจากนั้นยังมีเครื่องสูบน้ำแบบกังหันลม (wind mill pump) เครื่องสูบแบบเทอร์ไบน์ (turbine pump) ซึ่งมีองค์ประกอบค่อนข้างซับซ้อน แต่เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แม้ในในการสูบทดสอบน้ำบาดาลเพื่อคำนวณตัวเลขทางวิชาการ ก็ใช้เครื่องสูบแบบเทอร์ไบน์ โดยติดตั้งแผ่น orifice เพื่อวัดความดัน

(head) ของน้ำในสายยางเพื่อคำนวณปริมาณน้ำบาดาลที่สูบได้ (yield) ก็ใช้เครื่องสูบแบบเทอร์ไบน์ เช่นกัน แต่ที่เป็นที่นิยมที่สุดในขณะนี้ได้แก่เครื่องสูบน้ำไฟฟ้าแบบจุ่มใต้น้ำ (submersible pump) ซึ่งมีลักษณะเป็นกระบอกกลวง ภายในกระบอกจะติดตั้งด้วยใบพัดเพื่อยกน้ำขึ้นสู่ปากบ่อ ติดตั้งง่ายและมีหลายขนาดและหลายยี่ห้อ ผู้เขียนจะไม่ขอกล่าวในรายละเอียดเกี่ยวกับเครื่องสูบน้ำแบบต่างๆ มากกว่านี้ หากผู้อ่านมีความประสงค์จะทราบรายละเอียด ผู้เขียนแนะนำให้ไปอ่านจากหนังสือ “น้ำบาดาล-บ่อบาดาล” แต่งโดย เจริญ เพียรเจริญ, กรมทรัพยากรธรณี, 2540 (หน้า 90-98) รูปที่ 1-3 (a) เครื่องสูบน้ำแบบมือโยก (b) องค์ประกอบของเครื่องสูบแบบมือโยก รูปที่ 1-4 แสดงเครื่องสูบน้ำแบบกังหันลม รูปที่ 1-5 แสดงเครื่องสูบน้ำแบบเทอร์ไบน์ รูปที่ 1-6 แสดงเครื่องสูบน้ำแบบจุ่มอยู่ใต้น้ำ



รูปที่ 1-3 (a) เครื่องสูบน้ำแบบมือโยก (b) องค์ประกอบของเครื่องสูบน้ำแบบมือโยก (เครดิตภาพจาก Wikipedia)



รูปที่ 1-4 เครื่องสูบน้ำกังหันลมและองค์ประกอบ (เครดิตภาพจาก Wikipedia)

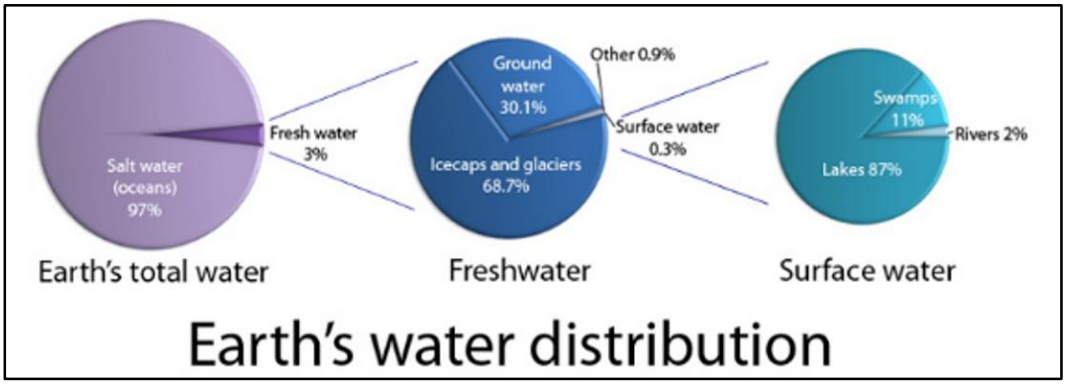
รูปที่ 1-5 แสดงเครื่องสูบน้ำแบบเทอร์ไบน์ (turbine pump) ตามแบบของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล

รูปที่ 1-6 แสดงเครื่องสูบน้ำไฟฟ้าแบบจุ่มใต้น้ำ (submersible pump)

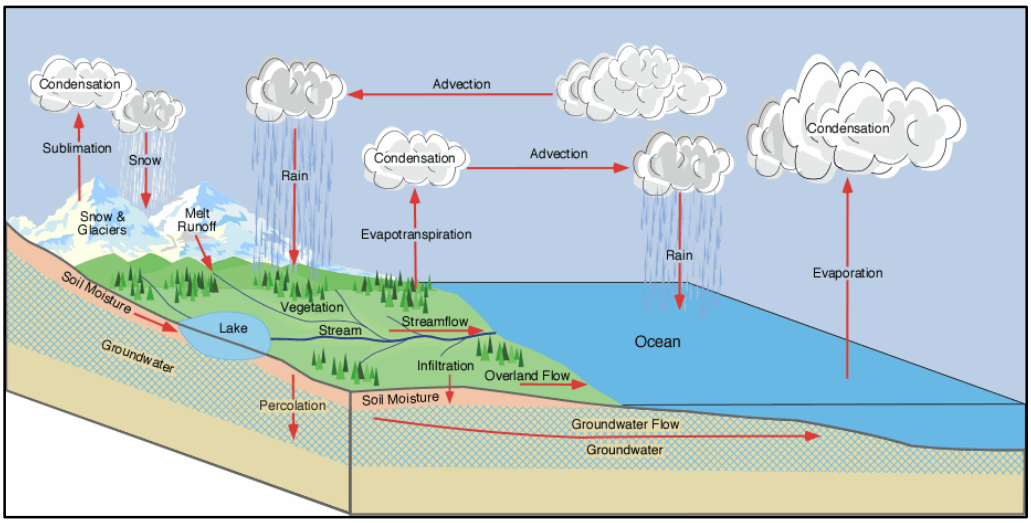
1.3 วัฏจักรของน้ำ (Hydrologic Cycle/Water Cycle)

มีการคำนวณตัวเลขจากหลายแหล่งแล้วพอจะประมาณการได้ว่าปริมาณน้ำทั้งหมดบนโลกใบนี้มีอยู่ทั้งสิ้น 14,000 ล้านลูกบาศก์กิโลเมตร (อุทกวิทยา, วิชัย ศรีบุญลือ, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2546) ในจำนวนนี้ร้อยละ 97 จะเป็นน้ำเค็มที่อยู่ในทะเลและมหาสมุทร มีเพียงร้อยละ 3 เท่านั้นที่เป็นน้ำจืด และจากปริมาณน้ำจืดเมื่อคิดเป็น 100 % จะเป็นน้ำจืดที่อยู่ในรูปของภูเขาน้ำแข็ง (ice berg) ธารน้ำแข็งที่อยู่ตามขั้วโลก (polar glaciers) ประมาณร้อยละ 68.7 อยู่ในรูปของน้ำบาดาล (groundwater) ร้อยละ 30.1 น้ำส่วนอื่นเช่นไอน้ำในอากาศ น้ำในระบบต้นไม้ ร้อยละ 0.9 และมีเพียงร้อยละ 0.3 เท่านั้นที่เป็นแหล่งน้ำผิวดิน (surface water) ซึ่งน้ำผิวดินทั้งหมดหากนับเป็น 100 % จะเป็นน้ำในทะเลสาบต่างๆ ถึง 87 % น้ำที่ขังตามหนองบึง (swamp) 11 % ที่เหลืออีก 2 % เป็นน้ำในแม่น้ำลำธารต่างๆ จะเห็นว่าน้ำจืดที่อยู่ในรูปของน้ำบาดาลมีปริมาณมหาศาลมากเมื่อเทียงกับน้ำจืดในทะเลสาบ หนองบึงและแม่น้ำลำธาร น้ำที่อยู่บนโลกจะถูกจัดอยู่ใน 3 ประเภทคือ น้ำในบรรยากาศ (meteoric หรือ atmospheric water) ซึ่งได้แก่ฝน หิมะ ลูกเห็บ น้ำค้าง เมฆ หมอก รวมถึงไอน้ำที่ภูเขาไฟพ่นปล่อยออกสู่บรรยากาศ น้ำผิวดิน (surface water) ได้แก่น้ำจืดที่กักเก็บอยู่ในทะเลสาบ หนองบึง แม่น้ำ ลำธาร และน้ำเค็มที่อยู่ในทะเลและมหาสมุทร และสุดท้ายคือน้ำใต้ดิน (subsurface water) หมายถึงน้ำที่ไหลซึมลงสู่ใต้ดินและกักเก็บอยู่ใต้ผิวดิน ความชื้นในดินทั้งหมด รวมไปถึงน้ำบาดาลด้วย

แต่ไม่ว่าน้ำทั้งหมดที่อยู่บนโลก (14,000 ล้านลูกบาศก์กิโลเมตร) จะอยู่ในที่ใดก็ตาม จะไม่มีทางที่จะหลุดพ้นจากวัฏจักรของน้ำ (Water Cycle/Hydrologic Cycle) ไปได้ กล่าวคือมีการเปลี่ยนสถานะหมุนเวียนอยู่ตลอดเวลาเริ่มตั้งแต่น้ำที่อยู่ในทะเล มหาสมุทร ทะเลสาบ หนองบึง แม่น้ำลำธารเมื่อถูกแสดงแดดแผดเผา (solar radiation) หรือถูกลมพัดผ่าน ก็จะเกิดการระเหย (evaporation) เปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นก๊าซหรือไอน้ำ เมื่อไอน้ำลอยตัวขึ้นไปสู่ชั้นบรรยากาศ ก็จะรวมตัวกันเป็นก้อนเมฆ เมฆบางส่วนจะถูกลมในที่สูงพักพาเข้าไปหาแผ่นดิน (advection) เมื่อปะทะอากาศเย็นก็จะกลั่นตัว (condensation) แล้วก็ตกลงมาเป็นฝน บางส่วนก็กลั่นตัวตกลงมาเป็นฝนแล้วก็ตกลงในทะเล มหาสมุทรเหมือนเดิม ในพื้นที่ที่เป็นเส้นรุ้งสูง (high latitude) การกลั่นตัวจะอยู่ในรูปของหิมะแล้วตกลงสู่พื้นดินทับถมกันอยู่ตามยอดเขาหรือธารน้ำแข็งต่าง ๆ เมื่อหิมะละลายกลายเป็นน้ำ (melting) รวมถึงน้ำฝนที่ตกลงในแผ่นดิน ก็จะไหลซึมลงสู่ใต้ดิน (percolation) เมื่อผืนดินอิ่มตัวด้วยน้ำก็ไม่สามารถซึมลงต่อไปได้ก็จะกลายเป็นน้ำไหลล้น (surface runoff) แล้วไหลลงแม่น้ำลำธาร แล้วไหลลงสู่ทะเลมหาสมุทรต่อไป ส่วนที่ซึมลงสู่ใต้ดินบางส่วนก็จะถูกดูดซับโดยรากพืชเพื่อเอาไปหล่อเลี้ยงชีวิต บางส่วนก็จะซึมลงใต้ดินแล้วกักเก็บ (stored) อยู่ในขั้นหินให้น้ำบาดาล (aquifer) แล้วน้ำบาดาลก็จะไหลลงสู่แม่น้ำลำธารแล้วไหลลงสู่ทะเลมหาสมุทรในที่สุดได้เช่นกัน น้ำที่ต้นไม้ดูดซับเข้าไปบางส่วนก็จะคายน้ำ (transpiration) ออกมาทางปากใบกลายเป็นไอน้ำ น้ำผิวดินบางส่วนก็จะถูกความร้อนและแรงลมทำให้แปรสถานะกลายเป็นไอโดยการระเหย (evaporation) ในทางอุทกวิทยามักจะรวมการคายน้ำกับการระเหยเข้าด้วยกัน เรียกเป็นคำใหม่ว่า “การคายระเหย” (evapotranspiration: ET) ในทำนองเดียวกัน น้ำแข็งตามภูเขาน้ำแข็งหรือธารน้ำแข็งเมื่อถูกความร้อนจากดวงอาทิตย์และแรงลม ก็จะเกิดการระเหิด (sublimation) กลายเป็นไอน้ำได้โดยตรง การเปลี่ยนสถานะของน้ำบนโลกนี้จะเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลาและจะหมุนวนเวียนอยู่อย่างนี้ตลอดไป จึงถูกเรียกว่า Water Cycle หรือวัฏจักรของน้ำ รูปที่ 1-7 แสดงการกระจายตัวของน้ำ (water distribution) และสัดส่วนของน้ำบนโลก รูปที่ 1-8 แสดงวัฏจักรของน้ำ



รูปที่ 1-7 แสดงการกระจายตัวและสัดส่วนของน้ำทั้งหมดที่อยู่บนโลก (ภาพประกอบจาก Internet)



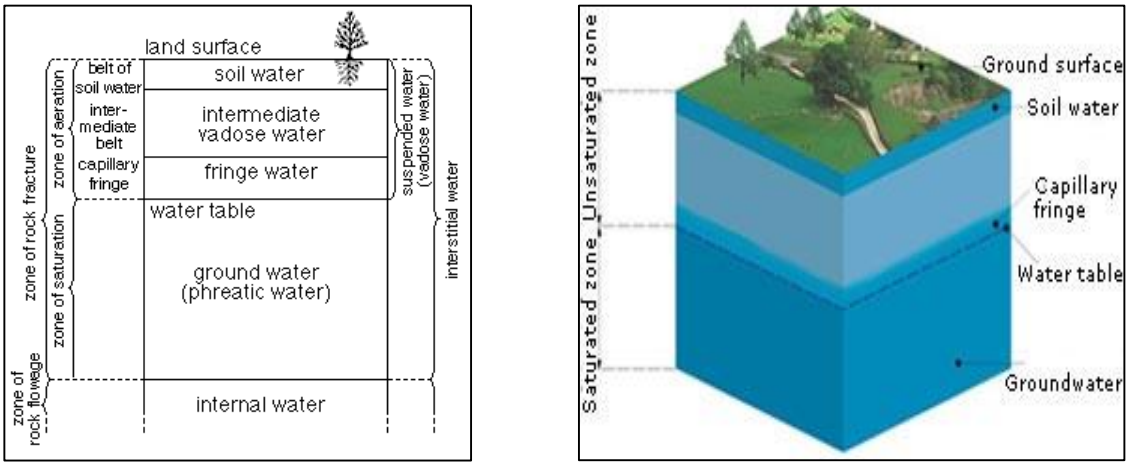
รูปที่ 1-8 แสดงวัฏจักรของน้ำบนโลก (Water Cycle / Hydrologic Cycle) (ภาพประกอบจาก Internet)

1.4 กำเนิดน้ำบาดาล (Groundwater Occurrence)

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อข้างบนว่าเมื่อน้ำฝนตกลงบนแผ่นดิน รวมถึงหิมะที่ละลาย จะมีน้ำส่วนหนึ่งซึมลงสู่ใต้ดิน (infiltration) น้ำที่ซึมลงใต้ดินบางส่วนจะถูกดูดซับโดยรากพืชต่างๆ เมื่อดินอิ่มตัว น้ำก็จะซึมลงไม่ได้ต่อไป น้ำส่วนที่เหลือก็จะเริ่มไหลล้นไปตามผิวดิน (surface water runoff) น้ำในส่วนที่ไหลซึมลงสู่ใต้ดิน รูปที่ 1-9 (a) และ (b) แสดงให้เห็นองค์ประกอบของน้ำใต้ดินทั้งระบบ ระบบของน้ำใต้ดินจะแบ่งออกเป็น 2 เขต (zone) ได้แก่ เขตที่สัมผัสกับอากาศ (vadose zone หรือ zone of aeration) ในเขตนี้น้ำใต้ดินจะแทรกอยู่ตามช่องว่างของเม็ดดินซึ่งจะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำเนื่องจากบางช่องว่างก็จะมีอากาศแทรกอยู่เช่นกัน น้ำใต้ดินในเขตนี้จะระเหยกลายเป็นไอกลับขึ้นสู่บรรยากาศได้ รากพืชจะใช้น้ำจากส่วนนี้ในการดูดซับไปหล่อเลี้ยงส่วนต่างๆ ของพืช เขตสัมผัสกับอากาศนี้น้ำที่อยู่ตามช่องว่างระหว่างเม็ดดินจะมีความดันน้ำ (Pore water pressure) น้อยกว่าความดันบรรยากาศ (atmospheric pressure) ดังนั้นจึงมีการสูญเสียน้ำสู่บรรยากาศได้ และบางช่องว่างระหว่างเม็ดดินจะเป็นอากาศ ดังนั้นในทางอุทกวิทยา จะเรียกว่า เขตไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (unsaturated zone) ซึ่งยังแบ่งย่อยออกได้อีกเป็น 3 ส่วนได้แก่ แถบของน้ำในดิน (belt of soil water) ซึ่งอยู่

บนสุดของเขตสัมผัสกับอากาศ ประกอบด้วยเม็ดดินเม็ดหินที่ถูกพัดพามา หรือผุพังอยู่กับที่ น้ำที่อยู่ในส่วนนี้เรียกว่า น้ำในดินหรือความชื้นในดิน (soil water หรือ soil moisture) ส่วนที่ 2 ได้แก่ส่วนที่อยู่ถัดขึ้นมาจากส่วนที่อิ่มตัวด้วยน้ำไปจนถึงเขตสูงสุดที่น้ำถูกดึงขึ้นได้โดยแรงดูดอณู (capillary force) ส่วนนี้จะถูกเรียกว่าแถบแรงดึงดูดอณู (capillary fringe) ความหนาของส่วนนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของช่องว่างระหว่างเม็ดตะกอนที่ประกอบเป็นชั้นนี้ หากช่องว่างขนาดใหญ่ ส่วนนี้จะบาง (แรงดึงดูดระหว่างอณูมีน้อย) แต่หากช่องว่างขนาดเล็กส่วนนี้ก็จะหนา (แรงดึงดูดระหว่างอณูมีมาก) น้ำที่อยู่ในส่วนนี้จะเรียกว่า น้ำในแถบแรงดึงดูดอณู (capillary water หรือ fringe water) ส่วนสุดท้ายในเขตสัมผัสกับอากาศเรียกว่า แถบระหว่างกลาง (intermediate belt) ซึ่งอยู่ระหว่างแถบของน้ำในดินและแถบแรงดึงดูดอณู ส่วนนี้อาจมีหรือว่าไม่มีก็ได้ น้ำที่ถูกกักเก็บอยู่ในแถบนี้จะถูกเรียกว่า น้ำในแถบระหว่างกึ่งกลาง (intermediate vadose water) ผู้สนใจในรายละเอียดสามารถค้นหาข้อมูลได้ในตำราทางวิชาการเรื่อง “น้ำบาดาล” โดยทวีศักดิ์ ระมิงค์วงศ์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2546

เขตถัดลงมาจากเขตสัมผัสกับอากาศ เรียกว่า เขตอิ่มตัวด้วยน้ำ (zone of saturation หรือ phreatic zone) ในเขตนี้จะมีน้ำกักเก็บอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดตะกอนหรือแม้กระทั่งรอยแตกในหินจนเต็มไปหมด ระดับผิวบนสุดของเขตนี้จะมีความดันน้ำ (pore water pressure) เท่ากับความดันบรรยากาศ และจะถูกเรียกว่า **ระดับน้ำบาดาล (Water Table)** หากเจาะบ่อน้ำบาดาลลงไปในชั้นนี้จะเห็นว่าระดับของน้ำบาดาลในบ่อจะอยู่ที่ระดับเดียวกับระดับบนสุดของชั้นหินให้น้ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความดันน้ำในเขตอิ่มตัวด้วยน้ำจะมีค่าเท่ากับความดันของบรรยากาศ และน้ำที่ถูกกักเก็บอยู่ในเขตนี้จะถูกเรียกว่า น้ำบาดาล (groundwater) ในรูปที่ 1-9 (a) จะเห็นว่าใต้ส่วนที่อิ่มตัวด้วยน้ำ จะเขียนว่า zone of rock flowage ซึ่งผู้เขียนได้ทำการสืบค้นจากหลายแหล่งข้อมูล คำอธิบายคือเป็นเขตที่ปราศจากช่องว่าง (interstices) ในเนื้อหินเนื่องจากหินอาจถูกกระทำด้วยแรงดันของเปลือกโลกและอาจมีการไหลแบบพลาสติก (plastic flow) น้ำที่กักเก็บในเขตนี้จะเรียกว่าน้ำภายในหิน (internal water) ซึ่งจะเป็นน้ำที่อยู่นอกระบบของวัฏจักรน้ำ (Water Cycle) ในปัจจุบัน น้ำภายในหินจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ น้ำจากหินหนืดหรือหินหลอมเหลว (magmatic หรือ juvenile water) เป็นน้ำทีมีต้นกำเนิดจากภายในโลกเป็นส่วนประกอบของหินหนืด เมื่อหินหนืดเย็นตัวลง ส่วนที่เป็นน้ำจะเข้าไปแทรกอยู่ตามช่องว่างในเนื้อหินอัคนี หากเกิดการประทุของภูเขาไฟ น้ำจากหินหนืดจะถูกดันขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศกลายเป็นน้ำในบรรยากาศ (meteoric water) ได้เช่นกัน น้ำภายในหินอีกส่วนหนึ่งได้แก่ น้ำตกค้าง (connate water) เป็นน้ำที่เกิดอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดตะกอนพร้อมกับการตกทับถมของตะกอนในชั้นหินร่วน (unconsolidated strata) ในอดีต ต่อมาชั้นตะกอนนี้ถูกปิดทับโดนตะกอนที่ทับถมมาภายหลัง ซึ่งน้ำตกค้างอาจเป็นน้ำจืดหรือน้ำเค็มก็ได้ ขึ้นอยู่กับสภาวะการสะสมตัวในขณะนั้น และเนื่องจากถูกกักเก็บอยู่ในชั้นหินเป็นระยะเวลานาน คุณภาพน้ำดั้งเดิมอาจเปลี่ยนไปเป็นน้ำที่มีเกลือแร่เจือปนอยู่มากจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีกับดินหินข้างเคียง น้ำส่วนนี้จะไม่มีโอการถูกเติมเข้ามาใหม่ได้เนื่องจากชั้นหินกักเก็บถูกปิดทับ ไม่มีพื้นที่ทางเข้าให้น้ำใหม่ (intake area) จึงเรียกน้ำในส่วนนี้ว่า “การสำรองเพียงครั้งเดียว” หรือ One Time Reserve: OTR หากสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้จนหมดก็จะหมดไปเลย (groundwater mining) (อ่านเพิ่มเติมได้ที่ “น้ำบาดาล”, ทวีศักดิ์ ระมิงค์วงศ์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2546) อย่างไรก็ตาม หากมีความจำเป็นที่จะต้องเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล (artificial recharge to aquifer) ชั้นน้ำตกค้างนี้ก็เหมาะสมที่จะเป็นเป้าหมายในการดำเนินการต่อไปโดยใช้เทคนิคที่เหมาะสม ยกตัวอย่างเช่นที่ประเทศอิสราเอล จะใช้น้ำที่ละลายจากหิมะบนที่ราบสูง Golan Heights เติมลงไปในบ่อน้ำบาดาลเดิมที่เจาะเอาน้ำบาดาลประเภทน้ำตกค้างขึ้นมาใช้เป็นการทดแทนน้ำที่สูบไปใช้ในฤดูแล้ง



รูปที่ 1-9 (a) แสดงระบบน้ำใต้ดิน 2 มิติ (b) แสดงระบบน้ำใต้ดิน 3 มิติ

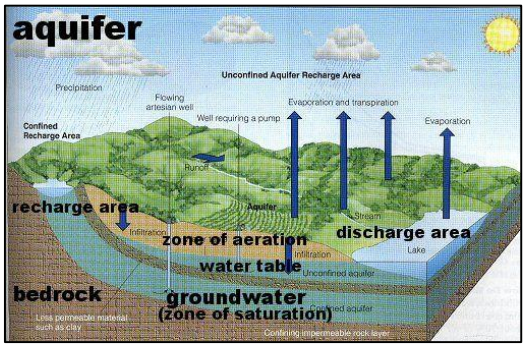
1.5 นิยามศัพท์ทางอุทกธรณีวิทยา (Definition of Hydrogeological Terms)

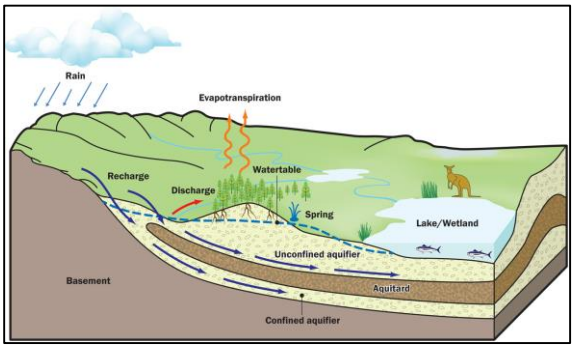
ในทางอุทกธรณีวิทยา มีคำศัพท์ภาษาอังกฤษอยู่เป็นจำนวนมากสำหรับบุคคลที่ปฏิบัติงานหรือศึกษาศาสตร์เกี่ยวกับน้ำบาดาลจำเป็นต้องรู้ ทั้งนี้เพื่อที่จะให้ผู้อ่านได้เข้าใจในกระบวนการเกิด การกักเก็บ การเคลื่อนที่ (การไหล) ของน้ำบาดาลในชั้นหินให้น้ำ ผู้เขียนขอนำศัพท์ทางอุทกธรณีวิทยา ไล่เรียงตามตัวอักษร (alphabetical order) จาก Harvey A. Cohen, S.S. Papadupulos & Association Inc. ใน Handbook of Geological Sciences มาเขียนเป็นบอกกล่าวพร้อมกับคำนิยามเป็นภาษาไทยพร้อมกับภาพประกอบ ดังนี้

1.5.1 Aquifer (ชั้นหินให้น้ำ) หมายถึงหน่วยหินทางธรณีวิทยาที่สามารถให้น้ำในปริมาณที่พอเพียงต่อการใช้ให้กับบ่อน้ำ หรือแหล่งน้ำพุได้ การจำแนกหน่วยหินที่ให้น้ำว่าจัดเป็น “ชั้นหินให้น้ำ” หรือไม่อาจขึ้นอยู่กับบริบทหรือความต้องการการใช้ใช้น้ำเฉพาะถิ่นก็ได้ (รูปที่ 1-10)

1.5.2 Aquiclude หรือ Aquifuge (ชั้นหินซึมน้ำ) หมายถึงชั้นหินหรือหน่วยหินเนื้อแน่นที่ซึมซาบน้ำแต่ไม่ยอมให้น้ำไหลผ่าน หากขนาบอยู่บนและล่างชั้นหินให้น้ำ อาจทำให้ชั้นหินให้น้ำนั้น ๆ เป็นชั้นหินให้น้ำภายใต้แรงดัน (Confined aquifer) ได้ บางครั้งเรียก **ชั้นหินทึบน้ำ** (รูปที่ 1-10)

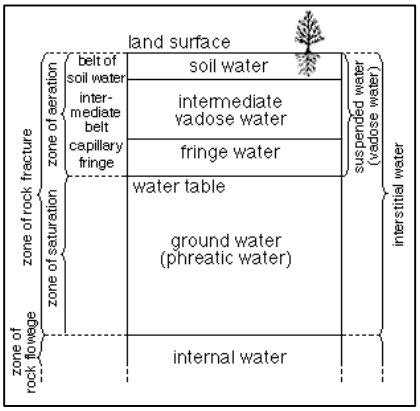
1.5.3 Aquitard (ชั้นหินต้านน้ำ) หมายถึงชั้นหินหรือหน่วยหินที่มีความสามารถให้น้ำซึมผ่านต่ำกว่าและสามารถเก็บกักน้ำไว้ได้ แต่ไม่สามารถส่งผ่านน้ำเข้าสู่บ่อสูบได้อย่างทันทีหรืออย่างฉับพลัน และหากขนาบอยู่บนและล่างชั้นหินให้น้ำ อาจทำให้ชั้นหินให้น้ำนั้น ๆ เป็นชั้นหินให้น้ำภายใต้แรงดัน (Confined aquifer) ได้เช่นเดียวกันกับ aquiclude (รูปที่ 1-10)

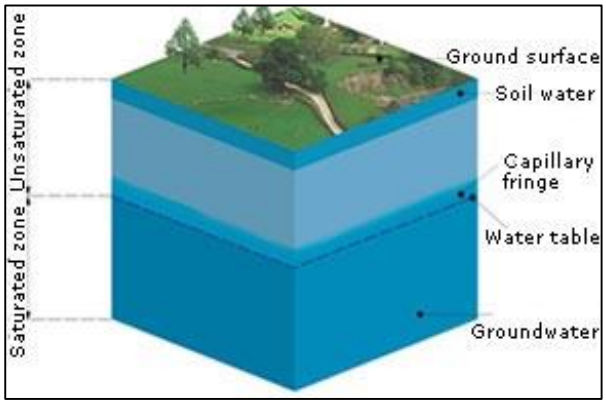




รูปที่ 1-10 แสดงชั้นหินให้น้ำ (aquifer) และชั้นหินต้านน้ำ (aquitard)

1.5.4 Capillary Fringe (แถบอณูอากาศ) ส่วนล่างสุดของเขตอิ่มตัวด้วยน้ำ ที่ซึ่งน้ำที่อยู่ในช่องว่างอยู่ภายใต้แรงดันน้อยกว่าแรงดันอากาศ แต่ช่องว่างยังอิ่มตัวด้วยน้ำ น้ำในส่วนนี้จะเคลื่อนที่ขึ้นต่อต้านกับแรงโน้มถ่วงของโลกซึ่งเป็นอิทธิผลของแรงตึงผิวบริเวณรอยต่อระหว่างน้ำกับอากาศและแรงดึงดูดระหว่างสภาพของแข็งและของเหลวในแถบดังกล่าว (รูปที่ 1-11)

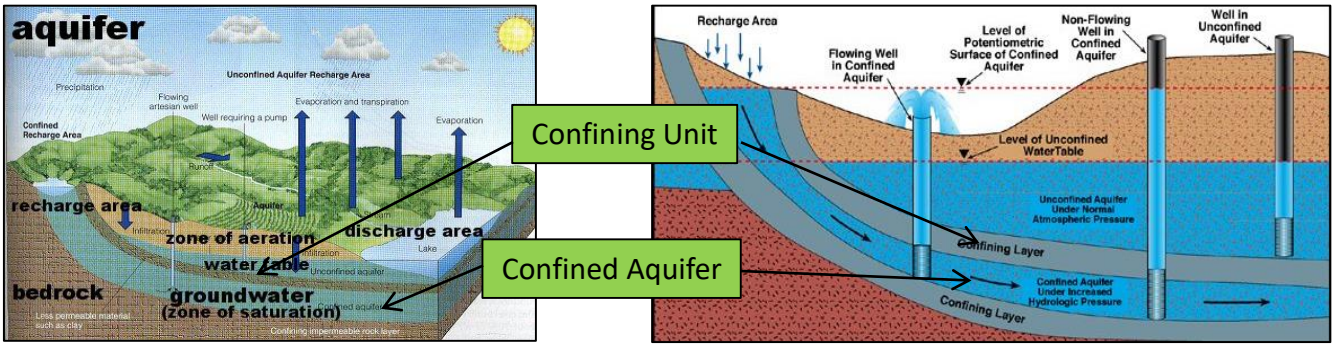




รูปที่ 1-11 แสดงแถบอณูอากาศ (capillary fringe) และเขตน้ำใต้ดินที่สัมพันธ์กัน

1.5.5 Confined Aquifer (ชั้นหินให้น้ำภายใต้แรงดัน) ชั้นหินให้น้ำที่อิ่มตัวไปด้วยน้ำอย่างสมบูรณ์และถูกปิดทับด้วยหน่วยหินกั้นน้ำซึ่งอาจเป็นชั้นหินต้านน้ำ (aquitard) หรือชั้นหินทึบน้ำ (aquiclude) ก็ได้ (รูปที่ 1-12)

1.5.6 Confining Unit (หน่วยหินกั้นน้ำ) หน่วยหินทางธรณีวิทยาที่มีค่าความนำทางชลศาสตร์ต่ำมาก ซึ่งปิดกั้นการเคลื่อนที่ของน้ำบาดาลเข้าสู่ หรือออกจาก ชั้นหินให้น้ำที่อยู่ด้านบนหรือด้านล่าง



รูปที่ 1-12 แสดงชั้นหินอุ้มน้ำภายใต้แรงดัน (confined aquifer) และหน่วยหินกั้นน้ำ (confining unit)

1.5.7 Darcy (ดาร์ซี่) หน่วยของความสามารถในการให้น้ำซึมผ่านที่มีค่าเท่ากับ 9.87 x 10^{-13} ตร.ม, หรือสำหรับน้ำที่มีความหนาแน่นและความหนืดปกติ จะมีค่าความนำทางชลศาสตร์เท่ากับ 10^{-5} เมตรต่อวินาที

1.5.8 Darcy's Law (กฎของดาร์ซี่) หมายถึงปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดหนึ่งในตัวกลางที่เป็นรูพรุน (porous media) จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับค่าลาดชลศาสตร์ในทิศทางที่ตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดนั้นกับค่าความนำทางชลศาสตร์ (รูปที่ 1-13)

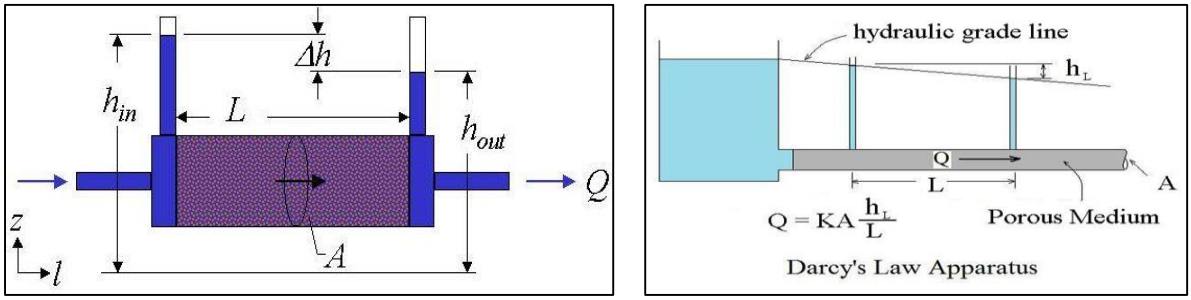
เขียนเป็นสมการได้เป็น $Q = KAi$

เมื่อ Q หมายถึงปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด

K หมายถึงค่าความนำทางชลศาสตร์ (Hydraulic Conductivity)

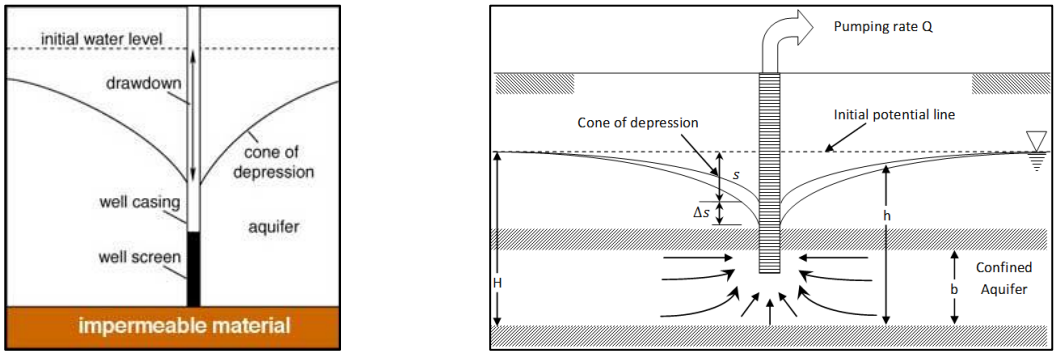
A หมายถึงพื้นที่หน้าตัดที่ของเหลวไหลผ่าน

และ *i* หมายถึงค่าลาดชลศาสตร์ (Hydraulic Gradient = dh/dL)



รูปที่ 1-13 แผนภูมิองค์ประกอบของ Darcy's Law (a) และอุปกรณ์แสดง Darcy's Law (b)

1.5.9 Drawdown (ระยะน้ำลด) หมายถึงความแตกต่างระหว่างระดับน้ำปกติซึ่งอาจเป็นระดับน้ำบาดาล (Static Water Level) หรือระดับพื้นผิวแรงดัน (Potentiometric Surface)) กับระดับน้ำในขณะที่กำลังสูบ (pumping level) ในบ่อน้ำบาดาล (รูปที่ 1-14)



(a) (b)

รูปที่ 1-14 แสดงระยะน้ำลดในหินให้น้ำแบบไร้แรงดัน (a) และระยะน้ำลดในหินให้น้ำภายใต้แรงดัน (b) (ภาพประกอบจาก Wikipedia)

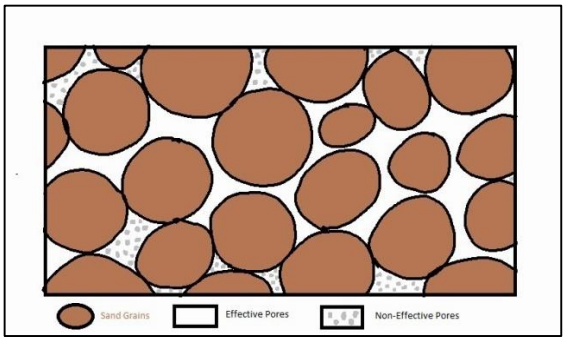
1.5.10 Effective porosity (n_e) (ความพรุนประสิทธิผล) หมายถึงร้อยละของปริมาตรของหินหรือดินที่มีช่องว่างที่เชื่อมต่อกัน (Inter-connected pore spaces) ซึ่งทำให้ของเหลวเก็บกัก และ/หรือไหลผ่านได้อย่างต่อเนื่อง (รูปที่ 1-15) มักใช้กับบริบทของการไหลของน้ำบาดาล และการเคลื่อนที่ของของเหลวใดๆ ความพรุนประสิทธิผลมีสูตรการคำนวณดังนี้

$$n_e = V_P / V_T$$

เมื่อ n_e หมายถึงความพรุนประสิทธิผล

V_P หมายถึงปริมาตรของช่องว่างที่เชื่อมต่อกัน (interconnected void-space)

และ V_T หมายถึงปริมาตรทั้งหมดของวัตถุ (total หรือ bulk volume)



รูปที่ 1-15 แสดงลักษณะของความพรุนที่ไม่ต่อเนื่อง (closed pores) และความพรุนที่ต่อเนื่อง (inter-connected pores) ซึ่งมีผลต่อค่าความพรุนประสิทธิผล (effective porosity)

1.5.11 Hydraulic Conductivity (ค่าความนำทางชลศาสตร์) Hydraulic Conductivity; K บางครั้งเรียกว่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Coefficient of permeability) เป็นค่าอัตราส่วนที่คงที่ตามกฎของดาร์ซี ได้จากการวัดความสามารถในการให้น้ำไหลผ่านของวัตถุตัวกลาง ค่า *K* จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของทั้งตัวกลางที่ของเหลวไหลผ่าน และของเหลวที่ไหลผ่าน (ความหนาแน่นและความหนืด) ค่าความนำทางชลศาสตร์ (K) มีหน่วยเป็นความเร็ว (L/T) หรือระยะทางต่อเวลาและสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$K = Q / Ai$$

เมื่อ **K** หมายถึงค่าความนำทางชลศาสตร์ หรือสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic Conductivity/Coefficient of Permeability) มีหน่วยเป็นพื้นที่ต่อเวลา (L2/T เช่น m2/d)

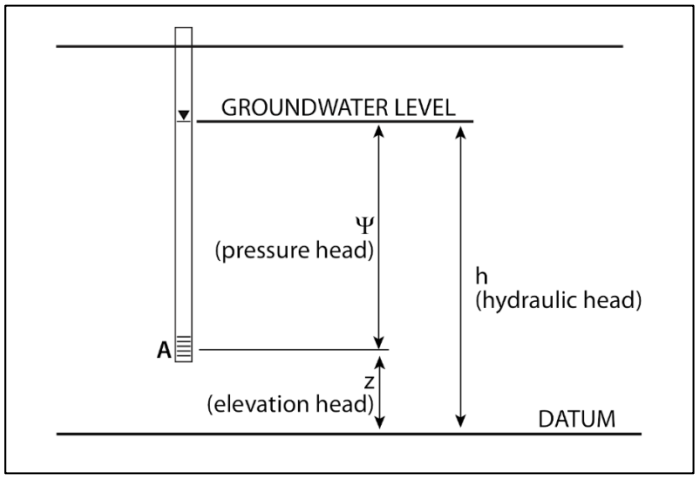
Q หมายถึงอัตราการไหลของน้ำ หน่วยเป็นปริมาตรต่อเวลา (L^3/T, เช่น m^3/d)

A หมายถึงพื้นที่หน้าตัดที่น้ำไหลผ่าน มีหน่วยเป็นพื้นที่ (L^2 เช่น m^2)

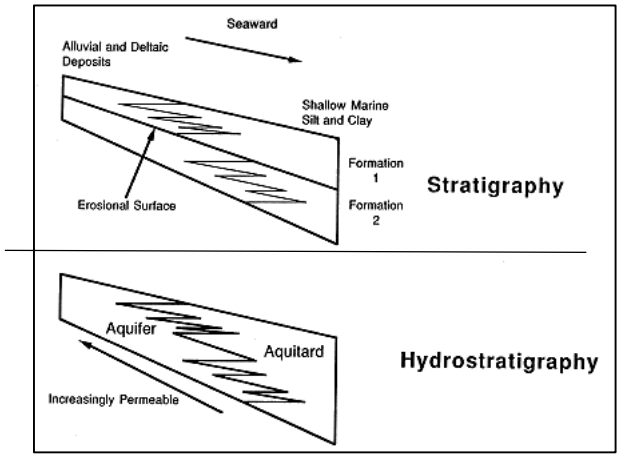
และ ***i*** หมายถึงค่าความลาดชลศาสตร์ (hydraulic gradient) หรือ dh/dl มีหน่วยเป็นระยะทางต่อระยะทาง (L/L เช่น m/m)

1.5.12 Hydraulic Head (*h*) (ระดับเฮดของน้ำบาดาล) หมายถึงพลังงานศักย์ของน้ำบาดาลในบ่อ ซึ่งหมายถึงระดับของน้ำบาดาลในบ่อหรือในไพโซมิเตอร์ที่สูงขึ้น เมื่อมีแรงต้านหรือมีสิ่งกีดขวาง ผลรวมของระดับความสูงของน้ำบาดาล จะเป็นผลรวมของ 2 องค์ประกอบปฐมภูมิ ได้แก่เฮดอันเนื่องมาจากการสูงจากระดับอ้างอิง หรือ datum (Elevation Head: z) และเฮดอันเนื่องมาจากแรงดันน้ำ (Pressure Head: ψ) ในกรณีน้ำบาดาลมักจะไม่รวมเฮดอันเนื่องมาจากความเร็ว (Velocity Head) ของการไหลของน้ำบาดาล (การไหลของน้ำบาดาลมักจะไหลแบบ laminar flow คือไหลแบบราบเรียบดังนั้นมักจะไม่ก่อให้เกิดแรงดันน้ำ – ผู้เขียน) (รูปที่ 1-16)

1.5.13 Hydrostratigraphic Unit (หน่วยหินทางอุทกธรณีวิทยา) หมายถึงหน่วยหิน หรือส่วนหนึ่งของหน่วยหิน หรือกลุ่มของหน่วยหิน ซึ่งสามารถแบ่งแยกได้ โดยใช้คุณลักษณะทางอุทกวิทยาที่คล้ายกัน (ชั้นหินให้น้ำ ชั้นหินต้านน้ำ ชั้นหินทึบน้ำ ต่างก็จัดเป็นหน่วยหินทางอุทกธรณีวิทยา ในหนึ่งหน่วยหินทางธรณีวิทยา เช่นตะกอนตะพักลำน้ำ อาจประกอบด้วยหน่วยหินทางอุทกธรณีวิทยาได้หลายหน่วย เช่นชั้นกรวดทราย ชั้นกรวดทรายปนดินเหนียว หรือชั้นดินเหนียว หรือหน่วยหินทางธรณีวิทยามากกว่าหนึ่งหน่วย อาจเป็นหน่วยหินทางอุทกธรณีวิทยาแค่หน่วยเดียวก็ได้ เช่นกัน – ผู้เขียน) (รูปที่ 1-17)

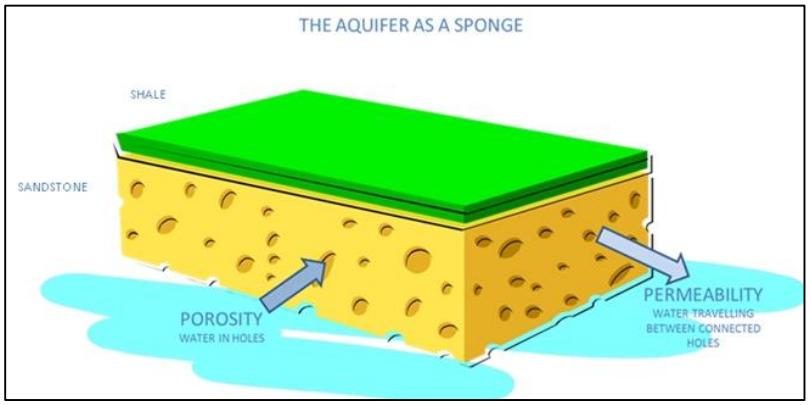


รูปที่ 1-16 แสดงเฮดของน้ำบาดาล ซึ่งเป็นผลรวมของเฮดอันเนื่องมาจากการสูงจากระดับอ้างอิง หรือ datum (Elevation Head: z) กับเฮดอันเนื่องมาจากแรงดันน้ำ (Pressure Head: ψ)



รูปที่ 1-17 ภาพบน แสดงหน่วยหินทางธรณีวิทยาที่แตกต่างกัน 2 หน่วย (Formation 1 และ Formation 2) ซ้อนทับกันในแนวดิ่ง และภาพล่างเมื่อจำแนกเป็นหน่วยหินทางอุทกธรณีวิทยา จะมี 2 หน่วยเช่นกัน แต่เป็น aquifer และ aquitard ต่อกันในแนวระนาบ

1.5.14 Permeability (k) (ความสามารถในการยอมให้น้ำซึมผ่าน) หมายถึงอัตราส่วนของค่าคงที่ที่มีความสามารถให้ของเหลวไหลผ่านของตัวกลางที่มีรูพรุน (รูปที่ 1-18 และ รูปที่ 1-19) ซึ่งเป็นอิทธิพลมาจากคุณลักษณะทางกายภาพของตัวกลางเพียงอย่างเดียว กล่าวคือค่าความสามารถในการยอมให้น้ำซึมผ่าน (permeability) จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความพรุนประสิทธิผล (effective porosity) Permeability มีหน่วยเป็น darcy หรือ millidarcy เพื่อเป็นเกียรติแก่ Dr. Henry Darcy วิศวกรชาวฝรั่งเศสที่ทดลองและสามารถอธิบายการไหลของของเหลวผ่านตัวกลางที่มีรูพรุน หน่วยตามระบบ SI (International System of Units) ของ permeability คือหน่วย m^2 หรือ cm^2



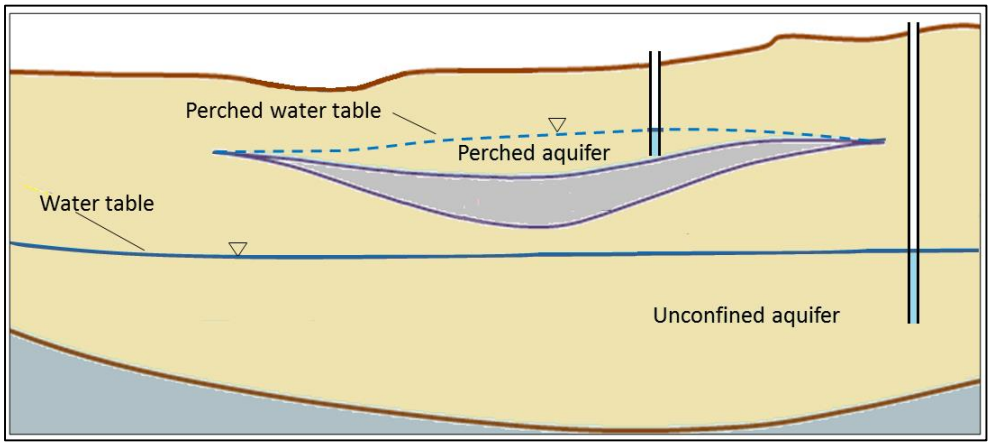
รูปที่ 1-18 แสดงแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่าง ความสามารถในการยอมให้น้ำซึมผ่านกับความพรุน (ภาพจาก http://www.acogok.org/water/groundwater-oklahoma/aquifer-and-rock-types/)

Permeability	Pervious				Semi-Pervious				Impervious			
Unconsolidated Sand & Gravel	Well Sorted Gravel		Well Sorted Sand or Sand & Gravel		Very Fine Sand, Silt, Loess, Loam							
Unconsolidated Clay & Organic					Peat		Layered Clay		Unweathered Clay			
Consolidated Rocks	Highly Fractured Rocks				Oil Reservoir Rocks			Fresh Sandstone		Fresh Limestone, Dolomite		Fresh Granite
κ (cm^2)	0.001	0.0001	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}	10^{-13}	10^{-14}	10^{-15}
κ (millidarcy)	10^{+8}	10^{+7}	10^{+6}	10^{+5}	10,000	1,000	100	10	1	0.1	0.01	0.001	0.0001

Source: modified from Bear, 1972

รูปที่ 1-19 แสดงค่าความสามารถในการยอมให้น้ำซึมผ่านของหินประเภทต่างๆ

1.5.15 Perched Aquifer (ชั้นหินให้น้ำปลอม) หมายถึงชั้นตะกอนร่วนของชั้นที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่ถูกแยกออกจากกันโดยชั้นดินเหนียวบางๆ และแผ่กระจายเป็นบริเวณแคบ ชั้นดินเหนียวนี้เมื่อถูกตะกอนร่วนด้านบนกดทับเป็นระยะเวลานานและหนาขึ้น ก็จะแอ่นตัวเหมือนถาด เมื่อน้ำฝนไหลซึมลงมาตามชั้นตะกอนร่วนเมื่อถึงชั้นดินเหนียวบางนี้ก็จะไหลลงต่อไปไม่ได้ ทำให้เกิดน้ำตกค้างอยู่บนตะกอนร่วนนี้ หากเจาะลงไปในบริเวณนี้ทำให้เราคิดว่าเราพบชั้นน้ำบาดาลแล้ว แต่เมื่อพัฒนาบ่อเสร็จ แล้วสูบน้ำใช้ไปสักพัก น้ำในบ่อก็จะแห้งลง น้ำที่ได้จากชั้นหินลักษณะนี้เรียกว่า น้ำบาดาลปลอม (perched groundwater) (รูปที่ 1-20) และระดับน้ำที่วัดในบ่อที่ก่อสร้างจากปรากฏการณ์แบบนี้จะเรียกว่าระดับน้ำบาดาลปลอม (perched water table) โดยทั่วไปจะพบชั้นน้ำบาดาลปลอมบริเวณพื้นที่ราบน้ำท่วมถึง (floodplain) ของแม่น้ำสายใหญ่ที่อยู่ในmature stage จนถึง old age stage เนื่องจากทางน้ำทั้ง 2 ระยะนี้มีการสร้างและพัฒนาที่ราบน้ำท่วมถึง (floodplain) มากกว่าทางน้ำระยะเริ่มแรก (youth stage) – ผู้เขียน



รูปที่ 1-20 ภาพแสดงชั้นหินให้น้ำปลอม (perched aquifer) และระดับน้ำบาดาลปลอม (perched water table)

1.5.16 Porosity (*n*) (ความพรุน) หมายถึงอัตราส่วนของช่องว่างต่อปริมาตรทั้งหมดของดินหรือหิน มีสูตรการคำนวณคือ

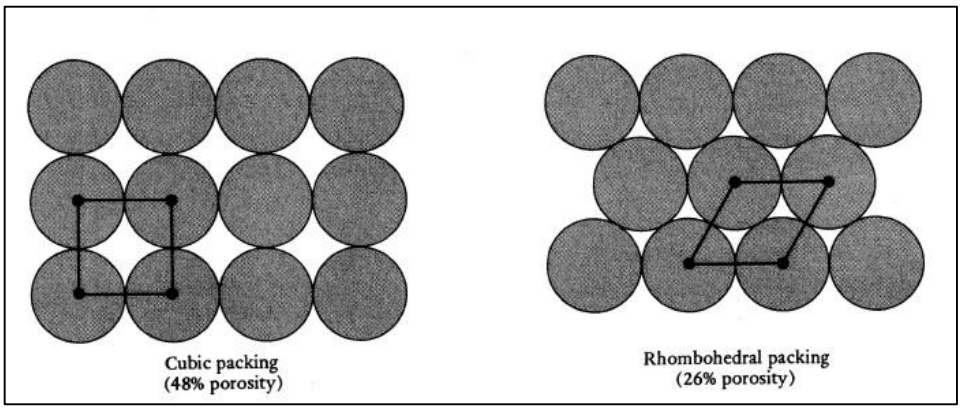
$$n = V_V / V_T$$

เมื่อ n คือความพรุน (porosity) V_V หมายถึงปริมาตรของช่องว่าง (void-space volume) ของวัตถุ และ V_T หมายถึงปริมาตรทั้งหมดของวัตถุ (total volume) ความพรุนในหินสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 แบบ คือ ความพรุนปฐมภูมิ (primary porosity) และความพรุนทุติยภูมิ (secondary porosity) ซึ่งมีความแตกต่างกัน (รูปที่ 1-21) ดังนี้

ความพรุนปฐมภูมิ (primary porosity) หมายถึงความพรุนหรือช่องว่างระหว่างเม็ดตะกอนซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกับการสะสมตัวของตะกอน (primary interstice) ได้แก่ช่องว่างระหว่างเม็ดกรวด ทราย ทรายแป้งในหินตะกอนร่วนที่เกิดตามที่ราบลุ่มน้ำท่วมถึง (floodplain) ตะกอนทางน้ำ (alluvial deposit) เป็นต้น แม้กระทั่งช่องว่างที่หลงเหลือจากการสมานตัว (cementation) โดยสารละลายต่างๆ ที่ไหลเข้ามาในตะกอนร่วนเช่นสารละลายซิลิกา สารละลายเหล็ก ช่องว่างที่หลงเหลือจากการเชื่อมประสานในหินที่เกิดจากการแข็งตัวของตะกอยร่วนเช่นหินทราย หินทรายแป้ง หินกรวดมน ก็ยังจัดอยู่ในกลุ่มความพรุนปฐมภูมิ หรือแม้กระทั่งความพรุนในเม็ดกรวดที่เป็นหินทรายก็จัดเป็นความพรุนปฐมภูมิเช่นกัน

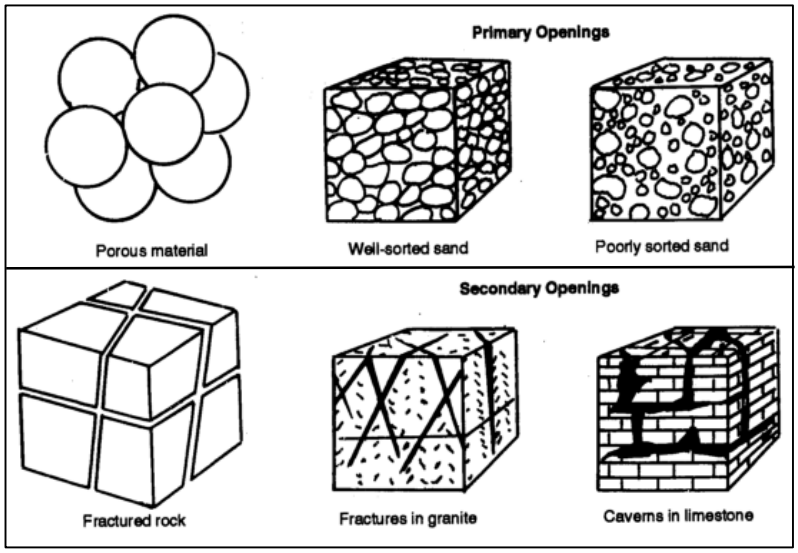
ความพรุนทุติยภูมิ (secondary porosity) หมายถึงความพรุนที่เกิดขึ้นมาภายหลังจากการเกิดเป็นหินแข็ง (consolidated rock) แล้ว เนื่องจากกระบวกการทางเทคโทนิค ซึ่งได้แก่การชนกัน เลื่อนออกจากกันของเปลือกโลก การเกิดปรากฏการณ์แผ่นดินไหว ภูเขาไฟระเบิด เป็นต้น ปรากฏการณ์เหล่านี้ทำให้เกิดรอยแตก รอยแยกในหินเดิมทำให้มีช่องว่างในหินมากขึ้น เรียกว่าช่องว่างทุติยภูมิ (secondary interstice) และความพรุนที่เกิดขึ้นภายหลังนี้เรียกว่า ความพรุนทุติยภูมิ และหากในหน่วยหินมีทั้งความพรุนปฐมภูมิเกิดร่วมกับความพรุนทุติยภูมิ จะเรียกว่า**ความพรุนแบบสองส่วน (dual porosity)** ความพรุนทุติยภูมิอีกแบบหนึ่งซึ่งพบได้เสมอในหินที่เป็นหินคาร์บอเนต เช่นหินปูน หินโดโลไมต์ ได้แก่ความพรุนที่เกิดจากการถูกละลาย (dissolution) ของเนื้อหินเดิมโดยน้ำฝนหรือน้ำบาดาลที่มีสภาพเป็นกรด เริ่มต้นจากโพรงเล็กๆ แล้วก็ขยายใหญ่ขึ้นจนถึงขนาดเป็นถ้ำน้ำใต้ดิน รอยต่อระหว่างชั้นหิน (bedding planes) ซึ่งเกิดจากการที่ตะกอนที่มีเนื้อต่างกันถูกทำให้กลายเป็นหิน จะมีรอยต่อที่เป็นช่องว่างระหว่างหินต่างชนิดกัน ก็จัดเป็นความพรุนทุติยภูมิ

เช่นเดียวกัน (รูปที่ 1-22) ปัจจัย (factors) ที่ควบคุมปริมาณและขนาดของความพรุนมีอยู่หลายประการสำหรับในหินตะกอน ปัจจัยที่สำคัญได้แก่การคัดขนาด (sorting) ของเม็ดตะกอน รูปร่างและการเรียงตัวของเม็ดตะกอน (shape and orientation) ของเม็ดตะกอน การกดทับ (compaction) และการเชื่อมประสาน (cementation)



(ก) **(ข)**

รูปที่ 1-21 แสดงร้อยละของความพรุนของตะกอนเมื่อ (ก) วางตัวซ้อนทับกันรูปลูกบาศก์ (cubic packing) และ (ข) วางตัวซ้อนทับกันรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน (rhombohedral packing)

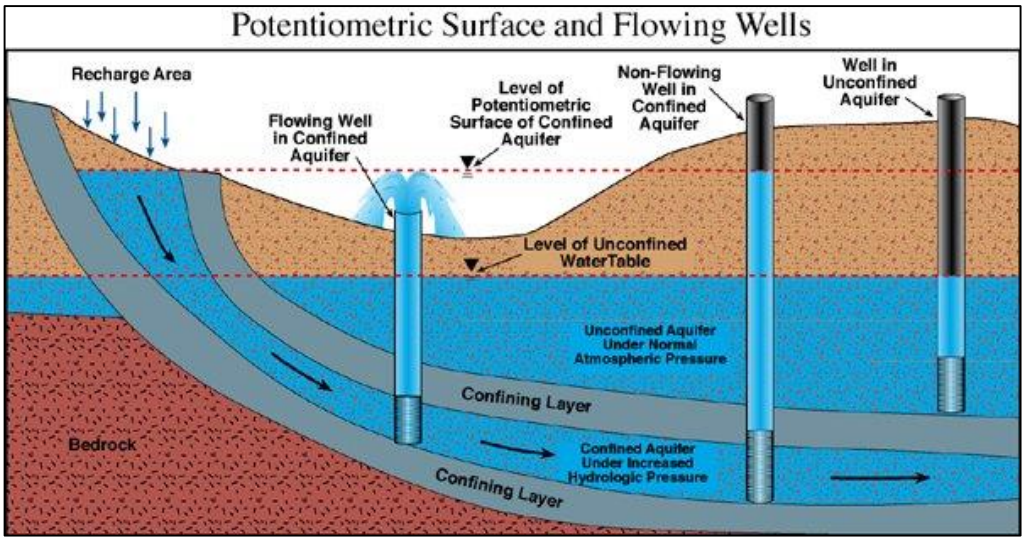


รูปที่ 1-22 ภาพบนแสดงช่องว่างแบบปฐมภูมิ (primary openings) ภาพบนซ้ายเป็นช่องว่างในหินเนื้อพรุน (porous media) ภาพบนกลางช่องว่างในทรายที่มีการคัดขนาดดี (well-sorted sand) ภาพบนขวาช่องว่างในทรายที่มีการคัดขนาดไม่ดี (poorly sorted sand) และภาพล่างแสดงช่องว่างทุติยภูมิ (secondary openings) ภาพล่างซ้ายเป็นรอยแตกในหิน (fractured rock) ภาพล่างกลางเป็นรอยแตกในหินแกรนิต (fractured granite) และภาพล่างซ้ายเป็นโพรงถ้ำในหินปูน (caverns in limestone)

1.5.17 Potentiometric Surface (ระดับผิวแรงดันน้ำ) หมายถึงระดับน้ำบาดาลที่ลากโยงจากระดับน้ำบาดาลจากแต่ละบ่อหรือระดับน้ำใน Piezometer ที่ก่อสร้างและติดตั้งในชั้นหินอุ้มน้ำเดียวกัน ซึ่งจะช่วยบ่งบอกถึงระดับน้ำบาดาลที่จะสูงขึ้นถึงระดับไหนหากเจาะและพัฒนาบ่อน้ำบาดาลในชั้นหินอุ้มน้ำนั้น มักจะใช้กับระดับน้ำในบ่อที่ติดตั้งในชั้นหินอุ้มน้ำแบบมีแรงดัน (confined aquifer) (รูปที่ 1-23)

1.5.18 Saturated Zone (แถบอิ่มตัวด้วยน้ำ) หมายถึงแถบที่อยู่ใต้ดินที่ความพรุนทั้งหมดอิ่มตัวด้วยน้ำ (รูปที่ 1-11)

1.5.19 Specific Capacity; S_c (ประสิทธิภาพการจ่ายน้ำจำเพาะ) หมายถึงปริมาณน้ำที่สูบได้จากบ่อน้ำบาดาล (Q) ต่อระยะน้ำลด (drawdown; s) หนึ่งหน่วย โดยปกติจะแสดงในหน่วยของอัตราการไหลของน้ำบาดาล (discharge rate; L^3/T) ต่อหน่วยความยาว (L) ดังนั้นหน่วยจึงเป็นพื้นที่ (L^2) ต่อเวลา (T)



รูปที่ 1-23 ภาพแสดงระดับน้ำบาดาลในบ่อน้ำบาดาลจากชั้นหินให้น้ำไร้แรงดัน (Unconfined หรือ water-table aquifer) ซึ่งระดับน้ำบาดาลปกติ (static water level) ในบ่อจะอยู่ระดับเดียวกับระดับน้ำบาดาล (water table) และผิวแรงดันน้ำ (potentiometric surface) ของบ่อน้ำบาดาลที่เจาะในชั้นหินให้น้ำภายใต้แรงดัน (Confined aquifer) ระดับน้ำในบ่อน้ำบาดาลจะอยู่สูงกว่าระดับชั้นหินให้น้ำ หากระดับปากบ่ออยู่ต่ำกว่าระดับผิวแรงดัน บ่อน้ำบาดาลนั้นจะเรียกว่าบ่อน้ำบาดาลพุ (Flowing artesian well)

1.5.20 Specific Retention; S_r (การดูดค้างจำเพาะ) หมายถึงปริมาณน้ำที่หลงเหลืออยู่ในวัตถุตัวกลางที่เป็นรูพรุน (porous media) เมื่อได้ปล่อยให้น้ำไหลออกจากวัตถุตัวกลางที่เป็นรูพรุนอย่างอิสระโดยแรงโน้มถ่วงของโลกไปแล้ว ผลรวมการดูดค้างจำเพาะ (S_r) และประสิทธิภาพการจ่ายน้ำจำเพาะ (Specific yield; S_y) จะเท่ากับความพรุนทั้งหมด (total porosity) ของวัตถุตัวกลาง

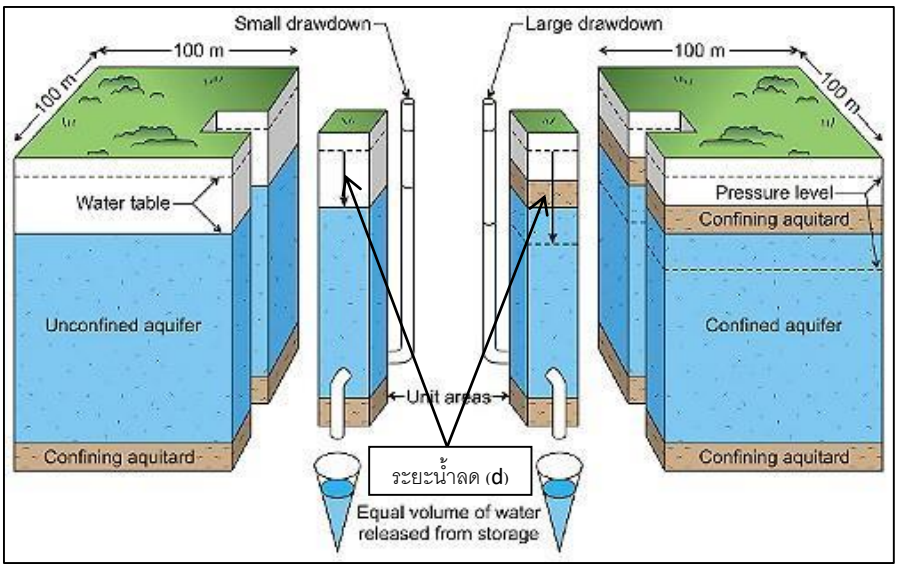
1.5.21 Specific Storage; S_s (การกักเก็บจำเพาะ) หมายถึงปริมาณน้ำต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรอิ่มตัวของหน่วยหิน (unit volume of saturated formation) ที่สามารถกักเก็บหรือระบายออกไปเมื่อเฮดน้ำ

บาดาลเปลี่ยนไปหนึ่งหน่วย อันเป็นผลสืบเนื่องมาจากโครงสร้างส่วนที่เป็นของแข็ง (skeleton) ของชั้นหินให้น้ำและแรงอัดตัวของน้ำ (compressibility of water)

1.5.22 Specific Yield; S_y (ปริมาตรการให้น้ำจำเพาะ) หมายถึงปริมาตรของน้ำที่ถูกระบายออกมาจากตัวกลางที่มีรูพรุนโดยอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของโลก จะมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของน้ำที่ระบายออกมาต่อปริมาตรทั้งหมดของวัตถุตัวกลาง

1.5.23 Static Water Level; S.W.L. (ระดับน้ำปกติ) หมายถึงระดับของน้ำในบ่อน้ำบาดาลที่เจาะและติดตั้งในชั้นหินอุ้มน้ำแบบไร้แรงดันในขณะที่ไม่ได้มีการสูบน้ำ

1.5.24 Storativity (*S*) สัมประสิทธิ์การกักเก็บ (Storativity) หมายถึงปริมาตรของน้ำที่สามารถสูบออกมาได้หรือเติมเข้าไปเก็บกักได้ในหน่วยหินต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เมื่อระดับน้ำเปลี่ยนไปหนึ่งหน่วย สำหรับในชั้นหินอุ้มน้ำไร้แรงดัน (จะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป) สัมประสิทธิ์การกักเก็บจะมีค่าเท่ากับความสามารถในการจ่ายน้ำจำเพาะของบ่อน้ำบาดาล (Specific Yield: S_y) ซึ่งก็คือปริมาณน้ำที่ระบายออกมาจากตัวกลางเนื้อพรุน (porous media) โดยอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของโลก กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คืออัตราส่วนของปริมาณน้ำที่ระบายออกมาจากตัวกลางเนื้อพรุนเมื่อเทียบกับปริมาตรทั้งหมดของตัวกลาง และในชั้นหินอุ้มน้ำภายใต้แรงดัน (Confined aquifer) (จะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป) จะมีค่าเท่ากับความสามารถในการจ่ายน้ำจำเพาะของบ่อน้ำบาดาล (S_s) คูณกับความหนาอิ่มตัว (Saturated thickness: b) ของชั้นหินให้น้ำ ($S_s b$)



รูปที่ 1-24 ภาพแสดงสัมประสิทธิ์การกักเก็บ (Storativity: S) ในชั้นหินให้น้ำ ภาพซ้าย ในชั้นหินให้น้ำภายใต้แรงดัน ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บมีค่าเท่ากับผลรวมของปริมาตรการให้น้ำจำเพาะ (Specific yield: S_y) กับผลคูณของการกักเก็บจำเพาะกับความหนาของชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำ ($S_s b$) ส่วนภาพขวาซึ่งแสดงค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บของชั้นหินให้น้ำแบบไร้แรงดัน ค่าค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บ จะมีค่าเท่ากับผลคูณของการกักเก็บจำเพาะกับความหนาของชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำ ($S_s b$) ในภาพจะเห็นว่าหากปริมาณน้ำที่ระบายออกมาจากทั้งชั้นหินให้น้ำไร้แรงดัน และชั้นหินให้น้ำมีแรงดันมีปริมาตรเท่ากัน ระยะน้ำลด (d) ในชั้นหินให้น้ำภายใต้แรงดัน (ภาพขวา) จะมีค่ามากกว่าในชั้นหินให้น้ำไร้แรงดัน (ภาพซ้าย) หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งได้คือหากให้ระยะน้ำลด (d) มีขนาดเท่ากัน ปริมาตรน้ำที่ระบายสู่กรวยทางภาพขวามือ จะน้อยกว่าปริมาตรน้ำที่ระบายสู่กรวยทางภาพซ้ายมือ

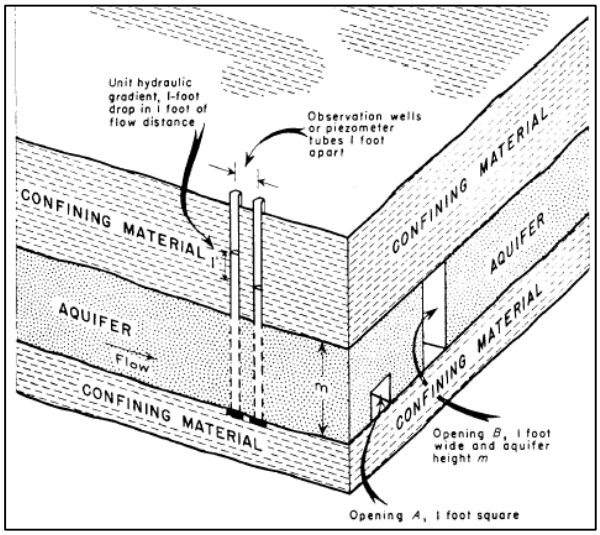
1.5.25 Transmisivity (สัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำ) หมายถึงปริมาณการไหลของน้ำในแนวราบผ่านพื้นที่หน้าตัดหนึ่งหน่วยตลอดความหนาของชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้ค่าความลาดทางชลศาสตร์ (Hydraulic gradient) 1 หน่วย (รูปที่ 1-25) สามารถคำนวณได้ตามสมการ ดังนี้

$$T = Kb$$

เมื่อ T หมายถึง สัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำ (Transmissivity หรือ Coefficient of Transmissibility) มีหน่วยเป็นปริมาตรต่อเวลา (L^3/T เช่น m^3/d)

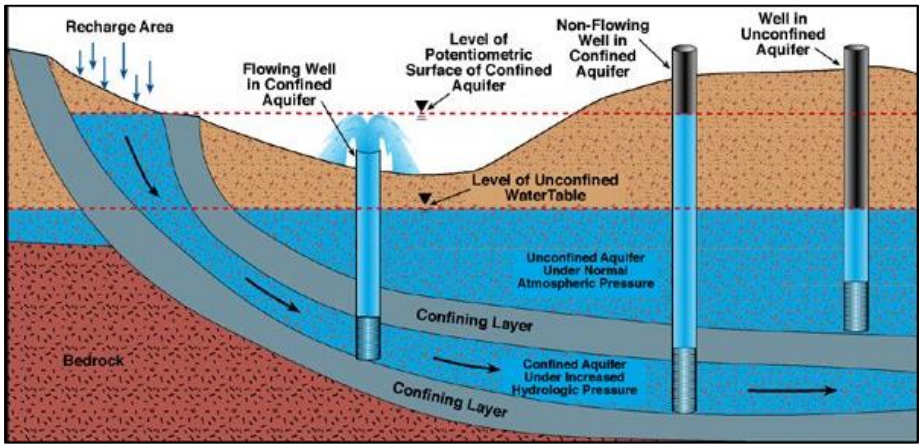
K หมายถึงค่าความนำทางชลศาสตร์ หรือสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic Conductivity / Coefficient of Permeability) มีหน่วยเป็นพื้นที่ต่อเวลา (L^2/T เช่น m^2/d)

b หมายถึงความหนาอิ่มตัวของชั้นหินให้น้ำ (saturated thickness of aquifer) หน่วยเป็นระยะทาง (L เช่น m)



รูปที่ 1-25 ภาพแสดงที่มาของค่าสัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำ (Transmissivity; T) ซึ่งเป็นผลคูณของค่าความนำทางชลศาสตร์ (K) ซึ่งเป็นค่าที่เป็นผลลัพธ์ของปริมาณน้ำ (Q) ที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด (A) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าลาดชลศาสตร์ (hydraulic gradient; *i*) หนึ่งหน่วยกับความหนาของชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำของชั้นหินให้น้ำ (saturated thickness of aquifer; b) ดังสมการ T = Kb

1.5.26 Unconfined Aquifer (ชั้นหินให้น้ำแบบไร้แรงดัน) หมายถึงชั้นหินให้น้ำที่มีน้ำกักเก็บอยู่บางส่วนซึ่งผิวด้านบนของส่วนที่อิ่มตัวด้วยน้ำจะมีระดับสูงขึ้นหรือลดลงอย่างอิสระ (เนื่องจากรับน้ำที่เติมโดยตรงจากน้ำที่ซึมลงมาสู่ชั้นหินให้น้ำในแนวดิ่ง-ผู้เขียน) บางครั้งเรียกว่า “ชั้นหินให้น้ำระดับน้ำบาดาล (Water-Table Aquifer)” (รูปที่ 1-26)



รูปที่ 1-26 ภาพแสดงหน่วยหินทางอุทกธรณีวิทยา (hydrostratigraphic units) ที่แสดงให้เห็นทั้งส่วนที่เป็นชั้นหินให้น้ำไร้แรงดัน (unconfined aquifer) ชั้นหินกั้นน้ำ (confining layer) และชั้นหินให้น้ำภายใต้แรงดัน (confined aquifer) ในภาพจะเห็นระดับน้ำบาดาล (water table) ซึ่งเป็นระดับน้ำบาดาลของชั้นหินให้น้ำไร้แรงดัน และระดับผิวแรงดันน้ำ (potentiometric surface) ซึ่งเป็นระดับน้ำของชั้นหินให้น้ำภายใต้แรงดัน

1.5.27 Unsaturated Zone (แถบไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ) หมายถึงส่วนแถบชั้นใต้ดินที่ช่องว่างในดินตะกอน หรือเศษหินมีน้ำกักเก็บอยู่เพียงบางส่วน เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าแถบสัมผัสกับอากาศ (vadose zone) (ดูรูปที่ 1.9)

1.5.28 Water Table (ระดับน้ำบาดาล) หมายถึงผิวบนสุดของแถบที่อิ่มตัวด้วยน้ำ – ระดับที่ระดับแรงดับน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำแบบไร้แรงดันมีค่าเท่ากับแรงดันบรรยากาศ ระดับน้ำบาดาลสามารถหาได้โดยการวัด (ดูรูปที่ 1-9 และรูปที่ 1-23)

1.5.29 Well Efficiency (ประสิทธิภาพของบ่อ) หมายถึงอัตราส่วนของระยะน้ำลด (drawdown) ตามทฤษฎี (ระยะน้ำลดในชั้นหินให้น้ำ ณ ตำแหน่งรัศมีของบ่อน้ำบาดาล) กับระยะน้ำลดที่วัดได้ในบ่อสูบ (pumping well) อัตราส่วนนี้จะบ่งบอกถึงการพัฒนาบ่อน้ำบาดาลที่ถูกต้องสมบูรณ์หรือไม่ หากพัฒนาบ่อน้ำบาดาลไม่ถูกต้องสมบูรณ์จะทำให้เกิดการสูญเสียภายในบ่อ (well loss)

1.5.30 Well Yield (ปริมาตรการให้น้ำของบ่อ) หมายถึงปริมาตรน้ำที่สูบหรือไหลอย่างอิสระจากบ่อน้ำบาดาลได้ต่อหน่วยเวลา มักจะถูกรายงานในรูปของอัตราการสูบ (Q) ในหน่วยของแกลลอนต่อนาที (gallon per minute: gpm) หรือลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง (m^3/hr) หรืออื่นๆ

1.6 ชนิดของชั้นหินให้น้ำจำแนกตามชนิดหิน (aquifers' types classified by rock types)

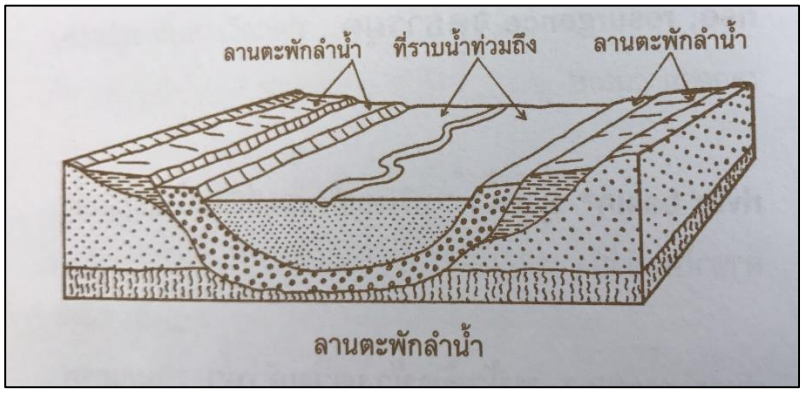
ชนิดของหินให้น้ำหรือหน่วยหินทางอุทกธรณีวิทยา (hydrostratigraphic unit) ในพื้นที่ใด ๆ แน่นอนว่าย่อมจะสอดคล้องกับหน่วยหินทางธรณีวิทยา (geologic unit) ที่เป็นประกอบขึ้นเป็นธรณีสัณฐานของพื้นที่นั้น ๆ ที่ผู้เขียนใช้คำว่า "ย่อมจะสอดคล้อง" นั้น หมายความว่าหลาย ๆ พื้นที่ที่เราไม่พบหน่อยหินทางธรณีวิทยาบริเวณพื้นผิว แต่หน่วยหินนั้นอาจเป็นหน่วยทางอุทกธรณีวิทยาก็ได้ ซึ่งอาจเกิดจากการหน่วยหินนั้นถูกปิดทับโดยกระบวนการทางตกทับถม (deposition) ที่เกิดขึ้นภายหลัง หรืออาจเกิดจากการแทรกดันตัวตัดเข้ามาในชั้นหินที่อยู่ใต้ดิน ในหัวข้อนี้ผู้เขียนจะแบ่งหน่วยหินทางธรณีวิทยาเป็น 2 ส่วน ได้แก่หินร่วน (unconsolidated rocks) และหินแข็ง (consolidated หรือ hard rocks) ดังต่อไปนี้

1.6.1 หินให้น้ำหินร่วน (unconsolidated aquifer) หรือบางครั้งก็เรียกว่าตะกอนที่ยังไม่แข็งตัว (unconsolidated sediment) หมายถึงเม็ดตะกอนที่จับตัวกันอย่างหลวม ๆ ไม่เป็นชั้น (unstratified) ชัดเจนนัก หรือยังไม่มีการเชื่อมประสาน (cementation) ระหว่างเม็ดตะกอน หมายรวมถึงตะกอนที่พบบนพื้นผิวดินและตะกอนที่ถูกปิดทับอยู่ใต้ผิวดิน (จาก Wikipedia) ตะกอนหินร่วนเกิดจากการพัดพามาสะสมตัวโดยทางน้ำ (fluviatile deposits) โดยลม (terrestrial หรือ eolian deposits) หรือถูกนำมาสะสมทับถมโดยแรงดึงดูดของโลก (gravitational sedimentation) ตะกอนร่วนหรือหินร่วนหรือตะกอนที่ยังไม่แข็งตัวในทางธรณีวิทยาสามารถจำแนกไดดังนี้

(1) **ตะกอนที่ราบน้ำท่วมถึง (floodplain deposits)** เกิดจากแม่น้ำล้นฝั่งในฤดูน้ำหลาก ตะกอนละเอียดจึงถูกพัดพาขึ้นมาสะสมตัวบนฝั่งอย่างต่อเนื่องและยาวนาน เกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ตะกอนส่วนใหญ่จะได้แก่ดินเหนียวเป็นชั้นหนา มีชั้นทรายแป้งที่เป็นชั้นบางแทรกสลับ บริเวณ

ใกล้ลำน้ำที่เคยมีทางน้ำโค้งตวัดไปถึงจะมีชั้นทรายหยาบปนกรวดละเอียดที่สะสมตัวในร่องน้ำเก่าแทรกสลับ หรืออาจแยกเป็นอีกหน่วยหนึ่งที่เรียกว่าตะกอนทางน้ำเก่า (abandoned channel deposits) หรืออาจเรียกรวมกันว่าตะกอนน้ำพา (fluvial deposits) ก็ได้ มักพบลักษณะโครงสร้างโครงสร้างเม็ดตะกอนที่เรียงจากใหญ่ขึ้นไปหาเล็ก (fining-upward sequence) (อ้างอิงจาก ธรณีวิทยาประเทศไทย, 2552) ตะกอนที่ราบน้ำท่วมถึงจะมีคุณลักษณะเป็นชั้นหินให้น้ำที่ดีเนื่องจากประกอบด้วยกรวดทรายเป็นส่วนใหญ่ สำหรับพื้นที่ในบริเวณที่มีดินเหนียวอยู่มากจะให้น้ำน้อยลงเนื่องจากเม็ดตะกอนดินเหนียวจะไปแทรกอยู่ในช่องว่างละหว่างเม็ดตะกอนที่เป็นกรวดทราย อย่างไรก็ตามตะกอนที่ราบน้ำท่วมถึงก็ถูกจัดเป็นหินตะกอนร่วนที่เป็นใช้หินให้น้ำที่ดีเนื่องจากมักจะอยู่ไม่ลึกจากผิวดิน มีความหนาพอสมควร (5-20 เมตร หรือมากกว่า) และระดับน้ำก็อยู่ไม่ลึกเช่นกัน เนื่องจากมักเป็นชั้นหินให้น้ำแบบไร้แรงดัน (จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป) ปริมาณน้ำที่พัดนาได้ มากกว่า 10 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง (ลบ.ม./ชม.) ในพื้นที่ลุ่มน้ำสายใหญ่อาจได้ปริมาณน้ำมากกว่า 50 ลบ.ม./ชม. (รูปที่ 1-27)

(2) **ตะกอนตะพักลำน้ำ (river terrace deposits)** เป็นตะกอนที่สะสมตัวตามลักษณะลานตะพักด้านข้างของตะกอนในที่ราบลุ่มน้ำท่วมถึง (floodplain) ขนานกันไปกับทางน้ำ จะมีลักษณะภูมิประเทศคล้ายขั้นบันได้ยาว จะมีขอบด้านที่หันเข้าหาทางน้ำที่มีความชันมากมีความสูงจากท้องน้ำปัจจุบัน (recent riverbed) และที่ราบลุ่มน้ำท่วมถึงของสองฝั่งแม่น้ำค่อนข้างมาก เกิดจากกระบวนการการยกตัวของท้องน้ำในอดีต ทำให้ท้องน้ำเดิมสูงขึ้นจากระดับ base level (ระดับการกัดเซาะต่ำสุดของระบบทางน้ำ) มากขึ้นเราเรียกแม่น้ำลักษณะนี้ว่าแม่น้ำคืนพลัง (rejuvenated river) แม่น้ำจึงมีความสามารถกัดเซาะในแนวดิ่งมากขึ้น (renewed down-cutting) จึงทำให้เกิดตะกอนที่ราบลุ่มสองฝั่งแม่น้ำใหม่ขึ้นมา ส่วนตะกอนที่ราบลุ่มสองฝั่งแม่น้ำอันเดิมจะกลายสภาพเป็นตะกอนตะพักลำน้ำ และการคืนพลังของแม่น้ำสามารถเกิดได้อยู่เสมอตราบใดที่ยังมีการยกตัวของเปลือกโลก ดังนั้นเรามักจะพบตะกอนตะพักลำน้ำหลายระดับ ทางน้ำตะพักลำน้ำที่เกิดก่อน ก็จะเรียกว่าตะกอนตะพักลำน้ำเก่า (old terrace) หรือบางครั้งเรียกว่าตะกอนตะพักลำน้ำสูง (high terrace) ส่วนตะกอนตะพักลำน้ำที่เกิดทีหลังก็จะเรียกว่า ตะกอนตะพักลำน้ำใหม่ (young terrace) หรือบางครั้งจะเรียกว่า ตะกอนตะพักลำน้ำต่ำ (low terrace) (ข้อมูลจาก Wikipedia และผู้เขียน) ลักษณะตะกอนก็จะประกอบด้วยชั้นของกรวด ทราย ทรายแป้งและดินเหนียว เช่นเดียวกับที่พบตามที่ราบลุ่มน้ำท่วมถึง ตะกอนตะพักลำน้ำจะมีคุณลักษณะเป็นชั้นหินให้น้ำที่ดีเนื่องจากประกอบด้วยกรวดทรายเป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นหินให้น้ำจะอยู่ลึกกว่าตะกอนที่ราบน้ำท่วมถึง และจะมีคุณลักษณะเป็นชั้นหินให้น้ำที่ดีเนื่องจากประกอบด้วยกรวดทรายเป็นส่วนใหญ่ มีความหนาพอสมควร (20-50 เมตร หรือมากกว่า) และเนื่องจากมักเป็นชั้นหินให้น้ำแบบมีแรงดัน (จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป) ระดับน้ำก็ขึ้นอยู่กับระดับผิวแรงดัน (potentiometric surface) ปริมาณน้ำที่พัดนาได้ มากกว่า 10 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง (ลบ.ม./ชม.) ในพื้นที่ลุ่มน้ำสายใหญ่ อาจได้ปริมาณน้ำมากกว่า 50 ลบ.ม./ชม. (รูปที่ 1-28)

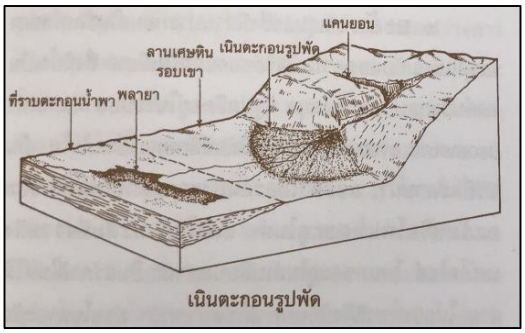


รูปที่ 1-27 ภาพตัดขวางแสดงลักษณะการสะสมตัวของตะกอนร่วนที่สะสมตัวตามที่ราบลุ่มน้ำท่วมถึงและลานตะพักลำน้ำ (ภาพจาก พจนานุกรม ศัพท์ธรณีวิทยา, 2544)

รูปที่ 1-28 ภาพซ้ายแสดงลักษณะตะกอนตะพักลำน้ำต่ำ บริเวณบ้านสันปูเลย อ.สันป่าตอง จ.เชียงใหม่ ภาพขวาแสดงลักษณะลานตะพักลำน้ำสูง บริเวณบ้านห้วยส้ม ข้างวัดป่าอรัญวิเวก อ.แม่ริม จ.เชียงใหม่ เมตร (ภาพจาก ธรณีวิทยาประเทศไทย, กรมทรัพยากรธรณี, 2552)

(3) ตะกอนที่สะสมตัวโดยเนินตะกอนรูปพัด (alluvial fan deposits) เป็นตะกอนที่เกิดจากการที่ทางน้ำเปลี่ยนระดับของการไหลจากหุบเขาสูงชั้น ลงสู่ที่ราบซึ่งเมื่อความลาดชันของร่องน้ำลดลง ความสามารถในการนำพาตะกอนก็จะลดลงด้วย ตะกอนที่ถูกพัดพามาก็จะสะสมตัวในลักษณะแผ่กระจายออกด้านข้างคล้ายรูปพัด ตะกอนที่มีขนาดใหญ่กว่า จะตกอยู่ใกล้กับจุดยอดของกรวยพัด (apex) ส่วนตะกอนที่มีขนาดละเอียดกว่าจะตกสะสมตัวไกลออกไป ตะกอนประกอบด้วยชั้นทรายสลับกับชั้นกรวดและดินเหนียว มีการคัดขนาดปานกลาง มีสีน้ำตาลและน้ำตาลปนเทา มักแสดงลักษณะโครงสร้างชั้นตะกอนแบบเรียงขนาดจากเล็กขึ้นไปใหญ่ (coarsening upward sequence) ตะกอนหน่วยนี้ไม่หนามากนัก ประมาณ 5-20 เมตร และครอบคลุมพื้นที่ไม่กว้างขวาง (เรียบเรียงจาก พจนานุกรมศัพท์ธรณีวิทยา, 2544 และ Wikipedia) เนื่องจากเนินตะกอนรูปพัดจะมีคุณลักษณะเป็นชั้นหินที่มีการซ้อนกันของตะกอนหลากหลายขนาดแบบเรียงขนาดจากเล็กขึ้นไปใหญ่ ดังนั้นการคละขนาดจึงไม่ดี ดังนั้นความต่อเนื่องของรูพรุนจึงมีน้อยกว่าตะกอนที่สะสมตัวหรือเคยสะสมตัวตามที่ราบ จึงไม่ใช่แหล่งน้ำบาดาลในหินร่วนที่ดีมากนัก

อย่างไรก็ตามอาจสามารถพัฒนาน้ำบาดาลได้จากเนินตะกอนรูปพัดในอัตรา 5-10 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง (รูปที่ 1-29)



รูปที่ 1-29 ภาพซ้ายแสดงลักษณะการเกิดเนินตะกอนรูปพัดของระบบทางน้ำ และภาพขวาแสดงภาพถ่ายจากของจริงของเนินตะกอนรูปพัด (ภาพจาก พจนานุกรมศัพท์ธรณีวิทยา, 2544 และจากอินเทอร์เน็ต)

(4) ตะกอนน้ำพา (alluvial deposits หรือ alluvium) เกิดจากการที่น้ำพัดพาเอากรวด หิน ดิน ทรายไปสะสมตัวกัน ณ บริเวณใด บริเวณหนึ่งอย่างไม่เป็นระบบ มีอิทธิพลของความลาดชันและน้ำผิวดินเข้ามามีส่วนเกี่ยวข้องบ้าง จึงได้ตะกอนหลากชนิดปนกัน ในบริเวณที่ห่างลำน้ำออกไปใกล้กับเนินตะกอนจะเป็นชั้นทรายสลับดินเหนียว มีกรวดละเอียดและลูกรังปนบ้างในบางชั้น การคัดขนาด (sorting) ของตะกอนไม่ค่อยดี บางครั้งจะเห็นการเปลี่ยนแปลงในแนวดิ่ง (vertical variation) อย่างรวดเร็ว ความหนาของตะกอนร่วนชุดนี้ประมาณ 5-20 เมตร (อ้างอิงจากธรณีวิทยาประเทศไทย, 2552) ตะกอนน้ำพาจะเป็นชั้นหินร่วนที่ให้น้ำที่ไม่ค่อยดีนักเนื่องจากประกอบด้วยกรวด ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียวคละกันเป็นส่วนใหญ่ ถึงแม้จะมีความหนาพอสมควร แต่การคัดขนาดจะไม่ดี (poorly sorted) ดังนั้นการเชื่อมต่อของรูพรุนในชั้นหินจะไม่ค่อยดี ความพรุนประสิทธิผล (effective porosity) จะต่ำ การจ่ายน้ำจะน้อย ในบางแห่งอาจให้น้ำน้อยกว่า 5 ลบ.ม./ชม.

(5) ตะกอนทรายชายหาด (beach sand deposits) เป็นตะกอนที่สะสมตัวกันบริเวณชายหาดริมฝั่งทะเล โดยตะกอนอาจจะมาจากสิ่งที่แม่น้ำพัดพามาตกจมบริเวณดินดอนสามเหลี่ยมปากแม่น้ำแล้วถูกกระแสน้ำทะเลชายหาด (long-shore current) พัดพาให้มาอยู่ตามชายหาด และอาจเป็นตะกอนที่เกิดจากที่คลื่นกัดเซาะให้หินบริเวณชายฝั่งทะเลพังทลายกลายเป็นเม็ดตะกอน ความกว้างของทรายชายหาดมักจะอยู่ระหว่างระยะน้ำขึ้นสูงสุด (high tide) และระยะน้ำลงต่ำสุด (low tide) หรือเรียกว่าที่ราบระหว่างน้ำขึ้น-น้ำลง (tidal flat) ขนาดของเม็ดตะกอนจะอยู่ระหว่างทรายละเอียด (fine sand) ถึงเม็ดปานกลาง (medium sand) ตะกอนทรายชายหาดบางครั้งอาจเรียกรวมถึงสันทรายชายหาด (sand dune) ซึ่งสะสมตัวกันโดยอิทธิพลของลมบก-ลมทะเล (eolian deposits) ขนาดตัวไปกับแนวชายฝั่งทะเล ด้วยเช่นกัน ตะกอนทรายชายหาดจะมีขนาดละเอียดจนถึงขนาดปานกลาง มีการคัดขนาดและความกลมมนดี (well sorted and rounded) เนื่องจากถูกขึ้นซัดไปมาอยู่ระหว่างที่ราบลุ่มน้ำขึ้น-น้ำลง (tidal flat) น้ำบาดาลระดับตื้นส่วนบนจะเป็นน้ำจืด แต่เนื่องจากอยู่ติดชายฝั่งทะเล จึงมีลิ่มน้ำเค็ม (seawater intrusion wedge) วางตัวอยู่ใต้น้ำ

จืด การพัฒนาบ่อน้ำบาดาลในบริเวณชายฝั่งทะเล มักจะใช้รูปแบบการก่อสร้างแบบบ่อแนวนอน (horizontal collection well) ปริมาณการให้น้ำอาจมากกว่า 20 ลบ.ม./ชม. (รูปที่ 1-30)

(6) ตะกอนเศษหินเชิงเขา (colluvial deposits หรือ colluvium) เกิดจากการผุพังของหินเดิมที่ประกอบเป็นภูเขา อาจเกิดอยู่กับที่หรือว่าถูกพัดพาไปไม่ไกลนัก พบตามเชิงเขาหรือขอบแอ่ง ตะกอนประกอบด้วยดินเหนียวปนกับเศษหินขนาดต่างๆ ที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยม (angular) การคัดขนาดไม่ดี (poorly sorted) บางบริเวณตะกอนชุดนี้จะวางปิดทับบนชั้นหินเดิมที่มีการผุพังอยู่กับที่ (residual deposit) และมีกระบวนการเกิดศิลาแลง (lateritization) ทำให้ได้ชั้นดินแลง (lateritic soil) แข็ง ตะกอนเศษหินเชิงเขามีความหนาระหว่าง 5-20 เมตร (อ้างอิงจาก ธรณีวิทยาประเทศไทย, 2552) เนื่องจากตะกอนเศษหินเชิงเขามีการคัดขนาดไม่ค่อยดี หรือมีชั้นศิลาแลงที่เกิดขึ้นภายหลังมาปิดกันการไหลลงของน้ำที่ซึมลงมา ตะกอนเศษหินเชิงเขาจึงเป็นหินตะกอนร่วนที่มีศักยภาพต่ำกว่าหินตะกอนร่วนประเภทอื่นๆ (รูปที่ 1-31)

รูปที่ 1-30 ภาพซ้ายแสดงลักษณะการสะตะกอนแบบทรายชายหาด (beach sand deposit) และภาพขวาลักษณะของสันทรายชายหาด (sand dune deposit) (ภาพประกอบจากอินเทอร์เน็ต)

รูปที่ 1-31 ภาพแสดงตะกอนเศษหินเชิงเขา (colluvial deposits) บริเวณบ่อดินสมชาย บ้านดงอ้อม อำเภอสันป่าตอง จังหวัดเชียงใหม่ (ภาพจาก ธรณีวิทยาประเทศไทย, 2552)

1.6.2 หินให้น้ำหินแข็ง (consolidated or hard-rock aquifers) เป็นได้ทั้งหินที่เกิดจากการเย็นตัวของหินหนืด (magma) ใต้เปลือกโลก หินที่เกิดจากการเย็นตัวของธารลาวา (lava flow) บนเปลือกโลก หินที่เกิดจากการตกทับถมของตะกอนภูเขาไฟ หินที่เกิดจากการเชื่อมประสาน (cementing) และการกดทับ (compaction) ของหินตะกอนร่วน หินที่เกิดจากการตกตะกอนทางเคมี (chemical deposition) เช่นหินคาร์บอเนต หินเกลือระเหย (evaporites) หรือหินที่เกิดจากการแปรสภาพ (metamorphism) ของหินเดิมที่เป็นหินอัคนี หินตะกอน และแม้กระทั่งหินที่เป็นหินแปรอยู่แต่เดิมแล้ว น้ำบาดาลที่อยู่ในหินแข็งสามารถพบได้ในช่องว่างระหว่างเม็ดตะกอนเดิม (ก่อนถูกเชื่อมประสานและกดทับจนกลายเป็นหิน) รอยแตก (fractures) รอยแยก (joints) รอยต่อระหว่างชั้นหิน (bedding planes) โพรงถ้ำที่เกิดจากการละลาย (solution caverns) เป็นต้น หินแข็งที่เป็นหน่วยหินทางอุทกธรณีวิทยามีดังนี้

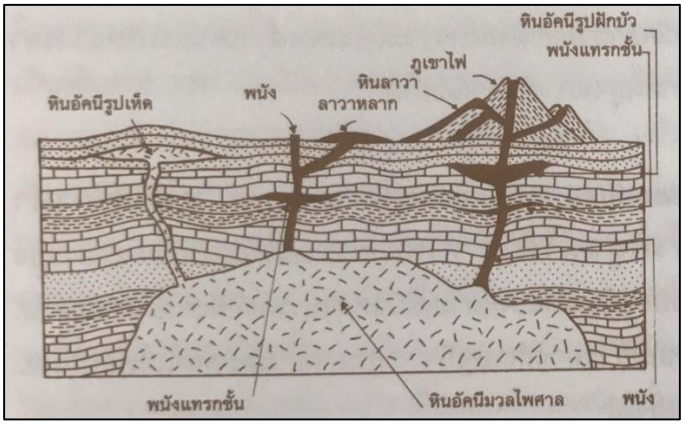
(1) หินอัคนี (Igneous aquifer) หินอัคนีจะจำแนกออกเป็น 2 ประเภทตามที่อยู่ของการเย็นตัวหรือแข็งตัวกลายเป็นหิน ได้แก่หินอัคนีที่เย็นตัวภายใต้เปลือกโลก หรือบางครั้งเรียกว่า หินอัคนีแทรกซอน (intrusive igneous rocks) และเย็นตัวนอกเปลือกโลกหรือบางครั้งเรียกว่า หินอัคนีพุ (extrusive igneous/volcanic rocks) หินอัคนีแทรกซอน เป็นได้ทั้งหินอัคนีระดับลึก (plutonic/abyssal rock) ซึ่งหมายถึงหินหินอัคนีที่เกิดในระดับลึกโดยการตกผลึกจากหินหนืด (magma) มีลักษณะเฉพาะคือเม็ดแร่มีขนาดกลางถึงขนาดหยาบ (ตั้งแต่ 1 มิลลิเมตร ขึ้นไป) และมีลักษณะของหินเป็นแบบหินแกรนิต และหินอัคนีระดับตื้น (hypabyssal rock) มักเกิดในรูปแบบของพนัง (dyke) และพนังแทรกชั้น (sill) สำหรับหินอัคนีพุ นั้น เกิดจากหินที่เย็นตัวนอกเปลือกโลกที่อาจมาจากการระเบิดของภูเขาไฟ (volcanic eruption) การประทุตามรอยแตก (fissure eruption) แล้วไหลหลากเป็นธารลาวา (lava flow) เนื่องจากหินมีเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ผลึกจึงมีขนาดละเอียด เช่นหินบะซอลต์ (basalt) หินไรโอไลต์ (rhyolite) หินแอนดีไซต์ (andesite) หรือเป็นเนื้อแก้ว เช่นหินออบสิเดียน (obsidian) (ข้อมูลจากพจนานุกรมศัพท์ธรณีวิทยา, 2544)

ชนิดของหินอัคนีที่เย็นตัวใต้เปลือกโลก หากเป็นมวลขนาดใหญ่ พื้นที่มากกว่า 100 ตารางกิโลเมตร และมีรากหยั่งลึกลงไปจนไม่สามารถกำหนดได้จะเรียกว่าหินอัคนีมวลไพศาล (batholith) หากแทรกชั้นลักษณะคล้ายรูปเห็ด จะเรียกว่าหินอัคนีรูปเห็ด (laccolith) หากเป็นรูปร่างคล้ายฝักบัว จะเรียกว่าหินอัคนีรูปฝักบัว (lopolith) หากแทรกเข้าไปตามรอยต่อระหว่างชั้นหินจะเรียกว่า พนังแทรกชั้น (sill) หากแทรกตัดเข้าไปในหินที่เกิดก่อน จะเรียกว่า พนัง (dike/dyke) ตัวอย่างของหินอัคนีระดับลึกได้แก่หินแกรนิต (granite) หินไดออไรต์ (diorite) หินแกบโบร (gabbro) หินดูไนต์ (dunite) หินเพกมาไทต์ (pegmatite) หินที่กล่าวมาจะแสดงรูปผลึกที่ชัดเจน ผลึกมีขนาดหยาบ เนื่องจากมีระยะเวลาในการพัฒนาตัวเองเป็นผลึกที่ค่อนข้างยาวนาน (มีการเย็นตัวอย่างช้า ๆ) (รูปที่ 1-32)

น้ำบาดาลในหินอัคนีที่เย็นตัวใต้เปลือกโลก จะพบตามบริเวณรอยแตก รอยแยกที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกหลังจากที่เกิดเป็นหินแข็งแล้ว หรือบริเวณที่เป็นหินผุ ที่เกิดจากการผุพัง (weathering) โดยมีน้ำบาดาลเป็นตัวการ กรณีนี้เกิดขึ้นได้เมื่อเมื่อผิวหน้าของหินถูกน้ำไหลผ่านเป็นระยะเวลานาน แร่ประกอบหินต่างๆ เช่นแร่เฟลด์สปาร์จะผุกร่อนแล้วถูกน้ำชะออกไป เหลือแต่เม็ดแร่ควอตซ์สะสมตัวกันอยู่กับที่ เรียกว่าหินแกรนิตผุ (weathered granite/granite washed) และเป็นที่กักเก็บน้ำบาดาลที่ดีอันหนึ่ง รอยแยกหรือรอยแตกอีกประเภทหนึ่งซึ่งมักพบในแนวสัมผัสของมวลหินอัคนีระดับลึกที่เมื่อแข็งตัวกลายเป็นหินแล้ว อาจถูกแรงทางเทคโทนิค

ดันตัวขึ้นมาใกล้กับผิวโลก หรือพ้นผิวโลก แรงดันมหาศาลที่เคยกดทับอยู่จะปลดปล่อยออกไป "แนวแตกมักเกิดจากการยกตัวของพื้นที่ที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนนำเอาหินด้านบนแตกหลุดออกไปแล้วยังผลให้เกิดการลดแรงกดทับทำให้หินด้านล่างเกิดการดึงขยายตัวออกไปทางด้านข้าง แนวแตกที่เกิดสัมพันธ์กับการที่สิ่งปิดทับด้านบนถูกนำออกไปจากการยกตัวและจากการกัดกร่อนนี้มีทิศทางการวางตัวที่มีผลมาจากแรงความเค้นหลักระหว่างที่มีการยกตัว ทั้งนี้จะต้องให้ความระมัดระวังในความพยายามที่จะเข้าใจแรงความเค้นทางเทคโทนิคในอดีตเพื่อที่จะแยกแยะชนิดของรอยแตก ถ้าเป็นไปได้ก็ระหว่างรอยแตกเทคโทนิคกับรอยแตกที่เกิดจากสิ่งปิดทับด้านบนถูกนำออกไป แนวแตกจากการแยกเป็นกาบมนคล้ายกลีบหัวหอม (exfoliation joint) (**รูปที่** 1-33) เป็นแนวแตกที่เกิดจากสิ่งปิดทับถูกนำออกไป (pressure released) จะเกิดที่และขนานไปกับพื้นผิวดินปัจจุบันในหินที่มีแรงความเค้นกดดันสูง" (Wikipedia) ตามระนาบรอยแตกที่อยู่ใต้ดินระดับไม่ลึกนัก มักจะเป็นที่กักเก็บน้ำบาดาลได้เช่นกัน

น้ำบาดาลในหินอัคพุ เนื่องจากหินอัคนีพุเป็นหินที่เย็นตัวนอกเปลือกโลก จึงเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วแทบจะทันทีที่ธารลาวาสัมผัสกับอากาศ ฟองก๊าซที่ระบายออกสู่บรรยากาศไม่ทันก็จะถูกกัก (trap) เป็นฟองอากาศอยู่ในเนื้อหินเช่นหินบะซอลต์ที่มีรูพรุน (vesicular basalt) หากเกิดการเย็นตัวและรูพรุนเหล่านี้ต่อเนื่องกัน ก็จะเป็นแหล่งกักเก็บน้ำบาดาลที่ดี ลักษณะเด่นอีกอย่างหนึ่งของธารลาวาที่เย็นตัวคือโครงสร้างรูปแท่งหิน (columnar structure) (**รูปที่** 1-34) ซึ่งเป็นลักษณะของหินอัคนีพุที่แตกแยกเป็นแท่งยาวคล้ายเสา เกิดเพราะกระบวนการเย็นตัวเข้าสู่จุดศูนย์กลาง (center of cooling) มีเกิดได้หลายเหลี่ยม แต่ที่พบมากจะเป็นแท่งเสาหินรูปหกเหลี่ยม columnar joints จะเป็นทางผ่านและกักเก็บน้ำบาดาลที่ดี ในกรณีที่ธารลาวาซ้อนทับกันหลายชั้น จะได้ชั้นน้ำบาดาลในหินอัคนีพุที่มีความหนามาก ลักษณะการกักเก็บน้ำบาดาลของหินอัคนีพุประเภทอื่นได้แก่รอยแตก รอยแยกที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทางเทคโทนิค (การเคลื่อนที่ของเปลือกโลก) หินผุที่เกิดจากการไหลผ่านของน้ำบาดาล เป็นต้น



รูปที่ 1-32 แสดงลักษณะการเกิดของหินอัคนีประเภทต่างๆ ในรูปจะประกอบด้วยหินอัคนีระดับลึก หินอัคนีระดับตื้น และหินอัคนีพุ (ภาพจาก พจนานุกรมศัพท์ธรณีวิทยา, 2544)

รูปที่ 1-33 แสดงลักษณะการเกิดรอยแยกแบบกาบ (exfoliation joint) บางครั้งเรียกว่าการแตกแบบกลีบหัวหอม (onion layers)
(ที่มา http://www.geosciences.unl.edu/~phanson/pictures2.htm)

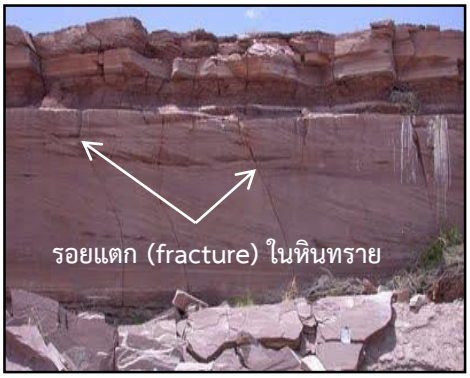
รูปที่ 1-34 แสดงลักษณะการเกิดรอยแยกแบบแท่งหิน (columnar jointing) (ที่มา Wikipedia)

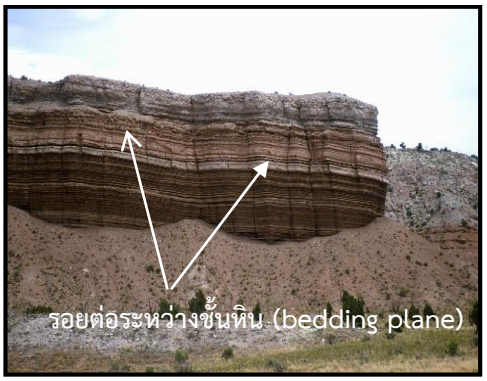
(2) หินตะกอน (sedimentary rocks) หมายถึงหินที่เกิดจากการทับถมกันของตะกอน (sediment) ซึ่งตะกอนเหล่านี้อาจเกิดจากการผุพังแตกสลายของหินอัคนี หินแปร หรือแม้แต่หินตะกอนที่มีอายุแก่กว่า ถูกพัดพามาตกจมทับถมและสะสมตัวกัน (detrital deposition) โดยทางน้ำ (fluvial) โดยลม (eolian) โดยธารน้ำแข็ง (glacial) หรือการตกตะกอนโดยกระบวนการทางเคมี (chemical deposition) และตะกอนต่างๆเหล่านี้มักจะแสดงลักษณะเป็นชั้น โดยชั้นจะชัดเจนหรือไม่ชัดเจนขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของตะกอน รวมถึงตัวกลางพัดพาตะกอนมาสะสมตัว

ตัวอย่างหินตะกอนที่เกิดจากการทับถมกันของเม็ดตะกอนได้แก่หินดินดาน (shale) หินเคลย์ (claystone) หินทรายแป้ง (siltstone) หินทราย (sandstone) และหินกรวดมน (conglomerate) เป็นต้น น้ำบาดาลในหินตะกอนที่เกิดจากการทับถมของเม็ดตะกอนจะพบได้ในรอยแตก (fracture) รอยแยก (joint) ที่เกิดจากกระบวนการทางเทคโทนิค (การเคลื่อนที่ของ

เปลือกโลก) ซึ่งมักทำให้เกิดโครงสร้างทางธรณีวิทยาที่เรียกว่า โครงสร้างรอยเลื่อน (fault) โครงสร้างคดโค้ง (fold) รอยต่อระหว่างชั้นหิน (bedding plane) ของหินต่างชนิดกัน (รูปที่ 1-35) สำหรับหินทรายหรือหินกรวดมนที่มีน้ำกักเก็บอยู่ระหว่างสะสมตัว เมื่อแข็งตัวกลายเป็นหินแล้ว น้ำเหล่านั้นยังคงตกค้างอยู่ ซึ่งเรียกกันในชื่อของ น้ำตกค้าง (connate water) ก็จัดเป็นแหล่งกักเก็บน้ำบาดาลเช่นกัน แต่เมื่อหากสูบขึ้นมาใช้แล้วจะไม่สามารถรับน้ำใหม่เข้ามาได้เนื่องจากพื้นที่รับน้ำเดิมมักจะถูกปิดไปแล้วเช่นกันโดยกระบวนการเชื่อมประสาน (cementation) และการกดทับ (compaction) เราจะเรียกน้ำบาดาลที่กักเก็บในลักษณะนี้ว่า “การกักเก็บครั้งเดียว (One Time Reserve; OTR)”

ตัวอย่างของหินตะกอนที่สะสมตัวโดยกระบวนการทางเคมี จะเกิดในขณะที่ความเข้มข้นของแอ่งน้ำเหมาะสมที่จะให้ไอออนของธาตุต่างๆ จับตัวกัน ตัวอย่างได้แก่ เกลือหินระเหย (evaporites) หินปูน (limestone) หินโดโลไมต์ (dolomite) ยิปซั่ม (gypsum) แอนไฮไดรต์ (anhydrite) หรือแม้กระทั่งเกลือหิน (rock salt) น้ำบาดาลที่พบในหินตะกอนที่สะสมตัวโดยกระบวนการทางเคมี จะพบในรอยแตก รอยแยกที่เกิดจากกระบวนการทางเทคโทนิค แต่ที่พบมากที่สุดคือพบในช่องว่างหรือโพรงซึ่งเกิดจากการละลาย (solution opening) ซึ่งพบมากในหินตระกูลคาร์บอเนต (carbonate species) ซึ่งได้แก่หินปูน (limestone มีแร่ Calcite; $CaCO_3$ เป็นส่วนประกอบหลัก) หินโดโลสโตน (dolostone มีแร่ Dolomite; $CaMg(CO_3)_2$ เป็นส่วนประกอบหลัก) ซึ่งแร่ประกอบหินของหินทั้ง 2 ชนิดถูกละลายได้ง่ายในตัวกลางที่เป็นกรดคาร์บอนิก อ่อน ๆ (น้ำฝนที่ซึมลงสู่ใต้ดิน มีคุณสมบัติเป็นกรดอ่อน) โพรงในหินปูนเมื่อต่อเชื่อมกันก็จะกลายเป็นทางไหลของน้ำใต้ดิน คล้ายน้ำไหลในท่อน้ำ (conduit) โพรงถ้ำหรือท่อทางน้ำใต้ดินเหล่านี้ หากเกิดการยกตัวของเปลือกโลก ก็จะโผล่พ้นผิวดิน กลายเป็นถ้ำต่างๆ น้ำที่เคยไหลอยู่ในท่อน้ำเดิม ก็จะละลายและกัดเซาะลงไปในแนวดิ่ง แล้วพัฒนาเป็นธารน้ำใต้ดินอันใหม่ น้ำบาดาลในหินคาร์บอเนตจึงมักจะมีหลายชั้น ในบริเวณเดียวกัน





รูปที่ 1-35 ภาพซ้าย แสดงลักษณะการเกิดรอยแตกในหินทราย (fracture) และภาพขวาแสดงลักษณะรอยต่อระหว่างชั้นหิน (bedding plane)

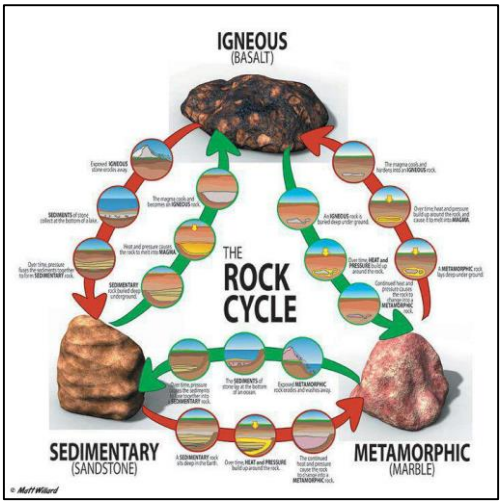
(3) หินแปร (metamorphic rocks) หินแปรหมายถึง หินที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบของเนื้อหิน (texture) จากหินเดิมไปเป็นหินชนิดใหม่ใต้ผิวโลก ซึ่งได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงความดันและอุณหภูมิในสภาพที่ยังเป็นของแข็ง อาจมีส่วนประกอบใหม่มาเพิ่มหรือไม่ก็ได้ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเรียกว่า การแปรสภาพ (metamorphism) หินต้นกำเนิดของหินแปรเป็นได้ทั้งหินอัคนี หินตะกอน และหินแปรที่เกิดมาก่อน ในทางธรณีวิทยาจะจำแนก

หินแปรออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ หินแปรเป็นริ้วขนาน (foliated metamorphic rock) หมายถึง หินแปรที่แสดงลักษณะของเนื้อหินที่มีแร่เรียงตัวขนานกัน เป็นแนวไปตามทิศทางที่ตั้งได้ฉากกับทิศทางที่แรงเค้นกระทำ และหินแปรไม่เป็นริ้วขนาน (non-foliated metamorphic rock) หมายถึงหินแปรที่แสดงลักษณะของเนื้อหินที่มีเม็ดแร่ขนาดเท่ากันทุกอณู ไม่มีการจัดเรียงตัว ทำให้เป็นเนื้อหินลักษณะสมานแน่น มักจะพบในหินที่ประกอบด้วยแร่ชนิดเดียวกัน รูปที่ 1.36 แสดงวัฏจักรของหิน (Rocks Cycle) (ที่มา: Wikipedia)

ตัวอย่างของหินแปรเป็นริ้วขนานได้แก่ หินชนวน (slate) เป็นหินมีลักษณะเนื้อละเอียดมาก ผลึกแร่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า แสดงแนวแตกเรียบแบบหินชนวน (slaty cleavage) และกะเทาะออกเป็นแผ่นเรียบบางได้ง่าย หินฟิลไลต์ (phyllite) เป็นหินเม็ดละเอียดกว่าหินชีสต์ แต่หยาบกว่าหินชนวน ผิวที่แตกใหม่จะมีลักษณะวาวแบบไหมหรือเป็นมันเงา เนื่องจากมีแร่ไมกาเม็ดละเอียดอยู่ มักเปลี่ยนมาจากหินดินดาน ด้วยความดันมหาศาลกว่าที่หินชนวนได้รับ แต่ไม่รุนแรงเท่าที่เกิดกับหินชีสต์ สำหรับหินชีสต์ (schist) มีขนาดเม็ดปานกลางถึงหยาบ เกิดขึ้นภายใต้ความดันมหาศาลกว่าหินฟิลไลต์ ประกอบด้วยแร่ไมกาเป็นหลัก ที่เรียงตัวเกือบขนานกัน เรียกว่าแนวแตกแบบหินชีสต์ (schistosity) บ่อยครั้งที่ปริแยกออกตามชั้นหรือแผ่นบางซึ่งคดงอและแตกหักได้ง่าย หินไนส์ (gneiss) เป็นหินลายเม็ดหยาบที่เกิดจากแปรสภาพอย่างมาก มีลักษณะแร่สีอ่อน เช่น ควอตซ์ เฟลด์สปาร์ เรียงตัวเป็นแถบเป็นลายสลับกับแถบของแร่สีเข้ม เช่น แร่ไบโอไทต์ ฮอร์นเบลนด์ แถบมีการโค้งงอและบิดเบี้ยว เรียกว่าสภาพเรียงตัวแบบหินไนส์ (Gneissosity) (ที่มา : Wikipedia)

ตัวอย่างของหินแปรไม่เป็นริ้วขนานได้แก่ หินควอร์ตไซต์ เป็นหินมีความคงทนมากที่สุดชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยมวลเนื้อผลึกของเม็ดทรายที่ขนาดไล่เลี่ยกัน ประสานติดกันแนบแน่น หินอ่อน (marble) เป็นหินเนื้อผลึก ค่อนข้างเม็ดหยาบ แปรสภาพมาจากหินปูนและหินโดโลไมต์

น้ำบาดาลในหินแปรมักพบกักเก็บอยู่ในรอยแตก (fracture) รอยแยก (joint) ที่เกิดจากกระบวนการทางเทคโทนิค (การเคลื่อนที่ของเปลือกโลก) ตามบริเวณที่เป็นหินผุ (weathered zone) หรือตามรอยริ้วขนาน (foliation) ของหินแปรที่เป็นริ้วขนานดังกล่าวข้างต้น



รูปที่ 1-36 แสดงวัฏจักของหิน (Rocks Cycle) แสดงให้เห็นถึงวัฏจักรการเกิดหินทั้ง 3 ประเภท ได้แก่ หินอัคนี หินตะกอน และหินแปร

1.7 ประเภทของชั้นหินให้น้ำจำแนกตามคุณสมบัติทางชลศาสตร์ (Types of Aquifer classified by hydraulic properties) ชั้นหินให้น้ำนั้น หากจำแนกตามหลักชลศาสตร์แล้ว สามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภทได้แก่ ชั้นหินให้น้ำไร้แรงดัน (unconfined aquifer) ชั้นหินให้น้ำภายใต้แรงดัน (confined aquifer) และชั้นหินให้น้ำปลอม (perched aquifer) สำหรับคำอธิบายเกี่ยวกับชั้นหินให้น้ำไร้แรงดันและชั้นหินให้น้ำภายใต้แรงดัน นั้น ผู้เขียนขอให้ผู้อ่านกลับไปอ่านในหัวข้อ 1.5.5 และ 1.5.26 และ รูปที่ 1-24 สำหรับชั้นหินให้น้ำปลอม นั้น ให้ผู้อ่านกลับไปอ่านคำอธิบายที่หัวข้อ 1.5.15 และรูปที่ 1-20

บทที่ 2
การวางแผนงานและการจัดเตรียมข้อมูลเบื้องต้น
(Planning and Preparation for existing information)

2.1 การวางแผนดำเนินการ (Planning for actions)

เมื่อผู้ปฏิบัติงานได้รับมอบหมายให้ดำเนินการพัฒนาน้ำบาดาลในโครงการใดโครงการหนึ่งหรือพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่ง อันดับแรกของการดำเนินการได้แก่การประเมินตำแหน่งของพื้นที่ ขนาดของพื้นที่ ปริมาณงานที่ต้องทำ จำนวนวันที่ต้องดำเนินการ ค่าตอบแทนบุคลากรเช่นค่าที่พัก ค่าเบี้ยเลี้ยงเดินทาง ตั้งแต่วันเริ่มต้นโครงการจนถึงวันสิ้นสุดโครงการ ทั้งนี้เนื่องจากการพัฒนาน้ำบาดาลให้มีประสิทธิผลนั้น นอกจากงบประมาณที่จัดสรรให้อย่างเพียงพอแล้ว ต้องมีกระบวนการทางวิชาการที่เกี่ยวข้องมากมาย และแต่ละกระบวนการต้องมีแผนงานที่ดีรองรับ (รูปที่ 2-1) การเตรียมการและการวางแผนต่าง ๆ เริ่มต้นด้วยขั้นตอนสำคัญคือการจัดเตรียมข้อมูลเบื้องต้น (preparation for existing information) การสำรวจภาคสนามและการคัดเลือกพื้นที่ (field investigation and site selection) การเจาะสำรวจ การวิเคราะห์ตัวอย่างดิน-หิน การหยั่งฟิสิกส์ธรณีหลุมเจาะ (test borehole drilling, samples examination and geophysical borehole logging) หลังจากนั้นก็จะเป็นการออกแบบและก่อสร้างบ่อน้ำบาดาล (casing design and well construction) แล้วตามด้วยการพัฒนาบ่อน้ำบาดาล (well development) สูบทดสอบ (pumping test) การวิเคราะห์คุณภาพน้ำ (groundwater analysis) การปรับปรุงคุณภาพน้ำและระบบกระจายน้ำ (groundwater treatment and water distribution system) ไปจนถึงกระบวนการสุดท้ายคือผู้ใช้น้ำและการบริหารจัดการและการอนุรักษ์น้ำบาดาล (groundwater management and conservation)

รูปที่ 2-1 กระบวนการทางวิชาการที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาน้ำบาดาลให้มีประสิทธิผลอย่างยั่งยืน

2.2 จัดเตรียมฐานข้อมูลเบื้องต้น (Desk Study)

หากได้รับมอบหมายให้ดำเนินการสำรวจและพัฒนาน้ำบาดาลในพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่ง สิ่งแรกที่จะต้องคำนึงถึงคือพื้นที่นั้นได้เคยมีการเจาะและพัฒนาน้ำบาดาลมาก่อนหรือไม่ หากมี สิ่งที่เราจะต้องดำเนินการต่อไปคือการนำเอาข้อมูลที่มีเหล่านั้นมาใช้ให้เป็นประโยชน์ให้มากที่สุด ทั้งนี้เพื่อให้เป็นแนวคิดเบื้องต้น (conceptual idea) สำหรับการดำเนินการในขั้นต่อ ๆ ไป ข้อมูลที่ต้องรวบรวมได้แก่ข้อมูลบ่อน้ำบาดาล (records of wells) ข้อมูลวิเคราะห์ตัวอย่างดิน-หินจากหลุมเจาะ (drilled logs of wells) งานที่ทำมาก่อน (previous work) ของพื้นที่ที่ได้รับมอบหมายหรือพื้นที่ใกล้เคียง แผนที่ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งได้แก่แผนที่ภูมิประเทศ (topographic map) ภาพถ่ายทางอากาศ (aerial photographs) ภาพถ่ายดาวเทียม (satellite images) แผนที่ธรณีวิทยา (geologic map) แผนที่น้ำบาดาล (groundwater availability map) และแผนที่อุทกธรณีวิทยา (hydrogeologic map) ที่ครอบคลุมพื้นที่ที่รับผิดชอบ ข้อมูลดังกล่าวนี้เมื่อนำมาศึกษาร่วมกันจะได้ภาพรวมเชิงมโนทัศน์ของธรณีวิทยาและอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่เป้าหมาย ลักษณะงานเช่นนี้เรียกว่า**การเตรียมการในสำนักงาน (desk study)** เมื่อได้ภาพรวมเชิงมโนทัศน์แล้ว จึงจะทราบว่าในการสำรวจภาคสนามเพื่อหาจุดเจาะและพัฒนาน้ำบาดาลที่เหมาะสม นั้น ต้องใช้เครื่องมืออะไรบ้าง เครื่องมือส่วนใหญ่ก็จะหนีไม่พ้นอุปกรณ์สำรวจทางธรณีวิทยา อุทกธรณีวิทยา และธรณีฟิสิกส์ ซึ่งจะบรรยายในหัวข้อต่อ ๆ ไป

2.2.1 ข้อมูลบ่อน้ำบาดาล (records of wells)

โดยทั่วไปแล้ว หลังจากที่มีการเจาะและพัฒนาบ่อน้ำบาดาลแล้ว ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับบ่อน้ำบาดาลนั้นรวมถึงข้อมูลเกี่ยวกับคุณภาพน้ำจากบ่อนั้น จะต้องถูกนำมาบันทึกอยู่ในระบบฐานข้อมูล แต่ก่อนที่จะนำเข้าสู่ระบบฐานข้อมูลนั้น ข้อมูลที่จะต้องบันทึกไว้จะต้องประกอบด้วย ชื่อบ่อ (well name หรือ well number หรือ well id.) สถานที่ตั้งบ่อ (well location) นอกจากจะบอกเป็นชื่อหมู่บ้าน ตำบล อำเภอ จังหวัด แล้ว ต้องบอกเป็นที่ตั้งทางภูมิศาสตร์ (GIS) อีกด้วย ได้แก่ พิกัดตะวันออก (UTME) และพิกัดเหนือ (UTMN) ข้อมูลส่วนสำคัญอื่นได้แก่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางบ่อ (well diameter) วันที่เริ่มเจาะ (date started) วันที่เจาะเสร็จ (date completed) ความลึกการเจาะ (drilled depth) ความลึกการพัฒนาบ่อ (developed depth) ระยะท่อกรอง/ท่อเซาะร่อง (screen/perforated casing interval) ระยะท่อกรุ (blank casing interval) ระดับน้ำปกติ (static water level: S.W.L.) ปริมาณน้ำ (yield) เจาะโดย (drilled by) วิธีการเจาะ (drilling method) และวิเคราะห์ตัวอย่างดิน-หินโดย (logged by) เป็นต้น ข้อมูลดังกล่าวข้างต้นเป็นข้อมูลประจำบ่อที่สำคัญมากและผู้ดูแลโครงการ หรือนักธรณีวิทยา วิศวกรที่รับผิดชอบโครงการต้องให้ความใส่ใจรวบรวมให้ครบถ้วนเพื่อที่จะนำไปกรอกข้อมูลในระบบฐานข้อมูลต่อไป จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นจะช่วยให้เราสามารถรู้ตำแหน่งของพื้นที่ที่ได้รับมอบหมาย รู้ความลึกของชั้นหินให้น้ำ รู้ระดับน้ำบาดาล รู้ปริมาณน้ำบาดาลที่สามารถจะพัฒนาได้ นับว่าเป็นประโยชน์ต่อการประเมินศักยภาพของพื้นที่ได้ในระดับหนึ่ง รูปที่ 2-2 และรูปที่ 2-3 แสดงตัวอย่างข้อมูลบ่อน้ำบาดาลซึ่งได้ลงในระบบฐานข้อมูลเรียบร้อยแล้ว

2.2.2 ข้อมูลการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน-หินจากหลุมเจาะ (drilled logs of wells)

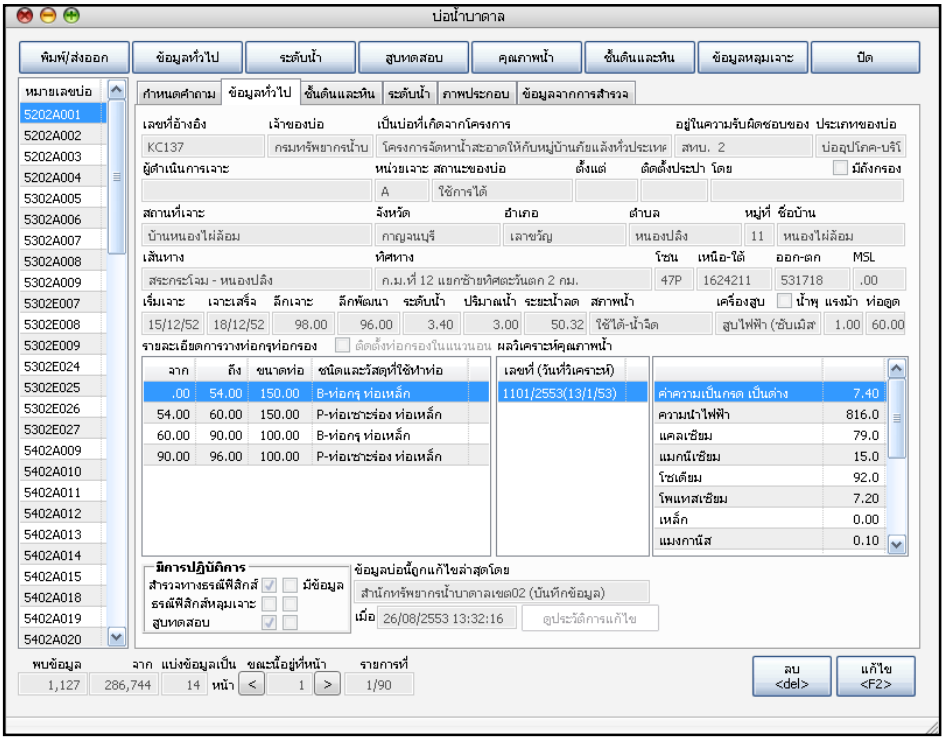
ข้อมูลการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน-หินจากหลุมเจาะ สามารถจัดเป็นข้อมูลด้านธรณีวิทยาประจำหลุมเจาะ (borehole signature) ได้เลย เปรียบดั่งลายนิ้วมือของบุคคล ทั้งนี้เนื่องจากหน่วยหินมักจะมีการแปรเปลี่ยนทางด้านข้าง (lateral variations) อยู่เสมอ หลุมเจาะที่อยู่ห่างกันเพียง 1 เมตร อาจจะมีลักษณะดิน-หินที่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการตรวจสอบและจำแนกชนิดและลักษณะเดินของตัวอย่างดิน-หินจากหลุมเจาะ (samples examination) ทุก ๆ บ่อ แม้จะเจาะห่างกันไม่กี่เมตรก็ตาม

ตัวอย่างดิน-หินจากหลุมเจาะเกิดจากการที่ชั้นดินชั้นหินที่ถูกเจาะถูกกัดหรือกระแทกให้แตกโดยหัวเจาะ (drill bit) และถูกนำขึ้นสู่ปากบ่อโดยการนำพาของโคลนเจาะ (drilling mud) หรือแรงอัดของลมในกรณีที่เจาะโดยใช้แรงอัดอากาศจากเครื่องอัดลม (air compressor) ตามปกติหากเป็นการเจาะแบบเก็บตัวอย่างแบบเศษหิน (cuttings หรือ chipped samples) ตัวอย่างแบบนี้จะถูกกำหนดให้เก็บเพื่อนำมาวิเคราะห์ทุก ๆ 1 เมตร จนถึงความลึกสุดท้ายของการเจาะ ปริมาณตัวอย่างที่เก็บประมาณ 200-300 กรัม หรือ 1 กำมือ ตัวอย่างจะถูกล้างด้วยน้ำสะอาดเพื่อชำระคราบโคลนเจาะที่เคลือบอยู่ตามผิวของเศษดินหินตัวอย่างเสียก่อน เพื่อให้ได้ตัวอย่างดินหินที่เป็นตัวแทนของชั้นดินหินที่เจาะผ่านอย่างแท้จริง เมื่อล้างแล้วก็จะทิ้งไว้ให้แห้ง แล้วเก็บใส่ถุงที่เขียนชื่อบ่อหรือหมายเลขบ่อไว้ สถานที่เจาะ ความลึกของช่วงที่เก็บตัวอย่าง จำนวนตัวอย่างจะเท่ากับความลึกของหลุมเจาะนั้นเสมอ เช่นบ่อที่เจาะถึงความลึก 100 เมตร จะมีจำนวนตัวอย่างเศษดินหินจากหลุมเจาะ 100 ตัวอย่าง ในการเจาะสำรวจบางพื้นที่ หากผู้ศึกษาต้องการข้อมูลเกี่ยวกับชั้นดินหินที่เจาะผ่านในขั้นรายละเอียด อาจกำหนดให้หน่วยเจาะใช้วิธีการเจาะแบบเก็บตัวอย่างแท่งหิน (core sample) ได้เช่นกัน สำหรับรายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการเจาะและอุปกรณ์การเจาะนั้น ผู้เขียนจะขอกล่าวในบทต่อ ๆ ไป

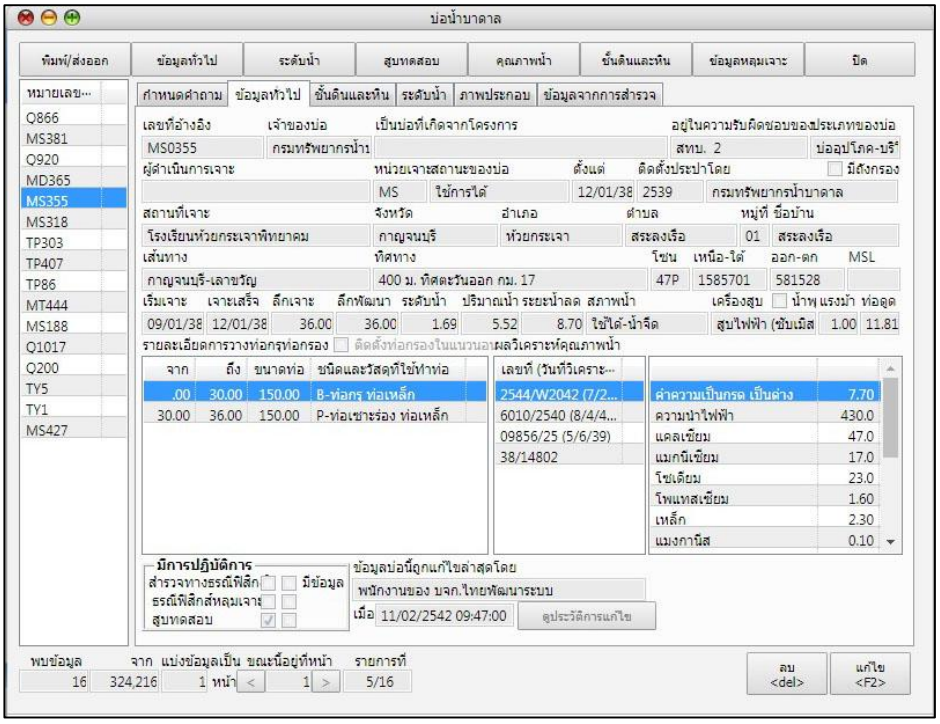
นักธรณีวิทยาจะเป็นผู้ตรวจสอบตัวอย่างดินหินเหล่านั้น พร้อมบรรยายรายละเอียดตามรูปแบบของการบรรยายตัวอย่างดินหินจากหลุมเจาะ (samples examination and description) ข้อมูลที่ได้มาจะเป็นข้อมูลเฉพาะหลุมเจาะนั้น ๆ และจะถูกนำมาใช้ในการออกแบบก่อสร้างบ่อน้ำบาดาล และเอาไว้เทียบเคียงในแนวระนาบ (correlation) กับข้อมูลจากหลุมเจาะอื่นเพื่อสร้างภาพตัดขวาง 2 มิติทางธรณีวิทยา เพื่อเอาไว้ต่อยอดในการศึกษาในขั้นรายละเอียดต่อไป ผู้เขียนจะกล่าวถึงการบรรยายลักษณะดินหินในรายละเอียดในบทต่อ ๆ ไป รูปที่ 2-4 แสดงตัวอย่างของข้อมูลการวิเคราะห์เศษตัวอย่างดิน-หินจากหลุมเจาะน้ำบาดาล และรูปที่ 2-5 แสดงตัวอย่างการบันทึกข้อมูลจากการวิเคราะห์ตัวอย่างที่เป็นแท่งหิน (core sample)

2.2.3 งานที่ทำมาก่อน (Previous work)

งานที่ทำมาก่อนในที่นี้หมายถึงรายงานไม่ว่าจะเป็นด้านอุทกธรณีวิทยา รายงานการสำรวจน้ำบาดาลเฉพาะแห่ง ธรณีวิทยาแหล่งแร่ ธรณีวิทยาปิโตรเลียม หรือแม้กระทั่งรายงานการสำรวจจัดทำแผนที่ต่าง ๆ ที่มีข้อมูลหรือแผนที่ธรณีวิทยาภายในรายงานและเคยดำเนินการในพื้นที่เป้าหมายหรือพื้นที่ใกล้เคียงกับเป้าหมายกับที่ผู้ศึกษาได้รับมอบหมายให้ดำเนินการ รายงานการศึกษาที่ได้กล่าวมาทั้งหมดมักจะประกอบด้วยแผนที่ธรณีวิทยาที่ค่อนข้างละเอียดกว่าที่เคยมีอยู่ ข้อมูลธรณีวิทยาโครงสร้างต่าง ๆ ซึ่งรายงานของงานที่ทำมาก่อนอาจเป็นของหน่วยงานของผู้ศึกษาเองและมีการสรุปเป็นรายงานประจำปี หากเป็นของหน่วยงานอื่นอาจต้องอาศัยการไปค้นจากห้องสมุดของหน่วยงาน หรืออาจใช้วิธีประสานงานด้วยความสัมพันธ์ส่วนตัวก็เป็นได้ในบางครั้งบางคราว งานที่เคยทำมาก่อน จะเป็นตัวช่วยอย่างดีในการประเมินแนวทางการปฏิบัติงานภาคสนามเบื้องต้น และหากผู้ศึกษาเขียนรายงานการศึกษาออกมา ก็ควรจะอ้างถึง “งานที่ทำมาก่อน” เป็นเอกสารอ้างอิงทางวิชาการด้วย รูปที่ 2-6 เป็นตัวอย่างรายงานการสำรวจของ “งานที่ทำมาก่อน (previous work)”



รูปที่ 2-2 แสดงตัวอย่างข้อมูลบ่อน้ำบาดาลซึ่งได้ลงในระบบฐานข้อมูลเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 2-3 แสดงตัวอย่างข้อมูลบ่อน้ำบาดาลซึ่งได้ลงในระบบฐานข้อมูลเรียบร้อยแล้ว

Lithologic Log

Project: Aquifer Storage and Recovery Mun-Chi River Basins

Location: Ban Thaphranao School, Tambon Thaphra, Amphoe Mueang, Changwat Khon Kaen

Well number: MC10 UTM E 264847 UTM N 1809397

Drilled depth: 102 metre Developed depth: 60 metre Well diameter: 4 in.

Blank casing: 0-40 metre Perforated casing: 40-56 metre

Drilled by: Sahabadan Co.Ltd. Date completed: 10 Jan 07 Logged by: Mahippong Worakul

Depth (m.)		Rock unit	Lthologic description	Remarks
From	To			
0	2	Clay	brownish grey, slightly silty, non-plastic, loose	
2	10	Clayey Sand	light reddish brown, 30% clayey, fine- to medium-	
			grained, moderately sorted, sub-angular to sub-rounded,	
			composed mostly of quartz, some feldspar and opaque	
			minerals, intercalated with yellowish grey, moderately	
			plastic Clay at depth 4-5 m.	
10	32	Siltstone	light reddish pink, moderately weathered, siliceous	
			cemented, composed mostly of quartz, some	
			feldspar, trace of mica and fe-oxide minerals, brittle	
38	65	Sandstone	light brown, medium to coarse-grained, moderately	Perforated
			sorted, sub-angular to sub-rounded, siliceous	casing at
			cemented, slightly weathered from 32-40 m.,	40-56 m.
			moderately weathered from 40-65 m., siliceous	
			cemented, composed mostly of quartz, some	
			feldspar, fe-oxide minerals, brittle in the upper part,	
			the rest are friable	

Depth (m.)		Rock unit	Lthologic description	Remarks
From				
65	102	Sandstone	dark brown, medium- to coarse-grained, moderately	
			sorted, sub-angular to sub-rounded, siliceous	
			cemented, fresh to slightly weathered., siliceous	
			cemented, composed mostly of quartz, some feldspar	
			and opaque minerals	
			End of hole at depth 102 m.	

รูปที่ 2-4 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์และบรรยายลักษณะดินหินแบบเศษหิน

Lithologic Log

Project: Artesian Aquifer Assessment in Northeastern Region of Thailand
Location: Ban Tangpadpordaeng Amphoe Ban Haed Changwat Khon Kaen
Well number RTA 100 UTM E xxxxxx UTM N yyyyyyy
Drilled depth 200 metre Developed depth 200 metre Well diameter 6 in.
Blank casing.....metre Perforated casing open hole metre
Drilled by DGR Date completed 29 Jun 2008 Logged by Mahippong Worakul

Depth (m.)		Rock unit	Lthologic description	Remarks
From	To			
0	3	Silty Clay	light brownish grey, 25% silty, non-plastic	Top soil unit
3	15	Mudstone	Pale pinkish brown, very stiff to hard, limonitic	Core loss from
			stained on horizontal fracture surface, core	7.5-8.0 m.
			recovery 95%, RQD 75%	
			Bedding plane: 5 degrees from horizontal	
			Contact to lower horizon: gradational contact	
15	105	Sandstone	pale reddish brown, fine to medium-grained,	Core loss from
			moderately to well sorted, sub-angular to sub-	72.0 - 72.5 m.
			rounded, composed mostly of quartz, some	101.25 - 102 m.
			feldspar, trace of fe-oxide minerals, siliceous	
			cemented, frequently horizontal fractured	
			occasionally sub-vertical fractured, moderately	
			weathered, core recovery 93%, RQD 35%	
			Bedding plane: 5-8 degrees from horizontal	
			Contact to lower horizon: sharp contact	

Depth (m.)		Rock unit	Lthologic description	Remarks
From	To			
105	178	Siltstone	reddish brown, dense, hard, ferruginous	Core loss from
			cemented, composed mostly of quartz, trace	108.3 - 109.5 m.
			of feldspar, core recovery 96 %, RQD 82%	
			Bedding plane: 7-10 degrees from horizontal	
			Contact to lower horizon: sharp contact	
178	200	Sandstone	light reddish brown, medium- to coarse-grained,	Core loss from
			moderately to well sorted, sub-rounded to	182.2 - 182.6 m.,
			rounded, composed mostly of quartz, some	193.5 - 194.2 m.
			feldspar, trace of fe-oxide minerals, siliceous	
			cemented, commonly horizontal and sub-vertical	
			fractured, moderately weathered, intercalated	
			with siltstone as 105-178 m. at depth 183-185 m.	
			Core recovery 91%, RQD 60%	
			Bedding plane: 5-7 degrees from horizontal	
			End of hole at depth 200 m.	

รูปที่ 2-5 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์และบรรยายลักษณะดินหินแบบแท่งตัวอย่างหิน

โครงการพัฒนาและอนุรักษ์น้ำบาดาล
ในลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา

พื้นที่ศึกษาแอ่งหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

ปีงบประมาณ 2548

สำนักสำรวจและประเมินศักยภาพน้ำบาดาล
กรมทรัพยากรน้ำบาดาล
ตุลาคม 2548

รูปที่ 2-6 เป็นตัวอย่างรายงานการสำรวจของงานที่ทำมาก่อน (previous work)

2.2.4 จัดเตรียมแผนที่ที่เกี่ยวข้อง (preparation for essential maps)

แผนที่เป็นข้อมูลที่จำเป็นมากในการศึกษาด้านอุทกธรณีวิทยา เนื่องจากแผนที่จะเป็นแหล่งที่ให้ข้อมูลไม่ว่าจะเป็นตำแหน่ง ขอบเขตของพื้นที่ศึกษา แผนที่ที่เกี่ยวข้องที่มักใช้ในงานพัฒนาน้ำบาดาลประกอบด้วยแผนที่ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

(1) แผนที่ภูมิประเทศ (topographic map)

แผนที่ภูมิประเทศเป็นแผนที่พื้นฐานที่ใช้ในการผลิตแผนที่อื่นๆ หรือเป็นแผนที่ที่จะบอกข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญ ๆ ได้มากมาย ในประเทศไทย แผนที่ภูมิประเทศผลิตโดยกรมแผนที่ทหาร (Royal Thai Survey Department: RTSD) และอยู่ในมาตราส่วน 1:50,000 ข้อมูลที่ปรากฏอยู่ในแผนที่ภูมิประเทศ นั้นประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ส่วนที่เรียกว่า raster เป็นข้อมูลที่เห็นเป็นรูปภาพ หรือ image หรือ bitmap หรือภาพที่เกิดจากการเอาจุดหลาย ๆ จุดมาวางเรียง ๆ กัน บอกขนาด หรือ size บอกสี หรือ colour บอกรูปร่าง หรือ shape แต่ไม่บอกทิศทาง หรือ direction ส่วนข้อมูลอีกประเภทได้แก่ข้อมูลที่เรียกว่า vector เป็นข้อมูลเชิงเส้น หรือ line บอกทั้งขนาด และทิศทาง แผนที่ภูมิประเทศของประเทศไทย จะมีข้อมูลประเภท vector อยู่ทั้งหมด 9 ชั้นข้อมูล หรือ layer ในที่นี้ผู้เขียนขอไม่กล่าวถึงการอ่านองค์ประกอบอื่นเช่นชื่อชุดแผนที่ (Series Name and Map Scale) หมายเลขประจำชุด (Series Number) ชื่อแผ่นระวาง (Sheet Name) หมายเลขแผ่นระวาง (Sheet Number) และอื่น ๆ ซึ่งผู้อ่านสามารถไปหาอ่านได้ตามเว็บไซต์ต่าง ๆ เช่นกรมแผนที่ทหาร กรมป่าไม้ เป็นต้น และผู้เขียนจะขอกล่าวถึงชั้นข้อมูลต่าง ๆ ดังนี้

ชั้นข้อมูลที่ 1 ได้แก่เส้นขอบระวาง หรือ Sheet บอกเป็นตำแหน่งบนเส้นรุ้ง หรือ latitude และเส้นแวง หรือ longitude เส้นกริด หรือ grid line และสัญลักษณ์ หรือ symbols ต่าง ๆ บนแผนที่

ชั้นข้อมูลที่ 2 ได้แก่ ถนน หรือ roads ทางรถไฟ หรือ railroads เครื่องหมายทางหลวง หรือ route markers สะพาน หรือ bridges อุโมงค์ หรือ tunnels และเส้นทางแสดงการขนส่งแบบอื่น ๆ หรือ other transportation routes

ชั้นข้อมูลที่ 3 ได้แก่ สิ่งก่อสร้างและแหล่งชุมชน หรือ built-up areas เช่น หมู่บ้าน หรือ villages วัด หรือ temples โรงเรียน หรือ schools ที่ตั้ง อำเภอและที่ตั้งจังหวัด หรือ points of 2nd order of administrative office (district) และ 1st order of administrative office (province)

ชั้นข้อมูลที่ 4 ได้แก่ รายเอียดทั่ว ๆ ไป เช่น เส้นแบ่งเขตอำเภอ หรือ 2nd order of administrative office (district) boundary เส้นแบ่งเขตจังหวัด หรือ 1st order of administrative office (province) boundary เส้นแบ่งเขตประเทศ หรือ international boundary เขตทหาร หรือ military area สายส่งศักย์สูง หรือ high tension powerline คันดิน หรือ levees สนามบิน หรือ airports เป็นต้น

ชั้นข้อมูลที่ 5 ได้แก่ เส้นชั้นความสูง หรือ contour lines จุดระดับความสูง หรือ spot elevation หมุดหลักฐานต่าง ๆ หรือ bench mark points พื้นที่ที่เป็นทราย กรวด หรือ sand and gravel areas

ชั้นข้อมูลที่ 6 เกี่ยวกับแหล่งน้ำได้แก่ แม่น้ำ หรือ rivers ทะเลสาบ หรือ lakes หนองน้ำ หรือ ponds อ่างเก็บน้ำ หรือ reservoirs น้ำตก หรือ waterfall นาเกลือ หรือ salt pan บ่อเลี้ยงปลา หรือ aquaculture areas นาข้าว หรือ paddy fields ที่ลุ่ม หรือ swamp ป่าจาก หรือ nipa และบริเวณที่น้ำท่วมถึง หรือ land subject to inundation

ชั้นข้อมูลที่ 7 ได้แก่ รายละเอียดพืชพรรณ หรือ vegetation หรือ tree เช่น ป่าทึบ หรือ dense ป่าโปร่ง หรือ open และพื้นที่เพาะปลูกอื่น ๆ หรือ other cultivated lands

ชั้นข้อมูลที่ 8 ได้แก่ รายละเอียดภูมิประเทศชายฝั่ง เช่น เส้นขอบชายฝั่ง หรือ shore line แนวหิน หรือ rock barriers

ชั้นข้อมูลที่ 9 ได้แก่ รายละเอียดเกี่ยวกับคำอธิบายลักษณะภูมิประเทศ เช่น ชื่อบ้าน วัด โรงเรียน และ ชื่อแหล่งน้ำ ข้อมูลทั้งหลายทั้งปวงที่ผมกล่าวมา จะถูกนำมาซ้อนทับกัน โดยใช้วิธีการทางสารสนเทศภูมิศาสตร์ หรือ Geographic Information System หรือ GIS (รูปที่ 2-7 แสดงลักษณะของแผนที่ภูมิประเทศทั่วไป)

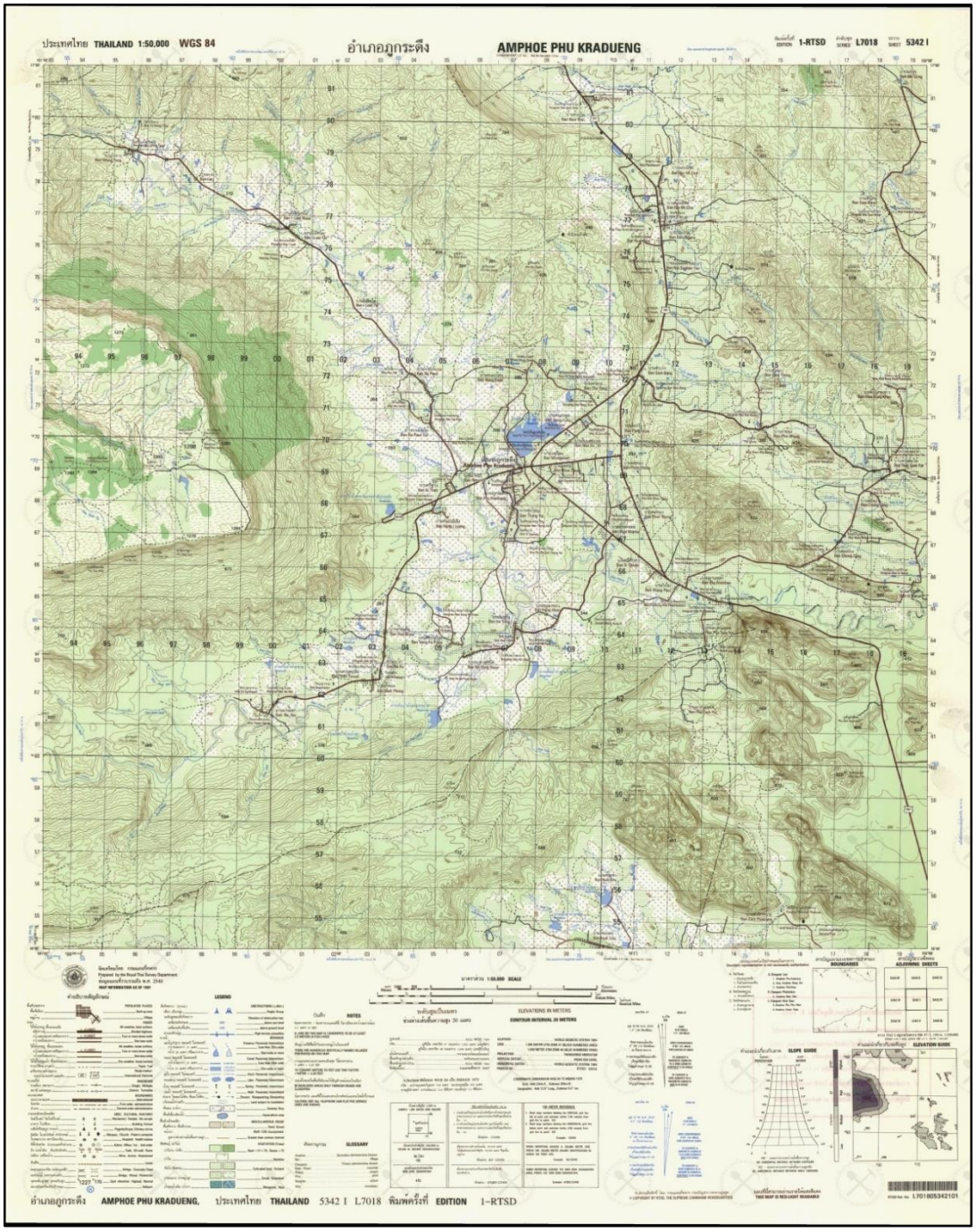
ที่กล่าวมาคือ information ทั่วๆ ไปที่บอกกล่าวให้เราในแผนที่ภูมิประเทศ แต่สำหรับนักธรณีวิทยาหรือนักอุทกธรณีวิทยาแล้ว แผนที่ภูมิประเทศสามารถบอกข้อมูลได้มากกว่านั้น เช่นลักษณะของเส้นชั้นความสูงจะช่วยบอกถึงขอบเขต ขนาดและรูปร่างของพื้นที่รับน้ำ (catchment area) ลักษณะ ตำแหน่ง และทิศทางของสันปันน้ำ (water divide) แสดงเส้นชั้นแอ่ง (depression contour) ซึ่งบอกบอกถึงพื้นที่ที่มีลักษณะภูมิประเทศต่ำกว่าพื้นที่โดยรอบ เช่นหลุมยุบ (sinkhole) หุบเขาหลุมยุบ (doline) ลักษณะของเส้นชั้นความสูงที่ชัดเจนอีกแบบหนึ่งที่บอกว่าพื้นที่นั้นเป็นเทือกเขาหินปูนสูงชัน (karst topography) ได้แก่เส้นชั้นความสูงที่อยู่ชิดกันมาก ๆ และมีความถี่สูง และจะปรากฏเส้นชั้นความสูงบนยอดเป็นเส้นชั้นความสูงปิดที่มีขนาดเล็กๆ และมีรูปร่างแตกต่างกันไป รูปที่ 2-8 และรูปที่ 2-9 แสดงลักษณะเส้นชั้นความสูงที่บ่งบอกถึงลักษณะภูมิประเทศที่มีประโยชน์ในการศึกษาเกี่ยวกับระบบธรณีวิทยา อุทกวิทยา และอุทกธรณีวิทยา

นอกจากนั้นรูปแบบของทางน้ำ (drainage patterns) ก็เป็นข้อมูลที่บ่งบอกสภาพธรณีสัณฐานวิทยาซึ่งจะสะท้อนถึงลักษณะทางธรณีวิทยาของพื้นที่ที่ทางน้ำไหลผ่าน ดังนี้ (รูปที่ 2-10)

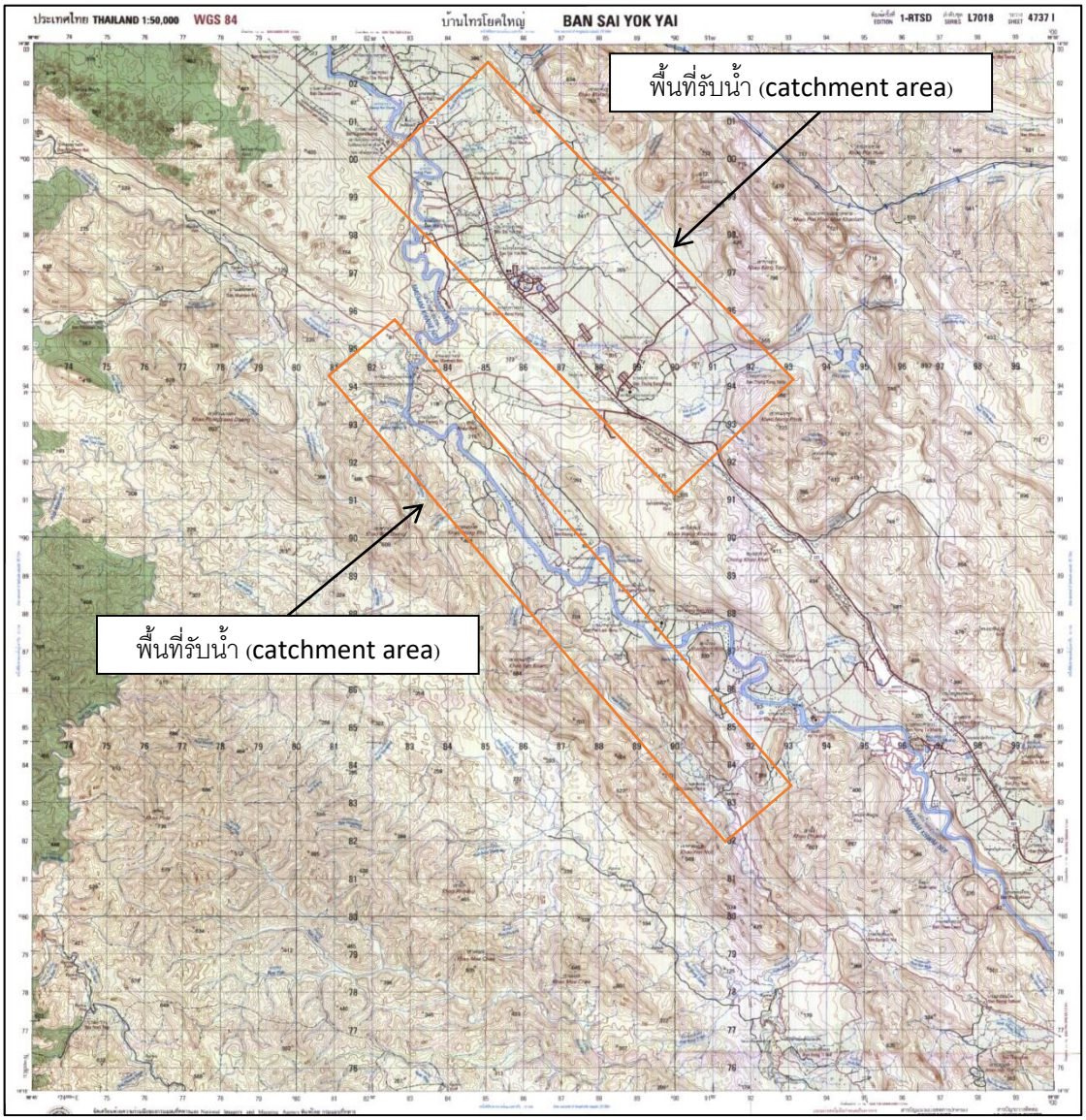
1) รูปแบบทางน้ำแบบกิ่งไม้หรือแบบกิ่งก้านสาขา (dendritic drainage pattern) เป็นรูปแบบทางน้ำที่มักพบเห็นกันเป็นประจำ ในระบบทางน้ำแบบนี้ จะมีทางน้ำสายย่อยคล้ายรูปกิ่งไม้ไหลลงสู่ทางน้ำสายรองหรือทางน้ำสาขา (tributary channels) ซึ่งทางน้ำสาขาก็จะไหลรวมกันแล้วไหลลงสู่ทางน้ำสายหลัก (main stream) ของระบบการไหลตามลำดับ ระบบการไหลแบบนี้จะเป็นการไหลในหุบเขารูปตัววี (v-shaped valley) ซึ่งหน่วยหินที่รองรับจะเป็นหินเนื้อแน่นและไม่มีรอยแตก (ที่มา: Wikipedia)
2) รูปแบบทางน้ำแบบเถาองุ่น (trellis drainage pattern) บางครั้งก็ถูกเรียกว่า grapevine drainage pattern เนื่องจากลักษณะการไหลของทางน้ำแบบนี้คล้ายรูปแบบของการจัดวางเถาองุ่นในไร่องุ่นเนื่องจากทางน้ำจะไหลในร่องที่เป็นทิศทางการวางตัวของหน่วยหินที่รองรับ ทางน้ำสาขาจะไหลลงจากเนินเขาสูงชันและมักจะบรรจบกับทางน้ำสายหลักในมุมเกือบตั้งฉาก ซึ่งทำให้มองดูเหมือนเถาองุ่น รูปแบบทางน้ำแบบนี้บ่งบอกถึงพื้นที่ที่เป็นภูเขาที่เกิดจากการคดโค้งของหน่วยหิน (folded mountains) (ที่มา: Wikipedia)
3) รูปแบบทางน้ำแบบขนาน (parallel drainage pattern) รูปแบบทางน้ำลักษณะนี้จะเกิดในพื้นที่ที่เป็นที่ลาดชันและมีความต่างของภูมิประเทศเล็กน้อย และเนื่องจากเป็นที่ลาดชันทางน้ำมักจะเป็นเส้นตรงและไหลเร็วและมีทิศทางเดียวกัน และไม่ค่อยพบว่ามีทางน้ำสาขา รูปแบบทางน้ำแบบขนานอาจบ่งบอกถึงการมีโครงสร้างรอยเลื่อน (fault) ตัดผ่านพื้นที่ที่รองรับด้วยหินที่เป็นโครงสร้างคดโค้ง (fold) และทางน้ำลักษณะอื่นอาจพบได้ท่ามกลางทางน้ำแบบขนานเช่นทางน้ำแบบเถาองุ่นหรือทางน้ำแบบกิ่งก้านสาขา

4) รูปแบบทางน้ำแบบรัศมี (radial drainage pattern) เป็นรูปแบบทางน้ำที่ไหลจากจุดศูนย์กลางที่เป็นที่สูง แล้วไหลออกไปเป็นแนวรัศมี มักพบตามลักษณะทางธรณีสัณฐานที่เป็นภูเขาไฟ หรือเนินที่เกิดจากการดันตัวขึ้นมาของหินอัคนีรูปเห็ด (laccolith) หรือโดมเกลือ (salt dome)
5) รูปแบบทางน้ำแบบวงแหวน (annular drainage pattern) เป็นรูปแบบทางน้ำที่มีรูปร่างคล้ายวงแหวนขนาดต่าง ๆ ซ้อนกันเกิดจากกระแสน้ำในลำธารกัดเซาะหินชั้นที่มีเนื้ออ่อนกว่าซึ่งแทรกสลับกับหินชั้นที่มีเนื้อแข็งกว่าในพื้นที่บริเวณที่มีโครงสร้างรูปโดม (พจนานุกรมศัพท์ธรณีวิทยา, 2544)
6) รูปแบบทางน้ำแบบตั้งฉาก (rectangular drainage pattern) บางครั้งก็เรียกว่า lattice drainage pattern รูปแบบทางน้ำแบบนี้มักจะพบว่าไหลอยู่บนพื้นที่ที่มีหน่วยหินที่รองรับมีความคงทนต่อการกัดกร่อนเท่ากันแต่มีทิศทางของรอยแยก 2 ทิศทางที่ตั้งฉากกันโดยประมาณ เนื่องจากรอยแยกมีความคงทนต่อการกัดกร่อนน้อยกว่าหินเนื้อแน่น ดังนั้นน้ำฝนที่ไหลล้นก็มักจะไหลตามแนวรอยแยกและขยายรอยแยกให้ขยายใหญ่ขึ้นโดยกระบวนการกัดกร่อนทำลาย (erosion) และพัฒนาการเป็นแม่น้ำ หรือทางน้ำในที่สุด

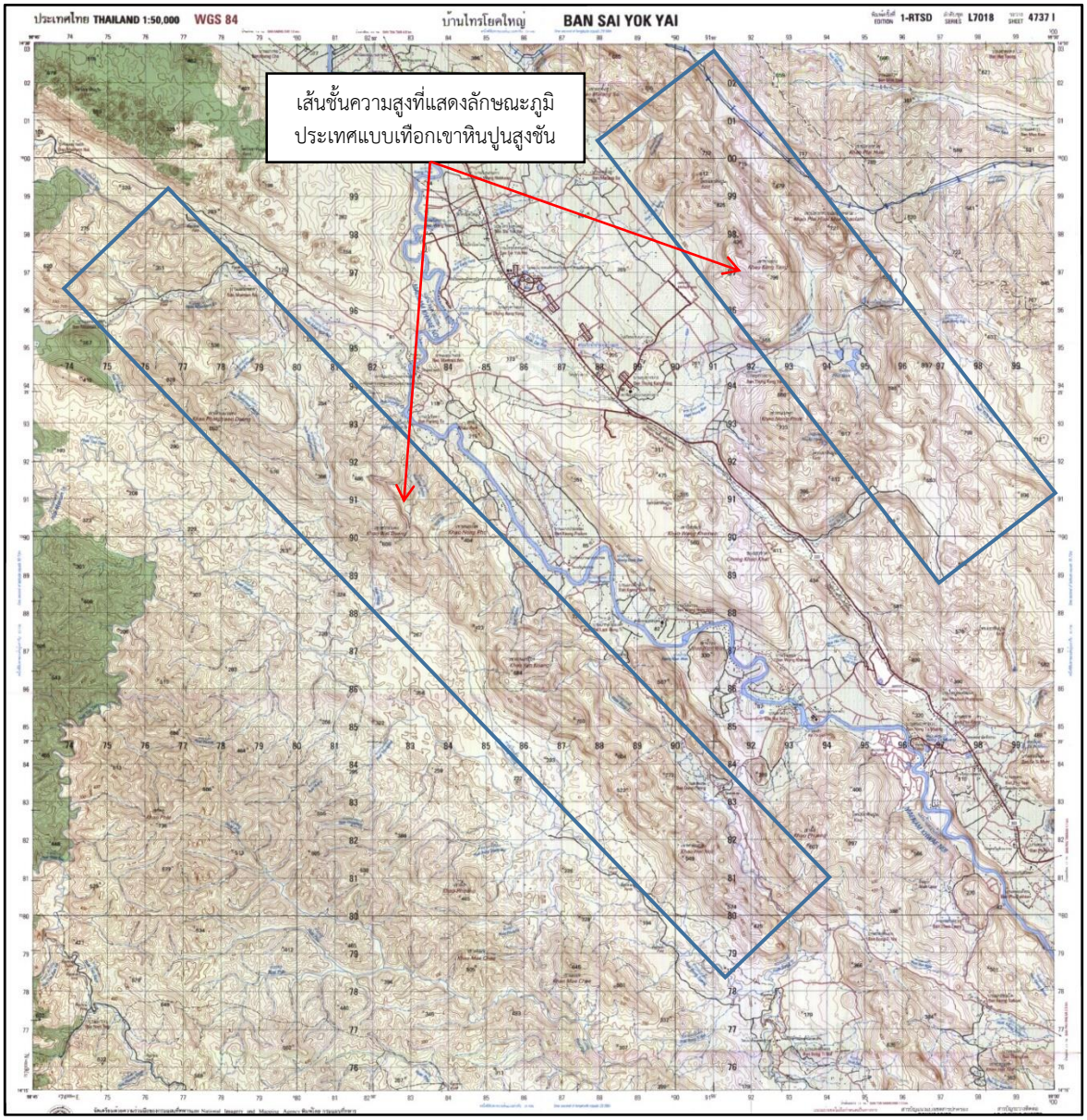
นอกจากรูปแบบทางน้ำดังกล่าวแล้ว ในพื้นที่ที่มีลักษณะภูมิประเทศแบบเทือกเขาหินปูน เราจะมักพบทางน้ำที่มีจุดกำเนิดบนที่สูงแล้วก็ไหลลงมาในที่ราบสักระยะหนึ่ง แล้วก็ไหลมุดลงไปใต้ดินในบริเวณที่เรียกว่าหลุมยุบ (sinkhole) ในแผนที่ภูมิประเทศก็จะเห็นเป็นลักษณะเส้นสีฟ้า (ซึ่งเป็นสัญลักษณ์ของทางน้ำ) ไหลแล้วไปหยุดบริเวณที่เส้นชั้นความสูงแบบเป็น depression contour line ทางน้ำแบบนี้เรียกว่า “ทางน้ำที่หายไป” หรือ disappearing stream และทางน้ำที่หายไปก็จะไหลลงไปในหลุมยุบ (sink hole/swallowed hole) แล้วไหลไปตามโพรงถ้ำใต้ดิน (underground caverns) และเมื่อไหลไปตัดกับภูมิประเทศที่ลาดเอียง ทางน้ำนี้ก็จะผุดหรือพุออกมาจากใต้ดินอีกครั้ง ทางน้ำที่เกิดจากการผุดออกมาจากใต้ดินจะเรียกว่า resurgence stream รูปที่ 2-11 แสดงแผนที่ภูมิประเทศที่มีหลุมยุบและ disappearing streams



รูปที่ 2-7 แสดงลักษณะของแผนที่ภูมิประเทศทั่วไปซึ่งบอกถึงข้อมูลพื้นฐานทั้งระดับชั้นข้อมูลทั้งหมดที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

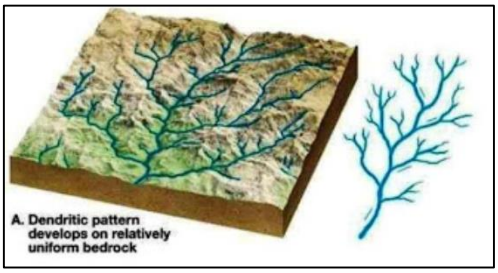


รูปที่ 2-8 แสดงลักษณะของเส้นชั้นความสูงที่บอกลักษณะ รูปร่าง และทิศทางของพื้นที่รับน้ำ

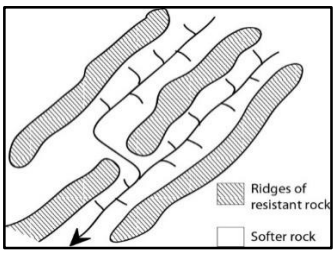


รูปที่ 2-9 แสดงลักษณะเส้นชั้นความสูงที่บ่งบอกถึงลักษณะภูมิประเทศแบบเทือกเขาหินปูนสูงชัน (Karst Topography)

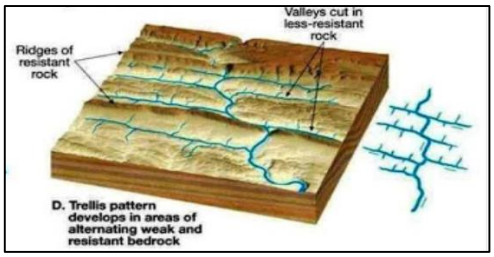
(1a)



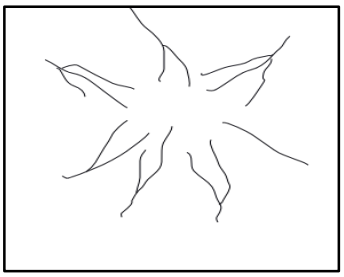
(1b)



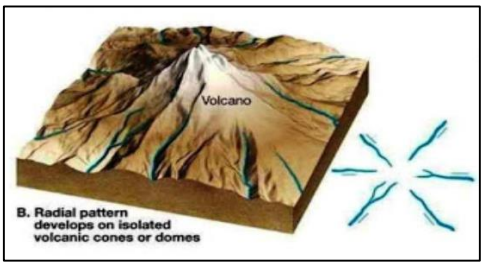
(2a)



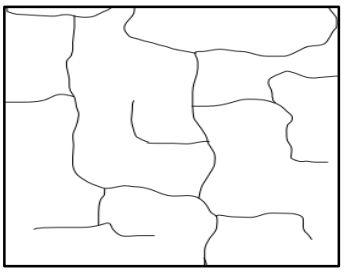
(2b)



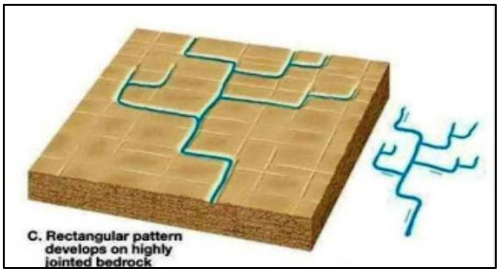
(3a)



(3b)

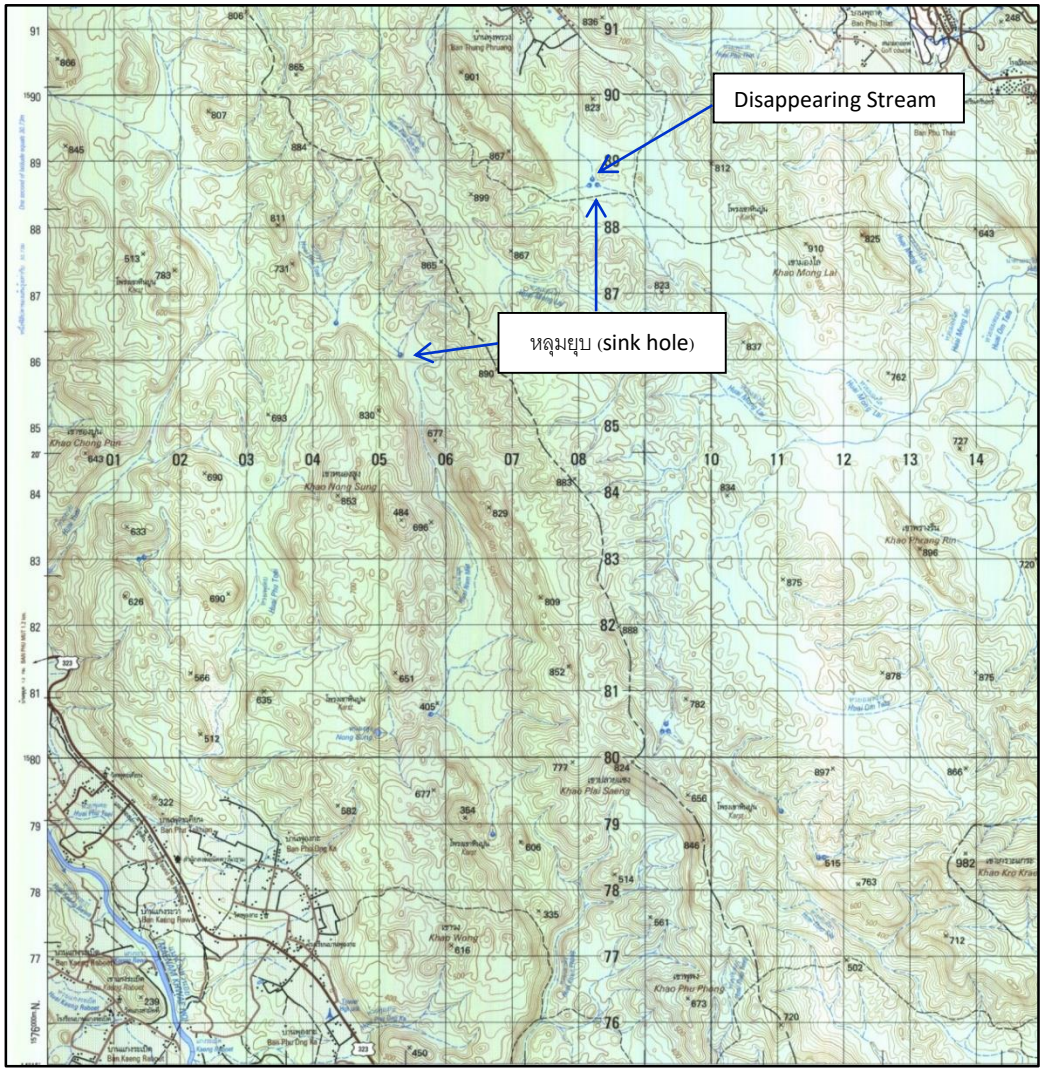


(4a)



(4b)

รูปที่ 2-10 แสดงรูปแบบทางน้ำ (1a, 1b) Dendritic drainage pattern (2a, 2b) Trellis drainage (3a, 3b) Radial drainage (4a, 4b) Rectangular Drainage Pattern (ภาพซ้ายจาก Wikipedia ภาพขวาจาก http://www.geology.com/2014/03/drainage-pattern.html)



รูปที่ 2-11 แสดงแผนที่ภูมิประเทศที่มีหลุมยุบและ disappearing streams (swallowed hole)

(2) ภาพถ่ายทางอากาศ (aerial photograph)

ภาพถ่ายทางอากาศหรือรูปถ่ายทางอากาศ เป็นภาพที่ถ่ายจากเลนส์กล้องแล้วบันทึกลงบนฟิล์มแล้วมาล้างแล้วพิมพ์ลงบนกระดาษสำหรับอัดรูปทั่วไปเหมือนรูปถ่ายในอดีต กล้องถ่ายรูปจะถูกติดตั้งบนอากาศยาน ได้แก่เครื่องบินหรือบอลลูน ตัวกล้องจะมีขนาดใหญ่กว่ากล้องถ่ายรูปทั่วไปเช่นเดียวกันกับขนาดของฟิล์ม ภาพถ่ายทางอากาศจะมีทั้งแบบภาพถ่ายในแนวดิ่ง และภาพถ่ายในแนวเฉียง ในที่นี้ผู้เขียนจะไม่ขอกล่าวในรายละเอียดของอุปกรณ์และเครื่องมือมากเกินไป แต่จะขอเน้นถึงวัตถุประสงค์ของการถ่ายภาพทางอากาศ และการแปลความหมายข้อมูลเป็นหลัก

วัตถุประสงค์ของการถ่ายภาพถ่ายทางอากาศ

1) เพื่อสำรวจและติดตามการเปลี่ยนแปลงด้านทรัพยากรธรรมชาติรวมถึงการใช้ที่ดิน

2) เพื่อสำรวจและจัดทำแผนที่ภูมิประเทศ

3) เพื่อภารกิจทางทหารและความมั่นคงของประเทศ

4) เพื่อการวางผังเมือง

การแปลความหมายข้อมูลจากภาพถ่ายทางอากาศ

1) รูปร่าง (shape) ของวัตถุที่เห็นจากภาพถ่ายทางอากาศ เช่นถนน ทางน้ำ ท้องทุ่งนา หรือตึก อาคารบ้านเรือน สามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจนจากภาพถ่ายทางอากาศ

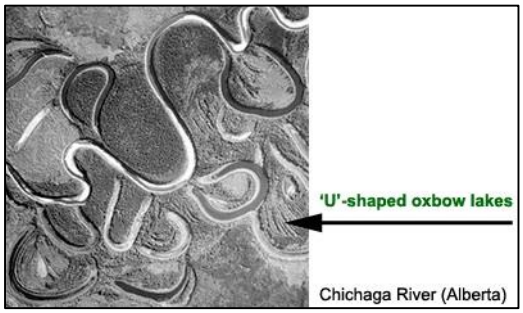
2) ถึงแม้ว่าถาพถ่ายทางอากาศที่นิยมใช้งานจะเป็นภาพขาว-ดำ แต่ความเข้มของสี (tone) ก็ซึ่งเป็นผลจากการสะท้อนแสงของวัตถุก็สามารถบ่งบอกความแตกต่างของวัตถุที่อยู่บนผิวดินได้ เช่นแหล่งน้ำเป็นสีเทาเข้ม แต่ถ้าน้ำลึกจะเป็นสีดำ หรือป่าทึบจะสะท้อนแสงได้น้อยจึงเห็นเป็นสีเข้มต่างจากดินที่ไม่มีต้นไม้ปกคลุมซึ่งจะสะท้อนแสงได้มากกว่า ในภาพถ่ายทางอากาศจึงมองเห็นเป็นสีขาว

3) เงา (shadow) ของวัตถุสามารถบ่งบอกถึงความสูง ขนาดของวัตถุได้ นอกจากนั้นยังสามารถบ่งบอกทิศทางของดวงอาทิตย์ในขณะถ่ายภาพได้อีกด้วยเช่นกัน

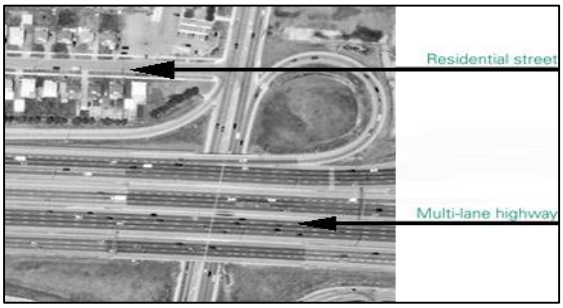
4) เนื้อภาพ (texture) จะบ่งบอกลักษณะทางกายภาพของวัตถุได้ เช่นน้ำนิ่งจะให้เนื้อภาพที่ดูเรียบ (smooth texture) ป่าไม้จะให้เนื้อภาพที่ดูขรุขระ (rough texture)
(ข้อมูลดัดแปลงจาก https://sites.google.com/site/nathchya2/phaph-cak-dawtheiym และ https://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air-photos/air-photos/about-aerial-photography/9689) รูปที่ 2-12 แสดงลักษณะต่าง ๆ ที่มองเห็นจากภาพถ่ายทางอากาศ

การแปลความหมายข้อมูลจากภาพถ่ายทางอากาศแบบ 3 มิติ

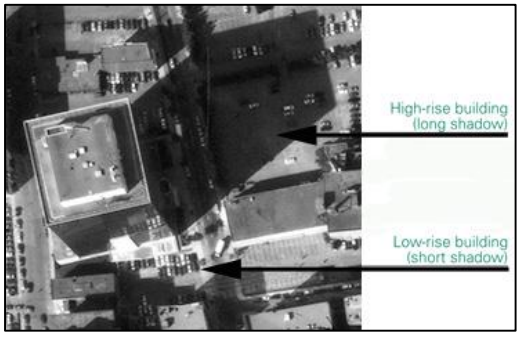
การแปลความหมายข้อมูลแบบ 3 มิติ ต้องมีองค์ประกอบคือภาพถ่ายทางอากาศที่มีพื้นที่ซ้อนทับกันแนวบินเดียวกัน (forward overlapping) ไม่น้อยกว่า 60 % และมีพื้นที่ซ้อนทับกันในแนวบินด้านข้าง (side overlapping) ประมาณ 20-40 % และการมองภาพให้เป็น 3 มิติ นั้น ต้องใช้กล้องที่เรียกว่า mirror stereoscope (ในสำนักงาน) หรือ pocket stereoscope (ในภาคสนาม) ในการมองภาพสองภาพที่มีพื้นที่ซ้อนทับกัน (ดัดแปลงจาก https://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air-photos/air-photos/about-aerial-photography/9689) รูปที่ 2-13 แสดงลักษณะการซ้อนทับกันของภาพถ่ายทางอากาศ 2 ภาพที่อยู่ในแนวบินเดียวกัน (Forward overlapping) และรูปที่ 2.14 แสดงลักษณะการแปลความหมายภาพถ่ายทางอากาศแบบ 3 มิติ พร้อมอุปกรณ์



(1)



(2)



(3)

(4)

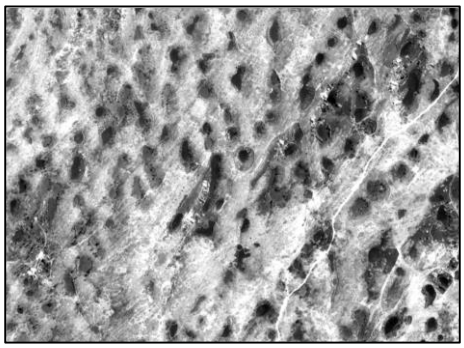
รูปที่ 2-12 แสดงลักษณะต่าง ๆ ที่มองเห็นและจำแนกได้จากภาพถ่ายทางอากาศ (1) ลักษณะที่ชัดเจนของ oxbow lakes (2) ขนาดที่แตกต่างของถนนในชุมชนกับถนนระหว่างเมือง (3) ขนาดของเงาอาคาร บอกความสูง-ต่ำของอาคาร เงายาวจะเป็นอาคารสูง เงาสั้นจะเป็นอาคารที่ไม่สูง และ (4) เนื้อภาพที่เรียบบ่งบอกถึงน้ำที่นิ่ง ส่วนเนื้อภาพที่ดูขรุขระแสดงพื้นที่ที่เป็นป่ารกทึบ (ที่มา https://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air-photos/air-photos/about-aerial-photography/9689)

รูปที่ 2-13 แสดงภาพถ่ายทางอากาศ 2 ภาพที่มีพื้นที่ซ้อนทับกันประมาณ 60 % (ภาพซ้ายคือพื้นที่ใต้เส้นสีแดง และภาพขวาคือพื้นที่เหนือเส้นสีแดง)

รูปที่ 2-14 แสดงการใช้กล้อง Mirror Stereoscope ในการแปลความหมายภาพถ่ายทางอากาศ 2 ภาพที่มีพื้นที่ซ้อนทับกันประมาณ 60 % ซึ่งจะทำให้มองเห็นภาพในส่วนที่ซ้อนทับกันเป็น 3 มิติ ทำให้รู้ความสูง-ต่ำของวัตถุที่อยู่บนภาพถ่ายทางอากาศได้

(3) ภาพถ่ายดาวเทียม (Satellite images)

ภาพถ่ายดาวเทียมจัดเป็นเครื่องมือทางภูมิศาสตร์อีกประเภทหนึ่งซึ่งเป็นภาพถ่ายที่ได้จากการบันทึกข้อมูลของดาวเทียมที่ส่งขึ้นไปโคจรรอบโลก พร้อมด้วยอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (sensor) ด้วยการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสื่อบันทึกข้อมูลในลักษณะของช่วงคลื่น ข้อมูลที่ได้จากภาพถ่ายดาวเทียมจะมีประโยชน์ต่อการพัฒนาประเทศและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในหลาย ๆ สาขา เช่นลักษณะภูมิประเทศ ธรณีวิทยา การเกษตร สิ่งแวดล้อม ป่าไม้ เป็นต้น เป็นการสำรวจแบบการรับรู้ระยะไกล (remote sensing) ภาพถ่ายจากดาวเทียมสามารถบ่งบอกลักษณะทางธรณีวิทยาได้เป็นอย่างดี ยกตัวอยางเช่นภาพถ่ายดาวเทียมของพื้นที่ที่ปกคลุมด้วยเทือกเขาหินปูน (karstic terrain) ที่จะเห็นแนวเขาที่มีลักษณะไม่ราบเรียบ หรือตะปุ่มตะป่ำ หรือเห็นแนวหลุมยุบ (sinkhole) ต่อเนื่องกันอย่างชัดเจน (รูปที่ 2-15)



รูปที่ 2-15 ภาพถ่ายดาวเทียมบริเวณที่เป็นเทือกเขาหินปูน (ซ้าย) และบริเวณที่เป็นแนวของหลุม ยุบ (sinkhole) กระจายอยู่เต็มพื้นที่ (ขวา)
(ที่มา ดัดแปลงจาก http://www.satit.up.ac.th/BBC07/AroundTheWorld/geo/19.htm)

(4) แผนที่ธรณีวิทยา (Geological Map / Geological Map)

แผนที่ธรณีวิทยาเป็นแผนที่พื้นฐานอย่างหนึ่งที่จะต้องเตรียมการสำหรับงานสำรวจและพัฒนาน้ำบาดาลในพื้นที่ที่ได้รับมอบหมาย เนื่องจากแผนที่ธรณีวิทยาสามารถให้ข้อมูลพื้นฐานด้านธรณีวิทยาให้กับผู้ศึกษาได้ค่อนข้างครบถ้วน (รูปที่ 2-16) แผนที่ธรณีวิทยาเป็นแผนที่ที่สร้างขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์โดยเฉพาะ ได้แก่ แสดงลักษณะทางธรณีวิทยา (geological features) ต่าง ๆ หน่วยหิน (rock unit) หรือชั้นหินทางธรณีวิทยา (geologic strata) ซึ่งโผล่ให้เห็นบนพื้นโลก (cropped out) จะถูกกำหนดให้แสดงโดยสีหรือสัญลักษณ์ที่แตกต่างกัน รอยต่อระหว่างชั้นหิน (bedding planes) และลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้าง (geologic structures) เช่นระนาบรอยเลื่อน (faults) โครงสร้างคดโค้ง (folds) ริ้วขนาน (foliations) โครงสร้างแนวเส้น (lineations) ในการทำแผนที่ธรณีวิทยา จะใช้แผนที่ภูมิประเทศมาตราส่วน 1:50,000 เป็นแผนที่พื้นฐาน (base map) แต่ที่ปรากฏให้เห็นในแผนที่ธรณีวิทยา มักจะคงไว้ซึ่งเส้นบอกระดับความสูงหลัก (index contour line) เท่านั้น แผนที่ธรณีวิทยาเป็นแผนที่ที่สร้างจากการแปลความหมายข้อมูลเบื้องต้นจากภาพถ่ายทางอากาศ ภาพถ่ายดาวเทียม และท้ายที่สุดได้ข้อมูลรายละเอียดจากการเดินสำรวจภาคสนาม แผนที่ธรณีวิทยาบอกข้อมูลที่เป็นประโยชน์ดังนี้

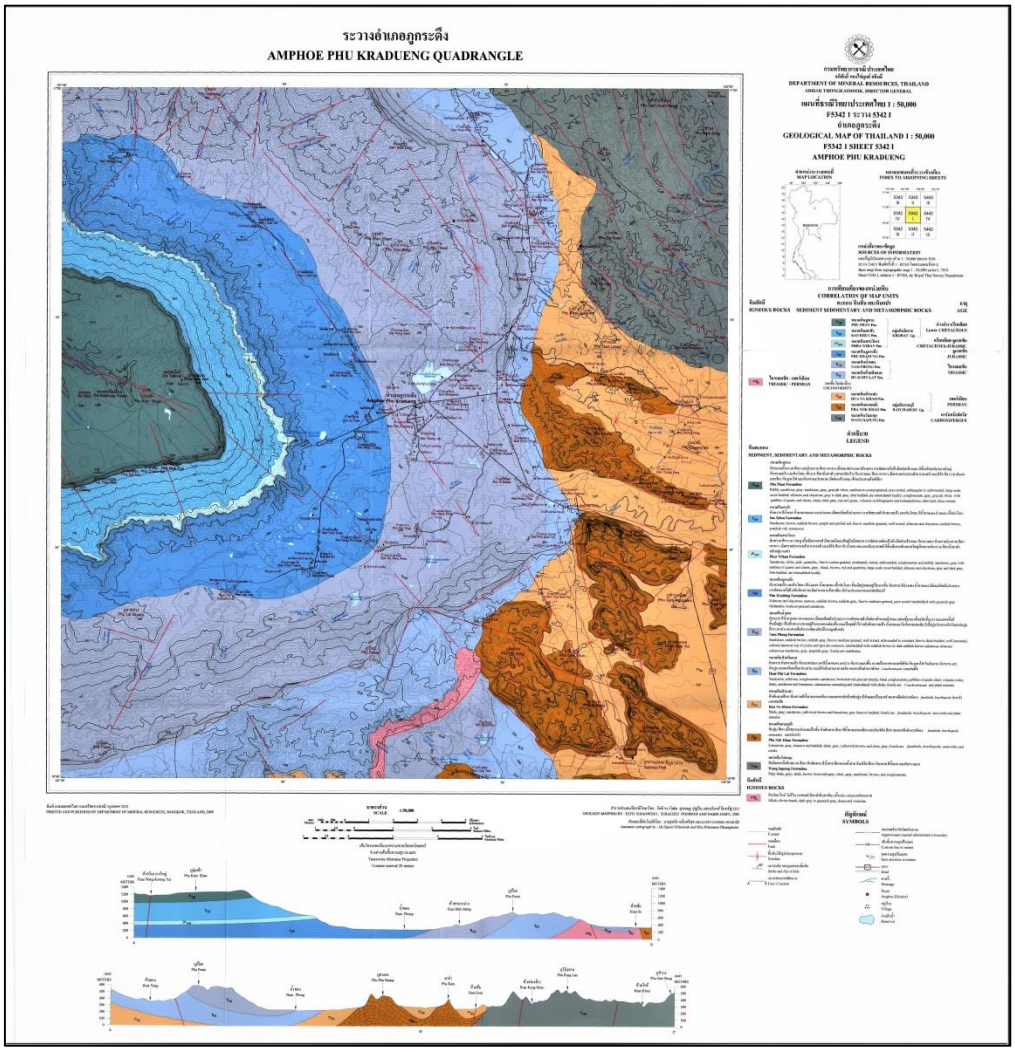
1) **ข้อมูลจำเป็นพื้นฐานทั่วไป (fundamental general information)** สำหรับแผนที่ธรณีวิทยามาตราส่วน 1:50,000 (รูปที่ 2-17) ได้แก่

- ที่ตั้งจังหวัด (province location) ที่ตั้งอำเภอ ตำแหน่งหมู่บ้าน ขอบเขตจังหวัด (โดยประมาณ)
- ถนน (roads) แสดงทั้งถนนสายหลัก และถนนสายรอง
- ทางรถไฟ (railroads)
- แม่น้ำ ทางน้ำ (rivers, streams)
- แหล่งน้ำ (water body) ได้แก่ทะเลสาบ (lake) อ่างเก็บน้ำ (reservoir) เป็นต้น
- เส้นชั้นความสูงหลัก (index contour lines) และเส้นชั้นความสูงรอง (intermediate contour lines) และจุดความสูง (spot elevation) มีหน่วยเป็นเมตร

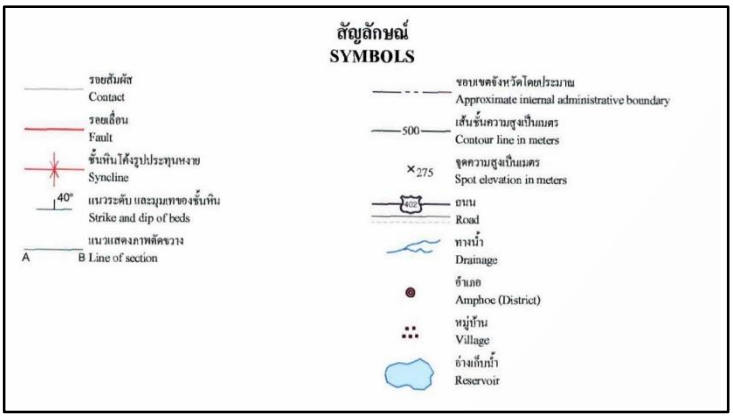
2) **ข้อมูลทางธรณีวิทยา (Geological Information)** ได้แก่

- หน่วยหิน (rock unit) บอกชนิดหินว่าบริเวณใด หินที่ปรากฏให้เห็นเป็นหินอะไร เช่นหินอัคนีประเภทใด หินตะกอนประเภทใด หรือหินแปรประเภทใด ซึ่งโดยทั่วไปแล้วหากผู้สำรวจจัดทำแผนที่สามารถพิสูจน์ทราบถึงอายุของหน่วยหินได้ ก็จะบอกเป็นหน่วยหินตามธรณีกาล (time-rock units) ซึ่งจะจำแนกออกจากกันโดยใช้สีซึ่งกำหนดตามมาตรฐานสากล และเขียนกำกับโดยสัญลักษณ์แสดงอายุหิน (รูปที่ 2-18) เช่น P หมายถึงหน่วยหินที่มีอายุเพอร์เมียน (Permian) หรือ T หมายถึงหน่วยหินที่มีอายุอยู่ในช่วงเทอร์เชียรี (Tertiary) นอกจากนั้นแผนที่ธรณีวิทยายังบอกการกระจายตัวของหน่วยหินอีกด้วย หลังสัญลักษณ์หรือตัวอักษรกำกับอายุแล้วจะมีตัวอักษรห้อย (subscript) ลงมาอีก 1 ชุดตัวอักษร ซึ่งจะบ่งบอกถึงชื่อของหมวดหิน (Formation) เช่น JK_{pw} ซึ่งบ่งบอกว่าเป็นหมวดหินพระวิหาร (Phra Wihan) มีอายุอยู่ระหว่างยุคจูแรสซิก (Jurassic: J) ต่อเชื่อมกับยุคครีเทเชียส (Cretaceous: K)
- ลักษณะทางธรณีวิทยา (geological features) ได้แก่ลักษณะทางธรณีวิทยาที่ปรากฏให้เห็นในพื้นที่ ข้อมูลจะได้จากการเดินสำรวจทางธรณีวิทยา (geological survey) และการวัด (measurement) ค่าต่าง ๆ เป็นหลักแล้วนำมาใส่ไว้ในแผนที่ให้ตรงกับตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ ข้อมูลทางธรณีวิทยาที่ปรากฏอยู่บนพื้นที่ได้แก่ (รูปที่ 2-19)

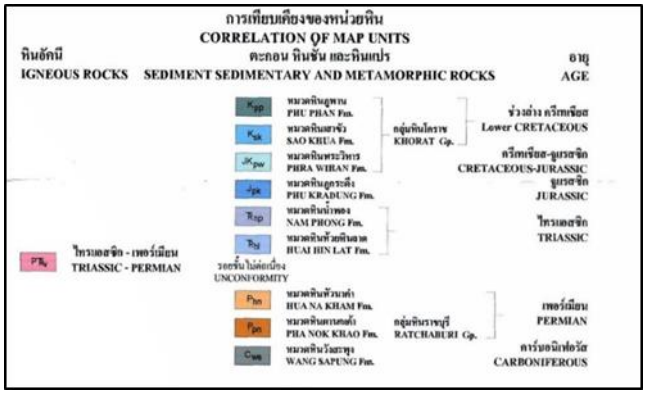
- ลักษณะการวางตัวของชั้นหิน (attitude of planes) หมายถึงการวางตัวเมื่อเทียบกับแนวระนาบของพื้นดินซึ่งก็คือ ชั้นแนวระดับ (strike) ของระนาบใด ๆ และมุมเท (dip) ของระนาบใด ๆ เป็นต้น บ่งบอกโดยใช้สัญลักษณ์และมีตัวเลขกำกับมุมเอียงเท และทิศทางของเส้นเมื่อเทียบกับทิศเหนือของแผนที่
- ระนาบรอยเลื่อน (fault) ซึ่งจะบ่งบอกโดยใช้สัญลักษณ์บนแผนที่ สามารถบ่งบอกได้ว่าเป็นแนวรอยเลื่อนปกติ (normal fault) รอยเลื่อนย้อน (reverse fault) แนวรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ (thrust fault) หรือรอยเลื่อนตามแนวระนาบ (strike-slip fault) เป็นต้น
- ชั้นหินโค้งรูปประทุน (anticline) หมายถึงโครงสร้างทางธรณีวิทยาแบบหนึ่งที่ชั้นหินมีลักษณะโค้งตัวเหมือนรูปประทุน ชั้นหินที่อยู่บริเวณใจกลางของชั้นหินโค้งรูปประทุนจะมีอายุแก่ที่สุด (พจนานุกรมศัพท์ธรณีวิทยา, 2540)
- ชั้นหินโค้งรูปประทุนหงาย (syncline) หมายถึงชั้นหินที่โค้งตัวเหมือนเอาประทุนเรือมาวางหงาย ชั้นหินที่อยู่ใจกลางของโค้งรูปประทุนหงายจะมีอายุอ่อนที่สุด (พจนานุกรมศัพท์ธรณีวิทยา, 2540)
- ภาพตัดขวางทางธรณีวิทยา (geological cross-section) คือ ภาคตัดขวางของพื้นที่บริเวณหนึ่งในแผนที่แสดงรูปด้านตัดของภูมิประเทศ (topographic profile) โดยจะแสดงการวางตัวของหน่วยหินต่าง ๆ และโครงสร้างทางธรณีวิทยาที่ลึกลงไปจากผิวโลก หรือข้อมูลธรณีวิทยาใต้ดิน เพื่อให้เห็นรายละเอียดทางธรณีวิทยาตามแนวที่ต้องการอย่างสมบูรณ์ (รูปที่ 2-20) ภาคตัดขวางนี้ประกอบเป็นส่วนหนึ่งของแผนที่ธรณีวิทยา (ที่มา : Wikipedia)



รูปที่ 2-16 แสดงองค์ประกอบของแผนที่ธรณีวิทยาที่ทั่วไป (มาตราส่วน 1:50,000)

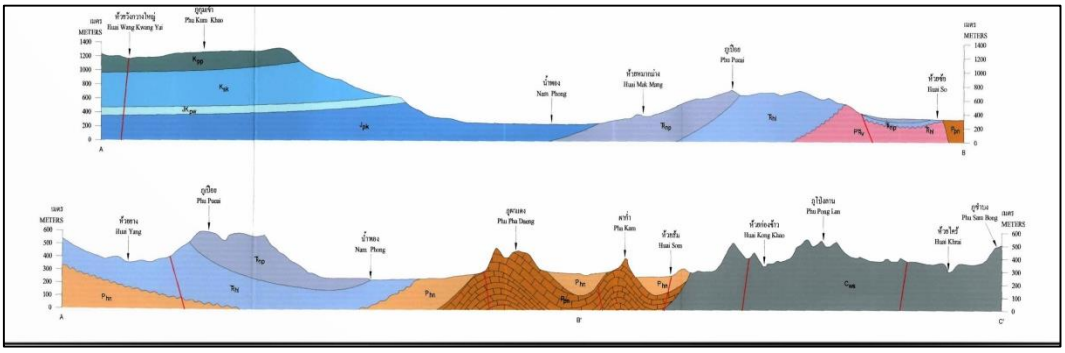


รูปที่ 2-17 แสดงสัญลักษณ์ที่ปรากฏอยู่บนแผนที่ธรณีวิทยาที่บอกข้อมูลทั่วไปและสัญลักษณ์เกี่ยวกับลักษณะทางธรณีวิทยา (geological features) ที่พบในพื้นที่



รูปที่ 2-18 แสดงการเทียบเคียงของหน่วยหินเรียงตามธรณีกาล (Geologic Time)

รูปที่ 2-19 แสดงรายละเอียดของหินของหน่วยหินต่าง ๆ เรียงตามธรณีกาล องค์ประกอบของหมวดหินและประเภทของหิน (หินตะกอนร่วนและหินตะกอน หินแปร ซึ่งจะอยู่ก่อนหินอัคนีเสมอ)



รูปที่ 2-20 แสดงภาพตัดขวางทางธรณีวิทยา (Geologic Cross-Section) ที่ปรากฏอยู่บนแผนที่ธรณีวิทยา ซึ่งสามารถบอกรายละเอียดถึงการวางตัวของหน่วยหินต่าง ๆ ความหนาโดยประมาณของหน่วยหิน ธรณีวิทยาโครงสร้างเช่นรอยเลื่อน ชั้นหินคดโค้ง และลักษณะภูมิประเทศที่แนวภาพตัดขวางลากผ่าน

(5) แผนที่น้ำบาดาล (Groundwater Map)

ระหว่างปี พ.ศ. 2530–2544 กองน้ำบาดาล กรมทรัพยากรธรณี ได้ดำเนินการสำรวจและจัดทำแผนที่น้ำบาดาลมาตราส่วน 1:100,000 โดยเริ่มต้นที่ 17 จังหวัดภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (จำนวนจังหวัดในขณะนั้น) ก่อน เนื่องจากด้วยปัจจัยทางด้านที่ตั้ง ลักษณะภูมิประเทศและลักษณะดินภาคตะวันออกเฉียงเหนือจึงเป็นพื้นที่ที่ประสบภัยแล้งรุนแรงกว่าภาคอื่น กองน้ำบาดาล กรมทรัพยากรธรณีในขณะนั้น (ปัจจุบันเป็นส่วนหนึ่งของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล) จึงได้ริเริ่มสำรวจและจัดทำแผนที่น้ำบาดาลมาตราส่วนดังกล่าวเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลของจังหวัด เนื่องจากข้อมูลในแผนที่น้ำบาดาลนั้นสามารถบอกได้ว่าในบริเวณใดรองรับด้วยหินให้น้ำประเภทใด ความลึกเท่าใด ปริมาณน้ำที่คาดว่าจะพัฒนาได้เท่าใด และคุณภาพน้ำบาดาลเป็นเช่นไร

ต่อมาในปี พ.ศ. 2552 กรมทรัพยากรน้ำบาดาลได้สำรวจและจัดทำแผนที่น้ำบาดาลรายละเอียดระดับจังหวัดขึ้นใหม่ ในมาตราส่วน 1:50,000 ของจังหวัดน่าน ครอบคลุม 27 ระวาง ในปี พ.ศ. 2553 กรมทรัพยากรน้ำบาดาลได้ดำเนินการครอบคลุมพื้นที่ใหญ่ขึ้น ในพื้นที่ลุ่มเจ้าพระยาตอนบน ครอบคลุมพื้นที่ 77 ระวาง ในปี พ.ศ. 2555 ถึง พ.ศ. 2559 ได้ดำเนินการในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือทั้งหมดโดยแบ่งเป็นตอนบน 82 ระวาง ตอนกลาง 90 ระวาง และตอนล่าง 85 ระวาง ซึ่งรวมกันแล้ว ณ ขณะนี้ กรมทรัพยากรน้ำบาดาลได้ดำเนินการไปแล้วเกือบครึ่งหนึ่งของประเทศ และยังอยู่ในแผนงานที่จะดำเนินการต่อไปในอนาคตอันใกล้นี้

การสำรวจและจัดทำแผนที่น้ำบาดาล นั้น จะใช้แผนที่ภูมิประเทศมาตราส่วน 1:50,000 เป็นแผนที่พื้นฐาน (base map) เช่นเดียวกับแผนที่ธรณีวิทยา และจะใช้แผนที่ธรณีวิทยาเป็นแนวทางในการกำหนดการกระจายตัวของชั้นหินให้น้ำเบื้องต้น ประกอบกับข้อมูลที่จัดเตรียมเบื้องต้นและการสำรวจเพิ่มเติมในภาคสนาม เช่นข้อมูลบ่อน้ำบาดาลที่มีอยู่ (existing boreholes data) ซึ่งได้แก่ตำแหน่งที่ตั้งทางภูมิศาสตร์ ความลึกถึงชั้นน้ำบาดาล (depth to aquifer) คุณภาพน้ำบาดาล (groundwater quality) ปริมาณน้ำบาดาล (well yield) และข้อมูลการบรรยายลักษณะดินหินจากหลุมเจาะ (drilled log of wells) มาใช้ในการกำหนดขอบเขตของชั้นหินให้น้ำ ความลึกของชั้นหินให้น้ำ คุณภาพน้ำบาดาล และปริมาณน้ำบาดาลที่คาดว่าจะพัฒนาได้ ความแม่นยำของการแปลความหมายข้อมูลในแผนที่น้ำบาดาลจะขึ้นอยู่กับปริมาณข้อมูลทุติยภูมิ (secondary data)

ที่มีอยู่ ข้อมูลปฐมภูมิ (primary data) ที่จัดหาเพิ่มเติมเช่นข้อมูลจากหลุมเจาะที่กำหนดให้เจาะใหม่ บวกกับความรู้ด้านธรณีวิทยา อุทกธรณีวิทยาและประสบการณ์ของผู้สำรวจและจัดทำแผนที่น้ำบาดาล นั้น ๆ แผนที่น้ำบาดาลบอกกล่าวข้อมูลที่เป็นประโยชน์ ดังนี้

1) **ข้อมูลพื้นฐานจำเป็นทั่วไป (Fundamental General Information)** ได้แก่
   - ที่ตั้งจังหวัด (province location) ที่ตั้งอำเภอ ขอบเขตตำบล ขอบเขตอำเภอ ขอบเขตจังหวัด ขอบเขตประเทศ และที่ตั้งหมู่บ้าน
   - ถนน (roads) ได้แก่ถนนสายหลัก (primary road) ถนนสายรอง (secondary road)
   - ทางรถไฟ (railroads)
   - แม่น้ำ ทางน้ำ (rivers, streams) เช่นทางน้ำไหลตลอดปี (perennial stream) ทางน้ำไหลไม่ตลอดปี (intermittent stream) เป็นต้น
   - แหล่งน้ำ (water body) ได้แก่ทะเลสาบ (lake) อ่างเก็บน้ำ (reservoir) เป็นต้น
   - เส้นชั้นความสูงหลัก (index contour lines) เช่นเส้นที่ 100, 200, 300 และเส้นชั้นความสูงรอง (intermediate contour lines)
   - ข้อมูลเบ็ดเตล็ดทั่วไป (miscellaneous information) ได้แก่ตำแหน่งของสิ่งปลูกสร้างต่าง ๆ เช่น โรงเรียน (school) วัดที่มีโบสถ์ (monastery: temple) วัดที่ไม่มีโบสถ์ (monastery: no temple) สำนักสงฆ์ (priest campsite) สถานีอนามัย (health station) เป็นต้น
   - จุดสำรวจธรณีฟิสิกส์แบบหยั่งลึก (vertical electrical resistivity sounding point: VES point)
2) **ข้อมูลด้านอุทกธรณีวิทยา (hydrogeological information)** ได้แก่
   - หน่วยหินทางอุทกธรณีวิทยา (hydrostratigraphic units) ซึ่งจะแสดงโดย<u>ลายเส้นสีน้ำตาล</u>ที่แสด<u>งสัญลักษณ์</u>ของประเภทชั้นหินให้น้ำ เช่นหินตะกอนที่เป็นหินทราย หินทรายแป้ง หินดินดาน หรือหินกรวดมน ก็จะมีสัญลักษณ์ที่แตกต่างกัน แต่จะถูกกำหนดโดยมาตรฐานที่กำหนดโดยสมาคมนักอุทกธรณีวิทยานานาชาติ (International Association of Hydrogeologists; IAH)
   - หน่วยหินทางอุทกธรณีวิทยาตามธรณีกาล (time-hydrostratigraphic units) ซึ่งแสดงโดย<u>ตัวอักษรกำกับอายุทางธรณีกาล</u>ของหน่วยหิน คล้ายกับที่ให้สัญลักษณ์กำกับหน่วยหินทางธรณีวิทยา และจะมีตัวอักษรที่พิมพ์เป็นตัวพิมพ์เล็ก ซึ่งเป็นอักษรย่อบ่งบอกถึงชื่อหมวดหินให้น้ำ (aquifer's name) ซึ่งก็จะตรงกับหมวดหิน (Formation) บนแผนที่ธรณีวิทยา ยกตัวอย่างเช่น J_{pk} จะหมายถึงหมวดหินให้น้ำภูกระดึง (Phu Kradung) อายุจูแรสซิก (Jurassic)
   - สัญลักษณ์แสดงบ่อน้ำบาดาลและตำแหน่งบ่อน้ำบาดาลเป็นวงกลมสีแดง ที่ผู้จัดทำได้นำข้อมูลมาใช้ในการแปลความหมายในการจัดทำแผนที่ บ่อน้ำบาดาลอาจเป็นบ่อน้ำบาดาลที่มีอยู่แล้ว (existing borehole) บ่อน้ำบาดาลที่เจาะใหม่ในโครงการฯ บริเวณสัญลักษณ์วงกลมสีแดงจะบอกข้อมูลหมายเลขบ่อน้ำบาดาล ความลึกของการเจาะ และระยะท่อกรองน้ำ เช่น JJ376/36/30-36 บ่อน้ำบาดาลที่ปรากฏบนแผนที่น้ำบาดาล มีทั้งบ่อที่เป็นบ่อผลิต (production well) บ่อสังเกตการณ์ (observation well) ที่เจาะคู่กับบ่อผลิต เพื่อทดสอบคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของชั้นน้ำบาดาลนั้น ๆ บ่อเจาะสำรวจโดยเก็บตัวอย่างแท่งหิน (testing borehole; core sample)
   - ดัชนีแสดงน้ำบาดาลที่หาได้ (Groundwater Availability Index) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญมากอันหนึ่งที่ปรากฏอยู่บนแผนที่น้ำบาดาลและเป็นประโยชน์มากต่อผู้ใช้แผนที่ เนื่องจากบ่งบอกข้อมูลสำคัญ 2 ส่วน ได้แก่คุณภาพน้ำบาดาล (groundwater quality) ซึ่งจะใช้ความเข้มข้นของปริมาณสารละลายมวลรวม (total dissolved solids: TDS) เป็นเกณฑ์ในการกำหนด โดยแบ่งเป็น 3 สีใน

แนวดิ่ง คือสีน้ำเงินจะหมายถึงน้ำบาดาลคุณภาพดี (TDS น้อยกว่า 500 มก./ล) สีเขียวหมายถึงน้ำบาดาลคุณภาพปานกลาง (TDS อยู่ระหว่าง 500-1,500 มก./ล.) และสีส้มหมายถึงน้ำบาดาลคุณภาพไม่ดี (TDS มากกว่า 1,500 มก./ล) และแนวนอนจะบอกปริมาณน้ำที่คาดว่าจะพัฒนาได้ (expected well yield) ซึ่งบ่งบอกโดยใช้ความเข้มของสีเป็นตัวกำหนด ดังนี้คือสีอ่อนมาก จะแทนปริมาณน้ำที่สามารถพัฒนาได้น้อยกว่า 2 ลบ.ม./ชม. สีอ่อน จะแทนปริมาณน้ำที่สามารถพัฒนาได้น้อยกว่า 2-10 ลบ.ม./ชม. สีเข้ม จะแทนปริมาณน้ำที่สามารถพัฒนาได้น้อยกว่า 10-20 ลบ.ม./ชม. และสีเข้มมาก จะแทนปริมาณน้ำที่สามารถพัฒนาได้มากกว่า 20 ลบ.ม./ชม. ยกตัวอย่างเช่น พื้นที่ที่แสดงโดยสีฟ้าอ่อนสุด จะเป็นดัชนีที่บ่งบอกว่าน้ำบาดาลคุณภาพดีแต่มีปริมาณน้ำน้อย (น้อยกว่า 2 ลบ.ม./ชม.) พื้นที่ที่แสดงโดยสีฟ้าเข้มมาก หมายถึงน้ำบาดาลคุณภาพดีและสามารถพัฒนาน้ำบาดาลได้ในปริมาณมาก (มากกว่า 20 ลบ.ม./ชม.) หรือพื้นที่ที่แสดงโดยสีส้มเข้ม จะได้น้ำบาดาลที่คุณภาพไม่ดี และปริมาณน้ำที่คาดว่าจะพัฒนาได้จะอยู่ระหว่าง 10-20 ลบ.ม./ชม.)

- ภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยา (hydrogeological cross-section) เป็นภาพตัดขวางที่ผู้จัดทำสร้างขึ้นในรูปแบบ 2 มิติ โดยพยายามลากเส้นตัดผ่านพื้นที่ที่มีข้อมูลหลุมเจาะมากที่สุด ทั้งนี้เพื่อให้ภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยามีความถูกต้องแม่นยำที่สุด การแปลความหมายก็จะใช้ความรู้ทางธรณีวิทยาประกอบด้วย ได้แก่การเรียงลำดับชั้นหิน หรือธรณีวิทยาโครงสร้างที่ตัดผ่านพื้นที่ในแผนที่ ในภาพตัดขวางจะลงข้อมูลบ่อน้ำบาดาลเพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงหน่วยหินให้น้ำ พื้นผิวของภาพตัดขวางจะแสดงลักษณะภูมิประเทศเช่นเดียวกับภาพตัดขวางทางธรณีวิทยา
- เนื่องจากข้อมูลคุณภาพน้ำ ผู้จัดทำใช้ข้อมูลปริมาณสารละลายมวลรวมเป็นตัวบ่งบอกคุณภาพน้ำ แต่ในสภาพความเป็นจริงสารละลายมวลรวมไม่สามารถบอกได้ว่ามีสารละลายชนิดไหนบ้างที่เป็นส่วนประกอบของสารละลายมวลรวม นั้น เช่นเป็นสารละลายเหล็ก (iron content) หรือเป็นความกระด้างทั้งหมด (total hardness content) หรือว่าเป็นสารอื่นเช่นคลอไรด์ (chloride content) ดังนั้นในแผนที่น้ำบาดาลที่จัดทำขึ้น จะแสดงแผนที่คุณภาพน้ำขนาดเล็ก (supplementary maps) เพื่อแสดงข้อมูลคุณภาพน้ำของสารละลายอื่นดังกล่าวในแผนที่น้ำบาดาลด้วยเช่นกัน นอกเหนือจากนี้ ยังมีแผนที่เล็กอีก 2 แผนที่ ที่มีประโยชน์มากเช่นกัน ได้แก่แผนที่แสดงความน่าเชื่อถือของข้อมูล (data reliability map) และแผนที่แสดงตำแหน่งของบ่อน้ำบาดาลที่ใช้งานได้ (groundwater well map)
- ตารางสรุปชนิดของหินให้น้ำและความลึกสำหรับเจาะบ่อน้ำบาดาล ตารางนี้จะช่วยให้ข้อมูลแยกออกมาเป็นรายจังหวัด อำเภอและตำบล ที่มีพื้นที่ครอบคลุมอยู่ในแผนที่ระวางนั้น ๆ ทั้งนี้ในแต่ละอำเภอหรือแต่ละจังหวัดจะอาจมีชั้นหินให้น้ำหลายประเภท หากผู้ใช้อ่านจากแผนที่โดยตรง อาจเกิดความสับสนได้ ดังนั้นผู้จัดทำจึงได้สรุปออกมาเป็นตารางให้ผู้ใช้แผนที่เข้าใจได้ง่ายขึ้น ยกตัวอย่างเช่น จังหวัดเลย อำเภอผาขาว หากเป็นตำบลผาขาว จะได้น้ำบาดาลจากหินปูนและหินดินดาน ที่ความลึกประมาณ 15-24 เมตร ในตำบลเดียวกัน หากเป็นหินทราย หินดินดาน หินควอร์ตไซต์ และหินเชิร์ต จะได้น้ำบาดาลอยู่ที่ช่วงความลึก 30-55 เมตร แต่หากเป็นตำบลโนนปอแดง จะได้น้ำจากหินทราย หินดินดาน หินควอร์ตไซต์ และหินเชิร์ต จะได้น้ำบาดาลที่ความลึก 20-35 และ 45-60 เมตร
- ข้อมูลลักษณะโครงสร้างทางอุทกธรณีวิทยา (hydrogeological structures) ที่ปรากฏอยู่ในแผนที่น้ำบาดาล ส่วนใหญ่จะบอกเกี่ยวกับรอยเลื่อนประเภทต่าง ๆ เช่นรอยเลื่อนทำหน้าที่เป็นทางลำเลียงน้ำ (fault behaves as water conduit) รอยเลื่อนทำหน้าที่ให้น้ำไหลผ่านได้ (fault

behaves as water flow through) รอยเลื่อนทำหน้าที่เป็นแนวคันกั้นน้ำ (fault behaves as water barrier) นอกจากนั้นยังบอกโครงสร้างที่เป็นชั้นหินโค้งรูปประทุน (anticline) และชั้นหินโค้งรูปประทุนหงาย (syncline) เช่นเดียวกับที่ปรากฏบนแผนที่ธรณีวิทยา

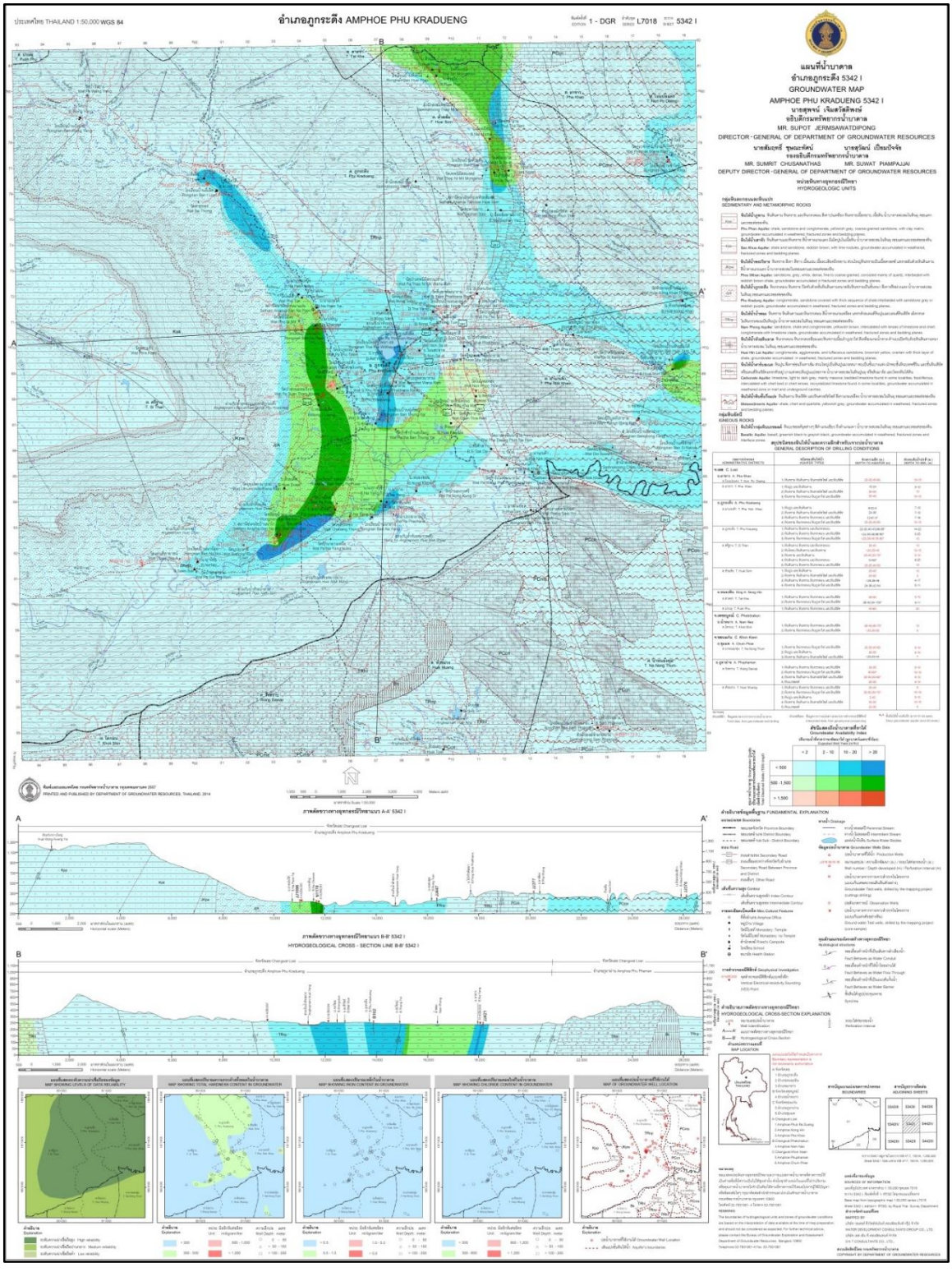
(6) แผนที่อุทกธรณีวิทยา (hydrogeological map)

แผนที่อุทกธรณีวิทยา โดยวัตถุประสงค์ดั้งเดิมในการจัดทำแล้วถือเป็นแผนที่พื้นฐานในการให้ข้อมูลทางอุทกธรณีวิทยา ซึ่งได้แก่ประเภทของชั้นหินให้น้ำ ปริมาณน้ำบาดาล แต่จะไม่บอกเกี่ยวกับคุณภาพน้ำบาดาล รูปแบบ (Patterns) ของแผนที่อุทกธรณีวิทยาจะถูกกำหนดโดยมาตรฐานของสมาคมนักอุทกธรณีวิทยานานาชาติ (International Association of Hydrogeologists; IAH) ซึ่งกำหนดให้เป็นรูปแบบมาตรฐานของแผนที่อุทกธรณีวิทยาทั่วโลก ไม่ว่าจะเป็นแผนที่มาตราส่วนใด ยกเว้นแผนที่อุทกธรณีวิทยาที่เพิ่มบางรายละเอียดเช่นแผนที่อุทกธรณีวิทยาเทือกเขาหินปูน (Karst Hydrogeological Map) ซึ่งอาจเพิ่มรายละเอียดเกี่ยวกับประเภทของชั้นหินให้น้ำ เช่นน้ำบาดาลที่ไหลในระบบโถงถ้ำใต้ดิน (groundwater in underground conduit) เป็นต้น แต่ในที่นี้ผู้เขียนจะอธิบายเฉพาะแผนที่อุทกธรณีวิทยา มาตราส่วน 1:50,000 ที่จัดทำโดยกรมทรัพยากรน้ำบาดาล ตามมาตรฐานสากลเท่านั้น แผนที่อุทกธรณีวิทยาบอกกล่าวข้อมูลที่เป็นประโยชน์ดังนี้

1) **ข้อมูลจำเป็นพื้นฐานทั่วไป (fundamental general information)** จะอธิบายเช่นเดียวกับแผนที่น้ำบาดาล ได้แก่
- ที่ตั้งจังหวัด (province location) ที่ตั้งอำเภอ ขอบเขตตำบล ขอบเขตอำเภอ ขอบเขตจังหวัด ขอบเขตประเทศ และที่ตั้งหมู่บ้าน
- ถนน (roads) ได้แก่ถนนสายหลัก (primary road) ถนนสายรอง (secondary road)
- ทางรถไฟ (railroads)
- แม่น้ำ ทางน้ำ (rivers, streams) เช่นทางน้ำไหลตลอดปี (perennial stream) ทางน้ำไหลไม่ตลอดปี (intermittent stream) เป็นต้น
- แหล่งน้ำ (water body) ได้แก่ทะเลสาบ (lake) อ่างเก็บน้ำ (reservoir) เป็นต้น
- เส้นชั้นความสูงหลัก (index contour lines) เช่นเส้นที่ 100, 200, 300 และเส้นชั้นความสูงรอง (intermediate contour lines)
- ข้อมูลเบ็ดเตล็ดทั่วไป (miscellaneous information) ได้แก่ตำแหน่งของสิ่งปลูกสร้างต่าง ๆ เช่น โรงเรียน (school) วัดที่มีโบสถ์ (monastery: temple) วัดที่ไม่มีโบสถ์ (monastery: no temple) สำนักสงฆ์ (priest campsite) สถานีอนามัย (health station) เป็นต้น
- จุดสำรวจธรณีฟิสิกส์แบบหยั่งลึก (vertical electrical resistivity sounding point: VES point)

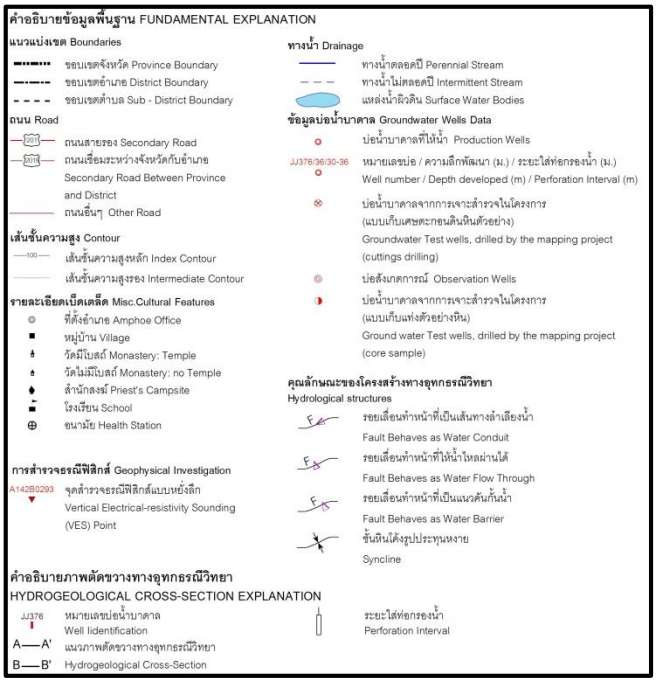
2) **ข้อมูลด้านอุทกธรณีวิทยา (hydrogeological information)**
- หน่วยหินในและหน่วยหินทางอุทกธรณีวิทยาตามธรณีกาลในแผนที่อุทกธรณีวิทยา นั้นจะอธิบายเช่นเดียวกับที่แสดงในแผนที่แผนที่น้ำบาดาล
- สำหรับสีที่แตกต่างกันนั้น จะใช้ในการบ่งบอกชนิดของหินให้น้ำ ได้แก่สีฟ้าจะแสดงชั้นหินให้น้ำที่เป็นหินร่วนหรือชั้นหินให้น้ำที่มีรูปพรุนและยังไม่แข็งตัว (porous aquifer) สีเขียวจะแสดงชั้นหินให้น้ำที่เป็นหินตะกอนที่ได้น้ำจากรอยแตก (fissured aquifer) และสีน้ำตาลจะแสดงชั้นหินให้น้ำที่เป็นหินแข็งแต่กระจายตัวเป็นบริเวณแคบ หรือชั้นหินให้น้ำที่เกิดเฉพาะแห่ง (local aquifer) เท่านั้น

- ความเข้มของสีนั้น หากเป็นหินร่วนและหินตะกอนที่มีรอยแตก สีอ่อนจะแสดงถึงปริมาณน้ำน้อย สีเข้มจะแสดงปริมาณน้ำมาก แต่สำหรับชั้นหินให้น้ำที่เกิดเฉพาะที่ สีอ่อนจะแสดงปริมาณน้ำมาก และสีเข้มจะแสดงปริมาณน้ำน้อย ซึ่งเป็นมาตรฐานที่กำหนดโดยสมาคมนักอุทกธรณีวิทยานานาชาติ (International Association of Hydrogeologists; IAH)
- สัญลักษณ์แสดงบ่อน้ำบาดาลและตำแหน่งบ่อน้ำบาดาลเป็นวงกลมสีแดง ที่ผู้จัดทำได้นำข้อมูลมาใช้ในการแปลความหมายในการจัดทำแผนที่ บ่อน้ำบาดาลอาจเป็นบ่อน้ำบาดาลที่มีอยู่แล้ว (existing borehole) บ่อน้ำบาดาลที่เจาะใหม่ในโครงการฯ บริเวณสัญลักษณ์วงกลมสีแดงจะบอกข้อมูลหมายเลยบ่อน้ำบาดาล ความลึกของการเจาะ และระยะท่อกรองน้ำ เช่น JJ376/36/30-36 บ่อน้ำบาดาลที่ปรากฏบนแผนที่น้ำบาดาล มีทั้งบ่อที่เป็นบ่อผลิต (production well) บ่อสังเกตการณ์ (observation well) ที่เจาะคู่กับบ่อผลิต เพื่อทดสอบคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของชั้นน้ำบาดาลนั้น ๆ บ่อเจาะสำรวจโดยเก็บตัวอย่างแท่งหิน (testing borehole; core sample)
- ภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยา (hydrogeological cross-section) เป็นภาพตัดขวางที่ผู้จัดทำสร้างขึ้นในรูปแบบ 2 มิติ โดยพยายามลากเส้นตัดผ่านพื้นที่ที่มีข้อมูลหลุมเจาะมากที่สุด ทั้งนี้เพื่อให้ภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยามีความถูกต้องแม่นยำที่สุด การแปลความหมายกจะใช้ความรู้ทางธรณีวิทยาประกอบด้วย ได้แก่การเรียงลำดับชั้นหิน หรือธรณีวิทยาโครงสร้างที่ตัดผ่านพื้นที่ในแผนที่ ในภาพตัดขวางจะลงข้อมูลบ่อน้ำบาดาลเพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงหน่วยหินให้น้ำ พื้นผิวของภาพตัดขวางจะแสดงลักษณะภูมิประเทศเช่นเดียวกับภาพตัดขวางทางธรณีวิทยา
- เนื่องจากแผนที่อุทกธรณีวิทยาเป็นแผนที่ที่จัดทำขึ้นเพื่อตอบสนองการใช้งานของนักวิชาการเป็นหลักและรายละเอียดสำคัญบางประการไม่สามารถนำมาซ้อนทับในตัวแผนที่หลักได้ เนื่องจากจะทำให้แผนที่ดูเลอะเทอะเกินไป ผู้จัดทำจึงได้ใส่ข้อมูลสำคัญอื่นๆ เป็นแผนที่ขนาดเล็ก (supplementary maps) จำนวน 5 ประเภทข้อมูล ได้แก่แผนที่แสดงแบบจำลองความสูงของระดับภูมิประเทศ (digital elevation model (DEM) map) แผนที่แสดงค่าสัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำ (transmissivity (T) map) แผนที่แสดงค่าปริมาณน้ำจำเพาะ (specific capacity (Sc) map) แผนที่แสดงระดับและทิศทางการไหลของน้ำบาดาล (groundwater level and groundwater flow direction map) และแผนที่สุดท้ายคือแผนที่แสดงชนิดของน้ำบาดาล (groundwater type map)

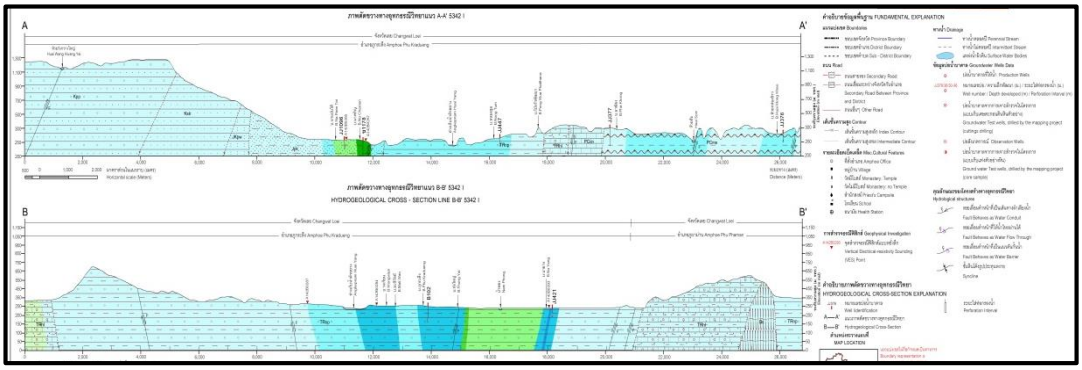


รูปที่ 2-21 แสดงลักษณะของแผนที่น้ำบาดาล (Groundwater Map) แสดงชนิดของชั้นหินให้น้ำ ลักษณะทางอุทกธรณีวิทยา และองค์ประกอบที่สำคัญอย่างครบถ้วน

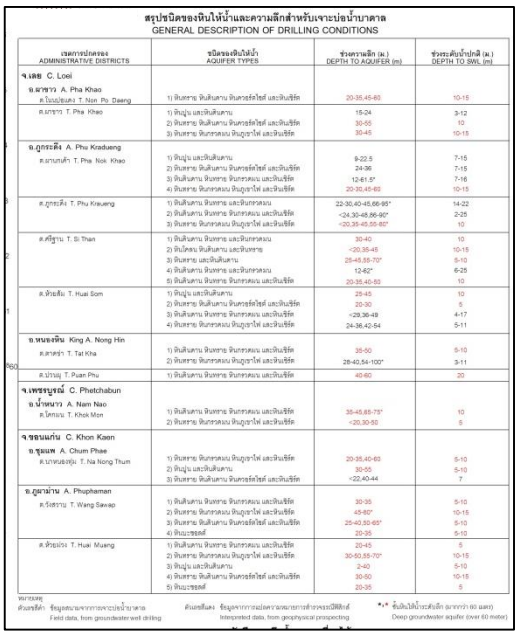
รูปที่ 2-22 แสดงตัวอย่างของหน่วยหินให้น้ำตามธรณีกาล พร้อมคำอธิบายลักษณะหน่วยหิน ในแผนที่น้ำบาดาล



รูปที่ 2-23 แสดงคำอธิบายสัญลักษณ์ที่สำคัญต่าง ๆ ในแผนที่น้ำบาดาล ประกอบด้วยข้อมูลพื้นฐาน โครงสร้างทางอุทกธรณีวิทยา ข้อมูลเกี่ยวกับบ่อน้ำบาดาล และภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยา



รูปที่ 2-24 แสดงภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยาในแผนที่น้ำบาดาล

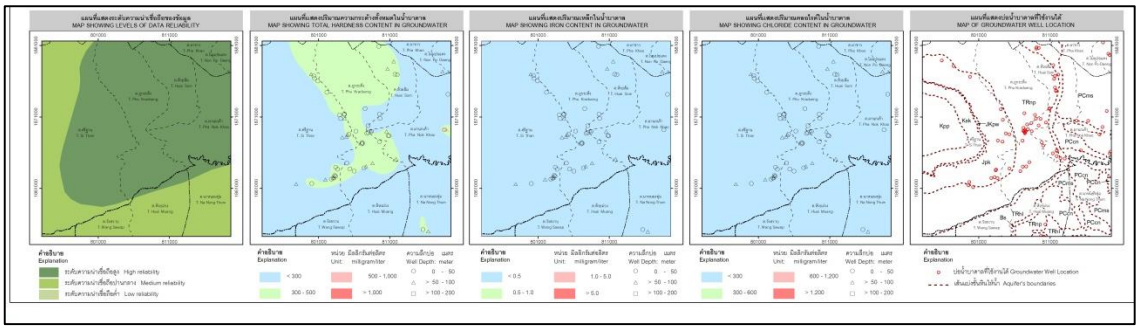


สรุปชนิดของหินให้น้ำและความลึกสำหรับเจาะบ่อน้ำบาดาล
GENERAL DESCRIPTION OF DRILLING CONDITIONS

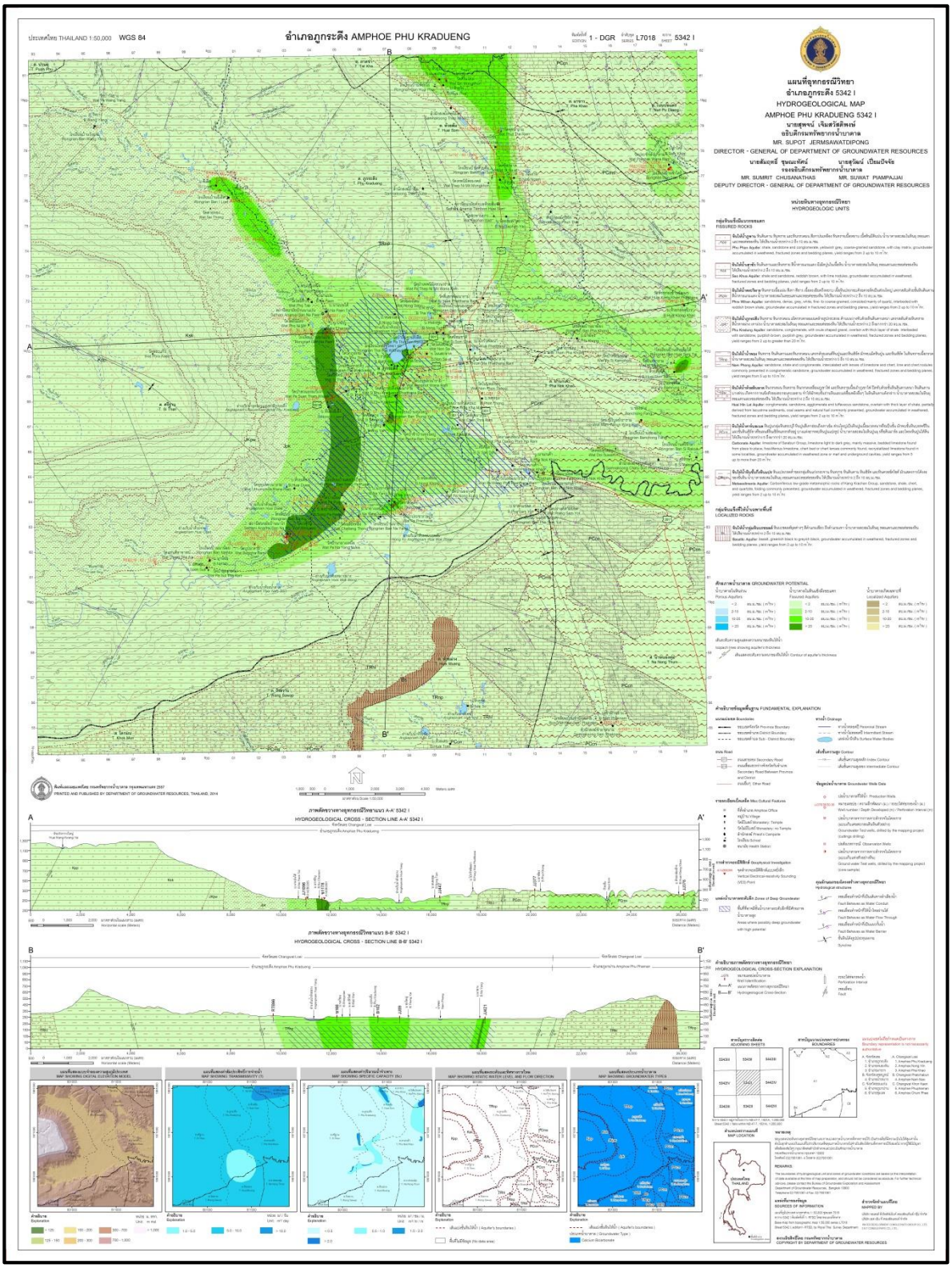
เขตการปกครอง ADMINISTRATIVE DISTRICTS	ชนิดของหินให้น้ำ AQUIFER TYPES	ช่วงความลึก (ม.) DEPTH TO AQUIFER (m)	ช่วงระดับน้ำปกติ (ม.) DEPTH TO SWL (m)
จ.เลย C. Loei			
อ.ผาขาว A. Pha Khao			
ต.โนนป่อแดง T. Non Po Daeng	1) หินทราย หินดินดาน หินทรวงไรไซต์ และหินชีร์ต	20-35,45-60	10-15
ต.ผาขาว T. Pha Khao	1) หินปูน และหินดินดาน 2) หินทราย หินดินดาน หินทรวงไรไซต์ และหินชีร์ต 3) หินทราย หินกรวดมน หินภูเขาไฟ และหินชีร์ต	15-24 30-55 30-45	3-12 10 10-15
อ.ภูกระดึง A. Phu Kradueng			
ต.นามน้ำก้ำ T. Pha Nok Khao	1) หินปูน และหินดินดาน 2) หินทราย หินดินดาน หินทรวงไรไซต์ และหินชีร์ต 3) หินดินดาน หินทราย หินกรวดมน และหินชีร์ต 4) หินทราย หินกรวดมน หินภูเขาไฟ และหินชีร์ต	9-22.5 24-36 12-41.5* 20-30,45-60	7-15 7-15 7-16 10-15
ต.ภูกระดึง T. Phu Kraueng	1) หินดินดาน หินทราย และหินกรวดมน 2) หินดินดาน หินทราย หินกรวดมน และหินชีร์ต 3) หินทราย หินกรวดมน หินภูเขาไฟ และหินชีร์ต	22-30,40-45,66-95* <24,30-46,66-90* <20,35-45,55-80*	14-22 2-25 10
ต.ศรีฐาน T. Si Than	1) หินดินดาน หินทราย และหินกรวดมน 2) หินโคลน หินดินดาน และหินทราย 3) หินทราย และหินดินดาน 4) หินดินดาน หินทราย และหินกรวดมน 5) หินดินดาน หินทราย หินกรวดมน และหินชีร์ต	30-40 <20,35-45 25-45,55-70* 12-62* 20-35,40-60	10 10-15 5-10 6-25 10
ต.ห้วยส้ม T. Huai Som	1) หินปูน และหินดินดาน 2) หินทราย หินดินดาน หินทรวงไรไซต์ และหินชีร์ต 3) หินดินดาน หินทราย หินกรวดมน และหินชีร์ต 4) หินทราย หินกรวดมน หินภูเขาไฟ และหินชีร์ต	25-45 20-30 <29,36-49 24-36,42-54	10 5 4-17 5-11
อ.หนองหิน King A. Nong Hin			
ต.ตาดข่า T. Tat Kha	1) หินดินดาน หินทราย หินกรวดมน และหินชีร์ต 2) หินทราย หินกรวดมน หินภูเขาไฟ และหินชีร์ต	35-50 28-40,54-100*	5-10 3-11
ต.ปวนพุ T. Puan Phu	1) หินดินดาน หินทราย หินกรวดมน และหินชีร์ต	40-60	20
จ.เพชรบูรณ์ C. Phetchabun			
อ.น้ำหนาว A. Nam Nao			
ต.โคกมน T. Khok Mon	1) หินดินดาน หินทราย หินกรวดมน และหินชีร์ต 2) หินทราย หินกรวดมน หินภูเขาไฟ และหินชีร์ต	35-45,65-75* <20,30-50	10 5
จ.ขอนแก่น C. Khon Kaen			
อ.ชุมแพ A. Chum Phae			
ต.นาทอนธุญ T. Na Nong Thun	1) หินทราย หินกรวดมน หินภูเขาไฟ และหินชีร์ต 2) หินปูน และหินดินดาน 3) หินทราย หินดินดาน หินทรวงไรไซต์ และหินชีร์ต	20-35,40-60 30-55 <22,40-44	5-10 5-10 7
อ.ภูผาม่าน A. Phuphaman			
ต.วังสวาย T. Wang Sawap	1) หินดินดาน หินทราย หินกรวดมน และหินชีร์ต 2) หินทราย หินกรวดมน หินภูเขาไฟ และหินชีร์ต 3) หินทราย หินดินดาน หินทรวงไรไซต์ และหินชีร์ต 4) หินประชอดส์	30-35 45-60* 25-40,50-65* 20-35	5-10 10-15 5-10 5-10
ต.ห้วยม่วง T. Huai Muang	1) หินดินดาน หินทราย หินกรวดมน และหินชีร์ต 2) หินทราย หินกรวดมน หินภูเขาไฟ และหินชีร์ต 3) หินปูน และหินดินดาน 4) หินทราย หินดินดาน หินทรวงไรไซต์ และหินชีร์ต 5) หินประชอดส์	20-45 30-60,65-70* 2-40 30-50 20-35	5 10-15 5-10 10-15 5

หมายเหตุ
ตัวเลขธรรมดา ข้อมูลสนามจากการขุดบ่อน้ำบาดาล Field data, from groundwater well drilling
ตัวเลขเอียง ข้อมูลจากการแปลความหมายการสำรวจธรณีฟิสิกส์ Interpreted data, from geophysical prospecting
, ชั้นหินให้น้ำระดับลึก (มากกว่า 60 เมตร) Deep groundwater aquifer (over 60 meter)

รูปที่ 2-25 ตารางสรุปชนิดของชั้นหินให้น้ำและความลึกของบ่อน้ำบาดาล

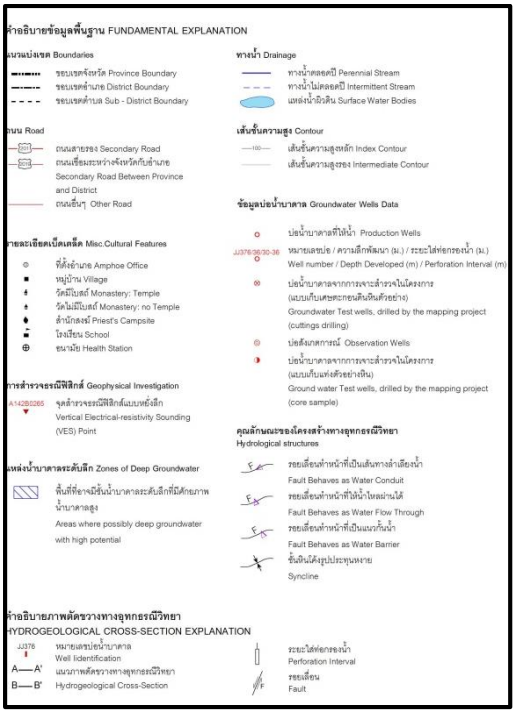


รูปที่ 2-26 แผนที่ขนาดเล็กในแผนที่น้ำบาดาลที่แสดงลักษณะสำคัญอื่น แต่ไม่ได้นำมาซ้อนทับในแผนที่หลัก



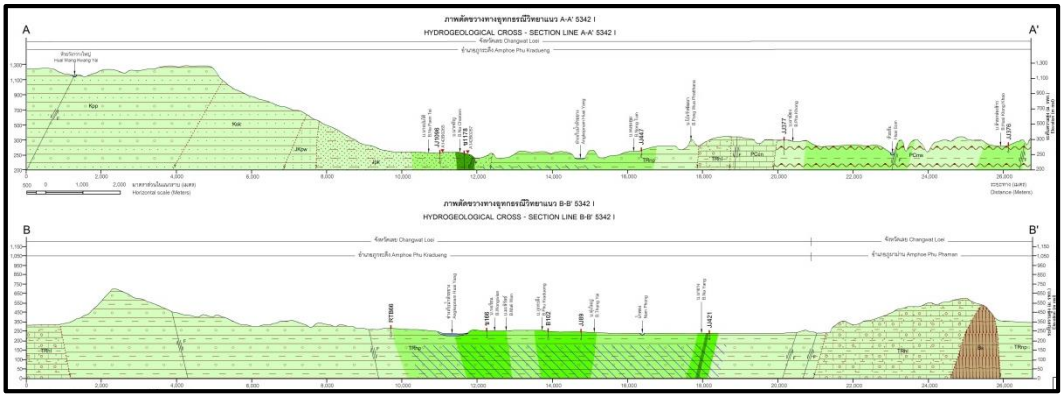
รูปที่ 2-27 แสดงลักษณะของแผนที่อุทกธรณีวิทยา (Hydrogeological Map) แสดงชนิดของชั้นหินให้น้ำ ลักษณะทางอุทกธรณีวิทยา และองค์ประกอบที่สำคัญอย่างครบถ้วน

รูปที่ 2-28 แสดงตัวอย่างของหน่วยหินให้น้ำตามธรณีกาล พร้อมคำอธิบายลักษณะหน่วยหิน ในแผนที่อุทกธรณีวิทยา

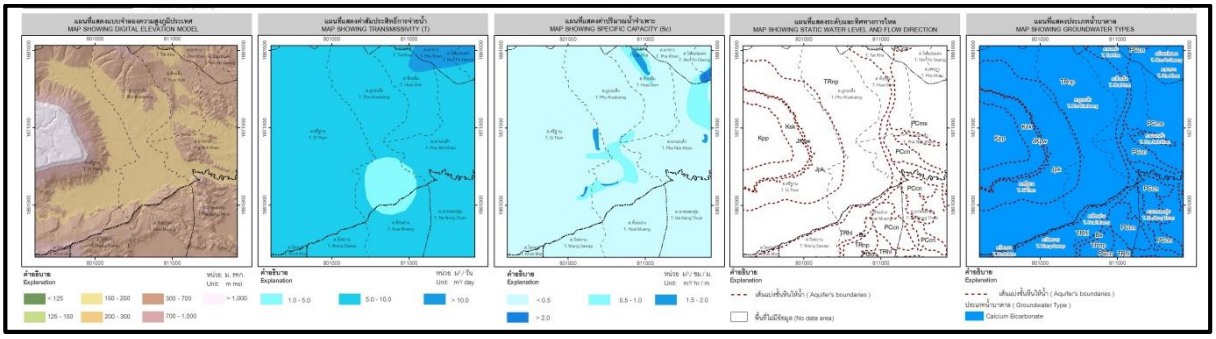


รูปที่ 2-29 แสดงคำอธิบายสัญลักษณ์ที่สำคัญต่าง ๆ ในแผนที่อุทกธรณีวิทยา ประกอบด้วยข้อมูลพื้นฐาน โครงสร้างทางอุทกธรณีวิทยา ข้อมูลเกี่ยวกับบ่อน้ำบาดาล และภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยา

รูปที่ 2-30 แสดงข้อมูลสรุปประเภทของชั้นหินให้น้ำและปริมาณน้ำบาดาลในแผนที่อุทกธรณีวิทยา



รูปที่ 2-31 แสดงภาพตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยาในแผนที่อุทกธรณีวิทยา



รูปที่ 2-32 แผนที่ขนาดเล็กในแผนที่อุทกธรณีวิทยาที่แสดงลักษณะสำคัญอื่น แต่ไม่ได้นำมาซ้อนทับในแผนที่หลัก

2.3 การจัดเตรียมอุปกรณ์สำรวจภาคสนาม (preparation of field equipment)

เมื่อได้เตรียมข้อมูลเบื้องต้นตามหัวข้อ 2.1 และ 2.2 โดยครบถ้วนแล้ว คราวนี้ก็ต้องถึงเวลาที่ต้องจัดเตรียมอุปกรณ์เพื่อออกปฏิบัติงานกันในภาคสนาม ซึ่งผู้เขียนได้จัดแบ่งออกเป็น 3 หมวด ได้แก่ อุปกรณ์สำรวจทางธรณีวิทยา อุปกรณ์สำรวจทางอุทกธรณีวิทยา และอุปกรณ์สำรวจทางธรณีฟิสิกส์บนผิวดิน ซึ่งอุปกรณ์ทั้ง 3 หมวดนี้ มีความจำเป็นอย่างมากสำหรับผู้ที่ปฏิบัติงานภาคสนาม

2.3.1 อุปกรณ์สำรวจทางธรณีวิทยา (geological survey equipment)

เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญและจำเป็นสำหรับนักสำรวจ หรือนักธรณีวิทยาที่ใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติของหินและเกี่ยวกับลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างของหินที่โผล่ให้เห็น (outcrops) ในพื้นที่ที่ดำเนินการ (รูปที่ 2-33) อุปกรณ์ที่สำคัญได้แก่ค้อนธรณีวิทยา (geologist’s hammer) ซึ่งมีไว้เพื่อทุบหินให้หลุดออกมาจากมวลหินที่โผล่ให้เห็นให้ได้ขนาดพอดีกับฝ่ามือที่จับถือสะดวก (hand specimen) ขนาดกว้าง*ยาว ประมาณ 2.5*2.5 ตารางนิ้ว อุปกรณ์ถัดมาจะเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบเนื้อหิน (texture) ซึ่งการมองด้วยตาเปล่า อาจมองไม่เห็นชัดเจน ไม่เห็นรูปผลึกในเนื้อหินดังนั้นจึงต้องใช้อุปกรณ์ช่วยขยายหรือ magnifier glass หรือเรียกง่าย ๆ ว่า hand lens สิ่งสำคัญท้ายสุดในบทความดังกล่าวคือ สมุดโน้ต หรือ notebook ครับ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญมาก ๆ ในการบันทึกสิ่งที่เห็นในงานภาคสนาม ผู้เขียนจะขอสรุปถึงอุปกรณ์จำเป็นสำหรับงานสำรวจภาคสนามในงานด้านธรณีวิทยาไว้ในบทนี้ ดังนี้

(1) ค้อนธรณี (geologist’s hammer) – สำหรับทุบหินให้แตกออกจากมวลหินโผล่

(2) แว่นขยายแบบพกพา (hand lens) – เพื่อขยายภาพเม็ดผลึกแร่ เม็ดตะกอน การศึกษาเนื้อหินที่มีเนื้อละเอียดนั้นเป็นการยากที่จะจำแนกชนิดหินแร่ด้วยตาเปล่า ดังนั้นจึงต้องอาศัยแว่นขยายนี่แหละเป็นช่วยขยายวัตถุขนาดเล็กให้ใหญ่ขึ้น เพื่อให้ง่ายต่อการระบุลักษณะหินแร่ แว่นขยายที่ใช้ก็จะมีกำลังขยายหลายขนาดตั้งแต่ 8 เท่า 10 เท่า 15 เท่า หรือ 20 เท่า เลือกใช้แล้วแต่ความชอบของแต่ละคน หาซื้อได้ง่าย ราคาไม่แพงมากนัก (ที่มา: Geothai.net) ผู้เขียนเคยใช้แต่ยี่ห้อถูก ๆ ที่ประดิษฐ์ในประเทศจีนมาตลอด เพิ่งจะมีโอกาสใช้ของดีและไม่แพงแต่มีชื่อเสียงผลิตในประเทศเบลารุส ยี่ห้อ Belomo เมื่อไม่กี่ปีนี่เอง

(3) สมุดสนาม (field note) – สำหรับบันทึกข้อมูลที่ตรวจสอบพบ สมุดสนามที่ดีสำหรับงานด้านสำรวจทางธรณีวิทยาต้องมีขนาดไม่หนามาก กระดาษพื้นขาว หากมีตารางเหมือนกระดาษกร๊าฟจะดีมาก เนื่องจากเอาไว้เป็นมาตราส่วนไว้วาด (sketch) สิ่งที่เห็น และควรเป็นปกแข็งเพื่อเอาไว้ทำเป็นวัสดุแผ่นเรียบเพื่อเอาแนบกับส่วนของระนาบหินเพื่อวัดแนวการวางตัวของชั้นหิน

(4) เข็มทิศธรณี (geological compass) – เป็นเข็มทิศที่ออกแบบมาสำหรับงานธรณีวิทยา สามารถใช้วัดทิศทางการวางตัว-เอียงเทของชั้นหิน แนวรอยเลื่อน แนวเส้น (lineation) ที่ปรากฏในหิน เพื่อดูทิศทางของแรงที่มากระทำต่อหน่อยหินในพื้นที่ ซึ่งมีประโยชน์ต่อการศึกษาธรณีวิทยาโครงสร้าง นอกจากนี้ก็ยังสามารถที่จะระบุตำแหน่งต่าง ๆ บนแผนที่ได้ด้วยหรือแม้กระทั่งการวัดความสูง ซึ่งความพิเศษนี้ทำให้เข็มทิศที่นักธรณีวิทยาใช้แตกต่างจากเข็มทิศทั่วๆ ไป ยี่ห้อที่นิยมและคุ้นหูในบ้านเราก็ได้แก่ Silva, Brunton และ Freiberg (ที่มา: Geothai.net)

(5) แผนที่ภูมิประเทศ และแผนที่ธรณีวิทยา แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับการกระจายตัวของหน่วยหินต่าง ๆ ในพื้นที่ พร้อมกับภาคตัดขวางแสดงโครงสร้างการวางตัวของหิน รวมถึงการลำดับอายุชั้นหินด้วย ซึ่งแผนที่เหล่านี้จะช่วยให้นักธรณีวิทยาวางแผนก่อนการสำรวจได้ (ที่มา: Geothai.net)

(6) เครื่องระบุตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ (Global Positioning System: GPS) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้บอกตำแหน่งหรือพิกัดของวัตถุต่าง ๆ ที่อยู่บนพื้นโลก อ่านได้ทั้งในระบบ UTM (Universal Transverse Mercator) ซึ่งบอกเป็นตัวเลขหลายหลักแล้วกำกับด้วย E และ N ซึ่งหมายถึงตะวันออก และเหนือตามลำดับ และระบบ latitude หรือเส้นรุ้ง และ longitude หรือเส้นแวง ซึ่งจะบอกเป็นองศา ลิปดา และฟิลิปดา เหนือ ใต้ ตะวันออกและตะวันตก โดยนับเอาเส้นศูนย์สูตร (Equator) เป็นเส้นละติจูดที่ศูนย์องศา ขั้วโลกเหนืออยู่ที่ละติจูดที่ 90 องศาเหนือ ขั้วโลกใต้อยู่ที่ละติจูดที่ 90 องศาใต้ สำหรับเส้นลองจิจูด จะนับเอาเมืองกรีนิช (Greenwich) ในประเทศอังกฤษเป็นลองจิจูดที่ศุนย์องศา ตำแหน่งทางตะวันออกของเส้นลองจิจูดศูนย์ ก็จะบอกเป็นองศา ลิปดา ฟิลิปดาตะวันออก ส่วนตำแหน่งทางตะวันตกของเส้นลองจิจูดศูนย์ ก็จะบอกเป็นองศา ลิปดา ฟิลิปดาตะวันตก เส้นลองจูดจะมี 360 เส้น แต่ละเส้นบนเส้นศูนย์สูตรจะห่างกันหนึ่งองศา เทียบเท่าระยะทาง 111 กิโลเมตร (ที่มา: Wikipedia)

(7) กล้องถ่ายรูป ถือว่าเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ช่วยบันทึกภาพสถานที่และสิ่งต่าง ๆ ที่พบในภาคสนาม ทำให้ง่ายต่อการจดจำและเป็นหลักฐานสำคัญสำหรับการยืนยันในสิ่งที่พบ ทั้งนี้ในการถ่ายรูปนั้นมีหลักอยู่ว่าสิ่งที่ถ่ายนั้นจะต้องมีวัตถุที่ทราบขนาดที่แท้จริง (scale) เทียบเคียงอยู่ด้วย อาจจะเป็นไม้บรรทัด เหรียญ สมุด ปากกา ค้อนธรณี เข็มทิศ ฝากล้อง หรือคนยืนตรงก็ได้ และต้องระบุทิศทางที่ถ่ายไว้ด้วยว่ามองไปทางทิศไหน (ที่มา: Geothai.net)

(8) กรดเจือจาง (ส่วนใหญ่จะใช้ dil. HCl 10%) ซึ่งนักธรณีวิทยามักจะใช้เพื่อทดสอบชนิดของหินโดยหยดลงไปบนเนื้อหิน หากเกิดปฏิกิริยาฟู่เป็นฟอง (effervescent) หินนั้นอาจจะเป็นหินปูน หินโดโลสโตน หินอ่อน หรือหิน calc-silicate เนื่องจากมีองค์ประกอบเป็น calcium carbonate ($CaCO_3$) ซึ่งทำปฏิกิริยากับกรด บางครั้งก็มักจะใช้ตรวจสอบชนิดของสารเชื่อมประสาน (cementing material) ของหินตะกอน

(9) เครื่องเขียนเบ็ดเตล็ด (miscellaneous stationeries) ที่สำคัญที่สุดคือปากกาเคมีถาวร (permanent marking pen) ที่ต้องใช้เขียน hand specimen ถึงพิกัดตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง ชื่อตัวอย่าง วันเดือนปีที่เก็บตัวอย่างเป็นต้น นอกจากนั้นยังต้องมีดินสอ ยางลบดินสอเพื่อใช้วาดรูปลักษณะหินโผล่ที่พบ (sketching of outcrops) ไม้วัดมุมโปรแทรกเตอร์ เพื่อใช้วัดมุมแล้วพล็อตวัดระยะทางในแผนที่เป็นต้น

(1)

(2)

(3)

(4)

(5)

(6)

(7)

(8)

รูปที่ 2-33 แสดงตัวอย่างของอุปกรณ์สำรวจด้านธรณีวิทยา (1) ค้อนธรณี (2) เข็มทิศธรณี (3) hand lens (4) สมุดสนาม (5) เครื่อง GPS (6) กล้องถ่ายรูป (7) ขวดกรดเจือจาง (8) ปากกาเคมี (ภาพประกอบจาก Wikipedia)

2.3.2 อุปกรณ์สำรวจทางอุทกธรณีวิทยา (hydrogeological survey equipment)

การสำรวจอุทกธรณีวิทยา หมายถึงการสำรวจที่ให้ได้มาซึ่งข้อมูลเกี่ยวกับสภาพแหล่งน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา ได้แก่ชนิดของชั้นหินให้น้ำ ความลึก ระดับน้ำบาดาล คุณภาพน้ำบาดาล ตลอดจนทิศทางการไหลของน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา การได้มาซึ่งข้อมูลดังกล่าวต้องใช้วัสดุ-อุปกรณ์ (รูปที่ 2-34) หลายประเภท ดังนี้

(1) เครื่องมือวัดระดับน้ำ (electrical dipper) – จะใช้เครื่องมือนี้ซึ่งประกอบด้วยสายไฟที่มีระยะบอกชัดเจน กับหัววัด โดยหัววัดจะถูกหย่อนลงไปในบ่อน้ำบาดาล เมื่อหัววัด (probe) แตะกับน้ำบาดาลแล้ว จะมีแสงไฟกระพริบ (blink of light bulb) หรือเกิดเสียง (beep) หรือเข็มวัดในเครื่อง multi-meter กระดิก ทั้งนี้แล้วแต่ชนิดของเครื่องมือ แล้ววัดระดับน้ำจากระยะที่ปรากฏบนสายไฟ

(2) กระบอกตักน้ำ (bailer) - เป็นกระบอกที่ทำด้วยวัสดุเหล็กไร้สนิม (stainless steel) หรืออาจใช้แบบกระบอกพลาสติกก็ได้เช่นกัน ส่วนใหญ่จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่มากนัก (1-$1^{1/2}$ นิ้ว) ถูกมัดด้วยเชือก เมื่อหย่อนลงไปถึงน้ำก็ปล่อยให้จุ่มใต้น้ำสักพัก แกว่ง ๆ กระบอก แล้วค่อยตักน้ำขึ้นมา หากบ่อลึกมาก อาจใช้เครื่องสูบแบบจุ่มใต้น้ำ สูบน้ำขึ้นมา กรณีนี้ต้องใช้เครื่องปั่นไฟด้วย

(3) ขวดตัวอย่างน้ำ (water sample bottle) - เอาไว้เก็บตัวอย่างน้ำบาดาลเพื่อส่งไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ส่วนใหญ่จะใช้วัสดุที่เป็นพลาสติกชนิด Poly Ethylene หรือเป็นขวดแก้ว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์

(4) กรดไนตริก – ในกรณีที่ต้องการวิเคราะห์โลหะในน้ำบาดาล ก็จะหยดกรดไนตริกลงไปในน้ำด้วยก่อนปิดฝาขวด ทั้งนี้กรดไนตริกจะช่วยยับยั้งการตกตะกอนของโลหะในน้ำบาดาล

(5) เครื่องมือวัดค่าทางกายภาพแบบพกพา (pocket test kits) – มีไว้เพื่อวัดคุณสมบัติต่าง ๆ ของน้ำบาดาล ณ จุดเก็บตัวอย่าง (wellhead measurement) ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยหัววัดอุณหภูมิ (temperature) หัววัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) หัววัดค่าความนำไฟฟ้า (electrical conductivity: EC) หัววัดค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (dissolved oxygen: DO) บางกรณีอาจมีชุดสารเคมีที่ใช้วัดปริมาณไบคาร์บอเนต และแคลเซียม ในน้ำบาดาลไปด้วยเช่นกัน

(6) แบบฟอร์มสำหรับสำรวจอุทกธรณีวิทยา (inventory form) – เป็นแบบฟอร์มสำรวจที่ใช้ในการสอบทานข้อมูลเกี่ยวกับแหล่งน้ำต่าง ๆ ในพื้นที่ศึกษา ข้อมูลที่ต้องการรู้ได้แก่จำนวนบ่อน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา ระดับน้ำ ความลึก อันดับการเจาะก่อน-หลัง หน่วยงานที่เป็นเจ้าของบ่อ ทั้งนี้เพื่อที่จะเอามาเทียบกับฐานข้อมูลที่ได้เตรียมมา แบบฟอร์มบางประเภทอาจมีคำถามเกี่ยวกับแหล่งน้ำผิวดินตามธรรมชาติ จำนวนประชากร ความต้องการการใช้น้ำในปัจจุบัน อัตราการขยายตัวของชุมชนหรือหมู่บ้าน

(7) ประแจ (adjustable spanner) สำหรับเปิดจุกปลั๊กบริเวณฐานเครื่องสูบมือโยก หรือบริเวณฝาปิดปากบ่อ – เอาไว้ช่วยหมุนเปิดปลั๊ก (plug) สำหรับหย่อนเครื่องวัดระดับน้ำ

(8) กล่องน้ำแข็ง (ice box) – มีไว้เพื่อเก็บขวดตัวอย่างน้ำที่จะส่งไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ และต้องเก็บตัวอย่างน้ำในอุณหภูมิประมาณ 4 องศาเซลเซียส เพื่อยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาทางชีววิทยา

(9) flow cell – เป็นเซลล์ที่ให้น้ำไหลผ่าน (เข้า-ออก) ขณะสูบน้ำโดยให้มีน้ำที่ไหลจากบ่ออยู่ในสภาวะที่คุณสมบัติทางกายภาพคงที่สักชั่วระยะเวลาหนึ่ง แล้วจึงค่อยเก็บตัวอย่าง

รูปที่ 2-34 แสดงตัวอย่างของอุปกรณ์สำรวจด้านอุทกธรณีวิทยา (1) เครื่องวัดระดับน้ำ (electrical dip meter) (2) กระบอกเก็บตัวอย่างน้ำ (bailer) (3) ขวดเก็บตัวอย่างน้ำ (sample bottles) (4) กรดสำหรับรักษาสภาพตัวอย่างน้ำ (nitric acid for preserve water) (5) pocket test kits (6) กล่องใส่น้ำแข็ง (ice box) (7) flow cell (กล่องพลาสติกฝาสีฟ้า) (8) อุปกรณ์อื่น ๆ ที่จำเป็น ได้แก่เครื่องสูบแบบจุ่มใต้น้ำ เครื่องปั่นไฟฟ้า ค้อน และประแจ (ภาพประกอบบางส่วนจาก Wikipedia)

2.3.3 อุปกรณ์สำรวจทางธรณีฟิสิกส์บนผิวดิน (surface geophysical survey instrument)

เมื่อได้ดำเนินการสำรวจทางธรณีวิทยา และอุทกธรณีวิทยาเบื้องต้นแล้ว ผู้ปฏิบัติงานจะดำเนินการในขั้นสุดท้ายเพื่อหาพื้นที่ที่เหมาะสมในการเจาะและพัฒนาน้ำบาดาล โดยจะใช้เครื่องมือสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ที่เหมาะสมสำหรับสภาพพื้นที่และสภาพภูมิอากาศ เครื่องมือทางธรณีฟิสิกส์ (รูปที่ 2-35) ที่มักใช้ในการสำรวจธรณีฟิสิกส์บนผิวดิน (surface geophysical prospecting) มีดังนี้

(1) เครื่องวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity meter หรือ Terrameter)
(2) เครื่องวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic instrument)
(3) เครื่องวัดคลื่นสั่นสะเทือนแบบหักเห (Seismic Refraction instrument)
(4) เครื่องวัดความแรงโน้มถ่วง (Gravimeter/Gravity meter))
(5) เครื่องวัดค่าสนามแม่เหล็ก (Magnetometer)
(6) เครื่องวัดคลื่นความถี่ต่ำมาก (Very Low Frequency: VLF)
(7) เครื่องวัด Ground Penetrating Radar (GPR)

(1)

(2)

(3)

(4)

(5)

(6)

รูปที่ 2-35 แสดงตัวอย่างของอุปกรณ์สำรวจด้านธรณีฟิสิกส์บนผิวดิน (1) เครื่องวัดความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity meter) (2) เครื่องวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic instrument) (3) เครื่องวัดคลื่นสั่นสะเทือน (Seismic refraction instrument) (4) เครื่องวัดแรงโน้มถ่วง (Gravimeter) (5) เครื่อง Ground Penetrating Radar (GPR) instrument (6) เครื่องวัดคลื่นความถี่ต่ำมาก (Very Low Frequency instrument) (ภาพประกอบจาก Wikipedia)

บทที่ 3
การสำรวจภาคสนาม
(Field Investigation)

การสำรวจภาคสนามมีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดพื้นที่ที่เหมาะสมที่สุดในการเจาะและพัฒนาบ่อน้ำบาดาลโดยใช้หลักการสำรวจทางวิชาการ 4 วิธีการหลักได้แก่การสำรวจธรณีวิทยา การสำรวจอุทกธรณีวิทยา การสำรวจธรณีฟิสิกส์บนผิวดิน การเจาะสำรวจและการสำรวจธรณีฟิสิกส์ใต้ผิวดินหรือการหยั่งธรณีฟิสิกส์หลุมเจาะ ทั้งนี้เพื่อลดความเสี่ยงในการเจาะแล้วไม่พบชั้นน้ำบาดาล หรือเจาะแล้วได้ปริมาณน้ำไม่เพียงพอต่อการพัฒนาน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ ผู้เขียนขออธิบายแต่ละวิธีการดังนี้

3.1 การสำรวจธรณีวิทยา (geological survey)

การสำรวจธรณีวิทยาภาคสนามเป็นการสำรวจภาคสนามจากสิ่งที่เห็นได้แก่หินโผล่ (outcrop) ตามธรรมชาติหรือที่เกิดจากการระเบิดหินเพื่อทำถนน (roadside quarry) หรือการทำเหมือง (mining quarry) ต่าง ๆ เป็นการสำรวจภาคสนามเพื่อยืนยันข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้มาจากแผนที่ธรณีวิทยาที่ได้จัดเตรียมไว้ในตอนต้น (desk study) ข้อมูลทางธรณีวิทยาต่าง ๆ ที่ต้องเก็บรวมรวมในภาคสนาม ได้แก่ ชนิดหิน (rock type) ทิศทางการวางตัวของหิน (attitude of plane: strike and dip) โครงสร้างทางธรณีวิทยา ได้แก่ตำแหน่งระนาบรอยเลื่อน (fault) ลักษณะการคดโค้งของหน่วยหิน (folding) ตำแหน่งหลุมยุบ (sinkhole) เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อเป็นการยืนยันข้อมูลที่ได้จากแผนที่ธรณีวิทยาหรืองานที่ได้ทำมาก่อน (previous work) เมื่อได้ข้อมูลภาคสนามแล้ว นักธรณีวิทยาสามารถนำมาประมวลผลร่วมกับข้อมูลที่จัดเตรียมไว้แล้วเบื้องต้น และทำให้สามารถพิจารณาวางตำแหน่งหรือแนวสำรวจธรณีฟิสิกส์บนผิวดินได้อย่างสอดคล้องกับสภาพธรณีวิทยาโดยรวมของพื้นที่ ผู้เขียนจะไม่ขอกล่าวถึงการสำรวจทางธรณีวิทยามากในที่นี้ สำหรับอุปกรณ์สำหรับสำรวจธรณีวิทยาภาคสนาม ผู้เขียนได้กล่าวไว้แล้ว ในหัวข้อ 2.3.1 รูปที่ 3-1 แสดงการสำรวจธรณีวิทยาภาคสนาม

รูปที่ 3-1 แสดงการสำรวจธรณีวิทยาภาคสนามได้แก่การวัดการวางตัวของหิน (attitudes of plane) การเก็บตัวอย่างหิน (rock sampling) และการบันทึกภาพสิ่งที่เห็นในภาคสนาม (picture taking)

3.2 การสำรวจอุทกธรณีวิทยา (hydrogeological survey)

จากการเตรียมข้อมูลบ่อน้ำบาดาลเบื้องต้น (desk study) ซึ่งได้แก่จำนวนบ่อน้ำบาดาลในพื้นที่ ข้อมูลประจำบ่อ (records of wells) ซึ่งบอกตำแหน่งบ่อน้ำบาดาล (well location) ชื่อหรือหมายเลขของบ่อน้ำบาดาล (well number) ความลึกของบ่อน้ำบาดาล (well depth) ความลึกพัฒนา (developed depth) ช่วงวางท่อรับน้ำ (well screen/perforated casing interval) ระดับน้ำบาดาลในบ่อน้ำบาดาลแต่ละบ่อ รวมถึงข้อมูลคุณภาพน้ำบาดาล (water chemistry of well) ของบ่อ และข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบจากแผนที่น้ำบาดาล เมื่อนักธรณีวิทยาหรือนักสำรวจเดินทางเข้าถึงพื้นที่เป้าหมายแล้ว จะต้องตรวจสอบข้อมูลที่ได้มาทั้งหมดซ้ำอีกครั้งหนึ่ง เพื่อเป็นการยืนยันข้อมูลว่าตรงตามข้อมูลที่ได้จากระบบฐานข้อมูลหรือไม่ หรือข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ อย่างไร ข้อควรปฏิบัติเมื่อนักสำรวจควรดำเนินการเมื่อเข้าถึงพื้นที่เป้าหมายแล้ว ได้แก่

- ตรวจสอบบ่อน้ำบาดาลในพื้นที่ว่าตรงตามข้อมูลที่ได้เตรียมมาหรือไม่ จากแผ่นเหล็กบันทึกข้อมูลบ่อ (well steel plate) ที่ติดตั้งอยู่กับฐานบ่อหรือชานบ่อ (well slab) ซึ่งบนแผ่นเหล็กนี้จะบันทึกชื่อบ่อน้ำบาดาล ความลึกของบ่อน้ำบาดาล ระดับน้ำบาดาล พิกัดทางภูมิศาสตร์ของที่ตั้งบ่อน้ำบาดาล ในกรณีบ่อน้ำบาดาลที่ได้รับการตรวจสอบยืนยันโดยกรมทรัพยากรน้ำบาดาลระหว่างปี 2552-2553 ข้อมูลประจำบ่อดังกล่าว จะถูกบันทึกในแผ่นอลูมิเนียมอย่างชัดเจน แล้วยึดติดไว้บนตัวบ่อในตำแหน่งที่เห็นได้อย่างชัดเจน (รูปที่ 3-2)
- ในกรณีที่มีบ่อน้ำบาดาลมากกว่า 1 บ่อ ในพื้นที่เป้าหมาย ให้ตรวจสอบให้ชัดเจนว่าบ่อใดให้ข้อมูลตรงกับที่ได้จัดเตรียมมา บ่อใดเจาะก่อน บ่อใดเจาะทีหลัง ซึ่งสามารถสอบถามข้อมูลจากผู้ใหญ่บ้าน หรือผู้ช่วยผู้ใหญ่บ้านได้ <u>และต้องทำการวัดระดับน้ำบาดาลจากบ่อที่มีอยู่ทุกบ่อ</u> เหตุที่ต้องตรวจทานข้อมูลบ่อน้ำบาดาล กรณีที่มีบ่อมากกว่า 1 บ่อ เนื่องจากความลึกของบ่อมักจะไม่เท่ากันเสียทีเดียว เช่นเดียวกับระดับน้ำในบ่อก็จะไม่เท่ากัน หากเรารู้ระดับน้ำเบื้องต้นที่ถูกต้อง และระดับน้ำบาดาลในปัจจุบัน นักธรณีวิทยาหรือนักสำรวจจะสามารถคำนวณทิศทางการไหลของน้ำบาดาลในพื้นที่เป้าหมายได้
- เก็บตัวอย่างน้ำบาดาลจากบ่อน้ำบาดาลทุกบ่อที่มีในพื้นที่เป้าหมาย แล้วตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี โดยอุปกรณ์ที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.3.2 (อุปกรณ์สำรวจทางอุทกธรณีวิทยา) ทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงหรือการไม่เปลี่ยนแปลงด้านคุณภาพน้ำในพื้นที่เป้าหมาย เมื่อเทียบกับข้อมูลประจำบ่อน้ำบาดาลเมื่อก่อนเริ่มใช้งาน
- ในวิธีปฏิบัติที่ถูกต้องตามหลักอุทกเคมี การเก็บตัวอย่างน้ำจากบ่อน้ำบาดาลจะต้องเก็บโดยผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่า Flow Cell กล่าวคือสูบน้ำบาดาลขึ้นมาจากบ่อแล้วให้น้ำไหลผ่านท่อเข้าไปในภาชนะที่จัดเตรียมไว้ และเมื่อน้ำเต็มภาชนะ น้ำก็จะไหลออกจากภาชนะผ่านสายยางที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ระหว่างที่น้ำอยู่ในภาชนะ ให้ทำการวัดค่าทางกายภาพต่าง ๆ ได้แก่อุณหภูมิ ความนำไฟฟ้า (electrical conductivity) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) จนค่าดังกล่าวเกือบไม่มีการเปลี่ยนแปลง แล้วจึงใช้ขวดหรือภาชนะที่เตรียมมาเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลในบ่อนั้น ๆ รูปที่ 3-3 แสดงการเก็บตัวอย่างน้ำแบบ Flow Cell Sampling

รูปที่ 3-2 แสดงแผ่นอลูมิเนียมบางที่บันทึกชื่อและความลึกของบ่อน้ำบาดาลในโครงการสำรวจสถานภาพบ่อน้ำบาดาล ศึกษากำหนดเครือข่ายบ่อสังเกตการณ์ และประเมินการใช้น้ำบาดาลเพื่อการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลของประเทศ

(1) (2) (3)

รูปที่ 3-3 แสดงอุปกรณ์การเก็บตัวอย่างน้ำแบบ Flow Cell (1) อุปกรณ์ทั้งชุดประกอบด้วยเครื่องสูบน้ำแบบจุ่มใต้น้ำ เครื่องปั่นกระแสไฟฟ้า อุปกรณ์การเปิดบ่อน้ำบาดาล และ test kits ชนิดต่าง ๆ (2) กล่อง Flow Cell ขวดเก็บตัวอย่างน้ำ และ test kits (3) แสดงการเก็บตัวอย่างน้ำผ่าน Flow Cell

3.3 การสำรวจธรณีฟิสิกส์บนผิวดิน (surface geophysical survey)

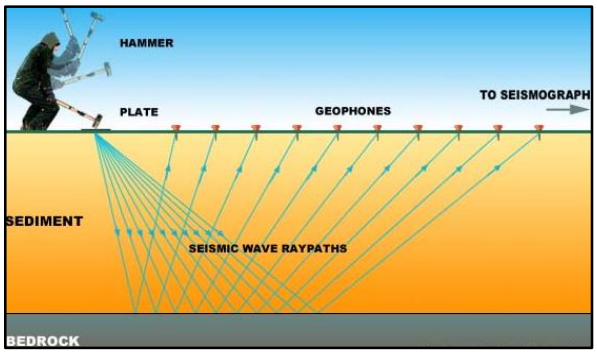
เมื่อการสำรวจทางธรณีวิทยา และอุทกธรณีวิทยาได้ดำเนินการไปครบกระบวนการแล้ว นักธรณีวิทยาหรือนักสำรวจจะสามารถประมวลผลข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับสภาพธรณีวิทยาและอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่เป้าหมายได้ชัดเจนขึ้น สามารถตัดพื้นที่บางส่วนที่มั่นใจว่ามีศักยภาพด้านน้ำบาดาลต่ำออกไปได้ ทำให้เหลือพื้นที่สำหรับการสำรวจธรณีฟิสิกส์บนผิวดินแคบลง จึงทำให้ไม่เสียเวลาและงบประมาณที่อาจมีอยู่จำกัด การสำรวจธรณีฟิสิกส์บนผิวดิน มีอยู่หลายวิธีการขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของจุดหรือพื้นที่ที่ต้องการสำรวจหรือวัดค่าโดยการวัดปริมาณอันเนื่องมาจากคุณสมบัติเหล่านั้น ซึ่งได้แก่ความยืดหยุ่น (elasticity) ความหนาแน่น (density) ความเป็นแม่เหล็ก (magnetization) ลักษณะทางไฟฟ้า (electrical characteristics) ระดับของการแผ่กัมมันตภาพรังสี (radioactivity level) ซึ่งวิธีการต่าง ๆ ที่สามารถนำมาใช้ในการสำรวจได้แก่ วิธีการสำรวจโดยวัดคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (Seismic Refraction Method) วิธีการสำรวจโดยวัดค่าสนามแม่เหล็ก (Magnetic Method) วิธีการสำรวจโดยวัดค่าความโน้มถ่วง (Gravity Method) วิธีการสำรวจโดยวัดค่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Method) และการสำรวจโดยวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า

(Resistivity Method) ซึ่งในบทความนี้ ผู้เขียนจะขอกล่าวถึงแต่ละวิธีการแบบสั้น ๆ แต่จะเน้นวิธีการที่ใช้ง่าย เป็นที่นิยมใช้ สำรวจได้รวดเร็วและแปลความหมายได้ง่ายและรวดเร็ว ผู้เขียนขออธิบายเกี่ยวกับหลักการของวิธีการสำรวจต่าง ๆ ข้างต้นดังนี้

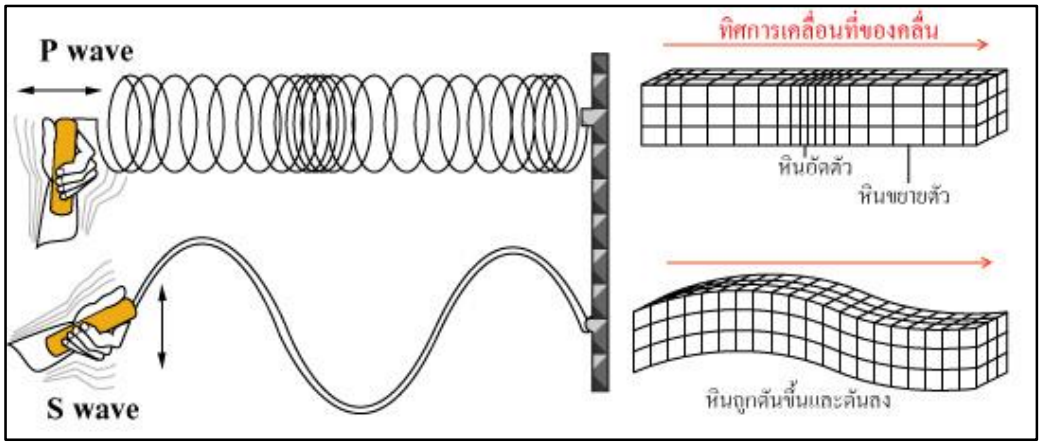
3.3.1 การสำรวจโดยวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (Seismic Refraction Method)

หลักการคือวัดคุณสมบัติทางกายภาพที่เป็นความยืดหยุ่น (elasticity) และความหน่าแน่น (Ddensity) ของหินที่รองรับบริเวณพื้นที่สำรวจ กล่าวคือคลื่นสั่นสะเทือนจะเดินทางในตัวกลางที่มีความยืดหยุ่นและความหนาแน่นที่ต่างกันด้วยความเร็วที่ต่างกัน แหล่งกำเนิดคลื่นไหวสะเทือน (energy source) อาจจะอยู่บนผิวดิน โดยวางผ่านเหล็กกล้าหนาประมาณ 1 นิ้วให้แนบสนิทกับผิวดิน แล้วใช้ค้อนขนาดใหญ่ทุบบนแผ่นเหล็กกล้า เพื่อให้เกิดคลื่นไหวสะเทือน (รูปที่ 3-4) หรืออาจใช้วิธีปล่อยตุ้มน้ำหนัก (weight drop) หนักประมาณ 30 กิโลกรัมลงมาจากที่สูงประมาณ 100 เซนติเมตร ให้กระแทกกับแผ่นเหล็กกล้าเพื่อให้กำเนิดคลื่น หรืออาจขุดหลุมลงไปใต้ผิวดินโดยใช้ hand auger ลึกประมาณ 1-2 ฟุต แล้วใช้การจุดระเบิดโดยแก๊ปหรือลูกปืน (shotgun) สำหรับตัวรับสัญญาณคลื่นไหวสะเทือน (detector หรือ geophone) จะวางเรียงออกไปเป็นแนวเส้นตรง โดยตัวรับคลื่นตัวแรกจะอยู่ห่างจากจุดกำเนิดคลื่นประมาณ 2.5 เมตร และตัวรับคลื่นถัดๆ ไปจะอยู่ห่างกันประมาณ 5 เมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความลึกที่ต้องการสำรวจและที่สำคัญคือค่าความถี่ของตัวรับคลื่น (frequency of geophone) ด้วยเช่นกัน

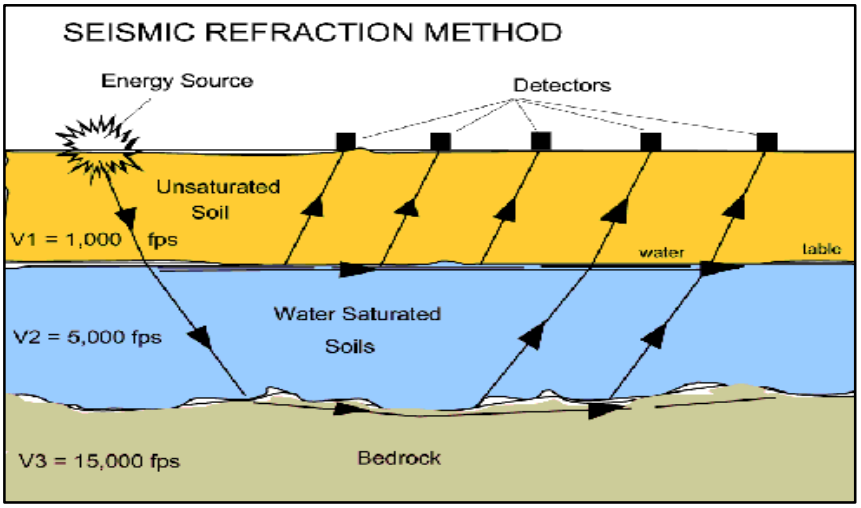
เมื่อเริ่มทำให้เกิดคลื่นไหวสะเทือนแล้ว จะมีคลื่นอยู่ 2 แบบเกิดขึ้นซึ่งได้แก่คลื่นปฐมภูมิ (primary waves หรือ P-waves) ซึ่งป็นคลื่นตามยาวที่เกิดจากความไหวสะเทือนในตัวกลาง โดยอนุภาคของตัวกลางนั้นเกิดการเคลื่อนไหวแบบอัดขยายในแนวเดียวกับที่คลื่นส่งผ่านไป คลื่นนี้สามารถเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊ส เป็นคลื่นที่สถานีวัดแรงสั่นสะเทือนสามารถรับได้ก่อนชนิดอื่น โดยมีความเร็วประมาณ 6–7 กิโลเมตร/วินาที และคลื่นทุติยภูมิ (secondary waves หรือ S-waves) ซึ่งเป็นคลื่นตามขวางที่เกิดจากความไหวสะเทือนในตัวกลางโดยอนุภาคของตัวกลางเคลื่อนไหวตั้งฉากกับทิศทางที่คลื่นผ่าน มีทั้งแนวตั้งและแนวนอน คลื่นชนิดนี้ผ่านได้เฉพาะตัวกลางที่เป็นของแข็งเท่านั้น ไม่สามารถเดินทางผ่านของเหลวได้ คลื่นทุติยภูมิมีความเร็วประมาณ 3–4 กิโลเมตร/วินาที (รูปที่ 3-5) คลื่นชุดแรกจะเดินทาง (propagate) ผ่านตัวกลางที่เป็นผิวดินไปสู่ตัวรับคลื่นโดยตรงด้วยความเร็ว V1 ส่วนคลื่นอีกส่วนหนึ่งจะเดินทางผ่านตัวกลางที่อยู่ใต้ดินชั้นแรกด้วยความเร็ว V1 เช่นกัน เมื่อเดินทางถึงอีกตัวกลางหนึ่งซึ่งคลื่นเดินทางได้เร็วกว่า (V2) คลื่นส่วนหนึ่งจะเดินทางตามแนวรอยต่อ (interface) ระหว่างตัวกลาง 2 ชนิด แล้วก็จะสะท้อน (reflect) กลับขึ้นไปในตัวกลางแรกแล้วก็ไปถึงตัวรับคลื่นตัวที่หนึ่ง ตัวที่สองไปเรื่อย ๆ จนถึงตัวรับคลื่นตัวสุดท้าย คลื่นไหวสะเทือนอีกส่วนหนึ่งจะหักเห (refract) แล้วเดินทางต่อไปในตัวกลางที่คลื่นเดินทางได้เร็วกว่าไปจนถึงหินเนื้อแน่นกว่าซึ่งเป็นชั้นที่คลื่นเดินทางได้เร็วกว่า (V3) คลื่นก็จะเดินทางไปตามแนวรอยต่อแล้วก็จะสะท้อนกลับขึ้นไปในตัวกลางตัวที่สองแล้วหักเหไปในตัวกลางตัวแรกแล้วสะท้อนแล้วก็ไปถึงตัวรับคลื่นที่อยู่ไกลออกไป (รูปที่ 3-6) ข้อจำกัดของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (refraction) หรือแบบสะท้อน (reflection) คือจะไม่สามารถสำรวจโดยวิธีการนี้ได้เลยถ้าชั้นบนสุดเป็นชั้นที่แข็งกว่าให้ความเร็วคลื่นที่เร็วกว่าชั้นล่างที่อ่อนกว่าและคลื่นเดินทางได้ช้ากว่า ไม่สามารถสำรวจได้ในพื้นผิวที่เป็นคอนกรีต asphalt ไม่สามารถสำรวจได้ในพื้นที่ที่มีโครงสร้างพื้นฐานอยู่ใต้ดิน และสภาพแวดล้อมการสำรวจโดยการวัดคลื่นไหวสะเทือน ต้องปราศจากสัญญาณรบกวน (noise) ซึ่งจะรบกวนสัญญาณจากแหล่งกำเนิดคลื่นที่ใช้ในการสำรวจ และเครื่องมือราคาแพง และการแปลความหมายข้อมูลต้องกระทำโดยผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเท่านั้น รูปที่ 3-7 แสดงลักษณะการแปลความหมายข้อมูลของการสำรวจคลื่นไหวไหวสะเทือนแบบหักเหที่มี 3 ชั้น



รูปที่ 3-4 แสดงการวางอุปกรณ์สำรวจคลื่นไหวสะเทือนที่ประกอบด้วยจุดกำเนิดคลื่น (energy source/plate) และตัวรับคลื่น (detector/geophone)
(ที่มา: http://www.ukm.my/rahim/Seismic%20Refraction%20Surveying.htm)

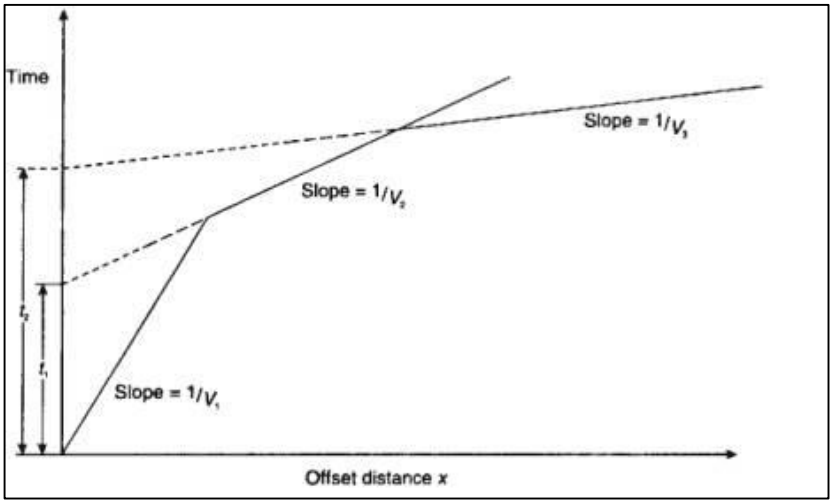


รูปที่ 3-5 แสดงลักษณะการเดินทางของคลื่นสั่นสะเทือน (seismic waves) ซึ่งเมื่อทำให้เกิดการสั่นสะเทือนแล้วจะมีคลื่นที่เกิดขึ้น 2 แบบคือคลื่นปฐมภูมิ (P-waves) และคลื่นทุติยภูมิ (S-waves) ซึ่งมีลักษณะการเคลท่อนที่ที่แตกต่างกัน (ที่มา: ศูนย์การเรียนรู้วิทยาศาสตร์โลกและดาราศาสตร์)



รูปที่ 3-6 แสดงลักษณะการเดินทางของคลื่นไหวสะเทือนเมื่อเกิดสัญญาณคลื่น คลื่นชุดแรกจะเดินทางจากแหล่งกำเนิดคลื่น (energy source) โดยตรง (direct wave) ไปยังตัวรับคลื่น (geophone) ด้วยความเร็ว V1 ส่วนหนึ่งเดินทางในตัวกลางชั้นแรกด้วยความเร็ว V1 และหักเหเข้าตัวกลางที่ 2 และตัวกลางที่ 3 ด้วยความเร็ว V2 และความเร็ว V3 ตามลำดับ ก่อนจะหักเหกลับขึ้นไปสู่ตัวรับคลื่นที่อยู่บนผิวดิน

(ที่มา : https://www.slideshare.net/PIRPASHA/geophysical-methods-of-soilfoundation-testing)



รูปที่ 3-7 แสดงลักษณะการแปลความหมายของการสำรวจวัดคลื่นสั่นสะเทือนแบบหักเห เส้น slope ทั้งหมด 3 เส้น แสดงว่าใต้พื้นดินมี 3 ชั้นที่สามารถตรวจสอบ (detect) ได้ เส้นประที่ต่อออกมา (interpolate) มาตัดแกนตั้ง (แกนเวลา) ได้ค่า t1 และ t2 จะเอาไปใช้คำนวณความหนาของชั้นที่ 1 และชั้น ที่ 2 ตามลำดับ (อ่านเพิ่มเติมได้ที่ กิตติชัย วัฒนานิกร, การสำรวจธรณีฟิสิกส์สำหรับนักธรณีวิทยาและวิศวกร, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2526)

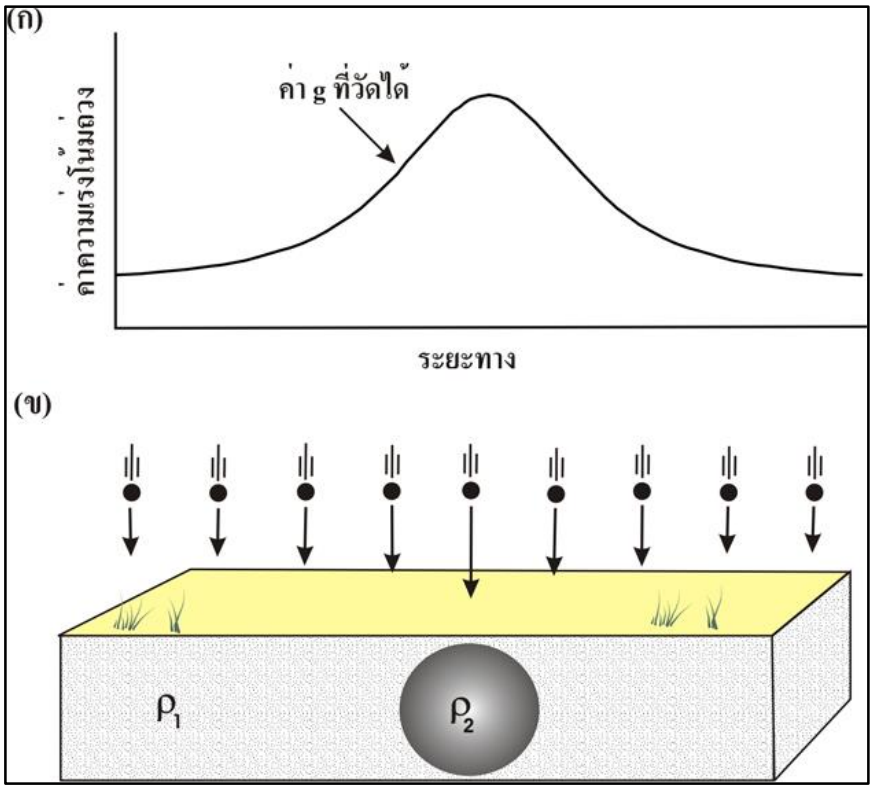
(ที่มา : https://www.slideshare.net/PIRPASHA/geophysical-methods-of-soilfoundation-testing)

3.3.2 การสำรวจโดยวัดค่าความเร่งโน้มถ่วง (Gravity Method)

เป็นวิธีสำรวจธรณีฟิสิกส์จากผิวดินอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถใช้ในการสำรวจหาแหล่งน้ำบาดาลได้ ถึงแม้จะไม่สามารถระบุได้โดยตรงว่าจะมีน้ำบาดาลกักเก็บอยู่หรือไม่ แต่ก็สามารถบอกได้ว่าชั้นดินชั้นหินที่วางตัวอยู่ข้างใต้พื้นที่สำรวจนั้น (underlying rock units) เป็นหินแข็งเนื้อแน่น หินแข็งปานกลาง หรือหินร่วน หรือมีมวลวัตถุใด มีรูปร่างอย่างไร นอกจากนี้ยังสามารถบ่งบอกถึงรูปร่างและโครงสร้างของแอ่งสะสมตะกอน ความหนาของชั้นตะกอน ตลอดจนโครงสร้างรอยเลื่อน โพรงถ้ำใต้ดิน (อ่านเพิ่มเติมได้ที่ เพียงตา สาตรักษ์, ธรณีฟิสิกส์เพื่อการสำรวจใต้ดิน, 2550) ซึ่งคาดว่าจะมีศักยภาพในการกักเก็บน้ำบาดาลได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากการสำรวจโดยการวัดค่าเร่งโน้มถ่วงนั้นอาศัยคุณสมบัติด้านความหนาแน่น (density) ของวัตถุ โดยอาศัยหลักการที่ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของชั้นดิน ชั้นหิน จากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของความเร่งอันเกิดจากแรงโน้มถ่วงบนผิวโลกด้วย เครื่องมือที่ใช้ในการสำรวจโดยวิธีการนี้เรียกว่าเครื่อง Gravity Meter หรือ Gravimeter (หัวข้อ 2.3.3 และรูปที่ 2-35 (4)) โดยทั่วไปแล้วเครื่องมือประเภทนี้ที่ใช้สำรวจหาน้ำบาดาลจะเรียกว่า Microgravity Meter ซึ่งสามารถตรวจสอบค่าความผิดปกติ (anomaly) ขนาดเล็กระดับไมโครแกล (microgal) ได้

การสำรวจหาแหล่งน้ำบาดาลโดยวิธีวัดค่าแรงโน้มถ่วงเป็นการประยุกต์การแปลความหมายสภาพธรณีวิทยาใต้พื้นที่สำรวจโดยอาศัยหลักการที่ว่าใต้ผิวดินจะมีความแตกต่างของชนิดชั้นดินชั้นหินในแนวดิ่งและแนวนอนอยู่เสมอ กล่าวคือชั้นดินชั้นหินใต้เปลือกโลกจะไม่มีคุณสมบัติที่เหมือนกันในทุกทิศทุกทาง (heterogeneous and anisotropic) ดังนั้นเราจึงสามารถสำรวจตรวจวัดค่าความเร่งโน้มถ่วงของพื้นที่ต่าง ๆ ได้ และค่าที่วัดได้ย่อมสามารถแปลความหมายเป็นสภาพธรณีวิทยาใต้ผิวดินได้ ซึ่งค่าความเร่งโน้มถ่วงที่วัดได้ ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง มีความสัมพันธ์กับมวลของชั้นดินชั้นหิน ที่ตำแหน่งนั้น มวลของชั้นดินชั้นหินมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่น (density) ของชั้นดินชั้นหิน ค่าความหนาแน่นของชั้นดินชั้นหินมีความสัมพันธ์กับ แร่ประกอบดิน-หิน เนื้อดิน-หิน ช่องว่างหรือรูพรุน และของเหลวที่แทรกอยู่ในรูพรุน (อ่านเพิ่มเติมได้ที่ เพียงตา สาตรักษ์, ธรณีฟิสิกส์เพื่อการสำรวจใต้ดิน, 2550)

การสำรวจวัดค่าความเร่งโน้มถ่วงบนผิวดินจะวางแนวสำรวจเป็นเส้นตรง ระยะห่างระหว่างจุดที่ตั้งเครื่องมือขึ้นอยู่กับข้อมูลธรณีวิทยาเบื้องต้นที่ผู้สำรวจทราบคร่าว ๆ ในภาพรวมจากข้อมูลแผนที่ธรณีวิทยา ข้อมูลหลุมเจาะในบริเวณใกล้เคียงแล้วว่าชั้นดินชั้นหินน่าจะเป็นอะไร อาจมีระยะระหว่างจุดเป็น 20 เมตร 40 เมตร ก็ได้ ขึ้นอยู่กับความต้องการรายละเอียด แนวสำรวจอาจยาว 100 เมตร 200 เมตร หรือ 500 เมตร เป็นต้น โดยทั่วไปแล้ว เมื่อเริ่มต้นวัดค่าสถานีฐาน (base station) แล้ว และสำรวจไปจนสุดแนวสำรวจ ผู้สำรวจจะต้องนำเครื่องกลับมาวัดค่าสถานีฐานอีกครั้งหนึ่งเพื่อเปรียบเทียบค่าและปรับแก้ค่าความผิดปกติ (anomaly) ของความเร่งโน้มถ่วง ทั้งนี้เนื่องจากตำแหน่งดวงอาทิตย์ที่เปลี่ยนไป จะส่งผลให้ค่าความผิดปกติของความเร่งโน้มถ่วงเปลี่ยนไปด้วยเช่นกัน ดังนั้นต้องกลับมาวัดซ้ำจุดแรกเพื่อนำค่าผิดปกติความเร่งโน้มถ่วงมาปรับแก้ค่า (correction) โดยวิธีการเฉพาะ ตำแหน่งของดวงอาทิตย์จึงถือเป็นปัจจัยสำคัญอันหนึ่งในการวัดความเร่งโน้มถ่วง นอกจากปัจจัยเรื่องตำแหน่งของดวงอาทิตย์แล้ว ยังมีปัจจัยสำคัญอื่นๆ ที่มีผลต่อการวัดค่าความเร่งโน้มถ่วงอีกหลายปัจจัย ที่สำคัญได้แก่ปัจจัยจากละติจูด ปัจจัยจากความสูง-ต่ำของระดับภูมิประเทศ ปัจจัยจากผลจากการขึ้น-ลงของระดับน้ำทะเล ปัจจัยจากเครื่องมือ ปัจจัยเกี่ยวกับความหนาแน่นมวลรวมของเปลือกโลก ดังนั้นค่าที่อ่านได้จากการสำรวจจะต้องถูกนำมาปรับแก้ค่าความผิดปกติความเร่งโน้มถ่วงอันเกิดจากปัจจัยดังกล่าวข้างต้นเสียก่อน จึงจะนับเป็นค่าความผิดปกติความเร่งโน้มถ่วงที่แท้จริง ซึ่งเป็นวิธีการที่ค่อนข้างยุ่งยากมาก ดังนั้นในการสำรวจหาแหล่งน้ำบาดาล วิธีวัดค่าแรงโน้มถ่วงจึงไม่เป็นที่นิยม รูปที่ 3-8 แสดงภาพจำลองการประยุกต์สำรวจจัดค่าความเร่งโน้มถ่วงในพื้นที่ที่มีสภาพใต้ผิวดินที่มีความหนาแน่น (ρ) ต่างกัน



รูปที่ 3-8 ภาพจำลองการประยุกต์สำรวจจัดค่าความเร่งโน้มถ่วง ในพื้นที่ที่มีสภาพใต้ผิวดิน โดยมีมวลวัตถุรูปทรงกลม (ก) กร๊าฟของค่าความเร่งโน้มถ่วง (ข) สภาพธรณีวิทยาใต้ผิวดิน โดยมีค่าความหนาแน่น ρ2 มากกว่า ρ1 ลูกศรแสดงขนาดและทิศทางของเวคเตอร์ความเร่งโน้มถ่วง (ภาพจาก ธรณีฟิสิกส์เพื่อการสำรวจใต้ดิน, 2550, เพียงตา สาตรักษ์, ได้รับอนุญาตแล้ว)

3.3.3 การสำรวจโดยวัดค่าสนามแม่เหล็ก (Magnetic Method)

การสำรวจโดยวัดค่าสนามแม่เหล็ก ไม่นิยมใช้ในการสำรวจหาแหล่งน้ำบาดาลโดยตรงแต่สามารถใช้ในการสำรวจหาร่องน้ำเก่าใต้ดิน (buried channel) ความไม่สม่ำเสมอของหินพื้นฐาน (basement irregularities) หรือธรณีวิทยาโครงสร้าง (geologic structures) ต่าง ๆ ได้แก่ระนาบรอยเลื่อน (fault plane) พนังหิน (dike) โครงสร้างรูปประทุน (anticline) โครงสร้างรูปประทุนหงาย (syncline) โดมหินเกลือ (salt dome) และมวลหินอัคนีแทรกซอน (igneous intrusion) เป็นต้น นอกจากนั้นยังสามารถใช้สำรวจหาสิ่งประดิษฐ์ที่อยู่ใต้ดิน เช่นตำแหน่งของสายไฟฟ้าและท่อน้ำใต้ดิน ตำแหน่งของปล่องเหมืองหรืออุโมงค์ใต้ดินได้เช่นกัน (ประมวลข้อมูลจาก กิตติชัย วัฒนานิกร, การสำรวจธรณีฟิสิกส์สำหรับนักธรณีวิทยาและวิศวกร, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2526)

ลักษณะการตั้งสถานีหรือจุดสำรวจ (measuring station) จะเป็นจุดตัดของเส้นตรงที่ตัดกันเป็นรูปสี่เหลี่ยม (gridding) ระยะห่างระหว่างสถานีวัดค่าหรือจุดสำรวจจะถูกกำหนดด้วยโครงสร้างทางธรณีวิทยาหรือว่าขนาดของวัตถุแม่เหล็กที่ซ่อนอยู่ใต้ดิน อาจเริ่มต้นที่ 10 เมตร เมื่อจุดประสงค์ของการสำรวจคือการสำรวจแร่จนถึง 1-2 กิโลเมตร เมื่อต้องการสำรวจหาโครงสร้างทางธรณีวิทยาขนาดใหญ่ ข้อจำกัดที่สำคัญของวิธีการวัดค่าแม่เหล็กได้แก่สถานีวัดค่าต้องอยู่ห่างจากสารแม่เหล็กบนเปลือกโลก ซึ่งได้แก่สายไฟแรงสูง สะพานเหล็ก ราง

รถไฟ เสาอาคารที่มีเหล็กอยู่ภายใจ แม้กระทั่งรถยนต์ รถจักรยานยนต์ ซึ่งสถานีวัดค่าควรอยู่ห่างจากสิ่งที่กล่าวข้างต้น ประมาณ 30-40 เมตร เป็นต้นไป

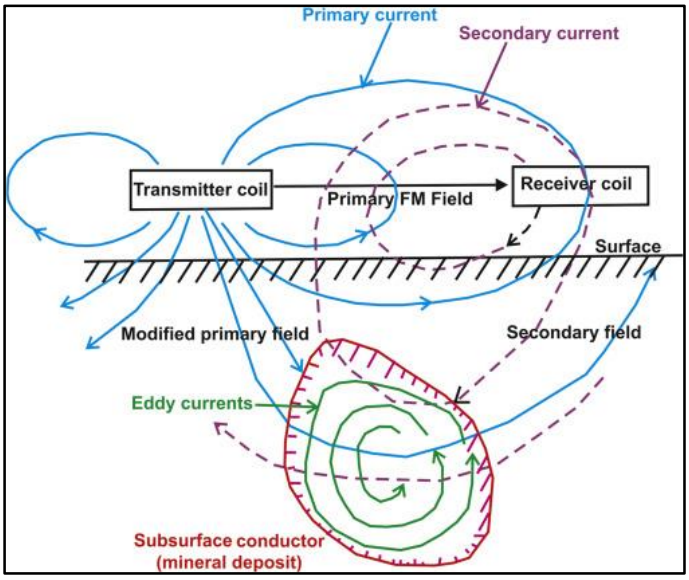
การสำรวจโดยวัดค่าสนามแม่เหล็กเป็นการสำรวจที่ค่อนข้างยุ่งยากเนื่องจากค่าความผิดปกติ (anomaly) ของค่าความเป็นแม่เหล็กแปรเปลี่ยนตามเวลา และตำแหน่งของดวงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลาของวันเช่นเดียวกับการวัดค่าความเร่งโน้มถ่วง ดังนั้นเมื่อเริ่มวัดค่าความเป็นแม่เหล็กจากสถานีฐานเริ่มต้นแล้ว เมื่อวัดค่าความเป็นแม่เหล็กสถานีต่อๆ ไป อีก 1-2 ชั่วโมง ก็จะต้องกลับมาวัดที่สถานีฐานซ้ำอีกครั้งหนึ่ง และเมื่อเสร็จงานประจำวันแล้ว ให้กลับไปวัดค่าที่สถานีฐานอีกครั้ง ทั้งนี้เพื่อหาค่าการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กกับเวลาที่แปรเปลี่ยนไปภายในหนึ่งวัน ทั้งนี้เพื่อนำไปแก้ค่า (correction) การแปรผันของสนามแม่เหล็กแปรผันประจำวันต่อไป ซึ่งการแก้ไขค่าสนามแม่เหล็กที่อ่านได้ ณ สถานีต่าง ๆ จะต้องได้รับการแก้ไขก่อนนำไปแปลความหมายข้อมูล การแก้ไข (correction) ได้แก่แก้ไขเนื่องจากการแปรผันประจำวัน (diurnal correction) การแก้ไขปกติ (normal correction) และการแก้ไขการแปรผันเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ (terrain correction) ที่แตกต่างกัน ดังนั้นการสำรวจหาแหล่งน้ำบาดาลโดยวิธีการวัดค่าสนามแม่เหล็กจึงไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากค่อนข้างยุ่งยากในการวัดค่าและการแปลความหมายข้อมูล (อ่านเพิ่มเติมได้จาก กิตติชัย วัฒนานิกร, การสำรวจธรณีฟิสิกส์สำหรับนักธรณีวิทยาและวิศวกร, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2526)

3.3.4 การสำรวจโดยวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Method)

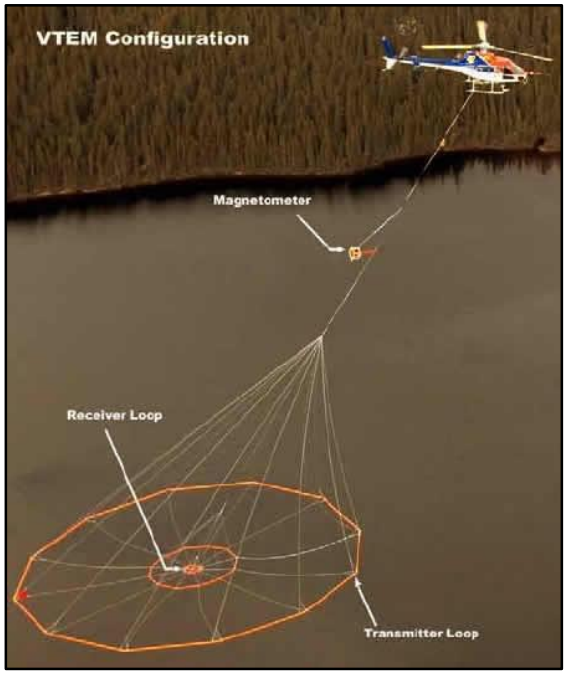
การสำรวจโดยวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Method) เป็นการประยุกต์ใช้คุณสมบัติทางฟิสิกส์ในการสำรวจหาลักษณะทางธรณีวิทยาใต้ผิวดินอีกวิธีการหนึ่ง หลักการก็คือการปล่อยสนามแม่เหล็กปฐมภูมิ (primary magnetic field) จากอุปกรณ์ปล่อยคลื่น (transmitter) ซึ่งภายในประกอบด้วยชุดปล่อยกระแสไฟฟ้าและขดลวดทองแดง เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดโลหะจะทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กขึ้นภายใน transmitter เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกปล่อยออกมาก็จะเดินทางไปทั้งเหนือพื้นดินและใต้ดิน หากเปลือกโลกใต้ดินมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางกลับถึงเครื่องรับสัญญาณ (receiver) จะไม่แตกต่างมากนักกับเคลื่นแม่เหล็กฟ้าที่เดินทางผ่านอากาศไปถึงเครื่องรับโดยตรง จะต่างกันเล็กน้อยที่จะมีความสูงของคลื่น (amplitude) ต่ำกว่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางถึงเครื่องรับโดยตรงเพียงเล็กน้อยและจะบ่งบอกว่าใต้ดิน ณ จุดสำรวจนั้น ไม่มีสิ่งใดที่เป็นตัวนำไฟฟ้าซ่อนอยู่

ในทางกลับกันหากถ้าใต้ดินมีวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้า (conducting body) ใต้ผิวดินซึ่งอาจเป็นมวลสินแร่หรือรอยแตกในหินที่มีน้ำกักเก็บอยู่ ส่วนประกอบที่เป็นแม่เหล็ก (magnetic component) ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าปฐมภูมิที่เดินทางผ่านเข้าไปในวัตถุจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าสลับ (alternating current) ซึ่งมีลักษณะเป็นกระแสหมุนวนหรือกระแสเอ๊ดดี้ (Eddy Currents) (รูปที่ 3.9) เคลื่อนที่ผ่านวัตถุที่นำไฟฟ้า (conductor) นั้น ก็จะเหนี่ยวนำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กทุติยภูมิ (secondary magnetic field) ขึ้นภายในวัตถุนั้นและเดินทางไปสู่เครื่องรับสัญญาณ (receiver) เมื่อคลื่นแม่เหล็กทุติยภูมิเดินทางถึงขดลวดที่อยู่ในตัวรับ (receiver) และเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าสลับ (alternating current) ไหลหมุนวนในขดลวดของตัวรับและผลที่เกิดขึ้นคือสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทุติยภูมิ (secondary electromagnetic field) เมื่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทุติยภูมิเดินทางถึงตัวรับสัญญาณ ผลรวมของความสูงของคลื่น (amplitude) จะแตกต่างกันกับผลรวมความสูงของคลื่นที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กปฐมภูมิที่เกิดขึ้นในพื้นที่ไม่มีวัตถุตัวนำเพียงอย่างเดียว ทำให้สามารถแปลความหมายได้ถึงการวางตัวของและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัตถุตัวนำไฟฟ้าที่อยู่ใต้ดินได้ ถ้าขนาดของวัตถุตัวนำมีขนาดใหญ่ และ/หรือการนำไฟฟ้าของวันถุตัวนำมีค่ามาก ค่าความกว้างและความสูงของคลื่น (wave length and amplitude) ก็จะมากตามไปด้วย

การสำรวจโดยวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถสำรวจได้ทั้งบนผิวดิน (surface electromagnetic survey) และการบินสำรวจทางอากาศ (airborne electromagnetic survey: AEM) ซึ่งอาจจะจะใช้ยานบินไร้คนขับ (Unmanned Aviator Vehicle: UAV) หรือเฮลิคอปเตอร์ หรือโดรน (drone) ในการพาอุปกรณ์สำรวจซึ่งติดตั้งเป็นโครงเหล็กเป็นห่วง (loop) รูปหลายเหลี่ยม (ส่วนใหญ่ 8 เหลี่ยม หรือ 12 เหลี่ยม) ซึ่งติดตั้งพร้อมกับอุปกรณ์วัดความเข้มของสนามแม่เหล็ก (magnetometer) เพื่อวัตถุประสงค์ของการวัดแบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปพร้อมกันด้วย อุปกรณ์ปล่อยสัญญาณ (transmitter) และอุปกรณ์รับสัญญาณ (receiver) อุปกรณ์ปล่อยสัญญาณ และอุปกรณ์รับสัญญาณอาจอยู่ในโครงสร้างเหล็กวงเดียวกัน หรืออยู่คนละวงก็ได้แต่ต้องอยู่ในระนาบเดียวกัน รูปที่ 3.10 แสดงชุดอุปกรณ์การสำรวจแบบ airborne electromagnetic survey สำหรับการสำรวจบนผิวดินจะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า EM34 (รูปที่ 3-11) ที่ประกอบไปด้วยห่วงขดลวด (coil) 2 ห่วง ที่ภายในมีขดลวดพันอยู่หลายรอบ ห่วงหนึ่งต่อเชื่อมกับอุปกรณ์ปล่อยสัญญาณ (transmitter) อีกห่วงหนึ่งต่อเชื่อมกับอุปกรณ์รับสัญญาณ (receiver) รูปที่ 3-12 แสดงชุดอุปกรณ์สำรวจคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนผิวดิน ซึ่งบางครั้งก็เรียกว่า ground conductivity meter ระยะห่างระหว่างห่วงในการสำรวจสามารถกำหนดได้เป็น 10 เมตร 20 เมตร หรือ 40 เมตร แต่ละระยะจะต้องปรับความถี่ในการปล่อยสัญญาณคลื่นที่ต่างกันไป เกณฑ์ตั้งความถี่ก็จะขึ้นอยู่กับรุ่นของเครื่องมือ นอกจากนั้นรูปแบบการวางห่วงยังสามารถออกแบบให้วางขนานกับผิวดิน (horizontal separation) ก็ได้ หรือวางให้ตั้งฉากกับผิวดิน (vertical separation) ได้เช่นกัน รูปที่ 3-13 แสดงรูปแบบการวางห่วงขดลวด ทั้งแบบ ข้อดีของการสำรวจโดยวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนผิวดินคือสามารถสำรวจได้ในพื้นที่ที่เป็นพื้นแข็งเช่นลานหิน ลานซีเมนต์หรือลาดด้วยแอสฟัลท์ ทั้งนี้เนื่องจากไม่ต้องใช้การตอกหลักเหล็ก (steel electrode) เพื่อปล่อยสัญญาณหรือปล่อยกระแสไฟฟ้าเหมือนการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า



รูปที่ 3-9 แสดงเส้นทางเดินของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากอุปกรณ์ปล่อยสัญญาณ (transmitter) ผ่านตัวนำไฟฟ้าใต้ดิน (conducting body) การเกิดกระแสเอ๊ดดี้ (Eddy Currents) และเดินทางไปยังเครื่องรับสัญญาณ (receiver)



(a) (b)

รูปที่ 3-10 แสดงรูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ปล่อยสัญญาณ (transmitter) และรับสัญญาณ (receiver) ภาพ (a) transmitter และ receiver อยู่คนละโครงโลหะ (b) transmitter และ receiver อยู่โครงโลหะเดียวกันแต่อยู่ที่ตำแหน่งหัวและท้ายของโครง

รูปที่ 3-11 แสดงชุดอุปกรณ์สำรวจคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนผิวดิน (surface electromagnetic) ซึ่งบางครั้งสามารถเรียกได้เป็นเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าของพื้นดิน (ground conductivity meter)

(a)

(b)

รูปที่ 3-12 แสดงรูปแบบการวางห่วงขดลวด (coil) ในการสำรวจวัดค่าแม่เหล็กไฟฟ้าบนผิวดิน (a) ตั้งห่วงขดลวดในแนวตั้งฉากกับพื้น (vertical separation) และ (b) ตั้งห่วงขดลวดในแนวขนานกับพื้น (horizontal separation)

3.3.5 การสำรวจโดยวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity Method)

การสำรวจโดยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Resistivity Method) เป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้ในการสำรวจและประเมินศักยภาพแหล่งน้ำบาดาล เนื่องจากวิธีการดังกล่าวสามารถกระทำได้ง่าย ค่าใช้จ่ายต่ำกว่าวิธีการอื่น ๆ และทำได้เร็ว มีความละเอียดสูง การแปลความหมายข้อมูลก็สามารถกระทำได้ง่ายโดยไม่จำเป็นต้องปรับแก้ค่ารบกวน (noise) ต่าง ๆ อันเกี่ยวเนื่องกับสิ่งแวดล้อมมากมาย สามารถบ่งบอกถึงคุณสมบัติด้านความต้านทานไฟฟ้าของชั้นดินชั้นหินที่ความลึกระดับต่าง ๆ จากผิวดินได้ชัดเจน และทำให้คาดคะเนได้ว่าที่ความลึกใด จะเป็นแหล่งกักเก็บน้ำบาดาล รวมถึงความลึกและชนิดของชั้นดินชั้นหินต่าง ๆ ได้อีกด้วย

ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ เป็นคุณสมบัติของหินที่จะจำกัดปริมาณของกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านตัวมันเอง ดังนั้นจึงหมายถึงความต้านทาน (Resistance, ohms) ระหว่างหน้าตรงกันข้ามของวัตถุที่เป็นรูปลูกเต๋า (Unit cube) และสมมุติว่าวัสดุนั้นมีความต้านทาน (Resistance: R) มีพื้นที่หน้าตัด (Area: A) และยาว (Length: L) ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (rho: ρ) จะมีค่าเท่ากับ

$$\rho = \frac{RA}{L}$$

เมื่อ ρ = ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ มีหน่วยคือ ohm-m^2/m หรือ ohm-m (โอห์ม-เมตร)

R = ความต้านทานไฟฟ้า (ohm)

A = พื้นที่หน้าตัดของวัตถุ (m^2)

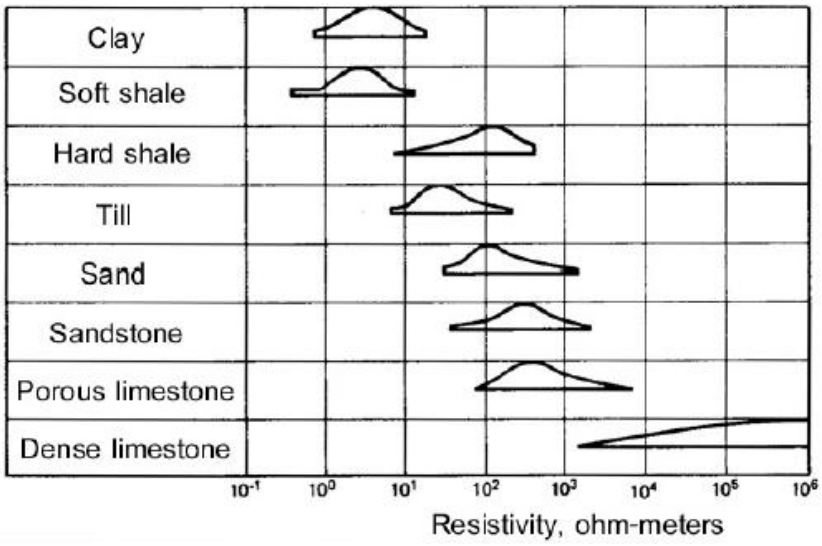
L = ความยาวของวัตถุ (m)

ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของชั้นดินชั้นหินจะแตกต่างกันมาก ขึ้นอยู่กับชนิดของหิน ความหนาแน่น ความพรุน ขนาดและรูปร่างของช่องว่าง ปริมาณและคุณภาพของน้ำที่อยู่ในช่องว่าง และอุณหภูมิ โดยปกติหินหรือแร่ประกอบหินโดยทั่ว ๆ ไป เช่น แร่ควอรซ์ (quartz) แร่เฟลด์สปาร์ (feldspar) ไมก้า (mica) และอื่น ๆ จะไม่นำไฟฟ้า กล่าวคือ เป็นฉนวน (insulator) แต่เนื่องจากชั้นหินมีช่องว่างซึ่งมีน้ำหรือสารละลายเกลือแร่กักเก็บอยู่ ซึ่งอาจเป็นในลักษณะเพียงบางส่วนหรืออิ่มตัวทั้งหมด สารละลายหรือน้ำเหล่านี้จึงเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านไปมาในชั้นหินได้ ดังนั้นความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะซึ่งเป็นส่วนกลับกับการนำไฟฟ้าจำเพาะซึ่งก็จะขึ้นอยู่กับสาเหตุหรือปัจจัยที่สำคัญ 2 ประการ คือ

1. การนำไฟฟ้าของน้ำหรือสารละลายที่แทรกอยู่ ซึ่งก็จะขึ้นอยู่กับปริมาณของเกลือแร่ที่ละลายอยู่หรือขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำนั่นเอง

2. ปริมาณของสารละลายที่แทรก หรือถูกกักเก็บอยู่ในช่องว่างซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าความพรุน ตลอดจนสภาวะที่หินนั้นอยู่ กล่าวคืออยู่เหนือ หรือต่ำกว่าระดับน้ำบาดาล จากการศึกษาพบว่าถ้าหินนั้นอยู่เหนือระดับน้ำบาดาล หินที่สามารถกักเก็บความชื้นไว้มากกว่าจะมีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะต่ำกว่าหินที่กักเก็บความชื้นได้น้อยกว่า ดังนั้น ดินเหนียวก็จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะต่ำกว่าทราย และกรวด ในขณะเดียวกัน กรณีที่หินนั้นอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำบาดาล หินที่สามารถอุ้มสารละลายเกลือแร่และดึงดูดไอออนอิสระได้ดีกว่าก็จะมีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะต่ำกว่าหินที่ไม่สามารถดึงดูดไอออนอิสระไว้ กรณีนี้ดินเหนียวก็จะมีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะต่ำกว่าทรายและกรวดอีกเช่นกัน

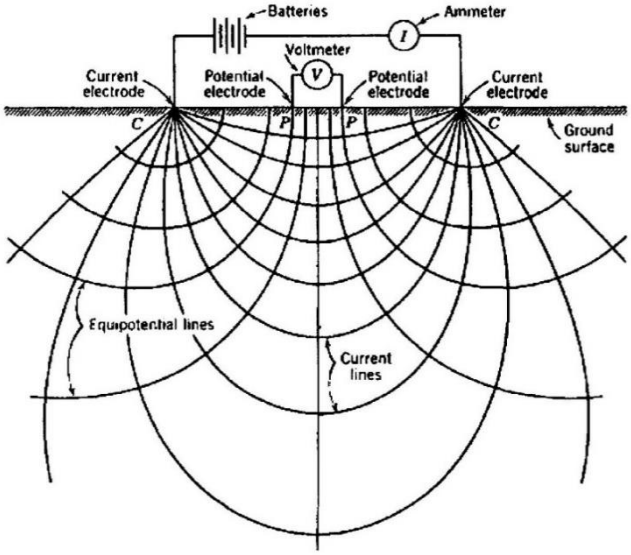
ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของหินชนิดต่าง ๆ หรือน้ำที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ ไม่สามารถกำหนดเป็นค่าที่ตายตัวได้ ทั้งนี้ เนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ ที่เข้ามาเกี่ยวข้อง กล่าวคือ หินอัคนี และหินแปรอาจจะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ ตั้งแต่ 10^2 ถึง 10^8 โอห์ม-เมตร หินตะกอน และหินร่วนอาจจะตั้งแต่ 10 ถึง 10^4 โอห์ม-เมตร (รูปที่ 3-13)



รูปที่ 3-13 ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะในหินประเภทต่าง ๆ ซึ่งมีน้ำจืดแทรกอยู่ตามช่องว่าง ถ้าเปลี่ยนเป็นน้ำเค็ม ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะจะลดลงอย่างน้อยหนึ่งเท่าตัว (จาก Todd, 1980)

การสำรวจโดยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ จะใช้ขั้วไฟฟ้า (electrical electrode) 4 ขั้วด้วยกัน โดยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ทำหน้าที่เป็นขั้วปล่อยกระแสไฟฟ้า (current electrodes, C1, C2) (รูปที่ 3-13) และอีก 2 ขั้ว ทำหน้าที่เป็นขั้ววัดความต่างศักย์ (potential electrodes, P1, P2) จากนั้นนำขั้วทั้งสี่ปักลงดินในพื้นที่สำรวจ และเมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านลงไปในดินระหว่างขั้ว C1 C2 ก็จะทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นที่ระหว่างขั้ว P1 P2 โดยผู้สำรวจจะต้องทำการวัดความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นและทำการบันทึกค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ และจากการทราบค่ากระแสไฟฟ้าที่ปล่อยลงไป ทำให้สามารถคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของหิน ในพื้นที่ดังกล่าวได้ พิจารณาจาก รูปที่ 3-14 จะเห็นว่าค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้ จะเป็นค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของชั้นหินหรือวัตถุที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านทั้งหมด จึงเรียกค่าเฉลี่ยนี้ว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปรากฏ

(apparent resistivity, ρ_a) ถ้าขยายระยะห่างของขั้วไฟฟ้าทั้งหมดออกไป กระแสไฟฟ้าก็จะผ่านลึกลงไปในชั้นหินที่ระดับความลึกต่าง ๆ ที่มากกว่าเดิม โดยค่า ρ_a ก็จะเปลี่ยนแปลงไปกับความลึกที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านลงไปเช่นกัน ซึ่งก็จะขึ้นอยู่กับขนาดความกว้าง หรือระยะของขั้วไฟฟ้าที่ผิวดิน ค่า ρ_a ที่บันทึกได้จำเป็นต้องนำไปแปลความหมายและคำนวณออกมาเป็น ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะจริง (True resistivity, ρ_a) อีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 3-14 วงจรไฟฟ้าของการสำรวจด้วยวิธีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (จาก Todd, 1980)

สำหรับการจัดขั้วไฟฟ้า หรือการวางตำแหน่งของขั้วไฟฟ้า (electrodes configuration หรือ electrodes array) ในระหว่างทำการสำรวจนั้น อาจจะวาง หรือจัดได้หลาย ๆ รูปแบบ แต่ที่นิยมใช้มีอยู่ 3 รูปแบบ ดังนี้ (รูปที่ 3-15)

1. การจัดแบบเวนเนอร์ (Wenner Configuration) จะจัดวางขั้วปล่อยกระแสไฟฟ้า (current electrodes) C1 และ C2 อยู่ด้านนอก และขั้ววัดความต่างศักย์ (potential electrodes) P1 และ P2 อยู่ตรงกลาง โดยจัดให้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทุกตัวมีค่าเท่ากันหมด (เท่ากับระยะ a) เวลาขยับขั้วไฟฟ้าต่อการวัดแต่ละครั้ง ก็จะขยับออกไปเป็นระยะเท่ากับ 2a, 3a, 4a, ... ไปจนถึงระยะเท่ากับ na เมื่อ n เป็นจำนวนนับ ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปรากฏ (ρ_a) จะมีค่าเท่ากับ

$$\rho_a = 2\pi a \frac{V}{I}$$

เมื่อ a = ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า (เมตร)
V = ความต่างศักย์ไฟฟ้า (มิลลิโวลท์)
I = กระแสไฟฟ้าที่ปล่อยลงไป (มิลลิแอมแปร์)

และ $2\pi a$ = Geometric Factor หรือค่าที่เป็นปัจจัยจากลักษณะการจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบ Wenner Array

2. การจัดแบบชลัมเบอร์เจอร์ (Schlumberger Configuration) จะจัดวางขั้วปล่อยกระแสไฟฟ้า (current electrodes) C1 และ C2 อยู่ด้านนอก และขั้ววัดความต่างศักย์ (potential electrodes) P1 และ P2 อยู่ตรงกลาง การขยับขั้วไฟฟ้า (electrodes) จะขยับขั้วปล่อยกระแสไฟฟ้าบ่อยครั้งกว่าการขยับขั้ววัดความต่างศักย์ โดยกำหนดให้ระยะ L ระหว่างขั้วปล่อยกระแสไฟฟ้า (current electrodes) C1C2 มีค่ามากๆ

เมื่อเปรียบเทียบกับระยะ b ซึ่งเป็นระยะระหว่างขั้ววัดความต่างศักย์ (potential electrodes) P1P2 โดยอย่างน้อย L ต้องมากกว่า 5 เท่าของระยะ b (L ≥ 5b) ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปรากฏ (ρ_a) ของแต่ละค่าของ L กับค่า b จะมีค่าเท่ากับ

$$\rho_a = \pi \frac{(L/2)^2 - (b/2)^2}{b} \frac{V}{I}$$

เมื่อ a = ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า (เมตร)
V = ความต่างศักย์ไฟฟ้า (มิลลิโวลท์)
I = กระแสไฟฟ้าที่ปล่อยลงไป (มิลลิแอมแปร์)

และ π $(L/2)^2 - (b/2)^2 / b$ = Geometric Factor หรือค่าที่เป็นปัจจัยจากลักษณะการจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบ Schlumberger Array

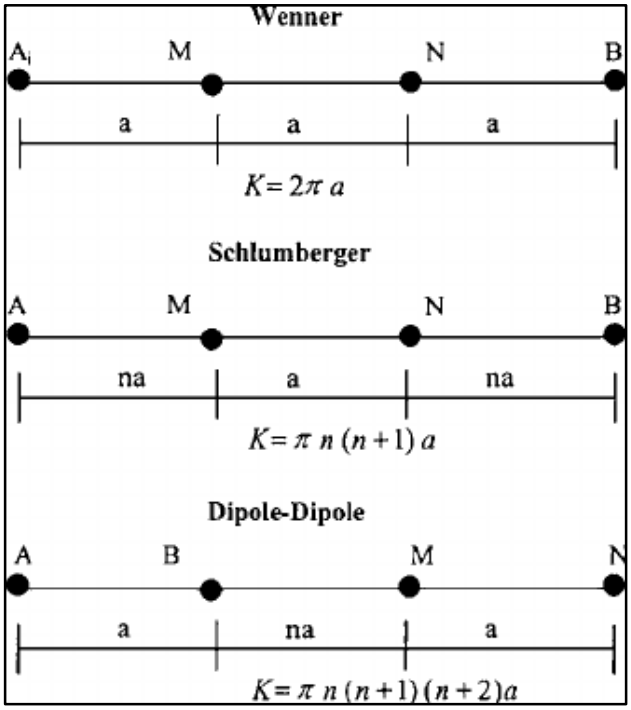
3. การจัดแบบไดโพล-ไดโพล (Dipole-Dipole Configuration) โดยให้ระยะห่างระหว่างขั้วปล่อยกระแสไฟฟ้า (current electrodes) C1C2 = ขั้ววัดความต่างศักย์ (potential electrodes) P1P2 = a และระยะห่างระหว่างชุดของขั้ว C1C2 และ P1P2 ห่างเท่ากับ na เมื่อ n เป็นเลขจำนวนเต็ม ในช่วงแรกของการวัดค่า (n=1) คู่ C1C2, P1P2 จะอยู่ห่างกันเท่ากับระยะ a ตำแหน่งที่เป็นตัวแทนของค่าความต้านทานไฟฟ้าจะอยู่กึ่งกลางอยู่ที่ที่ความลึกเท่ากับ a ณ จุดตัดของเส้นตรงซึ่งวัดไป 45 องศาของจุดกึ่งกลางของขั้วกระแสไฟฟ้า (รูปที่ 3-16) วิธีการสำรวจช่วงแรกจะปักขั้วปล่อยกระแสไฟฟ้าอยู่กับที่ ที่ n = 1 แล้วค่อยๆ ขยับขั้ววัดความต่างศักย์ออกไป ที่ n=2, n=3, n=4, n=5, n=... แล้วขยับขั้วปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้ามาปักอยู่กับที่ แล้วขยับขั้ววัดค่าความต่างศักย์ออกไปเรื่อยๆ ทำอบบนี้ไปเรื่อยๆ จนกว่าจะครบแนวสำรวจและความลึกที่ต้องการ รูปที่ 3-17 แสดงการปักและขยับขั้วไฟฟ้าในการสำรวจแบบ Dipole-Dipole Configuration และการแสดงผลสำรวจจะเป็นรูปแบบเส้น contour line ของค่าความต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติ (รูปที่ 3-18)

ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปรากฏ (ρ_a) แต่ละค่า a จะมีค่าเท่ากับ

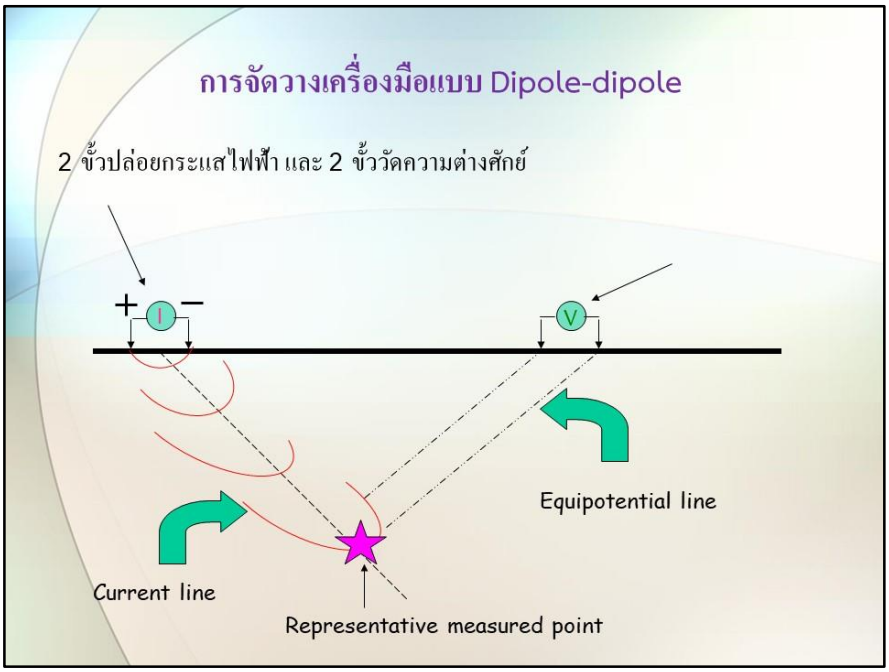
$$\rho_a = \pi\, n\, (n+1)\, (n+2)\, a\, V/I$$

เมื่อ a = ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า (เมตร)
V = ความต่างศักย์ไฟฟ้า (มิลลิโวลท์)
I = กระแสไฟฟ้าที่ปล่อยลงไป (มิลลิแอมแปร์)

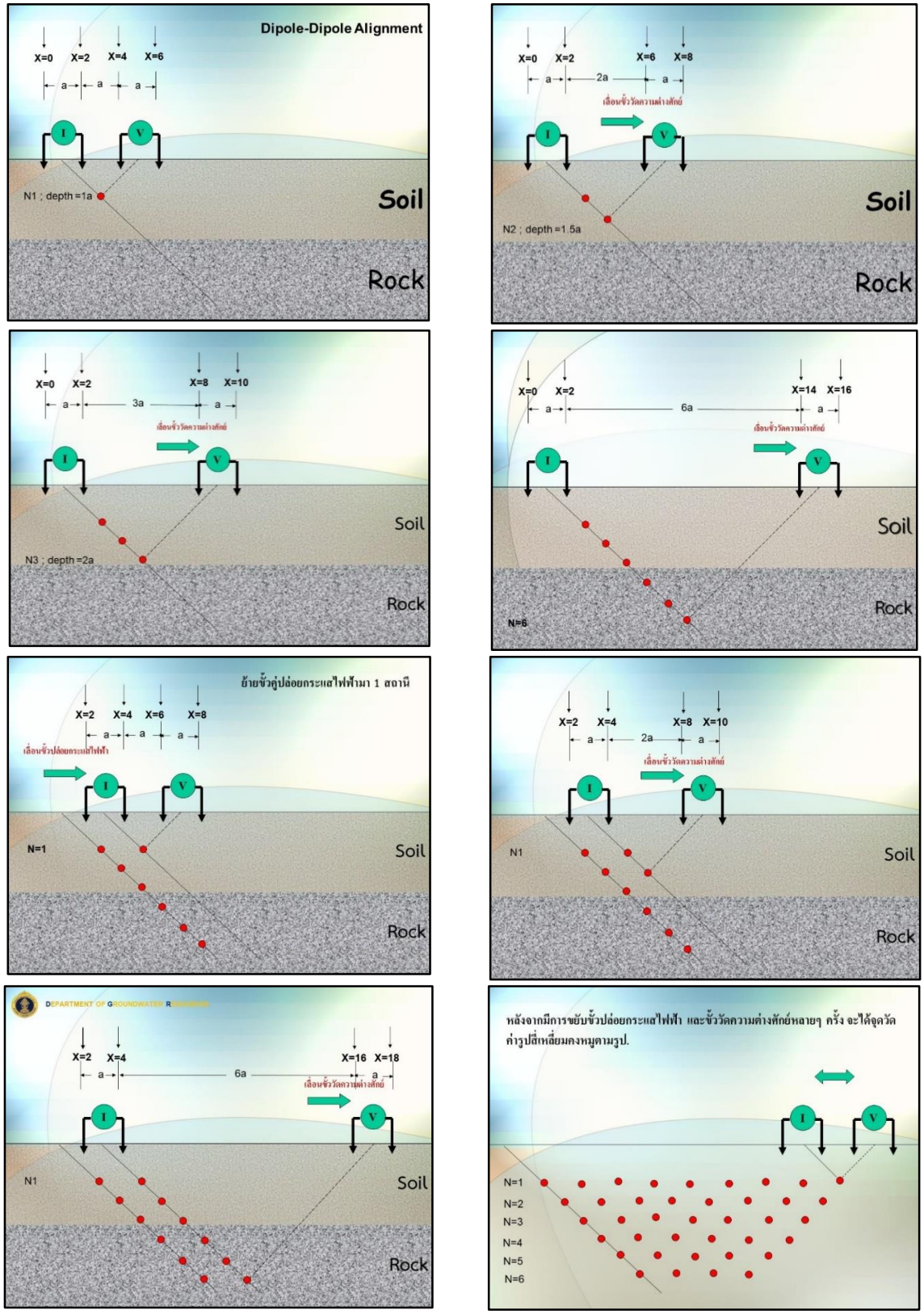
และ π n (n=1) (n+2) a = Geometric Factor หรือค่าที่เป็นปัจจัยจากลักษณะการจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบ Dipole-Dipole Array



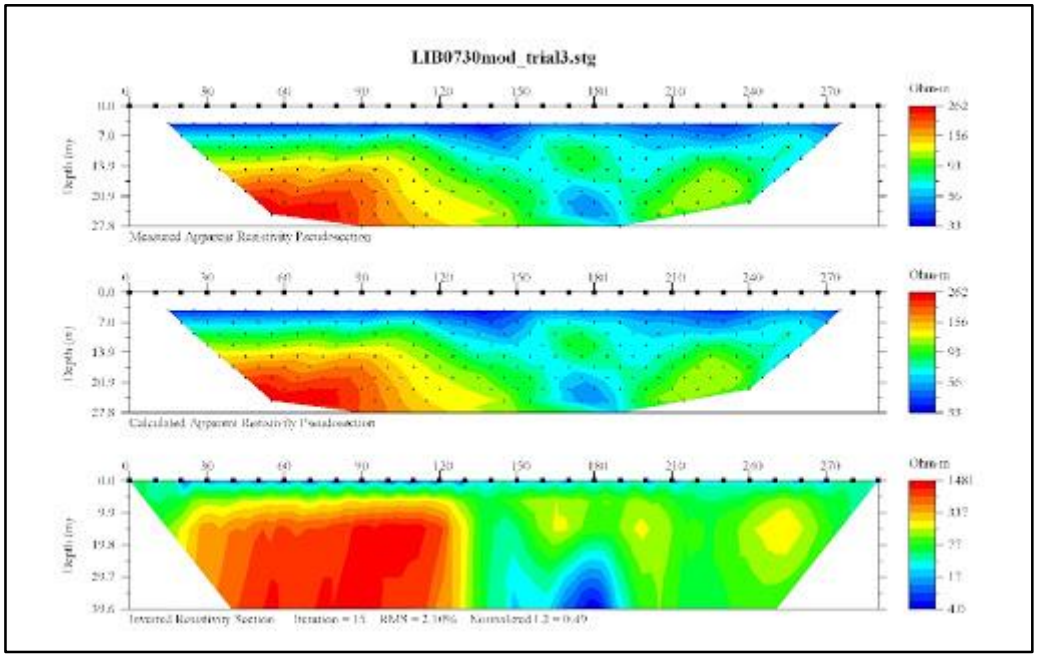
รูปที่ 3-15 การจัดขั้วไฟฟ้าในการสำรวจด้วยวิธีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (จาก Todd, 1980; Fetter 2001)



รูปที่ 3-16 แสดงตำแหน่งที่เป็นตัวแทนของค่าความต้านทานไฟฟ้าจะอยู่กึ่งกลางอยู่ที่ที่ความลึกเท่ากับ a ณ จุดตัดของเส้นตรงซึ่งวัดไป 45 องศาของจุดกึ่งกลางของขั้วกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 3-17 แสดงการปักและขยับขั้วไฟฟ้าในการสำรวจแบบ Dipole-Dipole Configuration (ภาพจากไฟล์นำเสนอการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าแบบ Dipole-Dipole, นภดล ภูมิวิเศษ, ส่วนธรณีวิทยา, กรมชลประทาน)



รูปที่ 3-18 การแสดงผลสำรวจของวิธีจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบ Dipole-Dipole Configuration จะเป็นรูปแบบเส้น contour line ของค่าความต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติ

3.3.2 รูปแบบการสำรวจในภาคสนาม

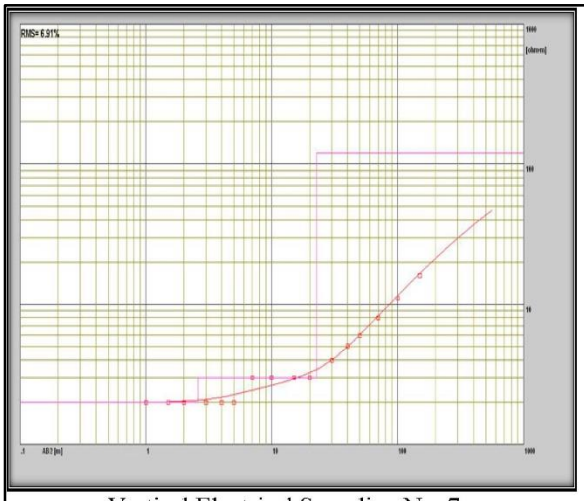
สำหรับการสำรวจในภาคสนาม สามรถกระทำได้ 2 ลักษณะ ขึ้นอยู่กับความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการสำรวจ ดังนี้

1. การหยั่งหาค่าความต้านทางไฟฟ้าในแนวดิ่ง (Vertical Electrical Resistivity Sounding: VES) มีวัตถุประสงค์เพื่อ หาค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะในแนวลึก โดยกำหนดแนวสำรวจ (survey line) และเลือกรูปแบบของการจัดขั้วไฟฟ้าที่ต้องกาดำเนินการในการสำรวจ กำหนดจุดกึ่งกลางของแนวสำรวจเป็นตำแหน่งสำรวจเริ่มต้น กำหนดระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเริ่มต้นให้มีระยะน้อย ๆ ก่อนทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ สำหรับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเริ่มต้น จากนั้นก็ขยายระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าออกไปทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ และขยายระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าออกไปอีก และทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ ทำเช่นนี้ไปจนครอบคลุมแนวสำรวจที่กำหนดไว้ เนื่องจากความลึกที่กระแสไฟฟ้าวิ่งผ่านลงไปในชั้นดินชั้นหินข้างล่าง จะขึ้นอยู่กับระยะห่างของขั้วไฟฟ้า กล่าวคือ เมื่อระยะห่างมาก กระแสไฟฟ้าก็สามารถที่จะวิ่งผ่านลงไปในชั้นหินได้ลึกมากขึ้น โดยทั่วไปในการสำรวจจะเริ่มต้นที่ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้ามีค่าน้อย และเพิ่มขยายมากขึ้นไปเรื่อยๆ ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปรากฏ (ρ_a) ที่วัดได้ในช่วงแรกๆ ก็จะใกล้เคียงกับค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของชั้นดินชั้นหินในส่วนตื้น ๆ เมื่อขยายระยะห่างของขั้วไฟฟ้าออกไปกระแสไฟฟ้าก็จะวิ่งผ่านลงไปที่ความลึกมากขึ้น ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปรากฏ ก็จะใกล้เคียงกับค่าความต้านทานฟ้าจำเพาะของชั้นหินที่อยู่บริเวณที่ลึกลงไป ดังนั้น ที่แต่ละตำแหน่งสำรวจก็จะทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะออกมาได้หลาย ๆ ค่า ซึ่งสัมพันธ์กับความลึกระดับต่าง ๆ กัน เป็นการสำรวจหาค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะในแนวลึกนั่นเอง ถ้านำค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปรากฏ และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่สัมพันธ์กันมาเขียนลงบนกระดาษกร๊าฟ จากรูปร่างลักษณะของกร๊าฟ สามารถที่จะบอกคร่าวๆ ถึงลักษณะของชั้นหินในบริเวณที่ทำการสำรวจได้ว่า พื้นที่ดังกล่าวน่าจะมีชั้นหินอยู่กี่ชั้น ความสัมพันธ์เปรียบเทียบของค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของแต่ละชั้นเป็นอย่างไร รูปที่ 3-19 แสดงตัวอย่างเส้นกร๊าฟการหยั่งหาค่าความต้านทางไฟฟ้าในแนวดิ่ง

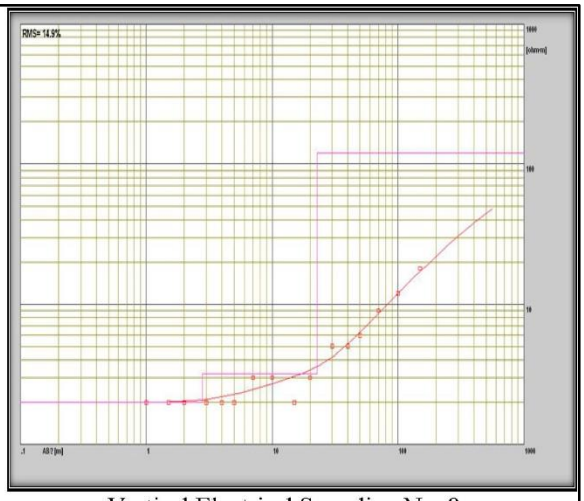
ลักษณะเส้นกร๊าฟต้นแบบของการหยั่งวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในแนวดิ่ง (VES Type Curves) จะมี 4 รูปแบบ ได้แก่ Type H เป็นเส้นกร๊าฟที่แสดงค่า $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ Type A เป็นเส้นกร๊าฟที่แสดงค่า $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$ Type K เป็นเส้นกร๊าฟที่แสดงค่า $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ และ Type Q เป็นเส้นกร๊าฟที่แสดงค่า $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$ รูปที่ 3-20 แสดงลักษณะเส้นกร๊าฟต้นแบบของการหยั่งวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในแนวดิ่ง

2. สำรวจหาค่าการเปลี่ยนแปลงในแนวราบ (Resistivity Profiling) มีวัตถุประสงค์ของการสำรวจเพื่อ หาค่าการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะในแนวระนาบ โดยกำหนดตำแหน่งสำรวจ (Stations) ให้ครอบคลุมพื้นที่สำรวจ จากนั้นกำหนดระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (electrode spacing) และเลือกรูปแบบการจัดขั้วไฟฟ้าที่ต้องการ เช่น Wenner หรือ Schlumberger configuration ทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะที่ตำแหน่งสำรวจที่กำหนดไว้แล้ว โดยให้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า และรูปแบบการจัดขั้วไฟฟ้าเหมือนกันหมดทุกตำแหน่งสำรวจ เพราะฉะนั้นค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะที่อ่านได้ ก็จะเป็นตัวแทนของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ ของชั้นหินที่ระดับความลึกที่เท่ากันในแต่ละตำแหน่งสำรวจ ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะที่วัดได้ที่แต่ละตำแหน่งสำรวจ และถ้ามีจำนวนข้อมูลมากเพียงพอ และครอบคลุมพื้นที่สำรวจ ก็จะสามารถเขียนเส้นระดับค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะที่เท่ากัน (resistivity contour) ของบริเวณที่ทำการสำรวจได้ เรียกว่า resistivity contour map (รูปที่ 3-21) ในขณะเดียวกันก็สามารถนำเสนอข้อมูล และแปลความหมายความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ และสภาพธรณีวิทยาในพื้นที่ในลักษณะของ resistivity profile หรือ resistivity section ได้ (รูปที่ 3-22)

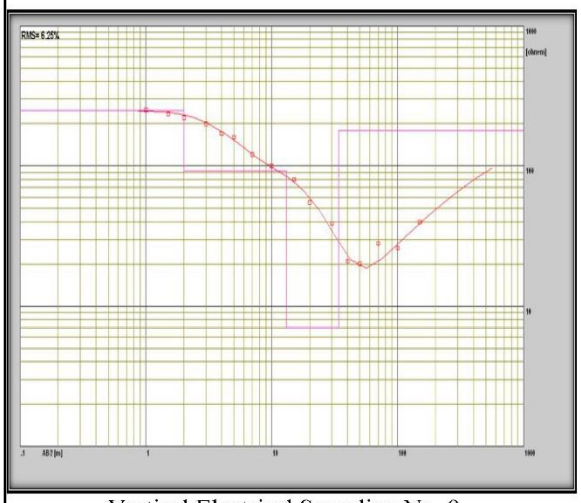
อีกหนึ่งวิธีการที่สามารถใช้สำรวจการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทางไฟฟ้าในแนวราบได้แก่การสำรวจที่เรียกว่า 2 Dimensional Resistivity Survey หรือ 2-D Resistivity Survey โดยการวางขั้วปล่อยกระแสไฟฟ้าเป็นแนวยาวและเป็นเส้นตรง ระยะห่างเท่ากัน เช่น 10 เมตร หรือ 25 เมตร แล้วแต่ความลึกที่ต้องการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติ ขั้วไฟฟ้าจะมีทั้งหมด 56 ขั้ว โดย 28 ขั้วจะวางอยู่ฝั่งหนึ่งของจุดศูนย์กลางของการวัดหรือจุดที่ตั้งเครื่องนั่นเอง ส่วนอีก 28 ขั้วจะวางอยู่ฝั่งตรงกันข้าม ขั้วไฟฟ้าแต่ละขั้วจะเชื่อมต่อกับสานเคเบิลยาว เมื่อเช็คดูแล้วว่าขั้วไฟฟ้าทุกขั้วต่อเชื่อมโดยสมบูรณ์กับสายเคเบิลและตอกแน่นลงในพื้นดินแล้ว ก็กดปุ่มเพื่อปล่อยกระแสไฟฟ้า อาจใช้เวลาในการประมวลผลข้อมูลประมาณ 40 นาที ถึง 60 นาที แล้วแต่สภาพพื้นที่ รูปที่ 3-23 แสดงชุดอุปกรณ์การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติ และรูปที่ 3-24 แสดงตัวอย่างการแสดงผลของการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติ



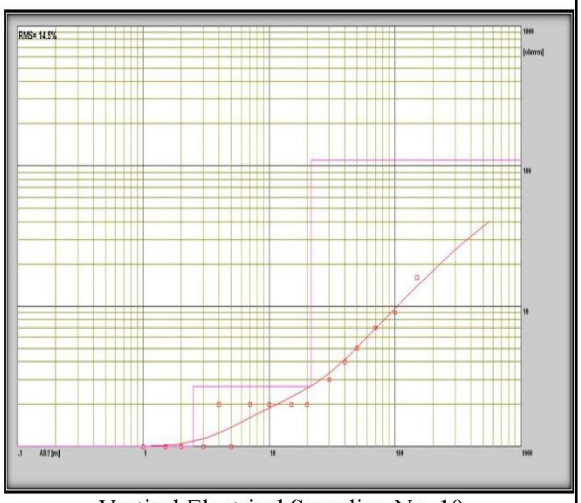
Vertical Electrical Sounding No. 7.



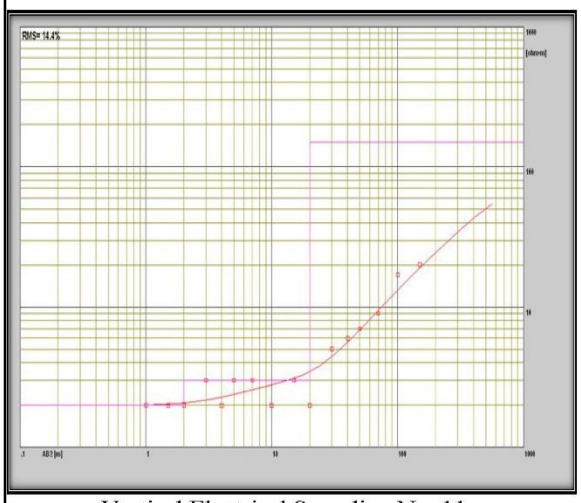
Vertical Electrical Sounding No. 8.



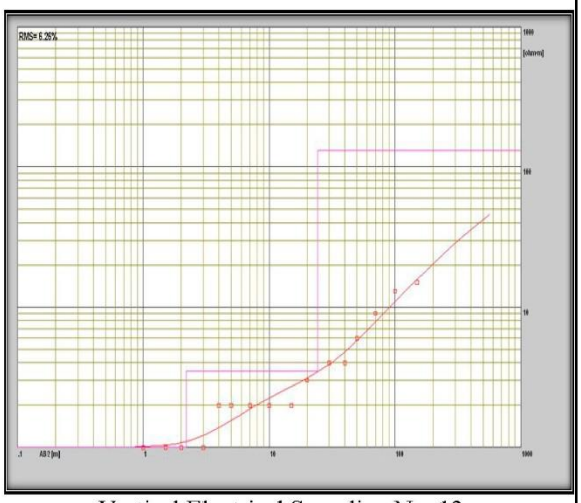
Vertical Electrical Sounding No. 9.



Vertical Electrical Sounding No. 10.

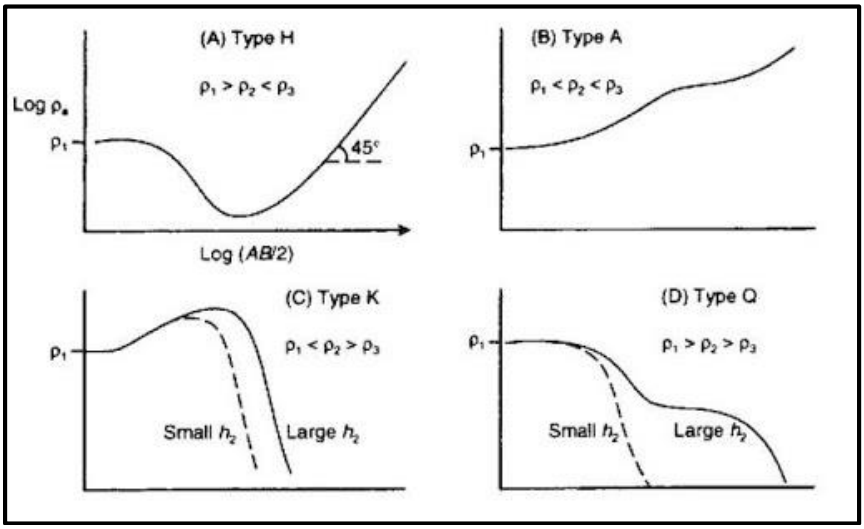


Vertical Electrical Sounding No. 11.

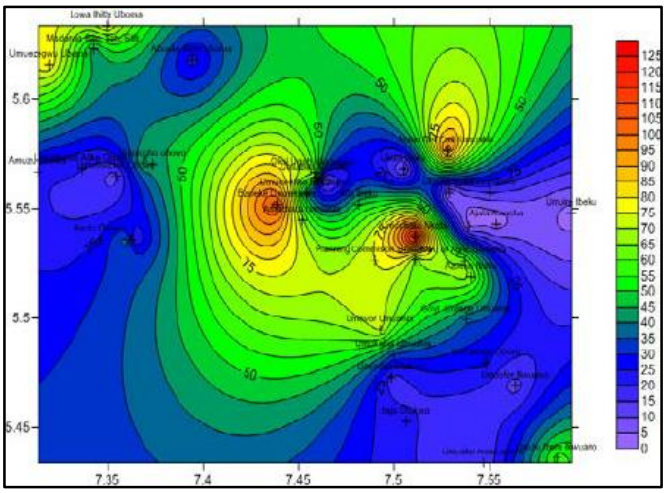


Vertical Electrical Sounding No. 12.

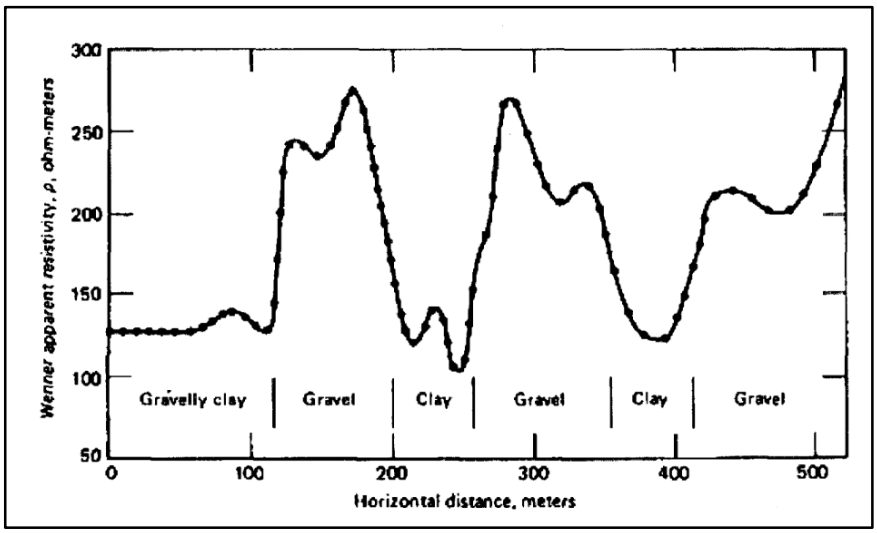
รูปที่ 3-19 แสดงตัวอย่างเส้นกร๊าฟการหยั่งหาค่าความต้านทางไฟฟ้าในแนวดิ่ง โดยใช้การจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบ Schlumberger Configuration



รูปที่ 3-20 แสดงลักษณะเส้นกร๊าฟต้นแบบของการหยั่งวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในแนวดิ่ง

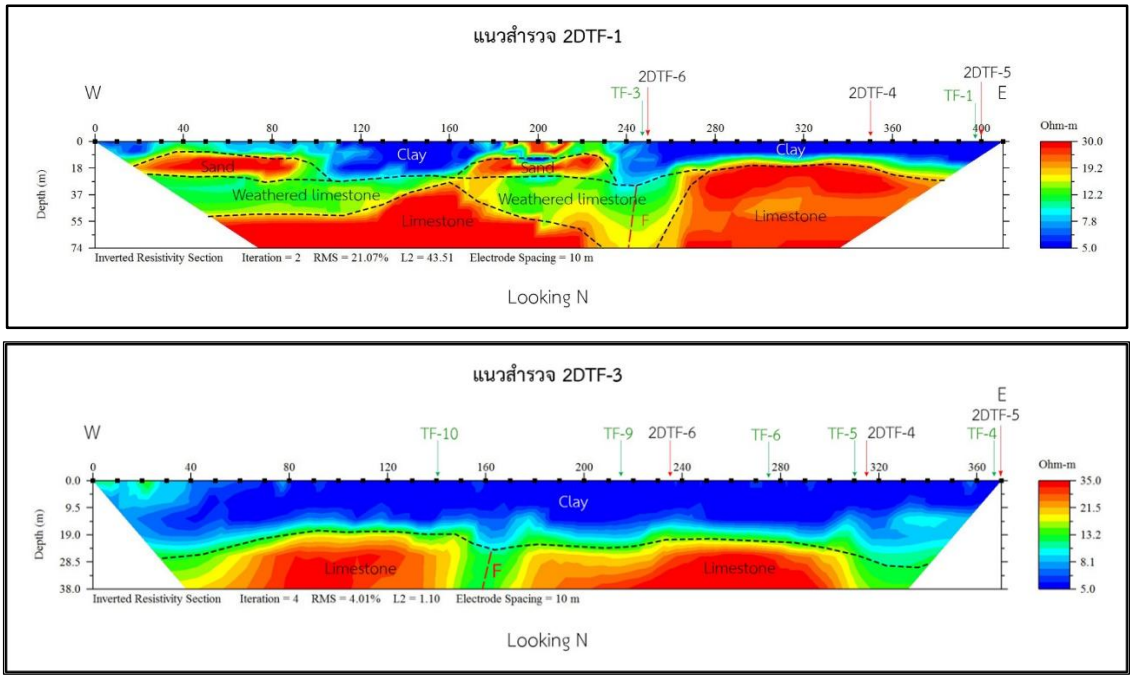


รูปที่ 3-21 การนำเสนอข้อมูลในรูปของ Resistivity contour map (จาก Fetter, 2001)



รูปที่ 3-22 การนำเสนอข้อมูลในรูปของ Resistivity profile map (จาก Todd, 1980)

รูปที่ 3-23 แสดงชุดอุปกรณ์การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติ



รูปที่ 3-24 แสดงตัวอย่างการแสดงผลของการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติ

3.4 การแปลความหมายข้อมูล (data interpretation)

การแปลความหมายข้อมูลสำหรับวิธีการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์แต่ละวิธี จะมีหลักการที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับทฤษฎีพื้นฐานของแต่ละวิธี ดังนี้

1) การสำรวจโดยใช้คลื่นไหวสะเทือน (Seismic Method) ไม่ว่าจะเป็นการสำรวจโดยวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (Seismic Refraction Method) หรือการสำรวจโดยวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือนแบบสะท้อน (Seismic Reflection Method) จะอาศัยหลักการด้านความเร็วของการเดินทางของคลื่น P-waves และ S-waves โดยความเร็วคลื่นของ P-waves จะขึ้นอยู่อย่างมากกับความพรุนและชั้นตะกอนที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (water saturation of sediment) ในขณะเดียวกันความเร็วคลื่นของ S-waves จะขึ้นอยู่กับความแน่นของเนื้อหิน ซึ่งนั่นหมายความว่าความเร็วคลื่นของทั้ง P-waves และของ S-waves จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของเนื้อหินที่รองรับพื้นที่สำรวจอยู่ ดังนั้นการสำรวจโดยใช้คลื่นไหวสะเทือนสามารถบ่งบอกความลึกของชั้นน้ำบาดาล (water table) และความลึกของชั้นหินพื้นฐาน (bed rock) ได้เป็นอย่างดี

2) การสำรวจโดยวัดค่าความเร่งโน้มถ่วง (Gravity Method) สามารถแปลความหมายโดยการจำแนกคุณสมบัติด้านความหนาแน่น (density) ของวัสดุที่อยู่ใต้ผิวดิน เป็นการประยุกต์การแปลความหมายสภาพธรณีวิทยาใต้พื้นที่สำรวจโดยอาศัยหลักการที่ว่าใต้ผิวดินจะมีความแตกต่างของชนิดชั้นดินชั้นหินในแนวดิ่งและแนวนอนอยู่เสมอ กล่าวคือชั้นดินชั้นหินใต้เปลือกโลกจะไม่มีคุณสมบัติที่หมือนกันในทุกทิศทุกทาง (heterogeneous and anisotropic) ดังนั้นเราจึงสามารถสำรวจตรวจวัดค่าความเร่งโน้มถ่วงของพื้นที่ต่าง ๆ ได้ และค่าที่วัดได้ย่อมสามารถแปลความหมายเป็นสภาพธรณีวิทยาใต้ผิวดินได้ ซึ่งค่าความเร่งโน้มถ่วงที่วัดได้ ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง มีความสัมพันธ์กับมวลของชั้นดินชั้นหินที่ตำแหน่งนั้น มวลของชั้นดินชั้นหินมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่น (density) ของชั้นดินชั้นหิน ค่าความหนาแน่นของชั้นดินชั้นหินมีความสัมพันธ์กับ แร่ประกอบดิน-หิน เนื้อดิน-หิน ช่องว่างหรือรูพรุน และของเหลวแทรกในรูพรุน
3) การสำรวจโดยวัดค่าสนามแม่เหล็ก (Magnetic Method) ไม่นิยมใช้ในการสำรวจหาแหล่งน้ำบาดาลโดยตรงแต่สามารถประยุกต์ใช้ในการสำรวจหาร่องน้ำเก่าใต้ดิน (buried channel) ความไม่สม่ำเสมอของหินพื้นฐาน (basement irregularities) หรือธรณีวิทยาโครงสร้าง (geologic structures) ต่าง ๆ ได้แก่ระนาบรอยเลื่อน (fault plane) พนังหิน (dike) โครงสร้างรูปประทุน (anticline) โครงสร้างรูปประทุนหงาย (syncline) โดมหินเกลือ (salt dome) และมวลหินอัคนีแทรกซอน (igneous intrusion)
4) การสำรวจโดยวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Method) เป็นการประยุกต์ใช้คุณสมบัติทางฟิสิกส์ในการสำรวจหาลักษณะทางธรณีวิทยาใต้ผิวดินอีกวิธีการหนึ่ง เครื่องมือที่ใช้สำรวจบางครั้งสามารถเรียกได้เป็น Ground Conductivity Meter หรือเครื่องวัดการนำไฟฟ้าในดิน ดังนั้นหากมีวัตถุที่นำไฟฟ้า (conducting body) เช่นแนวรอยเลื่อนหรือชั้นหินที่มีรอยแตกที่มีน้ำบาดาลกักเก็บอยู่ซ่อนอยู่ใต้ดิน ก็สามารถกำหนดจุดเจาะบ่อสำรวจหรือบ่อน้ำบาดาลได้
5) การสำรวจโดยวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity Method) วิธีการนี้จัดว่าเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการเลือกจุดเจาะน้ำบาดาล เนื่องจากวิธีการดังกล่าวสามารถกระทำได้ง่าย ค่าใช้จ่ายต่ำกว่าวิธีการอื่นๆ และทำได้เร็ว มีความละเอียดสูง การแปลความหมายข้อมูลก็สามารถกระทำได้ง่ายโดยไม่จำเป็นต้องปรับแก้ค่ารบกวน (noise) ต่าง ๆ อันเกี่ยวเนื่องกับสิ่งแวดล้อม สามารถบ่งบอกถึงคุณสมบัติด้านความต้านทานไฟฟ้าของชั้นดินชั้นหินที่ความลึกระดับต่าง ๆ จากผิวดินได้ชัดเจน และทำให้คาดคะเนได้ว่าที่ความลึกใด จะเป็นแหล่งกักเก็บน้ำบาดาล คุณภาพน้ำบาดาล (จืด-กร่อย-เค็ม) รวมถึงความลึกและชนิดของชั้นดินชั้นหินต่าง ๆ ได้อย่างแม่นยำและถูกต้องอีกด้วย

3.5 การคัดเลือกพื้นที่ (site selection)

การคัดเลือกพื้นที่สำหรับเจาะบ่อน้ำบาดาลมักจะคัดเลือกโดยใช้เกณฑ์ความเหมาะสมและโอกาสที่จะได้น้ำเริ่มจากมากที่สุดเป็นจุดแรก (first priority) แล้วก็ค่อยลดความเหมาะสมและโอกาสที่จะได้น้ำเป็นอันดับรองลงไป หากการใช้หลายๆ วิธีในพื้นที่เดียวกัน ก็จะนำผลการสำรวจมาพิจารณาร่วมกันเสมอ หากผลการเจาะในจุดเหมาะสมและมีโอกาสได้น้ำมากที่สุดไม่เป็นไปตามที่แปลความหมายไว้ตั้งแต่แรก ก็จะมีการทบทวนการแปลความหมายข้อมูลใหม่ (re-interpretation) ซึ่งในพื้นที่หนึ่งอาจต้องทำหลายครั้ง ปัจจัยสำคัญอย่างยิ่งในการคัดเลือกพื้นที่ ได้แก่ความรู้ทางธรณีวิทยา อุทกธรณีวิทยา และประสบการณ์ของผู้สำรวจ

บทที่ 4
การสำรวจโดยวิธีการทางใต้ผิวดิน
(Subsurface Investigation)

4.1 การเจาะสำรวจ (test well drilling)

หลังจากได้ทำการสำรวจเพื่อหาจุดที่เหมาะสมในการเจาะบ่อน้ำบาดาลแล้ว ขั้นตอนต่อไปได้แก่การเจาะสำรวจ (test well drilling) ทั้งนี้ก็เพื่อจะได้พิสูจน์ทราบว่าการแปลความหมายข้อมูล (interpretation) การสำรวจธรณีฟิสิกส์นั้นถูกต้องหรือไม่ อย่างไร หากการเจาะสำรวจหลุมแรกนั้นไม่เป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้ นักธรณีวิทยาจำเป็นต้องนำผลการสำรวจธรณีฟิสิกส์ทั้งหมดมาพิจารณาใหม่ เพื่อเลือกจุดเจาะสำรวจหลุมต่อ ๆ ไปจนกว่าจะพบชั้นน้ำบาดาล และการเจาะใด ๆ ก็ตามจะต้องมีตัวอย่างดิน-หิน ขึ้นสู่ปากหลุมเจาะเสมอ ซึ่งมีอยู่ 2 แบบ ได้แก่ตัวอย่างที่ขึ้นมาสู่ปากบ่อในลักษณะเศษดิน-หิน (chipped samples or cuttings) และขึ้นมาในแบบแท่งตัวอย่าง (core samples) ผู้เขียนขออนุญาตกล่าวถึงกระบวนการการนำตัวอย่างขึ้นสู่ปากบ่อพอสังเขป เกี่ยวกับการเกิดขึ้นของเศษดิน-หิน ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อชั้นดินชั้นหินถูกบดกัดหรือกระแทกโดยหัวเจาะแล้วถูกนำขึ้นมาสู่ปากบ่อโดยวิธีการดังต่อไปนี้

4.2 การเจาะแบบตัวอย่างเศษหิน (cuttings or chipped samples drilling)

ตัวอย่างแบบเศษหินสามารถถูกนำขึ้นมาสู่ปากบ่อได้ หลายวิธี ขึ้นอยู่กับประเภทของการเจาะซึ่งได้แก่ การเจาะแบบกระแทก (percussion drilling) และการเจาะแบบหมุน (rotary drilling) ซึ่งยังแบ่งออกเป็น 2 ประเภทย่อยได้อีกคือเจาะหมุนแบบน้ำโคลนหมุนเวียนตรง (direct-circulation rotary drilling) และการเจาะหมุนแบบดูดกลับ (reverse-circulation rotary drilling: RC drilling) การเจาะแบบผสม (Combination drilling) ซึ่งยังแบ่งออกเป็นการเจาะผสมแบบกระแทกรวมกับแบบหมุน (combination of percussion and rotary drilling) และการเจาะผสมแบบน้ำโคลนไหลเวียนตรงและแบบน้ำโคลนไหลเวียนย้อน (combination of direct and reverse circulation drilling) และแบบสุดท้ายที่นำตัวอย่างดิน-หินขึ้นสู่ปากบ่อแบบเศษหินได้แก่ การเจาะผสมแบบใช้น้ำและลม (combination of air and mud drilling)

4.2.1 การเจาะแบบกระแทก (Percussion Drilling หรือ Cable Tool Drilling)

วิธีการนี้เป็นวิธีที่เก่าแก่มากกว่า 4,000ปี โดยเริ่มครั้งแรกในประเทศจีนในพื้นที่ที่อยู่ห่างไกลจากทะเล มีวัตถุประสงค์ในการหาแหล่งน้ำบาดาลเค็มเพื่อนำน้ำเค็มมาใช้ประโยชน์เช่นรักษาสภาพเนื้อสัตว์ที่ล่ามาได้ อุปกรณ์รุ่นแรกในจีนจะใช้ไม้ไผ่ล้วน ๆ และใช้เวลาเจาะถึง 3 ชั่วอายุคน บ่อแรกเจาะได้ลึกถึงประมาณ 1,500 เมตร ต่อมาการเจาะแบบกระแทกจะพัฒนาขึ้นเรื่อยๆ มีการใช้ลวดสลิง (cable/wireline) แทนเชือกมนิลา เพิ่มอุปกรณ์ในระบบหัวเจาะ (drilling tool) ซึ่งประกอบด้วยหัวเจาะ (drilling bit) และองค์ประกอบของหัวเจาะที่มีอีกหลายชิ้น ได้แก่ข้อต่อสลิง (rope socket) ตะบันหรือก้านผ่อนแรง (drilling jar accelerator) และรอกที่เคลื่อนที่ขึ้น-ลงเพื่อดึงก้านเจาะให้ขึ้นและลง (travelling block) สมัยก่อนนั้นจะใช้แรงคน ต่อมาได้พัฒนามาใช้เครื่องจักรไอน้ำ เครื่องยนต์หรือเครื่องไฮดรอลิก ในจังหวะที่กระแทกลง ลวดสลิงจะหมุนคว้านไปด้วย จึงทำให้หัวเจาะสามารถกัดและกระแทกหินให้แตกได้ ระหว่างการเจาะก่อนที่จะถึงชั้นน้ำบาดาล การเจาะแบบกระแทกจะใช้น้ำหรือน้ำโคลนเจาะเทลงไประหว่างเจาะด้วยเพื่อลดความร้อนของหัวเจาะระหว่างการกัดกระแทกหินและช่วยให้หินแข็งเกิดอ่อนตัวลงบ้าง ทำให้เจาะง่ายขึ้น และน้ำจะเป็นตัวช่วยทำให้เศษดิน-หินจับตัวกันเป็นก้อน และสามารถใช้กระบอกเก็บตัวอย่าง (bailer) นำขึ้นมาโดยง่าย (อ่านเพิ่มเติมได้ที่ “น้ำบาดาล-บ่อบาดาล” โดยเจริญ เพียรเจริญ, กรมทรัพยากรธรณี, 2540)

อุปกรณ์ของเครื่องเจาะแบบกระแทกและหน้าที่ของอุปกรณ์

- อุปกรณ์สายสลิงการเจาะ (drilling lines) อุปกรณ์ชุดนี้จะบ่งออกเป็น 3 ส่วนตามหน้าที่การทำงาน ได้แก่ สายสลิงเก็บตัวอย่าง (sand line) สายสลิงสำหรับลงท่อกรุ-ท่อกรอง (casing line) และสายสลิงสำหรับการเจาะ (drilling line) สายสลิงทราย (sand line) จะถูกม้วนอยู่กับรอกที่ติดตังอยู่กับส่วนบนสุดของปั้นจั่น (derrick) หรือชุดเจาะบางชุด sand line อาจจะตั้งอยู่บนฐานเดียวกับเครื่องจักร ในม้วนของ sand line จะประกอบด้วย sand pump (กระบอกเก็บตัวอย่างดิน-หิน) และ bailer (กระบอกตัก) ในบางชุดเจาะ (rig) อาจไม่มี sand pump แต่จะใช้ bailer เพียงอุปกรณ์เดียวในการเก็บทั้งตัวอย่างดิน-หินจากการเจาะ และตักน้ำเพื่อทดสอบปริมาณน้ำ ขนาดของสายสลิงประมาณ 7/16–5/8 นิ้ว ส่วน สายสลิงท่อกรุ (casing line) จะถูกม้วนอยู่กับรอกสายสลิงท่อกรุ (casing) ทำหน้าที่หย่อนท่อกรุ (casing) และท่อกรอง (screen / perforated casing) ในการก่อสร้างและพัฒนาบ่อน้ำบาดาล มีขนาดของสายสลิงประมาณ 3/4 -1 นิ้ว สำหรับ สายสลิงการเจาะ (drilling line) จะถูกม้วนอยู่กับม้วนสายสลิงใหญ่ด้วยสายสลิงขนาดใหญ่ (3/4–1 $^{1/8}$ นิ้ว) สาเหตุเนื่องจากต้องรับน้ำหนักของระบบหัวเจาะที่ใหญ่และหนัก

- กระบอกตักและปั๊มทราย (Bailer and Sand Pumps) - เศษหินจะถูกนำขึ้นสู่ปากบ่อได้โดยการใช้กระบอกตักตัวอย่าง (Bailer) ลงไปเก็บตัวอย่างดินหิน ที่ปลายกระบอกตัก (Bailer) จะมีลักษณะเป็นฝาปิด-เปิดแบบบานพับ (flapper valve) เมื่อหย่อนกระบอกลงไป เศษดินหินจะถูกดันให้เข้ามาในกระบอกตักตัวอย่าง จนเต็ม ขณะดึงขึ้น บานพับจะถูกตัวอย่างที่อยู่ในกระบอกให้ดันปิดลง เศษดิน-หินจึงถูกเก็บไว้ในกระบอกเก็บตัวอย่าง แล้วจึงดึงกระบอกเก็บตัวอย่างขึ้นมา ในกรณีที่เศษตัวอย่างดินหินมีความหนาแน่นมากหรือมีชิ้นใหญ่ (coarse cuttings) เกินกว่าที่จะเข้าไปอยู่ในกระบอกตักได้และตัวอย่างมีความหนืดอันเนื่องมาจากมีส่วนผสมของน้ำหรือน้ำโคลนเจาะไม่สามารถใช้กระบอกตักธรรมดาลงไปเก็บตัวอย่างได้ ช่างเจาะก็จะใช้ sand pump ซึ่งมีลักษณะเป็นกระบอกหย่อนลงไปในกระบอก bailer อีกทีหนึ่งโดยปลายของ sand pump จะอยู่ห่างจากปลายของกระบอกตักช่วงประมาณกับขนาดความสูงของแท่งตัวอย่างในกระบอกตักพอประมาณ และเมื่อดึงขึ้นจะมีแรงดูดระหว่างกระบอก bailer กับกระบอก sand pump ก่อให้เกิดแรงดึงสุญญากาศที่จะดูดเอาตัวอย่างเข้ามาอยู่ใน bailer ได้เช่นกัน ตัวอย่างเศษดิน-หินจากการเจาะแบบกระแทกนี้จะตรงกับความลึกที่เจาะ ลักษณะรูปร่าง และน้ำหนักของหัวเจาะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของชั้นหิน

- เสากระโดง (Mast) – ต้องอยู่ในแนวดิ่งและมีความจำเป็นต้องมีความสามารถในการรับน้ำหนักอุปกรณ์ชุดเจาะได้ทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วย รอก (sheave) สายสลิงเจาะ (drilling lines) กระบอกตัก (bailer) และระบบคันโยก (walking beam) ทั้งขณะไม่ทำงานและในขณะที่เครื่องยนต์กำลังทำงาน

- เครื่องจักรต้นกำลัง (power unit) – ตัวเครื่องจักรจะเป็นแรงขับเคลื่อนระบบคันโยก (walking/spudding beam) ในสมัยก่อนจะวางอยู่บนล้อเลื่อน แต่ในปัจจุบันมักจะวางอยู่ท้ายรถยนต์บรรทุกขนาดใหญ่ (อ่านเพิ่มเติมได้ที่ “น้ำบาดาล-บ่อบาดาล” โดยเจริญ เพียรเจริญ, กรมทรัพยากรธรณี, 2540)

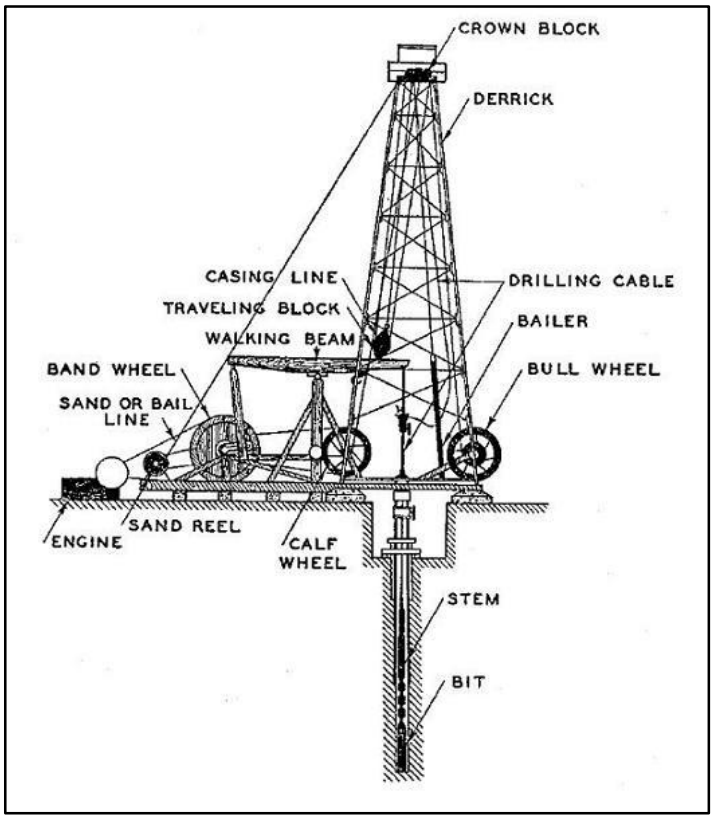
<u>ข้อดีของการเจาะแบบกระแทก</u>

- อุปกรณ์ชุดเจาะมีราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับเครื่องเจาะประเภทอื่น
- ค่าใช้จ่ายในการเจาะแต่ละวัน เช่นค่าวัสดุเชื้อเพลิง และแรงงานคนจะน้อยกว่าเจาะโดยวิธีอื่น ผู้เจาะสามารถดำเนินการได้เองเนื่องจากไม่ต้องมีการต่อท่อเพื่อให้ความลึกของการเจาะเพิ่มขึ้น
- สามารถใช้ได้กับการเจาะหินทุกชนิด ทั้งหินร่วนและหินแข็ง
- ความลึกของตัวอย่างที่เก็บได้จะมีความแม่นยำกว่าการเจาะโดยวิธีอื่น

- เมื่อเจาะถึงชั้นน้ำบาดาล จะรู้ได้ทันที และสามารถประเมินปริมาณน้ำได้โดยใช้กระบอกอันเดียวกันกับกระบอกเก็บตัวอย่างเศษดิน-หิน ตักน้ำขึ้นมาได้เลย
- ไม่ต้องใช้น้ำในการเจาะมากดังนั้นจึงเหมาะสมที่จะใช้ในพื้นที่ที่ไกลแหล่งน้ำและเหมาะสมที่จะใช้เจาะในหินที่มีลักษณะเป็นโพรง เช่นหินปูน เนื่องจากไม่มีการสูญเสียน้ำจากระบบการเจาะ
- การเจาะแบบกระแทกจะไม่ค่อยมีปัญหาเรื่องการปนเปื้อนเนื่องจากใช้น้ำหรือน้ำโคลนเจาะในการเจาะไม่มาก ใช้เพียงแค่วัตถุประสงค์ในการลดความร้อนของหัวเจาะและทำให้ตัวอย่างจับตัวเป็นก้อนเพื่อให้ง่ายต่อการเก็บใส่กระบอกเก็บตัวอย่าง (bailer) เท่านั้น

<u>ข้อเสียของการเจาะแบบกระแทก</u>

- เจาะได้ช้า โดยเฉพาะในชั้นที่เป็นหินร่วน เนื่องจากปัญหาบ่อพัง (ไม่มีน้ำโคลนเจาะเคลือบผนังบ่อ)
- การติดตั้งเครื่องเจาะใช้เวลานาน เนื่องจากต้องตั้งให้เครื่องเจาะมั่นคงโดยใช้สายสเตย์ (stable rope) ยึดโยงหลายด้าน
- กรณีที่เจาะในชั้นหินแข็งที่มีการเอียงตัว หัวเจาะจะลื่นไถล (Slip) ไปตามแนวการเอียงตัว จึงทำให้บ่อคดหรือไม่อยู่ในแนวดิ่ง เมื่อพบชั้นน้ำบาดาลจะทำให้ลงท่อเพื่อพัฒนาบ่อได้ยาก
- หากต้องเจาะลึกมากๆ บ่อมักจะไม่ค่อยตรง
- กรณีที่เป็นหินแข็ง บ่อที่ได้มักจะไม่เป็นวงกลม เนื่องจากหินจะแตกเป็นแง่งเป็นเหลี่ยมและยื่นเข้ามาในบ่อ ทำให้การลงท่อรับน้ำ หรือลงเครื่องสูบในกรณีเป็นบ่อเปลือย (opened hole) ทำได้ยากและเสียเวลา (อ่านเพิ่มเติมได้ที่ “น้ำบาดาล-บ่อบาดาล” โดยเจริญ เพียรเจริญ, กรมทรัพยากรธรณี, 2540)



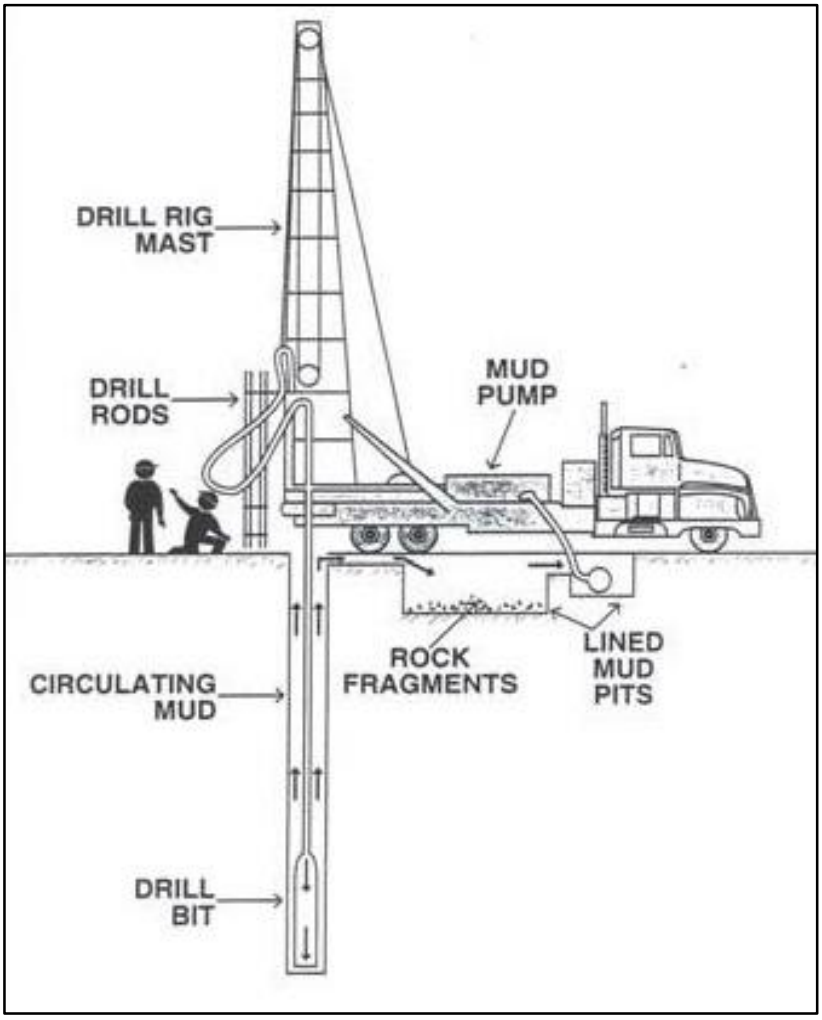
รูปที่ 4-1 แสดงองค์ประกอบของเครื่องเจาะแบบกระแทก (Percussion/Cable Tool Rig)

4.2.2 การเจาะแบบหมุน (Rotary Drilling)

การเจาะแบบหมุนเป็นการเจาะแบบใช้แรงกดที่หัวเจาะ พร้อมๆ กับมีการหมุนไปด้วย เศษหินที่เกิดจากการเจาะจะถูกนำขึ้นสู่ปากบ่อโดยแรงดันของน้ำโคลนเจาะ (drilling mud) ซึ่งถูกอัดลงไปสู่ก้นหลุมด้วยแรงดันจากปั๊มน้ำโคลนเจาะ (mud pump) ลงไปตามก้านเจาะ (drill string) ผ่านหัวเจาะ (bit) ลงไป น้ำโคลนเจาะนอกจากจะทำหน้าที่ลดความร้อนของหัวเจาะซึ่งเกิดจากการเสียดสีกับหินแล้วยังทำหน้าที่นำเศษหินขึ้นมาสู่ปากบ่อได้ด้วย รายละเอียดเกี่ยวกับน้ำโคลนเจาะ ผู้เขียนจะกล่าวในหัวข้อถัดไปในบทเดียวกันนี้ การเจาะแบบหมุนที่นิยมใช้ มีอยู่ 2 แบบ ดังนี้

1) การเจาะหมุนแบบน้ำโคลนเจาะไหลเวียนตรง (direct-circulation rotary drilling)

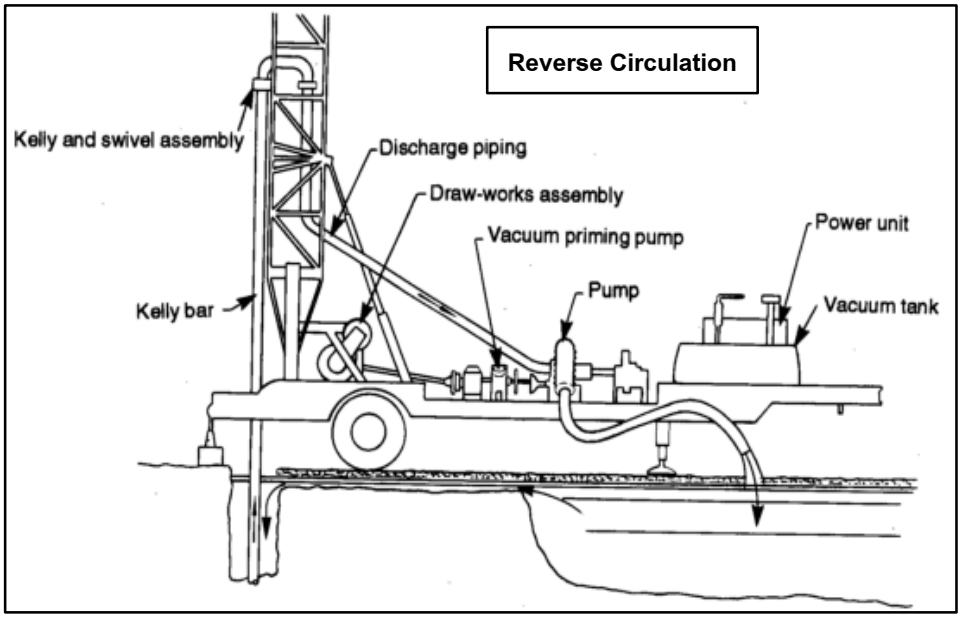
การเจาะหมุนแบบน้ำโคลนเจาะไหลเวียนตรง หมายถึงน้ำโคลนเจาะจะถูกอัดลงสู่ก้นบ่อด้วยแรงดันจาก mud pump ผ่านเข้าไปภายในก้านเจาะ แล้วไหลเวียนขึ้นสู่ปากบ่อผ่านช่องระหว่างก้านเจาะกับผนังบ่อ (annulus หรือ annular space) เศษหินที่ถูกหัวเจาะกัดจะถูกนำขึ้นมาสู่ปากบ่อด้วยแรงดันของน้ำโคลนเจาะ (รูปที่ 4-2)



รูปที่ 4-2 แสดงองค์ประกอบของเครื่องการเจาะหมุนแบบน้ำโคลนเจาะไหลเวียนตรง (direct-circulation rotary drilling) น้ำโคลนเจาะจะถูกปั๊มสู่ก้นบ่อภายในก้านเจาะและจะหมุนวนขึ้นสู่ปากบ่อผ่านช่องว่างระหว่างผนังบ่อกับก้านนำเจาะ (annulus)

2) การเจาะหมุนแบบดูดกลับ (reverse-circulation rotary drilling)

การเจาะแบบนี้ หลักการและองค์ประกอบจะคล้ายกับเครื่องเจาะแบบเจาะหมุนแบบน้ำโคลนเจาะไหลเวียนตรง ต่างกันตรงที่น้ำโคลนเจาะจะถูกปล่อยให้ไหลลงไปในบ่อตามช่องระหว่างผนังบ่อ (annulus) กับก้านเจาะ (drill string) เศษดินหินจะถูกดูดกลับขึ้นสู่ปากบ่อด้วยเครื่องสูบแรงดันสูง เศษดิน-หินขนาดใหญ่ ๆ จะถูกแยกออกโดยหัวแยกบริเวณปากบ่อไปกองรวมกัน น้ำโคลนเจาะถูกแยกให้ไหลลงในบ่อดักตะกอน (settling pit) น้ำโคลนเจาะที่เหลือจะมีตะกอนเหลือน้อยก็จะไหลลงสู่บ่อพักน้ำโคลนเจาะ (storage pit) บ่อที่ 2 ตัวอย่างขนาดเล็กจะถูกแยกในบ่อนี้ แล้วน้ำโคลนเจาะจะถูกนำไปใช้ไหลเวียนและกลับลงสู่ก้นหลุมเจาะใหม่ แล้วจะถูกสูบขึ้นมาอีกพร้อมกับเศษหินที่ความลึกที่มากขึ้น ๆ จะเป็นลักษณะนี้ครั้งแล้วครั้งเล่า หัวเจาะ รูในหัวเจาะ และก้านเจาะในการเจาะแบบนี้จะมีขนาดใหญ่กว่าการเจาะในระบบน้ำโคลนเจาะไหลเวียนตรง ตัวอย่างขนาดใหญ่ๆ สามารถถูกสูบขึ้นมาพร้อมกับน้ำโคลนเจาะได้อย่างง่ายดาย ด้วยแรงดูดของเครื่อง mud pump หลุมเจาะจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ ง่ายต่อการพัฒนาบ่อเพราะว่าไม่ต้องเสียเวลาในการคว้านบ่อ (ream) เพื่อให้ได้บ่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่เหมาะสมเพื่อการลงท่อกรุหรือท่อกรองในภายหลัง (รูปที่ 4-3)



รูปที่ 4-3 แสดงองค์ประกอบของเครื่องในการเจาะหมุนแบบดูดกลับ (reverse-circulation rotary drilling) น้ำโคลนเจาะจะถูกปล่อยสู่ก้นบ่อผ่านช่องว่างระหว่างผนังบ่อกับก้านนำเจาะ (annulus) และจะถูกดูดโดยแรงดูดจากปั๊มแรง ดันสูงขึ้นสู่ปากบ่อภายในก้านเจาะ

4.2.3 การเจาะแบบผสม (Combination Rig Drilling)

การเจาะแบบผสม เป็นการนำเอาข้อดีของแต่ละวิธีใน 2 แบบแรก มาผสมกัน ทั้งนี้วิธีการเจาะแบบกระแทกนั้นถึงแม้จะเจาะได้เร็วแต่มักจะประสบปัญหาของการพังของบ่อเนื่องจากไม่มีน้ำโคลนเจาะเข้าไปเคลือบผนังบ่อ (mud cake) เพื่อช่วยป้องกันปัญหาบ่อพัง ส่วนวิธีเจาะแบบหมุนนั้นปัญหาบ่อพังจะไม่ค่อยพบ แต่จะเจาะได้ช้ามากในกรณีที่เป็นหินแข็ง ดังนั้นในยุคหลังจึงมีผู้คิดประดิษฐ์เครื่องเจาะประเภทผสมโดยเลือกเอาข้อดีของแต่ละวิธีมาผสมผสานกัน มีอยู่ 3 วิธี ที่นิยมใช้กันได้แก่

- **เครื่องเจาะแบบผสมแบบกระแทกรวมกับแบบหมุน (combination of percussion and rotary rig)** เป็นการนำระบบเจาะหมุน (rotary) มาเพิ่มเติมในระบบเจาะกระแทกเพื่อให้การเจาะเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ กล่าวคือในหินร่วนหรือหินที่แข็งไม่มาก จะเจาะโดยใช้ระบบหมุน พอถึงหินแข็งค่อยปรับเปลี่ยนมาใช้เป็นระบบเจาะกระแทก โดยหลักการแล้วนับว่าเครื่องเจาะประเภทนี้น่าจะมีประสิทธิภาพสูง แต่ในสภาพความเป็นจริงแล้วระบบถ่ายทอดกำลังของแบบหมุนกับแบบกระแทกจะต่างกัน ดังนั้นจึงต้องเพิ่มเติมอุปกรณ์ส่วนเสริมอีกหลายชิ้นเช่นก้านหมุน (swivel) และแท่นหมุน (rotary table) เป็นต้น เครื่องเจาะแบบนี้จึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมสักเท่าใด (สามารถหาอ่านเพิ่มเติมได้ใน "น้ำบาดาล-บ่อบาดาล" โดย เจริญ เพียรเจริญ, กรมทรัพยากรธรณี, 2540)

- **เครื่องเจาะผสมแบบเครื่องเจาะหมุนแบบน้ำโคลนเจาะไหลเวียนตรง และการเจาะหมุนแบบดูดกลับ (combination of direct- and reverse-circulation rotary rig)** ระบบการเจาะแบบนี้จะมีระบบการทำงานที่เหมือนกัน จะต่างกันตรงที่ระบบน้ำโคลนการเจาะหมุนแบบดูดกลับจะใช้ก้านเจาะและหัวเจาะที่มีขนาดใหญ่กว่าเจาะโดยระบบหมุนเวียนตรง เนื่องจากต้องการให้เศษดินหินจากการเจาะถูกแรงสูบจากปั๊มเข้าไปในก้านเจาะผ่านรูตรงหัวเจาะได้และขึ้นมาสู่ปากบ่อได้ หากเริ่มต้นเจาะด้วยระบบไหลเวียนตรงไปแล้วและประสบกับปัญหาที่ไม่สามารถนำเศษดินหินขึ้นสู่ปากบ่อได้เนื่องจากมีขนาดใหญ่และหนักเกินที่น้ำโคลนเจาะจะพาขึ้นมาได้ แล้วจะต้องเปลี่ยนไปใช้ระบบน้ำโคลนในการเจาะหมุนแบบดูดกลับนั้น จะต้องเปลี่ยนทั้งก้านเจาะและหัวเจาะ และยังต้องเพิ่มเครื่องสูบอีกหนึ่งเครื่องเพื่อใช้สูบตัวอย่างจากก้นบ่อสู่ปากบ่อ ทำให้การทำงานใช้เวลานาน และการเพิ่มอุปกรณ์และขนาดของหัวเจาะ-ก้านเจาะ จะทำให้รถเจาะมีน้ำหนักมากขึ้นและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนย้าย (สามารถหาอ่านเพิ่มเติมได้ใน "น้ำบาดาล-บ่อบาดาล" โดย เจริญ เพียรเจริญ, กรมทรัพยากรธรณี, 2540)

- **เครื่องเจาะผสมแบบใช้น้ำและลม (combination of air and mud drilling)** เป็นเครื่องเจาะที่ออกแบบมาเพื่อให้ใช้ได้ทั้งระบบน้ำโคลนเจาะและระบบลม โดยในระบบใช้ลมนั้นต้องเพิ่มเครื่องอัดลม (air compressor) ขนาดใหญ่ ข้อดีของระบบนี้คือ ในขณะที่เจาะหินร่วนก็เจาะโดยใช้น้ำโคลนเจาะซึ่งจะเร็วกว่าการเจาะโดยใช้ลม แต่เมื่อเจาะถึงชั้นหินแข็ง ก็จะเปลี่ยนมาใช้ระบบเจาะด้วยลมแรงดันสูง โดยใช้ลมแทนน้ำโคลนเจาะซึ่งจะถูกอัดผ่านก้านหมุน (swivel) ก้านนำเจาะ (kelly) ระบบก้านเจาะ (drill string) ผ่านไปทางหัวเจาะซึ่งจะเจาะได้เร็วมากในหินแข็ง ตัวอย่างดินหินที่ขึ้นมาแทบจะตรงกับความลึกของการเจาะเลย อาจช้าบ้างแต่ไม่มาก ไม่เหมือนกับการเจาะโดยใช้น้ำโคลนเจาะ และเมื่อเจอชั้นน้ำบาดาลก็จะรู้ได้เพราะแรงดันของลมจะเป่าน้ำขึ้นมาสู่ปากบ่อเกือบจะทันที หัวเจาะสำหรับการเจาะแบบนี้จะถูกออกแบบมาให้ทำงานทั้งหมุนและกระแทกไปพร้อม ๆ กัน (ผู้สนใจสามารถหาอ่านเพิ่มเติมได้ใน "น้ำบาดาล-บ่อบาดาล" โดย เจริญ เพียรเจริญ, กรมทรัพยากรธรณี, 2540)

รูปที่ 4-4 ภาพบนแสดงลักษณะของเครื่องการเจาะแบบผสมซึ่งสามารถใช้เจาะได้ทั้งระบบน้ำโคลน เจาะไหลเวียนตรงเมื่อเจาะในชั้นหินร่วน และสามารถเปลี่ยนมาใช้ระบบเจาะโดยแรงหมุน พร้อมกับเครื่องอัดลม (air compressor) เมื่อต้องเจาะในหินแข็ง โดยใช้ drilling foam เป็นตัวลดความร้อนของหัวเจาะ แต่เศษดินหินตัวอย่างจะขึ้นสู่ปากบ่อได้ด้วยแรงดันของลม

ระบบของการเจาะหมุนแบบน้ำโคลนเจาะไหลเวียนตรงและไหลเวียนย้อน และเครื่องเจาะแบบผสม ประกอบด้วยระบบที่สำคัญ ดังนี้

- **ระบบเครื่องยนต์ต้นกำลัง (prime movers)** – หมายถึงอุปกรณ์ชิ้นต่างๆ ที่เป็นตัวส่งกำลังในระบบเจาะแบบหมุน ในสมัยก่อนจะใช้เครื่องจักรไอน้ำ แต่หลังจากสงครามโลกครั้งที่ 2 ได้เปลี่ยนมาใช้น้ำมันดีเซล หรือใช้ gasoline พลังงานจากเครื่องจักรต้นกำลังจะนำไปใช้ขับเคลื่อนอุปกรณ์การหมุน (rotary equipment) อุปกรณ์ระบบยก (hoisting equipment) และอุปกรณ์การไหลเวียน (circulating equipment) ในเครื่องเจาะขนาดใหญ่อาจใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเช่นกัน

- **ระบบอุปกรณ์ยก (hoisting equipment)** – เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ยก-หย่อนอุปกรณ์ในระบบขึ้น-ลงในแนวดิ่ง หรือเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ในแนวระนาบ ระบบอุปกรณ์ยกที่เห็นได้ชัดเจนที่สุดในการเจาะแบบหมุนได้แก่ ปั้นจั่น (derrick) เป็นโครงสร้างที่เป็นโครงเหล็กขนาดใหญ่ ช่องว่างอยู่ตรงกลางและมีความสูงมากพอที่จะยก-หย่อนก้านเจาะ ท่อกรุ ท่อกรอง เปลี่ยนชุดหัวเจาะ และอุปกรณ์เจาะต่าง ๆ ขึ้นลงในแนวดิ่งได้อย่างสะดวก ตัวปั้นจั่นจะติดตั้งในตำแหน่งที่ตรงกับหลุมเจาะซึ่งก็คือตำแหน่งที่ช่างเจาะทำงานพอดี ตรงปลายบนสุดของปั้นจั่นจะถูกติดตั้งด้วยระบบรอกพวง (crown block) ซึ่งประกอบด้วยชุดรอก 3-4 ชุดสำหรับแต่ละอุปกรณ์ และปั้นจั่นต้องสูงมากพอที่จะทำงานกับก้านเจาะที่มีความยาว 9.6 เมตร (เหมาะสำหรับเจาะบ่อลึก)

- **อุปกรณ์ระบบหมุน (rotary equipment)** – อุปกรณ์ระบบหมุนของเครื่องเจาะแบบหมุนแบบน้ำโคลนเจาะไหลเวียนตรงจะประกอบด้วยอุปกรณ์ชุดหมุนที่เอาไปขับเคลื่อนก้านนำเจาะและหัวเจาะเพื่อให้สามารถเจาะได้ลึกลงไปเรื่อย ๆ อุปกรณ์ชุดหมุนจะมีอยู่หลายส่วนซึ่งจะทำงานร่วมกันในการส่งต่อกำลังจากเครื่องยนต์ต้นกำลัง (prime movers) ไปยังหัวเจาะซึ่งอยู่ล่างสุดของระบบ เครื่องยนต์ต้นกำลังจะส่งกำลังผ่านมายังแท่นหมุน (rotary table) ซึ่งจะทำหน้าที่หมุนก้านนำเจาะ (kelly) ส่งต่อไปยังก้านเจาะ (drill pipe) และส่งผ่านกำลังไปยังท่อถ่วง (drill collar) และหัวเจาะ (drill bit) ตามลำดับ การหมุนจะหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (clockwise)

- **ระบบก้านเจาะ (drill string)** สำหรับชุดเจาะทั่วไปหรือชุดเจาะบ่อน้ำบาดาล ระบบก้านเจาะเป็นระบบที่รับส่งกำลังจากเครื่องจักรต้นกำลัง (prime mover) ไปยังหัวเจาะที่อยู่ก้นหลุมเจาะ ในชุดเจาะบ่อน้ำบาดาล ระบบก้านเจาะจะประกอบด้วยอุปกรณ์ที่นำมาประกอบกันหลายชุดเรียงตามลำดับจากบนลงล่างคือ ก้านนำเจาะ (kelly) ก้านเจาะ (drill pipe) ท่อถ่วง (drill collar; DC) และหัวเจาะ (drill bit) ตามลำดับโดยแต่ละชุดอุปกรณ์จะทำหน้าที่ดังนี้

- **ก้านนำเจาะ (kelly)** เป็นอุปกรณ์ท่อนบนสุดของระบบก้านเจาะ เป็นเหล็กกลวงสี่เหลี่ยม หลายเหลี่ยมหรือทรงกลม แต่จะมีรอยบาก (groove) บนท่อตลอดความยาวของก้านเพื่อจะให้สวมกับแท่นหมุน (rotary table) ได้อย่างลงตัวและจะเคลื่อนตัวขึ้งลงอยู่ภายในแท่นหมุน

- **ก้านเจาะ (drill pipe)** เป็นท่อเหล็กกลวงผนังบาง (เนื่องจากต้องใช้เป็นทางผ่านของให้น้ำโคลนเจาะที่ถูกปั๊มผ่านไปยังหัวเจาะและไหลเวียนกลับขึ้นไปทางปากบ่อระหว่างก้านเจาะกับผนังบ่อ) ทำด้วยเหล็กเหนียวอย่างดี เส้นผ่านศูนย์กลางที่นิยมคือ 2 $^{3/8}$ 2 $^{7/8}$ และ 3 $^{1/2}$ นิ้ว ความยาวขึ้นอยู่กับความสูงของปั้นจั่น ส่วนใหญ่จะอยู่ที่ 3 และ 6 เมตร แบบ 12 เมตรก็มี ปลายด้านหนึ่งจะเป็นเกลียวแบบเรียวลง (tapering) แบบตัวผู้ (pin tool joint) และปลายอีกด้านหนึ่งเป็นเกลียวตัวเมีย (box tool joint) รูปที่ 4-5 แสดงลักษณะของก้านเจาะทั่วไป

(a)

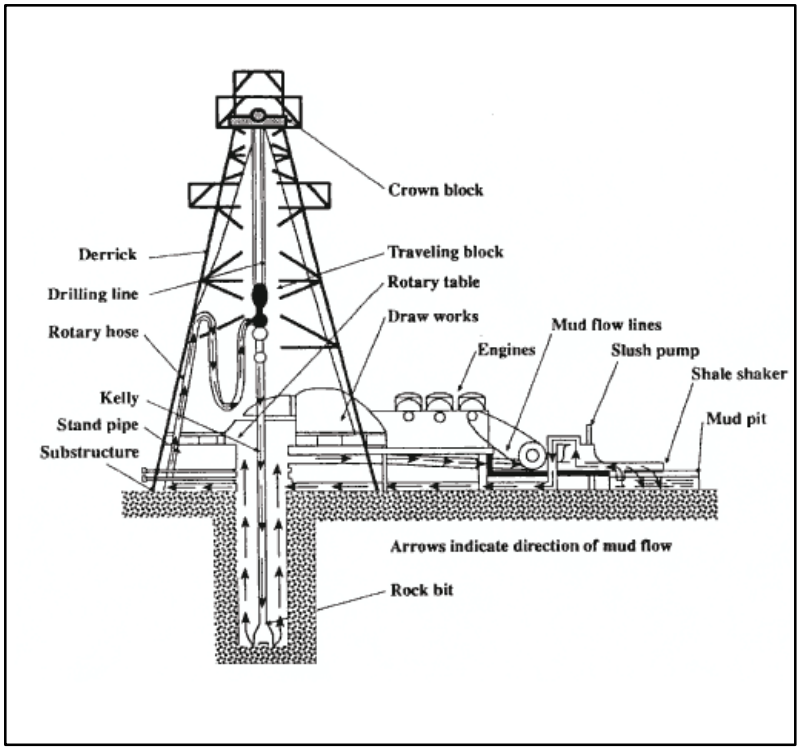
(b)

รูปที่ 4.5 (a) แสดงลักษณะเกลียวแบบเรียวแคบลง (tapering) ของก้านเจาะ (b) แสดงการป้องกันการสกปรกของเกลียวก้านเจาะโดยการปิดฝาไว้ขณะไม่ได้ใช้งาน

● **ท่อถ่วง (drill collar; DC)** เป็นท่อเหล็กกลวงผนังหนา (รูเล็ก) มีน้ำหนักมากเนื่องจากทำมาจากเหล็กแท่งทรงกระบอกแล้วเจาะรูตรงกลางเพื่อให้เป็นทางผ่านของน้ำโคลนเจาะในระบบไหลเวียนน้ำโคลนเจาะมีน้ำหนักมาก หน้าที่ของท่อถ่วงคือช่วยเป็นตัวเพิ่มน้ำหนักให้กับหัวเจาะให้กดลงไปในหินได้มากขึ้นทำให้เจาะได้เร็วขึ้น ตำแหน่งของท่อถ่วงจะอยู่ระหว่างหัวเจาะ (drill bit) กับก้านเจาะ (drill pipe) โดยทั่วไปความยาวของท่อถ่วงจะสั้นกว่าก้านเจาะ แต่มีน้ำหนักมากกว่า น้ำหนักของท่อถ่วงในงานเจาะบ่อน้ำบาดาลจะอยู่ที่ประมาณ 500 กิโลกรัม ในระบบก้านเจาะ รูปที่ 4-6 แสดงลักษณะของท่อถ่วง อาจติดตั้งท่อถ่วงมากกว่า 1 ชุดก็ได้ (ผู้สนใจสามารถหาอ่านเพิ่มเติมได้ใน “น้ำบาดาล-บ่อบาดาล” โดย เจริญ เพียรเจริญ, 2540) รูปที่ 4-7 แสดงชุดรวมอุปกรณ์การเจาะแบบหมุน (Rotary Drilling Rig)

● **ชุดอุปกรณ์ก้นหลุม (bottom hole assembly: BHA)** ในกรณีที่ต้องเจาะบ่อที่ลึกมาก ๆ จะเสริมชุดอุปกรณ์ก้นหลุมเป็นชุดใหญ่ นอกเหนือจากจะประกอบด้วยท่อถ่วง (drill collar) แล้ว ยังจะต้องติดตั้ง integral blade stabilizer ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ประคองให้หัวเจาะ ก้านเจาะ หรือท่อถ่วงอยู่ตรงกลางหลุมเจาะไม่เอียงไปเบียดกับผนังหลุมเจาะซึ่งจะช่วยลดแรงเสียดทานในหลุมเจาะได้ นอกจากนั้นอาจจะติดตั้ง down hole motor (DHM) ลงไปเพื่อช่วยเพิ่มแรงหมุนของหัวเจาะหรือเพื่อปรับทิศทางของการเจาะ ส่วนใหญ่จะใช้ประกอบในการเจาะสำรวจปิโตรเลียม

รูปที่ 4-6 แสดงลักษณะทั่วไปของท่อถ่วง (drill collar) ซึ่งมีลักษณะเกลียวเหมือนกับก้านเจาะ



รูปที่ 4-7 แสดงชุดรวมอุปกรณ์การเจาะแบบหมุน (rotary drilling machine)

● **หัวเจาะ (drill bits)** ในการเจาะใดๆ ไม่ว่าจะเป็นการเจาะสำรวจแร่ สำรวจและพัฒนาบ่อน้ำบาดาล หรือการเจาะในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ล้วนแต่ต้องใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าหัวเจาะ (drill bit) กันทั้งนั้น หัวเจาะมีหน้าที่กัด (cut) ดิน-หินของชั้นเปลือกโลกในขณะที่ก้านเจาะหมุนไปในระบบ rotary drilling จะมีหน้าที่ทำให้หลุมเจาะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกลึกลงไปใต้ดินเรื่อย ๆ และต้องเสียดสีกับวัสดุที่เป็นชั้นเปลือกโลกอยู่ตลอดเวลาระหว่างการเจาะ ดังนั้นวัสดุที่ใช้ทำหัวเจาะจึงต้องมีความแข็งแกร่งเป็นพิเศษเช่นเป็นโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ (tungsten carbide) หรือแม้กระทั่งใช้วัสดุที่เป็นเพชรเกรดอุตสาหกรรม (industrial grade diamond)

ในการเจาะสำรวจและเจาะพัฒนาบ่อน้ำบาดาลจะใช้หัวเจาะอยู่ไม่กี่ประเภท ที่นิยมใช้มากได้แก่ drag bit หรือ fish-tail bit เนื่องจากมีลักษณะคล้ายหางปลา ตอนปลายบานเป็นปีก อาจมี 2 ปีกหรือมากกว่า บริเวณคมปีกจะฝังวัสดุแข็งเช่นทังสเตนคาร์บายด์ เพื่อเอาไว้กัดหรือตัดหินที่เจาะผ่าน จะมีรูอยู่ด้านข้างเพื่อให้น้ำโคลนไหลเวียนออกจากภายในก้านเจาะ หัวเจาะชนิดนี้ภายหลังถูกออกแบบให้มีฟันตัดไล่ระดับกัน (step-drag bit) หัวเจาะชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้ในการเจาะหินร่วน (unconsolidated rock) หรือหินที่ไม่แข็งมาก (soft rock) เช่นหินดินดาน (shale) หินโคลน (mudstone) เหมาะสำหรับรอบการหมุน 60-80 รอบต่อนาที (round per minute: rpm) รูปที่ 4-8 แสดง drag bit รูปแบบต่างๆ

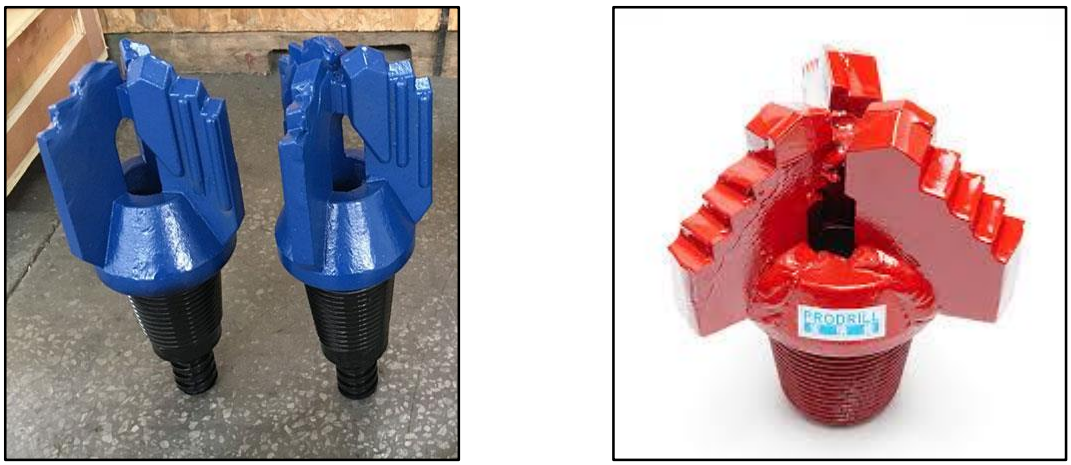
หัวเจาะอีกประเภทหนึ่งที่นิยมใช้ในการเจาะบ่อน้ำบาดาลได้แก่หัวเจาะที่เรียกว่า roller bit หรือ rolling cutter bit หรือบางครั้งก็เรียกว่า rock bit เนื่องจากหัวเจาะชนิดนี้นิยมใช้ในการเจาะชั้นหินที่เป็นหินแข็ง ในขณะเจาะชิ้นส่วนของหัวเจาะที่มีลักษณะคล้ายลูกกลิ้งจะแยกกันหมุน (roll) ชิ้นส่วนของหัวเจาะอาจมี 2 ชิ้น 3 ชิ้น หรือ 4 ชิ้น ส่วนใหญ่จะออกแบบให้มี 3 ชิ้น จึงมักจะถูกเรียกว่า tricone bit หัวเจาะประเภทนี้ในช่วงเริ่มแรกจะออกแบบให้มีรูที่ให้น้ำโคลนไหลออกจะอยู่ตรงกลาง แต่ในปัจจุบันนี้รูที่ให้น้ำโคลนไหลออกจะอยู่ด้านข้างหลายรูและแต่ละรูจะมีขนาดเล็กลงเพื่อทำให้น้ำโคลนที่ไหลออกมีแรงดันสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของ

การฉีดเพื่อกัดกร่อนหินร่วมกับการกัดกร่อนของหัวเจาะโดยตรงในขณะเจาะ ปัจจุบันนี้หัวเจาะประเภทนี้ถูกพัฒนาและออกแบบมาให้เจาะได้ทั้งในหินร่วน หินแข็ง และหินที่แข็งมาก (อ่านเพิ่มเติมได้ใน “น้ำบาดาล-บ่อบาดาล” โดย เจริญ เพียรเจริญ, 2540)

ปัจจุบันนี้ roller cutter bits ที่เป็นที่นิยมใช้ในการเจาะได้แก่ milled-tooth bits และ tungsten carbide insert (TCI) หรือ insert bits ซึ่งแบบแรก (milled-tooth bit) จะใช้ติดตั้งฟันตัดที่ทำด้วยเหล็กกล้าอยู่บนลูกกลิ้งรูปกรวย (roller cone) แต่ละลูก รูปร่างและขนาดของฟันก็จะแตกต่างกันไป หากเป็นหัวเจาะที่ใช้เจาะชั้นดินอ่อน (soft formation) รูปร่างของฟันจะยาวเรียวและติดตั้งห่างกัน หากเจาะในชั้นดินที่แข็ง (hard formation) ฟันตัดจะสั้นและติดตั้งบนลูกกลิ้งค่อนข้างชิดกัน ส่วนอีกแบบหนึ่งได้แก่ tungsten แarbide รnsert its หรือ TCI its นั้นจะมีการฝังฟันที่มีลักษณะเป็นตุ่มๆ ลงในเนื้อของลูกกลิ้งรูปกรวย สำหรับในหินร่วนรูปร่างของตุ่มจะยาวเรียว ส่วนปลายรูปร่างคล้ายสิ่ว (chisel) สำหรับหินแข็งตุ่มจะสั้น ๆ และกลม ๆ รูปที่ 4-9 แสดงหัวเจาะแบบ roller cutter bits รูปแบบต่างๆ

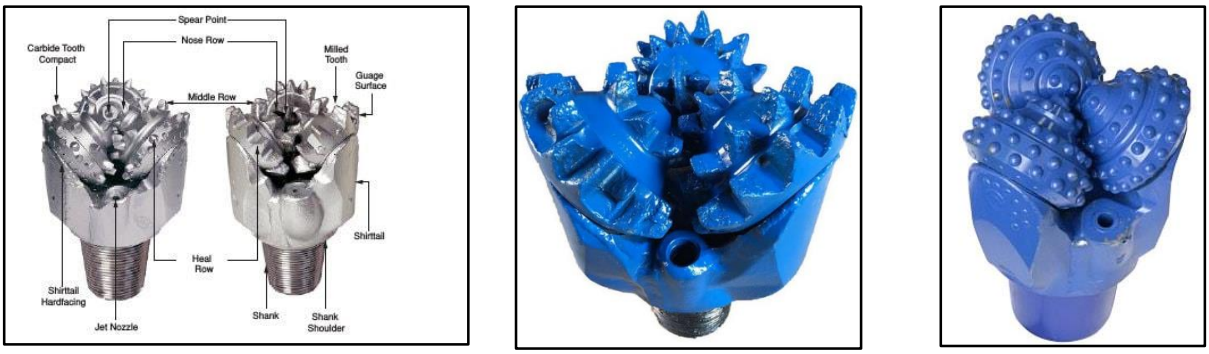
หัวเจาะอีกแบบหนึ่งซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบันเนื่องจากสามารถใช้เจาะได้ทั้งในหินร่วนและหินแข็ง ได้แก่ หัวเจาะติดใบตัด (fixed cutter bits) โดยที่ใบตัดจะทำด้วยโลหะที่แข็งมากๆ เช่นทังสเตนคาร์ไบด์ หัวเจาะแบบนี้จะไม่มีส่วนใดที่หมุน แต่จะใช้คมจากใบตัดที่แข็งและคมมากเฉือนชั้นดินชั้นหินที่เจาะผ่าน ที่ผลิตใช้ในตลาดหัวเจาะได้แก่หัวที่เรียกว่า polycrystalline diamond compact bits หรือ PDC bits และ natural or synthetic diamond cutters bits รูปที่ 4-10 แสดงหัวเจาะแบบ polycrystalline diamond compact bits (ที่มา: https://petgeo.weebly.com/types-of-drilling-bits.html)

หัวเจาะอีกประเภทหนึ่งที่จะไม่กล่าวถึงไม่ได้เลย นั่นก็คือหัวเจาะเพชรสำหรับเจาะเก็บแท่งตัวอย่างหิน (diamond core drill bits) หัวเจาะประเภทนี้จะใช้เจาะเก็บตัวอย่างแบบแท่งหิน (core samples) เหมาะสำหรับการเจาะสำรวจแร่ หรือเจาะเก็บแท่งหินเพื่อศึกษาขั้นรายละเอียดเช่นสิ่งแวดล้อมการเกิดของหิน ปริมาณแร่ธาตุ ชนิดแร่ต่างๆ ในหินเป็นต้น หัวเจาะแบบนี้จะติดเพชรไว้ที่ปลายหัวเจาะ เพชรที่นำมาใช้จะเป็นเพชรในเกรออุตสาหกรรม (Industrial grade diamond) แต่มีความแข็งเทียบเท่าเพชรที่ใช้ทำอัญมณี หัวเจาะอีกประเภทหนึ่งซึ่งเหมาะสำหรับเจาะบ่อน้ำบาดาลมากและใช้ได้เหมาะสมกับหินแข็งเกือบทุกประเภทคือ down-the-hole hammer (DTH bit) รูปที่ 4-11 แสดงลักษณะของหัวเจาะแบบเก็บแท่งหิน และ DTH bit



(a) (b)

รูปที่ 4-8 แสดงหัวเจาะ Drag bits (a) 3-wing drag bits (b) Step drag Bit



(a) (b) (c)

รูปที่ 4-9 (a) แสดงองค์ประกอบของ Roller cutter bits (b) หัวเจาะ Roller cutter bits สำหรับเจาะหินร่วน และ (c) หัวเจาะ Roller cutter bits สำหรับเจาะหินแข็ง

(a) (b)

รูปที่ 4-10 (a) Polycrystalline Diamond Compact (PDC) Bits (b) Synthetic Diamond Cutters Bits

รูปที่ 4-11 รูปซ้ายแสดงลักษณะของหัวเจาะเพชรแบบเก็บแท่งตัวอย่าง (diamond core drill bits) และรูปขวาแสดงลักษณะเฉพาะของ down-the-hole hammer (DTH Bit)

- ระบบน้ำโคลนเจาะ (drilling mud/drilling fluid system) จัดเป็นองค์ประกอบสำคัญมากของระบบการเจาะแบบหมุน (rotary drilling) ทั้งระบบของการเจาะหมุนแบบน้ำโคลนเจาะไหลเวียนตรงและเจาะหมุนแบบน้ำโคลนเจาะไหลเวียนย้อน การควบคุมคุณภาพและคุณสมบัติของน้ำโคลนเจาะเป็นเรื่องที่สำคัญมากในอุตสาหกรรมการเจาะสำรวจและผลิตปิโตรเลียมต้องใช้วิศวกรน้ำโคลนเจาะ (mud engineer) เป็นผู้ดูแลและควบคุม ระบบน้ำโคลนเจาะสำหรับงานเจาะบ่อน้ำบาดาลทั่วไปจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ปั๊มน้ำโคลน (mud pump) บ่อหรือถังน้ำโคลนเจาะ (mud pit or mud tank) และน้ำโคลนเจาะ (drilling mud/fluid) เนื่องจากเรื่องน้ำโคลนเจาะ (drilling mud) เป็นเรื่องที่สำคัญมาก ผู้เขียนจึงอยากเขียนเกี่ยวกับน้ำโคลนเจาะให้ลงในรายละเอียดพอสมควร ดังนี้

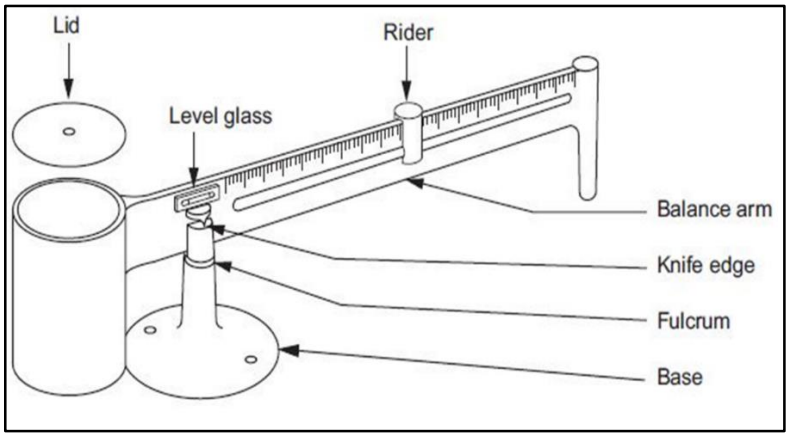
- **หน้าที่ของน้ำโคลนเจาะ (Functions of Driliing Fluids)**

1) ควบคุมแรงดันน้ำใต้ดิน – โดยป้องกันไม่ให้น้ำใต้ดินหรือน้ำบาดาลไหลเข้าสู่หลุมเจาะ ซึ่งจะทำให้การเจาะเป็นไปด้วยความยากลำบากมากขึ้น
2) นำเศษดิน-เศษหิน (cuttings) จากก้นหลุมเจาะขึ้นสู่ปากหลุม – เนื่องจากน้ำโคลนเจาะจะมีความหนาแน่น (density) หรือน้ำหนักและมีความหนืด (viscousity) ประกอบกับมีแรงดันจากปั๊มน้ำโคลน (mud pump) จึงสามารถพาเศษดิน-หินที่ถูกหัวเจาะกัดระหว่างการเจาะขึ้นสู่ปากบ่อได้ไม่ยากนัก แต่หากน้ำโคลนเจาะมีความหนาแน่นและความหนืดน้อย บางครั้งก็ไม่สามารถพยุงตัวอย่างดิน-หินที่เกิดจากการเจาะขึ้นสู่ปากบ่อได้ ก็จะลดประสิทธิภาพของการเจาะลงมาก
3) ป้องกันหลุมเจาะพัง (collapsing of borehole) – ในขณะที่เจาะหลุมสำรวจ น้ำโคลนเจาะที่ไหลเวียนอยู่ในระบบการเจาะจะสัมผัสกับผนังหลุมเจาะ และด้วยคุณสมบัติที่มีความเหนียวหนืดของน้ำโคลนเจาะก็จะทำให้น้ำโคลนเจาะเคลือบผิวของผนังหลุมเจาะที่เรียกว่า mud cake ซึ่งจะช่วยป้องกันการพังทลายของชั้นดินชั้นหินที่หัวเจาะกำลังเจาะผ่านได้ ทำให้การเจาะดำเนินการต่อไปได้อย่างต่อเนื่อง อีกประการหนึ่งคือการที่มีน้ำโคลนเจาะไหลเวียนอยู่ระหว่างก้านเจาะกับผนังบ่อ จะช่วยต้านแรงดันของดิน-หินที่อยู่รอบบ่อ (lithostatic pressure) โดยน้ำโคลนเจาะที่ไหลเวียนจะมีแรงดันที่เรียกว่า แรงดันน้ำโคลน (hydraulic pressure)
4) ระบายความร้อนของหัวเจาะ (cooling agent) – ในขณะที่หัวเจาะกัดชั้นดินชั้นหิน ความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้หัวเจาะสึกกร่อนได้เร็ว แต่น้ำโคลนเจาะจะทำหน้าที่ลดความร้อนที่เกิดขึ้นกับหัวเจาะทำให้หัวเจาะมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น
5) เป็นตัวกลาง (media) ในการหยั่งธรณีหลุมเจาะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งวิธี electrical logging (E-logging) ในหลุมที่ยังไม่ได้ลงท่อกรุ (uncased hole) โดยทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าที่ปล่อยจากหัววัด (probe) ไปยังผนังหลุมเจาะและเดินทางเข้าสู่ชั้นดินชั้นหินข้างหลุมเจาะ
6) ในบริเวณที่เป็นรอยต่อระหว่างดินเหนียวหรือหินเนื้อแน่นและชั้นทรายหรือหินที่มีรูพรุน น้ำโคลนเจาะที่เคลือบผนังหลุมเจาะอยู่บริเวณรอยต่อของหิน 2 ชนิดจะเหนี่ยวนำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าให้เกิดขึ้นโดยอัตโนมัติ (spontaneous potential: SP) ระหว่างหิน 2 ชนิด และสามารถวัดค่าได้จาก electrical logging จาก SP curve (graph)
7) ป้องกันการบวมน้ำของชั้นดินเหนียวหรือหินดินดาน (clay/shale swelling) – โดยทั่วไปเมื่อดินเหนียว (clay) หรือหินดินดาน (shale) ที่แห้ง เมื่อได้รับน้ำจะเกิดการบวมหรือพองตัว (swelling) แต่ในการเจาะใด ๆ เราจะไม่ใช้น้ำเปล่า แต่จะเลือกใช้น้ำโคลนแทนซึ่งในน้ำที่อยู่ในรูปน้ำโคลนจะสูญเสียน้ำให้กับดินเหนียวหรือหินดินดานที่เจาะผ่านได้ยากกว่า จึงเกิดการบวมหรือพองตัวน้อยทำให้ไม่เป็นอุปสรรคต่อการเจาะ

8) ในการเจาะสำรวจหรือเจาะหลุมผลิตปิโตรเลียม น้ำโคลนเจาะจะช่วยเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณการวัดระหว่างการเจาะ (measurement while drilling: MWD) จากชุดอุปกรณ์ก้นหลุม (bottom hole assembly: BHA) ขึ้นสู่ปากหลุม การวัดค่าต่าง ๆ ระหว่างการเจาะจะเรียกว่า logging while drilling (LWD) แต่ในการเจาะบ่อน้ำบาดาลจะไม่ใช้ MWD และ LWD เนื่องจากชุดอุปกรณ์จะมีราคาแพง ยุ่งยากในการติดตั้งและไม่มีความจำเป็น

- **คุณสมบัติของน้ำโคลนเจาะ (properties of drilling fluids)**

1) **ความหนาแน่นของน้ำโคลนเจาะ (density of drilling fluid)** - เทียบเท่าได้กับน้ำหนักน้ำโคลน (mud weight) นั่นเอง โดยปกติทั่วไปจะมีหน่วยเป็นปอนด์ต่อแกลลอน (pounds per gallon: ppg, lb/gal) ความหนาแน่นของน้ำโคลนจะช่วยลดแรงดันน้ำในบ่อ (hydrostatic pressure) ในกรณีที่เจาะเจอชั้นหินให้น้ำแบบมีแรงดัน หรือช่วยลดการพุ่งขึ้นมาของของเหลวหรือก๊าซที่ติดไฟได้ หากเจาะเจอชั้นหินที่มีร่องรอยของปิโตรเลียม การตรวจสอบน้ำหนักหรือความหนาแน่นของน้ำโคลนเจาะ จะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Mud Scale หรือ Mud Balance (รูปที่ 4-12) น้ำหนักน้ำโคลนเจาะที่เหมาะสมควรจะต่ำกว่า 20 ปอนด์ต่อแกลลอน (lb/gal) หรือเทียบเท่าค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity: SG) เท่ากับ 2.4 แต่ในกรณีที่ใช้ในบ่อเจาะสำรวจปิโตรเลียม น้ำหนักหรือความหนาแน่นของน้ำโคลนเจาะอาจมากถึง 22-23 ปอนด์ต่อแกลลอน การเพิ่มความหนาแน่นของน้ำโคลนส่วนใหญ่จะเพิ่มสารบดละเอียดที่เรียกว่าแบไรต์ (Barite: $BaSO_4$) ซึ่งเป็นแร่ชนิดหนึ่งที่มีความถ่วงจำเพาะสูง (SG 4.5)
(อ้างอิง https://en.wikipedia.org/wiki/Mud_weight#)



รูปที่ 4-12 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบความหนาแน่นหรือน้ำหนักของโคลนเจาะ (mud scale/mud Bbalance)

2) **ความหนืด (Viscosity)** – สำหรับน้ำโคลนเจาะแล้วจะหมายถึงความต้านทานในการไหล (resistance to flow) มักจะบอกเป็นหนา (thick) หรือบาง (thin) ในทางปฏิบัติความหนืดสามารถทดสอบได้โดยใช้อุปกรณ์เฉพาะที่เรียกว่า Marsh Funnel (รูปที่ 4-13) การทดสอบความหนืดจะใช้วิธีใช้ภาชนะตวงในชุดอุปกรณ์ดังกล่าวตักน้ำโคลนเจาะที่ผสมเข้าที่ดีแล้วขึ้นมาปริมาณ 1 ควอร์ต (quart) หรือเทียบเท่ากับ 946 มิลลิลิตร (millimetres: ml/cubic centimetres: cc) จากนั้นตั้งกรวยขึ้นแล้วเอานิ้วปิดปลายกรวย แล้วเทน้ำโคลนเจาะใส่กรวยจนหมดภาชนะตวง (946 มิลลิลิตร)

จากนั้นเอาภาชนะตวงไปรองรับน้ำโคลนเจาะที่ปลายกรวย ปล่อยนิ้วที่ปิดปลายกรวยออก พร้อมกับจับเวลาจนน้ำโคลนเจาะไหลออกจนหมดกรวยก็กดปิดนาฬิกาจับเวลา น้ำโคลนเจาะโดยทั่วไปจะมีค่าความหนืดอยู่ระหว่าง 32-34 วินาที/ควอร์ต รูปที่ 4-14 แสดงค่าความหนืดของน้ำโคลนเจาะที่เหมาะสมสำหรับตะกอนขนาดต่างๆ

<u>สิ่งที่ควรรู้</u>

- ความหนืดของน้ำโคลนเจาะที่มีน้ำหนักหรือความหนาแน่นมากกว่า จะมีค่ามากกว่าความหนืดของน้ำโคลนที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าเสมอ
- หลุมเจาะที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า ต้องการใช้น้ำโคลนเจาะที่มีความหนืดมากกว่าความหนืดของน้ำโคลนเจาะสำหรับบ่อที่เส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าเสมอ

รูปที่ 4-13 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบความหนืด (viscosity) ของโคลนเจาะ (Marsh Funnel)

ชนิด	ขนาด (มม.)	ความหนืดโดยประมาณ (วินาที/ควอด)
ทรายละเอียด	0.06-0.25	30-45
ทรายปานกลาง	0.25-0.50	45-55
ทรายหยาบ	0.50-2.00	55-65
กรวดเล็ก	2.00-4.00	65-75
กรวดหยาบ	4.00-6.40	75-85

รูปที่ 4-14 แสดงค่าความหนืดของน้ำโคลนเจาะที่เหมาะสมต่อการพาเศษดิน-หินจากก้นหลุมเจาะขึ้นสู่ปากบ่อของตะกอนแต่ละขนาด

3) **ความแกร่งของวุ้นน้ำโคลน (gel strenght)** – หมายถึงความเค้นเฉือน (shear stress) ของน้ำโคลน เป็นคุณสมบัติของน้ำโคลนอันหนึ่งซึ่งจะบ่งบอกความสามารถในการห่อหุ้มเศษดิน-หินที่เกิดจากการเจาะ ค่าของ gel strength สามารถหาได้โดยการใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Baroid Rhodeometer ตามรูปที่ 4-15

รูปที่ 4-15 แสดงเครื่องมือ Baroid Rhodeometer ซึ่งใช้หาค่า gel strength ของน้ำโคลน

4) **การซึมและการเกิดผนังซึมซาบ (filtration and filter cake) -** ในขณะที่น้ำโคลนไหลหมุนเวียนในระบบ น้ำโคลนจะทำหน้าที่เคลือบผนังหลุมเจาะไปด้วย ในส่วนของผนังหลุมเจาะที่มีรูพรุนเช่นชั้นกรวด-ทราย น้ำโคลนจะแทรกซึมเข้าไปได้ค่อนข้างมาก แต่หากน้ำโคลนเคลือบหรือฉาบผนังหลุมเจาะหนาเกินไป จะทำให้เศษดิน-หินที่เกิดจากการเจาะ (cuttings) เคลื่อนที่ผ่านขึ้นไปปากหลุมเจาะได้ยากขึ้น และอาจพอกผนังบ่อในส่วนนั้นและเป็นอุปสรรคต่อการไหลหมุนเวียนของน้ำโคลนในหลุมเจาะ ดังนั้นจึงต้องทดสอบคุณสมบัติด้านการซึมและการเกิดผนังซึมซาบ (filtration and filter cake) ให้มีความเหมาะสมโดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Filter Press รูปที่ 4-16 แสดงเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบคุณสมบัติด้านการซึมและการเกิดผนังซึมซาบ (filtration and filter cake) ของน้ำโคลน

รูปที่ 4-16 แสดงเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบคุณสมบัติด้านการซึมและการเกิดผนังซึมซาบ (filtration and filter cake) ของน้ำโคลน

5) **ปริมาณทรายในน้ำโคลน (Sand Content) –** ในระหว่างการเจาะมักจะมีตะกอนละเอียดจำพวกทรายแป้ง (silt) และทราย (sand) ที่เกิดจากการที่หัวเจาะกัดกับชั้นดินชั้นหินที่เจาะผ่าน ทำให้มีตะกอนทรายและทรายแป้งปนอยู่กับน้ำโคลนเสมอ หากปริมาณทรายและทรายแป้ง (sand content) มีมากเกินไปจะไปทำให้ปั๊มน้ำโคลน (mud pump) ก้านเจาะและหัวเจาะชำรุดและสึกหรอได้อย่างรวดเร็ว และหากมีปริมาณมากเกินไปจะทำให้คุณสมบัติที่จำเป็นของน้ำโคลนเปลี่ยนไปและเสื่อมสภาพไปในที่สุด ทำให้ต้องเตรียมน้ำโคลนใหม่ซึ่งจะทำให้สิ้นเปลืองงบประมาณ ปริมาณทรายในน้ำโคลนไม่ควรเกิน 2 % โดยปริมาตร ในการเจาะบ่อที่มีมาตรฐานการเจาะเป็นไปตามหลักวิชาการ หากมี sand content เกิน 2 % โดยปริมาตร จะต้องกำจัดออกไปโดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่าเครื่องกำจัดทราย (desander) และเครื่องกำจัดทรายแป้ง (desilter) เพื่อควบคุมคุณภาพของน้ำโคลนให้เหมาะสมระหว่างการเจาะ รูปที่ 4-17 แสดงเครื่องกำจัดทราย (desander) และเครื่องกำจัดทรายแป้ง (desilter) ที่ใช้ในการกำจัดตะกอนทั้ง 2 ขนาด

รูปที่ 4-17 แสดงเครื่องกำจัดทราย (desander ซ้าย) และเครื่องกำจัดทรายแป้ง (desilter ขวา) ที่ใช้ในการกำจัดตะกอนทั้ง 2 ขนาดตามลำดับ

6) **ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)** - น้ำโคลนที่เหมาะสมสำหรับการเจาะจะมีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ระหว่าง 8.5-10.0 ซึ่งอยู่ในช่วงของความเป็นด่าง ที่ต้องควบคุมความเป็นกรด-ด่างของน้ำโคลนให้อยู่ในสภาวะเป็นด่างก็เนื่องจากหากน้ำโคลนมีสภาวะเป็นกรด น้ำโคลนจะทำปฏิกิริยากับอุปกรณ์การเจาะทุกส่วนไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์ในปั๊มน้ำโคลน (mud pump) อุปกรณ์ที่เป็นโลหะเช่นก้านเจาะ หัวเจาะก็สามารถถูกทำให้ผุกร่อนได้เช่นกัน และหากค่าความเป็นกรด-ด่าง ต่ำหรืออยู่ในสภาวะเป็นกรด จะทำให้ควบคุมค่าความหนืด (viscosity) ได้ยาก

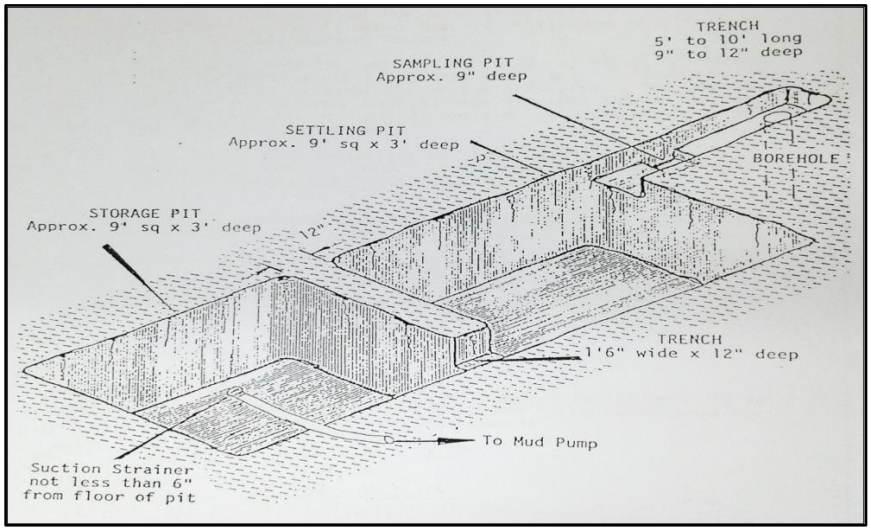
โดยทั่วไปน้ำจะมีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 5.5-7.5 เมื่อผสมกับผงโคลนจนมีสภาพเป็นน้ำโคลนแล้วจะต้องปรับให้ค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้นโดยการเติมโซดาแอช (Soda ash, Na_2CO_3) ลงไป ปริมาณการเติมที่เหมาะสมได้แก่ 0.55-1.1 กิโลกรัมต่อน้ำ 100 แกลลอน (3875 ลิตร) แต่หากว่าน้ำโคลนมีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงเกินไปหรือสูงกว่า 10.5 ก็ต้องเติมสาร Sodium Bicarbonate ($NaHCO_3$) ลงไปในน้ำโคลนเพื่อปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้อยู่ในช่วงเหมาะสม (pH 8.5-10.5)

- **บ่อน้ำโคลน/ถังน้ำโคลน (Mud Pit/Mud Tank)**

บ่อน้ำโคลนหรือถังน้ำโคลนเป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบไหลเวียนของน้ำโคลน (mud circulation) บ่อน้ำโคลนหรือถังน้ำโคลนมีไว้เพื่อเป็นภาชนะเริ่มต้นเพื่อเตรียมน้ำโคลนสำหรับการเจาะ เริ่มต้นโดยการผสมน้ำโคลนกับดินเบนโทไนต์ ตามด้วยสารโพลิเมอร์ และสารปรุงแต่งเฉพาะอย่าง ก่อนที่จะสูบน้ำโคลนไปใช้หมุนเวียนผ่านระบบต่างๆ ของการเจาะ สำหรับการเจาะบ่อน้ำบาดาลทั่วไปและมีพื้นที่ในการปฏิบัติงานกว้างขวางพอ บ่อน้ำโคลนจะเป็นบ่อที่ใช้แรงงานหรือเครื่องจักรกลขุดเป็นหลุมลงไปในดิน และในการเจาะตามรูปแบบมาตรฐานสากล บ่อน้ำโคลนจะต้องมี 2 บ่อ มีทางเชื่อมถึงกันบริเวณใกล้ผิวดินตรงขอบบ่อ (รูปที่ 4-18) โดยบ่อแรกจะเรียกว่าบ่อตกตะกอน (settling pit) บ่อนี้จะรองรับเศษดิน-หินที่ได้จากการเจาะ (cuttings) แล้วหมุนเวียนขึ้นมาสู่ปากบ่อ cuttings ส่วนหนึ่งจะถูกตักทิ้งออกไปบ้าง บางส่วนจะถูกเก็บไว้เพื่อให้นักธรณีวิทยา

ได้วิเคราะห์ (samples examination) แต่ก็จะมีบางส่วนที่ไหลลงบ่อน้ำโคลนบ่อแรก ตะกอนที่เหลือจากการตักจะตกจมลงสู่ก้นบ่อ ณ บ่อตกตะกอนนี้ และจะถูกทีมงานเจาะใช้ภาชนะตักทิ้งออกไปกองไว้ ทั้งนี้เพื่อป้องกันการตื้นเขินของบ่อตกตะกอน

น้ำโคลนส่วนที่อยู่ด้านบนของบ่อโคลนจะปราศจากเศษดิน-หินก็จะไหลผ่านร่องที่ขุดเชื่อมระหว่างบ่อโคลนทั้ง 2 บ่อ (trench) แล้วไหลเติมไปจนเต็มบ่อที่ 2 ซึ่งเรียกว่าบ่อกักเก็บน้ำโคลน (storage pit) ซึ่งพร้อมที่จะถูกสูบไปใช้หมุนเวียนในระบบการเจาะโดยปั๊มน้ำโคลน (mud pump) ต่อไป สำหรับในที่แคบหรือในการเจาะปิโตรเลียม จะใช้ถังน้ำโคลน (mud tank) แทนบ่อน้ำโคลน ซึ่งก็ค่อนข้างสะดวก รูปที่ 4-19 แสดงองค์ประกอบของถังน้ำโคลน



รูปที่ 4-18 แสดงระบบบ่อน้ำโคลนที่ประกอบไปด้วยบ่อดักตะกอน (settling pit) และบ่อกักเก็บน้ำโคลน (Storage pit)

รูปที่ 4-19 แสดงระบบถังน้ำโคลนที่ภายประกอบไปด้วยบ่อดักตะกอน (settling pit) และบ่อกักเก็บน้ำโคลน (storage pit) เช่นกัน และอุปกรณ์สีน้ำเงินด้สนบนซ้ายของภาพจะเป็นอุปกรณ์ผสมน้ำโคลน (mud hopper) ซึ่งจะอธิบายต่อไป

- **ประเภทของน้ำโคลน**

ประเภทของน้ำโคลนหรือน้ำโคลนเจาะ (drilling mud/drilling fluids) ที่นิยมใช้กันมากจะมี 2 ประเภทขึ้นอยู่กับของไหล (fluid) ที่ใช้เป็นพื้นฐานในการผสมน้ำโคลน ได้แก่น้ำโคลนที่มีน้ำเป็นพื้นฐาน (water-based mud: WBM) และน้ำโคลนที่มีน้ำมันเป็นพื้นฐาน (oil-based mud: OBM) น้ำโคลนทั้ง 2 ประเภทจะมีความแตกต่างกันมาก การจะเลือกใช้น้ำโคลนประเภทไหนจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายด้าน เช่นลักษณะธรณีวิทยาของพื้นที่ เช่นชนิดหิน หากเป็นการเจาะสำรวจแร่เกลือระเหยเช่นเกลือหิน แร่ซิลไวต์ (sylvite) แร่คาร์นาลไลต์ (carlnallite) ก็จะเลือกใช้ oil-based mud ทั้งนี้เพื่อป้องกันการละลายของแท่งหินตัวอย่างในขณะเจาะ หรือในกรณีข้างต้นอาจเปลี่ยนมาใช้ water-based mud ก็ได้เช่นกัน แต่ส่วนผสมต้องเป็นน้ำเกลืออิ่มตัว (saturated brine) เท่านั้น นอกจากนั้นยังมีปัจจัยเกี่ยวกับแรงดันก้นหลุมที่อาจเกิดขึ้น

สำหรับการเจาะน้ำบาดาลหรือปิโตรเลียมทั่วไป มักจะใช้น้ำโคลนประเภทน้ำโคลนที่มีน้ำเป็นพื้นฐาน เนื่องจากมีข้อดีหลายด้าน ได้แก่ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าน้ำโคลนประเภทที่มีน้ำมันเป็นพื้นฐาน ไม่มีคุณสมบัติที่เป็นพิษ (non-toxic nature) และไม่ทำปฏิกิริยากับดิน-หินที่เจาะผ่าน ทำให้รักษาสภาพองค์ประกอบของชนิดหิน (rock composition) เดิมไว้ โดยเฉพาะกรณีที่เจาะสำรวจปิโตรเลียม หากใช้ oil-based mud ในการเจาะ เมื่อได้ตัวอย่างเศษดิน-หิน (cuttings) ที่มีคราบน้ำมันเคลือบผิวตัวอย่างขึ้นมาจากหลุมเจาะ นักธรณีวิทยาจะไม่สามารถล่วงรู้ได้ว่าคราบน้ำมันนั้นมาจากตัวชั้นหินเอง หรือมาจาก oil-based mud เนื่องจากเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon) เช่นเดียวกัน แต่หากใช้ water-based mud ในการสำรวจหาปิโตรเลียม เมื่อเจาะถึงชั้นที่คาดว่าจะเป็นชั้นกักเก็บปิโตรเลียม นักธรณีวิทยาจะสังเกตเห็นคราบของไฮโดรคาร์บอนเกาะอยู่ตามผิวของตัวอย่างเศษหิน (cuttings) ได้อย่างชัดเจน

- **ขั้นตอนการผสมน้ำโคลน**

มีอยู่เว็บไซต์หนึ่งเขียนบอกไว้ว่า **“การผสมน้ำโคลนที่ดีสำหรับใช้ในการเจาะนั้นก็เหมือนการปรุงอาหารมื้อเย็นเลิศรสที่ต้องใช้ทั้งศาสตร์และศิลป์”** นั่นหมายความว่าการผสมน้ำโคลนที่ดีนั้นต้องใส่ใจในส่วนผสม (ingredients; bentonite, polymers, special additives) และช่วงเวลาที่เหมาะสมในการใส่ส่วนผสมต่างๆ ขั้นตอนการผสมน้ำโคลน มี 4 ขั้นตอนที่สำคัญ ดังนี้

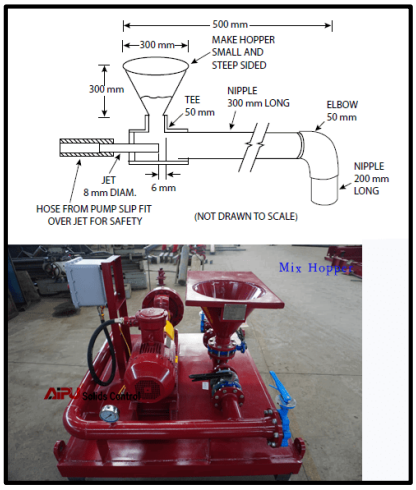
1) ปรับปรุงคุณภาพน้ำที่จะใช้ผสมน้ำโคลน (treat makeup water) – คุณภาพน้ำที่จะใช้ผสมเพื่อเตรียมน้ำโคลนที่ดีต้องเป็นน้ำที่มีคุณภาพดี หรือกล่าวได้อีกแบบหนึ่งว่าคุณภาพน้ำที่ไม่ดีก็จะผสมได้น้ำโคลนที่ไม่ดี น้ำอุ่นและน้ำอ่อน (soft water) จะเหมาะสมในการละลายผงเบนโทไนต์ (bentonite powder) หากน้ำที่ใช้มีความกระด้าง (hard water) ให้ลดความกระด้างของน้ำลงโดยเติมโซดาแอช (soda ash: Na_2CO_3) ลงไปในน้ำ นอกจากนั้นการเติมโซดาแอชลงไปยังช่วยเพิ่มความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำโคลนอีกด้วย ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมของน้ำโคลน ซึ่งกำหนดให้มีค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมอยู่ที่ 8.5-1.05
2) เติมดินเบนโทไนต์ (introduce bentonite clays) ขั้นตอนนี้จะทำเมื่อมีการเตรียมน้ำที่เหมาะสมแล้ว โดยการเติมดินเบนโทไนต์คุณภาพดี (high-yield bentonite) เข้าไปสู่ระบบ สารเบนโทไนต์จะช่วยเพิ่มความหนืด (viscosity) เพิ่มความแกร่งของวุ้นน้ำโคลน (gel strength) และเพิ่มประสิทธิภาพในการอุ้มพา (carrying capacity) เศษดิน-เศษหินให้กับน้ำโคลน การเติมเบนโทไนต์ นั้น จะค่อย ๆ เติม ช้าๆ ทั้งนี้เพื่อให้น้ำทำปฏิกิริยากับผงเบนโทไนต์ได้อย่างเต็ม

ประสิทธิภาพ (fully hydrated) หากเติมดินเบนโทไนต์เร็วเกินไป ดินเบนโทไนต์จะจับตัวกันเป็นก้อนแล้วตกจมลงก้นบ่อน้ำโคลน (mud pit) เป็นสาเหตุที่ทำให้ต้องใช้เบนโทไนต์มากขึ้นเพื่อให้ได้ค่าความหนืดที่ต้องการ เราสามารถตรวจสอบความหนืด (viscosity) ของน้ำโคลนได้ในขณะเติมเบนโทไนต์ได้เรื่อย ๆ โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Marsh Funnel (รูปที่ 4-11) การที่เราต้องเติมเบนโทไนต์เป็นอันดับแรกก็เนื่องจากนำโคลนเบนโทไนต์ที่ได้ในช่วงต้นนี้ จะมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการบวมตัวของดินเหนียว (clay swelling) เมื่อเจาะผ่านชั้นดินเหนียว ซึ่งการบวมตัวของชั้นดินเหนียวนั้น เป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ในกระบวนการเจาะเนื่องจากอาจจะไปลดประสิทธิภาพการไหลของน้ำโคลนระหว่างผนังหลุมเจาะกับก้านเจาะ (annulus)

3) การเติมสารโพลิเมอร์เมื่อจำเป็น (add polymers if necessary) ประโยชน์ของการเติมสารโพลิเมอร์ในน้ำโคลนก็คือสารโพลิเมอร์จะมีคุณสมบัติช่วยลดการเกาะตัวของดินเหนียวเข้าด้วยกันซึ่งดินเหนียวมักจะจับตัวเป็นก้อนกลมติดบริเวณหัวเจาะ (bit-balling) นอกจากนั้นสารโพลิเมอร์ยังจะช่วยเพิ่มความเหนียว (toughness) ของผนังโคลนเคลือบบ่อ (mud cake) และทำให้ผนังโคลนเคลือบบ่อบางลง (thinner) ซึ่งนอกจากจะช่วยป้องกันการพังของผนังหลุมเจาะแล้ว ยังไม่เป็นอุปสรรคต่อการไหลเวียนของน้ำโคลนในหลุมเจาะอีกด้วย

4) การเติมสารปรุงแต่งเฉพาะอย่างเมื่อจำเป็น (add specialty additives if necessary) เมื่อกระบวนการเติมสารโพลิเมอร์เสร็จสิ้นแล้ว ก็จะเติมสารปรุงแต่งเฉพาะเช่นสารช่วยการกระจาย (dispersant) เพื่อลดความหนักและความหนาของน้ำโคลน (thick mud) เมื่อมีเศษตะกอนจากการเจาะเจือปนมากับน้ำโคลน สารซักฟอกสำหรับการเจาะ (drilling detergent) เพื่อลดการเกาะตัวของดินเหนียวกับก้านเจาะ และสารพิเศษอีกชนิดหนึ่งได้แก่สารลดการสูญเสียน้ำโคลน (loss circulation materials) ซึ่งสารชนิดนี้จะช่วยลดการสูญเสียของน้ำโคลนจากการไหลเข้าไปในช่องว่างหรือรูพรุนของชั้นดินชั้นหินที่เจาะผ่าน

5) การเติมดินเบนโทไนต์ สารโพลิเมอร์ และสารปรุงแต่งเฉพาะอย่าง เพื่อให้เกิดการผสมกับน้ำที่ผ่านการเตรียมมาแล้วให้เป็นไปอย่างประสิทธิภาพจะใช้เครื่องมือที่เรียกว่าเครื่องผสมน้ำโคลน (Mud Hopper) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่จะช่วยให้การผสมเป็นไปอย่างรวดเร็ว และน้ำโคลนที่ผ่านเครื่องผสมนี้จะเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) รูปที่ 4-20 แสดงเครื่องผสมน้ำโคลน (Mud Hopper) รูปแบบต่างๆ
(ที่มา: https://waterwelljournal.com/first-look-four-steps-mixing-good-drilling-fluid/ และ https://www.chemstar.com/2014/06/comparing-water-based-muds-oil-based-muds/)



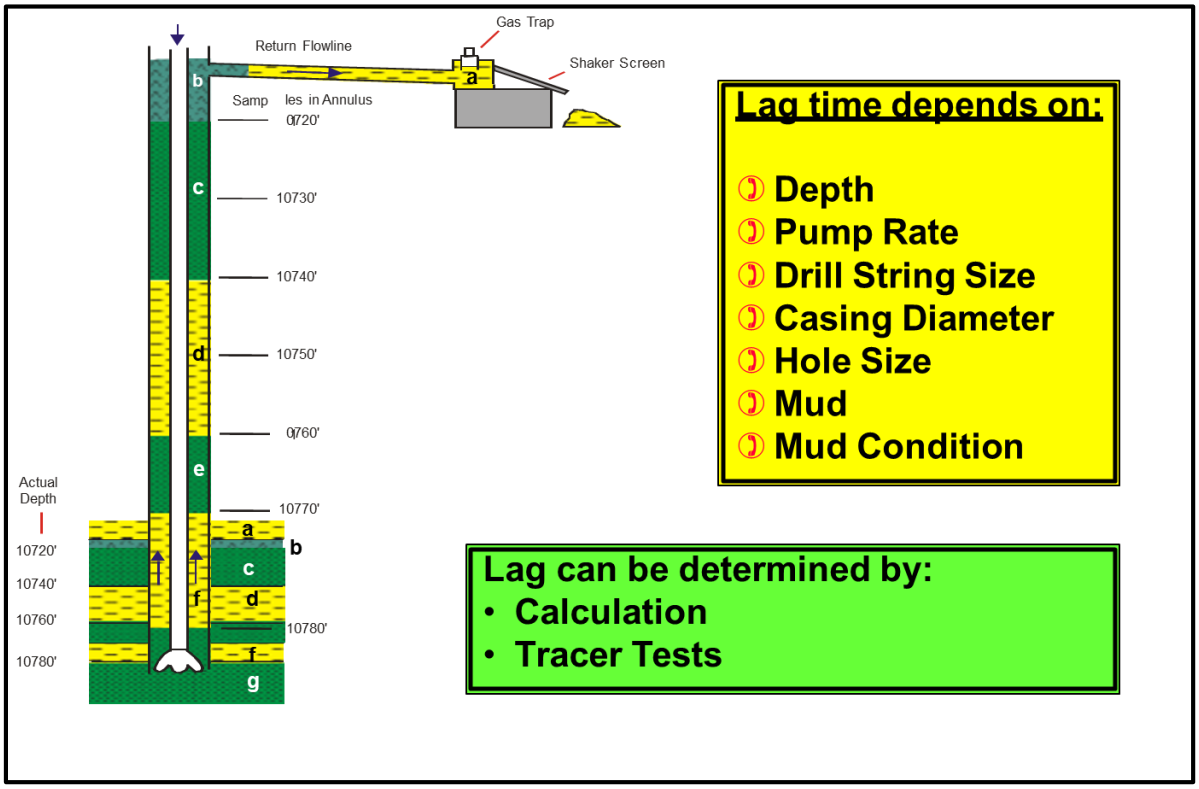
(a)

(b)

รูปที่ 4-20 (a) ผังแสดงองค์ประกอบของ Mud Hopper (b) Mud Hopper ที่ใช้ในการผสมน้ำโคลนทั่วไปในงานเจาะน้ำบาดาล

- **เวลาหน่วงของน้ำโคลนในการนำเศษดิน-หินขึ้นสู่ปากบ่อ (lag time of drilling fluid for cuttings traveling to ground surface)**

โดยข้อเท็จจริงแล้วในขณะที่หัวเจาะกำลังกัดกร่อนหิน ณ ความลึกหนึ่ง ๆ นั้น เศษหินที่ขึ้นสู่ปากบ่อ ณ เวลานั้น จะไม่ใช่ตัวแทนของเศษหิน ณ ความลึกนั้น เนื่องจากเศษหิน ย่อมต้องใช้เวลาระยะหนึ่ง ในการเดินทางจากก้นบ่อถึงปากบ่อ เราเรียกเวลาที่เศษหินเดินทางในช่วงนี้ ว่า lag time ซึ่งสามารถคำนวณได้ว่าที่ช่วงความลึกเท่าใด ในขณะที่น้ำโคลนเจาะมีความหนืดเท่าใด ค่า lag time จะเป็นเท่าใด ผู้เขียนต้องการจะสื่อว่าตัวอย่างที่ขึ้นมา **ในขณะที่หัวเจาะอยู่ที่ความลึกใด ๆ ในระบบการเจาะหมุนแบบน้ำโคลนเจาะไหลเวียนตรงนั้น เศษตัวอย่างดินหินที่ขึ้นมาสู่ปากบ่อจะไม่ใช่ตัวอย่างเศษหินที่ความลึกของหัวเจาะ ณ เวลานั้น** ผู้เก็บตัวอย่างต้องรอสักระยะหนึ่ง จึงค่อยเก็บตัวอย่าง ซึ่งเป็นเรื่องที่สำคัญมากและช่างเจาะบ่อน้ำบาดาลทั้งภาครัฐและภาคเอกชนไทยไม่ค่อยจะตระหนักถึงเรื่องนี้มากนัก ในอุตสาหกรรมการเจาะน้ำมัน จะมีผู้ที่ดูแลเรื่องนี้โดยเฉพาะ เรียกว่าวิศวกรน้ำโคลน (mud engineer) ซึ่งจะต้องทำหน้าที่คำนวณและควบคุมความหนืดของน้ำโคลนเจาะ และคำนวณ lag time แล้วป้อนข้อมูลให้ระบบคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะออกแบบให้ส่งสัญญาณเตือน (alarm) เพื่อให้นักธรณีวิทยาหรือช่างเจาะเริ่มให้เก็บตัวอย่างเศษหิน ณ ความลึกที่กำหนด รูปที่ 4-21 แสดงผังจำลองของเวลาหน่วงของน้ำโคลน (lag time) ที่เกิดขึ้นในหลุมเจาะต่างๆ



รูปที่ 4-21 แสดงผังจำลองของเวลาหน่วงของน้ำโคลน (lag time) ที่เกิดขึ้นในหลุมเจาะต่างๆ ในภาพทาง ซ้ายมือขณะที่หัวเจาะกำลังเจาะอยู่ในหน่วยหิน ‘g’ แต่ตัวอย่างเศษดิน-หินที่ออกตรงปากบ่อจะเป็นตัวอย่างของหน่วยหิน ‘a’ และหากเมื่อหัวเจาะกัดลงไปในหน่วยหิน ‘g’ ลงไปเรื่อยๆ ตัวอย่างที่จะขึ้นมาบนปากหลุมเจาะก็จะเป็นตัวอย่างของหน่วยหิน ‘b’ ‘c’ ‘d’ ‘e’ และ ‘f’ ตามลำดับ ส่วนในช่องสี่เหลี่ยมสีเหลืองจะบอกว่า เวลาหน่วงของน้ำโคลน (lag time) จะขึ้นอยู่กับความลึก อัตราการสูบของเครื่องสูบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านเจาะ หลุมเจาะ และสภาพน้ำโคลน ส่วนในช่องสี่เหลี่ยมสีเขียวจะบอกว่าเวลาหน่วงของน้ำโคลน (lag time) สามารถหาได้จากการคำนวณ (calculation) และการใช้สารติดตาม (tracer tests)

จากข้อมูลในรูปที่ 4-21 จะเห็นว่าปัจจัยที่ควบคุมการเดินทางน้ำโคลนที่จะพาเศษดิน-หินขึ้นสู่ปากบ่อมีอยู่หลายปัจจัย ที่สำคัญได้แก่เส้นผ่านศูนย์กลางของหลุมเจาะ (borehole diameter: Dh) เส้นผ่านศูนย์กลางของก้านเจาะ (drill pipe diameter: Dp) ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางของสองสิ่งดังกล่าวจะถูกนำมาคำนวณปริมาตรของของเหลวที่อยู่ในหลุมเจาะ (volume of drilling fluid in the annulur) ความลึกของหลุมเจาะ (depth of borehole) ในขณะที่กำลังเจาะ ประสิทธิภาพของปั๊มน้ำโคลน (mud pump capacity) และอัตราหรือความเร็วของน้ำโคลน (pump rate) เขียนเป็นสูตรได้ดังนี้

$$\text{Lag time} = \frac{(\text{annular capacity} * \text{depth}) \div (90\% \text{ of pump efficiency})}{\text{Pump stroke}}$$

เมื่อ annular capacity หมายถึงพื้นที่หน้าตัดของช่องว่างระหว่างหลุมเจาะกับก้านเจาะคูณกับความลึกของหัวเจาะ = π (Dh^2-Dp^2)

เมื่อ Dh หมายถึงเส้นผ่านศูนย์กลางของหลุมเจาะ

Dp หมายถึงเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านเจาะ

เมื่อได้ annular capacity แล้วจึงคูณด้วยความลึกของหัวเจาะ จะได้ปริมาตรน้ำโคลนที่อยู่ในช่องว่าง (annular volume) แล้วนำมา หาร (÷) ด้วย 90% ของประสิทธิภาพของ mud pump (90% of pump efficiency) แล้วหาร (÷) ต่อด้วย pump stroke จะได้เวลาออกมาเป็นจำนวนนาทีของ lag time ณ ความลึกหนึ่งๆ

pump stroke หาได้จาก sensor ที่ติดตั้งไว้ตรง mud pump ซึ่งจะบอกเป็นตัวเลขว่าในหนึ่งนาที mud pump จะทำงานกี่ stroke

จากสูตรข้างต้น annular capacity สามารถเอามาเขียนเป็นสูตรสำเร็จรูปได้ดังนี้

annular capacity in bbl/ft (บาเรล/ฟุต) = (Dh^2-Dp^2) ÷ 1029.4

เมื่อ Dh = Diameter of hole (เส้นผ่านศูนย์กลางของหลุมเจาะ) หน่วยเป็น นิ้ว (inch)

Dp = Diameter of pipe (เส้นผ่านศูนย์กลางของก้านเจาะ) หน่วยเป็น นิ้ว (inch)

1029.4 เป็นค่าคงที่ที่ได้จากการแปลงหน่วยต่างๆ มาแล้ว

ยกตัวอย่างเช่น เส้นผ่านศูนย์การหลุมเจาะ (Dh) = 6.125 นิ้ว

เส้นผ่านศูนย์กลางก้านเจาะ (Dp) = 3.5 นิ้ว

annular capacity in bbl/ft = (6.125^2 - 3.5^2) ÷ 1029.4

annular capacity = 0.0245 bbl/ft

annular capacity x depth (ความลึกถึงหัวเจาะ) = annular volumn (ปริมาตรน้ำโคลนในหลุมเจาะ)

และเมื่อนำปริมาตรน้ำโคลนในหลุมเจาะ ÷ จำนวน stroke ของ mud pump ต่อ 1 นาที จะได้ค่า

lag time เป็นจำนวนนาที หมายถึง ณ ความลึกของหัวเจาะนั้น น้ำโคลนจะนำตัวอย่างดิน-หินขึ้นสู่ปากหลุมในจำนวนนาทีที่คำนวณออกมาได้

lag time (stroke) = annular volumn ÷ pump output
lag time (min) = lag time (stroke) ÷ pump rate

แต่สูตรดังกล่าวข้างต้น จะเป็นหน่วยที่ใช้กับงานเจาะสำรวจปิโตรเลียม (Oilfield Unit) ซึ่งในทางงานน้ำบาดาลอาจจะไม่ค่อยคุ้นเคยกับหน่วยที่เป็นบาร์เรล (barrel: bbl) หน่วยฟุต (ft) ในงานด้านน้ำบาดาลจะคุ้นเคยกับหน่วยเมตริก (Metric Unit) เช่นหน่วยแกลลอนต่อนาที (gallon per minute: gpm) หน่วยเมตร (m) เป็นต้น อย่างไรก็ตามจะมีสูตรแปลงหน่วยจาก Oilfield Unit เป็น Metric Unit โดยใช้สูตรของโปรแกรม Excel ตามรูปที่ 4-22 และรูปที่ 4-23 (ที่มา: http://www.drillingformulas.com/calculate-inner-capacity-of-open-holeinside-cylindrical-objects/)

เวลาหน่วงของน้ำโคลน (lag time) จะเปลี่ยนแปลงเสมอเมื่อหลุมเจาะลึกขึ้น หรือความเร็วของปั๊มน้ำโคลน (pumping speed) เปลี่ยนแปลงไปอันเนื่องมาจาก 2 ปัจจัยซึ่งนั้นก็คือปริมาตรของน้ำโคลนในหลุมเจาะ (annular volume) และอัตราการไหลของน้ำโคลน (drilling mud flow rate)

ที่ปริมาตรของน้ำโคลนในช่องว่างของหลุมเจาะ (annular volume) ที่แน่นอน เวลาหน่วงของน้ำโคลน (lag time) ที่แสดงเป็นนาทีสามารถคำนวณหาได้ง่ายๆ จากการนำปริมาตรของน้ำโคลนในช่องว่างของหลุมเจาะ (บาร์เรล) มาหารด้วยอัตราการไหลของน้ำโคลน (บาร์เรลต่อนาที) ในกรณีที่ต้องเจาะบ่อลึกมากๆ หลุมเจาะหลุมเดียวกันจะถูกเจาะด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางหลายขนาด (reducing hole diameter drilling) ทั้งนี้เพื่อให้แรงดันปั๊มน้ำโคลนสามารถพาน้ำคลนหมุนเวียนและพาตัวอย่างดิน-หินขึ้นสู่ปากบ่อได้อย่างมีประสิทธิภาพ เวลาหน่วงของน้ำโคลน (lag time) จะต้องแบ่งคำนวณเป็นช่วงไปแล้วจึงเอาเวลามารวมกัน จึงจะเป็นเวลาที่แท้จริงของเวลาหน่วงของน้ำโคลน (lag time) ณ ความลึกนั้นๆ รูปที่ 4-24 แสดงลักษณะของความแตกต่างของปริมาตรของเหลวในหลุมเจาะ (annular volume) ที่จัดแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ช่วงบน ช่วงกลาง และช่วงล่าง ดังนั้นการคำนวณเวลาหน่วงของน้ำโคลนต้องคำนวณแยกส่วนกัน แล้วเอาผลลัพธ์มารวมกัน

(ที่มา: https://www.drillingmanual.com/2020/09/drilling-lag-time-calculations-calculator.html)

Lag Time Calculation

Oilfield

Pump speed	300	GPM
Pump Output	0.102	bbl/stroke
Annular Volume	250	bbl
Lag time in minutes	35	minutes
Lag time in strokes	2451	strokes

Metric

Pump speed	1200	litre/min
Pump Output	0.01622	m3/stroke
Annular Volume	40	m3
Lag time in minutes	33.3	minutes
Lag time in strokes	2466	strokes

รูปที่ 4-22 แสดงตาราง excel ที่สามารถแปลงหน่วยจาก Oilfield Unit เป็น Metric Unit ของ Pump speed Pump Output Annular Volume และ Lag Time
(ที่มา: www.drillingformulas.com)

Pump output

Oilfield Unit

Triplex Pump, bbl/stk

efficiency (%)	97	
Liner diameter	6	in
Stroke length	12	in
Pump Output	0.10183	bbl/stk

Duplex Pump , bbl/stk

efficiency (%)	85	
Liner diameter (in)	6	in
Rod diameter (in)	2	in
Stroke length (in)	12	in
PO (bbl/stk)	0.11236	bbl/stk

Metric Unit

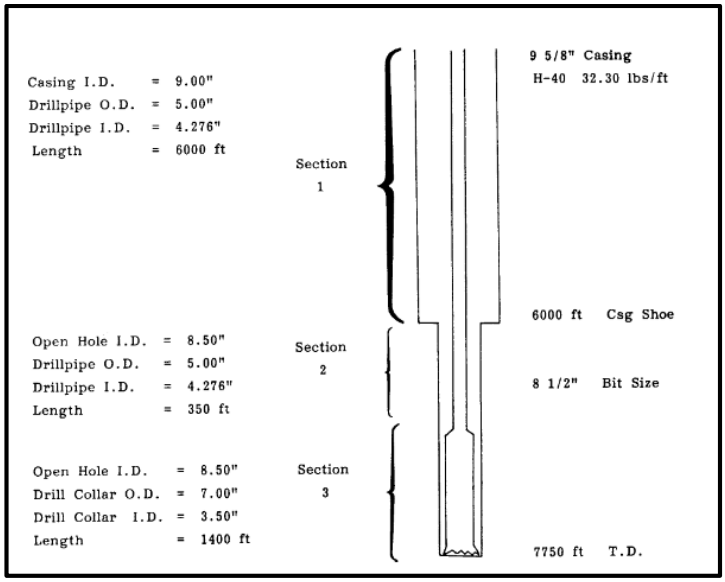
Triplex Pump, cubic metre/stk

efficiency (%)	97	
Liner diameter	152.4	mm
Stroke length	304.8	mm
Pump Output	0.016189	m3/stk

Duplex Pump , cubic metre/stk

efficiency (%)	85	
Liner diameter	152.4	mm
Rod diameter	50.8	mm
Stroke length	304.8	mm
PO (bbl/stk)	0.01786	m3/stk

รูปที่ 4-23 แสดงตาราง excel ที่สามารถแปลงหน่วยจาก Oilfield Unit เป็น Metric Unit ของ Triplex Pump Output, Duplex Pump Output และ parameters ที่เกี่ยวข้อง (ที่มา: www.drillingformulas.com)



รูปที่ 4-24 แสดงลักษณะของความแตกต่างของปริมาตรของเหลวในหลุมเจาะ (annular volume) ที่จัดแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ช่วงบนซึ่งเป็นช่วงเส้นผ่านศูนย์กลางหลุมเจาะมากที่สุด ช่วงกลางซึ่งเป็นช่วงเส้นผ่านศูนย์กลางหลุมเจาะถูกลดขนาดลงมา (reducing section of borehole) และช่วงล่างซึ่งเป็นช่วงที่มีท่อถ่วง (drill collar section) การคำนวณ lag time ต้องแยกส่วนกันแล้วเอาผลลัพธ์มารวมกัน

4.3 การเจาะแบบเก็บแท่งตัวอย่าง (Core Samples Drilling)

การเจาะแบบเก็บแท่งตัวอย่าง ใช้หลักการเดียวกับการเจาะแบบหมุน กล่าวคือใช้น้ำโคลนเจาะในการหล่อลื่นและลดความร้อนของหัวเจาะ แต่น้ำโคลนเจาะไม่ได้มีหน้าที่นำตัวอย่างขึ้นมาสู่ปากบ่อ ส่วนประกอบหลักของชุดเก็บตัวอย่างจะได้แก่ หัวเจาะแบบเพชรซึ่งเป็นหัวเจาะแบบวงแหวน ทำด้วยทังสเตนคาร์ไบด์ แล้วฝังด้วยเพชร ซึ่งจะเป็นเพชรเกรดอุตสาหกรรม ซึ่งมีความแข็งมาก บริเวณรอบ ๆ หน้าวงแหวน ซึ่งจะทำหน้าที่กัดชั้นหิน ภายในก้านนำเจาะจะมีอุปกรณ์เก็บตัวอย่างแท่งหินเรียกว่ากระบอกเก็บตัวอย่างแท่งหิน (core barrel) ซึ่งความยาวมาตรฐานจะอยู่ที่ 1.5 เมตร ปลายด้านหนึ่งของ core barrel ในส่วนที่ติดกับปลายด้านหัวเจาะ จะถูกติดตั้งอุปกรณ์วงแหวนบาง ๆ เป็นหยักอยู่ภายใน core barrel อุปกรณ์นี้เรียกว่าชุดยกตัวอย่างแท่งหินหรือชุดยึดจับตัวอย่างแท่งหิน (core lifter หรือ core catcher) มีหน้าที่จับยึดแท่งตัวอย่างหินไม่ให้หลุดจาก core barrel ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งของ core barrel จะติดตั้งด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า pulling neck ที่มีลักษณะคอดตรงโคน แล้วมีปลายเรียวแหลม คล้ายตัวโคนหรือขุนของหมากรุกไทย (ผู้เขียน) ตัวอย่างแท่งหินที่ถูกหัวเจาะกัดจะเข้าสู่กระบอกเก็บแท่งตัวอย่าง ช่างเจาะจะวัดระยะบนก้านเจาะก่อนทุกครั้งด้วยตลับเมตร ที่ความยาว 1.5 เมตร แล้วจะทำเครื่องหมายไว้ เมื่อก้านเจาะเลื่อนลงเรื่อยๆ จนถึงความลึกทุก ๆ 1.5 เมตร ที่กำหนดระยะไว้ แท่งตัวอย่างก็จะเต็มกระบอกเก็บตัวอย่างพอดี ช่างเจาะก็จะหย่อนลวดสลิงที่ส่วนปลายติดตั้งด้วยหัวตกกระบอก (overshot fishing tool) ลงไปสู่ก้นบ่อ เมื่อถึงส่วนต้นของ core barrel หัว overshot ก็จะสวมเข้าได้พอดีกับหัว pulling neck และช่างเจาะก็จะดึง core barrel ขึ้นสู่ปากบ่อ แล้วเก็บแท่งหินตัวอย่างแล้วบรรจุลงในลังสำหรับเก็บตัวอย่าง โดยจะทำการวัดขนาดของแท่งตัวอย่างที่เก็บได้ ว่ามีความยาวเต็ม 1.5 เมตรหรือไม่ core barrel จะถูกทิ้งลงสู่ก้นบ่ออีกครั้ง เพื่อเจาะต่อไป ครั้งละ 1.5 เมตร ไปเรื่อย ๆ จนถึงความลึกที่กำหนด รูปที่ 4-25 แสดงองค์ประกอบของอุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบแท่งหิน ขนาดของแท่งตัวอย่างหินตามมาตรฐานการเจาะมีหลายขนาด ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการเก็บตัวอย่างและขนาดของหัวเจาะ รูปที่ 4-26 แสดงขนาดของแท่งตัวอย่างหินและขนาดหัวเจาะ ก้านเจาะ

(a) Core barrel

(b) Core lifter / Core catcher

(c) Pulling neck

(d) Overshot fishing tool

รูปที่ 4-25 แสดงอุปกรณ์ชุดเก็บตัวอย่างแท่งหิน (a) Core barrel (b) Core lifter/Core catcher (c) Pulling neck และ (d) Overshot fishing tool

CORE BARRELS						
Series	AQ	BQ	NQ	HQ	PQ	SQ
Hole diameter (mm)	48	60	75,8	96	122,6	146
Core diameter (mm)	27	36,5	47,6	63,5	85	102
DRILL RODS						
Series	AQ	BQ	NQ	HQ	PQ	SQ
Ext diam (mm)	44,5	55,6	69,9	88,9	114,3	139,7
Int diam (mm)	34,9	46	60,3	77,8	103,2	125,4
Weight (kg/m)	4,7	6	7,8	11,5	17,4	24,3
CASINGS						
Series	AW	BW	NW	HW	PW	SW
Ext diam (mm)	57,1	73	88,9	114,3	139,7	168,3
Int diam (mm)	48,4	60,3	76,2	101,6	127	152,4
Weight (kg/m)	5,7	10,4	12,8	16,8	21,4	31

รูปที่ 4-26 แสดงขนาดของแท่งตัวอย่างหิน (ที่มา https://indonesian.alibaba.com/)

4.4 การเจาะแบบลดขนาด (reducing borehole diameter drilling)

การเจาะแบบลดขนาดหมายถึงการเจาะที่ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลุมเจาะลง มักจะใช้วิธีนี้กับบ่อที่ต้องเจาะลึกมาก ๆ ทั้งนี้เนื่องจากที่ความลึกมาก ๆ แรงดันน้ำโคลนอาจมีไม่มากพอที่จะนำเศษดิน-หินที่เกิดจากการเจาะขึ้นสู่ปากบ่อ วิธีการที่จะเพิ่มความสามารถในการพา cuttings ขึ้นสู่ปากบ่อได้แก่การลดขนาดช่องว่างระหว่างผนังบ่อกับก้านเจาะ (annulus) ลง ซึ่งอาจจะลดช่วงเดียวหรือลดหลายช่วงก็ได้ วิธีการที่นิยมปฏิบัติกันได้แก่

1) เจาะเปิดหน้าดินด้วยหัวเจาะขนาดใหญ่ลงไปประมาณ 6-10 เมตร (ขึ้นอยู่กับความร่วนซุยของดินบน) แล้วลงท่อกันพัง (surface casing) ลงไป
2) เจาะต่อด้วยหัวเจาะที่เล็กลงไปจนถึงความลึกระดับหนึ่งซึ่งแรงดันน้ำโคลนเริ่มลดลงจนเกือบจะพาเศษดิน-หินขึ้นสู่ปากบ่อได้โดยการสังเกตุ ก็ถอนก้านเจาะและหัวเจาะขึ้น
3) เทปูนซีเมนต์ที่ไม่ผสมหินหรือทรายลงไปในหลุมเจาะให้เต็ม ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงเพื่อให้ปูนแข็งตัว
4) เจาะด้วยหัวเจาะที่เล็กลงผ่านปูนซีเมนต์ลงไปจนถึงความลึกที่เทซีเมนต์ไว้ แล้วเจาะต่อไปจนพบชั้นน้ำบาดาล หยั่งธรณีฟิสิกส์หลุมเจาะ แล้วจึงก่อสร้างบ่อน้ำบาดาลตามขั้นตอน

บทที่ 5

การวิเคราะห์ตัวอย่างดิน-หินจากหลุมเจาะ และการหยั่งธรณีฟิสิกส์หลุมเจาะ (Samples Examination and Geophysical Borehole Logging)

5.1 การวิเคราะห์ตัวอย่างดินหินจากหลุมเจาะ (samples examination)

ตัวอย่างดิน-หินจากหลุมเจาะ ไม่ว่าจะเป็นหลุมเจาะเพื่อสำรวจสภาพธรณีวิทยา หลุมเจาะเพื่อสำรวจปิโตรเลียม หรือหลุมเจาะสำรวจหรือเพื่อพัฒนาเป็นบ่อน้ำบาดาล จัดว่าเป็นข้อมูลที่สำคัญมากและมีความจำเป็นที่จะต้องบันทึกรายละเอียดลักษณะเนื้อหิน (lithologic logging) และส่วนใหญ่มักจะดำเนินการโดยนักธรณีวิทยา หรือนักวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ วิศวกรเหมืองแร่ที่มีประสบการณ์มากพอสมควร ในด้านงานวิเคราะห์ตรวจสอบและวินิจฉัยและบรรยายลักษณะเนื้อหินและลักษณะเด่น ๆ ของตัวอย่างดิน-หินจากหลุมเจาะได้โดยใช้ศัพท์ทางวิชาการเฉพาะทาง (technical terms) ความละเอียดของการบันทึกข้อมูลลักษณะนี้ บางครั้งขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน เช่นหากเป็นบ่อสำรวจปิโตรเลียมหรือเชื้อเพลิงธรรมชาติอื่นๆ นักธรณีวิทยา นอกจากจะต้องบรรยายลักษณะทั่วไปของดิน-หิน ที่ได้มาแล้ว ยังต้องตรวจสอบถึงร่องรอยของสารไฮโดรคาร์บอน (trace of hydrocarbon) ซึ่งอาจเคลือบอยู่บนผิวตัวอย่างอีกด้วย ทั้งนี้การมีหรือไม่มีร่องรอยของ hydrocarbon จะบอกถึงสภาวะการสะสมตัว หรือการไหลเข้ามากักเก็บของปิโตรเลียม ซึ่งจะช่วยให้คาดคะเนถึงความลึกที่อาจเจาะพบปิโตรเลียม หรือหากเป็นการเจาะเพื่อพัฒนาน้ำบาดาล อาจไม่มีความจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบร่องรอยลักษณะดังกล่าว อย่างไรก็ตาม สำหรับผู้เขียนแล้ว เห็นว่าการบันทึกทุกอย่างที่เห็นซึ่งนอกจากลักษณะทางเนื้อหินแล้ว ลักษณะเด่นต่างๆ ควรจะบันทึกไว้ให้หมด เช่นลักษณะคราบสีต่างๆ เช่นสีเหลืองอมน้ำตาล สีน้ำตาลเข้ม หรือสีเทาที่เกิดเคลือบ (stained) อยู่บนผิวของดิน-หิน อาจบ่งบอกถึงสภาวะการขึ้น-ลงของระดับน้ำบาดาล (fluctuation of water table) ได้ หรือสิ่งแวดล้อมของการสะสมตัวได้เช่นกัน

นอกจากนั้นการบรรยายลักษณะเนื้อหินของหลุมเจาะจะเป็นตัวแทนของลักษณะทางธรณีวิทยาของหลุมเจาะนั้น ๆ หากมีหลุมเจาะหลาย ๆ บ่ออยู่ในบริเวณเดียวกัน ข้อมูลเหล่านี้จะช่วยให้นักธรณีวิทยาสามารถสร้างภาพตัดขวางทางธรณีวิทยา (geologic cross section) ได้ง่ายขึ้นและแม่นยำขึ้นโดยใช้หลักการเชื่อมโยงลักษณะเนื้อหินตามแนวระนาบ (horizontal correlation) โดยใช้หลักการทางธรณีวิทยา และหากข้อมูลจากหลุมเจาะมีมากพอ นักธรณีวิทยายังสามารถสร้างความสัมพันธ์แบบสามมิติหรือที่เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าไดอะแกรมรูปรั้ว (fence diagram) ซึ่งอาจสร้างโดยใช้การลากเชื่อมโยงโดยมือหรือใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งในปัจจุบันนี้ โปรแกรมที่นิยมใช้ ในหมู่นักธรณีวิทยาคือโปรแกรม Rockwork อย่างไรก็ตาม ความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของภาพตัดขวางทางธรณีวิทยา หรือ fence diagram ย่อมขึ้นอยู่กับความละเอียดของการวิเคราะห์ ตรวจสอบ และเขียนคำบรรยายลักษณะเศษดิน-หิน ที่ขึ้นมาจากหลุมเจาะรวมไปถึงจำนวนหลุมเจาะที่นำข้อมูลมาประมวลร่วมกันอีกด้วย

การตรวจสอบ วิเคราะห์ตัวอย่างดิน-หินจากหลุมเจาะ จะถูกใช้ประมวลผลร่วมกับกับข้อมูลการสำรวจและตรวจสอบชนิดดิน-หินในหลุมเจาะโดยวิธีการที่เรียกว่าหยั่งธรณีฟิสิกส์หลุมเจาะ (geophysical borehole logging) ข้อมูลเกี่ยวกับการไหลเวียนของน้ำโคลน (mud circulation) เช่นการสูญหายของน้ำโคลน (loss of mud circulation) การเพิ่มของน้ำโคลน (excess of mud circulation) ข้อมูลเกี่ยวกับอัตราความเร็วการเจาะทะลวง (Rate of Penetration; ROP) ในการออกแบบก่อสร้างบ่อน้ำบาดาล (casing program for well construction design) ซึ่งอาจเป็นการออกแบบเพื่อก่อสร้างบ่อผลิตหรือบ่อสังเกตการณ์ก็ได้

จากประสบการณ์การทำงาน ร่วม 30 ปีเกี่ยวกับการวิเคราะห์ดิน-หินตัวอย่าง เริ่มตั้งแต่การเป็นนักศึกษาฝึกงานที่เหมืองถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ จังหวัดลำปาง นักธรณีวิทยาประจำโครงการชลประทานจังหวัด

พิจิตร นักธรณีวิทยาประจำกองน้ำบาดาล กรมทรัพยากรธรณี รวมถึงการได้มีโอกาสทำงานร่วมกับนักธรณีวิทยาชาวต่างชาติ หลาย ๆ โครงการ จึงทำให้ผู้เขียนมีองค์ความรู้ในงานด้านนี้พอสมควร และคิดว่าควรจะนำองค์ความรู้ที่มีอยู่มาถ่ายทอดให้กับผู้ที่ต้องรับผิดชอบงานในด้านนี้ เอกสารอ้างอิงหลักในการเขียนคู่มือเล่มนี้ ได้แก่ Sample Examination Manual เขียนโดย R.G. Swanson แห่งศูนย์ฝึกอบรม Shell Oil Exploration Training นอกเหนือจากนั้นจะเป็นสิ่งที่ผู้เขียนได้มาจากการเก็บเกี่ยวเพื่อสร้างสรรค์ประสบการณ์ในการทำงานและการศึกษาค้นคว้าเพื่อความเข้าใจที่ถูกต้องด้วยตัวของผู้เขียนเอง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นความเข้าใจในหลักการของการใช้คำบรรยายเป็นภาษาอังกฤษซึ่งในคู่มือเล่มนี้ ผู้เขียนขออนุญาตใช้คำในวงเล็บเป็นภาษาอังกฤษบ่อยครั้ง ทั้งนี้เพื่อให้ผู้อ่านเกิดความคุ้นเคยกับศัพท์ทางเทคนิค (technical terms) ซึ่งหากต้องทำงานด้านนี้ต่อไป จะสามารถเลือกคำต่างๆ เหล่านั้นมาใช้ได้อย่างไม่ต้องลังเลใจ ข้อสำคัญอีกประการหนึ่งคือผู้เขียนขออนุญาตไม่กล่าวถึงการกำเนิดแร่และหิน (Mineralization and Petrogenesis) และส่วนประกอบของหินแต่ละชนิด เพราะคิดว่านักธรณีวิทยาทุกคนได้เรียนมาแล้วจากมหาวิทยาลัย สำหรับผู้ที่ไม่ได้เรียนมาก่อน ก็สามารถค้นคว้าได้จากตำราทางวิชาการต่างๆ ทั้งของไทย และต่างประเทศ เช่น หนังสือเกี่ยวกับหินและแร่ (Rocks and Minerals) หรือหนังสือเกี่ยวกับวิชาแร่วิทยา (Mineralogy) ต่างๆ

5.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ดินหินตัวอย่าง (lithologic logging equipment)

การตรวจสอบวิเคราะห์ตัวอย่างดิน-หินตัวอย่าง จะดำเนินการโดยนักธรณีวิทยาที่ได้รับมอบหมาย นักธรณีวิทยาที่เริ่มทำงานใหม่ๆ ในด้านการเจาะบ่อน้ำบาดาล หรือบ่อน้ำมัน มักจะถูกมอบหมายให้ทำหน้าที่นี้ (sample logger) ผู้เขียนเอง ตอนเริ่มต้นทำงานที่กองน้ำบาดาล กรมทรัพยากรธรณี ในปีแรก ๆ ก็ถูกมอบหมายให้ทำหน้าที่วิเคราะห์ตัวอย่างดินหินจากหลุมเจาะน้ำบาดาล และทำงานด้านนี้ต่อเนื่องกันมาหลายปี ในตอนนั้นผู้เขียนได้รับการถ่ายทอดความรู้จากนักธรณีวิทยา รุ่นพี่หลายท่าน และรุ่นพี่เหล่านั้น ก็ได้สอนให้ผู้เขียนรู้ว่าอุปกรณ์ที่จำเป็นในการ log sample มีอะไรบ้าง ซึ่งมีรายการดังต่อไปนี้

1. แว่นขยาย (Hand lens or magnifier glass)

บางครั้งนักธรณีวิทยาอาจสามารถบ่งบอกชื่อของหินได้อย่างถูกต้องด้วยตาเปล่า แต่หากจะให้มองเห็นถึงชนิดของแร่ประกอบหิน ลักษณะเนื้อหิน (texture) ขนาดของผลึก หรือเม็ดตะกอน นั้น ต้องใช้แว่นขยาย (magnifier glass) ซึ่งจะทำหน้าที่ขยายภาพของตัวอย่างดิน-หิน ให้เห็นชัดเจนขึ้น รูปที่ 5-1 แสดงให้เห็นถึงแว่นขยายที่นิยมใช้กัน ซึ่งแบบ (a) จะนิยมใช้ในการดูตัวอย่างหินในภาคสนาม และเป็นที่นิยมของเซียนดูพระ แบบ (b) นิยมใช้ในห้องปฏิบัติการ หมอดูลายมือก็นิยมใช้เช่นกัน

(a)

(b)

รูปที่ 5-1 แสดงตัวอย่างของแว่นขยาย (a) แบบพกพาในสนาม และ (b) แบบที่ใช้ประจำห้องปฏิบัติการ

2. แผ่นเทียบสี (rock colour chart)

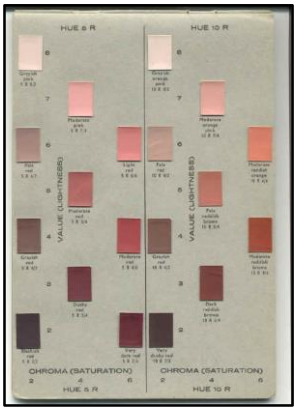
มนุษย์แต่ละคนจะมีความสามารถในการจำแนกสีที่ต่างกัน ดังนั้นเพื่อให้การบอกสีในการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน-หินที่แม่นยำ ผู้ปฏิบัติงานควรใช้แผ่นเทียบสีในการให้คำบรรยายโดยนำเอาตัวอย่างที่เก็บจากหลุมเจาะ มาเทียบกับแผ่นเทียบสี (rock colour chart) แล้วจึงเขียนไปในคำบรรยาย แผ่นเทียบสีจะบอกสีตามมาตรฐานโดยใช้รหัสสีหลัก ดังนี้ R (Red) หมายถึงโทนสีแดง Y (Yellow) หมายถึงโทนสีเหลือง G (Green) หมายถึงโทนสีเขียว B (Blue) หมายถึงโทนสีน้ำเงิน และ P (Purple) หมายถึงโทนสีม่วง และหากสีมีการก้ำกึ่งกันระหว่างสี 2 สี ก็จะเรียกสีรองก่อนแล้วตามด้วยสีหลัก ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อๆ ไป รูปที่ 5-2 แสดงตัวอย่างของแผ่นเทียบสีของโทนสีต่างๆ

3. แผ่นเทียบขนาดตะกอน (grain size comparator)

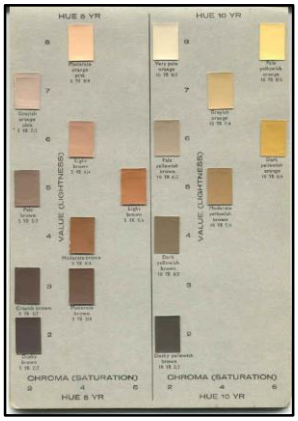
แผ่นเทียบขนาดตะกอนมีไว้เพื่อใช้เทียบตัวอย่างดิน-หิน กับแผ่นเทียบขนาดมาตรฐาน ซึ่งมีอยู่หลายรูปแบบ บางรูปแบบจะเป็นเช่นไม้บรรทัดมาตรฐานทั่วไป (a) แต่จะเป็นแผ่นใส เมื่อวางเทียบกับตัวอย่างแล้วจะเห็นได้ชัดเจนว่า ตัวอย่างมีขนาดเท่าไร บางแบบก็จะเป็นแผ่นใสกลม (b) ซึ่งมีรูปวงกลมสีขาวหรือดำ ขนาดต่างๆ ตามมาตรฐานการแบ่งขนาดตะกอนทางธรณีวิทยาอยู่ภายใน ซึ่งเมื่อนำไปวางทาบบนตัวอย่างดิน-หิน แล้ว จะเห็นได้ชัดเจนว่าตะกอนมีขนาดเท่าใด รูปที่ 5-3 แผ่นเทียบขนาดตะกอน (grain size comparator) แบบไม้บรรทัดมาตรฐานทั่วไป และแบบแผ่นใสวงกลม

4. แผ่นเทียบลักษณะและรูปร่างของตะกอน (texture comparator)

นอกจากจะบอกการคัดขนาดตะกอน (a) เช่น การคัดขนาดดี (well sorted) การคัดขนาดปานกลาง (moderately sorted) การคัดขนาดไม่ดี (poorly sorted) แล้ว ยังบอกขนาดตะกอนแบบสัมพัทธ์ เช่นละเอียด (fine) ปานกลางกลาง (medium) และขนาดหยาบ (coarse) และยังมีแบบที่ใช้เปรียบเทียบลักษณะความกลมมน (roundness) ของเม็ดตะกอน และบางแบบใช้เปรียบเทียบภาวะทรงกลม (sphericity) ของเม็ดตะกอน ซึ่งลักษณะและรูปร่างของตะกอน รวมถึงขนาดของตะกอน จะช่วยให้นักธรณีวิทยาสามารถแปลความหมายข้อมูลเกี่ยวกับระยะทางการพัดพาตะกอนมายังแหล่งสะสมตัว และสิ่งแวดล้อมของแหล่งสะสมตัวได้ รูปที่ 5-4 แสดงแผ่นเทียบลักษณะและรูปร่างของตะกอน (texture comparator) บอกขนาดแบบสัมพัทธ์และการคัดขนาด (a) และบอกความกลมมนภาวะทรงกลม (b)

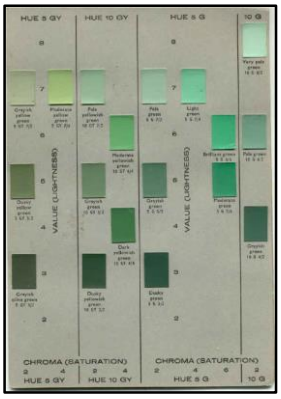


(a)

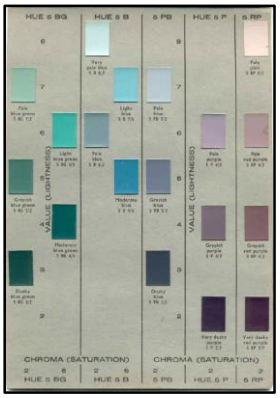


(b)

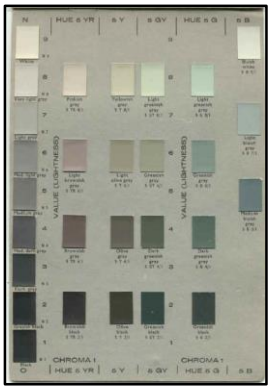
(c)



(d)



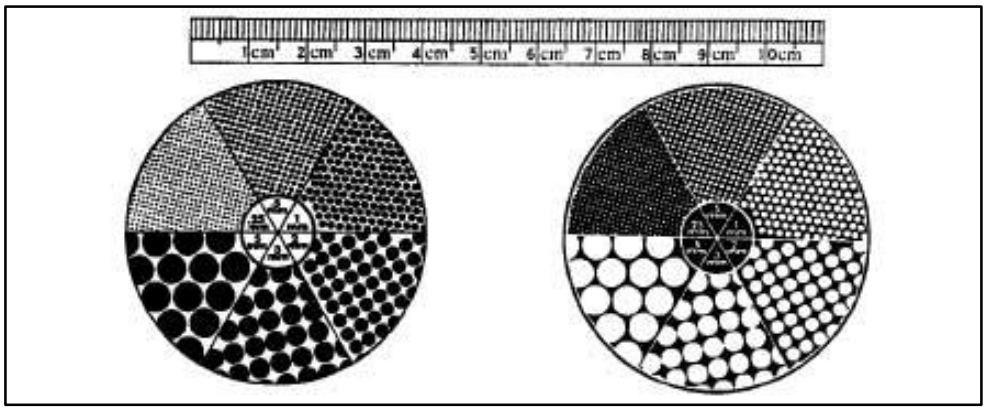
(e)



(f)

รูปที่ 5-2 แสดงแผ่นเทียบสีโทนสีต่างๆ (a) โทนสีแดง (b) โทนสีเหลืองแกมแดง (c) โทนสีเหลือง (d) โทนสีเขียว (e) โทนสีน้ำเงิน และน้ำเงินปนม่วง และ (f) โทนสีเขียวปนเหลือง

(a)

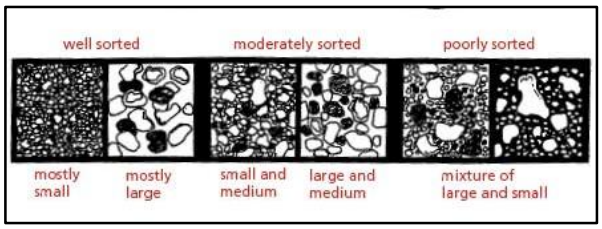


(b)

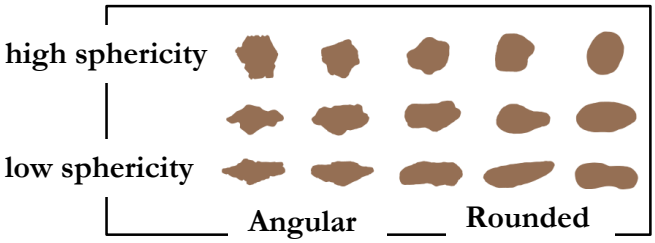
รูปที่ 5-3 แผ่นเทียบขนาดตะกอน (grain size comparator) แบบไม้บรรทัดมาตรฐานทั่วไป (a) และแบบแผ่นใสวงกลม (b)

5. มีดพับ (pen knife)

มีดพับได้ใช้ประโยชน์หลายอย่างในการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน-หิน ประโยชน์ข้อแรกคือใช้ตัดปากถุงเก็บตัวอย่าง เพื่อนำตัวอย่างออกมาวิเคราะห์ ประโยชน์ข้อ 2 คือ ใช้เป็นมาตรวัดความแข็งของแร่ประกอบหิน (Mohs' Scale of Hardness) ในตัวอย่าง กล่าวคือใบมีดของมีดพับจะมีความแข็งเท่ากับ 5.5 เล็บมือมีความแข็งเท่ากับ 2.5 เหรียญกษาปณ์มีความแข็งเท่ากับ 3.5 ปลายตะปูเหล็กกล้ามีความแข็งเท่ากับ 6.5 กระจกมีความแข็งเท่ากับ 5.5 และตะไบเหล็กมีความแข็งเท่ากับ 6.5 สว่านเจาะนังปูนมีความแข็งเท่ากับ 8.5 เป็นต้น รูปที่ 5-5 แสดงมีดพับแบบเอนกประสงค์ (multi-purposes pen knife) ที่เป็นที่นิยมใช้



(a)



(b)

รูปที่ 5-4 แผ่นเทียบลักษณะและรูปร่างของตะกอน (texture comparator) บอกขนาดแบบสัมพัทธ์และการคัดขนาด (a) และบอกความกลมมนภาวะทรงกลม (b)

รูปที่ 5-5 แสดงมีดพับแบบอเนกประสงค์ (multi-purposes pen knife) ที่เป็นที่นิยมใช้

6. แผ่นกระเบื้องไม่เคลือบ (streak plate)

Streak ในทางแร่วิทยาหมายถึงสีผงละเอียดของแร่ (colour of mineral powder) นักธรณีวิทยามักใช้แผ่นกระเบื้องที่ยังไม่ได้เคลือบ ซึ่งมีความแข็ง 6.5 ตาม Mohs Scale of Hardness เป็นตัวช่วยในการระบุชนิดของแร่ โดยการนำผลึกแร่หรือหินมาขูดบนแผ่นกระเบื้องที่ยังไม่ได้เคลือบ ผงที่เกิดจากการขูดบนกระเบื้องจะช่วยให้นักธรณีวิทยาระบุชื่อแร่ได้ เนื่องจากว่าแร่แต่ละชนิดจะให้สีผงละเอียดที่ไม่เหมือนกัน เช่น แร่ฮีมาไทต์จะให้สีผงละเอียดเป็นสีแดง แร่กาลีนาจะให้สีผงละเอียดเป็นสีเทา หรือแร่ฟลูออไรต์มีสีผงละเอียดเป็นสีขาว แต่ในบางครั้ง อาจให้สีผงเป็นสีเหลือง ม่วง หรือน้ำเงินได้เช่นกัน บางครั้งหากหาแผ่นกระเบื้องไม่เคลือบไม่ได้ ก็สามารถใช้ก้นชามก๋วยเตี๋ยวที่ทำจาก ceramic หรือ porcelain ทดแทนได้เช่นกัน (ผู้เขียน) รูปที่ 5-6 แสดงตัวอย่างของแผ่นกระเบื้องที่ใช้ทดสอบสีผงละเอียด (streak) ของแร่

รูปที่ 5-6 แสดงตัวอย่างของแผ่นกระเบื้องหรือก้นชามกระเบื้องที่ใช้ทดสอบสีผงละเอียด (Streak) ของแร่

7. แผ่นกระจกนาฬิกา (watch glass) กรดเจือจาง (diluted acid) และ อุปกรณ์ดูดของเหลว (dropper)

อุปกรณ์ชุดนี้จะต้องมาพร้อมกันเสมอ แผ่นกระจกนาฬิกา มีไว้เพื่อรองรับตัวอย่างที่ต้องการทดสอบหาส่วนประกอบทางแร่ กรดเจือจาง อาจเป็นกรดเกลือ (HCl) หรือกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ก็ได้ สำหรับ dropper นั้นมีไว้สำหรับดูดกรดขึ้นมาจากขวดกรด ส่วนใหญ่อุปกรณ์ชุดนี้จะมีไว้เพื่อทดสอบว่าดิน-หินตัวอย่างนั้น มีส่วนประกอบหรือสารเชื่อมประสานเป็น แคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งได้แก่ แร่แคลไซต์ และโดโลไมต์ หรือไม่ เพื่อง่ายต่อการระบุ (identify) ชนิดแร่ รูปที่ 5-7 แสดงชุดอุปกรณ์ตรวจสอบส่วนประกอบหรือสารเชื่อมประสานของเม็ดแร่ โดยเฉพาะแร่ที่มีส่วนประกอบเป็นคาร์บอเนต สมัยก่อนผู้เขียนมักจะใช้ขวดยาหยอดตาเก่าไปใส่กรดที่ให้ฝ่ายวิเคราะห์น้ำบาดาลเตรียมให้ ก็ค่อนข้างจะสะดวกเช่นกัน

(a)

(b)

(c)

รูปที่ 5-7 แสดงชุดอุปกรณ์ตรวจสอบส่วนประกอบหรือสารเชื่อมประสานของเม็ดแร่ โดยเฉพาะแร่ที่มีส่วนประกอบเป็นคาร์บอเนต (a) กระจกแก้วนาฬิกา (b) กรดเจือจาง และ (c) อุปกรณ์ดูดของเหลว

8. ใบพายและถาดแยก (spatula with tray)

อุปกรณ์ชุดนี้ อาจไม่มีความจำเป็นมากนัก แต่หากมีไว้ก็จะอำนวยความสะดวกในการแยกและเกลี่ยตัวอย่างให้ออกจากกัน ทำให้ตรวจสอบตัวอย่างได้ง่ายขึ้นและเวลาเทตัวอย่างกลับใส่ถุงก็จะทำได้ง่ายและรวดเร็ว โดยแท้ที่จริงแล้วอุปกรณ์ชุดนี้เป็นอุปกรณ์สำหรับนับยาเม็ดตามร้านขายยาทั่วไป แต่ผู้เขียนใช้อุปกรณ์ชุดนี้ในการวิเคราะห์ดิน-หิน ตัวอย่างด้วย รูปที่ 5-8 ชุดอุปกรณ์ใบพายพร้อมถาด (spatula with tray)

รูปที่ 5-8 ชุดอุปกรณ์ใบพาย พร้อมถาด (Spatula with tray)

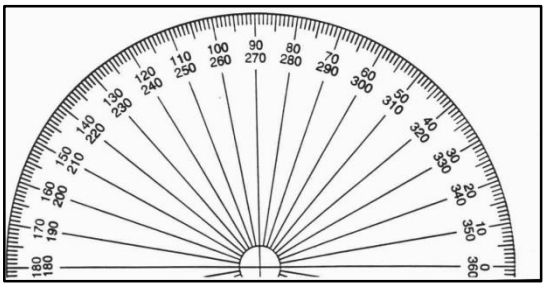
9. กล้องจุลทัศน์แบบมอง 2 ตา (binoculars stereo microscope)

ในกรณีที่ไม่สามารถจำแนกแร่ประกอบหินได้จากการใช้แว่นขยายกำลังต่ำและวิธีการทดสอบอื่น อาจมีความจำเป็นต้องดูตัวอย่างดิน-หิน หรือแร่ประกอบหินให้ชัดเจนโดยใช้กล้องจุลทัศน์แบบมอง 2 ตา (binoculars stereo microscope) ซึ่งกล้องจุลทัศน์แบบนี้ ยังสามารถใช้วิเคราะห์ตัวอย่างแบบแผ่นหินบาง (thin section) ได้อีกด้วย รูปที่ 5-9 แสดงกล้องจุลทัศน์แบบมอง 2 ตา (binoculars stereo microscope)

รูปที่ 5-9 แสดงกล้องจุลทัศน์แบบมอง 2 ตา (binoculars stereo microscope)

10. ไม้วัดมุมองศา (180° Protractor)

ไม้วัดมุมองศานี้เป็นอุปกรณ์มีไว้สำหรับการวัดมุมเอียงของชั้นหิน (bedding plane) มุมเอียงของแถบหิน (lamination) มุมเอียงของแนวแตก (fracture) รวมถึงมุมเอียงของชั้นรอยต่อระหว่างชั้นหิน (contact to lower unit) มักใช้กับมุมเอียงของรอยแตกต่าง ๆ กับตัวอย่างที่เป็นแท่งหิน (core sample) รูปที่ 5-10 แสดงไม้วัดมุมองศา (180° Protractor) ซึ่งเป็นอุปกรณ์หนึ่งในการวิเคราะห์ดิน-หินตัวอย่าง



รูปที่ 5-10 แสดงไม้วัดมุมองศา (180° Protractor) ซึ่งเป็นอุปกรณ์หนึ่งในการวิเคราะห์ดิน-หินตัวอย่าง

11. ตลับเมตร (measuring tape)

ในการวิเคราะห์ตัวอย่างแบบแท่งหินตัวอย่าง (core sample) มีค่าอยู่ 2 ค่าที่ต้องหาคือค่าความยาวแท่งตัวอย่างที่สามารถเก็บได้ (core recovery) ต่อ 1 กระบอกเก็บแท่งหิน (core barrel) และค่า RQD (Rock Quality Designation) ซึ่งบ่งบอกถึงลักษณะการแตกของชั้นหินซึ่งจะเป็นค่าที่บ่งบอกถึงคุณภาพของหน่วยหินที่เจาะผ่าน รูปที่ 5-11 แสดงตลับเมตรที่ใช้วัดความยาวของแท่งตัวอย่าง

รูปที่ 5-11 แสดงตลับเมตรที่ใช้วัดความยาวของแท่งตัวอย่าง

12. ลิ้น ฟัน จมูกกับไฟแช็ก (Tongue, tooth, nose, lighter, and finger tip)

หากไม่กล่าวถึงอุปกรณ์ทางกายทั้ง 3 อย่างนี้ คงจะไม่ได้เพราะถึงแม้จะไม่นับเป็นอุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์แต่นักธรณีวิทยาก็ใช้ในการวินิจฉัยชนิดหินได้เช่นกัน เช่นใช้ในการจำแนกหิน 2 ชนิดออกจากกัน ยกตัวอย่างเช่น หินทรายแป้งกับหินดินดานซึ่งจำแนกออกจากกันค่อนข้างยาก แต่หากเอามาถูกับฟันแล้ว หินดินดานจะลื่นไปตามการถู แต่หินทรายแป้งจะมีความรู้สึกสะดุด เช่นกันกับการใช้ลิ้นในการจำแนกแร่ Sylvite กับแร่ Carnallite ซึ่งเป็นแร่โพแทช ทั้งคู่ แร่ Sylvite จะให้รสขม ส่วนแร่ Carnallite เมื่อสัมผัสลิ้นแล้วจะรู้สึกเหมือนว่าลิ้นถูกไฟฟ้าอ่อน ๆ ดูด (Sparkling) หรือในกรณีที่สงสัยในประเภทของหินดินดานที่มีสีเข้ม เช่นเทาดำว่าจะเป็น oil shale หรือไม่ หากลองเอาไฟแช็กลนดูสักพัก แล้วดมกลิ่นดู หากเป็น oil shale จะได้กลิ่นคล้ายกับยางมะตอยร้อน ๆ หรือปลายนิ้วมือเมื่อสัมผัสหับแร่ talc จะให้ความรู้สึกว่าลื่นไถลได้ง่าย

13. แบบฟอร์มการบันทึกรายละเอียด (logging form)

เป็นแบบฟอร์มสำหรับบันทึกรายละเอียดและเขียนคำบรรยาย แต่ละหน่วยงานหรือองค์กร จะใช้แบบฟอร์มที่ไม่เหมือนกัน แล้วแต่วัตถุประสงค์ของงาน แต่ที่ต้องมีและขาดไม่ได้คือ ชื่อบ่อ (well number) สถานที่เจาะ (well location) พิกัดของบ่อ (well co-ordinate) ความลึกที่เจาะ (drilled depth) ความลึกที่พัฒนา (developed depth) ขนาดบ่อ (Well diameter) เจาะโดย (drilled by) ซึ่งอาจเป็นชื่อของหน่วยเจาะ ชื่อผู้บันทึกรายละเอียดตัวอย่างโดย (logged by) ทั้งนี้เพื่อสามารถติดตามตัวบุคคลได้กรณีเกิดข้อสงสัยในชนิดหิน หากเป็นบ่อน้ำบาดาล อาจต้องเพิ่มระยะท่อกรุ (blank casing) และระยะท่อกรอง (perforated casing) เข้าไปด้วย รูปที่ 5-12 แสดงตัวอย่างของแบบฟอร์มบันทึกรายละเอียดตัวอย่างจากหลุมเจาะ

Lithologic Log

Department of Groundwater Resources,
26 Soi Thanpuying Pahon, Lad Yao,
Chatuchak, Bangkok 10900

Project :

Well number : ..... UTM E : ..... UTM N : .....

Location : .....

Drilled depth: ..... Metre Developed depth :..... Metre Well diamiter : ..... In.

Blank casing : ..... Metre Perforated casing : ..... Metre

Drilled by : ..... Date completed : ..... Logged by : .....

Depth (m.)		Rock unit	Lthologicdescription	Remarks
From	To			

รูปที่ 5-12 แสดงตัวอย่างของแบบฟอร์มบันทึกรายละเอียดตัวอย่างจากหลุมเจาะ

5.1.2 อันดับของการเขียนบรรยายลักษณะดิน-หิน (order of description writing)

หลักการตามมาตรฐานสากลในการเขียนบรรยายลักษณะตัวอย่างดิน-หินจากหลุมเจาะสำรวจ หรือแม้กระทั่งการเขียนบรรยายตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นก้อน (hand specimen) ที่เก็บจากหินโผล่ (outcrop) หรือจุดที่เกิดจากการระเบิดหินหรือตามเหมืองหิน (quarry) ต่าง ๆ จะเป็นลักษณะเดียวกัน คือเริ่มต้นด้วยชื่อหิน (rock type) สีของหินหรือตัวอย่างดิน-หิน (colour) ตามด้วยลักษณะเนื้อหินซึ่งรวมไปถึงขนาดเม็ดแร่หรือเม็ดตะกอน การคัดขนาด ความกลมมน และภาวะทรงกลม (texture including grain size, sorting, roundness, and sphericity) แล้วจะตามด้วย ส่วนประกอบหลักของหิน (composition of rock) แล้วตามด้วยสารเชื่อมประสานหรือตะกอนขนาดเล็ก ๆ ที่ล้อมรอบด้วยตะกอนขนาดใหญ่กว่าในกรณีที่เป็นหินตะกอนหรือเนื้อมวลสารรองในหินอัคนี (cement and/or matrix materials) ในกรณีที่เก็บตัวอย่างเป็นแท่งหิน เราอาจมองเห็นโครงสร้างของชั้นตะกอน (sedimentary structures) เช่นชั้นเฉียงระดับ (cross-bedding) มุมเอียงเทของชั้นหิน (dip angle) ก็ต้องให้คำบรรยายไปด้วย หลังจากนั้นก็จะบอกอัตราของการผุพังและการบดแน่น (degree of weathering/compaction) แล้วตามด้วยค่าความยาวของแท่งตัวอย่างที่เก็บได้ต่อหนึ่งความยาวของกระบอกเก็บตัวอย่าง (core recovery) แล้วตามด้วยคุณภาพของหน่วยหินที่เจาะผ่าน (rock quality designation: RQD) สุดท้ายตามด้วยแนวสัมผัสที่มีต่อหน่วยหินหรือแท่งตัวอย่างหินกระบอกถัดไป (contact to lower unit)

(1) ชนิดหิน (rock type)

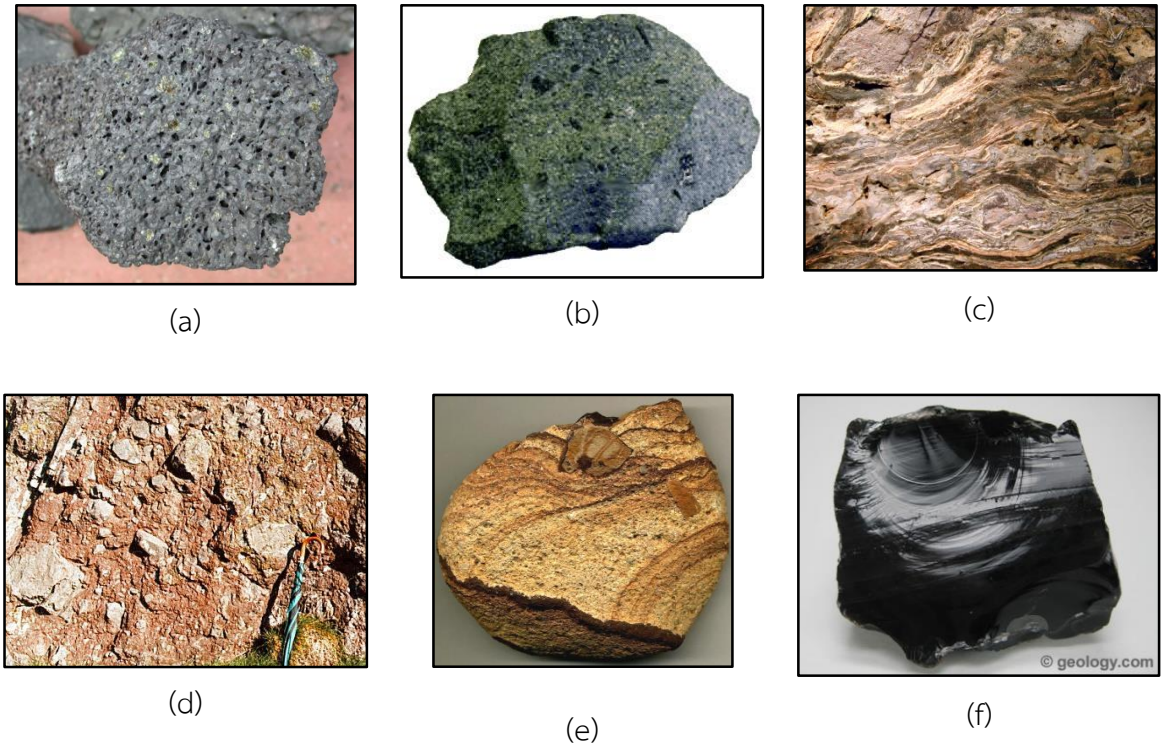
หน่วยหินหรือ rock type ต้องเป็นอันดับแรกเสมอในการเขียนคำบรรยายดิน-หินจากหลุมเจาะทั้งหลาย จะเขียนเป็นตัวอักษรตัวใหญ่ (capital letter) ทั้งคำหรือขึ้นต้นด้วยตัวอักษาตัวใหญ่แล้วตามด้วยตัวอักษรตัวเล็กก็ได้ หน่วยหินทางธรณีวิทยาจะจำแนกตามประเภทของหินคือหินอัคนี (igneous rock) หินตะกอน (sedimentary rock) และหินแปร (metamorphic rock) หินประเภทต่างๆ ที่พบในเมืองไทยมีดังนี้

<u>หินอัคนี (igneous rock)</u>

หินอัคนีที่พบในเมืองไทย มีอยู่ไม่กี่ประเภท ทั้งหินอัคนีที่เย็นตัวใต้เปลือกโลกหรือหินอัคนีแทรกซอน (intrusive igneous rock) และหินอัคนีที่เย็นตัวบนผิวโลกหรือหินอัคนีพุ (extrusive igneous rock) ตัวอย่างหินอัคนีที่เย็นตัวใต้เปลือกโลกที่พบในเมืองไทยได้แก่หินแกรนิต (granite) หินแกรโนไดโอไรต์ (granodiorite) หินเพกมาไทต์ (pegmatite) ดังรูปที่ 5.13

หินอัคนีที่เย็นตัวบนผิวโลกที่พบในประเทศไทย ได้แก่หินบะซอลต์ (basalt) หินแอนดีไซต์ (andesite) หินไรโอไลต์ (rhyolite) หินกรวดเหลี่ยมภูเขาไฟ (agglomerate or volcanic breccia) หินเถ้าภูเขาไฟ (tuff) และหินออบซิเดียน (obsidian) รูปที่ 5.14 แสดงตัวอย่างของหินอัคนีที่เย็นตัวใต้เปลือกโลกที่พบในประเทศไทย

รูปที่ 5-13 ตัวอย่างหินอัคนีที่เย็นตัวใต้เปลือกโลกที่พบในประเทศไทย (ซ้าย) หินแกรนิต (granite), (กลาง) หินแกรโนไดโอไรต์ (granodiorite), และ (ขวา) หินเพกมาไทต์ (pegmatite)



รูปที่ 5-14 แสดงตัวอย่างของหินอัคนีที่เย็นตัวบนผิวโลกที่พบในเมืองไทย (a) หินบะซอลต์ (basalt), (b) หินแอนดีไซต์ (andesite), (c) หินไรโอไลต์ (rhyolite), (d) หินกรวดเหลี่ยมภูเขาไฟ (agglomerate), (e) หินเถ้าภูเขาไฟ (tuff), และ (f) หินออบซิเดียน (obsidian)

<u>หินตะกอน (Sedimentary rock)</u>

หินตะกอนที่พบในประเทศไทยมีทั้งหินตะกอนที่เกิดโดยการตกสะสมตัวและแข็งตัวจากเม็ดตะกอน (detrital deposits/clastic rock) หินตะกอนที่เกิดจากกระบวนการตกสะสมตัวของตะกอนทางเคมี (chemical deposits/crystalline rock) ซึ่งรวมถึงหินตะกอนประเภทเกลือหินระเหย (evaporites) ชนิดต่างๆ และหินตะกอนที่เกิดจากการสะสมตัวของสารอินทรีย์ (organic matter deposits)

หินตะกอนประเภทที่ตกสะสมตัวและแข็งตัวจากเม็ดตะกอนที่พบในประเทศไทยได้แก่หินกรวดมน (conglomerate) หินกรวดเหลี่ยม (breccia) หินทราย (sandstone) หินทรายแป้ง (siltstone) หินดินดาน (shale) หินเคลย์ (claystone) และหินโคลน (mudstone) รูปที่ 5.15 แสดงตัวอย่างของหินตะกอนที่เกิดจากการสะสมตัวและแข็งตัวจากเม็ดตะกอน (detrital deposit/clastic rock)

(a)

(b)

(c))

(d)

(e)

(f)

(g)

รูปที่ 5-15 แสดงตัวอย่างของหินตะกอนที่สะสมตัวและแข็งตัวจากเม็ดตะกอนที่พบมากในเมืองไทย (a) หินกรวดมน (b) หินกรวดเหลี่ยม (c) หินทราย (d) หินทรายแป้ง (e) หินดินดาน (f) หินเคลย์ และ (g) หินโคลน

สำหรับหินตะกอนที่เกิดจากการสะสมตัวทางเคมีซึ่งรวมถึงหินเกลือระเหยที่พบมากในประเทศไทยนั้น ได้แก่ หินปูน (limestone) หินโดโลไมต์ (dolomite) หินชอล์ค (chalk) หินเชิร์ต (chert) เกลือหิน (rock salt) ยิปซัม (gypsum) และแอนไฮไดรต์ (anhydrite) รูปที่ 5.16 แสดงตัวอย่างของหินตะกอนที่เกิดจากการสะสมตัวของตะกอนทางเคมี (chemical deposits)

สำหรับหินตะกอนประเภทสุดท้ายที่พบมากเช่นกันในเมืองไทยได้แก่หินตะกอนที่เกิดจากการสะสมตัวของอินทรีย์สาร (biological deposits) ได้แก่ถ่านหินเกรดต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ พีท (peat) ลิกไนต์ (lignite) บิทูมินัส (bituminous) และแอนทราไซต์ (anthracite) รูปที่ 5.17 แสดงตัวอย่างของหินตะกอนที่เกิดจากการสะสมตัวของอินทรีย์สาร

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

(g)

รูปที่ 5-16 แสดงหินตะกอนที่เกิดจากการสะสมตัวทางเคมี (a) หินปูน (limestone), (b) หินโดโลไมต์ (dolomite), (c) หินชอล์ค (chalk), (d) หินเชิร์ต (chert), (e) เกลือหิน (rock salt), (f) ยิปซัม (gypsum) และ (g) แอนไฮไดรต์ (anhydrite)

(a)

(b)

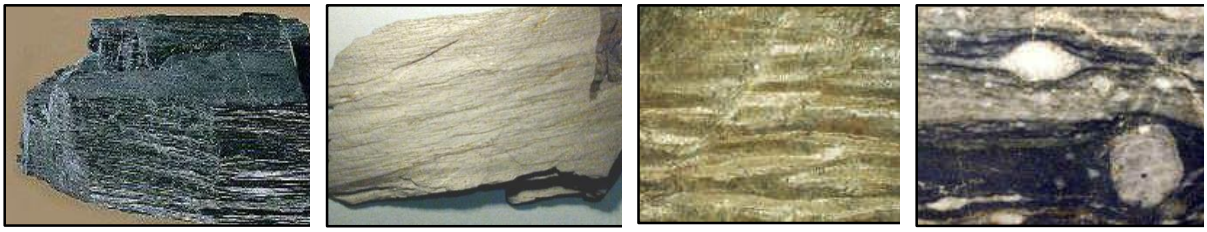
(c))

(d)

รูปที่ 5-17 แสดงตัวอย่างของหินตะกอนที่เกิดจากการสะสมตัวของอินทรีย์สาร (a) พีท (peat), (b) ลิกไนต์ (lignite), บิทูมินัส (bituminous) และ แอนทราไซต์ (anthracite)

<u>หินแปร (metamorphic rock)</u>

หินแปรเป็นหินที่เกิดจากการแปรสภาพจากหินเดิมโดยกระบวนการทางการกระทำของความร้อนและ/หรือความดันและปฏิกิริยาทางเคมี หินแปรอาจจำแนกเป็น 2 ประเภท คือหินแปรที่มีการเรียงตัว (foliated metamorphic rock) ของแร่ประกอบหิน และหินแปรที่ไม่มีการเรียงตัว (non-foliated metamorphic rock) ของแร่ประกอบหิน หินแปรที่มองเห็นการเรียงตัวได้แก่ หินชนวน (slate) หินฟิลไลต์ (phyllite) หินชีสท์ (schist) และหินไนส์ (gneiss) ส่วนหินแปรที่ไม่มีการเรียงตัวได้แก่ หินอ่อน (marble) หินควอร์ตไซต์ (quartzite) และหินกรวดมนแปรสภาพ (meta-conglomerate) รูปที่ 5.18 และรูปที่ 5.19 แสดงตัวอย่างของหินแปรที่มีการเรียงตัว และหินแปรที่ไม่มีการเรียงตัว ตามลำดับ



(a) (b) (c) (d)

รูปที่ 5-18 แสดงตัวอย่างของหินแปรที่มองเห็นการเรียงตัวได้แก่ (a) หินชนวน (slate), (b) หินฟิลไลต์ (phyllite), (c) หินชีสท์ (schist) และ (d) หินไนส์ (gneiss)

(a) (b) (c)

รูปที่ 5-19 แสดงหินแปรที่ไม่มีการเรียงตัวได้แก่ (a) หินอ่อน (marble), (b) หินควอร์ตไซต์ (quartzite), และ (c) หินกรวดมนแปรสภาพ (meta-conglomerate)

(2) สี (colour)

การบอกสีในการบรรยายลักษณะหินนั้นเป็นสิ่งที่สำคัญมาก การบอกสีตัวอย่างนั้น ผู้ปฏิบัติงานบางคนจะใช้ความเคยชินในการระบุชื่อสี แต่ความสามารถในการจำแนกสีของแต่ละบุคคลมักต่างกัน ดังนั้นผู้เขียนขอแนะนำให้ระบุสีโดยเทียบกับแผ่นเทียบสี (rock colour chart) เนื่องจากจะทำให้ระบุสีได้ใกล้เคียงกัน ถึงแม้ผู้ปฏิบัติงานจะไม่ใช่คนเดียวกัน โดยสภาพความเป็นจริงดิน-หินตัวอย่างมักจะไม่มีโทนสีตรงกับสีหลักสีใดสีหนึ่ง เช่นสีเหลือง สีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน หรือสีม่วง แต่มักจะมีโทนสีหลักอันใดอันหนึ่งแล้วมีโทนสีอื่น ๆ ที่เราสามารถมองเห็นรองลงมา เช่น สีน้ำเงินอมม่วง สีแดงอมน้ำตาล สีชมพูอมส้ม เป็นต้น ผู้เขียนขอให้คำบรรยายสีตามแผ่นเทียบสีดังตัวอย่างข้างต้น เป็นภาษาอังกฤษเพื่อให้ผู้นำไปใช้งาน สามารถใช้ได้ง่ายขึ้นดังนี้

ตัวอย่างของคำที่ใช้ในการบรรยายสีของตัวอย่างดิน-หิน

pink = สีชมพู	greyish pink = สีชมพูอมเทา	orange pink = สีชมพูอมส้ม
red = สีแดง	greyish red = สีแดงอมเทา	blackish red = สีแดงอมดำ
yellow = สีเหลือง	greyish yellow = สีเหลืองอมเทา	brownish yellow = สีเหลืองอมน้ำตาล
green = สีเขียว	greyish green = เขียวอมเทา	yellowish green = เขียวอมเหลือง
blue = สีน้ำเงิน	greenish blue = น้ำเงินอมเขียว	bluish green = สีเขียวอมน้ำเงิน
brown = สีน้ำตาล	reddish brown = สีน้ำตาลอมแดง	greyish brown = สีน้ำตาลอมเทา
purple = สีม่วง	bluish purple = สีม่วงอมน้ำเงิน	reddish purple = สีม่วงอมแดง

orange = สีส้ม	pinkish orange = สีส้มอมชมพู	greyish orange = สีส้มอมเทา
black = สีดำ	greyish Black = สีดำอมเทา	brownish black = สีดำอมน้ำตาล
grey = สีเทา	yellowish grey = สีเทาอมเหลือง	greenish grey = สีเทาอมเขียว

บางครั้งหากมีโทนสีที่มี 3 โทนสี ให้เขียนสีที่น้อยที่สุดขึ้นหน้า ตามด้วยสีรอง แล้วตามด้วยสีหลัก เช่น ถ้ามองเห็นเป็นสีเขียวอมน้ำเงิน แต่มีสีเทาปน ให้บรรยายเป็น greyish bluish green หรือสีเขียวอมเทาและมีสีเหลืองปน ก็ต้องบรรยายเป็น yellowish greyish green เป็นต้น

นอกจากนี้แล้ว การให้คำบรรยายสี มักจะมีการให้น้ำหนัก หรือความเข้มของสีด้วย ซึ่งคำที่ใช้ในการให้น้ำหนักของสีต่างๆ มีดังนี้

pale หมายถึงสีจางหรือซีด เช่น pale reddish brown หมายถึงสีน้ำตาลอมแดง ที่มีสีค่อนข้างซีด

light หมายถึงความเข้มสีอ่อน เช่น light greyish green หมายถึง สีเขียมอมเทา ที่มีสีค่อนข้างอ่อน

moderate หมายถึงความเข้มสีปานกลาง เช่น moderate greenish grey หมายถึงสีเทาอมเขียว ที่มีความเข้มของสีปานกลาง

dark/dusky หมายถึงความเข้มของสีค่อนข้างเข้ม เช่น dark brown หมายถึงสีน้ำตาลเข้ม dusky yellow หมายถึงสีเหลืองมืดมน

นอกจากบรรยายเพิ่มน้ำหนักที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังมีคำอีก 1 คำ ที่มักใช้ขยาย คือคำว่า very ซึ่งแปลว่ามาก ยกตัวอย่างเช่น very light grey หมายถึงสีเทาอ่อนมาก หรือ very dark yellow ซึ่งหมายถึงสีเหลืองเข้มมาก อย่างไรก็ตาม ผู้เขียนขอแนะนำให้ใช้แผ่นเทียบสีในการระบุสีของตัวอย่างดิน-หิน ทั้งนี้ เพื่อให้เกิดความถูกต้อง และมีความแม่นยำในการเทียบเคียง (correlation) กับหน่วยหินของหลุมเจาะอื่น ที่อยู่ใกล้เคียง

(3) ลักษณะเนื้อหิน (Texture)

ในหัวข้อนี้ ผู้เขียนจะแบ่งหัวข้อการบรรยายลักษณะเนื้อหินของตัวอย่างดิน-หินออกเป็น 4 ส่วน คือการบรรยายตะกอนร่วน หินตะกอน หินอัคนี และหินแปร ดังนี้

ลักษณะเนื้อหินของเม็ดตะกอน (texture of sedimentary rock)

นักธรณีวิทยาเกือบทั่วโลก โดยเฉพาะในประเทศสหรัฐอเมริกานิยมใช้การจำแนกขนาดตะกอนที่เรียกว่า Wentworth Grade Scale ซึ่งเปรียบเทียบได้ทั้งขนาดที่เป็นหน่วยเมตริก หน่วยฟี (ϕ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $-\log_2 d$ เมื่อ d หมายถึงของขนาดตะกอนในระบบเมตริกและได้กำหนดชื่อให้เรียกตามที่แสดงในรูปที่ 5.20 และรูปที่ 5.21 แสดงตัวอย่างของตะกอนร่วนขนาดต่างๆ

Size range (metric)	φ scale	grain name
> 256 mm	< -8	boulder
64–256 mm	-6 to -8	cobble
4–64 mm	-2 to -6	pebble
2–4 mm	-1 to -2	granule
1–2 mm	0 to -1	very coarse sand
½–1 mm	1 to 0	coarse sand
¼–½ mm	2 to 1	medium sand
125–250 μm (¼–⅛ mm)	3 to 2	fine sand
62.5–125 μm (⅛–1/16 mm)	4 to 3	very fine sand
3.90625–62.5 μm (1/16-1/256 mm)	8 to 4	silt
< 3.90625 μm (< 1/256 mm)	> 8	clay/mud

รูปที่ 5-20 แสดง Wentworth Grade Scale สำหรับเรียกชื่อตะกอนขนาดต่างๆ

ตะกอน	ขนาดเล็กกว่า	0.004 มิลลิเมตร มม.	เรียกว่า ดินเหนียว (clay)
ตะกอน	ขนาดระหว่าง	0.004-0.0625 มม.	เรียกว่า ทรายแป้ง (silt)
ทราย	ขนาดระหว่าง	0.0625-0.125 มม	เรียกว่า ทรายขนาดละเอียดมาก (very fine sand)
		0.125-0.25 มม.	เรียกว่า ทรายขนาดละเอียด (fine sand)
		0.25-0.50 มม.	เรียกว่า ทรายขนาดปานกลาง (medium sand)
		0.50-1.0 มม.	เรียกว่า ทรายขนาดหยาบ (coarse sand)
		1.0-2.0 มม.	เรียกว่า ทรายขนาดหยาบมาก (very coarse sand)
กรวด	ขนาดระหว่าง	2.0-4.0 มม.	เรียกว่า แกรนุล (granule)
		4.0-64.0 มม	เรียกว่า เพ็บเบิล (pebble)
		64.0-256.0 มม.	เรียกว่า ค็อบเบิล (cobble)
		>256 มม.	เรียกว่า โบลเดอร์ (boulder)

(a) (b) (c) (d)

รูปที่ 5-21 แสดงตัวอย่างของตะกอนขนาดต่างๆ (a) ดินเหนียว (clay), (b) ทรายแป้ง (silt), (c) ทราย (sand) และ (d) กรวด (gravel)

ลักษณะเนื้อหินของดินเหนียว (texture of clay)

คำจำกัดความของดินเหนียวคือเม็ดตะกอนที่มีขนาดเล็กมากๆ และสามารถมองเห็นได้โดยการใช้กล้องจุลทัศน์อิเล็กตรอน (electron microscope) เท่านั้น ลักษณะเนื้อดินของดินเหนียว สามารถบรรยายได้ดังนี้

ความเป็นพลาสติก (plasticity) หมายถึงปริมาณน้ำในมวลดินบ่งบอกว่าดินมีสถานะความเป็นพลาสติก (ปั้นขึ้นรูปได้) หรือไม่ ตามปกติค่านี้จะทดสอบในห้องปฏิบัติการ ในกรณีจะที่ทดสอบนอกห้องปฏิบัติการโดยการจับหรือสัมผัสหรือทดลองปั้น จะบอกในลักษณะสัมพัทธ์ ดังนี้

Non-plastic	หมายถึงไม่มีความเป็นพลาสติก
Slightly plastic	หมายถึงมีความเป็นพลาสติกเล็กน้อย
Moderately plastic	หมายถึงมีความเป็นพลาสติก
Highly plastic	หมายถึงมีความเป็นพลาสติกมาก

ความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneity) หมายถึงการที่ดินเหนียวมีส่วนประกอบที่เป็นเนื้อเดียวกันหรือไม่ หรืออาจมีแร่หรือตะกอนชนิดและขนาดอื่นเจือปนอยู่ในหน่วยหิน ซึ่งจะแบ่งออกเป็น

- heterogeneous หมายถึงไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกันโดยสิ้นเชิง
- slightly homogeneous หมายถึงมีความเป็นเนื้อเดียวกันบ้างเล็กน้อย
- moderately homogeneous หมายถึงมีความเป็นเนื้อเดียวกันปานกลาง
- homogeneous หมายถึง มีความเป็นเนื้อเดียวกัน

รอยด่างของสี (mottling) ลักษณะเนื้อหินแบบนี้มักจะเกิดได้ง่ายในดินเหนียว เนื่องจากดินเหนียวส่วนใหญ่จะอิ่มตัวด้วยน้ำ เมื่อระดับน้ำใต้ดินขึ้น-ลง ตามฤดูกาล โอกาสที่ดินเหนียวจะสัมผัสกับอากาศจะมีมาก เมื่อดินเหนียวสัมผัสกับอากาศจะอยู่ในสภาพเติมออกซิเจน (oxidation condition) ทำให้สารละลายเหล็กที่อยู่ในน้ำที่เคลือบอยู่บนผิวดินเหนียวตกตะกอน จะให้รอยด่างสีแดงหรือน้ำตาล แต่เมื่อเวลาดินเหนียวอยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดิน จะอยู่ในสภาวะลดออกซิเจน (reduction condition) จะเกิดรอยด่างสีเทา หากเป็นสารละลายของแร่ธาตุอื่น ก็จะมีสีต่างออกไป เช่นสีเหลือง สีแดงอิฐ การบรรยายลักษณะรอยด่างของสีจะบรรยายดังตัวอย่างต่อไปนี้

- grey mottled หมายถึงรอยด่างของสี เป็นสีเทา
- brick red mottled หมายถึงรอยสีด่างของสี เป็นสีแดงอิฐ
- yellow mottled หมายถึงรอยด่างของสี เป็นสีเหลือง
- reddish brown mottled หมายถึงรอยด่างของสี เป็นสีน้ำตาลอมแดง เป็นต้น

การบรรยายลักษณะเนื้อหินของทรายแป้ง (texture of silt)

คำจำกัดความของทรายแป้งคือ เม็ดตะกอนที่จะสามารถมองเห็นได้ ก็ต่อเมื่อมองผ่านกล้องจุลทัศน์ (microscope) เท่านั้น ลักษณะเนื้อดินของทรายแป้ง ส่วนมากจะอธิบายได้ยาก เพราะมีคุณสมบัติต่างจากดินเหนียวและทราย ซึ่งมีจำนวนของคุณสมบัติที่อธิบายได้มากกว่า เนื้อหินของหินทรายแป้งมักจะอธิบายเป็น clastic, and fine-grained (0.004-0.006 mm.) อีกลักษณะหนึ่งที่พอจะอธิบายให้เห็นภาพได้คือ การจับเกาะตัว (compaction) เป็นคุณสมบัติหนึ่งของการตกสะสมตัวของตะกอน จำแนกได้ดังนี้

- loose หมายถึงตะกอนมีการจับเกาะตัวกันแบบหลวมๆ
- slightly compacted หมายถึงตะกอนมีการจับเกาะตัวกันเล็กน้อย
- moderately compacted หมายถึงตะกอนมีการจับเกาะตัวกันปานกลาง
- highly compacted หมายถึงตะกอนมีการจับเกาะตัวกันดีมาก

การบรรยายลักษณะเนื้อหินของทราย และกรวด (texture of sand and gravel)

ขนาดเม็ดตะกอน (grain size) เป็นลักษณะเนื้อหิน (texture) อันแรกที่ต้องกล่าวถึงรองจากชื่อหน่วยหินและสีของหน่วยหิน และต้องทำให้คำที่บอกขนาดเม็ดตะกอนอยู่ในรูปของคำคุณศัพท์ โดยการใช้สัญลักษณ์ hyphen (-) เชื่อมต่อระหว่างคำเพื่อให้เป็นคำเดียวกัน และเติม -ed ท้ายคำเพื่อทำให้อยู่ในรูปของคำคุณศัพท์ (adjective) การเขียนคำบรรยายที่ถูกต้อง ต้องอยู่ในรูปที่ผู้เขียนจะกล่าวถึง ดังต่อไปนี้

- ขนาดละเอียดมาก (0.0625-0.125 มม.) เขียนบรรยายว่า very fine-grained
- ขนาดละเอียด (0.125-0.250 มม.) เขียนบรรยายว่า fine-grained
- ขนาดปานกลาง (0.25-0.50 มม.) เขียนบรรยายว่า medium-grained
- ขนาดหยาบมาก (0.50-1.0 มม.) เขียนบรรยายว่า coarse-grained
- ขนาดหยาบมาก (10.-2.0 มม.) เขียนบรรยายว่า very coarse-grained

ในกรณีที่ตะกอนมีขนาดก้ำกึ่ง หรือมีมากกว่า 1 ขนาดคละกัน ให้ใช้คำบรรยายทั้ง 2 ส่วนแต่ให้ส่วนที่เป็นขนาดเล็กกว่าขึ้นก่อน เช่น มีทรายขนาดละเอียด ถึงขนาดปานกลาง เขียนอธิบายว่า fine- to medium grained หรือเช่น ทรายขนาดปานกลาง ถึงขนาดหยาบ จะเขียนอธิบายว่า medium- to coarse-grained

การคัดขนาด (sorting) เป็นอันดับถัดไปลักษณะเนื้อหิน (texture) ที่ต้องบรรยาย การคัดขนาดจำแนกออกเป็น 3 ระดับหลัก ดังนี้

- การคัดขนาดไม่ดี ใช้คำว่า poorly sorted
- การคัดขนาดดีปานกลาง ใช้คำว่า moderately sorted
- การคัดขนาดดี ใช้คำว่า well sorted

เช่นเดียวกับการบรรยายขนาด หากมีการคัดขนาดที่มองเห็นก้ำกึ่งระหว่างระดับใดระดับหนึ่ง ให้อธิบายทั้ง 2 ส่วน โดยให้ส่วนที่ดีน้อยกว่ามาก่อน เช่น การคัดขนาดไม่ดี ถึงปานกลาง ให้ใช้คำว่า poorly to moderately sorted การคัดขนาดดีปานกลางถึงดี ให้ใช้คำว่า moderately to well sorted

ความกลมมน (roundness) ความกลมมนหมายถึงลักษณะพื้นผิวของเม็ดตะกอนว่าผิวมีความกลมมนหรือหรือความขรุขระมากน้อยอย่างไร ลักษณะความกลมมนของผิวเม็ดตะกอน บางครั้งจะบอกให้เรารู้ว่าตะกอนชุดนั้นๆ ถูกพัดพามาจากแหล่งที่อยู่ไกล หรือใกล้ จากแหล่งสะสมตัว เพราะว่าหากตะกอนถูกพัดพามาไกล จะเกิดการขัดสีกับท้องน้ำ หรือระหว่างเม็ดตะกอนด้วยกันเอง ทำให้มีผิวกลมมน หากพัดพามาจากที่ใกล้ๆ ความกลมมนก็จะน้อยกว่า ระดับของความกลมมนมีดังต่อไปนี้ (รูปที่ 5-22)

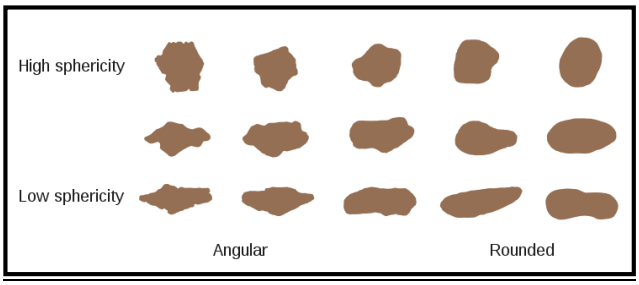
- angular หมายถึง ตะกอนมีลักษณะผิวเป็นเหลี่ยมมาก
- subangular หมายถึง ตะกอนมีลักษณะผิวเป็นเหลี่ยมปานกลาง
- subrounded หมายถึง ตะกอนมีลักษณะผิวกลมมนปานกลาง
- rounded หมายถึง ตะกอนมีลักษณะผิวกลมมนดี
- well rounded หมายถึง ตะกอนมีลักษณะผิวกลมดีมาก

เช่นเดียวกันกับลักษณะเนื้อหินอื่นๆ ข้างต้น ความกลมมนที่ก้ำกึ่งระหว่าง 2 ระดับ สามารถใช้คำบรรยายควบคู่กันไปได้ เช่นมีความเป็นเหลี่ยมปานกลางถึงกลมมนปานกลาง ให้ใช้คำว่า subangular to subrounded หรือมีความกลมมนดี ถึงดีมาก ให้ใช้คำว่า rounded to well rounded

รูปที่ 5-22 แสดงลักษณะของความกลมมนตามมาตรฐานที่เป็นที่นิยมใช้กันในหมู่นักธรณีวิทยา

ภาวะทรงกลม (sphericity) หมายถึงรูปร่างของตะกอนว่ามีความคล้ายกับทรงกลมเพียงไร มักจะใช้กับการบรรยายลักษณะเนื้อหินของทราย และกรวด ในการบรรยายทางธรณีวิทยา จะจำแนกภาวะทรงกลมออกเป็น 3 ระดับ ดังนี้ (รูปที่ 5-23)

- high sphericity หมายถึงมีภาวะทรงกลมสูง
- moderate sphericity หมายถึงมีภาวะทรงกลมปานกลาง
- low sphericity หมายถึงมีภาวะทรงกลมน้อย



รูปที่ 5-23 แสดงลักษณะภาวะทรงกลม (sphericity) และความกลมมน (roundness) ของเม็ดตะกอน

การบรรยายลักษณะเนื้อหินของหินตะกอนประเภทหินเคลย์ หินโคลน หินดินดาน และหินทรายแป้ง (texture of sedimentary rocks: claystone, mudstone, shale, and siltstone)

- **สารเชื่อมประสาน (cementing material)** หมายถึงสารละลายที่เชื่อมประสานให้ตะกอนแข็งตัวกลายเป็นหินตะกอนพร้อมๆ กับการที่ตะกอนถูกกดทับโดยตะกอนที่สะสมตัวภายหลัง ชนิดของสารเชื่อมประสาน จะขึ้นอยู่กับสิ่งแวดล้อมของการสะสมตัวของตะกอน หรือสารละลายที่เกิดอยู่ในช่องว่างของตะกอน

ระหว่างการสะสมตัว หากเกิดในพื้นที่ๆ ใกล้แหล่งหินปูน สารเชื่อมประสานอาจเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ในพื้นที่ๆ เป็นหินทรายหรือหินแกรนิต สารเชื่อมประสานอาจเป็นซิลิกา เป็นต้น

- siliceous cemented หมายถึงสารเชื่อมประสานมีองค์ประกอบของซิลิกา
- calcareous cemented หมายถึงสารเชื่อมประสานมีองค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต
- ferruginous cemented หมายถึงสารเชื่อมประสานมีองค์ประกอบของเหล็ก

- อัตราของการผุพังอยู่กับที่ (degree of weathering) หมายถึงลักษณะที่แสดงถึงการผุพังของหินซึ่งเกิดขึ้นได้โดยหลายปัจจัย คือการผุพังโดยปัจจัยทางกายภาพ (physical weathering) เช่นโดยลม ฝน ทางน้ำ ธารน้ำแข็ง การผุพังโดยกระบวนการทางเคมี (chemical weathering) โดยปกติแล้ว จะแบ่งเป็น 5 ระดับ ดังนี้

- fresh หมายถึงหินที่ไม่มีการผุพัง
- slightly weathered หมายถึงหินที่มีการผุพังเล็กน้อย
- moderately weathered หมายถึงหินที่มีการผุพังปานกลาง
- highly weathered หมายถึงหินที่มีการผุพังมาก
- completely weathered หมายถึงหินที่มีการผุพังโดยสมบูรณ์

- แนวแตกถี่ (fissility)

เป็นคุณสมบัติทางกายภาพอีกลักษณะหนึ่งของหินโดยเฉพาะหินตะกอนขนาดละเอียดมากเช่นในหินดินดาน บางครั้งก็ปรากฏให้เห็นในหินชนวน หินชีสต์ ซึ่งเป็นหินแปร ผู้เขียนแบ่งระดับรอยแตกถี่ ออกเป็น 3 ระดับ ดังนี้

- non-fissile หมายถึงไม่ปรากฏแนวแตกถี่ให้เห็น
- slightly fissile หมายถึงพอมองเห็นแนวแตกถี่
- clearly fissile หมายถึงมองเห็นแนวแตกถี่ได้อย่างชัดเจน

การบรรยายลักษณะเนื้อหินของหินตะกอนประเภท หินทราย และหินกรวดมน
(texture of sedimentary rocks: sandstone, and conglomerate)

บรรยายเช่นเดียวกันการบรรยายกรวด และทราย กล่าวคือต้องบรรยายขนาดของตะกอน (Grain size) ตามด้วยการคัดขนาด (sorting) ความกลมมน (roundness) และภาวะกลมมน (sphericity)

การบรรยายลักษณะเนื้อหินของหินอัคนี (texture of igneous rocks)

การบรรยายลักษณะเนื้อหินของหินอัคนี ก็จะบรรยายอยู่บนพื้นฐานของขนาดเม็ดแร่หรือผลึก หรืออาจบรรยายบนพื้นฐานของความเท่ากันของขนาดผลึก (equality of grain size) หรืออาจบรรยายบนพื้นฐานของลักษณะเด่นพิเศษ (special textures) ได้ดังนี้

phaneritic texture หมายถึงเนื้อหินที่มีขนาดผลึกหรือเม็ดแร่ ที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า หรือแว่นขยายที่มีกำลังขยาย 10 เท่า

aphanitic texture หมายถึงลักษณะเนื้อหินที่มีขนาดผลึกหรือเม็ดแร่ ที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า หรือหรือแว่นขยายที่มีกำลังขยาย 10 เท่า

equigranular texture หมายถึงขนาดเม็ดแร่หรือผลึกมีขนาดเท่ากันหรือใกล้เคียงกันมาก

porphyritic texture หมายถึงหินที่ประกอบด้วยเม็ดแร่หรือผลึก ที่มีขนาดอย่างน้อย 2 ขนาดที่เห็นได้ชัดเจน

glassy texture หมายถึงเนื้อหินที่มีลักษณะเป็นเนื้อแก้วเกือบทั้งหมด

vesicular texture หมายถึงลักษณะเนื้อหินที่เต็มไปด้วยฟองอากาศ โดยที่ฟองอากาศเหล่านั้นอาจมีแร่หรือไม่มีแร่ทุติยภูมิ ตกผลึกอยู่ภายในก็ได้

fragmental texture หรือ pyroclastic texture หมายถึงลักษณะเนื้อหินที่ประกอบไปด้วยเศษหินซึ่งเกิดในขณะการประทุและสะสมของตะกอนภูเขาไฟ รูปที่ 5-24 แสดงบางตัวอย่างของเนื้อหินอัคนี (igneous rock textures)

การบรรยายลักษณะเนื้อหินของหินตะกอนประเภทหินแปร (texture of metamorphic rocks)

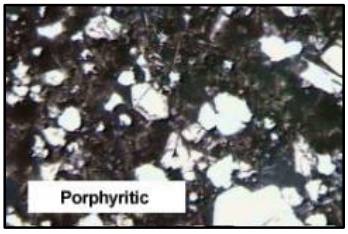
การบรรยายหรือเรียกลักษณะของเนื้อหินแปร จะอยู่บนบรรทัดฐานของการกระจายตัวและวางตัวของแร่ประกอบหิน (Fabrics) และส่วนประกอบของหิน ดังนี้

foliated or lineated fabrics (เนื้อหินแบบมีการเรียงตัว) ได้แก่ ลักษณะที่เรียกว่า slaty cleavage (foliation) หรือ phyllitic foliation หรือ schistose foliation หรือ gneissose texture ซึ่งหมายถึง แร่มีการเรียงตัวเป็นชั้น มีริ้วขนาน แร่ประกอบหินจะมีลักษณะแบนเป็นแผ่น (platy) หรือแบบแท่ง (prismatic) หรือรูปแบนรี (ellipsoidal) วางตัวขนานกับชั้น gneissic ซึ่งหมายถึงมีลักษณะเป็นแถบชั้น แต่ค่อนข้างใหญ่ มีแถบลายทางหยักคดโค้งห่าง ๆ และ mylonitic ซึ่งมีลักษณะเป็นริ้วขนาน มีการเรียงตัวของเม็ดแร่ที่ถูกบดอัด

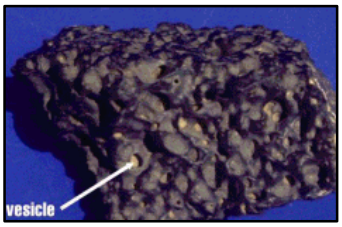
Massive fabrics เป็นลักษณะเนื้อหินแปรที่มีเนื้อแน่น บางประเภทก็เห็นลักษณะการหลอมของขอบผลึกเช่นหินควอร์ตไซต์ (quartzite) บางชนิดก็ไม่เห็นรูปผลึกชัดเจน เช่นหินอ่อน (marble) รูปที่ 5-25 แสดงตัวอย่างของลักษณะเนื้อหินของหินแปร (metamorphic rock textures)

(a) phaneritic texture

(b) aphanitic texture



(c) porphyritic texture



(d) vesicular texture

(e) glassy texture

(f) fragmental texture

รูปที่ 5-24 แสดงตัวอย่างลักษณะเนื้อหินของหินอัคนี (a) phaneritic texture (b) aphanitic texture (c) porphyritic texture (d) vesicular texture (e) glassy texture และ (f) fragmental texture

(a) schistose foliation

(b) gneissose texture

(c) massive fabric

(d) recrystalized fabric

รูปที่ 5-25 แสดงตัวอย่างลักษณะเนื้อหินของหินแปร (metamorphic rock fabrics)

(4) ส่วนประกอบของหิน (composition of rock)

ในคู่มือเล่มนี้ ผู้เขียนขออนุญาตไม่กล่าวถึงส่วนประกอบของหินในรายละเอียด เพราะว่าผู้อ่านได้เรียนมาหมดแล้วในมหาวิทยาลัย หรือผู้อ่านสามารถค้นหาได้จากตำราทั้งของไทยและต่างประเทศ แต่ที่คงหัวข้อนี้ในคู่มือฉบับนี้ เนื่องจาก หัวข้อนี้เป็นหนึ่งในความสำคัญที่ต้องบรรยาย ในการทำ lithologic logging ผู้เขียนขอกล่าวโดยสั้นๆ พอสังเขป ดังนี้

ส่วนประกอบของหินอัคนี (composition of igneous rocks)

ส่วนประกอบทางแร่ของหินอัคนี แร่กลุ่มหลักคือกลุ่มแร่ Silicate Group ซึ่งประกอบด้วยธาตุหลัก คือ silica และ oxygen แร่หลักๆ ของหินอัคนี ได้แก่ quartz แร่ในกลุ่ม mica ได้แก่ muscovite และ biotite แร่ในกลุ่ม Feldspar ได้แก่แร่ plagioclase และ orthoclase ยังมีแร่ในกลุ่ม amphibole (hornblende) pyroxene (augite) และกลุ่ม olivine

ส่วนประกอบของหินตะกอน (composition of sedimentary rocks)

ส่วนประกอบของหินตะกอน จะพิจารณาได้ค่อนข้างง่ายโดยเฉพาะกรณีที่เป็นหินตะกอนที่เกิดจากการตกสะสมตัวของเม็ดตะกอน (detrital deposits) เนื่องจากสามารถมองเห็นเม็ดตะกอนได้ชัดเจนด้วยตาเปล่าหรือแว่นขยายขนาดกำลังขยาย 10 เท่า หรือถ้ามองด้วยตาเปล่าไม่เห็นก็สามารถทดสอบได้ง่ายโดยดูจากลักษณะริ้วรอยแตก เช่นแนวแตกถี่ (fissility) หรือถ้าถูฟังแล้วรู้สึกสะดุด ก็จะรู้ว่าเป็นหินทรายแป้ง ซึ่งส่วนประกอบหลักจะได้แก่แร่ quartz แร่ fe-oxides เช่นเดียวกับหินทราย เป็นต้น แต่หินทราย อาจมีแร่ที่ยังไม่ผุพังอื่นๆ เช่นแร่ feldspar ปะปนอยู่ด้วย ถ้าเป็นหิน conglomerate ให้ดูว่าส่วนที่เป็นเม็ดตะกอนนั้น หินเดิมเป็นหินอะไร

แต่สำหรับตะกอนที่เกิดจากการสะสมตัวทางเคมี นั้น ทดสอบได้ง่ายโดยใช้กรดเจือจาง หยดทดสอบดูถ้ามีฟองฟู่ ส่วนประกอบก็จะเป็นแร่ calcite หรือแร่ dolomite หากหยดกรดแล้วไม่มีปฏิกิริยา อาจทดสอบโดยใช้เกณฑ์ความแข็งเปรียบเทียบ เช่นถ้าเล็บขูดเข้า ก็อาจเป็นแร่ gypsum ซึ่งมีความแข็งเท่ากับ 2 (เล็บมือมีความแข็งเท่ากับ 2.5) แร่ประกอบหินตะกอนทางเคมีตัวอื่น ได้แก่ halite ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของชั้นเกลือหิน (rock salt) แร่ Anhydrite ซึ่งเกิดจากการสูญเสียน้ำของแร่ gypsum เป็นต้น

อีกส่วนหนึ่งคือหินตะกอนที่เกิดจากการทับถมตัวของสารอินทรีย์ หินตะกอนจำพวกนี้ได้แก่ peat lignite bituminous และ anthracite ซึ่งส่วนประกอบหลักก็คือ hydrocarbon

ส่วนประกอบของหินแปร (composition of metamorphic rocks)

ส่วนประกอบของหินแปร จะมีแร่ดัชนี อยู่ไม่กี่ชนิด ซึ่งได้แก่แร่ silimanite แร่ andalucite แร่ kyanite และแร่ garnet (โกเมน) ซึ่งโดยปกติแล้ว ต้องวินิจฉัยจากแผ่นหินบางเท่านั้น ยกเว้นแร่ garnet ซึ่งมองเห็นผลึกได้ด้วยตาเปล่า แร่ที่พบได้ในหินแปรอาจเป็นแร่ที่พบในหินอัคนีเช่นกัน ได้แก่แร่ quartz แร่ feldspar แร่ olivine แร่ mica และแร่ pyroxene แต่ถ้าหินแปรนั้น แปรสภาพมาจากแร่ calcite ของ limestone ผลึกแร่จะตกผลึกใหม่ (recrystallization) เปลี่ยนจากหินปูน (limestone) ไปเป็นหินอ่อน (marble) แต่แร่ประกอบหิน ก็ยังคงเป็นแร่ calcite อยู่เช่นเดิม

(5) ลักษณะเด่นอื่น ๆ (other distinctive features)

เช่นตะกอนมีการสะสมตัวแบบตะกอนละเอียดอยู่ด้านบน (fining upward sequence) หรือตะกอนมีขนาดละเอียดลงเมื่อความลึกมากขึ้น (coarsening upward sequence) หรือมีการแทรกสลับด้วยสายแร่ หรือมีแร่มีสีแปลกๆ แทรกช่วงอยู่ หรือชั้นเฉียงระดับ (cross bedding)

(6) ข้อกำหนดคุณภาพของหิน (rock quality designation: R.Q.D.)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าหากเก็บตัวอย่างแบบแท่งตัวอย่าง หากแท่งหินมีรอยแตกตามธรรมชาติ จะต้องวัดความยาวของแท่งหินที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของรอยแตกตามธรรมชาติแยกเป็นท่อนไปจนครบความยาวของแท่งหินที่เก็บได้จากกระบอกเก็บตัวอย่าง (core barrel) นั้น ๆ คุณภาพของแท่งตัวอย่าง (R.Q.D.) จะคำนวณจาก**ผลรวมของความยาวของแท่งหินตัวอย่างที่ยาวเท่ากับหรือมากกว่า 10 เซนติเมตร แล้วนำมาหารด้วยความยาวของแท่งตัวอย่างทั้งหมด** หน่วยจะออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ (%) คุณภาพของหินที่กำหนดตามมาตรฐานทางวิศวกรรมธรณี มีดังต่อไปนี้

Rock Quality Designation (R.Q.D.)	Description of rock quality
0-25 %	Very poor
25-50 %	Poor
50-75 %	Fair
75-90 %	Good
90-100 %	Excellent

ยกตัวอย่างเช่นแท่งหินที่เก็บขึ้นมาได้ต่อหนึ่งกระบอกเก็บแท่งหิน (ความยาว 150 ซม.) มีความยาวของแท่งหินที่แตกหัก 15-8-20-25-12-30-10-10-8-7-5 เซนติเมตร ตามลำดับ

ค่า RQD จะเท่ากับ [(15+20+25+12+30+10+10)/150] * 100

RQD = (122/150) * 100 = 81.3 %

คุณภาพของหินจึงอยู่ที่ระดับ Good quality (ค่าอยู่ระหว่าง75-90 %)

(7) แท่งหินที่สามารถเก็บขึ้นมาได้ (core recovery: CR)

คือร้อยละของค่าผลรวมของความยาวแท่งตัวอย่างหินที่เก็บ (core recovery) ได้ต่อ 1 กระบอกเก็บแท่งหิน (core barrel) ซึ่งโดยปกติจะยาว 150 เซนติเมตร ค่านี้จะบอกถึงคุณภาพของการเจาะหรือสภาพของชั้นหินที่เจาะว่าหินผุพังหรือไม่ หากหินมีการแตกหักหรือผุพังจนเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อย ตัวจับแท่งหิน (core lifter/catcher) ก็ไม่สามารถจับแท่งหินไว้ในกระบอกได้

$$\text{Core Recovery (CR)} = \frac{\text{ความยาวของแท่งหินที่เก็บขึ้นมาได้}}{\text{ความยาวของกระบอกเก็บแท่งหิน}} * 100$$

ยกตัวอย่างเช่นแท่งหินที่เก็บขึ้นมาได้ต่อหนึ่งกระบอกเก็บแท่งหิน (ความยาว 150 ซม.) มีความยาว 15-8-20-25-12-30-10-10-8-7-5 เซนติเมตร ตามลำดับ

ค่า Core Recovery (CR) จะเท่ากับ $\frac{\text{(15-8-20-25-12-30-10-10-8-7-5) ซม.}}{\text{150 ซม.}} *100$

ดังนั้นค่า CR = (150/150) * 100 = 100 %

(8) มุมเอียงเทของชั้นหิน/แนวรอยแตก (angle of bedding plane/fractures)

มุมเอียงเทของชั้นหินจะบอกเราได้ว่าถึงแม้จะไม่สามารถบอกทิศทางการวางตัวของหิน (strike) ว่าวางตัวในทิศทางใดแต่ก็สามารถบอกได้ว่าชั้นหินมีมุมเอียงเท (dip) เท่าใดได้ ข้อมูลนี้วัดได้จากตัวอย่างที่เป็นแท่งหินเท่านั้น แล้วจะเป็นมุมเอียงเทจริง (true dip) เพราะว่าเวลาเราตั้งเครื่องเจาะ (drilling rig) เพื่อการเจาะสำรวจแบบเก็บแท่งตัวอย่างโดยทั่วไป เราจะตั้งเครื่องเจาะในแนวดิ่งเสมอ ข้อมูลนี้เมื่อประกอบกับ strike and dip ที่วัดได้จากหินโผล่หรือ quarry จะทำให้เราสามารถเชื่อมโยงการกระจายตัวของหน่วยหิน ในพื้นที่ใดๆ ได้ง่ายขึ้น

เช่นกันกับแนวรอยแตกในแท่งตัวอย่างหิน เราต้องวัดมุมแนวแตกทุกชุดที่เห็นได้ชัดเจน ทั้งนี้ค่าที่วัดได้จากแนวรอยแตกจะบอกให้เรารู้ว่าพื้นที่ นั้นๆ เคยถูกแรงกระทำมากี่ครั้ง กี่ทิศทาง ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการแปลความหมายทางธรณีวิทยาและอุทกธรณีวิทยา

(9) แนวสัมผัสกับหน่วยหินที่อยู่ข้างล่าง (contact to lower unit/horizon)

เป็นลักษณะแนวรอยต่อระหว่างส่วนปลายหินชุดหนึ่งกับส่วนต้นของหินอีกชุดหนึ่งที่อยู่ถัดลงไป ข้อมูลนี้ จะช่วยให้นักธรณีวิทยาแปลความหมายของการเกิดหินหรือสิ่งแวดล้อมของการเกิดแต่ละหน่วยหินได้ง่ายขึ้น ลักษณะรอยต่อนั้นสามารถบรรยายได้ดังนี้

Sharp contact หมายถึงรอยต่อที่ชัดเจน มีการเปลี่ยนสภาพการเกิดหินแบบทันทีทันใด

Gradational contact หมายถึงแนวรอยต่อที่แสดงลักษณะค่อยเปลี่ยนไปจากหน่วยหินหนึ่งไปเป็นอีกหน่วยหินหนึ่ง

5.1.3 หลักการเขียนคำบรรยาย

ในการเขียนคำบรรยายลักษณะดิน-หินตัวอย่างนั้น นอกจากต้องเขียนคำบรรยายเรียงตามอันดับของการเขียนบรรยายลักษณะดิน-หิน (order of writing description) แล้วนั้น ข้อสำคัญที่สุดคือต้องเขียนคำบรรยายเป็นภาษาอังกฤษเท่านั้น เพราะเป็นมาตรฐานสากล (international standard) แต่ในอดีตนั้นผู้เขียนเคยกระทำผิดพลาดมามาก เช่นการใช้คำที่ผิดลักษณะ เช่นการใช้คำแบบปนเปกันไป เช่นเขียนเป็นคำนามบ้าง คำคุณศัพท์บ้าง เป็นคำกริยาวิเศษณ์บ้าง ซึ่งผิดหลักการบรรยายลักษณะหิน ซึ่งภายหลังได้รับคำชี้แนะจากเจ้าของภาษาจึงได้ทำการปรับปรุงแก้ไข และประสงค์จะให้ผู้อ่านใช้ให้ถูกต้องตามไปด้วย ลักษณะคำที่ใช้ในการบรรยายที่ถูกต้องคือต้องเขียนบรรยายโดยใช้คำ **คุณศัพท์ (adjective)** เท่านั้นเพราะว่าคำคุณศัพท์จะใช้ขยายนามที่อยู่ข้างหน้าซึ่งในที่นี้ได้แก่ **หน่วยหิน** ที่วินิจฉัยแล้วและเขียนระบุไว้ข้างหน้าแล้ว ส่วนคำกริยาวิเศษณ์ (adverb) สามารถใช้ได้เมื่อเอามานำหน้าคำคุณศัพท์เพื่อขยายความอีกต่อหนึ่ง สำหรับสี (colour) เป็นคำคุณศัพท์อยู่ในตัวแล้ว ลักษณะเนื้อหิน ก็ต้องบรรยายโดยใช้คำคุณศัพท์เช่นกัน เมื่อให้คำบรรยายลักษณะทั่วไปเสร็จแล้ว จึงค่อยตามด้วยคำบรรยายที่เป็นลักษณะเด่นอื่น ๆ ที่พบในชั้นหินนั้น ๆ

โดยหลักการแล้วการบรรยายจะอธิบายในหน่วยหินที่มีความเป็นชนิดเดียวกันและต่อเนื่องกันเมื่อหินเปลี่ยนชนิด ก็จะเริ่มบรรยายแยกออกไปเป็นอีกคำบรรยายหนึ่ง แต่ในกรณีที่หินมีการแทรกสลับกันอย่างสม่ำเสมอเช่นหินทรายแทรกสลับกับหินดินดานทั้งชุดหิน ก็ใช้คำว่า sandstone and shale interbedded แล้วแยกบรรยายลักษณะของหินทราย และตามด้วยหินดินดาน หรือในกรณีที่เป็นหินทรายเกือบทั้งชุดแล้วแทรกชั้นด้วยหินดินดานเป็นบางช่วง ให้บรรยายเป็นหินทรายก่อน แล้วใช้คำว่า intercalated with shale at depth.... แล้วตามด้วยการบรรยายลักษณะของหินดินดานต่อ และหากผู้อ่านมีความสังเกตจะเห็นว่าที่ผู้เขียนบรรยายมาตั้งแต่ช่วงต้นของบทนี้ นั้น ผู้เขียนใช้คำที่เป็นคำคุณศัพท์มาตลอดและขอให้ผู้อ่านนำคำเหล่านี้ไปใช้ได้เลยโดยไม่ต้องกลัวผิดหลักไวยากรณ์ ผู้เขียนขอนำคำเหล่านั้นมาแสดงซ้ำในที่นี้อีกครั้งหนึ่ง ดังนี้

<u>เกี่ยวกับสี</u>

“สี” มีรูปคำที่เป็นคำคุณศัพท์ในตัวเองอยู่แล้ว

pink = สีชมพู	greyish pink = สีชมพูอมเทา	orange pink = สีชมพูอมส้ม
red = สีแดง	greyish red = สีแดงอมเทา	blackish red = สีแดงอมดำ
yellow = สีเหลือง	greyish yellow = สีเหลืองอมเทา	brownish yellow = สีเหลืองอมน้ำตาล
green = สีเขียว	greyish green = เขียวอมเทา	yellowish green = เขียวอมเหลือง
blue = สีน้ำเงิน	greenish blue = น้ำเงินอมเขียว	bluish green = สีเขียวอมน้ำเงิน
brown = สีน้ำตาล	reddish brown = สีน้ำตาลอมแดง	greyish brown = สีน้ำตาลอมเทา
purple = สีม่วง	bluish purple = สีม่วงอมน้ำเงิน	reddish purple = สีม่วงอมแดง
orange = สีส้ม	pinkish orange = สีส้มอมชมพู	greyish orange = สีส้มอมเทา
black = สีดำ	greyish Black = สีดำอมเทา	brownish black = สีดำอมน้ำตาล
grey = สีเทา	yellowish grey = สีเทาอมเหลือง	greenish grey = สีเทาอมเขียว

<u>ความเป็นพลาสติก (Plasticity)</u>

คำที่ลงท้ายด้วย –ic อยู่ในรูปคุณศัพท์เกือบทั้งหมด รวมถึงคำดังต่อไปนี้

Non-plastic	หมายถึงไม่มีความเป็นพลาสติก
Slightly plastic	หมายถึงมีความเป็นพลาสติกเล็กน้อย
Moderately plastic	หมายถึงมีความเป็นพลาสติก
Highly plastic	หมายถึงมีความเป็นพลาสติกมาก

<u>ความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity)</u>

คำที่ลงท้ายด้วย –ous หรือ –eous มีรูปคำเป็นคำคุณศัพท์

Heterogeneous	หมายถึงไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน
Slightly homogeneous	หมายถึงมีความเป็นเนื้อเดียวกันเล็กน้อย
Moderately homogeneous	หมายถึงมีความเป็นเนื้อเดียวกันปานกลาง
Homogeneous	หมายถึงมีความเป็นเนื้อเดียวกัน

<u>เกี่ยวกับรอยด่างของสี (Mottling)</u>

ให้เติม -d ท้ายคำว่า Mottle เพื่อให้รูปคำเป็นคุณศัพท์

grey mottled	หมายถึงมีรอยด่างสีเทาในเนื้อ
brick red mottled	หมายถึงมีรอยด่างสีแดงอิฐในเนื้อ
yellow mottled	หมายถึงมีรอยด่างสีเหลืองในเนื้อ
purplish red mottled	หมายถึงมีรอยด่างสีแดงแกมม่วงในเนื้อ

<u>เกี่ยวกับขนาด (grain size)</u>

การทำคำว่า grain ให้เป็นคำคุณศัพท์ (adjective) โดยการเติม –ed แล้วการนำคำที่ระบุขนาดตะกอนมาวางเชื่อมข้างหน้าเพื่อให้เป็นคำเดียวโดยต้องเติม hyphen (-) เสมอ จึงทำให้คำทั้งคำมีรูปเป็นคำคุณศัพท์ ดังนี้

very fine-grained	หมายถึงเม็ดทรายขนาดละเอียดมาก
fine-grained	หมายถึงเม็ดทรายขนาดละเอียด
medium-grained	หมายถึงเม็ดทรายขนาดปานกลาง
coarse-grained	หมายถึงเม็ดทรายขนาดหยาบ
very coarse-grained	หมายถึงเม็ดทรายขนาดหยาบมาก

<u>เกี่ยวกับการคัดขนาด (sorting)</u>

เติม –ed ต่อท้าย sort จะเปลี่ยนเป็นรูปคำคุณศัพท์ ส่วน คำว่า poorly moderately และ well เป็นกริยาวิเศษณ์ เมื่อนำไปวางข้างหน้าคำคุณศัพท์เพื่อขยาย ทั้งวลีจะเปลี่ยนรูปเป็นคุณศัพท์

poorly sorted	หมายถึงการคัดขนาดไม่ดี
moderately sorted	หมายถึงการคัดขนาดดีปานกลาง
well sorted	หมายถึงการคัดขนาดดีมาก

<u>เกี่ยวกับความกลมมน (roundness)</u>

เติม –ed ท้ายคำว่า round ก็จะกลายเป็นคุณศัพท์ ส่วนคำว่า angular และ subangular เป็นคำคุณศัพท์ ในตัวเองอยู่แล้ว

Angular	หมายถึงมีความเป็นเหลี่ยมมาก
Subangular	หมายถึงมีความเป็นเหลี่ยมบ้าง
subrounded	หมายถึงมีความมนบ้าง
rounded	หมายถึงมีความมนดี
well rounded	หมายถึงมีความมนดีมาก

<u>เกี่ยวกับสารเชื่อมประสาน (cementing material)</u>

คำว่า siliceous calcareous และ ferruginous เป็นคุณศัพท์ เติม –ed หลัง cement เพื่อทำให้เปลี่ยนรูปเป็นคุณศัพท์ ทั้งวลีจะกลายเป็นคำคุณศัพท์

Siliceous cemented	หมายถึงมีสารเชื่อมประสานเป็นซิลิกา
Calcareous cemented	หมายถึงมีสารเชื่อมประสานเป็นคาร์บอเนต
Ferruginous cemented	หมายถึงมีสารเชื่อมประสานเป็นเหล็ก

<u>เกี่ยวกับอัตราของการผุพังอยู่กับที่ (degree of weathering)</u>

เช่นเดียวกัน คือ คำว่า slightly moderately highly และ completely เป็นกริยาวิเศษณ์ ที่เอามาวางหน้าคำว่า weather ที่ถูกเติมด้วย –ed ทั้งหมดจะกลายเป็นคุณศัพท์ และคำว่า fresh เป็นคุณศัพท์

fresh	หมายถึงหินมีเนื้อสด (ไม่ผุพัง)
slightly weathered	หมายถึงหินผุพังเล็กน้อย
moderately weathered	หมายถึงหินผุพังปานกลาง
highly weathered	หมายถึงหินผุพังมาก
completely weathered	หมายถึงหินผุพังโดยสมบูรณ์ (กลายเป็นเนื้อดิน)

<u>เกี่ยวกับแนวแตกถี่ (Fissility)</u>

คำว่า fissile เป็นคำคุณศัพท์ เมื่อเติมกริยาวิเศษณ์ ข้างหน้า ทั้งหมดจะกลายเป็นคุณศัพท์

non-fissile	ไม่มีรอยแตกถี่
slightly fissile	มีรอยแตกถี่เล็กน้อย
clearly fissile	มีรอยแตกถี่ชัดเจน

5.1.4 การเก็บตัวอย่างดินหินจากหลุมเจาะ (Sampling of rock samples)

โดยทั่วไปแล้วการเก็บตัวอย่างดินหินจากหลุมเจาะจะต้องเก็บทุกความลึก 1 เมตร ไม่ว่าหินจะยังไม่เปลี่ยนชนิดก็ตาม หากเป็นตัวอย่างเศษดิน-หิน (cuttings) จะเก็บประมาณ 100-150 กรัม หรือเต็มกำมือ ตัวอย่างที่เก็บขึ้นมาล้างโดยน้ำสะอาดเพื่อให้น้ำโคลนที่พอกอยู่ถูกชะล้างออกไปให้หมดก่อนเพื่อให้สามารถมองเห็นตัวอย่างดิน-หินที่เป็นเนื้อแท้ แล้วตัวอย่างจะถูกนำมาจัดเรียงในถาดเก็บตัวอย่าง (samples tray) เรียงจากความลึกน้อยไปหามากในทิศทางจากซ้ายไปขวาจนหมดแถวในถาด แล้วมาเริ่มใหม่จากซ้ายมาขวา ทำเช่นเดียวกับการเขียนหนังสือ กล่าวคือเริ่มต้นบรรทัดทางซ้ายมือสุด แล้วเขียนไปทางขวาจนสุดบรรทัด แล้วก็มาเริ่มบรรทัดใหม่ (line by line) อย่าเก็บตัวอย่างแบบ zigzag หรือเก็บวนไป-มา เนื่องจากอาจทำให้นักธรณีวิทยาเกิดความสับสนในหินที่เปลี่ยนไป และอาจทำให้การจำแนกชนิด-ความลึกของหินผิดไปจากสภาพความเป็นจริง เช่นเดียวกับการเก็บตัวอย่างแบบแท่งหิน จะใช้ระบบเดียวกันคือความลึกน้อยอยู่ทางซ้ายของช่องในกล่องเก็บตัวอย่าง (sample box) ความลึกมากอยู่ทางขวาของช่อง และอยู่แถวบนสุดในกล่องเก็บแท่งหิน ถ้ากล่องเก็บแท่งหินมีฝาและบานพับ (hinge) ความลึกน้อยสุดของกล่องจะอยู่แถวที่ติดอยู่กับบานพับเสมอ ตัวอย่างที่เก็บจากหลุมเจาะจะถูกตรวจสอบเพื่อจำแนกชนิดของตัวอย่าง (samples examination) โดยนักธรณีวิทยาประจำโครงการ หรือประจำหน่วยงาน รูปที่ 5-26 และรูปที่ 5-27 แสดงลักษณะการจัดวางตัวอย่างดินหินจากหลุมเจาะแบบเศษหิน และแบบแท่งหิน ตามลำดับ

รูปที่ 5-26 แสดงลักษณะการวางตัวอย่างแบบเศษดินหินจากหลุมเจาะอย่างถูกต้อง โดยการวางเรียงจากซ้ายไปขวา และจากบนลงล่าง

รูปที่ 5-27 แสดงลักษณะการวางตัวอย่างหินแบบแท่งหินจากหลุมเจาะอย่างถูกต้อง โดยการวางเรียงจากซ้ายไปขวา และจากบนลงล่าง แถวบนสุดจะอยู่ติดกับบานพับของกล่องใส่ตัวอย่างแท่งหินที่มีฝาปิดเสมอ

5.1.5 ตัวอย่างการบรรยาย Samples Examination

ท้ายบทนี้ ผู้เขียนขอแสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน-หิน ให้ผู้อ่านได้เห็น 2 แบบ คือแบบที่วิเคราะห์ตัวอย่างที่เป็นเศษหิน (รูปที่ 5-28) และแบบที่ 2 เป็นตัวอย่างแบบแท่งตัวอย่างหิน (รูปที่ 5-29) โดยเมื่อวิเคราะห์ตัวอย่างเสร็จตามความลึกที่เจาะแล้ว ให้เขียนกำกับท้ายด้วยว่า End of Hole at depth.....m. ทั้งนี้เพื่อให้ผู้ใช้ข้อมูลได้ทราบว่าตัวอย่างดิน-หิน ของหลุมเจาะ นั้น ๆ ได้ถูกส่งมาให้วิเคราะห์ครบถ้วนตามจำนวนที่ระบุไว้ในข้อมูลของบ่อ

Lithologic Log

Department of Groundwater Resources,
26 Soi Thanpuying Pahon, Lad Yao,
Chatuchak, Bangkok 10900

Project : Aquifer Storage and Recovery
Mun-Chi River Basins

Well number : MC 10 UTM E : 264847 UTM N : 1809397
Location : Ban Thaphranao School, Tambon Thaphra, Amphoe Mueang, Changwat Khon Kaen
Drilled depth: 102 Metre Developed depth : 60 Metre Well diamiter : 4 In.
Blank casing : 0-40 Metre Perforated casing : 40-56 Metre
Drilled by : Sahabadan Co.Ltd. Date completed : 10 Jan 07 Logged by : Mahippong Worakul

Depth (m.)		Rock unit	Lthologicdescription	Remarks
From	To			
0	2	Clay	brownish grey, slightly silty, non-plastic, loose	
2	10	Clayey Sand	light reddish brown, 30% clayey, fine to medium-grained, moderately sorted, subangular to subrounded, composed mostly of quartz, some feldspar and opaque minerals, intercalated with yellowish grey, moderately plastic Clay at depth 4-5 m.	
10	32	Siltstone	light reddish pink, moderately weathered, siliceous cemented, composed mostly of quartz, some feldspar, trace of mica and fe-oxide minerals, brittle	
32	65	Sandstone	light brown, medium to coarse-grained, moderately sorted, subangular to subrounded, siliceous cemented, slightly weathered from 32-40 m., moderately weathered from 40-65 m., siliceous cemented, composed mostly of quartz, some feldspar, fe-oxide minerals, brittle in the upper part, the rest are friable	Perforated casing at 40-56 m.
65	102	Sandstone	dark brown, medium to coarse-grained, moderately sorted, subangular to subrounded, siliceous cemented, fresh to slightly weathered., siliceous cemented, composed mostly of quartz, some feldspar and opaque minerals	
			End of hole at depth 102 m.	

รูปที่ 5-28 แสดงการบรรยายในการวิเคราะห์ตัวอย่างแบบเศษหิน (cuttings)

Lithologic Log

Department of Groundwater Resources,
26 Soi Thanpuying Pahon, Lad Yao,
Chatuchak, Bangkok 10900

Project : Artesian Aquifer Assessment in Northeastern Region of Thailand

Well number : RTA 100 UTM E : xxxxxx UTM N : xxxxxxx
Location : Ban Tangpadpordaeng Amphoe Ban Haed Changwat Khon Kaen
Drilled depth: 200 Metre Developed depth : 200 Metre Well diamiter : 6 In.
Blank casing : ..... Metre Perforated casing : open hole Metre
Drilled by : DGR Date completed : 29 Jun 2008 Logged by : Mahippong Worakul

Depth (m.)		Rock unit	Lthologicdescription	Remarks
From	To			
0	3	Silty Clay	light brownish grey, 25% silty, non-plastic	Top soil unit
3	15	Mudstone	pale pinkish brown, very stiff to hard, limonitic stained on horizontal fracture surface, core recovery 95%, RQD 75% Bedding plane: 5 degrees from horizontal Contact to lower unit: gradational contact	Core loss from 7.5-8.0 m.
15	105	Sandstone	pale reddish brown, fine- to medium-grained, moderately to well sorted, subangular to subrounded, composed mostly of quartz, some feldspar, trace of fe-oxide minerals, siliceous cemented, frequently horizontal fractured occasionally subvertical fractured, moderately weathered core recovery 93%, RQD 35% Bedding plane: 5-8 degrees from horizontal Contact to lower unit: sharp contact	Core loss from 72.0-72.5 m. 101.25-102 m.
105	178	Siltstone	reddish brown, dense, hard, ferruginous cemented, composed mostly of quartz, trace of feldspar, core recovery 96 %, RQD 82% Bedding plane: 7-10 degrees from horizontal Contact to lower unit: sharp contact	Core loss from 108.30-109.5m.
178	200	Sandstone	light reddish brown, medium- to coarse-grained, moderately to well sorted, subrounded to rounded, composed mostly of quartz, some feldspar, trace of fe-oxide minerals, siliceous cemented, commonly horizontal and subvertical fractured, moderately weathered, intercalated with siltstone as 105-178 m. at depth 183-185 m. Core recovery 91%, RQD 60% Bedding plane: 5-7 degrees from horizontal **End of hole at depth 200 m.**	Core loss from 182.2-182.6 m., 193.5-194.2 m..

รูปที่ 5-29 แสดงการบรรยายในการวิเคราะห์ตัวอย่างแบบแท่งตัวอย่างหิน (core samples)

5.2 การหยั่งธรณีฟิสิกส์หลุมเจาะ (geophysical borehole logging)

การหยั่งธรณีฟิสิกส์หลุมเป็นการสำรวจธรณีฟิสิกส์ในแนวดิ่งเพื่อตรวจสอบว่าที่ความลึกตั้งแต่ปากหลุมลงไปจนถึงก้นหลุมมีหินอะไรรองรับบ้าง เป็นหินแข็งหรือหินร่วน หากเป็นหินร่วนจำพวกกรวดทรายที่มักจะมีน้ำบาดาลกักเก็บมีความหนาเท่าไหร่ หากเป็นหินแข็งก็ดูว่าหินแข็งเหล่านั้นพอจะมีรอยแตกที่กักเก็บน้ำบาดาลหรือไม่ และข้อมูลหรือเส้นกร๊าฟจะถูกนำมาประมวลผลร่วมกับข้อมูลจากการวิเคราะห์ดิน-หินตัวอย่างจากหลุมเจาะ นั้น ๆ ประเภทที่ต้องพิจารณากันเมตรต่อเมตรเลยทีเดียว นอกจากนั้นการหยั่งธรณีฟิสิกส์หลุมเจาะยังสามารถระบุคุณภาพน้ำของชั้นหินให้น้ำได้อีกด้วยเช่นชั้นใดเป็นน้ำจืด ชั้นใดเป็นน้ำเค็มทำให้สามารถออกแบบการก่อสร้างบ่อน้ำบาดาลได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนั้นยังใช้ร่วมกับข้อมูลการเจาะของช่างเจาะที่บันทึกไว้ระหว่างการเจาะด้วยเช่นกัน

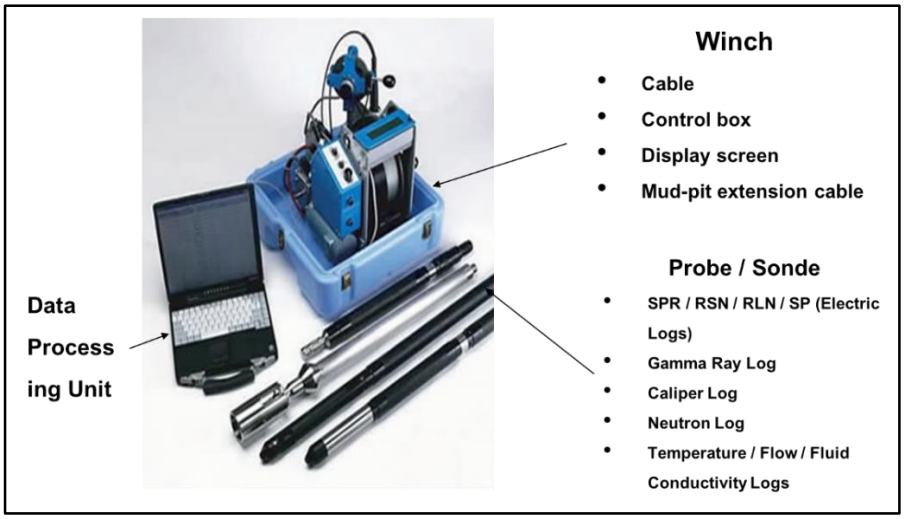
หลักการเบื้องต้นของการหยั่งธรณีฟิสิกส์หลุมเจาะได้แก่การหย่อนหัววัด (probe/sonde) ซึ่งมีสายต่อเชื่อมสัญญาณ (cable) กับเครื่องบันทึกค่าต่างๆ ลงไปสู่ก้นหลุม ในขณะที่หย่อนหัววัดลงไป ก็พยายามปรับตั้งค่าระยะของการอ่านค่า (range) ให้อยู่ภายในช่วงกร๊าฟที่ปรากฏบนหน้าจอให้เหมาะสม ไม่ให้เกินหรือไม่ให้แคบเกินไป เมื่อหัววัดถึงก้นหลุมแล้ว จึงค่อย ๆ ดึงหัววัดขึ้นซึ่งจะเริ่มบันทึกค่าลงในเครื่องบันทึก สมัยก่อนจะเป็นการเขียนกร๊าฟโดยใช้ปากกาสีต่างๆ บนกระดาษกร๊าฟ แต่ในยุคปัจจุบันจะเป็นการบันทึกค่าในเครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา (laptop) ซึ่งสะดวกกว่าในยุคก่อนมาก

อุปกรณ์ที่สำคัญที่ใช้ในการหยั่งธรณีฟิสิกส์หลุมเจาะ ประกอบไปด้วย (รูปที่ 5-30)

(1) หัววัด (probe/sonde) ซึ่งในชุดเครื่องมือหยั่งธรณีฟิสิกส์หลุมเจาะ จะมีหัววัดหลายแบบ เช่น หัววัดเกี่ยวกับความต้านทานไฟฟ้า (resistivity) ความต่างศักย์ไฟฟ้า (electrical potential) จะอยู่ในหัววัดเดียวกัน หัววัดค่ารังสีแกมม่าธรรมชาติ (natural gamma) เพื่อวัด gamma ray log (GRL) จะแยกอีกหัวหนึ่ง หรือหัววัดค่านิวตรอน ก็จะแยกอีกหัวหนึ่งเป็นต้น

(2) ชุดสายสัญญาณและควบคุมการเคลื่อนที่ (cable and control box) จะประกอบด้วยสายสัญญาณที่ม้วนอยู่ในชุดกว้าน (winch) จอแสดงการทำงาน (screen) และสายสัญญาณสำหรับบ่อน้ำโคลน (mud-pit extension)

(3) ชุดประมวลผล (data processing unit)



รูปที่ 5-30 แสดงองค์ประกอบของชุดเครื่องมือหยั่งธรณีฟิสิกส์หลุมเจาะ

การวัดค่าการสำรวจโดยการหยั่งธรณีฟิสิกส์หลุมเจาะจะอาศัยคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของชั้นดินชั้นหินที่เจาะผ่าน คุณสมบัติเหล่านั้นได้แก่ค่าความต้านทานไฟฟ้า (resistivity) การแผ่รังสีแกมมาธรรมชาติ (natural gamma) ค่าความต่างศักย์ธรรมชาติ (spontaneous potential: sp) และคุณสมบัติอื่นๆ อีกหลายประการ รูปที่ 5-31 แสดงประเภทของการหยั่งธรณีฟิสิกส์หลุมเจาะ คุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่ใช้วัด และสภาพของหลุมเจาะที่เหมาะสมสำหรับการวัดค่า เช่น uncased หมายถึงหลุมเจาะที่ยังไม่ได้ลงท่อ fluid filled หมายถึงหลุมเจาะที่มีน้ำโคลนเต็มหลุม most conditions หมายถึงหลุมเจาะลักษณะใดๆ ก็ได้ เป็นต้น และรูปที่ 5-32 แสดงตัวอย่างเส้นกร๊าฟการหยั่งธรณีฟิสิกส์หลุมเจาะ

Type of Log	Potential Uses	Borehole Conditions Required
Spontaneous Potential (SP)	Lithology, correlation, water quality	Uncased, fluid filled
Single-point resistance (SPR)	Lithology, correlation	Uncased, fluid filled
Normal (RSN, LSN, Multi-electrodes)	Lithology, correlation, water quality	Uncased, fluid filled
Gamma	Lithology, correlation	Most conditions
Neutron	Saturated porosity, lithology, correlation, fractures, bonding of casing	Wide range
Acoustic velocity	Character and orientation of fractures, solution openings and bedding	Uncased, fluid filled (mud/water)
Borehole camera (TV Borehole)	Well construction, secondary porosity, lost object	Uncased or case, air or clear fluid
Caliper	Borehole diameter, log correction, well construction, fractures, lithology	Most conditions
Temperature	Fluid movement, identifying plumes, calculation of specific conductance	Fluid filled
Well construction	Numerous techniques for checking casing and completion materials, leakage, borehole deviation	All conditions

รูปที่ 5-31 แสดงประเภท (type) ชนิดของการตรวจวัด (potential uses) และสภาพของการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า และวัดค่ารังสีแกมม่าธรรมชาติในหลุมเจาะ)

<u>หลักการวัดค่าของหัววัด (Probe Measurement)</u>

1) การหยั่งวัดความต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธี single-point resistance (SPR) จะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า (current electrode) สองขั้ว คือ บวกและลบติดอยู่ที่ปลายสายไฟฟ้า ขั้วหนึ่งถูกหย่อนลงไปในหลุมเจาะ สภาพของหลุมเจาะต้องยังไม่มีการลงท่อ (uncased) และมีน้ำหรือโคลนอยู่เต็ม (fluid filled) เพื่อเป็นสื่อทางไฟฟ้า ปล่อยและวัดกระแสไฟฟ้า (ammeter) หรือค่าความต้านทานต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าในชั้นหิน ขณะหย่อนขั้วหัวหยั่งลงหรือดึงขึ้นจากหลุมเจาะ ค่าดังกล่าวจะถูกรายงานต่อเนื่องในรูปของกร๊าฟ ซึ่งเรียกว่า electric log หรือ resistivity log ค่าความต้านทานที่ได้เป็นผลเนื่องจากอิทธิพลของน้ำหรือโคลนเจาะในหลุมเจาะต่อชั้นหิน และต่อความกว้างของหลุมเจาะโดยตรง (ที่มา: รายงานฉบับสมบูรณ์ (เล่มที่ 7/10) โครงการจัดทำมาตรฐานการเจาะ สำรวจ และการพัฒนาน้ำบาดาล, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2551)
2) Electric logging มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นหินที่เจาะผ่านลงไป คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่วัด ได้แก่ศักย์ไฟฟ้าธรรมชาติ (spontaneous potential: SP) และความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (resistivity: R) โดยปกติแล้ว คุณสมบัติทางไฟฟ้าทั้ง 2 แบบนี้ สามารถทำการวัดไปพร้อมกันโดยอาศัยหัววัดเดียวกัน
3) Spontaneous potential logging สามารถกระทำโดยการหย่อนขั้วไฟฟ้า (potential electrode) ลงไปในหลุมเจาะ 1 ขั้ว และปักไว้บนผิวดิน 1 ขั้ว ได้แก่ ขั้ว M และ N เพื่อวัดศักย์ของไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติรอบ ๆ ชั้นหินในหลุมเจาะ โดยไม่ต้องมีการปล่อยกระแสไฟฟ้าใด ๆ ทั้งสิ้น ปกติศักย์ไฟฟ้าธรรมชาตินี้จะมีค่าน้อยมาก หน่วยที่ใช้วัดโดยปกติจะเป็นมิลลิโวลต์ สาเหตุของการเกิดศักย์ไฟฟ้าธรรมชาติก็เนื่องมาจากการไหลของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในบริเวณที่เป็นรอยต่อระหว่างชั้นหินเนื้อพรุนกับชั้นหินเนื้อแน่นซึ่งสัมผัสกับน้ำโคลนอยู่อีกต่อหนึ่ง การไหลของกระแสไฟฟ้านี้เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าแม่เหล็ก (electromagnetic force: e.m.f.) ซึ่งมีต้นกำเนิดมาจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างน้ำในหินกับน้ำโคลนในบริเวณรอยต่อดังกล่าว แนวของแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้จะเริ่มจากน้ำโคลนในหลุมเจาะจะซึมผ่านผนังบ่อเข้าสู่ชั้นหินเนื้อพรุนแล้วทะลุรอยต่อระหว่างชั้นหินเข้าสู่ชั้นหินเนื้อแน่น ซึ่งมีชื่อเรียกเป็นภาษาอังกฤษว่า invasion zone แล้วจึงผ่านเข้าสู่น้ำโคลนอีกเป็นวงจร รูปที่ 5-32 แสดงลักษณะการเกิด Spontaneous Potential ในหลุมเจาะ
4) Resistivity logging โดยหลักการแล้ว เครื่องมือจะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า (electrodes) จำนวน 4 ตัว โดยขั้วไฟฟ้า 2 ตัวจะทำหน้าที่เป็นตัวปล่อยและรับกระแสไฟฟ้า (current electrodes) และทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าอีก 2 ตัว ซึ่งทำหน้าที่เป็นคู่วัดความต่างศักย์ไฟฟ้า (potential electrodes) การจัดขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 ตัวนี้ อาจจะจัดได้เป็น 3 รูปแบบ กล่าวคือ short normal, long normal และ lateral electrode arrangements การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแบบ resistivity short normal: RSN) และแบบ resistivity long normal: RLN) มีหลักการคือมีขั้วปล่อยกระแสไฟฟ้าขั้ว A และขั้ว B ที่จัดวางอยู่ในหัววัดมีระยะห่างกัน 16 นิ้ว และ 64 นิ้ว ตามลำดับ ซึ่งจะวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าระหว่างขั้วปล่อยกระแสไฟฟ้า หากเป็น RSN ค่าการวัดค่าจะวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าลึกเข้าไปในชั้นหินได้น้อยกว่าแบบ RLN แต่ค่าจากการวัดแบบ RLN จะไม่สามารถวัดชั้นที่มีความหนาน้อย ๆ ได้หรือมองจากเส้นกร๊าฟแล้วไม่ชัดเจน รูปที่ 5-33 แสดงการจัดวางขั้วไฟฟ้าในหัววัดรูปแบบต่างๆ
5) ข้อปฏิบัติขณะหย่อนหัววัด (probe) เพื่อวัดค่าทางไฟฟ้า เมื่อหย่อนหัววัดลงจากปากหลุมเจาะจะพยายามปรับเส้นกร๊าฟอยู่ชิดซ้ายของกรอบมาตรของการอ่านค่า (range of reading scale) แต่จะไม่

ปรับให้ชิดขอบมาเกินไปนัก ทั้งนี้เพื่อให้เป็นเส้นที่แทนค่าหน่วยหินที่เป็นดินเหนียวหรือหินดินดาน (clay line/shale line) ซึ่งผู้ปฏิบัติงานต้องดูตัวอย่างดิน-หินที่ได้จากการเจาะไว้ก่อนด้วยก่อนลงมือดำเนินการหยั่งธรณีฟิสิกส์หลุมเจาะ แกนซ้ายสุดจะมีค่าเท่ากับศูนย์ เส้นกร๊าฟที่ "เตะ (kick)" ไปทางขวาจะหมายถึงหน่วยหินที่มีค่าความต้านทานมากกว่าดินเหนียวหรือหินดินดาน ซึ่งอาจแปลความหมายได้ว่าแจเป็นกรวดทราย หรือหินทรายแป้ง หินทราย หินกรวดมน หากเป็นชั้นกรวดทราย ก็น่าจะเป็นชั้นหินให้น้ำ ส่วนเส้นกร๊าฟที่เตะไปทางซ้ายของ shale/clay line อาจแปลความหมายได้ว่าเป็นชั้นน้ำเค็ม

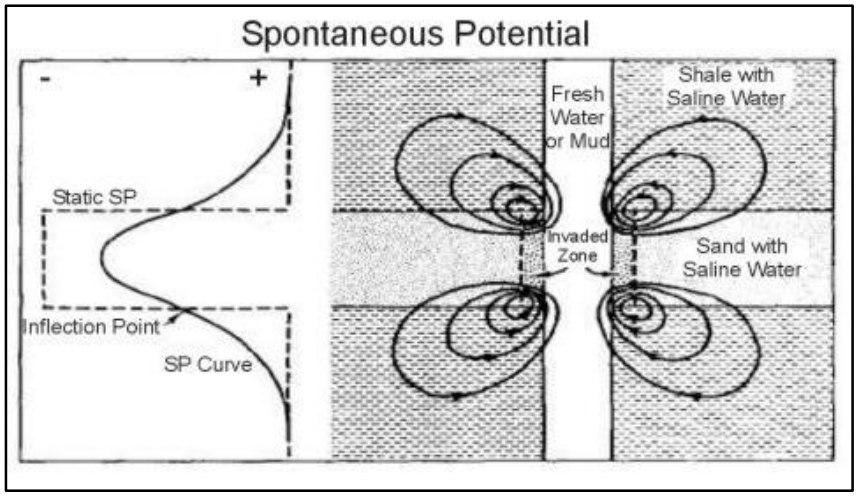
6) การหยั่งวัดแกมม่าธรรมชาติ (natural-gamma) อาศัยหลักการที่ว่าหินแต่ละชนิดจะมีปริมาณกัมมันตภาพรังสีที่แตกต่างกัน กัมมันตภาพรังสีที่สามารถตรวจวัดในบ่อน้ำบาดาลได้ คือ การวัดแกมม่าธรรมชาติ (natural-gamma) จะได้ natural-gamma curve หรือ gamma-ray curve ซึ่งต่างจากการวัดรังสีแกมม่า-แกมม่า (gamma-gamma) การวัดรังสีนิวตรอน (neutron) แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการวัดแกมม่าธรรมชาติ ในธรรมชาติหินเกือบทุกชนิดจะปล่อย natural gamma ออกมาจากแร่ที่มีส่วนประกอบของธาตุโพแทสเซียม ยูเรเนียม และธอเรียม ซึ่งปกติจะมีอยู่มากในชั้นดินเหนียว ในหินดินดาน และมากกว่าในชั้นทราย หินทราย และหินปูน **ในหน่วยหินที่มีรังสีแกมม่าธรรมชาติอยู่มากเช่นหินดินดานหรือดินเหนียว เส้นกร๊าฟจะเตะ (kick) ไปทางขวาเนื่องจากมีรังสีแกมม่าธรรมชาติเดินทางถึงหัววัดในปริมาณที่มาก** (ดูภาพประกอบที่ รูปที่ 5-34) รังสีแกมม่ามีคุณสมบัติสามารถแผ่กระจายและทะลุทะลวงผ่านวัตถุต่างๆ ได้แม้กระทั่งบ่อเจาะที่ลงท่อกรุท่อกรองแล้ว (cased hole) ทั้งที่เป็นท่อเหล็กและท่อพีวีซี ผลการหยั่งวัดในรูปของ natural-gamma curve ทางด้านน้ำบาดาล นำไปแปลค่าเพื่อแบ่งแยกดินเหนียวจากชั้นกรวดทรายหรือชั้นน้ำหรือแยกชั้นหินดินดานออกจากชั้นกรวดทรายได้อย่างดี นักอุทกธรณีวิทยาที่มีประสบการณ์มักกล่าวว่า **"กร๊าฟแกมม่าเตะซ้าย นี่ใช่เลย"** แต่เส้นกร๊าฟ natural-gamma ไม่สามารถบอกรายละเอียดเกี่ยวกับคุณภาพน้ำได้

7) โดยทั่วไปแล้วหัววัดเกี่ยวกับค่าทางไฟฟ้าจะสามารถวัดค่า SP SPR RSN และ RLN ได้จากการหย่อนลง-ขึ้นหลุมเจาะในคราวเดียวกัน ส่วนการวัดค่า Gamma Ray Log: GRL) ต้องใช้หัววัดแยกออกมา แต่ในบางยี่ห้อก็สามารถวัดได้ 5 ค่า ในหัวเดียวกัน ต่างกันที่วัดตอนหย่อนลงและดึงขึ้นแยกค่ากัน หรือบางรุ่น บางยี่ห้อสามารถวัดค่าและบันทึกค่าไปได้พร้อม ๆ กัน ทำให้ประหยัดเวลาไปได้พอสมควร โดยเฉพาะบ่อที่มีความลึกมาก ๆ

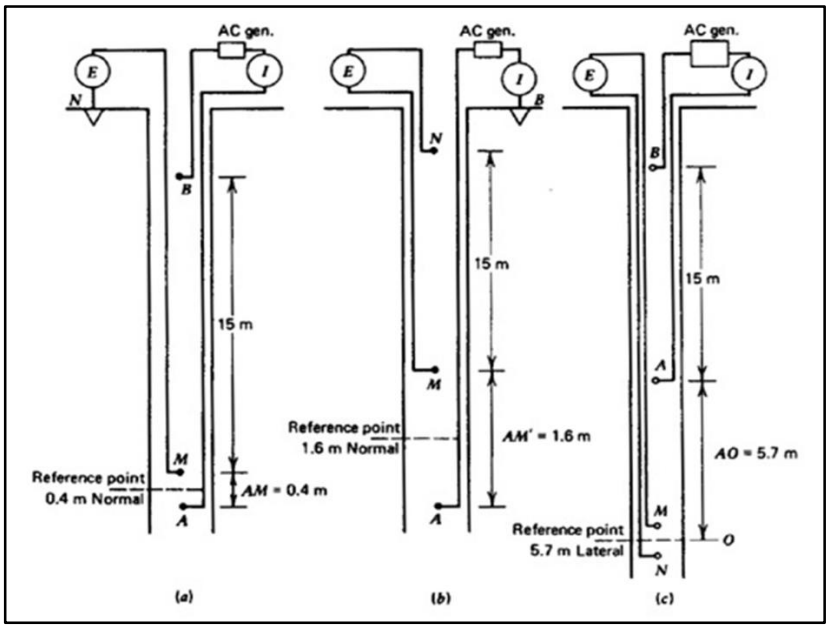
8) การแปลความหมายข้อมูลว่าแต่ละชั้น แต่ละช่วงความลึก จะใช้เส้นกร๊าฟของการวัดหลายๆ ค่ามาวินิจฉัยร่วมกัน (รูปที่ 5-34)

9) Spontaneous Potential Log จะบอกถึงคุณภาพน้ำกร่อย-จืด-เค็ม และถ้าเป็นหินที่มีรูพรุนแต่มีน้ำเค็มกักเก็บอยู่ เส้นกร๊าฟจะเตะ (kick) ไปทางซ้ายของเส้น shale line ค่อนข้างมากเนื่องจากมีความต่างศักย์มากระหว่างน้ำบาดาลเค็มกับน้ำโคลนที่เตรียมจากน้ำจืด หากเป็นชั้นหินร่วนที่มีน้ำจืดกักเก็บอยู่เส้นกร๊าฟ SP จะโป่งหรือเตะไปทางขวาจนมีคำสอนในหมู่นักธรณีวิทยารุ่นเก่าจากกองน้ำบาดาลกรมทรัพยากรธรณีว่า **"ถ้า SP เตะขวา คว้าไว้ก่อน"** หมายความว่าหากลงท่อรับน้ำในช่วงนี้ ได้น้ำบาดาลจืดแน่นอน (จากบทความบน Facebook Jade Julawong, 1 พฤษภาคม 2564) และการกำหนดช่วงท่อรับน้ำควรให้อยู่ระหว่างจุด **infection point** ของเส้นกร๊าฟ (รูปที่ 55-32)

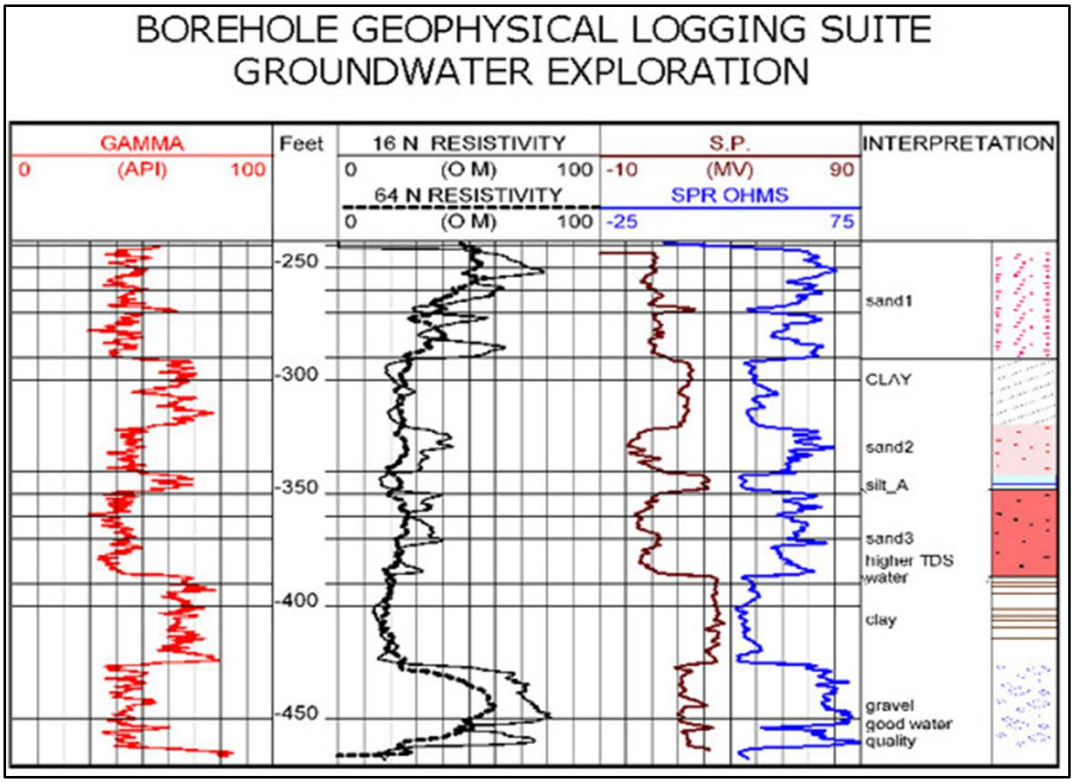
10) Resistivity Logs จะบอกถึงชนิด ความหนาของชั้นหิน และบอกถึงคุณภาพน้ำกร่อย-จืด-เค็มได้เช่นเดียวกัน



รูปที่ 5-32 แสดงลักษณะการเกิด Spontaneous Potential ในหลุมเจาะ



รูปที่ 5-33 แสดงการจัดวางขั้วไฟฟ้าในหัววัดรูปแบบต่างๆ (a) Short Normal Resistivity (b) Long Normal Resistivity และ (c) Lateral Resistivity



รูปที่ 5-34 แสดงตัวอย่างเส้นกร๊าฟและการแปลความหมายการหยั่งธรณีฟิสิกส์หลุมเจาะโดยการการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า และวัดค่ารังสีแกมม่าธรรมชาติในหลุมเจาะ

คำถาม จากเส้นกร๊าฟ Geophysical Borehole Logging ข้างบน (รูปที่ 5-34) หากต้องการจะลงท่อรับน้ำ (screen/perforated casing) ให้อธิบายว่าหากต้องการให้บ่อน้ำบาดาลได้รับน้ำให้ได้ปริมาณสูงสุด จะลงท่อรับน้ำในช่วงความลึกประมาณเท่าใด,ร้อมเหตุผลประกอบ โดยใช้มาตราส่วนความลึก (เป็นหน่วยฟุต) จากที่เห็นในภาพ โดยให้ลงท่อรับน้ำได้มากกว่า 1 ช่วง

คำตอบ

1. ช่วงความลึกประมาณ 250-290 ฟุต เนื่องจากเป็นชั้นทราย ดูจากกร๊าฟแกมม่า (เส้นสีแดง) เตะไปทางซ้าย กร๊าฟ SPR เตะไปทางขวา
2. ช่วงความลึกประมาณ 320-340 ฟุต เนื่องจากเป็นชั้นทราย ดูจากกร๊าฟแกมม่า (เส้นสีแดง) เตะไปทางซ้าย กร๊าฟ SPR เตะไปทางขวา และกร๊าฟ SP เตะไปทางซ้าย
3. ช่วงความลึกประมาณ 350-390 ฟุต เนื่องจากเป็นชั้นทราย ดูจากกร๊าฟแกมม่า (เส้นสีแดง) เตะไปทางซ้าย กร๊าฟ SPR เตะไปทางขวา และกร๊าฟ SP เตะไปทางซ้าย
4. ช่วงความลึกประมาณ 425-450 ฟุต เนื่องจากเป็นชั้นทราย ดูจากกร๊าฟแกมม่า (เส้นสีแดง) เตะไปทางซ้าย กร๊าฟ SPR เตะไปทางขวา และกร๊าฟ SP เตะไปทางซ้าย

บทที่ 6
การออกแบบและก่อสร้างบ่อน้ำบาดาล
(Groundwater Well Design and Construction)

6.1 การออกแบบก่อสร้างบ่อน้ำบาดาล (well construction design)

การออกแบบก่อสร้างบ่อน้ำบาดาลเป็นกระบวนการที่สำคัญมาก เนื่องจากหากออบแบบไม่ดีวางท่อรับน้ำ (screen/perforated casing) ไม่ตรงกับชั้นหินให้น้ำจะทำให้น้ำเข้าบ่อน้อย ประสิทธิภาพการให้น้ำของบ่อจะลดลงอย่างมาก หรือกรณีที่เป็นชั้นที่ให้น้ำเค็มสลับกับชั้นที่ให้น้ำจืดหากออกแบบการก่อสร้างไม่ดีพอ หรือวางท่อรับน้ำผิดพลาด และออกแบบการใช้ชั้นดินเหนียวหรือเบนโทไนต์อัดเพื่อกันซึมไม่ดีพอ อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้น้ำเค็มไหลเข้าบ่อ บ่อน้ำบาดาลนั้นก็ใช้งานไม่ได้ ต้องอุดกลบบ่อทิ้งไปในที่สุด

สำหรับผู้เขียนแล้ว ในการออกแบบก่อสร้างบ่อน้ำบาดาลแต่ละบ่อ ผู้เขียนจะใช้ข้อมูล 3 ส่วนมาประกอบในการพิจารณา ได้แก่

(1) ข้อมูลชั้นดินชั้นหินที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่าง (samples examination)

(2) ข้อมูลจากการหยั่งธรณีฟิสิกส์หลุมเจาะ จะพิจารณากร๊าฟแต่ละประเภทร่วมกัน (ตามรูป 5-34)

(3) ข้อมูลจากการบันทึกของช่างเจาะ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

- อัตราการเจาะทะลวง (Rate of Penetration: ROP) ซึ่งช่างเจาะจะบันทึกไว้ว่าในการเจาะแต่ละก้านหรือแต่ละเมตรใช้เวลากี่นาที ซึ่งส่วนนี้จะบอกเราได้ว่าช่วงความลึกไหนเป็นหินแข็งซึ่งเจาะยากจะใช้เวลานาน หินแข็งที่มีรอยแตกจะเจาะลงได้เร็วกว่า หรือหากเป็นหินร่วน เมื่อเจาะในชั้นดินเหนียวจะใช้เวลานานเนื่องจากมีความเหนียวสูงและมักจะจับพอกที่หัวเจาะทำให้เจาะได้ช้า แต่หากเจาะในชั้นกรวดทรายจะเจาะได้ง่ายและเร็วกว่า ดังนั้นช่วงความลึกใดที่มีค่า ROP ต่ำ จะเป็นช่วงที่เหมาะสมในการวางตำแหน่งท่อรับน้ำซึ่งหากเป็นชั้นหินร่วนที่เป็นทรายหรือกรวด ถ้าเป็นทรายละเอียดก็จะเลือกใช้ท่อรับน้ำที่เป็นท่อกรองพันลวด (screen casing) หากเป็นตะกอนขนาดหยาบหรือรอยแตกในหินก็จะเลือกใช้ท่อรับน้ำที่เป็นท่อเซาะร่อง (perforated casing)
- ข้อมูลการบันทึกน้ำโคลน (mud logging) ที่ช่างเจาะจะบันทึกไว้เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของน้ำโคลน เช่นเมื่อเจาะถึงชั้นหินให้น้ำซึ่งน้ำมีแรงดันน้อยกว่าแรงดันของน้ำโคลนที่ใช้เจาะ (unconfined aquifer) น้ำโคลนจะไหลเข้าไปในชั้นหินให้น้ำ เกิดการสูญเสียปริมาณน้ำโคลนในระบบหมุนเวียนน้ำโคลน (loss of mud circulation) ช่างเจาะก็ต้องผสมน้ำโคลนเพิ่มให้พอเพียงต่อระบบหมุนเวียน แต่หากเจาะถึงชั้นให้น้ำที่น้ำมีแรงดันมากกว่าแรงดันน้ำโคลน (confined aquifer) น้ำจากชั้นหินให้น้ำจะไหลเพิ่มขึ้นในระบบหมุนเวียนน้ำโคลน (excess of mud circulation) ความเข้มข้นและความหนืดของน้ำโคลนจะลดลง ช่างเจาะก็ต้องเติมผงโคลนเพื่อให้น้ำโคลนมีความเข้มข้นที่เหมาะสมกับความสามารถในการนำตัวอย่างดิน-หินขึ้นมาจากก้นบ่อ แต่ทั้งข้อมูล loss circulation และ excess circulation จะบอกให้เรารู้ว่าช่วงความลึกนั้นๆ เป็นช่วงที่ชั้นดินชั้นหินมีรูพรุน น่าจะเป็นชั้นหินให้น้ำ เราก็จะเลือกวางท่อรับน้ำ ณ ช่วงความลึกนั้น ๆ

การออกแบบเพื่อก่อสร้างบ่อน้ำบาดาล (well construction design) ที่สมบูรณ์นั้น จะประกอบด้วยการออกแบบการวางท่อรับทราย (sand collector/sump) ท่อกรุ (blank casing) ท่อกรองพันลวดหรือท่อเซาะร่อง (screen or perforated casing) จำนวนกี่ท่อน แต่ละท่อนอยู่ที่ความลึกช่วงใดบ้าง ซึ่งส่วนนี้เรียกว่าการออกแบบการวางท่อ (casing program design) ส่วนต่อไปคือออกแบบว่าจะลงกรวดกรุจากความลึกใดถึงช่วงความลึกใด ลงชั้นดินเหนียวหรือเบนโทไนต์อัดกันซึม (clay/bentonite Seal) ในช่วงความลึกใด จะใส่โครงบังคับท่อ (centralizer) เพื่อบังคับให้ท่ออยู่กึ่งกลางบ่อกี่ชิ้น ห่างกันช่วงละกี่เมตร การกำหนดช่วงความลึกการเทซีเมนต์ป้องกันการปนเปื้อนบริเวณปากบ่อ (cement core) การก่อสร้างฐานหรือชานบ่อ (cement slab) ล้วนอยู่ในขั้นตอนการออกแบบการก่อสร้างบ่อน้ำบาดาลทั้งสิ้น

6.2 แบบมาตรฐานการก่อสร้างบ่อน้ำบาดาล

องค์ประกอบมาตรฐานในการก่อสร้างบ่อน้ำบาดาลในหินร่วน (รูปที่ 6-1)

- ท่อกรุ (blank casing)
- ท่อรับน้ำ (screen/perforated casing)
- ท่อรับทราย (sand collector/sump)
- ท่อปิดปลายบ่อ (well point/bottom cap/bullnose)
- โครงบังคับท่อ (centralizer) (รูปที่ 6-2)
- กรวดกรุ (gravel pack)
- ดินเหนียวหรือเบนโทไนต์อัดกันซึม (clay/bentonite seal)
- แกนซีเมนต์บ่อ (cement core)
- ชานบ่อหรือฐานบ่อซีเมนต์ (cement slab)
- ฝาปิดบ่อ (locking lid)

6.2.1 แบบมาตรฐานของบ่อน้ำบาดาลในหินร่วน

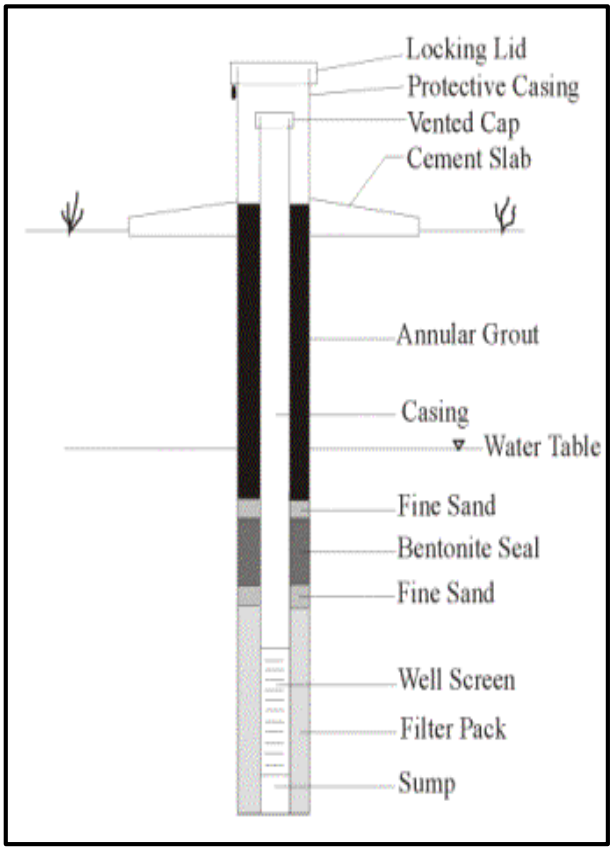
- จะติดตั้งท่อปิดปลายบ่อ (bull nose) ที่ต่อเชื่อมกับท่อรับทราย (sand collector) ที่ยาวไม่น้อยกว่า 3 เมตร
- ต่อเชื่อมท่อรับทรายด้วยท่อรับน้ำ (well screen) ถ้าความยาวของท่อรับน้ำเท่ากับความหนาของชั้นหินให้น้ำ บ่อน้ำบาดาลแบบนี้จะเรียกว่า fully penetrating well น้ำจะเข้าบ่อแบบสม่ำเสมอตั้งแต่เริ่มสูบ การไหลมักจะเป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) แต่ถ้าความยาวของท่อรับน้ำน้อยกว่าความหนาของชั้นหินให้น้ำ จะเรียกบ่อน้ำบาดาลแบบนี้ว่า partially penetrating well น้ำจะเข้าบ่อแบบรวดเร็วและรุนแรง (turbulent flow) ตั้งแต่เริ่มสูบซึ่งอาจทำความเสียหายให้กับใบพัดของเครื่องสูบน้ำไฟฟ้าแบบจุ่มใต้น้ำได้ง่าย แต่เมื่อเวลาผ่านไปการไหลของน้ำเข้าสู่บ่อจะเป็นแบบราบเรียบ (laminar flow)
- หากมีชั้นน้ำบาดาลชั้นเดียว หลังจากลงท่อรับน้ำแล้วก็จะต่อท่อกรุยาวไปจนถึงปากบ่อโดยให้ปลายท่ออยู่เหนือพื้นดินประมาณ 1 เมตร
- ทุกๆ 12-15 เมตร จะติดตั้งโครงบังคับท่อ (centralizer) เพื่อประคองให้บ่อน้ำบาดาลอยู่ตรงกลาง (center) ของหลุมเจาะเพื่อที่จะสามารถลงกรวดกรุได้อย่างสม่ำเสมอและน้ำบาดาลสามารถเข้าได้ทุกทิศทางด้วยอัตราที่เท่ากัน
- การลงกรวดกรุ (gravel packing หรือ filter packing) จะลงจากก้นหลุมเจาะขึ้นมาจนอยู่เหนือระดับท่อรับน้ำประมาณ 2-3 เมตร จากนั้นจะกรุรอบบ่อด้วยดินเหนียวหรือเบนโทไนต์ (clay or bentonite seal) ขึ้นมาจนถึงความลึก 6 เมตรจากผิวดิน

- หากชั้นน้ำบาดาลมีหลายชั้น จะลงกรวดกรุรอบ ๆ ท่อรับน้ำทุกช่วง แล้วลงกรวดเหนือขึ้นมาจากท่อรับน้ำประมาณ 2-3 เมตรแล้วกรุรอบบ่อด้วยดินเหนียวหรือเบนโทไนท์จนถึงด้านล่างของท่อรับน้ำที่อยู่ถัดขึ้นมา แล้วจึงลงกรวดกรุรอบท่อรับน้ำชั้นถัดขึ้นมา ปฏิบัติเช่นนี้จนถึงท่อรับน้ำชั้นบนสุด แล้วจึงกรุรอบบ่อด้วยดินเหนียวหรือเบนโทไนต์ (clay or bentonite seal) ขึ้นมาจนถึงความลึก 6 เมตรจากผิวดิน
- วัตถุประสงค์ของการการลงกรวดกรุคือการเพิ่มประสิทธิภาพการจ่ายน้ำของบ่อ โดยกรวดที่กรุอยู่รอบบ่อจะทำหน้าที่เสมือนบ่อน้ำบาดาลอีกบ่อหนึ่งซึ่งหุ้มบ่อจริงไว้ **บ่อเทียมนี้จะประกอบด้วยกรวดที่มีรูพรุนสม่ำเสมอ (uniform pore space) และมีความซึมได้ (permeability) สูง ซึ่งยอมให้น้ำผ่านได้มากที่สุด** นอกจากนั้นยังช่วยกรองตะกอนละเอียดไม่ให้ไหลเข้าสู่บ่อน้ำบาดาล ซึ่งอาจทำให้บ่อน้ำบาดาลเกิดการอุดตันได้
- การลงกรวดกรุนั้น จะลงหรือไม่ลงกรวดกรุ หรือหากต้องลงกรวดกรุจะเลือกกรวดขนาดเท่าใดจึงจะทำให้น้ำเข้าสู่บ่อน้ำบาดาลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ต้องมีการวิเคราะห์ขนาดตะกอนที่ประกอบเป็นชั้นหินให้น้ำโดยวิธี sieve analysis เสียก่อน (รูปที่ 6-3 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ขนาดตะกอนโดยวิธี sieve analysis และรูปที่ 6-4 แสดงตัวอย่างของเส้นกร๊าฟที่ได้จากการวิเคราะห์ขนาดตะกอน)
- การวิเคราะห์ขนาดตะกอนโดยวิธี sieve analysis โดยเครื่องร่อนตะแกรง (sieve shaker: รูปที่ 5-3) ก่อนเพื่อการเลือกวิธีกรุกรวด เราจะคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของขนาดตะกอน (coefficient of uniformity: CU) ซึ่งคำนวณโดยใช้สูตร CU = D60/D10 (รูปที่ 6-4) ซึ่งจะบ่งบอกถึงการกระจายขนาดของเม็ดตะกอนที่ประกอบเป็นชั้นหินให้น้ำนั้น หากค่า CU น้อยกว่า 4 จะหมายถึงตะกอนมีการคละขนาดไม่ดี เช่นมีทั้งตะกอนทรายขนาดละเอียดไปจนถึงกรวดหยาบ ในกรณีนี้จะใช้วิธีที่เรียกว่า natural gravel packing คือการใช้แรงดันลมหรือแรงน้ำเป่าหรือกวนหรือเขย่าให้ตะกอนขนาดละเอียดออกไปไกลๆจากผนังบ่อ จะเหลือแต่ตะกอนขนาดหยาบอยู่ข้างบ่อเหมือนการลงกรวดกรุแบบหนึ่ง
- หากค่า CU มากกว่า 4–6 แสดงว่าตะกอนที่ประกอบเป็นชั้นหินให้น้ำมีการคละขนาดดี คือมีขนาดไล่เลี่ยกัน จึงต้องใช้วิธีกรุกรวดแบบ artificial gravel packing กล่าวคือนำกรวดจากภายนอกมาใช้เป็นวัสดุกรวดกรุ
- จากปากบ่อให้เทซีเมนต์ลงในช่องว่างระหว่างผนังบ่อและผนังท่อกรุ (annular grouting) เพื่อป้องกันไม่ให้สารปนเปื้อนจากผิวดินเข้าไปสู่บ่อน้ำบาดาลได้ (sanitary seal)

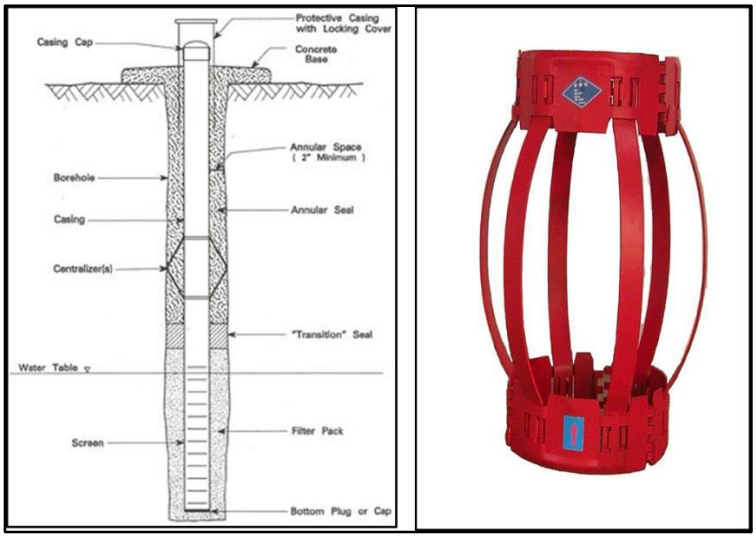
6.2.2 แบบมาตรฐานของบ่อน้ำบาดาลในหินแข็ง

- ลงท่อกรุไปจนถึงความลึกเริ่มต้นของหินแข็ง หากชั้นหินให้น้ำเป็นหินแข็งมาก มีความมั่นคง (high stability) สูง ก็จะไม่ใส่ท่อรับน้ำเพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย เรียกว่าบ่อเปลือย (opened hole)
- หากชั้นหินให้น้ำเป็นหินที่ไม่แข็งมากนัก หรือบริเวณใกล้เคียงมีการระเบิดหินเพื่ออุตสาหกรรม จะใส่ท่อรับน้ำลงไปจนตลอดความลึกของชั้นหินให้น้ำเพื่อป้องกันบ่อพัง และในกรณีนี้มักจะใส่กรวดกรุลงไปด้วยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจ่ายน้ำของชั้นหินให้น้ำ รูปที่ 6-5 แสดงรูปแบบของการก่อสร้างบ่อน้ำบาดาลในหินแข็งทั้งแบบที่เป็นบ่อเปิดหรือบ่อเปลือย (opened hole) และบ่อแบบลงท่อรับน้ำ (cased Hole)

- ข้อควรระวังในการพิจารณาในการก่อสร้างบ่อน้ำบาดาลแบบบ่อเปิดได้แก่ชั้นหินแข็งที่เป็นชั้นหินให้น้ำนั้นมีความแข็งจริงหรือไม่ ถ้าไม่แข็งแกร่งจริง เมื่อสูบน้ำไปนาน ๆ แล้ว ชั้นหินให้น้ำอาจถล่มหรือพังเข้ามาในบ่อและจะทำความเสียหายให้กับเครื่องสูบน้ำได้ ในกรณีที่บ่ออยู่ในพื้นที่ที่มีการระเบิดหินเพื่อทำเหมืองหิน ชั้นหินให้น้ำในบ่อเปิดอาจถล่มหรือพังเข้ามาในบ่อจากแรงระเบิดที่เหมืองหินทำการระเบิดหินอย่างต่อเนื่องทุกวันได้ ซึ่งจะเข้ามาปิดช่องทางไม่ให้น้ำไหลเข้าเครื่องสูบได้ หรือกรณีที่ต้องถอนเครื่องสูบขึ้นมาบำรุงรักษาก็จะไม่สามารถถอนเครื่องสูบขึ้นมาได้เนื่องจากถูกหินล็อคไว้

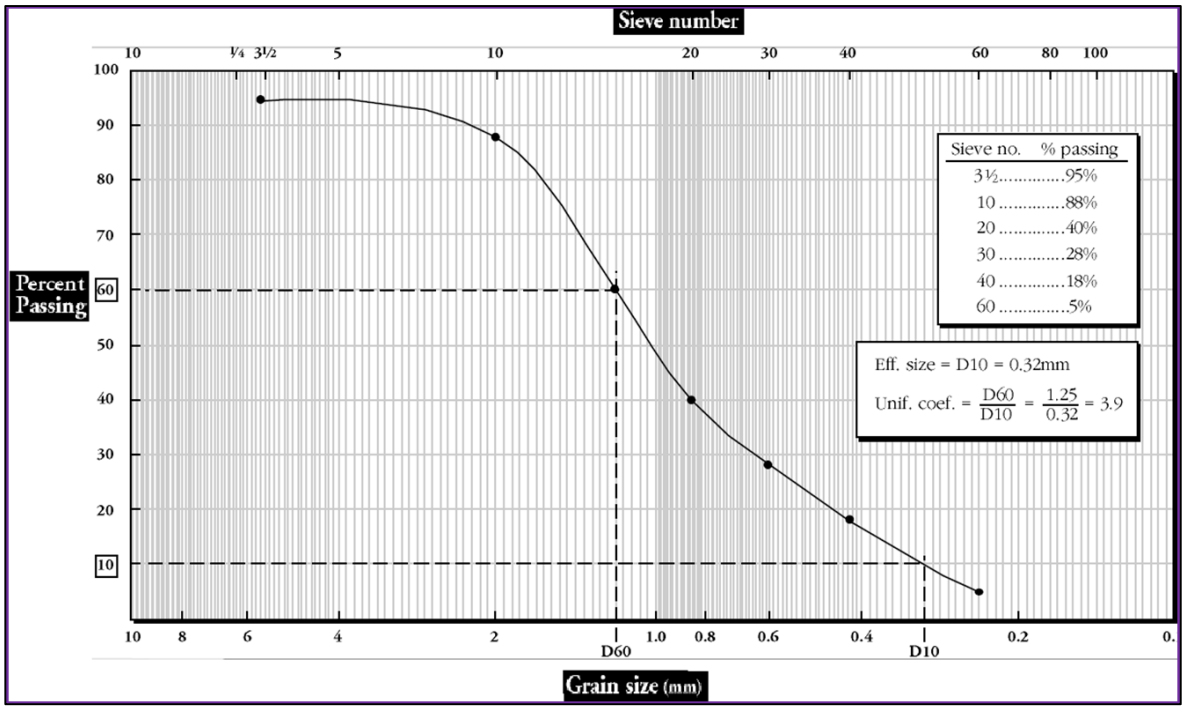


รูปที่ 6-1 แสดงแบบมาตรฐานการออกแบบก่อสร้างบ่อน้ำบาดาลในหินร่วน

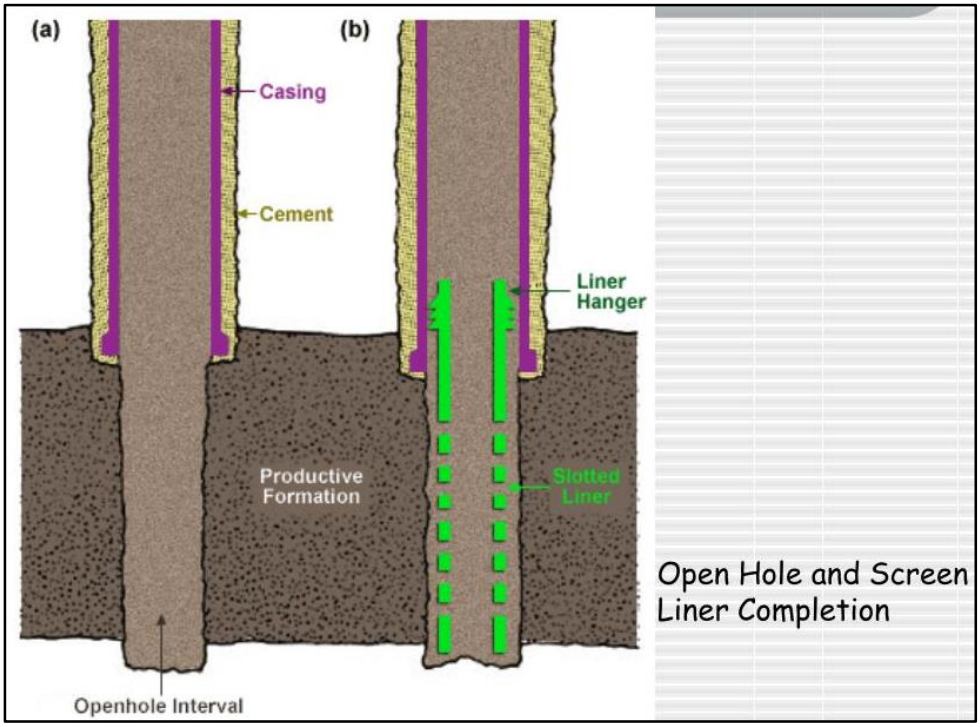


รูปที่ 6-2 แสดงลักษณะการติดตั้งโครงบังคับท่อ และรูปแสดงโครงบังคับท่อ (centralizer) ที่ผลิตจากโรงงาน

รูปที่ 6-3 แสดงอุปกรณ์ตะแกรงร่อน (sieve) ขนาดต่างๆ (ภาพซ้าย-กลาง) และเครื่องร่อนตะแกรง (sieve shaker) (ภาพขวา)



รูปที่ 6-4 แสดงกร๊าฟการกระจายตัวของตะกอนขนาดต่างๆ (grain size distribution curve) เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของขนาดตะกอน (uniformity coefficient: CU)



รูปที่ 6-5 แสดงรูปแบบของการก่อสร้างบ่อน้ำบาดาลในหินแข็งทั้งแบบที่เป็นบ่อเปิดหรือบ่อเปลือย (opened hole) และบ่อแบบลงท่อรับน้ำ (cased hole)

6.3 การก่อสร้างบ่อน้ำบาดาล (Well Construction)

การก่อสร้างบ่อน้ำบาดาลนับเป็นกระบวนการที่ต้องใช้ความระมัดระวังอย่างสูงเนื่องจากหากคำนวณระยะท่อพลาด ท่อรับน้ำ (well screen/perforated casing) อาจจะอยู่ในตำแหน่งที่ไม่ตรงกับชั้นหินให้น้ำ สาเหตุที่เป็นอย่างนี้เพราะว่าการต่อท่อกรุ-ท่อกรองระหว่างท่อน ความยาวจะหายไปประมาณ 10 เซ็นติเมตร ในช่วงที่เป็นข้อต่อ (coupling) หากบ่อลึกมากๆ ความลึกจะร่นไปเยอะ ซึ่งจุดนี้เป็นข้อควรระวัง ขั้นตอนการก่อสร้างบ่อน้ำบาดาล มีดังต่อไปนี้

(1) คว้านบ่อ (reaming) โดยใช้หัวคว้าน (reamer) ให้เส้นผ่านศูนย์กลางบ่อกว้างขึ้นโดยเฉพาะบ่อที่ต้องลงกรวดกรุ ต้องมีช่องว่างระหว่างท่อกรุกับผนังบ่อ (annulus) อย่างน้อย 10 เซนติเมตร ถ้าเป็นบ่อที่ไม่ต้องลงกรวดกรุ เช่นบ่อที่พัฒนาการกรุกรวดแบบธรรมชาติ (natural gravel packing) ต้องมีช่องว่างระหว่างท่อกรุกับผนังบ่อ (annulus) อย่างน้อย 5 เซนติเมตร

(2) กรณีที่ความลึกการเจาะบ่อสำรวจลึกกว่าความลึกของบ่อน้ำบาดาลที่จะก่อสร้าง ถ้าเกิน 6 เมตร ให้อุดกลบก้นบ่อส่วนที่เกินนั้นด้วยวัสดุทึบน้ำเช่นดินเหนียวน้ำจืดเนื้อเนียน หรือซีเมนต์จนได้ความลึกที่กำหนดโดยสภาพของผนังบ่อต้องโล่งและเรียบและต้องมีน้ำโคลนเข้มข้นอยู่ในหลุมเจาะเพื่อกันไม่ให้บ่อพังขณะก่อสร้างบ่อน้ำบาดาล

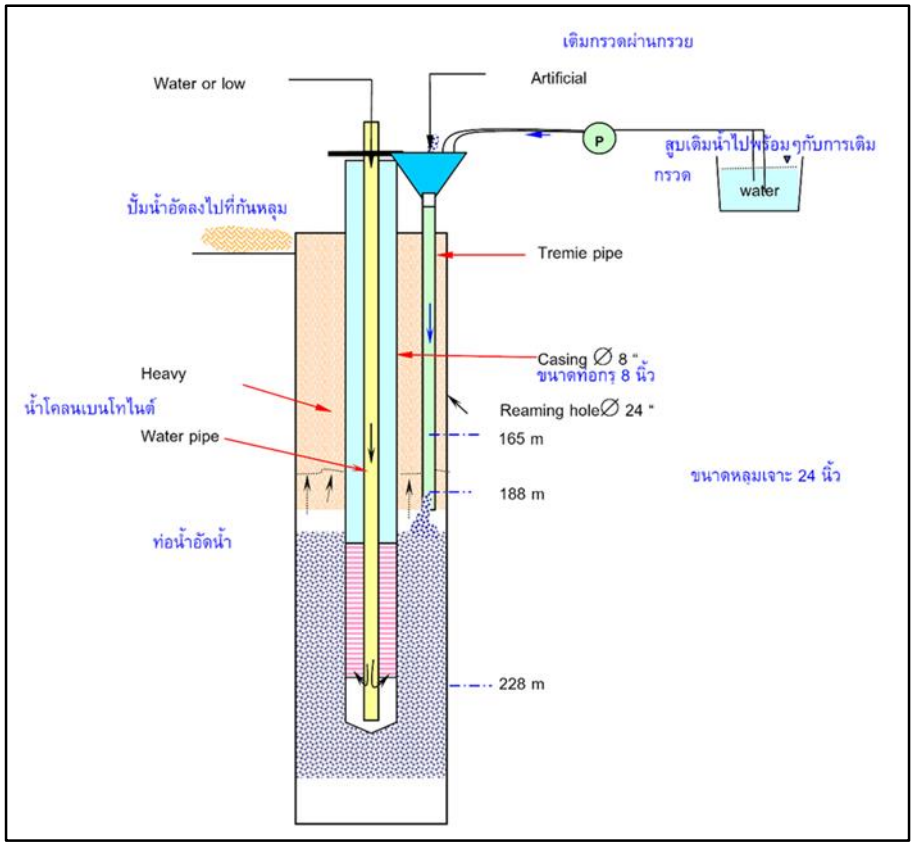
(3) จัดเตรียมสถานที่ให้พร้อมโดยเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ที่ไม่จำเป็นออกจากบริเวณท้ายรถเจาะ เช่นหัวเจาะต่างๆ หรือถาดตัวอย่างดิน-หินจากหลุมเจาะ จัดวางท่อรับทราย ท่อรับน้ำ ท่อกรุ และเขียนตัวเลขลำดับที่จะลงอย่างชัดเจนบนผิวท่อ จัดเตรียมตารางบันทึกการก่อสร้างบ่อน้ำบาดาลเพื่อบันทึกการติดตั้งท่อกรุ ท่อกรอง ท่อรับทราย (ตารางที่ 6-1)

(4) ขั้นตอนการลงท่อกรุ ท่อกรอง มีดังนี้
- ลงท่อรับทราย (sand collector/sump) ที่มีขนาดยาวไม่น้อยกว่า 3 เมตร ที่มีปลายปิด (foot cap/bull nose) ลงเป็นอันดับแรก
- เหนือท่อรับทรายจะเป็นท่อกรองตามการออกแบบที่กำหนดไว้ ท่อกรองควรถูกติดตั้งให้ตรงช่วงความลึกของชั้นหินอุ้มน้ำ
- ติดตั้งโครงบังคับท่อหรือเหล็กกันศูนย์ (centralizer) ที่ช่วงล่างและบนของท่อกรองเพื่อพยุงให้ท่อกรองน้ำอยู่ตรงกลางหลุมเจาะ
- ต่อท่อกรุลงที่เตรียมไว้ไปเรื่อย ๆ หากเป็นท่อเหล็กจะต่อโดยใช้เกลียวของท่อเมื่อสุดระยะเกลียวแล้วให้เชื่อมท่อเข้าด้วยกันเพื่อกันเกลียวท่อขาด หากเป็นท่อพีวีซีปลายข้างหนึ่งจะบานจะใช้วิธีทากาวให้ทั่วถึงแล้วสวมต่อกัน แล้วใช่สกรูขัน 4 ด้านโดยให้น็อตทะลุถึงท่อที่อยู่ชั้นในด้วยเพื่อกันกาวเสื่อมสภาพแล้วท่ออาจขาดออกจากกันในภายหลัง
- ติดตังโครงบังคับท่อ (centralizer) ทุกๆ 12-15 เมตร เพื่อพยุงให้ท่อกรุอยู่ในตำแหน่งศูนย์กลางของหลุมเจาะเพื่อที่จะได้ลงกรวดกรุได้อย่างสม่ำเสมอ ลงท่อกรุจนโผล่พ้นพื้นดินประมาณ 1 เมตร

(5) ขั้นตอนการลงกรวดกรุ มีดังนี้
- สำหรับบ่อที่ความลึกน้อยกว่า 200 เมตร ให้เทกรวดลงระหว่างผนังหลุมเจาะกับท่อกรุได้โดยตรงโดยพยายามเทให้สม่ำเสมอรอบๆ ท่อกรุ ในขณะที่ลงท่อกรุควรทำให้น้ำโคลนเจือจางลงเพื่อลดความหนาแน่นและความหนืดของน้ำโคลน เพื่อที่กรวดที่เติมลงไปจะได้ตกจมลงได้ง่ายโดยเติมน้ำลงในบ่อที่เพิ่งต่อท่อเสร็จโดยผ่านท่อนำน้ำ (educator pipe) และปล่อยให้น้ำ

หมุนเวียน (circulate) ในระบบน้ำโคลนเบา ๆ เพื่อให้กรวดเกิดการเรียงตัวที่ดีขึ้น สำหรับบ่อน้ำบาดาลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อรับน้ำไม่เกิน 150 มิลลิเมตร ลงกรวดจนถึงระดับที่สูงกว่าท่อรับน้ำประมาณ 3 เมตร และสำหรับบ่อน้ำบาดาลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อรับน้ำมากกว่า 150 มิลลิเมตร ให้ลงกรวดจนถึงระดับที่สูงกว่าท่อรับน้ำประมาณ 5 เมตร

- กรณีที่บ่อน้ำบาดาลลึกมากกว่า 200 ม. (รูปที่ 6-6) การกรุกรวดควรเติมผ่านท่อเติมกรวด (tremie pipe) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. หรือใช้วิธีล้างบ่อ (wash down) คือหากวัดดูแล้วพบว่ากรวดทรุดตัวลงไปจากระดับดั้งเดิม ก็เติมกรวดลงไปพร้อมกับสูบน้ำปล่อยลงไปด้วย จะทำให้กรวดจัดเรียงตัวได้ดีขึ้น
- สำหรับระดับต่ำสุดของกรวดกรุอย่างน้อยต้องอยู่ที่ระดับต่ำสุดของท่อกรองหรือถ้าหากอยู่ที่ระดับล่างสุดของท่อรับทรายได้ยิ่งดีหากไม่มีปัญหาเรื่องคุณภาพน้ำบาดาล
- สำหรับบ่อที่เป็นหินแข็งที่ไม่ลงท่อรับน้ำ (opened hole/uncased hole) หรืออาจลงท่อรับน้ำตรงชั้นที่เป็นชั้นหินให้น้ำ (cased hole) จะลงกรวดที่ก้นบ่อ หรือลงกรวดกรุข้างบ่อก็ได้
- เมื่อพ้นระยะกรวดตามที่ออกแบบไว้แล้ว ให้กรุข้างบ่อด้วยดินเหนียวหรือเบนโทไนต์จนถึงระดับความลึก 6 เมตรจากผิวดิน
- จากระดับ 6 เมตรให้เทซีเมนต์ (cement core/annulus grouting) ขึ้นมาจนถึงปากหลุมเจาะ ทั้งนี้เพื่อป้องกันสิ่งปนเปื้อนที่อาจลงไปทางข้างบ่อเวลาน้ำท่วมบ่อ
- เทฐานซีเมนต์หรือชานบ่อ (cement slab) หนา 15 เซนติเมตรเป็นอย่างน้อยรอบบ่อ ชานบ่อหรือฐานซีเมนต์ควรมีความกว้าง*ยาว ไม่น้อยดว่า 1.5 เมตร * 1.5 เมตร และติดป้ายแสดงรายละเอียดของบ่อน้ำบาดาล ที่บอกหมายเลขบ่อ ความลึกของบ่อ วันเดือนปีที่เจาะเสร็จ ระดับน้ำบาดาล ปริมาณน้ำบาดาล และระยะน้ำลด เป็นต้น (รูปที่ 6-7) ประโยชน์ของฐานซีเมนต์คือป้องกันน้ำท่วมบ่อและเป็นพื้นที่สำหรับทำงานเมื่อถึงเวลาที่มาบำรุงรักษาบ่อน้ำบาดาล
- ปิดฝาบ่อน้ำบาดาล (locking lid) ไว้ให้มิดชิดจนกว่าจะมีการติดตั้งเครื่องสูบเสร็จพร้อมใช้งาน
- ปรับภูมิทัศน์รอบบ่อน้ำบาดาลให้สวยงาม หากเป็นไปได้ให้ปรับพื้นที่รอบบ่อให้เป็นทางลาดเอียงเล็กน้อยโดยให้ตำแหน่งบ่อน้ำบาดาลอยู่บนยอดเนินเตี้ยๆ ก็ถือเป็นการสิ้นสุดการก่อสร้างบ่อน้ำบาดาล ปลูกต้นไม้พุ่มเตี้ยที่ปลายเนินเพื่อป้องกันขยะมูลฝอยที่มากับน้ำในขณะเกิดน้ำหลากฉับพลัน ที่ลอยไปใกล้ปากบ่อน้ำบาดาลซึ่งอาจทำให้เกิดการปนเปื้อนได้
- ปัจจุบันนี้ในบางประเทศทางแถบยุโรป และประเทศจีนจะใช้ท่อรับน้ำที่พอกด้วยกรวดกรุสำเร็จรูป (prepacked screen) เพื่อให้ง่ายต่อการก่อสร้างบ่อน้ำบาดาล ไม่ต้องเสียเวลาในการลงกรวดและรอให้กรวดเซ็ทตัว หรือแหล่งกรวดธรรมชาติอาจอยู่ในระยะทางที่ไกล ไม่คุ้มค่าต่อการขนส่ง ซึ่งนับว่าเป็นนวัตกรรมที่น่าสนใจทีเดียว แต่ว่าที่เมืองไทยยังไม่มีการใช้ท่อกรุกรวดสำเร็จรูปเช่นนี้ รูปที่ 6-8 แสดงตัวอย่างของท่อกรุกรวดสำเร็จรูปแบบต่างๆ



รูปที่ 6-6 การเติมกรวดกรุผ่านท่อเติมกรวด (Driscoll, 1987) (ที่มา: รายงานฉบับสมบูรณ์ (เล่มที่ 7/10) โครงการจัดทำมาตรฐานการเจาะ สำรวจ และพัฒนาบ่อน้ำบาดาล)

ตารางที่ 6-1 ตัวอย่างบันทึกการติดตั้งท่อกรุ ท่อกรอง ท่อรับทราย และโครงบังคับสำหรับบ่อชนิดเติมกรวด

PRODUCTION WELL SCREEN INSTALLATION FOR WELL No.DW08

DATE (d/m/y)	TIME	PIPE NO.	LENGTH (m)	TOTAL DEPTH (m)	WELL CONSTRUCTION PIPE NO.	WELL CONSTRUCTION PIPE TYPE	WELL CONSTRUCTION TOTAL	TYPE PIPE	SIZE (Inc.)	CENTRALIZER (Piece)
27/10/00	09.30	1	3.28	3.28						
	10.05	2	3.19	6.47						
	10.25	3	3.15	9.62		**				
	10.40	4	3.14	12.76	26		2.50	Casing	8	
	10.55	5	3.15	15.91	25		8.56	Casing	8	6
	11.55	6	3.15	19.06	24		20.69	Casing	8	
	12.05	7	3.15	22.21	23		32.83	Casing	8	
	12.17	8	3.14	25.35	22		45.01	Casing	8	5
	13.00	9	3.19	28.54	21		57.16	Casing	8	
	14.25	10	12.42	40.96	20		69.28	Casing	8	
	14.55	11	12.20	53.16	19		81.43	Casing	8	4
	15.18	12	12.40	65.56	18		93.64	Casing	8	
	15.42	13	12.15	77.71	17		105.75	Casing	8	
	16.12	14	12.20	89.91	16		117.93	Casing	8	3
	16.40	15	12.15	102.06	15		130.08	Casing	8	
	17.05	16	12.18	114.24	14		142.28	Casing	8	
	17.30	17	12.11	126.35	13		154.43	Casing	8	2
	18.17	18	12.21	138.56	12		166.83	Casing	8	
	18.42	19	12.15	150.71	11		179.03	Casing	8	
	19.05	20	12.12	162.83	10		191.45	Casing	8	1
	20.28	21	12.15	174.98	9		194.64	Screen#40	8	
	21.08	22	12.18	187.16	8		197.78	Screen#40	8	
	21.50	23	12.14	199.30	7		200.93	Screen#40	8	
	22.05	24	12.13	211.43	6		204.08	Screen#40	8	
	23.50	25	6.06	217.49	5		207.23	Screen#40	8	
28/10/00	01.09	26	2.5	219.99	4		210.37	Screen#40	8	
					3		213.56	Screen#40	8	
					2		216.71	Screen#40	8	
					1		219.99	and collecto	8	

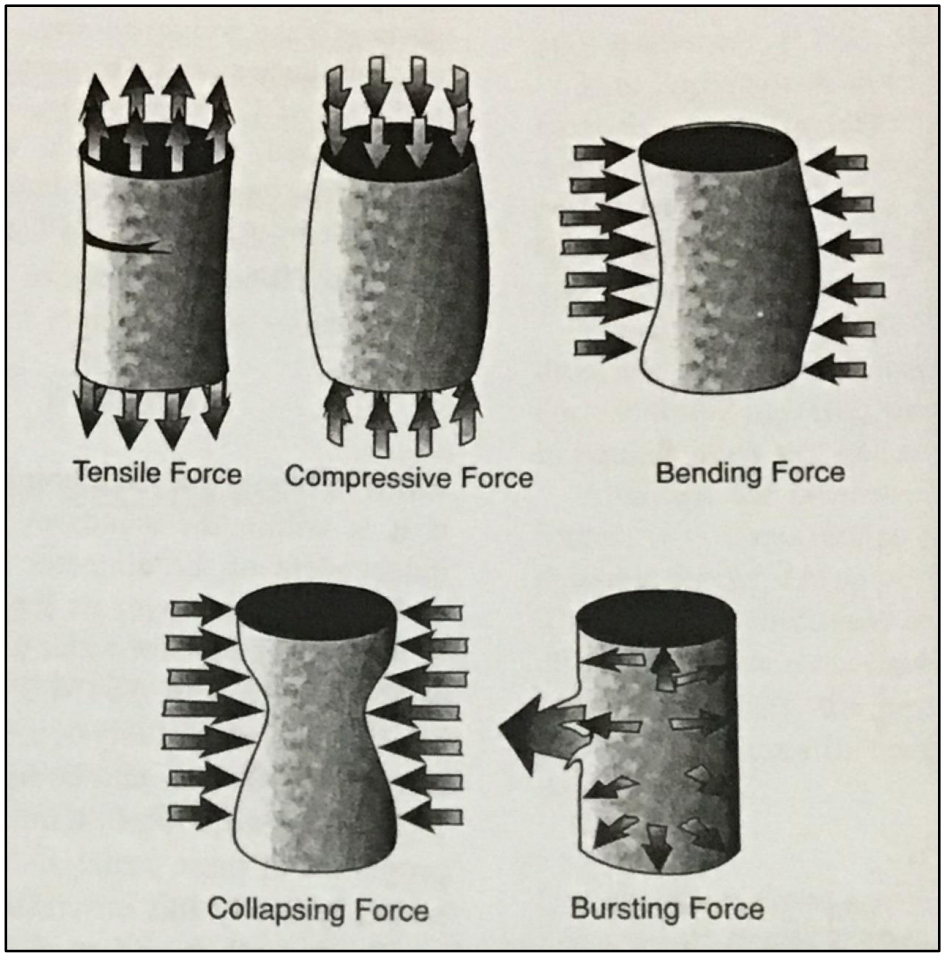
(ที่มา: รายงานฉบับสมบูรณ์ (เล่มที่ 7/10) โครงการจัดทำมาตรฐานการเจาะ สำรวจและพัฒนาบ่อน้ำบาดาล)

รูปที่ 6-7 ป้ายรายละเอียดบ่อน้ำบาดาลที่ติดบนฐานบ่อน้ำบาดาล

รูปที่ 6-8 แสดงท่อกรุกรวดสำเร็จรูป (prepacked screen) รูปแบบต่างๆ (ถ่ายจากห้องแล็บขอ Institute of Hydrogeology and Environmental Geology: IHEG, China Geological Survey: CGS)

6.4 แรงดันที่มีต่อท่อกรุและท่อกรอง (stress on well casing and screen)

เมื่อติดตั้งท่อกรุ (casing) ท่อกรองพันลวด (screen) หรือท่อเซาะร่อง (perforated casing) ในบ่อเรียบร้อยแล้ว จะมีแรง (force / stress) ที่กระทำต่อท่ออยู่หลายแรง ได้แก่แรงดึงในแนวดิ่งที่กระทำต่อท่อ (tensile force) แรงกดในแนวดิ่งที่กระทำต่อ (compressive force) แรงดันจากชั้นดินที่อยู่รอบข้างท่อ (lithostatic pressure) ที่กระทำต่อท่อแล้วทำให้ท่อโค้งงอ (bending force) หรือทำให้ท่อยุบตัวเข้าข้างใน (collapsing force) และแรงดันของของเหลวที่เกิดภายในท่อ (hydrostatic pressure) ซึ่งอาจทำให้ท่อเกิดการระเบิด (bursting force) ได้ รูปที่ 6-8 แสดงประเภทของแรงที่กระทำต่อท่อกรุ และท่อรับน้ำทั้ง 2 แบบ (ท่อกรองพันลวด และท่อเซาะร่อง)



รูปที่ 6-8 แสดงประเภทของแรงที่กระทำต่อท่อกรุ และท่อรับน้ำทั้ง 2 แบบ (ท่อกรองพันลวด และท่อเซาะร่อง) ซึ่งได้แก่แรงดึงในแนวดิ่ง (tensile force) แรงกดในแนวดิ่ง (compressive force) แรงดันจากชั้นดินที่อยู่รอบข้างท่อ (lithostatic pressure/overburden force) ที่กระทำต่อท่อแล้วทำให้ท่อโค้งงอ (bending force) หรือทำให้ท่อยุบตัวเข้าข้างใน (collapsing force) และแรงดันของของเหลวที่เกิดภายในท่อ (hydrostatic pressure) อาจทำให้ท่อระเบิดได้ (bursting force)

1) แรงเครียดในแนวดิ่ง (tensile stress/force) เป็นแรงดึงที่เกิดจากน้ำหนักรวมของท่อทั้งหมด มีค่าเท่ากับ

$$\rho g L A$$

เมื่อ ρ หมายถึง ความหนาแน่น (density) ของท่อ $[ML^{-3}]$
g หมายถึงความเร่งอันเกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก $[LT^{-2}]$
L หมายถึงความยาวของท่อ $[L]$
และ A หมายถึงพื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยของท่อ $[LT^{2}]$

ณ ตำแหน่งก้นบ่อหรือพื้นบ่อ จะมีแรงลอยตัวดันขึ้น (buoyant upward force) อันเนื่องมาจากแรงดันของของเหลว (fluid pressure) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\rho_f g h A$

เมื่อ ρ_f หมายถึง ความหนาแน่นของของเหลว [ML^{-3}]
g หมายถึง ความเร่งอันเกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก [LT^{-2}]
h หมายถึง ความลึกของของเหลว [L]
และ A หมายถึงพื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยของท่อ [LT^{2}]

จากรูปที่ 6-9 ในหน้าถัดไป แรงเครียด (tensile stress) ในแนวดิ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$F = gA(\rho L - \rho_f h)$$

เมื่อ L = h สมการที่ข้างบน จะถูกลดรูปลงเป็น (ρ - ρf)gAL ซึ่งจะเป็นค่าน้ำหนักลอยตัว (buoyant weight) ของท่อ และสำหรับท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดและความหนาแน่นสม่ำเสมอ (uniform) แรงเครียดสูงสุดจะอยู่บริเวณส่วนบนของท่อ และมีค่าเท่ากับ

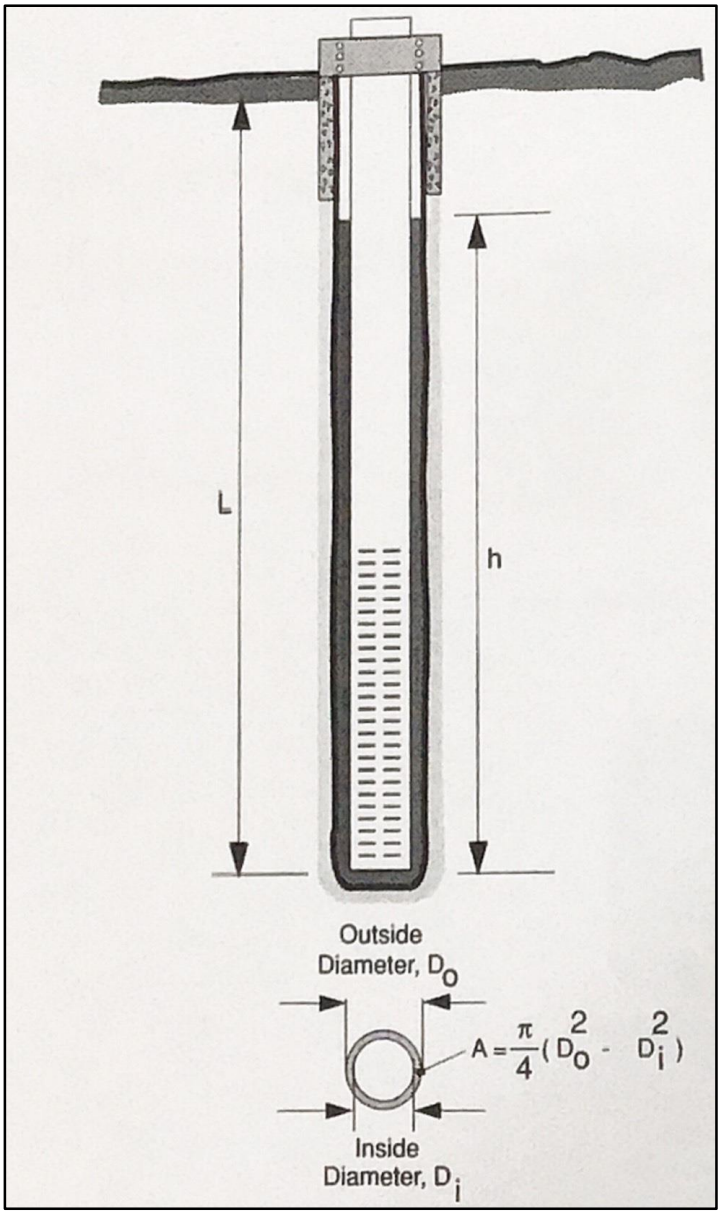
$$F/A = \sigma_m = g(\rho L - \rho_f h)$$

เมื่อ σ_m แรงเครียดหรือแรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่กระทำในแนวแกนท่อ

2) แรงในแนวรัศมีที่กระทำต่อท่อกรุและท่อรับน้ำ (radial forces on well casing and screen) จะประกอบไปด้วยแรงดันจากภายในท่อซึ่งมักจะเป็นแรงดันของน้ำบาดาลหรือปิโตรเลียม (hydrostatic pressure) และแรงดันของเหลวจากภายนอกท่อซึ่งหากแรงทั้ง 2 องค์ประกอบนี้ไม่สมดุลกันก็จะทำให้ท่อยุบตัว (collapse) หรือโค้งงอ (bend) หรือเกิดระเบิด (burst) ได้เช่นกัน แรงดันสูงสุดของของเหลวภายนอกท่อที่กระทำต่อท่อแสดงได้ดังสูตร

$$P = \rho_f gh$$

เมื่อ P หมายถึง แรงดันของของเหลว [$MT^{-1}T^{-2}$]
ρ_f หมายถึง ความหนาแน่นของของเหลว [ML^{-3}]
g หมายถึงความเร่งอันเกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก [LT^{-2}]
และ h หมายถึงความลึก [L]
(สำหรับน้ำจืด P (psi) = 0.433 *h* (ft)

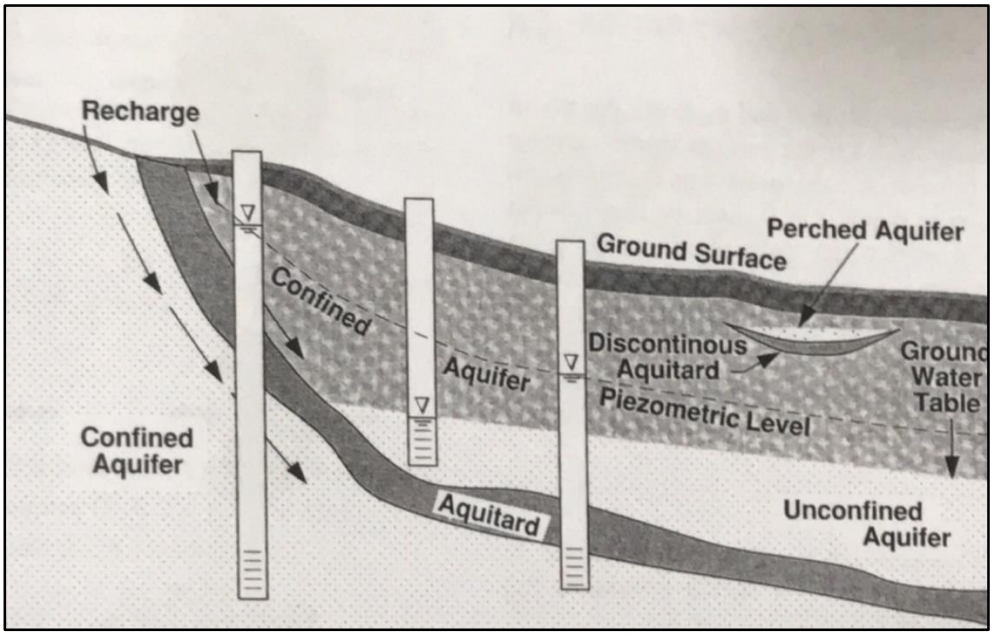


รูปที่ 6-9 แสดงองค์ประกอบของปัจจัยที่ก่อให้เกิดแรงดันต่างๆ ต่อท่อกรุและท่อรับน้ำในบ่อน้ำบาดาล

สำหรับแรงกระทำด้านข้างรอบรัศมีท่อ (radial force) อีกประเภทหนึ่งได้แก่แรงดันจากน้ำหนักกดทับ (overburden pressure) ซึ่งแบ่งออกเป็นแรงดันจากน้ำบาดาลและแรงดันจากวัสดุที่กดทับซึ่งมีน้ำแทรกอยู่ภายใน (fluid content) โดยทั่วไปแล้วน้ำหนักที่กดทับจากด้านบนของหน่วยหิน (formation) จะถูกพยุงด้วยหน่วยหินโดยตัวเองอยู่แล้ว แต่ในบางกรณีแรงกดทับนั้นจะถูกส่งผ่าน (transmit) ไปยังของเหลวที่อยู่ในหน่วยหิน (fluid content) ทำให้ของเหลวที่อยู่ในหน่วยหินซึ่งอาจเป็นน้ำบาดาล หรือปิโตรเลียมมีแรงดันเพิ่มขึ้นมาก นอกเหนือจากแรงดันที่เกิดจากการไหลของน้ำบาดาลในระดับลึก (regional groundwater flow regime)

ในรูปที่ 6-10 แสดงภาพตัดขวางของชั้นหินให้น้ำประเภทต่างๆ ได้แก่ชั้นหินให้น้ำแบบไร้แรงดัน (unconfined aquifer) ชั้นหินให้น้ำภายใต้แรงดัน (confined aquifer) และชั้นหินให้น้ำปลอม (perched aquifer) สำหรับชั้นหินให้น้ำแบบไร้แรงดัน ระดับผิวแรงดัน (piezometric level) จะอยู่ที่ส่วนบนของชั้นหินให้น้ำหรือผิวบนสุดของส่วนที่อิ่มตัวด้วยน้ำ เรียกว่าระดับน้ำบาดาล (water table) สำหรับชั้นหินให้น้ำภายใต้แรงดันที่อยู่ใต้ชั้นหินให้น้ำแบบไร้แรงดันลงไป ระดับผิวแรงดันของชั้นหินให้น้ำภายใต้แรงดัน (confined aquifer piezometric level) จะไม่ได้อยู่ที่ระดับบนสุดของชั้นหินให้น้ำ แต่จะมีแรงดันขึ้นไปจนอยู่ใกล้ผิวดิน หรือถ้าเจาะบ่อน้ำบาดาลในชั้นหินให้น้ำดังกล่าวในที่ต่ำกว่าระดับผิวแรงดันดังกล่าว จะได้บ่อน้ำบาดาลพุ (flowing artesian well)

ในบางพื้นที่แรงดันจากวัสดุกดทับจากด้านบน (overburden pressure) มักจะพบในชั้นหินให้น้ำภายใต้แรงดันระดับลึก อันมาจากปัจจัยการบดอัด (compaction) การจัดเรียงตัวของเม็ดตะกอนครั้งใหม่ (repacking) หรือกระบวนการอื่นๆ ทางการเกิดตะกอน (sedimentary processes) หน่วยหินที่อยู่ระดับลึกนั้น อาจไม่ได้พยุงน้ำหนักทั้งหมดของวัสดุที่กดทับ แต่ส่วนหนึ่งของแรงดันนี้จะถูกส่งผ่านไปยังของเหลวที่อยู่ในช่องว่างของตะกอน (interstitial fluid) ในชั้นหินให้น้ำซึ่งอาจทำให้ตะกอนมีการเคลื่อนที่ไปชนกับท่อกรุ ท่อรับน้ำ หากแรงกดภายนอกนี้มีค่ามากกว่าแรงดันของๆ เหลวภายในท่อ (hydrostatic pressure) จะทำให้ท่อกรุ ท่อรับน้ำเกิดความเสียหายได้



รูปที่ 6-10 แสดงภาพตัดขวางของชั้นหินให้น้ำประเภทต่างๆ ได้แก่ชั้นหินให้น้ำแบบไร้แรงดัน (unconfined aquifer) ชั้นหินให้น้ำภายใต้แรงดัน (confined aquifer) และชั้นหินให้น้ำปลอม (perched aquifer)

ในทางอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ให้สูตรความสัมพันธ์ของความลึกบ่อกับแรงดันที่กระทำต่อก้นบ่อ ณ ความลึกใดๆ ไว้ดังนี้

$$P = 2.3\ \rho_W gh$$

ซึ่งเทียบเท่ากับ

$$P\ (psi) = 1.0\ h\ (ft.)$$

เมื่อ P หมายถึงแรงดันที่ความลึกเท่ากับ *h* (หน่วยเป็น bar)

ρ_W หมายถึงความหนาแน่นของน้ำจืด (ค่าเฉลี่ย 1.0 g/cm^3)

2.3 หมายถึงความถ่วงจำเพาะเฉลี่ยของมวลวัสดุรอบบ่อ (ไม่มีหน่วย)

g หมายถึงความเร่งอันเกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก (ค่าเฉลี่ย 10 m/s^2)

ซึ่งเทียบเท่ากับ

$$P\ (psi) = 1.0\ h\ (ft.)$$

psi หมายถึงหน่วยแรงดัน pound per square inch

ยกตัวอย่างเช่น ที่ความลึก 200 (656 ฟุต) เมตร จะมีแรงดันของ overburden ดังนี้

$$P\ (psi) = 1.0*656$$

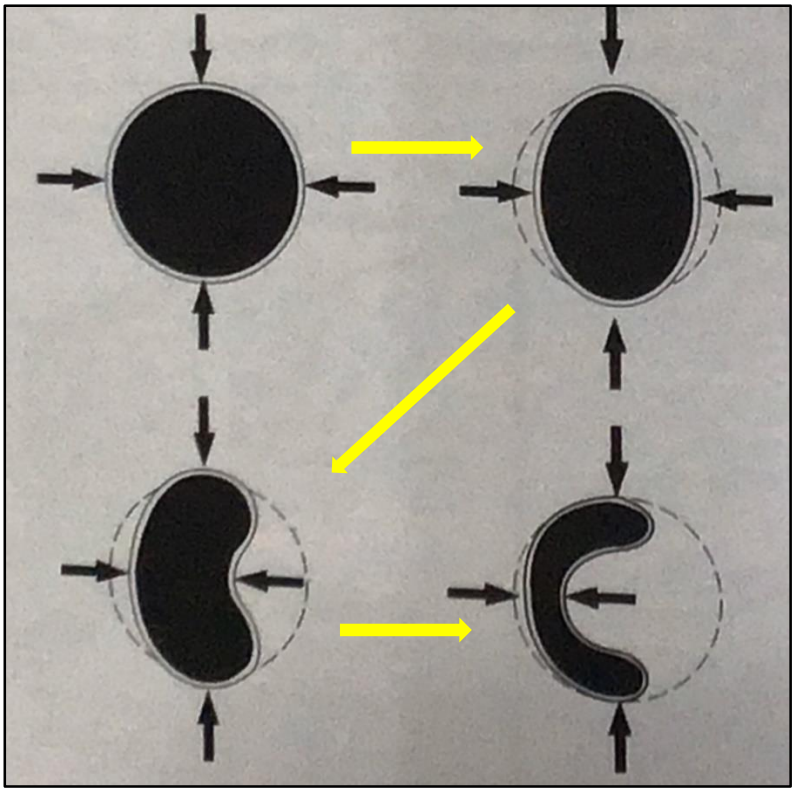
$$P = 656\ psi$$

เมื่อแรงดัน 1 bar = 14.5 psi ดังนั้น 656 psi มีค่าเท่ากับ 45.24 bar

จะเห็นว่าแรงดันอันเกิดจากวัสดุกดทับ (overburden) รอบบ่อมีมหาศาลมาก หากในการก่อสร้างบ่อน้ำบาดาลระดับลึกมีการเลือกใช้วัสดุที่ไม่ดี อาจทำให้บ่อน้ำบาดาลพังได้ง่าย

6.5 ความคงทนต่อการพังทลายของท่อกรุและท่อรับน้ำ (collapse resistance of casing)

เมื่อแรงดันจากการกดทับของวัสดุรอบท่อมีค่ามากเพียงพอกว่าแรงต่อต้านหรือพยุงจากภายใน ท่อกรุก็จะถูกเริ่มต้นของการพังทลาย (collapsing) ภาวะไม่สมดุลของแรงดันน้ำนี้จะเกิดขึ้นตลอดความยาวของท่อในส่วนที่อยู่ต่ำกว่าระดับสูบน้ำ (pumping level) การพังทลายจะเริ่มต้นที่จุดที่ผิดปกติของเนื้อท่อก่อน ท่อกรุจะเริ่มถูกให้แปรสภาพ จากวงกลม (circular cylinder) ในช่วงเริ่มต้นไปเป็นรูปวงรี (elliptical shape) แล้วกลายเป็นรูปเม็ดถั่ว (pea shape) และในที่สุดก็ถูกทำให้เปลี่ยนรูปร่างเป็นรูปเกือกม้า (horse-shoe shape) เมื่อเกิดการแปรเปลี่ยนรูปร่างของท่อ ณ จุดเริ่มต้นแล้ว ใรที่สุดก็จะขยายลุกลามไปตลอดความยาวท่อได้ รูปที่ 6-11 แสดงการแปรเปลี่ยนรูปร่างของท่อกรุเมื่อเกิดความไม่สมดุลของแรงกดดันภายนอกท่อและแรงพยุงต้านจากภายในท่อ



รูปที่ 6-11 แสดงการแปรเปลี่ยนรูปร่างของท่อกรุเมื่อเกิดความไม่สมดุลของแรงกดดันภายนอกท่อและแรงพยุงต้านจากภายในท่อ เริ่มจากรูปทรงกระบอก ไปเป็นรูปวงรี แล้วเปลี่ยนไปเป็นรูปเม็ดถั่ว และในที่สุดเปลี่ยนไปเป็นรูปเกือกม้า

6.6 การเลือกใช้ท่อกรุและท่อรับน้ำ (Selection of Casing and Screen)

ในบ่อน้ำบาดาลนั้น ท่อกรุและท่อรับน้ำมีประโยชน์มากมายหลายด้าน ได้แก่ป้องกันไม่ให้หลุมเจาะพัง ท่อรับน้ำก็มีไว้ให้น้ำไหลเข้าบ่อและป้องกันเครื่องสูบน้ำ ท่อกรุด้านบนช่วยป้องกันไม่ให้สารปนเปื้อนที่มีแหล่งกำเนิดใกล้ผิวดินไม่ให้ไหลเข้ามาปะปนกับน้ำบาดาล โดยหลักการก่อสร้างบ่อน้ำบาดาลที่ถูกต้องและมีอายุการใช้งานได้อย่างยั่งยืนแล้ว ท่อกรุของบ่อน้ำบาดาลจะจำแนกออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ท่อกรุปากบ่อ (surface casing) ท่อควบคุม (conductor casing) ท่อกรุระยะกลาง (intermediate casing) และท่อกรองช่วงติดตั้งเครื่องสูบหรือช่วงผลิตน้ำบาดาล (pump house casing/production casing) ซึ่งแต่ละแบบจะมีลักษณะทั่วไปที่คล้ายกัน ได้แก่

- มีพื้นผิวภายในเรียบเพื่อที่จะติดตั้งอุปกรณ์ภายในบ่อต่างๆ เช่นลงเครื่องสูบ หรืออุปกรณ์สำหรับพัฒนาบ่อได้อย่างราบลื่น ไร้อุปสรรค
- มีคุณสมบัติทางกายภาพที่เพียงพอทนต่อแรงเครียดของการติดตั้ง (stress of installation) หรือแรงต่างๆ ที่อาจมากระทำต่อท่อระหว่างการก่อสร้างบ่อ การพัฒนาบ่อ หรือแม้กระทั่งระหว่างการสูบน้ำขึ้นมาใช้
- วัสดุที่ใช้ทำท่อกรุ ท่อรับน้ำต้องไม่เป็นอันตรายหรือส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

6.6.1 ท่อกรุปากบ่อ (Surface Casing)

ท่อกรุปากบ่อหรือบางครั้งจะเรียกว่าท่อกันพัง อาจใช้ท่อ PVC มาตรฐาน มอก. 8.5 หรือจะใช้เป็นท่อเหล็กเหนียว ลงลึกจากผิวดินไปประมาณ 3-6 เมตร เพื่อป้องกันการพังทลายของชั้นดินด้านบน ซึ่งจะเป็นอุปสรรคต่อการเจาะและอาจเป็นอันตรายต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการเจาะ ข้อกำหนดมาตรฐานการเจาะของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล พ.ศ. 2562 และบังคับใช้ในกรมทรัพยากรน้ำบาดาล ได้กำหนดไว้ดังนี้

- ขนาดบ่อน้ำบาดาล 100 มิลลิเมตร ขนาดหลุมเจาะ 200 มิลลิเมตร ขนาดของท่อ surface casing ต้องไม่น้อยกว่า 200 มิลลิเมตร
- ขนาดบ่อน้ำบาดาล 150 มิลลิเมตร ขนาดหลุมเจาะ 270 มิลลิเมตร ขนาดของท่อ surface casing ต้องไม่น้อยกว่า 270 มิลลิเมตร
- ขนาดบ่อน้ำบาดาล 200 มิลลิเมตร ขนาดหลุมเจาะ 360 มิลลิเมตร ขนาดของท่อ surface casing ต้องไม่น้อยกว่า 360 มิลลิเมตร
- ขนาดบ่อน้ำบาดาล 250 มิลลิเมตร ขนาดหลุมเจาะ 450 มิลลิเมตร ขนาดของท่อ surface casing ต้องไม่น้อยกว่า 450 มิลลิเมตร
- ขนาดบ่อน้ำบาดาล 300 มิลลิเมตร ขนาดหลุมเจาะ 500 มิลลิเมตรขนาดของท่อ surface casing ต้องไม่น้อยกว่า 500 มิลลิเมตร

6.6.2 ท่อควบคุม (conductor casing)

ในบ่อที่มีการออกแบบการเจาะแบบปลอดภัยสูงสุด (high-capacity well design) จะมีการลงท่อควบคุมลงไปจนถึงความลึกประมาณ 15 เมตร ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้สารปนเปื้อนบนผิวดินที่อาจไหลเข้าไปในหลุมเจาะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วงที่เป็นหินร่วนชั้นแรก โดยการเทซีเมนต์ลงไปให้เต็มหลุมเจาะ แล้วเจาะต่อโดยเจาะผ่านซีเมนต์ ท่อควบคุมยังสามารถลดปัญหาของการพังทลายของหินร่วนระดับตื้นได้เช่นกัน

6.6.3 ท่อระยะกลางหรือท่อชั้นกลาง (intermediate casing)

ท่อระยะกลางนี้จะใช้ในกรณีที่เจาะบ่อลึกแล้วมีเงื่อนไขที่มีความยากต่อการเจาะ เช่นการบวมน้ำของชั้นดินเหนียว (clay swelling/hydrating clay) ที่เจาะผ่านซึ่งจะทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางหลุมเจาะช่วงนั้นลดขนาดลง เป็นอุปสรรคต่อการไหลเวียนของน้ำโคลนในระบบเจาะ หรือการเกิดการสูญเสียน้ำโคลน (loss circulation of drilling mud) จากการที่เจาะผ่านชั้นหินร่วนที่มีแรงดันน้ำน้อยกว่าแรงดันน้ำโคลน หรือโพรงในหินปูน ท่อระยะกลางอาจถูกออกแบบให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางหลายขนาด (multi-diameter casing program) แล้วกดลงไปในบ่อโดยแรงดันหรือการใช้เครื่องจักรกดลงไป กรณีเช่นนี้ควรออกแบบขนาดของท่อ surface casing เพื่อรองรับการลงท่อ intermediate casing ไว้หนึ่งขนาดหากเกิดปัญหาในการเจาะจะได้ไม่ต้องเปลี่ยนจุดเจาะ ท่อ intermediate casing อาจจะติดตั้งถาวร หรือรื้อถอนหลังจากเสร็จงาน

6.6.4 ท่อกรองช่วงติดตั้งเครื่องสูบหรือช่วงผลิตน้ำบาดาล (pump house casing/production casing)

ขึ้นอยู่หัวเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวสูบ (pump bowl) หรือเครื่องสูบแบบจุ่มใต้น้ำ (submersible pump) และความลึกของการติดตั้งเครื่องสูบ (depth of pump setting) ทั้งนี้ย่อมขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำสูงสุดที่คาดว่าจะผลิตได้จากท่อช่วงนี้ด้วยเช่นกัน และขึ้นอยู่กับการออกแบบการติดตั้งเครื่องสูบให้สอดคล้องกับความต้องการ

บทที่ 7
การพัฒนาบ่อน้ำบาดาล และการสูบทดสอบ
(Groundwater Well Development and Pumping Test)

7.1 การพัฒนาบ่อน้ำบาดาล (Well Development)

การพัฒนาบ่อน้ำบาดาลควรจะต้องปฏิบัติทันทีหลังจากก่อสร้างบ่อน้ำบาดาลแล้วเสร็จ ทั้งนี้หากปล่อยระยะเวลาให้เนิ่นช้าเกินไป น้ำโคลนทั้งที่อยู่ข้างหลุมเจาะและที่รุกล้ำ (invaded) เข้าไปในชั้นหินให้น้ำ (invasion zone) จะกลายสภาพเป็นวุ้น (gel) ซึ่งทำให้ถูกชะล้างออกได้ยาก วัตถุประสงค์ของการพัฒนาบ่อน้ำบาดาล มีดังนี้

1) เพื่อเสริมสร้างพื้นที่กรองน้ำ (filter zone) ที่อยู่ระหว่างท่อรับน้ำและชั้นหินให้น้ำให้มีความมั่นคง ทั้งบ่อที่พัฒนากรวดกรุแบบธรรมชาติ (natural gravel packing) และบ่อที่ต้องเติมกรวดกรุ (artificial gravel packing)
2) เพื่อเพิ่มค่าความนำทางชลศาสตร์ (hydraulic conductivity) ในพื้นที่รอบๆ บ่อ (near-well zone)
3) เพื่อเพิ่มรัศมีประสิทธิภาพ (effective radius) ของบ่อน้ำบาดาล
4) เพื่อชะล้างน้ำโคลน เศษวัสดุที่ตกค้างอยู่ในช่องรับน้ำ (screen openings) ในกรวดกรุ ที่เคลือบอยู่ตามผนังบ่อและในชั้นหินให้น้ำออกให้หมดเพื่อที่จะได้น้ำสะอาดจากชั้นหินให้น้ำอย่างเต็มประสิทธิภาพ

7.2 วิธีการพัฒนาบ่อน้ำบาดาล (well development methods)

การพัฒนาน้ำบาดาลสามารถแบ่งได้ออกเป็น 3 ระยะ ดังนี้ ระยะที่ 1 ได้แก่ระยะก่อนการพัฒนา (predevelopment phase) ระยะที่ 2 ได้แก่ระยะการพัฒนาขั้นต้น (preliminary development) และระยะที่ 3 ได้แก่ระยะการพัฒนาสุดท้าย (final development) ลักษณะการพัฒนาของแต่ละระยะสามารถอธิบายได้ ดังนี้

7.2.1 ระยะก่อนการพัฒนา (predevelopment phase)

ระยะนี้ประกอบด้วยกระบวนการก่อสร้างบ่อน้ำบาดาลที่จะต้องปฏิบัติด้วยความระมัดระวัง ไม่ทำความเสียหายต่อชั้นดินชั้นหิน และขณะที่ลงกรวดกรุ เม็ดกรวดที่ค่อยๆ เทลงข้างบ่อก็จะช่วยขัดสีผนังบ่อทำให้น้ำโคลนที่เคลือบผนังหลุมเจาะ (mud cake) ถูกขูดหรือชะออกไปได้ในบางส่วน ซึ่งขั้นตอนนี้ต้องทำอย่างรวดเร็วหลังจากลงกรวดกรุ เพื่อสร้างชั้นกรวดหุ้ม (gravel envelope) ที่มีความหนาและการจัดเรียงตัวที่สม่ำเสมอระหว่างผนังหลุมเจาะกับท่อรับน้ำ (screen / perforated casing)

7.2.2 ระยะการพัฒนาขั้นต้น (preliminary development)

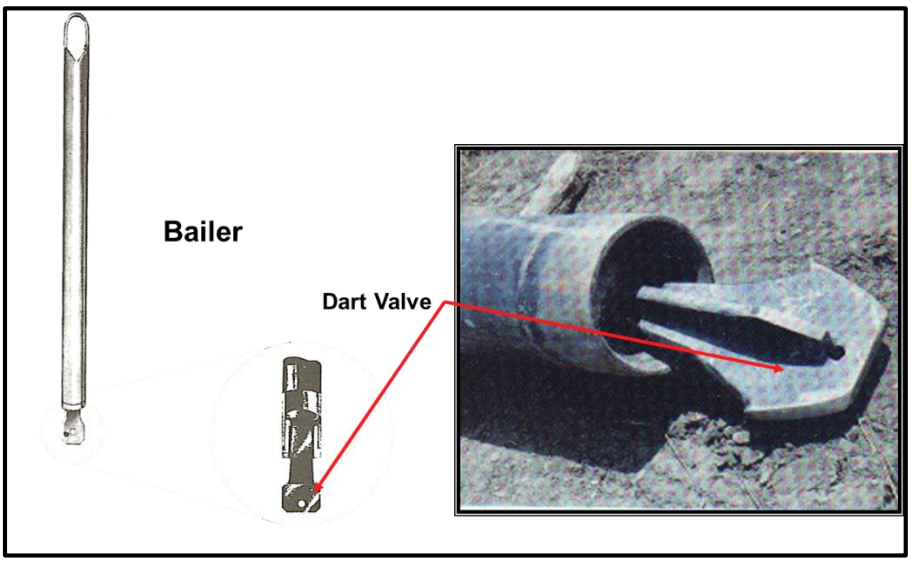
การพัฒนาบ่อระยะนี้ได้แก่การทำความสะอาดภายในบ่อน้ำบาดาล และบริเวณกรวดกรุ ไปจนถึงพื้นผิวของชั้นหินให้น้ำ การพัฒนาบ่อน้ำบาดาลระยะนี้มีอยู่หลายวิธี จะเลือกใช้วิธีใดบางครั้งก็ขึ้นอยู่กับชนิดของชั้นหินให้น้ำด้วย ในภาพรวมผู้เขียนจะขอนำเสนอวิธีการพัฒนาบ่อน้ำบาดาลระยะขั้นต้นที่เป็นที่นิยมปฏิบัติกัน ได้แก่

วิธีการตักน้ำ (Bailing)

เป็นวิธีการพัฒนาบ่อแบบการตักน้ำโดยใช้กระบอกตัก (bailer) โดยการหย่อนกระบอกตักที่มีดาร์ทวาล์ว (dart valve) ติดตั้งอยู่ที่ปลายกระบอก โดยที่วาล์วจะเปิดเมื่อกระบอกตักกระแทกก้นบ่อ น้ำก็จะ

เข้าไปในกระบอก และเมื่อดึงขึ้นน้ำในกระบอกก็จะดันให้วาล์วปิด (รูปที่ 7-1) การหย่อนกระบอกตักลงและดึงขึ้นจะทำให้น้ำกระเพื่อมผ่านรูเปิดของท่อกรองอย่างแรง จะทำให้ตะกอนทรายขนาดละเอียดเข้ามาในบ่อ-และถูกผลักออกไปจากบ่อ ส่วนที่เข้ามาในบ่อก็จะถูกกระบอกตักนำขึ้นมาทิ้ง ปฏิบัติการหย่อนลง-ดึงขึ้นหลาย ๆ ครั้ง จนสังเกตว่าน้ำที่ขึ้นมาไม่มีตะกอนเจือปนแล้วค่อยหยุดตัก การพัฒนาบ่อด้วยวิธีนี้สะดวกและรวดเร็วแต่ต้องกระทำด้วยความระมัดระวัง ทั้งนี้เพื่อไม่ให้กระบอกตักไปกระแทกกับท่อกรองและทำความเสียหายได้

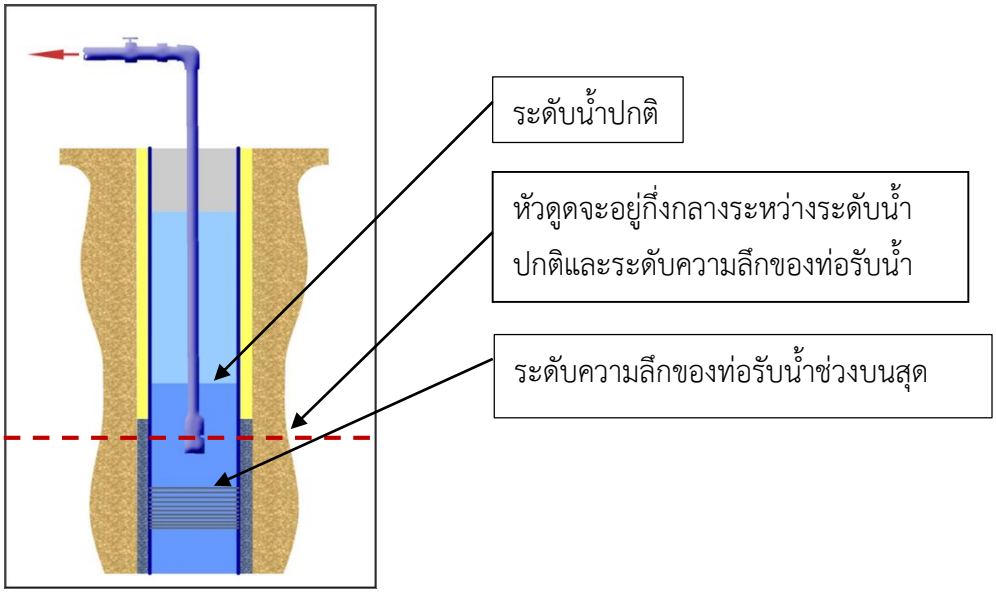
การพัฒนาบ่อโดยวิธีการตักนี้ สามารถใช้ประเมินประสิทธิภาพการให้น้ำของบ่อน้ำบาดาล นั้น ๆ ได้เช่นกันเนื่องจากกระบอกตักมีปริมาตรที่แน่นอน เมื่อตักน้ำขึ้นกี่กระบอกก็นับปริมาตรน้ำที่ตักออกมาได้ (yield) ไว้ พร้อมกับวัดระยะน้ำลด (drawdown) ที่เกิดขึ้นในบ่อ นำปริมาตรน้ำที่สูบออกมาเป็นตัวตั้งแล้วหารด้วยระยะน้ำลด (yield/drawdown) ก็จะได้ค่า specific capacity (Sc) หรือประสิทธิภาพการให้น้ำจำเพาะของบ่อน้ำบาดาล นั้น ๆ วิธีการประเมินศักยภาพของบ่อน้ำบาดาลวิธีการนี้เรียกว่า bailer test



รูปที่ 7-1 แสดงอุปกรณ์การพัฒนาบ่อโดยการตักน้ำ (Bailing)

วิธีการสูบน้ำ (Pumping)

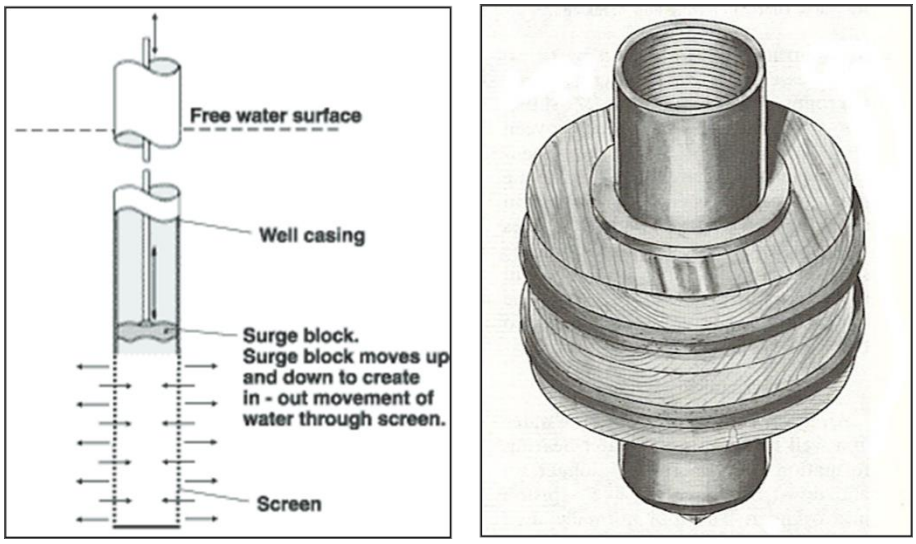
การพัฒนาบ่อโดยวิธีนี้เป็นการพัฒนาโดยใช้เครื่องสูบ วิธีการคือหย่อนท่อสูบ (suction pipe) ของเครื่องสูบลงไปในบ่อน้ำบาดาล ณ ตำแหน่งประมาณกึ่งกลางระหว่างระดับน้ำปกติ (static water level) กับของความลึกบนสุดของท่อรับน้ำ แล้วเริ่มสูบน้ำด้วยอัตราต่ำก่อนจนกว่าน้ำที่ออกมาจะใส จากนั้นก็เพิ่มอัตราสูบขึ้นมาทีละขั้นจนถึงอัตราสูงสุดที่เครื่องสูบจะทำงานได้ จากนั้นก็ทิ้งระยะเวลาให้ระดับน้ำคืนตัวมาจนถึงระดับน้ำปกติ แล้วจึงเริ่มลงมือสูบอีกครั้งหนึ่ง ทำแบบนี้ซ้ำ ๆ กันจนมั่นใจว่าไม่มีตะกอนหลงเหลืออยู่ในน้ำบาดาล จึงหยุดพัฒนาบ่อ รูปที่ 7-2 แสดงการพัฒนาบ่อแบบวิธีการสูบน้ำ



รูปที่ 7-2 แสดงการพัฒนาบ่อแบบวิธีการสูบน้ำ

วิธีการกวนน้ำ (mechanical surging/swabbing)

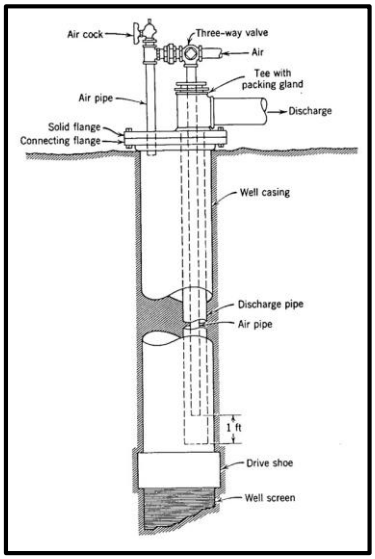
วิธีการพัฒนาบ่อน้ำบาดาลแบบนี้ จะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า surge block หรือ plunger หรือ swab (รูปที่ 7-3) ที่มีลักษณะคล้ายกับลูกสูบและมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางบ่อเล็กน้อยหรือมีขนาดพอดีกับเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (inside diameter) ของท่อกรุ ใส่ลงไปในบ่อเหนือระดับท่อกรองและดันลง-ดึงขึ้นสลับกันเร็วๆ เหมือนการกวนน้ำ ระหว่างดึงขึ้น-ดันลงนั้นก็จะทำให้น้ำในบ่อกระเพื่อม ทำให้ทรายที่อยู่ในบ่อถูกผลักออกไปแยกออกจากกรวดหรือทรายหยาบของชั้นหินให้น้ำ ทำให้ชั้นหินให้น้ำจ่ายน้ำเข้าสู่บอกน้ำบาดาลได้ดีขึ้น สำหรับทรายละเอียดที่เข้ามาอยู่ในบ่อ เมื่อดึง plunger หรือ swab ขึ้นจากบ่อ ทรายละเอียดเหล่านั้นก็จะปนมากับน้ำด้วย กระทำซ้ำ ๆ กันหลายรอบจนกว่าน้ำจะใส บางครั้งก็จะใช้แปรงลวดเหล็ก (iron wire) พันรอบ surge block เพื่อทำความสะอาดท่อรับน้ำที่มีทรายละเอียดไปอุดตามรูเปิดได้เช่นกัน เรียกว่า wire brushing

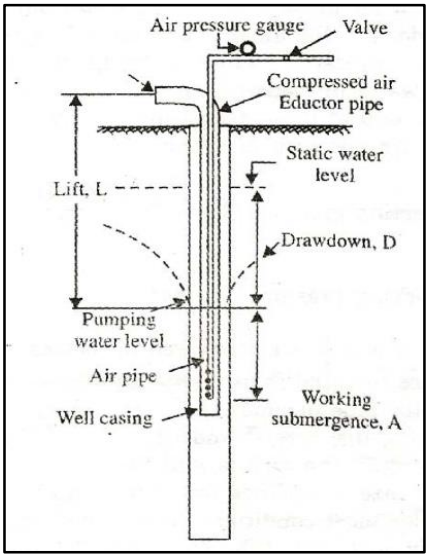


รูปที่ 7-3 แสดงอุปกรณ์การพัฒนาบ่อโดยการกวนน้ำ (Mechanical Surging) โดยการใช้ surge block

วิธีเป่าล้างด้วยลม (Air Lifting)

ในวิธีการนี้ บริเวณปากบ่อจะต้องปิดแน่น ท่อลม (air pipe) และท่อสูบน้ำ (eductor pipe) ที่ใช้จะมีลักษณะเดียวกับวิธีการเป่ากวนด้วยลมข้างต้นแต่จะเพิ่มท่อลมขนาดสั้นและลิ้นปิดเปิดสามทาง (three-way valve) ที่ปากบ่อ การทำงานเริ่มด้วยการปล่อยลมผ่านท่อลมตัวยาว ซึ่งก็จะส่งผลให้เกิดการเป่ากวนตะกอนที่อยู่รอบ ๆ บ่อและไหลขึ้นปากบ่อไปตามท่อสูบน้ำ ทำไประยะหนึ่งเมื่อน้ำเริ่มใส ก็จะปิดท่อลม และปล่อยให้น้ำไหลคืนกลับไปสู่ระดับเริ่มต้น จากนั้นปรับเปลี่ยนที่ลิ้นปิดเปิดให้ลมผ่านเข้าทางบ่อลมขนาดสั้นที่ท่อสูบน้ำ หลังจากนั้นก็จะปรับเปลี่ยนลิ้นปิด-เปิด ปล่อยลมลงมาทางท่อลมขนาดยาวแทน ทำแบบนี้ไปเรื่อย ๆ จนน้ำใส รูปที่ 7-4 แสดงองค์ประกอบของชุดอุปกรณ์การพัฒนาบ่อโดยวิธีเปล่าล้างด้วยลม (อ่านเพิ่มเติมได้ที่ “น้ำบาดาล” ทวีศักดิ์ ระมิงค์วงศ์, 2546)

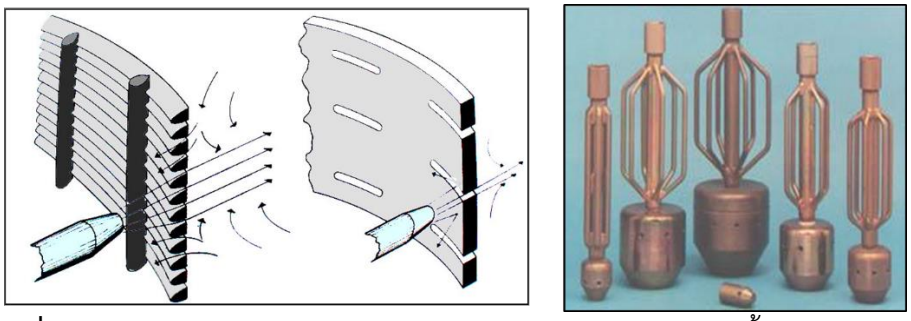




รูปที่ 7-4 แสดงอุปกรณ์การพัฒนาบ่อโดยการเป่าล้างด้วยลม (air lifting)

วิธีเป่าฉีดน้ำความเร็วสูง (hydraulic jetting)

วิธีการนี้จะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าหัวเจ็ท (jetting nozzle) ที่ต่อกับก้านเจาะโดยตรงซึ่งก้านเจาะด้านบนจะต่อเชื่อมกับเครื่องอัดลงที่มีแรงดันสูง หัวเจ็ทจะถูกหย่อนลงไปบริเวณล่างสุดของท่อรับน้ำแล้วเป่าน้ำหรืออากาศแรงดันสูงผ่านลงมาตามก้านเจาะ น้ำหรืออากาศจะไปทำให้ตะกอนขนาดละเอียดที่อุดตามรูเปิดของท่อกรองหลุดออก ไปทำให้โคลนที่เคลือบผนังหลุมเจาะแตกออกหรือละลายออกไป ตะกอนละเอียดอาจจะถูกชะล้างกลับเข้ามาในบ่อที่ตำแหน่งรูเปิดด้านบน ค่อยๆ ดึงหัวเจ็ทขึ้นทีละน้อย จนพ้นช่วงท่อรับน้ำ จึงถอนหัวเจ็ทขึ้นแล้วสูบน้ำที่มีตะกอนละเอียดออกจากบ่อ ทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จนน้ำใส รูปที่ 7-5 แสดงอุปกรณ์และลักษณะการทำงานของการพัฒนาบ่อน้ำบาดาลโดยวิธีเป่าฉีดน้ำหรืออากาศความเร็วสูง



รูปที่ 7-5 แสดงอุปกรณ์และลักษระการทำงานของการพัฒนาบ่อน้ำบาดาลโดยวิธีเป่าฉีดน้ำหรืออากาศความเร็วสูง

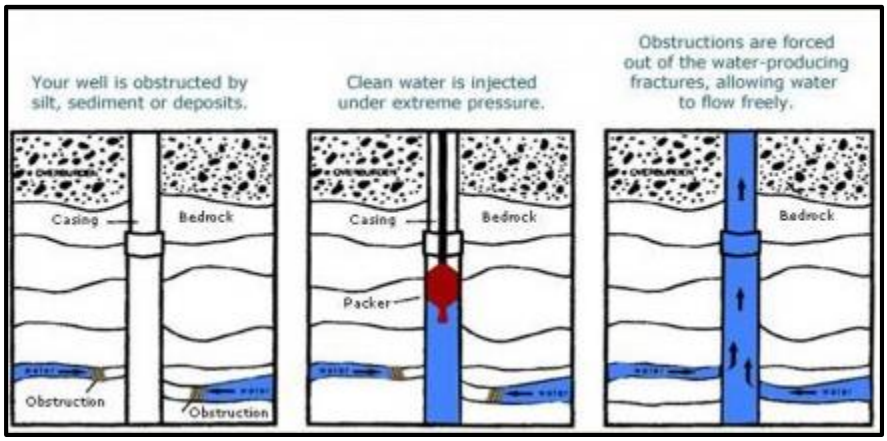
ทั้ง 5 วิธีที่กล่าวมาข้างต้น จัดเป็นวิธีพัฒนาบ่อเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจ่ายน้ำเข้าสู่บ่อโดยที่ชั้นหินให้น้ำสามารถจ่ายน้ำเข้าสู่บ่อได้อย่างเพียงพออยู่แล้ว แต่ที่ต้องพัฒนาบ่อก็เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจ่ายน้ำของบ่อน้ำบาดาล หรือทำความสะอาดบ่อซึ่งมักจะมีวัสดุตกค้างเช่นคราบน้ำมันเครื่อง น้ำมันไฮดรอลิก หรือน้ำโคลนเจาะที่ค้างอยู่ในบ่อหรือเคลือบอยู่ตามผนังบ่อ แต่ก็ยังมีวิธีการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการจ่ายน้ำของชั้นหินให้น้ำที่ผู้เขียนจะขอกล่าวถึง แต่เมืองไทยไม่ค่อยนิยมนำมาใช้ ได้แก่

7.2.3 วิธีขยายรอยแตกโดยใช้น้ำแรงดันสูง (hydrofracturing/hydrofracking)

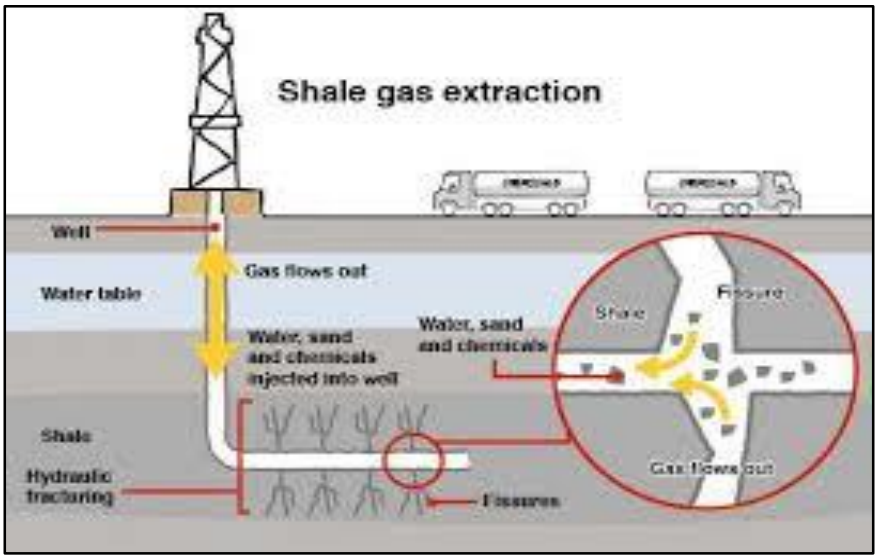
ในกรณีที่ชั้นหินให้น้ำเป็นหินแข็งที่ได้น้ำจากรอยแตกขนาดเล็ก เราสามารถที่จะขยายรอยแตกเพื่อให้น้ำไหลผ่านได้สะดวกขึ้น ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าบ่อน้ำบาดาลก็จะมากขึ้นตามโดยการ วิธีการขยายรอยแตกหรือทำให้รอยแตกต่อเชื่อมถึงกัน จะใช้วิธีใส่ยางแข็งที่สามารถเป่าให้พองลมได้ (inflatable hard rubber) หรือบางทีก็เรียกว่าลูกโป่งยาง (rubber balloon) หรือหากเรียกว่า packer ก็จะถูกต้องมากกว่า ลงไปต่ำกว่าระดับที่ต้องการขยายรอยแยกรอยแตกของชั้นหินให้น้ำประมาณ 6 เมตร แล้วก็ใส่อีกชุดหนึ่งต่ำกว่าระดับผิวดินประมาณ 20 เมตร แต่หากก้นบ่อและใต้ท่อรับน้ำเป็นหินแข็ง packer ตัวล่างก็ไม่จำเป็นต้องใส่ รูปที่ 7-6 แสดงลักษณะการพัฒนาชั้นน้ำบาดาลแบบ hydrofracking

น้ำแรงดันสูงจะถูกอัดลงไประหว่าง packer ทั้ง 2 ชุด แรงดันที่อัดลงไปส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 35-140 บาร์ น้ำที่มีแรงดันนี้จะไปแทรกตามรอยแยกรอยแตกของชั้นหินให้น้ำและขยายรอยแยกรอยแตกนั้นจนสามารถเชื่อมต่อกันได้อย่างสมบูรณ์ทำให้น้ำสามารถไหลได้อย่างต่อเนื่อง เราจะรู้ได้ทันทีว่ารอยแตกรอยแยกได้ถูกขยายแล้วและเชื่อมต่อถึงกันแล้ว เมื่อระดับแรงดันที่อ่านจากมาตรวัดแรงดัน (pressure gauge) ลดลงอย่างรวดเร็ว (sudden drop) แต่ถ้าอัดน้ำลงไปแล้วความดันยังไม่ลดลงเลย นั่นหมายถึงการทำ hydrofracking ไม่ประสบผลสำเร็จ

นอกจากนี้วิธีการ hydrofracking ยังเหมาะสำหรับการเปิดขยายรอยแตกในชั้นกักเก็บปิโตรเลียม เช่น ขยายรอยแตกรอยแยกในชั้นถ่านหินเพื่อให้ก๊าสมีเทนที่ถูกกักเก็บอยู่ในช่องว่างในชั้นถ่านหิน (coal bed methane: CBM) ได้มีช่องทางไหลถึงกันตลอดความหนาของชั้นถ่านหินและจะถูกรวบรวมมาใช้เป็นพลังงานได้ต่อไป วิธีการการดำเนินการจะเป็นการเจาะจนถึงชั้นกักเก็บปิโตรเลียม แล้วเจาะในแนวนอนไปในชั้นหินแล้วฝังแก๊ปหรือประจุระเบิด เพื่อให้ระเบิดพร้อมกัน รูปที่ 7-7 แสดงรูปแบบการทำ hydrofracking ในชั้นกักเก็บปิโตรเลียม



รูปที่ 7-6 แสดงลักษณะการพัฒนาชั้นน้ำบาดาลแบบ hydrofracking (ภาพซ้าย) น้ำจากชั้นหินให้น้ำทางซ้ายและขวาของบ่อยังไหลถึงกันได้ม่มากนักเนื่องจากอาจถูกบล็อกด้วยวัสดุบางอย่าง (ภาพกลาง) ใส่ packer ที่เป็น inflatable hard rubber ลงไปเหนือช่วงชั้นหินให้น้ำและอัดน้ำแรงดันสูงลงไปในบ่อ (ภาพขวา) เมื่อการทำ hydrofracking ประสบผลสำเร็จ ทำให้น้ำในชั้นหินให้น้ำไหลถึงกันได้อย่างสะดวกและง่ายดายขึ้น



รูปที่ 7-7 แสดงรูปแบบการทำ hydrofracking ในชั้นกักเก็บปิโตรเลียม

7.3 การสูบทดสอบ (Pumping Test)

การสูบทดสอบเป็นขั้นตอนของการประเมิน (evaluation) ประสิทธิภาพการจ่ายน้ำของบ่อน้ำบาดาลนั้นๆ (well production test) และประเมินคุณสมบัติทางชลศาสตร์ (hydraulic properties) ของชั้นหินให้น้ำ (aquifer test) คุณสมบัติเหล่านั้นได้แก่ค่าความนำทางชลศาสตร์ (hydraulic conductivity: K) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (coefficient of permeability) สัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำ (transmissivity: T) หรือที่เรียกอีกแบบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำไหลผ่านตลอดชั้นหินอุ้มน้ำ (coefficient of transmissibility) และค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำ (coefficient of storage หรือ storativity: S) เป็นต้น

วิธีการของการสูบทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของบ่อ และคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของชั้นหินให้น้ำสามารถแบ่งแยกได้ดังนี้

1. การทดสอบหาคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของชั้นหินให้น้ำ (aquifer test)
   (1) ในชั้นหินให้น้ำภายใต้แรงดัน (confined aquifer)
      (1.1) วิธีทดสอบในสภาวะไม่คงที่ (non-steady-state test method)
      (1.2) วิธีทดสอบในสภาวะคงที่ (steady-state test method)
   (2) ในชั้นหินให้น้ำแบบไร้แรงดัน (unconfined aquifer)
      (2.1) วิธีทดสอบในสภาวะไม่คงที่ (non-steady-state test method)
      (2.2) วิธีทดสอบในสภาวะคงที่ (steady-state test method)
   (3) ในชั้นหินให้น้ำแบบรั่วซึม (semi-confined (leaky) aquifer)
      (3.1) วิธีทดสอบในสภาวะไม่คงที่ (non-steady-state test method)
      (3.2) วิธีทดสอบในสภาวะคงที่ (steady-state test method)
2. การทดสอบหาประสิทธิภาพการให้น้ำของบ่อ (well test)
   (1) บ่อสูบน้ำบาดาล (production well)
   (2) บ่อเติมน้ำบาดาล (injection well)

7.3.1 สมมติฐานหรือเงื่อนไขพื้นฐาน (basic assumptions) ในการสูบทดสอบ

1. ชั้นหินให้น้ำมีลักษณะเป็นรูพรุน (porous media) และมีการไหลของน้ำแบบไหลเอื่อย (laminar flow) ตามหลักของ Darcy’s Law

2. ชั้นหินให้น้ำมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) มีคุณค่าความนำทางชลศาสตร์ (hydraulic conductivity) เท่ากันในทุกทิศทาง (isotropic) มีความหนาคงที่ (uniform thickness) และมีการแผ่กระจายตัวไม่จำกัด (infinite areal extend)

3. น้ำจะไหลออกจากหรือเพิ่มเข้าสู่ชั้นหินให้น้ำทันทีเมื่อระดับน้ำเปลี่ยนไป

4. เส้นผ่านศูนย์กลางของบ่อน้ำบาดาลจะมีขนาดเล็กมากและถือว่าน้ำที่ค้างอยู่ในบ่อมีน้อยมาก (เมื่อเทียบกับน้ำในชั้นหินให้น้ำ)

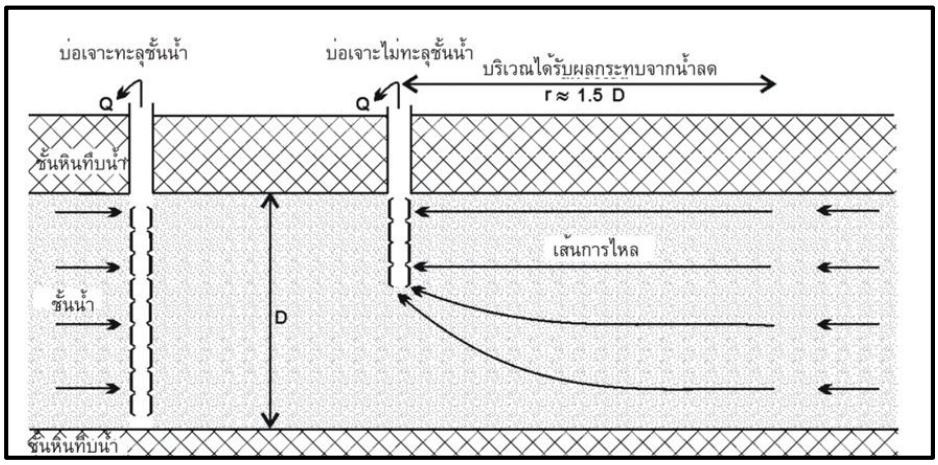
5. บ่อสูบน้ำจะต้องเจาะผ่านตลอดความหนาของชั้นหินให้น้ำ (fully penetrating well) และการลงท่อกรองต้องลงให้เต็มความหนาของชั้นหินให้น้ำเพื่อให้การไหลของน้ำเข้าสู่บ่ออยู่ในแนวระนาบ (horizontal flow to well) รูปที่ 7-8 แสดงการไหลของน้ำเข้าสู่บ่อสูบที่ลงท่อกรองตลอดความหนา และไม่ตลอดความหนาของชั้นหินให้น้ำ (partially penetrating well)

6. ความลาดเอียงของระดับน้ำบาดาล (water table) หรือระดับผิวแรงดันน้ำบาดาล (potentiometric surface) จะอยู่ในแนวระนาบระหว่างการสูบทดสอบ

7. อัตราการสูบทดสอบจะคงที่ (constant rate of pumping) ตลอดระยะเวลาของการสูบทดสอบ

8. ระยะเวลาในการสูบทดสอบจะนับจากระยะเริ่มต้นของการสูบจนสิ้นสุดของระยะระดับน้ำคืนตัว

9. ระดับน้ำที่วัดในบ่อสังเกตการณ์ (observation well) จะต้องลดลงทันทีเมื่อมีการเริ่มสูบน้ำจากบ่อสูบทดสอบ (pumping well)



รูปที่ 7-8 แสดงการไหลของน้ำเข้าสู่บ่อสูบที่ลงท่อกรองตลอดความหนา และไม่ตลอดความหนาของชั้นหินให้น้ำ (ที่มา: Kruseman and Ridder, 1990 ใน รายงานฉบับสมบูรณ์ (เล่มที่ 7/10) โครงการจัดทำมาตรฐานการเจาะสำรวจและพัฒนาบ่อน้ำบาดาล)

7.3.2 คำศัพท์เกี่ยวกับการสูบทดสอบ (terminologies of pumping test analysis)

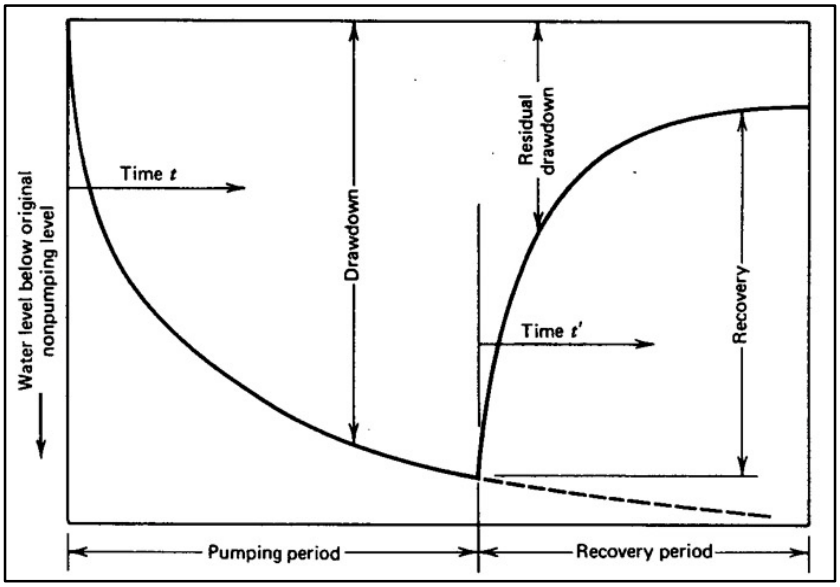
ก่อนสูบน้ำ ระหว่างการสูบน้ำ และหลังการสูบน้ำ ในบ่อน้ำบาดาลหนึ่งๆ มีค่าทางชลศาสตร์ที่เราจำเป็นต้องรู้และวัดค่าที่ระยะเวลาต่างๆ ดังนี้

1) **ระดับน้ำปกติ (static water level: S.W.L.)** หมายถึงระดับน้ำนิ่งในบ่อน้ำบาดาลในขณะที่ยังไม่มีการสูบน้ำ สำหรับบ่อน้ำบาดาลแบบไร้แรงดัน (unconfined aquifer) ระดับน้ำปกติจะอยู่ที่ระดับน้ำบาดาล (water table) ซึ่งก็คือระดับบนสุดของชั้นหินให้น้ำ หากเป็นในชั้นหินให้น้ำภายใต้แรงดัน (confined aquifer) ระดับน้ำปกติจะอยู่ที่ระดับผิวแรงดัน (potentiometric surface) ระดับน้ำปกติในบ่อน้ำบาดาลจะมีค่าเท่ากับ 1 บรรยากาศ (1 atmosphere: atm.)
2) **ระยะน้ำลด (drawdown: DD)** หมายถึงระยะที่เกิดขึ้นของระดับน้ำบาดาลในบ่อสูบขณะสูบ (pumping water level) เมื่อเทียบกับระดับน้ำปกติ ในช่วงแรกของการสูบ ระดับน้ำในบ่อจะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากเป็นน้ำที่ค้างอยู่ในบ่อ ต่อมาเมื่อเกิดค่าความลาดทางชลศาสตร์ (Hydraulic gradient) ขึ้นระหว่างน้ำในบ่อสูบกับระดับน้ำจากชั้นหินให้น้ำรอบๆ บ่อ น้ำจากชั้นหินให้น้ำจะค่อย ๆ ไหลเข้าสู่บ่อทำให้ระดับน้ำในบ่อลดลงน้อยกว่าช่วงแรกของการสูบ เมื่อปริมาณน้ำที่ไหลเข้าบ่อเท่ากับปริมาณน้ำที่สูบออก ระดับน้ำในบ่อก็จะไม่ลดลงอีกต่อไป เราเรียกสภาวะแบบนี้ว่าสภาวะสมดุล (equilibrium/steady State)

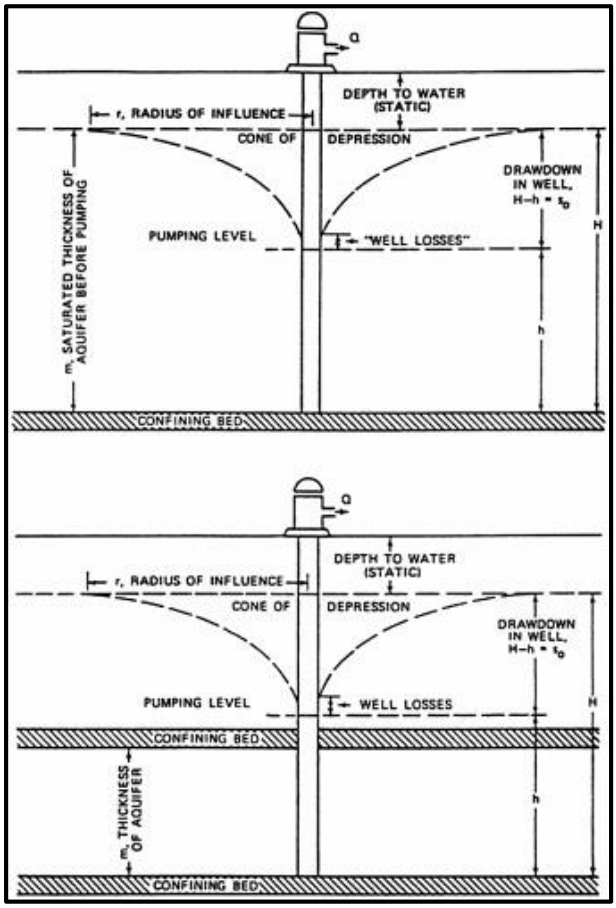
3) **ระดับน้ำคืนตัว (recovery)** หมายถึงระดับน้ำที่วัดได้ ณ เวลาหนึ่งๆ หลังจากหยุดสูบน้ำกับระยะน้ำ ณ เวลาหยุดสูบ และผลต่างระหว่างระดับน้ำปกติกับระดับน้ำคืนตัว ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง เรียกว่า **ระยะน้ำคืนตัวคงเหลือ (residual drawdown)** รูปที่ 7-9 แสดงให้เห็นลักษณะของระยะน้ำลด ระดับน้ำคืนตัว และระดับน้ำคืนตัวคงเหลือ
4) **ปริมาณการให้น้ำ (yield)** ของบ่อน้ำบาดาล หมายถึงปริมาณน้ำที่สูบขึ้นมาได้จากบ่อน้ำบาดาล ณ เวลาหนึ่งๆ
5) **กรวยน้ำลดและกรวยความดันลด (cone of depression and cone of pressure relief)** หมายถึงลักษณะคล้ายรูปทรงกรวยที่เกิดขึ้นรอบๆ บ่อสูบ เกิดขึ้นได้โดยการลดลงของระดับน้ำในทุกทิศทาง รอบๆ บ่อสูบ โดยระดับน้ำจะลดลงมากที่สุดในบ่อสูบ และเมื่อห่างบ่อสูบออกไประดับน้ำก็จะลดน้อยลงจนถึงจุดที่ระดับน้ำไม่ลดลงอีกต่อไป
6) **รัศมีอิทธิพล (radius of influence)** หมายถึงระยะทางจากจุดกึ่งกลางของบ่อสูบไปถึงระยะปลายสุดของกรวยน้ำลด ณ จุดที่ระดับน้ำไม่ลดลงในขณะที่สูบน้ำจากบ่อสูบ รูปที่ 7-10 แสดงลักษณะของกรวยน้ำลด และรัศมีอิทธิพลในชั้นหินให้น้ำแบบไรแรงดัน และในชั้นหินให้น้ำภายใต้แรงดัน
7) **ประสิทธิภาพการจ่ายน้ำจำเพาะ specific capacity: Sc)** หมายถึงปริมาณน้ำที่สูบได้ (yield: Q) หารด้วยระยะน้ำลด (drawdown: DD) ณ เวลาหนึ่งๆ เขียนเป็นสูตรสำหรับคำนวณง่ายๆ ดังนี้

$$Sc = Q / DD$$

หากเรากำหนดให้ระยะน้ำลดในบ่อสูงสุดได้ให้อยู่เหนือระยะท่อรับน้ำช่วงสุดท้ายประมาณ 3 เมตร (เพื่อความปลอดภัยของเครื่องสูบและท่อรับน้ำ) เราจะได้ค่าความสามารถในการจ่ายน้ำจำเพาะสูงสุดของบ่อน้ำบาดาล นั้นๆ



รูปที่ 7-9 แสดงให้เห็นลักษณะของระยะน้ำลด ระดับน้ำคืนตัว และระดับน้ำคืนตัวคงเหลือ (ที่มา Todd, 1980 ใน “น้ำบาดาล”, ทวีศักดิ์ ระมิงค์วงศ์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2546)

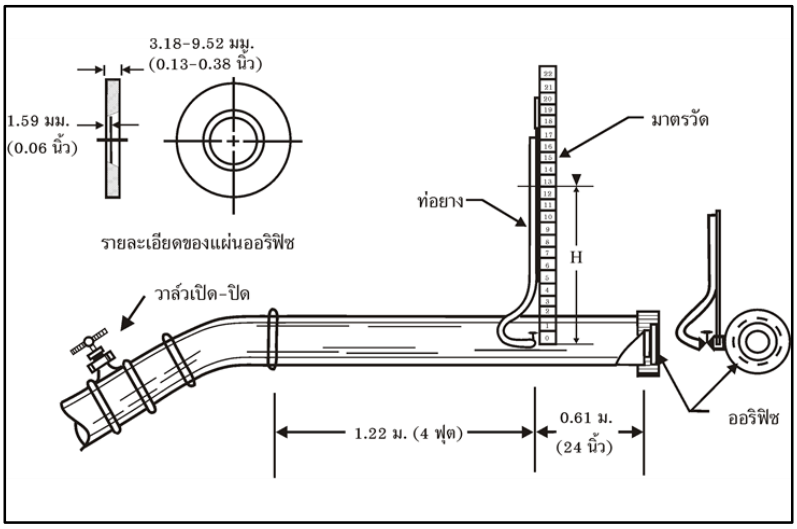


รูปที่ 7-10 แสดงให้เห็นลักษณะของกรวยน้ำลดและรัศมีอิทธิพลในชั้นหินให้น้ำแบบไรแรงดัน และในชั้นหินให้น้ำภายใต้แรงดัน (ภาพประกอบจาก Internet)

7.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการสูบทดสอบ (pumping test equipment)

1) เครื่องสูบน้ำ ซึ่งอาจเป็นแบบเทอร์ไบน์ (turbine pump) รูปที่ 7-11 หรือแบบจุ่มใต้น้ำ (submersible pump)
2) อุปกรณ์วัดการไหลของน้ำแบบ orifice (รูปที่ 7-12) หรือ แบบมาตรวัดน้ำ (flow meter)
3) อุปกรณ์วัดระดับน้ำ (electric dipper) (รูปที่ 7-13)
4) นาฬิกาจับเวลา และกระดาษบันทึกข้อมูล (รูปที่ 7-14)
5) เทปวัดระยะทาง (กรณีมีบ่อสังเกตการณ์)

รูปที่ 7-11 แสดงเครื่องสูบน้ำแบบเทอร์ไบน์ (Turbine pump)



รูปที่ 7-12 ส่วนประกอบของเครื่องวัดปริมาณน้ำแบบออริฟิซ (เจริญ เพียรเจริญ และจเร ตันติเสรี, 2517 ใน รายงานฉบับสมบูรณ์ (เล่มที่ 7/10) โครงการจัดทำมาตรฐานการเจาะ สำรวจ และพัฒนาบ่อน้ำบาดาล)

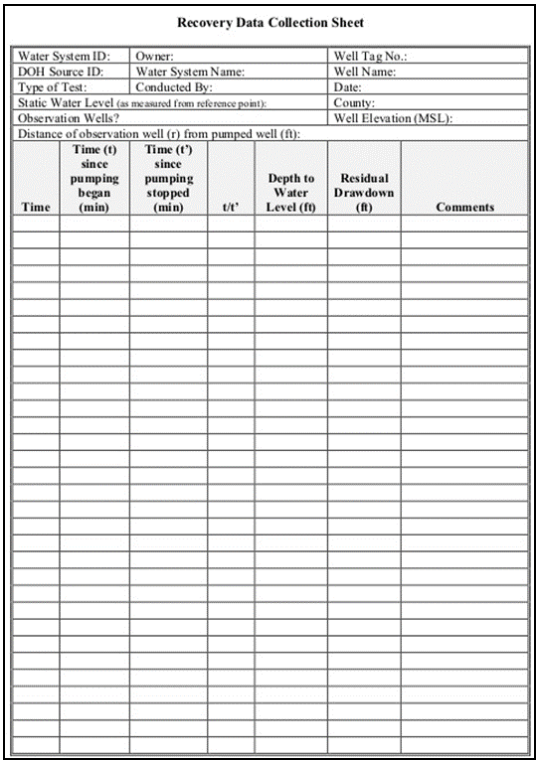
รูปที่ 7-13 แสดงเครื่องวัดระดับน้ำในบ่อน้ำบาดาล (Electric Dipper)

(ที่มาhttps://www.heroninstruments.com/products/conductivity-temperature-water-level-meters/dipper-temp)

PUMPING TEST DATA SHEET

Project: ----------
Name of abstraction well: ----------
Distance from observation well: ----------
Well Depth: ----------Well Diameter: ----------
Date of test: Start: ----------Finish: ----------
Depth of pump: ----------S.W.L: ----------
Remarks: ----------

Date	Actual time	Elapsed time (t) (min)	Depth to water table (m)	Draw Down (m)	Q (m^3/hr)	Remarks



Recovery Data Collection Sheet

Water System ID:	Owner:	Well Tag No.:
DOH Source ID:	Water System Name:	Well Name:
Type of Test:	Conducted By:	Date:
Static Water Level (as measured from reference point):		County:
Observation Wells?		Well Elevation (MSL):
Distance of observation well (r) from pumped well (ft):		

Time	Time (t) since pumping began (min)	Time (t') since pumping stopped (min)	t/t'	Depth to Water Level (ft)	Residual Drawdown (ft)	Comments

รูปที่ 7-14 แสดงตารางบันทึกค่าระดับน้ำระหว่างการสูบทดสอบ (ซ้าย) และระหว่างระดับน้ำคืนตัว (ขวา)

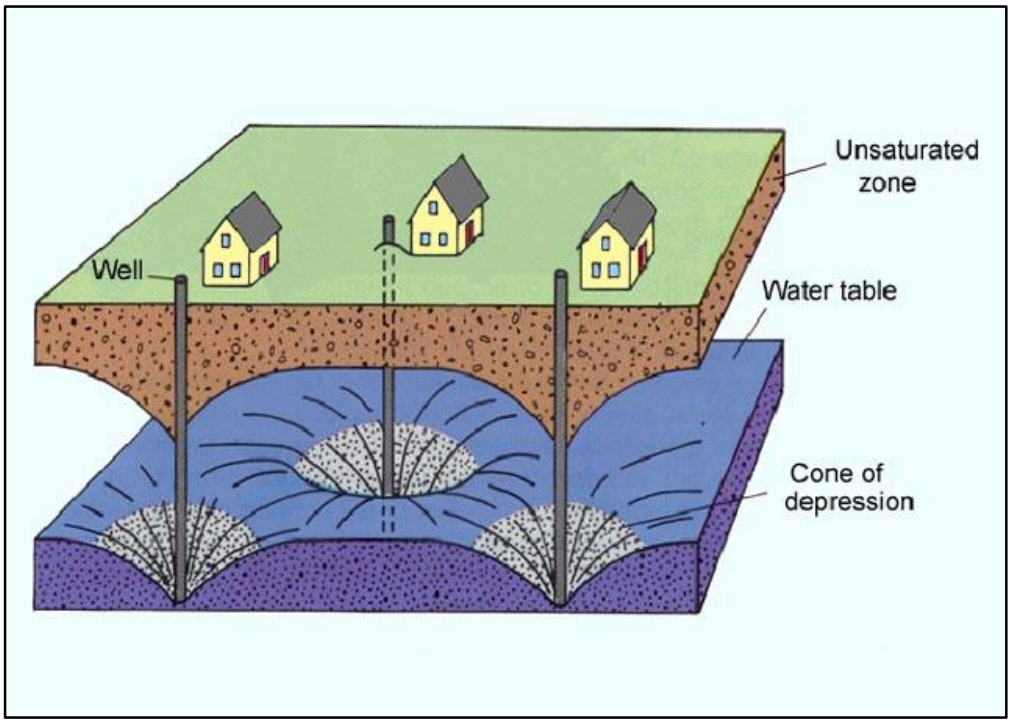
7.5 วิธีการและขั้นตอนการสูบทดสอบ (pumping test procedures)

1) เริ่มสูบน้ำด้วยอัตราคงที่ (constant rate pumping) และเริ่มวัดระดับน้ำในบ่อสูบโดยในช่วง 10 นาทีแรกให้วัดระดับน้ำ ทุก ๆ ครึ่งนาที จาก 10-15 นาที ให้วัดทุก 1 นาที จาก 15 ถึง 60 นาที ให้วัดทุก 5 นาที_จากนาทีที่ 60 ถึงนาทีที่ 300 ให้วัดทุก 30 นาที จากนาทีที่ 300 ถึงนาทีที่ 1,440 (24 ชั่วโมง) ให้วัดทุก ๆ หนึ่งชั่วโมง และจาก 1,440 นาที ไปจนถึงหยุดสูบ ให้วัดทุก ๆ 480 นาที หรือ 8 ชั่วโมง สาเหตุที่ต้องวัดถี่ในช่วงแรกเนื่องจากช่วงแรกของการสูบระดับน้ำที่อยู่ในท่อจะลดลงอย่างรวดเร็วและชั้นหินให้น้ำยังจ่ายน้ำเข้าสู่บ่อได้ช้า แต่เมื่อเวลาผ่านไป น้ำในชั้นหินให้น้ำจะจ่ายน้ำเข้าสู่บ่อสูบได้อย่างต่อเนื่อง ระดับน้ำจึงลดลงค่อนข้างช้า ความถี่ในการวัดก็จะน้อยลง การสูบจะดำเนินต่อไปจนระดับน้ำในบ่อไม่ลดลงอีกต่อไป ซึ่งส่วนใหญ่จะกำหนดไว้อย่างน้อย 72 ชั่วโมง
2) ในบ่อสังเกตการณ์ ระดับน้ำในบ่อจะลดลงช้ากว่าในบ่อสูบเล็กน้อย โดยในช่วง 60 นาทีแรกจะวัดระดับน้ำทุก ๆ 2 นาที จาก 60 ถึง 120 นาที จะวัดระดับน้ำในบ่อทุก ๆ 5 นาที จาก 120 ถึง 240 นาที จะวัดทุก ๆ 15 นาที จาก 240 ถึง 260 นาที จะวัดระดับน้ำในบ่อทุก ๆ 30 นาที จาก 360 ถึง 1,440 นาที จะวัดระดับน้ำในบ่อทุก ๆ 60 นาที และจาก 1,440 นาทีไปจนถึงหยุดสูบ จะวัดระดับน้ำในบ่อสังเกตการณ์ทุก ๆ 480 นาที หรือ 8 ชั่วโมง
3) เมื่อหยุดสูบแล้ว ให้เริ่มวัดระดับน้ำคืนตัว (recovery) ทันทีด้วยความถี่เหมือนกันทั้งในบ่อสูบและบ่อสังเกตการณ์
4) สำหรับชั้นหินให้น้ำที่มีค่าสัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำ (transmissivity) สูงหากเริ่มต้นด้วยอัตราการสูบต่ำ ระยะน้ำลดอาจจะไม่มากและระดับน้ำลดจะคงที่ในระยะเวลาอันสั้น ผู้ปฏิบัติอาจเลือกวิธีการสูบทดสอบแบบ step-drawdown test กล่าวคือเพิ่มอัตราการสูบไปทีละขั้น ซึ่งโดยปกติจะเพิ่มอีก 2 ขั้น รวมทั้งหมดเป็น 3 ขั้น (3 Steps) เท่านั้น หลังจากนั้นจึงหยุดสูบ และให้เริ่มวัดระดับน้ำคืนตัวทันที จนกว่าระดับน้ำคืนตัวจะขยับขึ้นใกล้เคียงกับระดับปกติ ก่อนการสูบทดสอบจึงจบกระบวนการสูบทดสอบ
5) นำค่าที่ได้จากการบันทึกระดับน้ำในบ่อสูบและบ่อสังเกตการณ์ทั้งในช่วงสูบน้ำและในช่วงหยุดสูบมาคำนวณหาคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของชั้นหินให้น้ำซึ่งได้แก่ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (hydraulic conductivity) ค่าสัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำ (transmissivity) และสัมประสิทธิ์การกักเก็บ (storativity) ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นการสูบทดสอบเพื่อประเมินคุณสมบัติของชั้นหินให้น้ำ (aquifer test) การคำนวณสามารถทำได้โดยการ matching curve หรือการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่มีข้อให้เลือกใช้หลายเงื่อนไข ผู้เขียนจะไม่ขอกล่าวถึงในที่นี้
6) นำค่าอัตราการสูบน้ำ (discharge: Q) มาหารด้วยระยะน้ำลด (drawdown) จะได้ค่าประสิทธิภาพการจ่ายน้ำจำเพาะ (Specific Capacity: Sc) ของบ่อน้ำบาดาล ถ้าค่า Sc สูง แสดงว่าบ่อน้ำบาดาลนั้นๆ มีประสิทธิภาพการจ่ายน้ำสูง สามารถใช้ในการกำหนดขนาดเครื่องสูบน้ำที่เหมาะสมได้ต่อไป
7) เก็บตัวอย่างน้ำบาดาลทั้งจากบ่อสูบ และบ่อสังเกตการณ์เพื่อนำไปวิเคราะห์คุณภาพน้ำว่าเหมาะสมต่อการนำไปใช้ตามวัตถุประสงค์หรือไม่ อย่างไร

7.6 พฤติกรรมของระดับน้ำบาดาลขณะทำการสูบ (behaviors of groundwater level while pumping)

ในช่วงต้นของการสูบ น้ำที่สูบขึ้นมาได้จะเป็นน้ำที่ค้างอยู่ในท่อของบ่อน้ำบาดาลนั้น ระดับน้ำบาดาลในบ่อจะลดลงอยากรวดเร็ว หลังจากนั้นน้ำที่ขึ้นมาจะเป็นน้ำจากชั้นหินให้น้ำที่อยู่รอบๆ ตัวบ่อ ในช่วงเริ่มต้นปริมาณการสูบน้ำออกจากบ่อจะมากกว่าปริมาณน้ำที่ชั้นหินให้น้ำจ่ายเข้าสู่บ่อ ระดับน้ำบาดาลในบ่อจะยังคงลดลงเรื่อยๆ เรียกว่าการไหลของน้ำบาดาลยังอยู่ในสภาวะไม่สมดุล (non-equilibrium หรือ non-steady state) แต่เมื่อสูบด้วยอัตราคงที่ต่อไปเรื่อยๆ น้ำจากชั้นหินให้น้ำจะสามารถจ่ายน้ำเข้าสู่บ่อสูบได้อย่างต่อเนื่องเท่ากับปริมาณที่สูบออกจากบ่อ ระดับน้ำบาดาลในบ่อจะไม่ลดลงต่อไป เรียกว่าอยู่ในสภาวะสมดุล (equilibrium หรือ steady state) ระดับน้ำที่ลดลงจากระดับปกติ (static water level: s.w.l.) ในช่วงใดช่วงหนึ่งของการสูบจะเรียกว่า “ระยะน้ำลด (drawdown)”

ระยะน้ำลดสูงสุด (maximum drawdown) จะอยู่ ณ ตำแหน่งของบ่อสูบ และจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อห่างบ่อออกไปและจนถึงจุดที่ระยะน้ำลดเท่ากับศูนย์ ระยะทางจากจุดนี้ไปจนถึงกึ่งกลางบ่อสูบจะเรียกว่า “รัศมีอิทธิพล (radius of influence)” หากลากวงกลมจากปลายรัศมีอิทธิพลรอบบ่อสูบซึ่งเปรียบเสมือนจุดศูนย์กลางวงกลม พื้นที่วงกลมที่เกิดขึ้นจะเรียกว่า “พื้นที่อิทธิพล (area of influence)” และหากขยับจากพื้นที่อิทธิพลบนดินลงไปจนถึงระดับน้ำในบ่อที่คงที่แล้วจะมีรูปร่างคล้ายกรวย จึงถูกเรียกว่า “กรวยน้ำลด (cone of depression)” รูปที่ 7-15 แสดงภาพ 3 มิติของกรวยน้ำลด



รูปที่ 7-15 แสดงภาพสเก็ตช์ 3 มิติของกรวยน้ำลดที่เกิดจากการสูบน้ำบาดาล 3 บ่อที่รัศมีอิทธิพลของแต่ละบ่อไม่ซ้อนทับกันจึงไม่ส่งผลกระทบต่อการละระดับน้ำบาดาลในชั้นหินให้น้ำระดับนั้น แต่หากว่ารัศมีอิทธิพลเกิดซ้อนทับกันจะทำให้เกิดระยะน้ำลดรวม (composite drawdown) ซึ่งจะทำให้ระดับน้ำบาดาลลดลงมากผิดปกติ ซึ่งหากสูบต่อไปนานๆ อาจทำให้ชั้นน้ำบาดาลนั้นแห้งลงได้ (groundwater mining)

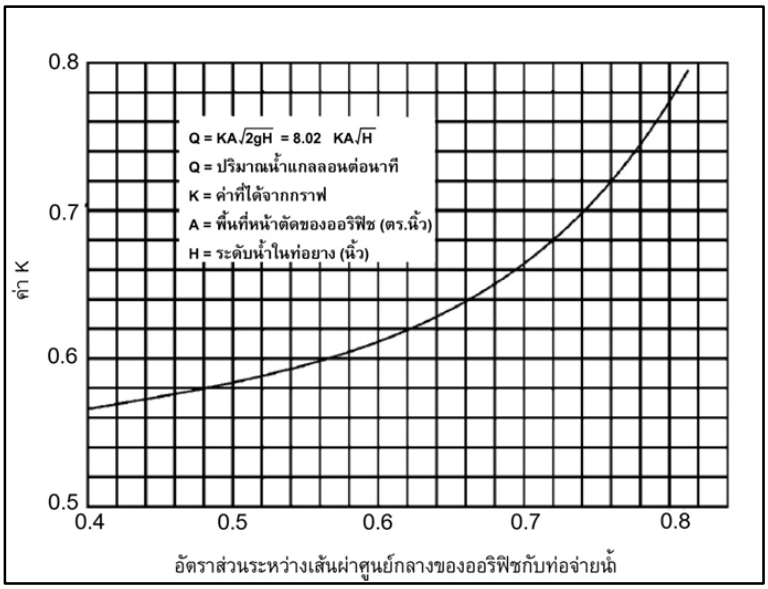
7.7 การคำนวณปริมาณน้ำที่สูบได้ (calculation for yield)

การคำนวณปริมาณน้ำจากการสูบทดสอบสามารถเลือกทำได้หลายวิธี แต่วิธีการที่จะได้ข้อมูลที่น่าเชื่อถือที่สุด ได้แก่การสูบทดสอบโดยใช้เครื่องมือได้แก่แผ่นวงกลมออริฟิช (circular orifice plate) ท่อจ่ายน้ำ (discharge pipe) ที่เหมาะสมกับเครื่องสูบ ท่อดังกล่าวต้องมีความยาวอย่างน้อย 1.2 ม. (4 ฟุต) เจาะรูให้ตั้งฉากกับแนวแกนกลางของบ่อให้ห่างจากปลายท่อซึ่งจะติดออริฟิชประมาณ 60 ซม. รูดังกล่าวจะต้องมีขนาดและเกลียวพอดีที่จะใส่นิปเปิล (nipple) ขนาด 0.32 ซม. (1/5 นิ้ว) ได้โดยให้ปลายนิปเปิลด้านที่ใส่ในท่อเสมอระดับเดียวกับผิวท่อด้านใน ต่อปลายนิปเปิลด้วยท่อยางหรือท่อพลาสติกให้ยาวอย่างน้อย 1.5 ม. (5 ฟุต) ก่อนการสูบน้ำต้องวางแนวท่อจ่ายน้ำจากเครื่องให้ได้ระดับและหมุนท่อให้แนวแกนกลางของนิปเปิลขนานกับแนวระดับพร้อมกับยกท่อยางหรือท่อพลาสติกให้สูงขึ้นตามแนวดิ่ง เมื่อน้ำไหลออกจากท่อจ่ายน้ำ ปริมาณน้ำทั้งหมดจะถูกกั้นไว้และไหลออกได้เฉพาะทางรูออริฟิช อีกส่วนหนึ่งจะดันให้สูงขึ้นทางนิปเปิลและท่อยางหรือท่อพลาสติก ถ้าวัดความสูงของน้ำในท่อยางหรือท่อพลาสติกจากจุดแกนกลางของนิปเปิลได้ ก็สามารถคำนวณหาปริมาณน้ำที่ทำการสูบในขณะนั้นได้ ดังแสดงในรูปที่ 7-16

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ คือ

$$Q = 8.025 \times K \times A \times H^{1/2}$$

เมื่อ Q คือ ปริมาณน้ำที่ทำการสูบคิดเป็นแกลลอนต่อนาที A คือ พื้นที่หน้าตัดของรูออริฟิชมีหน่วยเป็นตารางนิ้ว H คือ ความสูงของน้ำในบ่อท่อยางจากแนวแกนกลางของนิปเปิลมีหน่วยเป็นนิ้ว และ K คือค่าคงที่ซึ่งหาได้จากกร๊าฟในรูปที่ 2-45 ด้วยวิธีนี้จะเห็นได้ว่าค่า K และคือ A เป็นค่าคงที่แน่นอนสำหรับออริฟิชชุดหนึ่งชุดใดที่หาค่าล่วงหน้าได้ ส่วนค่าหรือตัวเลขที่ต้องวัดหาในสนามก็มีค่า H ค่าเดียว ถ้าวัดค่า H ที่ได้ก็จะคำนวณปริมาณน้ำได้ทันที ตารางที่ 7-1 แสดงการหาปริมาณน้ำจากค่า H ที่อ่านได้จากความสูงของระดับน้ำในสายยาง (ข้อความจากรายงานฉบับสมบูรณ์ (เล่มที่ 7/10) โครงการจัดทำมาตรฐานการเจาะ สำรวจและพัฒนาบ่อน้ำบาดาล)

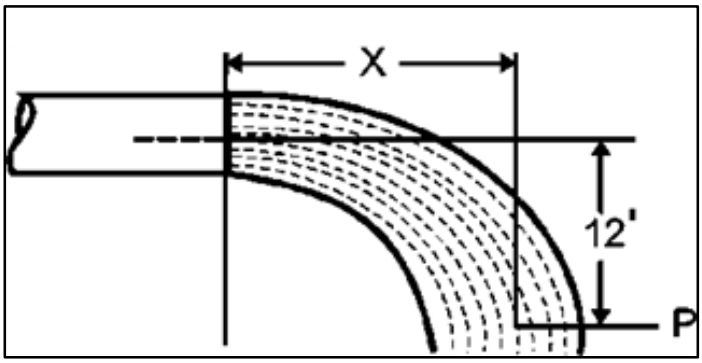


รูปที่ 7-16 กร๊าฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า K และอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางของออริฟิชกับท่อจ่ายน้ำ (เจริญ เพียรเจริญ และจเร ตันติเสรี, 2517 ใน รายงานฉบับสมบูรณ์ (เล่มที่ 7/10) โครงการจัดทำมาตรฐานการเจาะ สำรวจและพัฒนาบ่อน้ำบาดาล)

ตารางที่ 7-1 แสดงการหาปริมาณน้ำจากค่า H ที่อ่านได้จากความสูงของระดับน้ำในสายยาง สำหรับการวัดปริมาณน้ำโดยใช้ Circular Orifice Plate (รายงานฉบับสมบูรณ์ (เล่มที่ 7/10) โครงการจัดทำมาตรฐานการเจาะ สำรวจ และพัฒนาบ่อน้ำบาดาล)

ความสูงของน้ำ		ปริมาณน้ำจากท่อในแนวดิ่ง											
		ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ											
		2 นิ้ว (51 มม)		3 นิ้ว (76 มม.)		4 นิ้ว (102 มม.)		5 นิ้ว (127 มม.)		6 นิ้ว (152 มม.)		8 นิ้ว (203 มม.)	
(นิ้ว)	(ซม.)	แกลลอนต่อนาที	ลบ.ม./นาที	แกลลอนต่อนาที	ลบ.ม./นาที	แกลลอนต่อนาที	ลบ.ม./นาที	แกลลอนต่อนาที	ลบ.ม./นาที	แกลลอนต่อนาที	ลบ.ม./นาที	แกลลอนต่อนาที	ลบ.ม./นาที
1	2.54	22	0.10	43	0.20	68	0.31	85	0.39	110	0.50	160	0.73
2	5.08	26	0.12	55	0.25	93	0.42	120	0.55	160	0.73	230	1.05
3	7.62	33	0.15	74	0.34	130	0.59	185	0.84	250	1.14	385	1.75
4	10.16	38	0.17	88	0.40	155	0.70	230	1.05	320	1.45	520	2.36
5	12.70	44	0.20	99	0.45	175	0.80	270	1.23	380	1.73	630	2.86
6	15.24	48	0.22	110	0.50	190	0.86	300	1.36	430	1.95	730	3.32
8	20.32	56	0.25	125	0.57	225	1.02	360	1.64	510	2.32	900	4.09
10	25.40	62	0.28	140	0.64	255	1.16	400	1.82	580	2.64	1050	4.77
12	30.48	69	0.31	160	0.73	280	1.27	440	2.00	640	2.91	1150	5.23
15	31.10	78	0.35	175	0.80	315	1.43	500	2.27	700	3.18	1300	5.91
18	45.72	85	0.39	195	0.89	350	1.59	540	2.45	780	3.55	1400	6.36
21	53.34	93	0.42	210	0.95	380	1.73	595	2.70	850	3.86	1550	7.05
24	60.96	100	0.45	230	1.05	400	1.82	640	2.91	920	4.18	1650	7.50

การคำนวณโดยใช้การวัดปริมาณน้ำจากบ่อในแนวนอน โดยการติดตั้งท่อจ่ายน้ำให้อยู่ในแนวนอน ดังแสดงในรูปที่ 11 วัดระยะในแนวราบ (ระยะ X) โดยเริ่มวัดจากปลายท่อถึงจุด P ซึ่งจุด P ทำได้จากการวัดระยะ จากแนวเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อลงมา 30 ซม. (12 นิ้ว) แล้วกำหนดจุด P ตรงจุดกึ่งกลางสายน้ำที่ไหลออกจากท่อดังรูปที่ 7-17 เมื่อได้ระยะ X นำไปเทียบกับเส้น ผ่าศูนย์กลางของบ่อจะหาค่าปริมาณน้ำได้จากตารางที่ 7-2



รูปที่ 7-17 แสดงการวัดปริมาณน้ำจากการวัดระยะที่ไหลของน้ำจากท่อในแนวราบ (เจริญ เพียรเจริญ และจเร ตันติเสรี, 2517 ใน รายงานฉบับสมบูรณ์ (เล่มที่ 7/10) โครงการจัดทำมาตรฐานการเจาะ สำรวจและพัฒนาบ่อน้ำบาดาล)

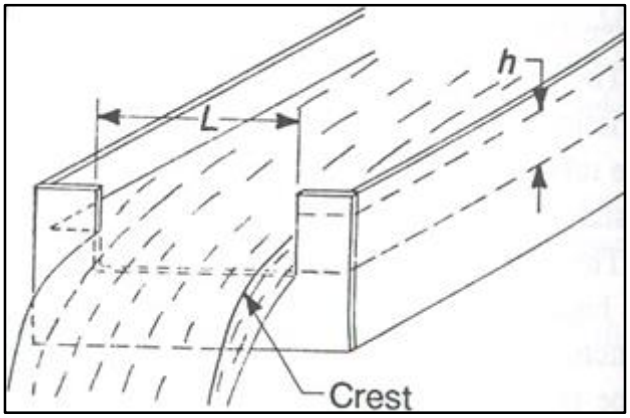
ตารางที่ 7-2 แสดงการคำนวณปริมาณน้ำจากท่อในแนวราบ (รายงานฉบับสมบูรณ์ (เล่มที่ 7/10) โครงการจัดทำมาตรฐานการเจาะ สำรวจ และพัฒนาบ่อน้ำบาดาล)

ระยะทางแนวราบ *		ปริมาณน้ำจากท่อในแนวราบ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ											
		2 นิ้ว (51 มม)		3 นิ้ว (76 มม.)		4 นิ้ว (102 มม.)		5 นิ้ว (127 มม.)		6 นิ้ว (152 มม.)		8 นิ้ว (203 มม.)	
(นิ้ว)	(ซม.)	แกลลอนต่อนาที	ลบ.ม./นาที	แกลลอนต่อนาที	ลบ.ม./นาที	แกลลอนต่อนาที	ลบ.ม./นาที	แกลลอนต่อนาที	ลบ.ม./นาที	แกลลอนต่อนาที	ลบ.ม./นาที	แกลลอนต่อนาที	ลบ.ม./นาที
6	15.24	21	0.10	46	0.21	80	0.36	125	0.57	181	0.82	312	1.42
7	17.78	24	0.11	54	0.25	93	0.42	146	0.66	211	0.96	364	1.65
8	20.32	28	0.13	61	0.28	106	0.48	167	0.76	242	1.10	416	1.89
9	22.86	31	0.14	69	0.31	119	0.54	188	0.85	272	1.24	468	2.13
10	25.40	35	0.16	77	0.35	133	0.60	208	0.95	302	1.37	520	2.36
11	27.94	38	0.17	84	0.38	146	0.66	229	1.04	332	1.51	572	2.60
12	30.48	42	0.19	92	0.42	159	0.72	250	1.14	362	1.65	624	2.84
15	38.10	52	0.24	115	0.52	199	0.90	313	1.42	453	2.06	780	3.55
20	50.80	70	0.32	154	0.70	26	0.12	417	1.90	604	2.75	1040	4.73

การคำนวณจากการไหลของน้ำผ่านเวียร์ (weir) การวัดปริมาณน้ำโดยใช้เวียร์นิยมใช้วัดปริมาณน้ำในลำห้วยขนาดเล็กที่มีอัตราการไหลประมาณ 100-1,000 ลบ.ม./ชม. กรณีการวัดปริมาณน้ำจากบ่อน้ำบาดาลทำได้โดยการสูบน้ำใส่ถังสี่เหลี่ยมขนาด 1 ลบ.ม. มีช่องเปิดให้น้ำไหลล้นเป็นรูปสี่เหลี่ยมกว้าง 2.54-30 ซม. (1-12 นิ้ว) ติดไม้บรรทัดบอกระยะความสูงน้ำ ปริมาณน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการของ Francis (Driscoll,1987)

$$Q = 1495 * L * h * \sqrt{h}$$

เมื่อ Q คือ ปริมาณน้ำมีหน่วยเป็นแกลลอนต่อนาที L คือ ความยาวของหน้าตัดมีหน่วยเป็นฟุต h คือ ความแตกต่างของระดับน้ำบนเวียและระดับน้ำที่ไหลผ่านเวียมีหน่วยเป็นฟุต (รูปที่ 7-18) จากรายงานฉบับสมบูรณ์ (เล่มที่ 7/10) โครงการจัดทำมาตรฐานการเจาะ สำรวจและพัฒนาบ่อน้ำบาดาล)



รูปที่ 7-18 แสดงการวัดปริมาณน้ำไหลของน้ำผ่านเวียร์ (Driscoll,1987 ในรายงานฉบับสมบูรณ์ (เล่มที่ 7/10) โครงการจัดทำมาตรฐานการเจาะ สำรวจและพัฒนาบ่อน้ำบาดาล)

7.8 วิธีการวิเคราะห์ในการสูบทดสอบ (method of pumping test analysis)

เมื่อทำการสูบทดสอบเสร็จแล้ว มีการนำค่าต่างๆ มาใช้ในการคำนวณไม่ว่าโดยวิธีการเทียบกร๊าฟด้วยมือ (manual graph matching) หรือการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปในการคำนวณ (computerized graph matching) วิธีการแปลความหมายการสูบทดสอบจะมีหลายวิธี ขึ้นอยู่กับสภาวะหรือเงื่อนไข (condition) ของค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้และได้มาระหว่างการสูบทดสอบ ผู้เขียนจะขอกล่าวโดยสังเขป ดังนี้

7.8.1 การสูบทดสอบในสภาวะไม่สมดุล (equilibrium/steady state condition)

หมายถึงการสูบทดสอบที่ระยะน้ำลด (drawdown) ไม่ลดลงต่อไปแล้ว ถือว่าอยู่ในสภาวะสมดุล วิธีคำนวณจะใช้ Theim's Equilibrium Formulas โดยแบ่งออกเป็น 2 เงื่อนไข ได้แก่

กรณีเป็นชั้นหินให้น้ำแบบไร้แรงดัน (unconfined aquifer) จะใช้สมการ Theim's Equilibrium Formula ดังนี้

$$T = \frac{Q}{2\pi (h_2/h_1)} * \ln [r2/r1]$$

กรณีเป็นชั้นหินให้น้ำภายใต้แรงดัน (confined aquifer) จะใช้สมการ Theim Equilibrium Formula ดังนี้

$$K = \frac{Q}{\pi (b_2/b_1)} * \ln [r2/r1]$$

โดยมี T = สัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำ (transmissivity) ของชั้นหินให้น้ำ (L^2/T)
K = ค่าความนำทางชลศาสตร์ (hydraulic conductivity) ของชั้นหินให้น้ำ (L/T)
Q = อัตราการสูบที่คงที่ (constant pumping rate) (L^3/T)
h_1 = เฮดที่ระยะเท่ากับ r_1 จากบ่อสูบทดสอบ (L)
h_2 = เฮดที่ระยะเท่ากับ r_2 จากบ่อสูบทดสอบ (L)
b_1 = ความหนาอิ่มตัว (saturated thickness) ของชั้นหินให้น้ำที่ระยะเท่ากับ r_1 จากบ่อสูบทดสอบ (L)
b_2 = ความหนาอิ่มตัว (saturated thickness) ของชั้นหินให้น้ำที่ระยะเท่ากับ r_2 จากบ่อสูบทดสอบ (L)

อ่านเพิ่มเติมได้ที่ "น้ำบาดาล", ทวีศักดิ์ ระมิงค์วงศ์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2546

7.8.2 การสูบทดสอบในสภาวะไม่สมดุล (non-equilibrium/transient state condition)

ข้อมูลที่สำคัญคือข้อมูลระยะเวลา-ระยะน้ำลด (time-drawdown data) ซึ่งมีวิธีที่เหมาะสมได้แก่ Theis Method และ Cooper-Jacob Method ซึ่งก็ยังแบ่งเป็น 2 วิธีย่อยคือ Cooper-Jacob time-drawdown method และ Cooper-Jacob recovery method ซึ่งข้อมูลระยะน้ำลดในบ่อสังเกตการณ์จะ

สามารถน้ำมาคำนวณหาค่า K ค่า T และค่า S ได้ แต่ข้อมูลระยะน้ำลดในบ่อสูบทดสอบจะไม่สามารถนำมาคำนวณหาค่า S ได้ เนื่องจากไม่มีค่าระยะทางหรือค่ารัศมี (r) นั่นเอง

นอกจากนั้นยังมีวิธีการแปลความหมายข้อมูลในสภาวะไม่สมดุลวิธีอื่นอีก ได้แก่วิธี Jacob Method ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาค่า T และค่า S ได้โดยการนำข้อมูลระยะน้ำลดในบ่อสังเกตการณ์มาพล็อตกับระยะทางระหว่างบ่อสูบทดสอบกับบ่อสังเกตการณ์ เรียกว่า Jacob Distance-Drawdown Method อีกหนึ่งวิธีการสำหรับการสูบทดสอบในสภาวะไม่สมดุลและชั้นหินให้น้ำภายใต้แรงดันที่มีการรั่วซึม ได้แก่วิธีที่เรียกว่า Walton Method in leaky confined aquifer วิธีการแปลความหมายข้อมูลข้างต้นสามารถกระทำได้โดยการใช้วิธี manual matching curve บนกร๊าฟต้นฉบับ (master curves) สำหรับแต่ละวิธีการก็ได้ (อ่านเพิ่มเติมได้ที่ “น้ำบาดาล”, ทวีศักดิ์ ระมิงค์วงศ์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2546) หรือจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปเช่น Aquifer Test หรือ AQTESOLV ก็ได้เช่นกัน แต่ไม่ว่าจะใช้วิธีการใด เป้าหมายของการสูบทดสอบก็เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าคุณสมบัติทางชลศาสตร์พร้อมคำจำกัดความของชั้นหินให้น้ำดังต่อไปนี้

1) ค่าความนำทางชลศาสตร์ (hydraulic conductivity: K) เป็นค่าอัตราส่วนที่คงที่ตามกฎของดาร์ซี ได้จากการวัดความสามารถในการให้น้ำไหลผ่านของวัตถุตัวกลาง ค่า K จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของทั้งตัวกลางที่ของเหลวไหลผ่านและของเหลวที่ไหลผ่าน (ความหนาแน่นและความหนืด) ค่าความนำทางชลศาสตร์ (K) มีหน่วยเป็นความเร็ว (L/T) หรือระยะทางต่อเวลาและสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$K = Q / Ai$$

เมื่อ **K** หมายถึงค่าความนำทางชลศาสตร์ หรือสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic Conductivity/Coefficient of Permeability) มีหน่วยเป็นพื้นที่ต่อเวลา (L2/T เช่น m2/d)

Q หมายถึงอัตราการไหลของน้ำ หน่วยเป็นปริมาตรต่อเวลา (L^3/T, เช่น m^3/d)

A หมายถึงพื้นที่หน้าตัดที่น้ำไหลผ่าน มีหน่วยเป็นพื้นที่ (L^2 เช่น m^2)

และ ***i*** หมายถึงค่าความลาดชลศาสตร์ (hydraulic gradient) หรือ dh/dl มีหน่วยเป็นระยะทางต่อระยะทาง (L/L เช่น m/m)

2) สัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำ (transmissivity: T) หมายถึงปริมาณการไหลของน้ำในแนวราบผ่านพื้นที่หน้าตัดหนึ่งหน่วยตลอดความหนาของชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้ค่าความลาดทางชลศาสตร์ (Hydraulic gradient) 1 หน่วย (รูปที่ 7-19) สามารถคำนวณได้ตามสมการ ดังนี้

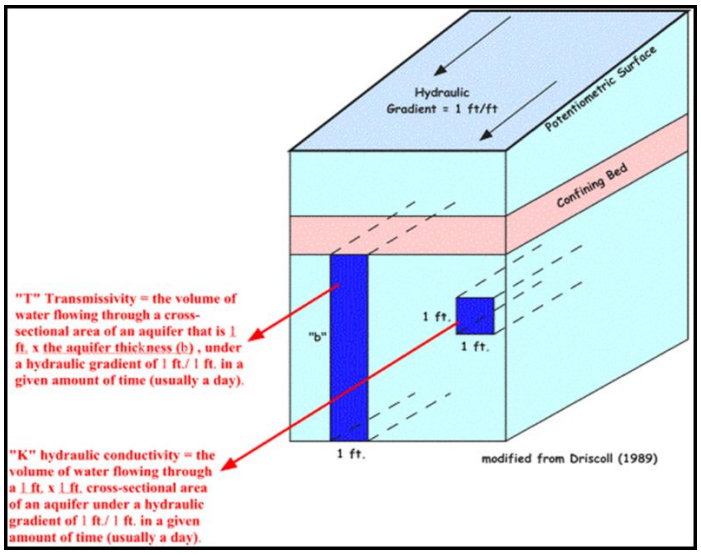
$$T = Kb$$

เมื่อ T หมายถึง สัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำ (Transmissivity หรือ Coefficient of Transmissibility) มีหน่วยเป็นปริมาตรต่อเวลา (L^3/T เช่น m^3/d)

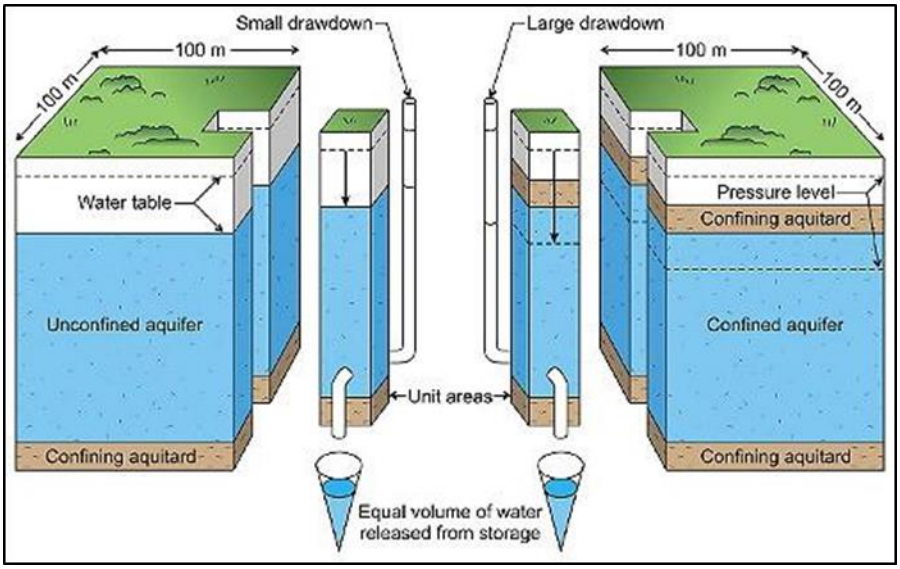
K หมายถึงค่าความนำทางชลศาสตร์ หรือสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (hydraulic conductivity/coefficient of permeability) มีหน่วยเป็นพื้นที่ต่อเวลา (L^2/T เช่น m^2/d)

b หมายถึงความหนาอิ่มตัวของชั้นหินให้น้ำ (saturated thickness of aquifer) หน่วยเป็นระยะทาง (L เช่น m)

3) สัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำ (coefficient of storage หรือ storativity: S) หมายถึงปริมาตรของน้ำที่สามารถสูบออกมาได้หรือเติมเข้าไปเก็บกักได้ในหน่วยหินต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เมื่อระดับน้ำเปลี่ยนไปหนึ่งหน่วย สำหรับในชั้นหินอุ้มน้ำไร้แรงดัน (จะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป) สัมประสิทธิ์การกักเก็บจะมีค่าเท่ากับความสามารถในการจ่ายน้ำจำเพาะของบ่อน้ำบาดาล (specific yield: S_y) ซึ่งก็คือปริมาณน้ำที่ระบายออกมาจากตัวกลางเนื้อพรุน (porous media) โดยอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของโลก กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คืออัตราส่วนของปริมาณน้ำที่ระบายออกมาจากตัวกลางเนื้อพรุนเมื่อเทียบกับปริมาตรทั้งหมดของตัวกลาง และในชั้นหินอุ้มน้ำภายใต้แรงดัน (confined aquifer) (จะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป) จะมีค่าเท่ากับความสามารถในการจ่ายน้ำจำเพาะของบ่อน้ำบาดาล (S_s) คูณกับความหนาอิ่มตัว (saturated thickness: b) ของชั้นหินให้น้ำ (S_sb) รูปที่ 7-20 แสดงสัมประสิทธิ์การกักเก็บของชั้นหินให้น้ำไร้แรงดัน และของชั้นหินให้น้ำภายใต้แรงดัน



รูปที่ 7-19 ภาพแสดงที่มาของค่าสัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำ (transmissivity; T) ซึ่งเป็นผลคูณของค่าความนำทางชลศาสตร์ (K) ซึ่งเป็นค่าที่เป็นผลลัพธ์ของปริมาณน้ำ (Q) ที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด (A) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าลาดชลศาสตร์ (hydraulic gradient; *i*) หนึ่งหน่วยกับความหนาของชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำของชั้นหินให้น้ำ (saturated thickness of aquifer; b) ดังสมการ T = Kb



รูปที่ 7-20 ภาพแสดงสัมประสิทธิ์การกักเก็บของชั้นหินให้น้ำไร้แรงดัน และของชั้นหินให้น้ำภายใต้แรงดัน ภาพซ้าย ในชั้นหินให้น้ำภายใต้แรงดัน ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บมีค่าเท่ากับผลรวมของปริมาตรการให้น้ำจำเพาะ (specific yield: S_y) กับผลคูณของการกักเก็บจำเพาะกับความหนาของชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำ ($S_s b$) ส่วนภาพขวาซึ่งแสดงค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บของชั้นหินให้น้ำแบบไร้แรงดัน ค่าค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บ จะมีค่าเท่ากับผลคูณของการกักเก็บจำเพาะกับความหนาของชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำ ($S_s b$) ในภาพจะเห็นว่าหากปริมาณน้ำที่ระบายออกมาจากทั้งชั้นหินให้น้ำไร้แรงดัน และชั้นหินให้น้ำมีแรงดันมีปริมาตรเท่ากัน ระยะน้ำลด (d) ในชั้นหินให้น้ำภายใต้แรงดัน (ภาพขวา) จะมีค่ามากกว่าในชั้นหินให้น้ำไร้แรงดัน (ภาพซ้าย) หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งได้คือหากให้ระยะน้ำลด (d) มีขนาดเท่ากัน ปริมาตรน้ำที่ระบายสู่กรวยทางภาพขวามือจะน้อยกว่าปริมาตรน้ำที่ระบายสู่กรวยทางภาพซ้ายมือ

<u>ข้อควรระวัง</u>

การสูบทดสอบในกรณีที่มีหลายบ่อในพื้นที่เดียวกัน (well field) ถ้าสูบพร้อมกันหลาย ๆ บ่อ จะได้ค่าคุณสมบัติทางชลศาสตร์ที่ไม่เป็นจริง ทั้งนี้เนื่องจากกรวยน้ำลด (cone of depression) หรือรัศมีอิทธิพล (radius of influence) ของแต่ละบ่ออาจไปซ้อนทับกัน และอาจจะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “ระยะน้ำลดรวม (composite drawdown)” ซึ่งจะทำให้การแปลความหมายหรือการคำนวณจากระยะน้ำลดไม่ได้ค่าที่แท้จริงของบ่อบาดาลแต่ละบ่อ ค่าที่คำนวณได้จึงไม่สามารถเชื่อถือได้ (unreliable result)

บทที่ 8
การวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลและการปรับปรุงคุณภาพน้ำ
(Groundwater Analysis and Water Treatment)

8.1 อุทกเคมีของน้ำบาดาล (groundwater hydrochemistry)

ในบทนี้จะกล่าวถึงคุณลักษณะโดยทั่วไปของน้ำบาดาลและกระบวนการบางอย่างที่สำคัญต่อการวิวัฒนาการทางเคมีของน้ำซึ่งไหลผ่านชั้นดินรวมไปถึงการสมดุลของสารคาร์บอเนต (carbonate equilibrium) ปฏิกิริยาเพิ่มและลดออกซิเจน (oxidation-reduction reactions) และกระบวนการดูดซับสารและการคายสาร (adsorption and desorption processes)

8.1.1 สารที่ละลายอยู่ในน้ำบาดาล (dissolved constituents in groundwater)

มีแร่ธาตุมากมายหลายชนิดที่สามารถถูกละลายไปอยู่ในน้ำบาดาล ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากการละลายในบรรยากาศ สภาวะแวดล้อมบนผิวดิน ในดิน และในหินดาน (bedrock) น้ำบาดาลมักจะมีความเข้มข้นของสารต่างๆ มากกว่าน้ำผิวดิน และน้ำบาดาลระดับลึกที่ไหลผ่านหินชนิดต่างๆ เป็นระยะทางไกลและเวลาเนิ่นนาน (residence time) หรือน้ำบาดาลอายุมากก็มักจะมีความเข้มข้นของสารต่างๆ มากกว่าน้ำบาดาลระดับตื้นและมีอายุน้อย การจัดกลุ่มหรือประเภทของสารต่างๆ ในน้ำ มักจะจัดออกเป็นสารหลักหรือสารที่มักพบมากในน้ำบาดาล ทั้งสารที่มีประจุบวกและสารที่มีประจุลบ (predominant cations and anions) และสารที่มีปริมาณน้อย (trace elements)

ความเข้มข้นของสารที่ละลายอยู่ในน้ำบาดาลของสารหลักมักจะถูกระบุออกมาเป็นหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L) หรือหนึ่งส่วนในล้านส่วน (part per million: ppm) และสำหรับสารที่มีน้อยมักจะแสดงออกมาในรูปของไมโครกรัมต่อลิตร (μg/L) หรือหนึ่งส่วนในพันล้านส่วน (part per billion: ppb) เราสามารถแสดงหน่วยความเข้มข้นของสารต่างๆ ในน้ำบาดาลเป็นหน่วย molarity (โมลต่อน้ำหนึ่งลิตร) ได้เช่นกัน ยกตัวอย่างเช่นสารละลายที่มีแคลเซียม (Ca) 34.1 mg/L จะมี molarity ของ Ca เท่ากับ 34.1/40.08 = 0.851 millimole/litre (Mm/L) ตัวเลข 40.08 ในที่นี้คือน้ำหนักอะตอม (atomic weight) ของ Ca

สำหรับน้ำบาดาล ดัชนีคุณภาพน้ำบาดาลที่กรมทรัพยากรน้ำบาดาล หรือแม้แต่องคการอนามัยโลก (World Health Organization: WHO) หรือองค์กรใด ๆ ที่มีความจำเป็นให้ใส่ใจในคุณภาพน้ำ กำหนดให้ต้องวิเคราะห์จะแบ่งออกเป็น 3 ด้าน ได้แก่ด้านกายภาพ (physical characteristics) ด้านเคมี (chemical characteristics) และด้านชีวภาพ (biological characteristics) ด้านกายภาพได้แก่ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณของธาตุไฮโดรเจน (hydrogen) ในน้ำ สี (colour) หน่วยเป็น Platinum-Cobalt ความขุ่น (turbidity) มีหน่วยเป็น NTU (Nephalometric Turbidity Unit) ค่าความนำไฟฟ้า (electrical conductivity: EC) หน่วยเป็น ไมโครซีเมนส์/ซม. (μS/cm) ที่ 25 องศาเซลเซียส สำหรับด้านเคมี กรมทรัพยากรน้ำบาดาลจะกำหนดให้วิเคราะห์ทั้งประจุบวกหลัก (major cations) และประจุลบหลัก (major anions) ธาตุที่มีประจุบวกที่สำคัญ และพบมากในน้ำบาดาลได้แก่ Calcium (Ca^{+2}) Magnesium (Mg^{+2}) Sodium (Na^{+1}) และ Potassium (K^{+1}) สำหรับธาตุที่มีประจุลบที่สำคัญและพบมากในน้ำบาดาลได้แก่ Chloride (Cl^{-1}) Carbonate (CO_3^{-2}) Bicarbonate (HCO_3^{-1}) Fluoride (F^{-1}) Nitrite (NO_2^{-2}) Nitrate (NO_3^{-1}) และ Sulfate (SO_4^{-2}) สำหรับด้านชีวภาพนั้น กรมทรัพยากรน้ำบาดาลกำหนดให้วิเคราะห์คุณลักษณะทางแบคทีเรียซึ่งประกอบด้วย Standard Plate Count, Most probable number of coliform organisms (MPN) และ E. coli นอกจากนั้นหากในพื้นที่ใดมีข้อมูลเกี่ยวกับโลหะหนักในน้ำบาดาล กรมทรัพยากรน้ำบาดาลจะกำหนดให้วิเคราะห์โลหะหนักด้วยเช่นกัน โลหะหนักที่มักพบในน้ำบาดาลได้แก่ สารหนู (As)

ไซยาไนด์ (CN) ตะกั่ว (Pb) ปรอท (Hg) แคดเมียม (Cd) และซีลีเนียม (Se) ซึ่งจะถูกจัดอยู่ในหมวดสารพิษ ตารางที่ 8-1 และ 8-2 แสดงมาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก และของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล ตามลำดับ

ตารางที่ 8-1 แสดงมาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก ปี พ.ศ. 2539

ข้อมูล	หน่วยวัด	เกณฑ์ที่กำหนด
ความเป็นกรด-ด่าง	-	-
สี	แพลตตินัมโคบอลท์	ไม่เกิน 15
ความขุ่น	เอ็นทียู (NTU)	ไม่เกิน 5
สารละลายทั้งหมดที่เหลือจากการระเหย	มิลลิกรมต่อลิตร	ไม่เกิน 1,000
ความกระด้าง	มิลลิกรมต่อลิตร	-
เหล็ก	มิลลิกรมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.3
แมงกานีส	มิลลิกรมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.1
ทองแดง	มิลลิกรมต่อลิตร	ไม่เกิน 1.0
สังกะสี	มิลลิกรมต่อลิตร	ไม่เกิน 3
ตะกั่ว	มิลลิกรมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.01
โครเมียม	มิลลิกรมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.05
แคดเมียม	มิลลิกรมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.003
สารหนู	มิลลิกรมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.01
ปรอท	มิลลิกรมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.001
ซัลเฟต	มิลลิกรมต่อลิตร	ไม่เกิน 250
คลอไรด์	มิลลิกรมต่อลิตร	ไม่เกิน 250
ไนเตรท	มิลลิกรมต่อลิตร	ไม่เกิน 50
ฟลูออไรด์	มิลลิกรมต่อลิตร	ไม่เกิน 1.5
คลอรีนอิสระคงเหลือ	มิลลิกรมต่อลิตร	-
แบคทีเรียประเภทโคลิฟอร์ม	เอ็มพีเอ็นต่อ 100 มิลลกรม	ไม่พบ
อี.โคไล หรือเทอร์โมโธเลอแรนท์โคลิฟอร์มแบคทีเรีย	เอ็มพีเอ็นต่อ 100 มิลลกรม	ไม่พบ
แบเรียม	มิลลิกรมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.7
ฟีนอล	มิลลิกรมต่อลิตร	-
ซิลิเนียม	มิลลิกรมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.01
เงิน	มิลลิกรมต่อลิตร	-
อลูมิเนียม	มิลลิกรมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.2
เอ บี เอส (Alkylbenzene Sulfonate)	มิลลิกรมต่อลิตร	-
ไซยาไนด	มิลลิกรมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.07
นิเกิล	มิลลิกรมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.02

ที่มา: Guidelines for drinking – water quality (WHO, 1996)

ตารางที่ 8-2 แสดงมาตรฐานน้ำดื่มของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล ปี พ.ศ. 2551

คุณลักษณะ	ดัชนีคณภาพน้ำ	หน่วย	ค่ามาตรฐาน	
			เกณฑ์กำหนดท เหมาะสม	เกณฑ์อนุโลม สูงสุด
ทางกายภาพ	1.สี (Colors)	ปลาตินัม-โคบอลต	5	15
	2.ความขุ่น(Turbidity)	หน่วยความขุ่น	5	20
	3.ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	-	7.0-8.5	6.5-9.2
ทางเคมี	4.เหล็ก (Fe)	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 0.5	1.0
	5.มังกานีส (Mn)	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 0.3	0.5
	6.ทองแดง (Cu)	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 1.0	1.5
	7.สังกะสี (Zn)	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 5.0	15.0
	8.ซัลเฟต (SO_4)	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 200	250
	9.คลอไรด์ (Cl)	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 250	600
	10.ฟลูออไรด์ (F)	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 0.7	1.0
	11.ไนเตรต (NO_3)	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 45	45
	12.ความกระด้างทั้งหมด (Total Hardness as $CaCO_3$)	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 300	500
	13.ความกระด้างถาวร (Non carbonate hardness as $CaCO_3$)	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 200	250
	14.ปริมาณสารทั้งหมดที่ละลายได้ (Total dissolved solids)	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 600	1,200
สารพิษ	15.สารหนู (As)	มก./ล.	ต้องไม่มีเลย	0.05
	16.ไซยาไนด์ (CN)	มก./ล.	ต้องไม่มีเลย	0.1
	17.ตะกั่ว (Pb)	มก./ล.	ต้องไม่มีเลย	0.05
	18.ปรอท (Hg)	มก./ล.	ต้องไม่มีเลย	0.001
	19.แคดเมียม (Cd)	มก./ล.	ต้องไม่มีเลย	0.01
	20.ซิลิเนียม (Se)	มก./ล.	ต้องไม่มีเลย	0.01
ทางบักเตรี	21.บักเตรีที่ตรวจพบโดยวธี Standard plate count	โคโลนีต่อ ลบ.ซม.	ไม่เกินกวา 500	-
	22.บักเตรีที่ตรวจพบโดยวิธ Most Probable Number (MPN)	เอ็ม.พี.เอน ต่อ 100 ลบ.ซม.	น้อยกว่า 2.2	-
	23.อี.โคไล (E.coli)	-	ต้องไม่มีเลย	

8.1.2 วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์น้ำ (objectives of groundwater analysis)

1. เพื่อตรวจสอบคุณภาพน้ำบาดาลว่าเหมาะสมที่จะนำไปอุปโภค-บริโภคหรือไม่ มีธาตุชนิดใดที่มีอยู่เกินเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดโดยองค์การอนามัยโลก (World Health Organization: WHO) หรือไม่ อย่างไร

2. เพื่อที่จะเลือกวิธีปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลที่เหมาะสม มีประสิทธิภาพ และประหยัดงบประมาณในการการปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล

เนื่องจากแหล่งน้ำแต่ละท้องที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันตามสภาพทางธรณีวิทยาและเคมี ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในตอนต้นของบท รวมทั้งอาจมีแร่ธาตุที่ส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตเมื่อบริโภคเข้าไป จึงต้องวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลก่อนการนำไปใช้งานตามต้องการ หากมีแร่ธาตุใดที่สูงเกินเกณฑ์มาตรฐาน หรือเกณฑ์อนุโลมสูงสุดก็จะต้องหาวิธีการที่เหมาะสมมาปรับปรุงคุณภาพน้ำ หรืออาจกำหนดให้ “งดใช้ในการบริโภค” กรณีพบสารเคมีสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานอุปโภคบริโภค มีขั้นตอนหลัก ๆ ได้แก่ การเก็บตัวอย่าง และการหาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

8.1.3 วิธีการวิเคราะห์น้ำบาดาล (Groundwater Analysis Methods)

1) การเก็บตัวอย่างน้ำ จำแนกได้เป็นการเก็บเพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีโดยรวม การเก็บเพื่อหาโลหะหนัก (เหล็ก แมงกานีส ทองแดง และสังกะสี) และการหาคุณลักษณะที่เป็นพิษหรือสารพิษ (ปรอท โครเมียม แคดเมียม สารหนู และซีลีเนียม)

1.1) การเก็บตัวอย่างน้ำจากบ่อบาดาล หากเป็นบ่อเจาะใหม่ให้เก็บขณะทดสอบปริมาณน้ำก่อนหยุดสูบประมาณ 15 นาที บ่อที่ใช้งานแล้วให้เก็บหลังจากเริ่มสูบน้ำใช้ในวันที่จะเก็บตัวอย่างไม่น้อยกว่า 15 นาที โดยใช้ขวดพลาสติกหรือขวดแก้วสะอาด (กลั้วด้วยน้ำที่เก็บ 2-3 ครั้ง) เก็บให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร ขึ้นไป ปิดฝาให้แน่นแล้วส่งวิเคราะห์ต่อไป

1.2) การเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อหาโลหะหนัก ให้ใช้ขวดพลาสติกทนกรดหรือขวดแก้วสะอาด ขนาด 250 มิลลิลิตร กลั้วด้วยน้ำที่เก็บ 2-3 ครั้ง เก็บให้ได้ปริมาตร 240 มิลลิลิตร เติมกรดไนตริกเข้มข้น (1:1 โดยปริมาตร) 1 มิลลิลิตร เพื่อให้น้ำมี pH ต่ำกว่า 2 โลหะหนักจะอยู่ในรูปไอออนละลายน้ำ เขย่าและปิดฝาให้แน่น

1.3) การเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อหาคุณลักษณะที่เป็นพิษ การเก็บคล้ายกับการเก็บเพื่อหาโลหะหนักแต่ให้ใช้ตัวอย่างน้ำที่กรองผ่านกระดาษกรอง 0.45 ไมครอน แทนเพื่อให้ได้ตัวอย่างน้ำจริงๆ ไม่ได้มาจากตะกอนดิน

2) คุณลักษณะในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาล

2.1) คุณลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ pH ค่าการนำไฟฟ้า ความขุ่น และสี

2.2) คุณลักษณะทางเคมี ได้แก่ ได้แก่ cations (sodium, potassium, calcium, magnesium, iron, manganese, copper และ zinc, ความกระด้างชั่วคราวและถาวร anions (carbonate, bicarbonate, nitrate, fluoride, sulphate และ chloride) และปริมาณสารทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (total dissolved solids: TDS)

2.3) คุณลักษณะที่เป็นพิษ คือโลหะหนักที่มีผลกระทบต่อสุขภาพแม้ได้รับปริมาณน้อย และตามมาตรฐานน้ำบาดาลที่จะใช้บริโภค กำหนดให้ “ต้องไม่มี หรืออยู่ในเกณฑ์อนุโลม” ได้แก่ ปรอท, โครเมียม, แคดเมียม, สารหนู และซีลีเนียม ใช้เครื่อง Inductive Couple Plasma/Mass Spectrometer (ICP/MS) วิเคราะห์คุณภาพ รูปที่ 8-1 ตัวอย่างเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาล อนึ่ง การหาค่าความกระด้าง ค่าความเป็นด่าง (คาร์บอเนตและไบคาร์บอเนต) แคลเซียม แมกนีเซียม และคลอไรด์ จะใช้วิธีไทเทรต (Titration)

เครื่องมือ	คุณภาพที่วิเคราะห์
(a) UV-VIS Spectrophotometer	ซัลเฟตและไนเตรต
(b) Ion Selective Electrode Metre	โซเดียม, โพแทสเซียม และฟลูออไรด์
(c) pH meter-Conductometre	pH และการนำไฟฟ้า
(d) Atomic Absorption Spectrometre	เหล็ก แมงกานีส ทองแดง สังกะสี โซเดียม และโพแทสเซียม

รูปที่ 8-1 แสดงตัวอย่างเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาล (a) เครื่อง UV-VIS Spectrophoto meter ใช้วิเคราะห์หาสารซัลไฟต และไนเทรต (b) เครื่อง Ion Selective Electrode Meter ใช้วิเคราะห์หาสารโซเดียม โพแทสเซียม และฟลูออไรด์ (c) เครื่อง pH meter-Conductometre ใช้ตรวจวัดค่า pH และการนำไฟฟ้า และ (d) เครื่อง Atomic Absorption Spectrometre ใช้วิเคราะห์หาค่าเหล็ก แมงกานีส ทองแดง สังกะสี โซเดียม และโพแทสเซียม

8.2 การแปลความหมายผลการวิเคราะห์น้ำบาดาล (interpretation of groundwater analysis)

โดยปกติทั่วไปผลการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำบาดาล หรือแม้กระทั่งน้ำผิวดินต่างๆ จะถูกนำมาแสดงผลเป็นตารางที่ออกแบบไว้เฉพาะองค์กรหรือหน่วยงาน เช่นเดียวกับการแสดงผลวิเคราะห์ของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล แต่หากต้องการให้แสดงผลในรูปของแผนภาพ (diagram) ต่าง ๆ ก็สามารถทำได้ และการแสดงโดยแผนภาพนั้นจะสามารถช่วยให้เราวิเคราะห์ประเภทของน้ำบาดาลได้เช่นกัน ซึ่งประเภทของน้ำที่แสดงให้เห็นโดยแผนภาพจะบอกถึงประเภทของน้ำบาดาล (groundwater facies) อายุสัมพัทธ์ของน้ำบาดาล (relative age of groundwater) รวมถึงบ่งบอกว่าตำแหน่งที่ตั้งของบ่อน้ำบาดาลนั้นตั้งอยู่ส่วนใดในระบบการไหลของน้ำบาดาล (groundwater flow regime) เช่นเป็นพื้นที่รับน้ำ (recharge area) เป็นพื้นที่กลางน้ำ (mid-line area) หรือเป็นพื้นที่สูญเสียน้ำ (discharge area)

8.2.1 การแสดงผลแบบทั่วไป (general display of water analysis results)

เป็นการแสดงผลโดยใช้แผ่นแบบฟอร์มข้อมูล (data sheet) ใส่ผลที่วิเคราะห์ได้ในห้องปฏิบัติการลงไปในช่องข้อมูล ซึ่งในแบบฟอร์มจะมีรายละเอียดตั้งแต่เลขที่คำขอ หมายเลขห้องปฏิบัติการสถานที่ตั้งบ่อน้ำบาดาล พิกัดบ่อน้ำบาดาล ข้อมูลบ่อน้ำบาดาลอื่นๆ เช่นหมายเลขบ่อ ความลึกของบ่อ วันที่เก็บตัวอย่างน้ำ เป็นต้น หลังจากนั้นก็จะเป็นการใส่ข้อมูลคุณลักษณะทางกายภาพ (physical characteristics) ซึ่งได้แก่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าความนำไฟฟ้า (electrical conductivity: EC) สี (colour) และความขุ่น (turbidity) หลังจากนั้นก็มาใส่ผลวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมีซึ่งได้แก่ธาตุประจุบวกหลัก (major cations) ธาตุประจุลบหลัก (major anions) โลหะหนัก (heavy metals) ความกระด้างทั้งหมด (total hardness as $CaCO_3$) ความกระด้างถาวร (non-carbonate hardness as $CaCO_3$) และปริมาณสารทั้งหมดที่ละลายได้ (total dissolved solids: TDS) รูปที่ 8-2 แสดงตารางการแสดงผลวิเคราะห์ที่อยู่ในรูปตารางแสดงผลซึ่งกำหนดโดยกรมทรัพยากรน้ำบาดาล ซึ่งท้ายผลจะมีสรุปผลการทดสอบแนะนำด้วยว่าน้ำบาดาลบ่อนั้น สามารถนำมาบริโภคได้หรือไม่ได้ อย่างไร หรือต้องปรับปรุงคุณภาพน้ำโดยวิธีการใด

หรือในในกรณีที่บ่อน้ำบาดาลที่เจาะ มีวัตถุประสงค์ที่จะนำไปใช้ในโครงการน้ำบาดาลเพื่อการเกษตรรูปแบบต่างๆ มีความจำเป็นที่จะต้องหาค่า SAR (Sodium Adsorption Ratio) ซึ่งเป็นค่าที่หมายถึงอัตราส่วนของธาตุโซเดียมต่อ ‘รากที่ 2 (square root)’ ของครึ่งหนึ่งของผลรวมของธาตุแคลเซียมและแมกนีเซียม ซึ่งสามารถเขียนเป็นสูตรได้ดังนี้

$$SAR = \frac{Na^{+}}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}}$$

โดยที่ค่า SAR จะเป็นตัวบ่งชี้ว่าคุณภาพน้ำนั้นเหมาะสมสำหรับใช้ในการเกษตรหรือไม่ โดยที่จะบอกว่าน้ำที่จะนำไปใช้นั้นจะทำให้เกิดการรวมตัว (flocculation) หรือการกระจายตัว (dispersion) ของอนุภาคดินเหนียวในดินมากหรือน้อยอย่างไร ธาตุโซเดียมและโพแทสเซียม หากมีมาก หรือ SAR มากกว่า 13 ก็จะเอื้อให้เกิดการกระจายตัวของสารอินทรีย์ (organic matters) และอนุภาคดินเหนียว (clay particles) ในดินซึ่งจะไปลดค่าการนำทางชลศาสตร์อิ่มตัว (saturated hydraulic conductivity: Ksat) ลดการระบายอากาศ (aeration) ในดินหรือทำให้โครงสร้างดิรเสื่อมสภาพซึ่งไม่เป็นผลดีต่อการทำการเกษตร แต่ในทางตรงกันข้ามธาตุแคลเซียมและแมกนีเซียม หากมีมากก็จะเอื้อให้เกิดการจับตัวเป็นก้อนของอนุภาคของดินเหนียวในดิน รูปที่ 8-3 เป็นตัวอย่างของตารางแสดงผลการวิเคราะห์น้ำเพื่อการนำน้ำไปใช้เพื่อการเกษตร ของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล

กองวิเคราะห์น้ำบาดาล กรมทรัพยากรน้ำบาดาล

75/10 ถนนพระราม 6 แขวงทุ่งพญาไท เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400
โทรศัพท์ 0-2666-7393 โทรสาร 0-2354-4764

ที่ 23 ว. 1511

รายงานผลการทดสอบ หน้า 1 / 2

เลขที่คำขอ 1527/2562 คำร้องที่ - หมายเลขห้องปฏิบัติการ 9600/2562

เจ้าของบ่อ - ผู้ขอรับบริการ สทบ. เขต 1 จ. ลำปาง

สถานที่ตั้งบ่อ วนอุทยานถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน ต.โป่งผา อ.แม่สาย จ.เชียงราย

พิกัด E - N - ความลึกของบ่อ - เมตร ระดับน้ำนิ่งปกติ - เมตร วิธีเก็บน้ำตัวอย่าง -

หมายเลขบ่อ - วันที่เก็บตัวอย่าง วันที่รับตัวอย่าง 28 มิถุนายน 2562

ใบอนุญาตเลขที่ - หมายเหตุ ก่อนผ่านระบบ RO

คุณลักษณะทางกายภาพ

ความเป็นกรด-ด่าง 8.0

การนำไฟฟ้า 410 ไมโครซีเมนส์ / ซม. (ที่ 25° ซ.)

ความขุ่น - หน่วยความขุ่น (NTU)

สี - หน่วยแพลทินัม-โคบอลต์

คุณลักษณะทางเคมี (มิลลิกรัมต่อลิตร)

แคลเซียม	(Ca)	90	คลอไรด์	(Cl)	2.4
แมกนีเซียม	(Mg)	0.7	คาร์บอเนต	(CO_3)	0
โซเดียม	(Na)	< 4	ไบคาร์บอเนต	(HCO_3)	275
โพแทสเซียม	(K)	0.4	ฟลูออไรด์	(F)	0.0
เหล็ก	(Fe)	0.0	ไนไทรต์	(NO_2)	-
แมงกานีส	(Mn)	0.1	ไนเทรต	(NO_3)	< 0.9
ทองแดง	(Cu)	-	ความกระด้างทั้งหมด	(Total hardness as $CaCO_3$)	230
สังกะสี	(Zn)	-	ความกระด้างถาวร	(Noncarbonate hardness as $CaCO_3$)	2
ซัลเฟต	(SO_4)	7	ปริมาณสารทั้งหมดที่ละลายได้	(Total dissolved solids)	266

ลักษณะตัวอย่างน้ำขณะทดสอบ ใส วันที่ทดสอบ 9 กรกฎาคม 2562

สรุปผลการทดสอบ ผลการวิเคราะห์ดังกล่าว ใช้บริโภคได้ตามมาตรฐานน้ำบาดาลที่จะใช้บริโภคได้

ตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม พ.ศ. ๒๕๕๑

ผู้รับรอง
(นายสุดใจ วงชารี)
ผู้อำนวยการกองวิเคราะห์น้ำบาดาล
วันที่ 23 ก.ค. 2562

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล

ผู้ทดสอบ
(นางสาวดารารัตน์ สอนทันธ์)
นักวิทยาศาสตร์
วันที่ 22 ก.ค. 2562

รายงานฉบับนี้รับรองผลเฉพาะตัวอย่างที่ทดสอบเท่านั้น
ห้ามคัดถ่ายโปรายงานผลส่วนใดส่วนหนึ่งโดยไม่ได้รับอนุญาตจากกองวิเคราะห์น้ำบาดาลเป็นลายลักษณ์อักษร

รูปที่ 8-2 แสดงตารางการแสดงผลวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำบาดาลที่อยู่ในรูปตารางแสดงผล

กองวิเคราะห์น้ำบาดาล กรมทรัพยากรน้ำบาดาล

75/10 ถนนพระราม 6 แขวงทุ่งพญาไท เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400
โทรศัพท์ 0-2666-7393 โทรสาร 0-2354-4764

ที่ 23/657

รายงานผลการทดสอบ หน้า 1/1

เลขที่คำขอ 554/2563 คำร้องที่ - หมายเลขห้องปฏิบัติการ 3153/2563
เจ้าของบ่อ - ผู้ขอรับบริการ สทบ. เขต 1 จ. ลำปาง
สถานที่ตั้งบ่อ บ้านวังหิน หมู่ที่ 6 ต.เถินบุรี อ.เถิน จ.ลำปาง
พิกัด 47Q E 520295 N 1942488 ความลึกของบ่อ 120 เมตร ระดับน้ำนิ่งปกติ 4 เมตร วิธีเก็บน้ำตัวอย่าง เป่าแอร์
หมายเลขบ่อ 6301D018 วันที่เก็บตัวอย่าง วันที่รับตัวอย่าง 1 พฤษภาคม 2563
ใบอนุญาตเลขที่ - หมายเหตุ -

คุณลักษณะทางกายภาพ

ความเป็นกรด-ด่าง	8.1	
การนำไฟฟ้า	898	ไมโครซีเมนส์ / ซม. (ที่ 25° ซ.)
ความขุ่น	2.4	หน่วยความขุ่น (NTU)
สี	-	หน่วยแพลทินัม-โคบอลต์

คุณลักษณะทางเคมี (มิลลิกรัมต่อลิตร)

แคลเซียม	(Ca)	16	คลอไรด์	(Cl)	5.6
แมกนีเซียม	(Mg)	16	คาร์บอเนต	(CO_3)	25
โซเดียม	(Na)	200	ไบคาร์บอเนต	(HCO_3)	486
โพแทสเซียม	(K)	2.2	ฟลูออไรด์	(F)	6.9
เหล็ก	(Fe)	0.3	ไนไทรต์	(NO_2)	-
แมงกานีส	(Mn)	0.0	ไนเทรต	(NO_3)	1.1
ทองแดง	(Cu)	-	ความกระด้างทั้งหมด	(Total hardness as $CaCO_3$)	110
สังกะสี	(Zn)	-	ความกระด้างถาวร	(Noncarbonate hardness as $CaCO_3$)	0
ซัลเฟต	(SO_4)	85	ปริมาณสารทั้งหมดที่ละลายได้	(Total dissolved solids)	584

ลักษณะตัวอย่างน้ำขณะทดสอบ มีตะกอนเล็กน้อย วันที่ทดสอบ 19 พฤษภาคม 2563
สรุปผลการทดสอบ SAR = 8

อ้างอิง : United States Salinity Laboratory : USSL 1954

ผู้รับรอง
(นายสุดใจ วงชารี)
ผู้อำนวยการกองวิเคราะห์น้ำบาดาล
วันที่ 15 ก.ย. 2563

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล

ผู้ทดสอบ
(นายประทีป เจริญวัง)
นักวิทยาศาสตร์ปฏิบัติการ
วันที่ 07 ก.ย. 2563

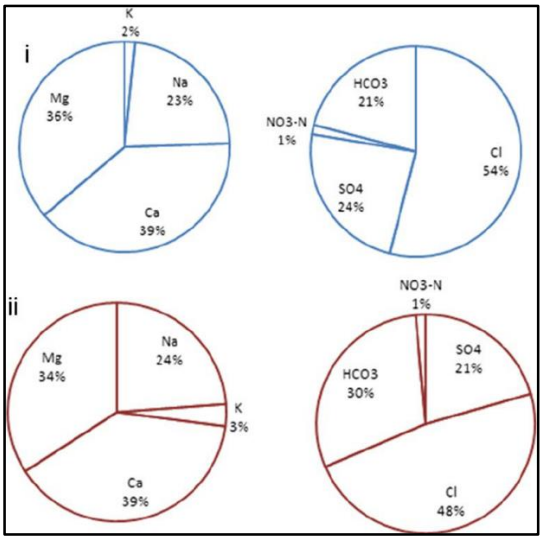
รายงานฉบับนี้รับรองผลเฉพาะตัวอย่างที่ทดสอบเท่านั้น
ห้ามคัดถ่ายใบรายงานผลแต่ส่วนใดๆ ไม่ได้รับอนุญาตจากกองวิเคราะห์น้ำบาดาลเป็นลายลักษณ์อักษร

รูปที่ 8-3 เป็นตัวอย่างของตารางแสดงผลการวิเคราะห์น้ำเพื่อการนำน้ำไปใช้เพื่อการเกษตรของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล มีการวิเคราะห์ค่า SAR (Sodium Adsorption Ratio) เพิ่มเติม

8.2.2 การแสดงผลโดยใช้แผนภาพ (diagram display of water analysis results)

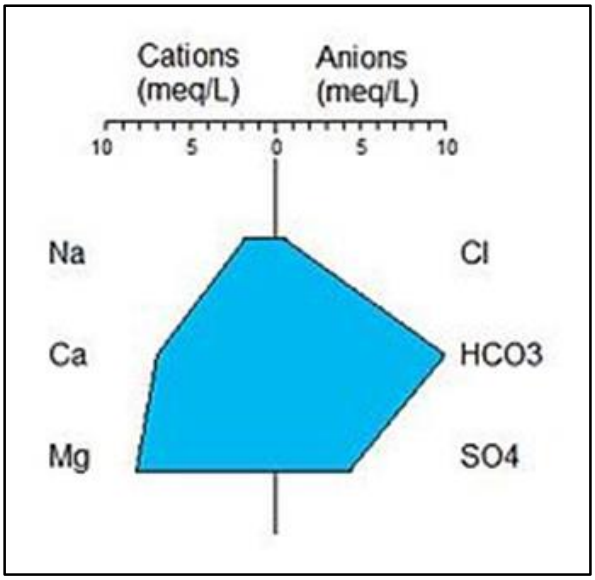
การแสดงผลโดยใช้แผนภาพนั้นเป็นที่นิยมใช้แสดงผลกันมากในการวิจัยต่างๆ ได้แก่ Pipers Diagram หรือแผนภาพสามเหลี่ยม Stiff Diagram หรือแผนภาพแบบแกน และ Pie or Circular Diagram หรือแผนภาพวงกลม หรือแผนภาพรูปรั้ว (Fence Diagram) ซึ่งแผนภาพแต่ละรูปแบบก็จะเหมาะสมกับวัตถุประสงค์ของการการแสดงผลแตกต่างกันไป ดังนี้

- **แผนภาพวงกลม (Circular Diagram)** มักจะใช้แสดงร้อยละ (percentage) ของธาตุที่มีประจุบวกหลัก (major cations) ซึ่งได้แก่ Ca, Mg, Na และ K และธาตุที่มีประจุลบหลัก (major anions) ซึ่งได้แก่ NO_3-N, HCO_3, SO_4 และ Cl และมักใช้เทียบเคียงกับแหล่งน้ำเดียวกันแต่ในฤดูกาลที่แตกต่างกันเช่นปริมาณธาตุประจุบวกและลบหลักที่เก็บวิเคราะห์ก่อนหน้ามรสุมและเก็บวิเคราะห์หลังหน้ามรสุม รูปที่ 8-4 แสดงแผนภาพวงกลมแสดงร้อยละของปริมาณธาตุประจุบวกและลบหลักที่เก็บวิเคราะห์ก่อนหน้ามรสุม และเก็บวิเคราะห์หลังหน้ามรสุม



รูปที่ 8-4 แสดงแผนภาพวงกลมแสดงร้อยละของปริมาณธาตุประจุบวกและลบหลักที่เก็บวิเคราะห์ก่อนหน้ามรสุม และเก็บวิเคราะห์หลังหน้ามรสุม

- **แผนภาพสติ๊ฟฟ์ (Stiff Diagram)** เป็นแผนภาพที่แสดงผลการวิเคราะห์ทางเคมีรูปแบบหนึ่ง ซึ่งพัฒนาโดย H.A. Stiff ในปี พ.ศ. 2494 เป็นแผนภาพที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะนักอุทกธรณีวิทยา (hydrogeologist) นักธรณีเคมี (geochemist) ในการแสดงผลการวิเคราะห์ธาตุหลักในตัวอย่างน้ำ รูปหลายแหลี่ยมจะถูกสร้างขึ้นในเส้นแนวนอน 4 เส้นโดยขยายออกจากเส้นแกนตั้งที่มีค่าเท่ากับศูนย์ (vertical zero axis) โดยใช้หน่วยความเข้มข้นเป็น milliequivalent per litre (meq/L) โดยมีความเข้มข้นของธาตุประจุบวกหลัก (Na, Ca, Mg) จะถูกพล็อททางฝั่งซ้ายของ vertical zero axis และความเข้มข้นของธาตุประจุลบหลัก (Cl, HCO_3, SO_4) จะถูกพล็อททางฝั่งขวาของ vertical zero axis โดยที่ Na และ Cl จะอยู่ในแกนนอนเดียวกัน Ca และ HCO_3 จะอยู่ในแกนนอนเดียวกัน และ Mg และ SO_4 จะอยู่ในแกนนอนเดียวกัน แผนภาพสติ๊ฟฟ์มีประโยชน์ในการเปรียบเทียบคุณภาพน้ำจากแหล่งต่างๆ ด้วยสายตา (visual comparison) โดยมีเงื่อนไขว่ามาตราส่วน (scale) ต้องเป็นมาตราส่วนเดียวกัน รูปที่ 8-5 แสดงผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำโดยใช้แผนภาพสติ๊ฟฟ์



รูปที่ 8-5 แสดงผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำโดยใช้แผนภาพสติ๊ฟฟ์

- **แผนภาพไพเพอร์ (Piper Diagram)** แผนภาพไพเพอร์เป็นแผนภาพที่พัฒนามาใช้โดย Arthur M. Piper ในปี พ.ศ. 2537 หรือเมื่อไม่กี่ปีมานี้เอง เป็นแผนภาพที่แสดงให้เข้าใจได้อย่างชัดเจนถึงแหล่งที่มาของธาตุต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำบนพื้นฐานที่ว่าในแหล่งน้ำธรรมชาตินั้น ธาตุที่มีประจุบวกและที่มีประจุลบจะอยู่ในสภาวะสมดุลทางเคมี และสามารถกล่าวได้ว่าในน้ำธรรมชาตินั้นจะมีธาตุประจุบวกในกลุ่ม alkaline-earth หรือกลุ่มที่ 2 ในตารางธาตุ ที่มีมากอยู่ 2 ธาตุคือ แคลซียม (Ca) และแมกนีเซียม (Mg) และธาตุในกลุ่มที่ 1 ในตารางธาตุ หรือกลุ่ม alkaline อยู่ 1 ธาตุ ซึ่งได้แก่ธาตุโซเดียม (Na) สำหรับธาตุพื้นฐานประจุลบ นั้น จะประกอบด้วยธาตุที่มีสถานะเป็นกรดอ่อน (weak acid) ซึ่งได้แก่ไบคาร์บอเนต (HCO_3) และธาตุที่มีสถานะเป็นกรดแรง (strong acid) 2 ธาตุ ได้แก่ซัลเฟต (SO_4) และคลอไรด์ (Cl) นอกจากนั้นก็จะมีธาตุประจุบวกและลบที่พบน้อยในแหล่งน้ำบาดาล ตารางที่ 8-3 แสดงองค์ประกอบของธาตุหลักและผลรวมของธาตุรองที่มักมีอยู่ในแหล่งน้ำบาดาล (ที่มา https://www.hatarilabs.com/ih-en/what-is-a-piper-diagram-and-how-to-create-one)

ตารางที่ 8-3 แสดงองค์ประกอบและผลรวมโดยน้ำหนักของธาตุหลักและธาตุรองที่มีอยู่ในน้ำบาดาล

Cations		Reciprocal of combining weight	Anions		Reciprocal of combining weight
Alkaline earths	**Calcium (Ca^{2+})**	0.0499	Weak acids	**Bicarbonate (HCO_3^-)**	0.01639
	Barium (Ba^{2+})	0.01456		Carbonate (CO_3^{2-})	0.03333
	Strontium (Sr^{2+})	0.02282		Tetraborate ($B_4O_7^{2-}$)	0.01288
	Magnesium (Mg^{2+})	0.08224		Orthophosphate (PO_4^{3-})	0.03157
Alkalies	**Sodium (Na^+)**	0.04348	Strong acids	**Sulphate (SO_4^{2-})**	0.02082
	Potassium (K^+)	0.02558		**Chloride (Cl^-)**	0.0282
	Caesium (Cs^+)	0.00752		Iodide (I^-)	0.00788
	Rubidium (Rb^+)	0.0117		Bromide (Br^-)	0.01251
	Lithium (Li^+)	0.14409		Fluoride (F^-)	0.05263
	Ammonium ($NH4^+$)	0.05543		Nitrate (NO_3^-)	0.01613
				Nitrite (NO_2^-)	0.02174

การสร้าง Piper Diagram นั้น ผู้พัฒนา (Arthur M. Piper) กำหนดว่าให้วาดรูปสามเหลี่ยม 2 รูปที่เป็นตัวแทนของธาตุประจุบวก (Ca, Mg, Na+K) และธาตุประจุลบ (Cl, SO_4, CO_3+HCO_3) อยู่ฝั่งซ้ายและขวาของแผนภาพตามลำดับ และด้านบนระหว่างกลางจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน (rhombus) หรืออาจเรียกง่ายๆ ว่ารูปเพชร (diamond) ซึ่งมีไว้เพื่อสรุปประเภทของน้ำ (water type) จากการประมวลผลของรูปสามเหลี่ยม 2 รูป ด้านล่าง ฐานของสามเหลี่ยมฝั่งซ้ายจะเป็นแกนแสดงค่าความเข้มข้นของ Calcium (Ca) แขนด้านซ้ายของสามเหลี่ยมจะเป็นแกนแสดงค่าความเข้มข้นของ Magnesium (Mg) ส่วนแขนด้านขวาของสามเหลี่ยมจะเป็นแกนแสดงค่าความเข้มข้นของ Sodium + Potassium (Na+K) สำหรับธาตุประจุลบ ฐานของสามเหลี่ยมฝั่งขวาจะเป็นแกนแสดงค่าความเข้มข้นของ Chloride (Cl) แขนด้านซ้ายของสามเหลี่ยมจะเป็นแกนแสดงค่าความเข้มข้นของ Carbonate + Bicarbonate (CO_3+HCO_3) ส่วนแขนด้านขวาของสามเหลี่ยมจะเป็นแกนแสดงค่าความเข้มข้นของ Sulfate (SO_4)

แต่ก่อนที่จะนำค่าความเข้มข้นของสารต่าง ๆ มาพล็อทลงใน Piper Diagram นั้น จะต้องแปลงหน่วยที่เป็น มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L) ให้เป็นหน่วยมิลลิอิควิวาเลนท์ต่อลิตร (milliequivalent/L: meq/L) เสียก่อน เช่นเดียวกับการพล็อทแบบ Stiff Diagram ซึ่งมีสูตรการแปลงหน่วยดังนี้

ปริมาณธาตุหรือโมเลกุลที่วิเคราะห์ได้ในหน่วย mg/L หารด้วยน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight) หรือน้ำหนักอะตอม (atomic weight) จะได้น้ำหนักเป็นมิลลิโมลต่อลิตร (millimole/L) แล้วคูณด้วยจำรวนประจุ (charge) พิจารณาผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 8-2 เมื่อนำปริมาณความเข้มข้นของสารที่มีหน่วยเป็น mg/L มาแปลง (convert) เป็นหน่วย meq/L ซึ่งแสดงให้เห็นในตารางที่ 8-4

ตารางที่ 8-4 แสดงการแปลงหน่วยจาก mg/L เป็นหน่วย meq/L ของผลวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำที่ปรากฏในรูปที่ 8-2

Ion	ปริมาณ (mg/L)	น้ำหนักโทเลกุล/อะตอม (mg)	มิลลิโมล/ลิตร (millimole/L)	จำนวจประจุ (charge)	มิลลิอิควิวาเลนท์/ลิตร (meq/L)
Na	4	22.99	0.17	+1	0.17
Ca	90	40.08	2.25	+2	4.49
Mg	0.7	23.31	0.03	+2	0.06
K	0.4	39.10	0.01	+1	0.01
HCO_3	275	61.01	4.51	-1	-4.5
Cl	2.4	35.45	0.07	-1	-0.07
SO_4	7	96.06	0.07	-2	-0.015
CO_3	0	60.01	0	-2	0

หลังจากนั้นนำสารละลายประจุบวกที่ใช้ใน Na, K, Ca, Mg มาแบ่งเป็นร้อยละ และนำสารละลายประจุลบที่ใช้ใน HCO_3, CO_3, Cl, SO_4 มาแบ่งเป็นร้อยละเช่นกันดังแสดงในตารางที่ 8-5 และ ตารางที่ 8-6

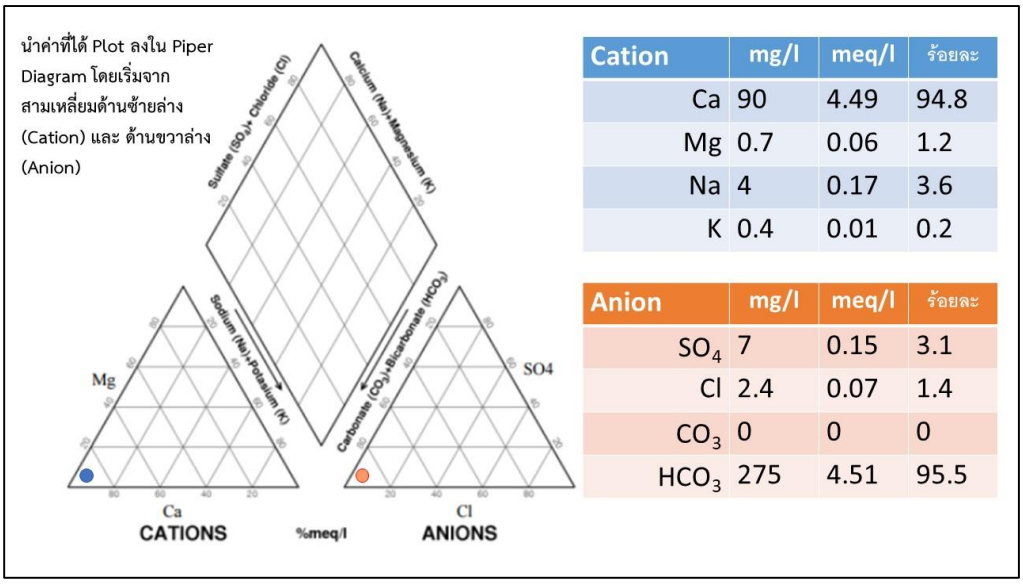
ตารางที่ 8-5 แสดงการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของธาตุประจุบวกจากหน่วย meq/L เป็นร้อยละ

Cation	หน่วย mg/L	หน่วย meq/L	ร้อยละ
Ca	90.0	4.49	94.8
Mg	0.7	0.06	1.2
Na	4	0.17	3.6
K	0.4	0.01	0.2

ตารางที่ 8-6 แสดงการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของธาตุประจุบลบจากหน่วย meq/L เป็นร้อยละ

Cation	หน่วย mg/L	หน่วย meq/L	ร้อยละ
SO_4	7.0	0.15	3.1
Cl	2.4	0.07	1.4
CO_3	0	0	0
HCO_3	275	4.51	95.5

หลังจากนั้นจึงน้ำค่าที่ได้มาพล็อทลงใน Piper Diagram โดยเริ่มต้นจากสามเหลี่ยมด้านซ้ายล่าง (cation) แล้วตามด้วยสามเหลี่ยมด้านขวาล่าง (anion)

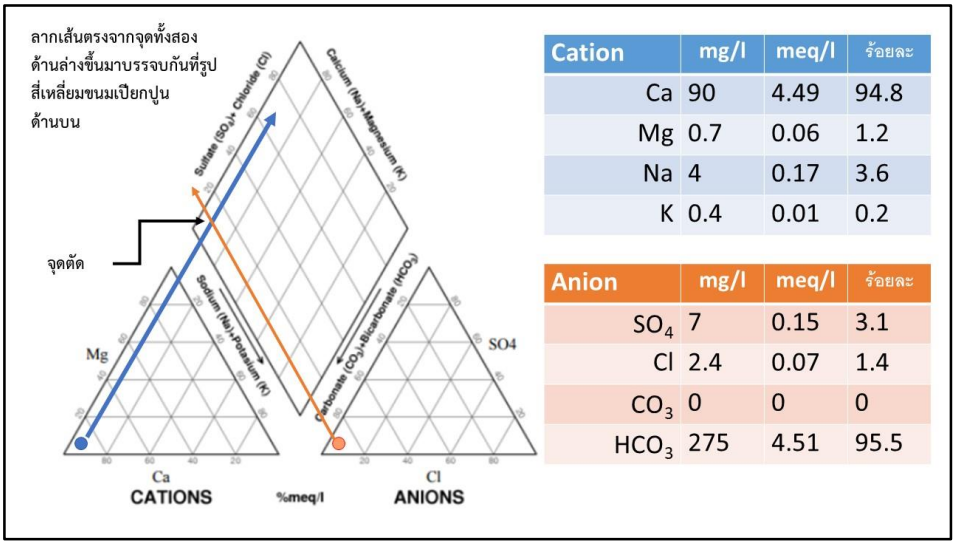


Cation	mg/l	meq/l	ร้อยละ
Ca	90	4.49	94.8
Mg	0.7	0.06	1.2
Na	4	0.17	3.6
K	0.4	0.01	0.2

Anion	mg/l	meq/l	ร้อยละ
SO_4	7	0.15	3.1
Cl	2.4	0.07	1.4
CO_3	0	0	0
HCO_3	275	4.51	95.5

รูปที่ 8-6 แสดงตำแหน่งที่พล็อทภาพรวมของคุณภาพน้ำเป็น meq/L วงกลมสีน้ำเงินเป็นตัวแทนของธาตุประจุบวก วงกลมสีส้มเป็นตัวแทนของธาตุประจุลบ

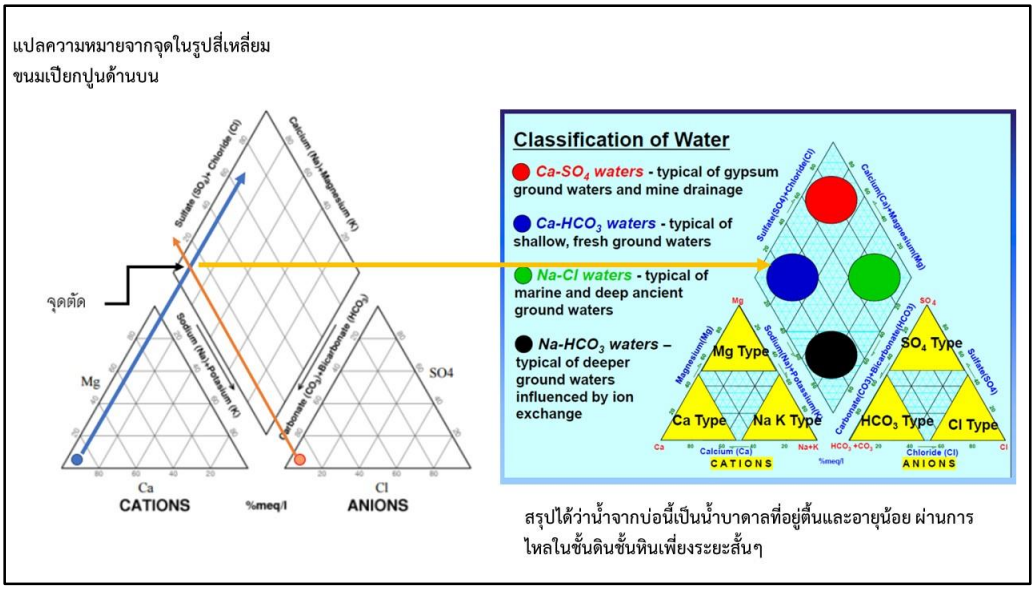
หลังจากนั้นให้ลากเส้นตรงจากจุดทั้งสองด้านล่างขึ้นมาบรรจบกันที่รูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนด้านบน จะได้จุดตัดที่ระบุประเภทของน้ำตามเกณฑ์การจำแนกประเภทน้ำ (Classification of Water Types) รูปที่ 8-7 แสดงการลากเส้นเพื่อหาจุดตัด และรูปที่ 8-8 แสดงการแปลความหมายหรือการระบุประเภทของน้ำ



Cation	mg/l	meq/l	ร้อยละ
Ca	90	4.49	94.8
Mg	0.7	0.06	1.2
Na	4	0.17	3.6
K	0.4	0.01	0.2

Anion	mg/l	meq/l	ร้อยละ
SO_4	7	0.15	3.1
Cl	2.4	0.07	1.4
CO_3	0	0	0
HCO_3	275	4.51	95.5

รูปที่ 8-7 แสดงการลากเส้นเพื่อหาจุดตัดของธาตุประจุบวกและธาตุประจุลบ

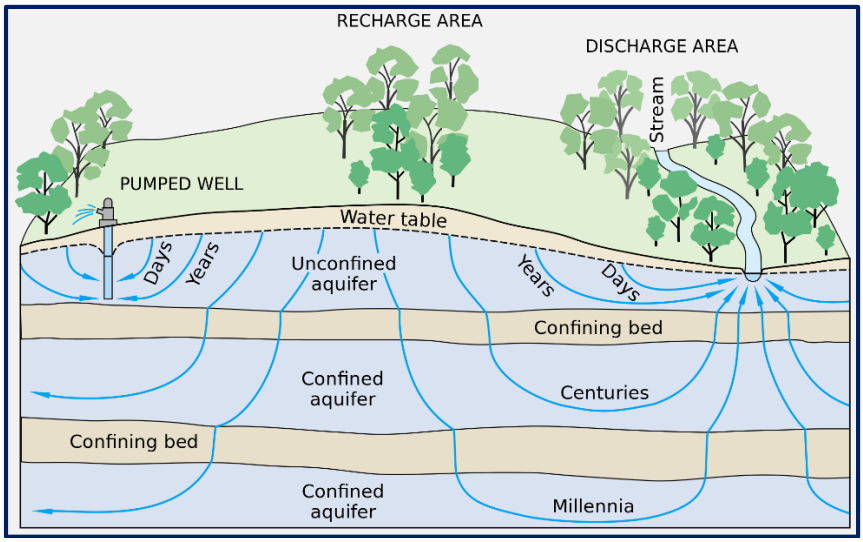


รูปที่ 8-8 แสดงการแปลความหมายหรือการระบุประเภทของน้ำซึ่งบ่งบอกว่าน้ำบาดาลที่มีผลวิเคราะห์ตามรูปที่ 8-2 ข้างต้น เป็นน้ำบาดาลระดับตื้น อายุน้อยและผ่านการไหลในชั้นดินชั้นหินเป็นระยะทางสั้นๆ

8.3 วิวัฒนาการทางเคมีของน้ำบาดาลธรรมชาติ (Chemical Evolution of Natural Groundwater)

น้ำบาดาลเกือบทั้งหมดมีต้นกำเนิดมาจากน้ำฝนหรือน้ำจากหิมะที่ละลายแล้วไหลซึมลงไปในดินผ่านชั้นดินต่างๆ ลงไปสู่ระบบการไหลของน้ำบาดาล ซึ่งจะไหลผ่านชั้นดินบางๆ ที่เป็นวัสดุตามธรรมชาติและมีสภาวะหนาแน่นทางชีววิทยา (biological active zone) และมีความสามารถสูง (powerful) ในการเปลี่ยนแปลง (alter) คุณภาพทางเคมีของน้ำที่ไหลผ่าน เมื่อน้ำบาดาลเคลื่อนที่ตามเส้นทางการไหลจากพื้นที่รับน้ำ (recharge area) ไปยังพื้นที่สูญเสียน้ำ (discharge area) คุณลักษณะทางเคมีของน้ำจะแปรเปลี่ยนไปตามกระบวนการทางธรณีเคมี ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า “วิวัฒนาการทางเคมีของน้ำบาดาลตามธรรมชาติ (chemical evolution of natural groundwater)”

ระบบการไหลของน้ำบาดาล (groundwater flow system) ตามธรรมชาติจะจำแนกออกเป็น 3 ระบบ ได้แก่การไหลเฉพาะแห่ง (local flow system) ระบบการไหลขนาดกลาง (intermediate flow system) และระบบการไหลบริเวณกว้าง (regional flow system) การไหลของน้ำบาดาลจากพื้นที่เติมน้ำไปจนถึงพื้นที่สูญเสียน้ำของการไหลเฉพาะแห่งอาจนับเวลาเป็นวันหรือเป็นปี ของการไหลขนาดกลางอาจใช้เวลาเป็นศตวรรษ ส่วนของการไหลบริเวณกว้าง นั้น อาจนับเวลาเป็นพันเป็นหมื่นปี และรูปที่ 8-9 แสดงระยะเวลาเปรียบเทียบการไหลของน้ำบาดาลจากพื้นที่เติมน้ำไปจนถึงพื้นที่สูญเสียน้ำทั้ง 3 ระบบการไหล



รูปที่ 8-9 แสดงระยะเวลาเปรียบเทียบการไหลของน้ำบาดาลจากพื้นที่เติมน้ำไปจนถึงพื้นที่สูญเสียน้ำของทั้ง 3 ระบบการไหล

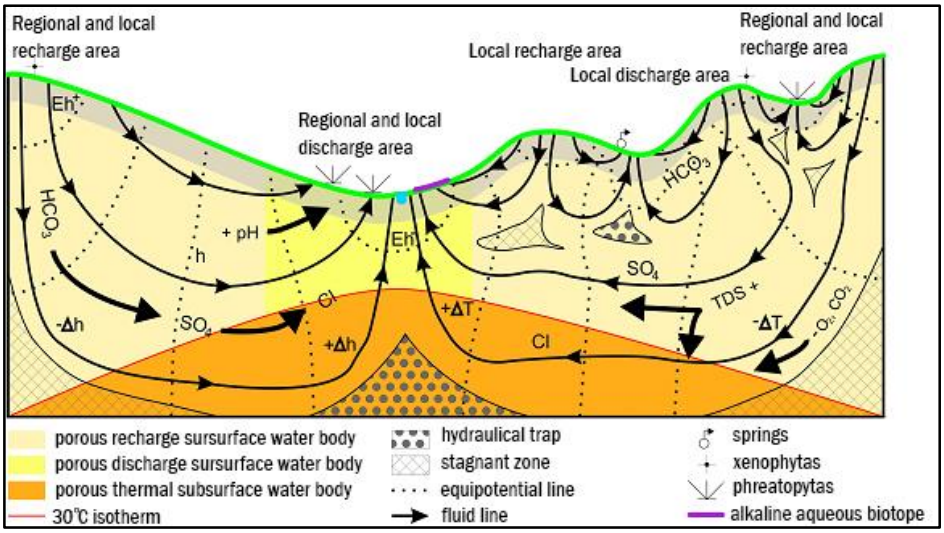
ในพื้นที่รับน้ำ น้ำที่ไหลซึมลงไปใต้ดินในช่วงแรกจะมีองค์ประกอบทางเคมีเหมือนกับน้ำฝนหรือน้ำที่ละลายจากหิมะ (snow-melted water) แต่เมื่อน้ำบาดาลไหลไปเรื่อยๆ องค์ประกอบทางเคมีของน้ำบาดาลจะค่อยๆ เปลี่ยนไปจนสุดท้ายจะมีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับน้ำทะเล (Chebotarev, 1955) ดังนี้

การเดินทางของน้ำบาดาลตามเส้นทางการไหล ⟶

$$HCO_3^- \rightarrow HCO_3^- + SO_4^{2-} + HCO_3^- \rightarrow SO_4^{2-} + Cl \rightarrow Cl + SO_4^{2-} \rightarrow Cl$$

การเพิ่มขึ้นของอายุน้ำบาดาล ⟶

จากรูปแบบทางเคมีข้างบน สามารถกล่าวได้ว่าองค์ประกอบหลักของน้ำบาดาลอายุน้อยหรือในพื้นที่รับน้ำ จะมี HCO_3^- เป็นธาตุเด่น เมื่อไหลลงลึกไปกะจะละลายเอาสารซัลเฟต (SO_4^{2-}) ออกมาจากชั้นดินชั้นหินที่ไหลผ่าน เมื่อไหลต่อไปเรื่อยๆ HCO_3^- ในน้ำบาดาลจะลดลงจนหมดไปแต่ได้ละลายคลอไรด์ (Cl) จากชั้นดินชั้นหินที่ไหลผ่านเอามาอยู่ในน้ำบาดาล เมื่อไหลไปจนถึงพื้นที่สูญเสียน้ำธาตุซัลเฟตก็จะหมดไปเหลือแต่คลอไรด์ไว้ในน้ำบาดาล รูปที่ 8-10 แสดงธาตุต่างๆ ที่พบในพื้นที่รับน้ำ พื้นที่กลางน้ำและพื้นที่สูญเสียน้ำ ซึ่งจะพบในระบบการไหลของน้ำบาดาลแบบ Intermediate และ Regional Flow System



รูปที่ 8-10 แสดงธาตุต่างๆ ที่พบในพื้นที่รับน้ำ พื้นที่กลางน้ำและพื้นที่สูญเสียน้ำ ซึ่งจะพบในระบบการไหลของน้ำบาดาลแบบ Intermediate และ Regional Flow System (ที่มา: https://www.google.com/search?q=groundwater+flow+regime)

8.4 วิธีการปรับปรุงคุณภาพน้ำ (Water Treatment Methods)

เป็นการทำให้คุณภาพน้ำดีขึ้นจนเหมาะสมกับการใช้งานด้านอุปโภค บริโภค และการเกษตร โดยลดปริมาณสารที่ไม่พึงประสงค์ออกจากน้ำ จำแนกได้เป็น

8.4.1 การลดความขุ่น ใช้วิธีกรองด้วย microfiltration หรือใช้สารกรองแอนทราไซต์/แมงกานีสกรีนแซนด์

8.4.2 การลดสีและกลิ่น ใช้ถ่านกัมมันต์ (activated carbon)

8.4.3 การขจัดความกระด้าง สามารถทำได้โดยการต้ม (boiling) ซึ่งสามารถขจัดความกระด้างชั่วคราว (carbonate hardness) เท่านั้น ในกรณีที่เป็นความกระด้างถาวร (non-carbonate hardness) ซึ่งได้แก่ $MgSO_4$, $CaSO_4$ นั้น จะทำให้ตกตะกอนด้วยปูนขาว ($Ca(OH)_2$) และโซดาแอช (Na_2CO_3) ดังสมการ

$$\underset{\text{hardness}}{MgSO_4} + \underset{\text{lime}}{(Ca(OH)_2)} \longrightarrow Mg(OH)_2 \downarrow + \underset{\text{hardness}}{CaSO_4}$$

$$\underset{\text{hardness}}{CaSO_4} + \underset{\text{soda ash}}{(Na_2CO_3)} \longrightarrow CaCO_3 \downarrow + \underset{\text{non-hardness (soluble)}}{Na2SO_4}$$

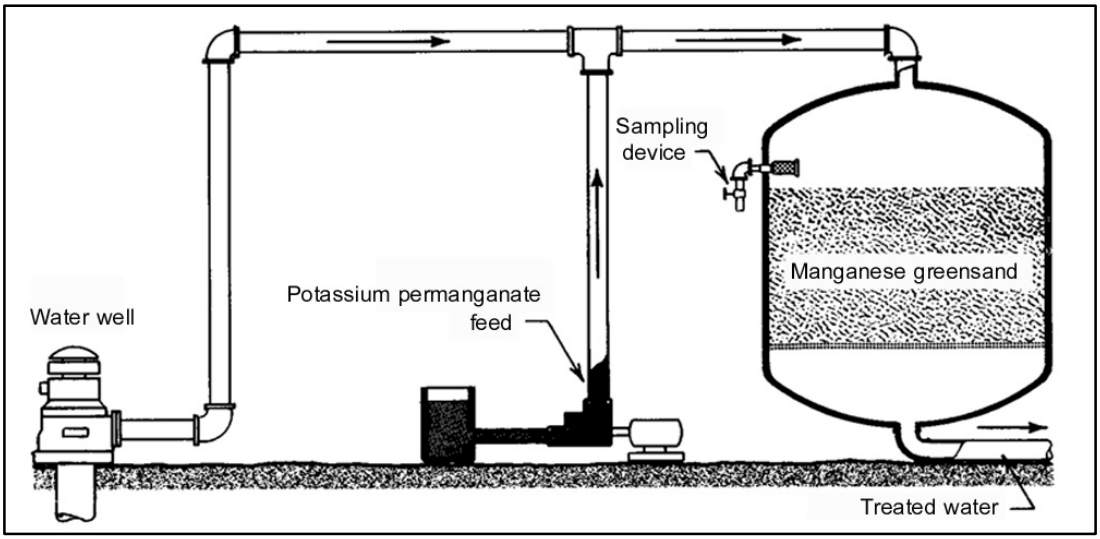
หรืออาจใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนแบบแคทไอออน (base exchange) หรือ zeolite softening (อ่านเพิ่มเติมได้ที่ “น้ำบาดาล” โดยทวีศักดิ์ ระมิงค์วงศ์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2546)

8.4.4 การลดหรือกำจัดปริมาณเหล็ก สามารถทำได้โดยใช้วิธีการเพิ่มออกซิเจน (aeration) เป็นกระบวนการให้น้ำบาดาลสัมผัสกับอากาศ ซึ่งจะทำให้สารละลายเหล็กซึ่งอยู่ในรูปของ ferrous oxides (Fe_2O_3) ถูกเพิ่มออกซิเจนแล้วเปลี่ยนรูปเป็น ferric oxides (Fe_3O_4) ที่อยู่ในรูปของของแข็ง (ตะกอน) ซึ่งการเพิ่มออกซิเจนสามารถใช้อุปกรณ์ได้หลายแบบ ได้แก่เครื่องเพิ่มออกซิเจนแบบโปรยน้ำ (spray aerator) เครื่องเพิ่มออกซิเจนแบบขั้นบันได (cascade aerator) เครื่องเพิ่มออกซิเจนแบบถาด (tray aerator) หรือเพิ่มออกซิเจนแบบถาดพร้อมถังกรอง (tray aerator with filter tank) หรืออาจเรียกอีกแบบหนึ่งว่าหอเติม

อากาศ (aeration tower) เครื่องเพิ่มออกซิเจนแบบฟองอากาศ (diffused air aerator) นอกจากนั้นยังมีอีกหลายวิธีที่สามารถแยกเหล็กออกจากน้ำบาดาลได้ เช่นปฏิกิริยาออกซิเดชั่นทางเคมี (chemical oxidation) การตกตะกอนทางเคมี (chemical precipitation) การแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange) เป็นต้น ซึ่งผู้เขียนจะไม่ขอบรรยายในรายละเอียดของวิธีการ รูปที่ 8-11 แสดงระบบกำจัดออกซิเจนโดยใช้หอกรองอากาศ ซึ่งประกอบด้วยเครื่องเพิ่มออกซิเจนแบบถาดพร้อมถังกรอง

รูปที่ 8-11 แสดงระบบกำจัดออกซิเจนโดยใช้หอกรองอากาศ ซึ่งประกอบด้วยเครื่องเพิ่มออกซิเจนแบบถาดพร้อมถังกรอง (ที่มา: รายงานฉบับสุดท้าย “โครงการศึกษาเพิ่มประสิทธิภาพของระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล” บริษัทดีไวพลัส จำกัด, 2555)

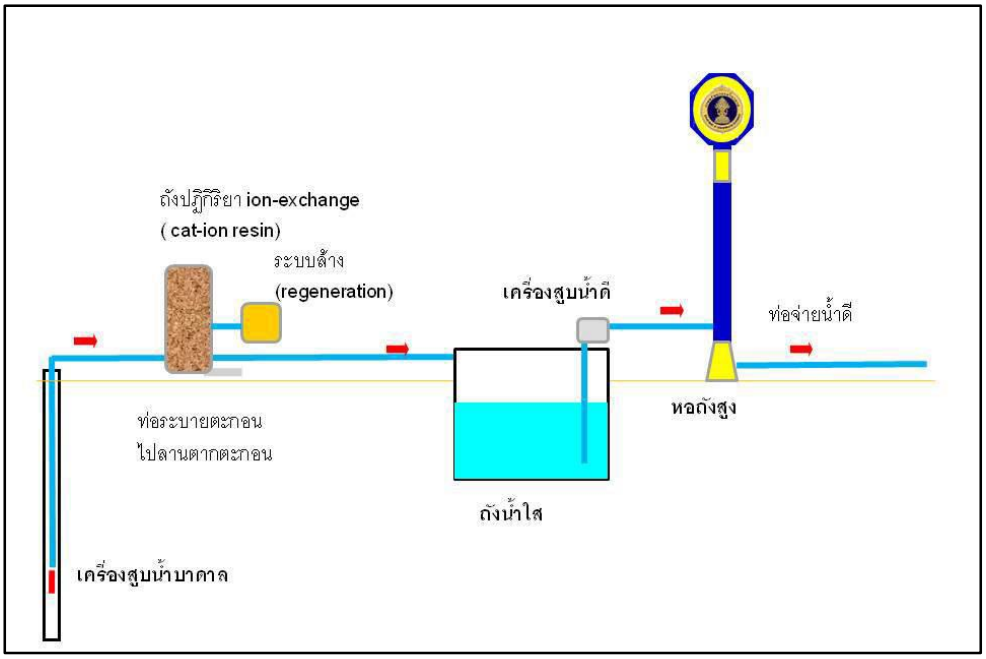
8.4.5 การลดปริมาณแมงกานีส การลดหรือกำจัดแมงกานีสในน้ำบาดาล สามารถทำเหมือนการกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลได้ทุกวิธี แต่วิธีที่ได้ผลดีได้แก่การใช้สารกรองแมงกานีสกรีนแซนด์ หรือ glauconite sand หรือ manganese green sand ซึ่งมาจากแร่ glauconite ที่มีองค์ประกอบของแร่เป็นโซเดียม โพแทสเซียม เหล็ก อลูมิเนียม แมกนีเซียมซิลิเกต มีสูตรเคมีที่ซับซ้อนเป็น $(K,Na)(Fe3^{+},Al,Mg)_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2$ เป็นแร่ที่มีสีเขียว เนื้อสามารถบิเป็นผงได้ง่าย (friable) และไม่คงทนต่อการผุพัง glauconite sand หรือ manganese greensand จะใช้เป็นวัสดุกรองน้ำที่มีเหล็กและแมงกานีสละลายอยู่ แต่เหมาะสำหรับน้ำที่มีความเข้มข้นของเหล็กและแมงกานีสไม่เกิน 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ้าเกินกว่านี้จะทำให้เกิดการอุดตันของสารกรองเร็วกว่ากำหนด และเมื่อใช้งานไปได้ระยะหนึ่งต้องล้างเพื่อฟื้นฟูประสิทธิภาพของซีโอไลต์ด้วยสารละลายด่างทับทิม (potassium permanganate: KMnO4) แต่ด่างทับทิมก็มีราคาแพง ทำให้ค่าใช้จ่ายสูง นอกจากนั้นยังมีวิธีการกำจัดแมงกานีสโดยการให้ตกตะกอนด้วยสารส้ม ปูนขาวและคลอรีน หรือการเติมโอโซน รูปที่ 8-12 แสดงรูปแบบการกำจัดเหล็กและแมงกานีสในน้ำบาดาลโดยใช้ถังกรองที่มี manganese greensand



รูปที่ 8-12 แสดงรูปแบบการกำจัดเหล็กและแมงกานีสในน้ำบาดาลโดยใช้ถังกรองที่มี manganese greensand (ที่มา: Johnson Division, 1975 ใน “น้ำบาดาล” โดยทวีศักดิ์ ระมิงค์วงศ์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2546)

8.4.6 การลดปริมาณฟลูออไรด์ มีหลายวิธีได้แก่การตกตะกอนทางเคมี (chemical precipitation) ซึ่งมีทั้ง hydroxide precipitation และ carbonate precipitation โดยแบบหลังจะมีประสิทธิภาพมากกว่าและได้ขนาดตะกอนเม็ดใหญ่กว่าแบบแรก นอกจากนั้นยังสามารถใช้วิธีแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange) การดูดซับ (adsorption process) และใช้ระบบ reverse osmosis หรือใช้ activated alumina ในการกำจัดหรือลดปริมาณฟลูออไรด์ออกจากน้ำบาดาลได้เช่นกัน

8.4.7 การลดปริมาณไนเทรต ไนเทรตจัดได้ว่าเป็นสารที่กำจัดได้ยาก วิธีการกำจัดไนเทรตในน้ำบาดาลจะต้องใช้เทคโนโลยีสูงและเสียค่าใช้จ่ายสูง การกรองผ่านแผ่นเยื่อกรองเป็นวิธีการที่ยุ่งยาก ซับซ้อนและมีราคาแพง วิธีการที่เหมาะสมได้แก่การแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange) โดยใช้เรซิน (resin) ซึ่งเรซินที่นิยมใช้ในการกำจัดไนเทรตออกจากน้ำบาดาล มี อยู่ 2 ชนิด ได้แก่ trimethylamine group และ dimethylamine group เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนแบบแอนไอออน (anion) นอกจากนั้นยังสามารถใช้ระบบ reverse osmosis ในการกำจัดไนเทรตออกจากน้ำบาดาล ได้เช่นกัน รูปที่ 8-13 แสดงแผนภูมิการกำจัดไนเทรตออกจากน้ำบาดาลโดยใช้เรซิน ประเภท dimethylamine group



รูปที่ 8-13 แสดงแผนภูมิการกำจัดไนเทรตออกจากน้ำบาดาลโดยใช้เรซิน ประเภท dimethylamine group (ที่มา: รายงานฉบับสุดท้าย “โครงการศึกษาเพิ่มประสิทธิภาพของระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล” บริษัทดีไวพลัส จำกัด, 2555)

8.4.8 การกำจัดหรือลดปริมาณสารหนู มีอยู่หลายวิธีได้แก่การตกตะกอนทางเคมี (chemical precipitation) ซึ่งก็แบ่งแยกออกได้เป็น hydroxide precipitation ใช้โซดาแอช (Na_2CO_3) และปูนขาว ($Ca(OH)_2$) เติมลงไปในน้ำบาดาล สารหนูจะตกตะกอนในรูปของเกลือไฮดรอกไซด์ ส่วน sulfide precipitation สารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอน ได้แก่ Na2S H2S หรือ Na2S2O3 ซึ่งมักนิยมใช้ในการตกตะกอนโลหะหนักพวกอาร์เซนิก แคดเมียม เหล็ก อะลูมิเนียม และปรอท เป็นต้น นอกจากนั้นยังมีวิธีการแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange) ซึ่งจะใช้สารเรซิน (resin) เติมลงไปในน้ำบาดาลที่ปนเปื้อนสารหนู เรซิน เช่น zeolite จะมีการแลกเปลี่ยนประจุกับสารหนูในน้ำบาดาล นอกจากนั้นยังมีวิธีการดูดซับ (adsorption process) และการกรองผ่านเมมเบรน (membrane process) โดยวิธีออสโมซีสแบบย้อนกลับ (reverse osmosis: RO) ได้อีกเช่นกัน ติดตามรายละเอียดได้ที่ รายงานฉบับสุดท้าย “โครงการศึกษาเพิ่มประสิทธิภาพของระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล” บริษัทดีไวพลัส จำกัด, 2555

8.4.9 การลดปริมาณซัลเฟต ใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนแบบแอนไอออน หรือระบบ Reverse Osmosis

8.4.10 การลดปริมาณคลอไรด์ ใช้ระบบ reverse osmosis ทั้งนี้ วิธี reverse osmosis สามารถขจัดสารไม่พึงประสงค์หลากหลายชนิด อาทิ โลหะหนัก anions แต่ต้นทุนสูง และน้ำที่เข้าระบบต้องขจัดความขุ่นและสารอินทรีย์ก่อน เหมาะสำหรับผลิตน้ำดื่ม

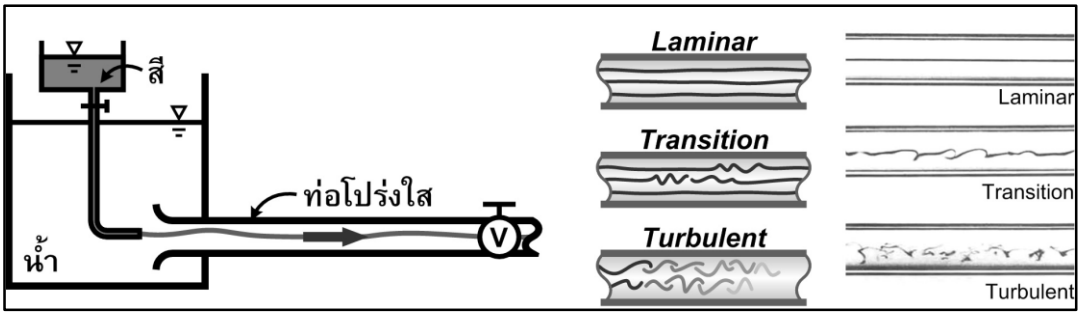
บทที่ 9
ระบบกระจายน้ำ
(Water Distribution System)

ในยุคที่มีการเจาะบ่อน้ำบาดาลเพื่อบริการประชาชนโดยหน่วยงานของรัฐยุคแรกๆ ประมาณ 50-60 ปีที่แล้ว เมื่อเจาะบ่อน้ำบาดาลเสร็จแล้ว หน่วยงานของรัฐเช่นกองน้ำบาดาล กรมทรัพยากรธรณี กองพัฒนาบ่อบาดาล กรมโยธาธิการ กองพัฒนาแหล่งน้ำ สำนักงานเร่งรัดพัฒนาชนบท จะติดตั้งเครื่องสูบมือโยค (hand pump) เพื่อให้ประชาชนได้เข็นรถเข็นใส่ภาชนะรองน้ำมาโยกน้ำใส่ภาชนะแล้วเข็นไปใส่โอ่งน้ำ ตุ่มน้ำที่บ้าน ใครมาก่อนก็ได้สิทธิ์โยกน้ำก่อน แม่บ้านส่วนใหญ่ก็มักจะหอบเสื้อผ้า หอบกาละมังซักผ้ามาจากบ้านมาซักกันที่บ่อกันเลย บ่อน้ำบาดาลประจำหมู่บ้านจะเป็นที่พบปะของประชาชนกันในช่วงเย็น หลังจากกลับจากงานทำไร่ทำนากันแล้ว นับเป็นวิถีชีวิตในชนบทที่มีความสุขมีความสามัคคีกลมเกลียวกันอย่างที่ไม่ค่อยพบเห็นในปัจจุบัน ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากในสมัยก่อนเครื่องสูบน้ำไฟฟ้าแบบจุ่มใต้น้ำ (submersible pump) ยังไม่ถูกนำเข้ามาใช้ในประเทศไทยและไฟฟ้าก็ยังเข้าไม่ถึงหมู่บ้านในชนบท

แต่เนื่องจากในปัจจุบันหน่วยงานของรัฐได้รับงบประมาณมากขึ้นและไฟฟ้าเข้าถึงเกือบทุกหมู่บ้าน เครื่องสูบน้ำไฟฟ้าแบบจุ่มใต้น้ำจึงถูกสั่งเข้ามาใช้งาน ดังนั้นเมื่อมีการเจาะบ่อน้ำบาดาลแล้ว ระบบกระจายน้ำตามท่อแล้วส่งให้ถึงหน้าบ้านจึงเป็นระบบที่สำคัญในการพัฒนาน้ำบาดาลในยุคปัจจุบัน ในช่วงต้นก็จะเรียกว่าระบบประปาบาดาลบ้าง ประปาหมู่บ้านบ้าง สำหรับกรมทรัพยากรน้ำบาดาล ต้นสังกัดของผู้เขียนได้ริเริ่มโครงการมากมายที่เป็นประโยชน์ต่อประชาชน นอกจากมีระบบกระจายน้ำแล้วยังมีระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำควบคู่ไปด้วยเสมอ ซึ่งผู้เขียนจะขอกล่าวในหัวข้อต่อๆ ไป การออกแบบระบบกระจายน้ำ นอกจากรูปแบบการส่งน้ำแล้วยังต้องคำนึงถึงความแรงของน้ำสำหรับปลายสุดของระบบส่งน้ำด้วยว่าจะมีน้ำทีมีแรงดันเพียงพอที่จะนำไปใช้งานได้ทันทีหรือไม่เนื่องจากแรงดันในระบบกระจายน้ำจะลดลงเมื่อระยะทางไกลขึ้นเสมออันเกี่ยวเนื่องกับการสูญเสียพลังงานแบบต่าง ๆ ในบทนี้ผู้เขียนจะกล่าวคร่าว ๆ ถึงภาคทฤษฎีของกลศาสตร์ของไหล (fluid mechanics) เพื่อให้ผู้อ่านได้เข้าใจเกี่ยวกับการสูญเสียพลังงาน (energy loss) ในระบบการไหลของน้ำในท่อซึ่งมีทั้งการสูญเสียพลังงานหลัก (major losses) และการสูญเสียพลังงานรอง (minor losses) ซึ่งผู้เขียนจะเรียบเรียงมาบอกกล่าวต่อไป

9.1 การไหลของน้ำในท่อ (flow in conduit)

ออสบอร์น เรย์โนลด์ นักฟิสิกส์ชาวสหราชอาณาจักร ผู้ที่มีความสนใจในศาสตร์ด้านกลศาสตร์และพลศาสตร์ของไหล (fluid dynamics) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลของของเหลวในท่อ (behavior of flow in pipe) ในปี ค.ศ. 1883 โดยใช้เครื่องมือที่ประกอบด้วยถังน้ำขนาดใหญ่ แล้วเชื่อมต่อกับท่อแก้วใสที่มีวาล์วควบคุมการไหลหรือวาล์วสำหรับเปิด-ปิดน้ำที่ปลายของท่อใส และยังมีถังสีขนาดเล็กที่เชื่อมต่อกับท่อขนาดเล็กที่ทำหน้าที่ปล่อยอนุภาคของสีที่ทำหน้าที่เสมือน dye tracer เข้าไปในท่อโปร่งใส (รูปที่ 9.1)



รูปที่ 9-1 แสดงเครื่องมือทดสอบการไหลและพฤติกรรมการไหลของเรย์โนลด์
(ที่มา: กลศาสตร์ของไหล, ธันดร ออกวะลา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2553)

การทดลองของเรย์โนลด์เริ่มต้นโยการเปิดวาล์วน้ำ (V) เพียงเล็กน้อย จะพบว่าน้ำในท่อใสจะไหลอย่างช้าๆ และแนวเส้นสีจะเป็นเส้นตรง เมื่อเปิดวาล์วน้ำ (V) ให้มากขึ้นอีกเล็กน้อย จะเห็นแนวเส้นสีเริ่มมีการกระเพื่อมเล็กน้อย และเมื่เปิดวาล์วน้ำ (V) ให้มากขึ้น น้ำจะไหลเร็วขึ้นอนุภาคสีหรือเส้นสีจะไหลแบบไม่เป็นระเบียบหรือแบบปั่นป่วน ซึ่งเรย์โนลด์สามารถแบ่งพฤติกรรมการไหลของของไหลภายในท่อได้เป็น 3 ลักษณะ ดังนี้ (อ่านเพิ่มเติมได้ที่ กลศาสตร์ของไหล, ธันดร ออกวะลา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2553 และ ชลศาสตร์, กีรติ ลีวัจนกุล, มหาวิทยาลัยรังสิต)

1) การไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) - เป็นการไหลของของไหลที่มีความเร็วต่ำ อนุภาคของของไหลจะเคลื่อนที่อย่างเป็นระเบียบไปในทิศทางเดียวกับทิศทางการไหลของของไหลในท่อในลักษณะราบเรียบและเป็นแนวเส้นตรง จะเกิดกับของไหลที่มีความหนืดสูง
2) การไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) - เป็นการไหลของของไหลที่มีความเร็วสูงซึ่งจะเกิดกับของไหลที่มีความหนืดต่ำ อนุภาคของของไหลจะเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบ
3) การไหลในช่วงแปรเปลี่ยน (transition flow) - เป็นการไหลช่วงที่จะพัฒนาจากการไหลแบบราบเรียบไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วน กล่าวคือ ณ ตำแหน่งเดียวกันในหลอดแก้วใส อาจพบการไหลช่วงหนึ่งเป็นแบบราบเรียบ ช่วงหนึ่งจะไหลแบบปั่นป่วน ไหขแบบสะเปะสะปะและไม่สามารถคาดเดาได้

จากการทดลองดังกล่าวจะเห็นว่ามีตัวแปรหลายอย่างที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการไหลของน้ำในท่อ ซึ่งได้แก่ความเร็วของการไหล (Velocity of flow: v) เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (Diameter of pipe: D) ความหนืดคินาเมติกหรือความหนืดจลน์ของของไหล (Kinamatic Viscosity of Fluid: ν) ความหนาแน่นของของไหล (Density of fluid: ρ) และความหนืดพลวัตของของไหล (Dynamic Viscosity of fluid: μ) ซึ่งมีความสัมพันธ์กันที่เขียนเป็นสูตรหรือสมการได้ดังนี้

$$Re = \rho Dv / \mu = Dv / \nu$$

เมื่อ Re หมายถึง Reynold Number (ไม่มีหน่วย)

ρ คือความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (m)

V คือความเร็วของของไหลในท่อ (m/s)

μ คือความหนืดคินาเมติกหรือความหนืดจลน์ (m^3/s)

และ ν คือความหนือพลวัต ($N.s/m^3$) หรือมีค่าเท่ากับ μ/ρ

ตัวเลข Reynold Number (Re) จะเอามาจัดแบ่งรูปแบบการไหลได้ดังนี้

Re $\leq$ 2000 รูปแบบการไหลจะเป็นแบบการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow)

2000 < Re < 4000 รูปแบบการไหลจะเป็นแบบการไหลแบบเปลี่ยนแปลง (Transition flow)

Re $\geq$ 4000 รูปแบบการไหลจะเป็นแบบการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow)

9.2 การสูญเสียพลังงานในการไหลของน้ำในท่อ (energy losses of flow in conduit)

เจตนาที่ผู้เขียนกล่าวถึงระบบการไหลของน้ำในท่อและที่มาของ Reynold Number ก็เพื่อจะบอกให้ผู้อ่านทราบว่าตัวเลขของ Reynold Number นั้นมีความสำคัญต่อ Friction factors หรือปัจจัยที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานของการไหลของน้ำในท่อซึ่งมีทั้งการสูญเสียพลังงานหลัก (Major losses) และการสูญเสียพลังงานรอง (Minor losses) นอกจากนั้นยังมีการสูญเสียหรือได้รับพลังงานเพิ่มด้วยปัจจัยทางการเปลี่ยนแปลงความสูงของระดับภูมิประเทศ (Elevation changes) อีกด้วยเช่นกัน

9.2.1 การสูญเสียพลังงานหลัก (major head losses, $h_{loss,f}$) – หรือการสูญเสียพลังงาน (พลังงาน) อันเนื่องจากแรงเสียดทาน (friction loss) หมายถึงการสูญเสียพลังงานหรือสูญเสียพลังงาน (head loss) ของการไหลเนื่องมาจากความเสียดทานในท่อที่กระทำต่อของไหลในขณะที่ไหลเต็มท่อตรง (straight pipe) การสูญเสียพลังงานหลักมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่ระบบการไหลของน้ำในท่อ (flow regime) ซึ่งแสดงให้เห็นจาก Reynold Number ความเร็วของการไหล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของท่อ และความขรุขระสัมพัทธ์ของผิวท่อ (relative roughness) ด้านที่สัมผัสกับการไหล สมการสำหรับการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลักของการไหลในท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ D มีความยาวท่อตลอดการไหลที่เป็นแนวตรงเท่ากับ L ของของไหลที่มีความหนืดที่ไหลด้วยความเร็วเท่ากับ V ได้แก่สมการ

$$\boxed{\frac{\Delta h}{L} = f_D \cdot \frac{1}{2g} \cdot \frac{V^2}{D}}$$

เมื่อ Δh	คือการสูญเสียพลังงานเนื่องจากแรงเสียดทาน หน่วยเป็นเมตร (m)
f_D	คือ Darcy Friction factor (ไม่มีหน่วย)
L	คือความยาวของท่อ (ตรง) หน่วยเป็นเมตร (m)
D	คือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ หน่วยเป็นเมตร (m)
V	คือความเร็วเฉลี่ยของการไหลของของไหลในท่อ หน่วยเป็นเมตร/วินาที (m/s)
g	คือความเร่งอันเกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีหน่วยเป็น เมตร^2/วินาที (m^2/s)

9.2.2 การสูญเสียพลังงานรอง (minor Head Loss: $h_{loss,m}$) – หรือการสูญเสียพลังงานเฉพาะที่ (local losses) เป็นการสูญเสียพลังงานในการไหลอันเนื่องมาจากการไหลของของไหลที่มีการเปลี่ยนทิศทาง หรือการเปลี่ยนแปลงขนาดโดยฉับพลัน (sudden) เช่นการไหลผ่านข้อต่อ (fittings) ข้อต่อลดขนาด (contraction fitting) ข้อต่อขยายขนาด (expansion fitting) ข้องอ (bends) ข้อต่อสามทิศทาง (tee) ข้อต่อสี่ทิศทาง (cross) หรือวาล์ว (valves) ต่าง ๆ ในระบบการไหลของของไหลในท่อ เป็นต้น ปัจจัยที่ควบคุมการสูญเสียพลังงานรองได้แก่ระบบการไหล (flow regime) ซึ่งจะเป็นตัวบ่งบอก Reynold Number ความเร็วของการไหล (flow velocity) และรูปร่างและการวางตัว (geometry) ของข้อต่อ ข้องอ และวาล์วต่าง ๆ ในการไหลของของไหลในระบบท่อที่ไม่ยาวมาก แต่ประกอบด้วยข้อต่อ ข้องอ หรือวาล์วเป็นจำนวนมาก ผลรวมของการสูญเสียพลังงานรอง (minor losses/local losses) ก็จะเป็นไปได้ที่จะมีค่ามากกว่าการสูญเสียพลังงานหลัก (major losses/friction loss) (https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/fluid-dynamics/major-head-loss-friction-loss/)

สมการการคำนวณหาค่าการสูญเสียพลังงานรองมีดังนี้

$$h_m = kV^2/2g$$

เมื่อ h_m คือ Minor head loss

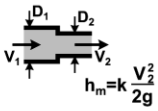
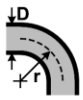
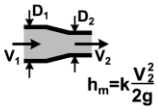
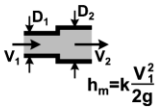
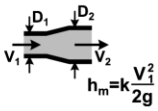
k คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานรอง (minor loss coefficient)

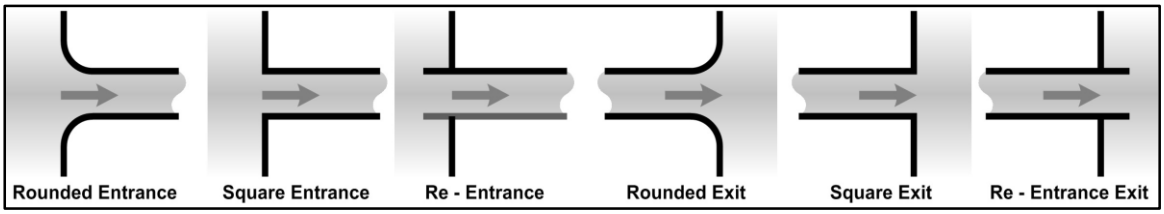
V คือ ความเร็วการไหลของของไหลในท่อ

g คือ ความเร่งอันเกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก

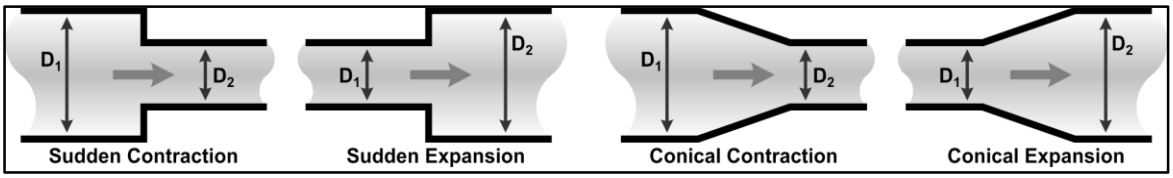
โดยที่ค่า k จะขึ้นอยู่กับประเภทและรูปร่างของอุปกรณ์ที่ของไหลไหลผ่าน ซึ่งมีหลากหลายประเภท เช่นทางเข้าผิวโค้งมน (rounded connection) ทางเข้าตั้งฉาก (square connection) รอยต่อลดขนาดฉับพลัน (sudden contraction) รอยต่อลดขนาดแบบกรวย (conical contraction) รอยต่อขยายขนาดฉับพลัน (sudden expansion) รอยต่อขยายขนาดแบบกรวย (conical expansion) หรือหากเป็นประเภทวาล์ว ก็จะมีหลายรูปร่าง เช่น วาล์วแบบประตูน้ำ (gate valve) วาล์วลูกบอล (ball valve) วาล์ว์ลูกโลก (globe valve) หรือข้อต่อแบบสามทางตั้งฉาก (tee) สี่ทางตั้งฉาก (cross) หรือเป็นข้องอที่องศาต่าง ๆ ข้องอหักศอก (elbow) ข้องอ 180 องศา (180° bend) ที่มีทั้งแบบปีก (flanged) และแบบเกลียว (threaded) เป็นต้น อุปกรณ์ที่กล่าวมาข้างต้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานรองที่ต่างกันอย่างชัดเจน ดังนั้นการคำนวณการสูญเสียพลังงานรองของระบบต้องพิจารณาเป็นจุดอย่างละเอียดและรอบคอบ ตารางที่ 9.1 แสดงค่าสัมประสิทธ์การสูญเสียพลังงานรองของอุปกรณ์ประเภทต่าง ๆ ในระบบการไหลของของไหลในท่อปิด รูปที่ 9.2 แสดงทางเข้าและทางออกรูปแบบต่างๆ รูปที่ 9.3 แสดงท่อลดและขยายขนาดรูปแบบต่างๆ รูปที่ 9.4 แสดงข้อต่อและข้องอชนิดต่างๆ และรูปที่ 9.5 แสดงวาล์วประเภทต่างๆ (ที่มา: กลศาสตร์ของไหล, ธันดร ออกวะลา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2553)

ตารางที่ 9-1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานรองของอุปกรณ์ประเภทต่าง ๆ ในระบบการไหลของของไหลในท่อปิด (ที่มา: กลศาสตร์ของไหล, ธันดร ออกวะลา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2553)

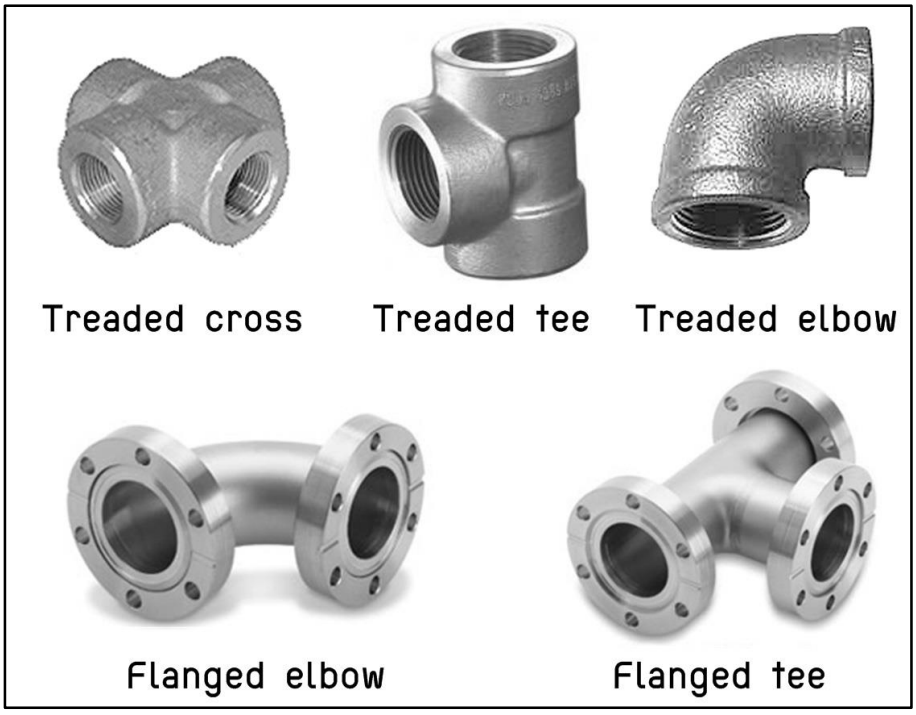
Type of Component or Fitting		: K	Type of Component or Fitting	: K	Type of Component or Fitting	: K
Pipe Entrance (Reservoir to Pipe)			**Globe valve - fully open**	: 10.0	**Cross**	
Square Connection		: 0.50	**Gate valve**		Line flow	: 0.50
Rounded Connection		: 0.20	- fully open	: 0.39	Branch flow	: 0.75
Re-entrant (pipe juts into tank)		: 1.00	- 3/4 open	: 1.10		
Pipe Exit (Pipe to Reservoir)			- 1/2 open	: 4.80	**Mitered bend (θ)**	
Square Connection		: 1.00	- 1/4 open	: 27.0	15°	: 0.05
Rounded Connection		: 1.00	**Ball Valve**		30°	: 0.10
Re-entrant (pipe juts into tank)		: 1.00	- fully open	: 0.05	45°	: 0.20
Contraction – sudden			- 2/3 open	: 5.50	60°	: 0.35
	D_2/D_1=0.80	: 0.18	- 1/3 open	: 200	90°	: 0.80
	D_2/D_1=0.50	: 0.37	**Angle valve - fully open**	: 4.30		
$h_m=k\frac{V_2^2}{2g}$	D_2/D_1=0.20	: 0.49	**Check valve – conventional**	: 4.00	**90° smooth bend**	
			Check valve – clearway	: 1.50	 Bend radius/D = 4	: 0.16-0.18
Contraction – conical			**Check valve – ball**	: 4.50	Bend radius/D = 2	: 0.19-0.25
	D_2/D_1=0.80	: 0.05	**Butterfly valve - fully open**	: 1.20	Bend radius/D = 1	: 0.35-0.40
	D_2/D_1=0.50	: 0.07	**Cock - straight through**	: 0.50		
$h_m=k\frac{V_2^2}{2g}$	D_2/D_1=0.20	: 0.08	**Foot valve – hinged**	: 2.20	**Elbows**	
			Foot valve – poppet	: 12.5	Threaded Regular 90°	: 1.50
Expansion – sudden					Threaded Regular 45°	: 0.40
	D_2/D_1=0.80	: 0.16	**Tee**		Threaded Long Radius 90°	: 0.70
	D_2/D_1=0.50	: 0.57	Line flow	: 0.30-0.40	Flanged Regular 90°	: 0.30
$h_m=k\frac{V_1^2}{2g}$	D_2/D_1=0.20	: 0.92	Branch flow	: 0.75-1.80	Flanged Long Radius 90°	: 0.20
			Flanged, Line Flow	: 0.20	Flanged Long Radius 45°	: 0.20
Expansion – conical			Flanged, Branch Flow	: 1.00		
	D_2/D_1=0.80	: 0.03	Threaded, Line Flow	: 0.90	**180° Return Bends**	
	D_2/D_1=0.50	: 0.08	Threaded, Branch Flow	: 2.00	Flanged	: 0.20
$h_m=k\frac{V_1^2}{2g}$	D_2/D_1=0.20	: 0.13	Threaded Union	: 0.08	Threaded	: 1.50



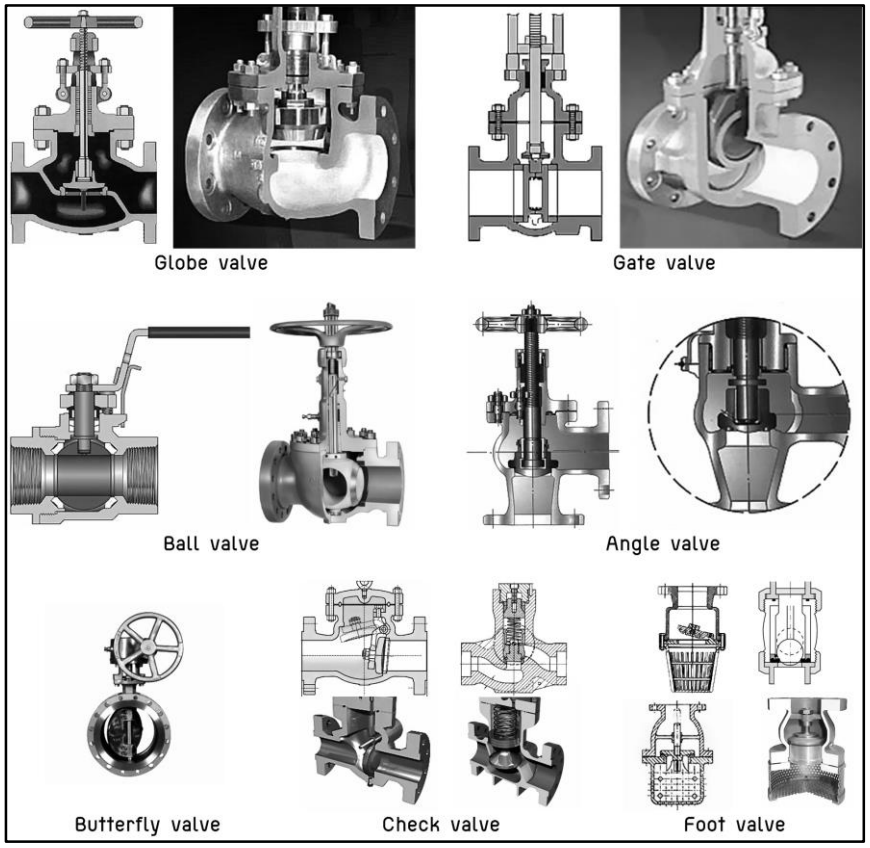
รูปที่ 9-2 แสดงทางเข้าและทางออกรูปแบบต่าง ๆ (ที่มา: กลศาสตร์ของไหล, ธันดร ออกวะลา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2553)



รูปที่ 9-3 แสดงท่อลดและขยายขนาดรูปแบบต่าง ๆ (ที่มา: กลศาสตร์ของไหล, ธันดร ออกวะลา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2553)



รูปที่ 9-4 แสดงข้อต่อและข้องอชนิดต่าง ๆ (ที่มา: กลศาสตร์ของไหล, ธันดร ออกวะลา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2553)



รูปที่ 9-5 แสดงวาล์วประเภทต่าง ๆ (ที่มา: กลศาสตร์ของไหล, ธันดร ออกวะลา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2553)

9.2.3 การสูญเสียพลังงานรวม (total head loss: $h_{loss,t}$) - คือผลรวมของการสูญเสียพลังงานหลัก ($h_{loss,f}$) และการสูญเสียพลังงานรอง ($h_{loss,m}$) และสามารถเขียนเป็นสมการแบบง่ายๆ ได้ดังนี้

$$h_{loss,t} = h_{loss,f} + h_{loss,m}$$

หลักการออกแบบระบบการไหลในท่อนั้น ผู้ออกแบบจะทำการเลือกขนาดท่อที่จะใช้และวิเคราะห์ชลศาสตร์การไหลในท่อ ตามสมการพลังงานเบอรนูลีย (Bernoulli's Equation) โดยคำนวณการสูญเสียพลังงานหลักเนื่องจากแรงเสียดทานในท่อ (H_f) และการสูญเสียพลังงานรอง (h_m) เมื่อสามารถคำนวณการสูญเสียพลังงานการไหลในท่อแต่ละส่วนได้แล้ว ก็จะสามารถหาค่าแรงดันของน้ำตามแนวท่อ ณ จุดใช้น้ำต่าง ๆ ในระบบ ว่ามีค่าตามที่กำหนดไว้และเหมาะสมต่อการใช้งานหรือไม่

ระบบกระจายน้ำหรือระบบส่งน้ำที่ดีต้องออกแบบให้พลังงาน ณ จุดจ่ายน้ำต้นทางมีมากเพียงพอที่จะเอาชนะการสูญเสียพลังงานรวมหรือออกแบบขนาดท่อรวมถึงการเลือกใช้อุปกรณ์ประกอบท่อ ข้อต่อ ข้องอ และวาล์วเพื่อลดการสูญเสียพลังงาน ทำให้สามารถที่จะส่งน้ำไปถึงจุดที่ไกลที่สุดของระบบส่งน้ำให้มีแรงดันไม่น้อยกว่าแรงดันใช้งานที่ออกแบบไว้ ซึ่งปกติแรงดันน้ำประปาทั่วไปจะให้แรงดันประมาณ 0.7-1.5 bar หรือที่ประมาณ 7–15 เมตรน้ำ ซึ่งจะแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่

9.3 ความสัมพันธ์ของแรงดันน้ำกับการเปลี่ยนแปลงของระดับภูมิประเทศ (relationship of water pressure and elevation change)

การเปลี่ยนแปลงระดับภูมิประเทศในการส่งน้ำบาดาลในระบบท่อหมายถึงการส่งน้ำในพื้นที่ที่ไม่ราบเรียบ เช่นผ่านเนินเขาบ้างที่ราบบ้างหรือผ่านที่ลาดบ้าง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับความสูง-ต่ำของระดับท่อ ในตำรากลศาสตร์ของไหลหลายเล่มกล่าวไว้ว่าว่าทุก 1 ฟุต (0. 3048 เมตร) ของความแตกต่างระดับภูมิประเทศในแนวดิ่ง แรงดันน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลง 0.433 PSI (pound per square inch) ซึ่งเท่ากับ 0.03 bar ถ้าระดับภูมิประเทศสูงขึ้น 1 ฟุตหรือระดับท่อน้ำขึ้นบนเนินก็ให้หัก (subtract) แรงดันน้ำออก 0.03 bar จากระดับแรงดันน้ำเริ่มต้นที่ต้นระบบส่งน้ำ (water sources) แต่หากระดับภูมิประเทศลดลง 1 ฟุตหรือระดับท่อน้ำลงเนินก็ให้เพิ่ม (add) แรงดันน้ำเข้าไป 0.03 bar จากระดับแรงดันน้ำเริ่มต้นที่ต้นระบบส่งน้ำ (1 PSI = 0.0689475729 bar)

ยกตัวอย่างเช่นในระบบชลประทานแห่งหนึ่ง มีความสูงของพื้นที่ส่วนท้ายน้ำของระบบส่งน้ำอยู่ 9 ฟุต จากพื้นที่ต้นน้ำ แรงดันน้ำที่ปลายน้ำจะต่ำกว่าแรงดันน้ำที่จุดเริ่มต้นเท่ากัลป์ 9 ฟุต x 0.433 PSI หรือต่ำกว่าเท่ากับ 4 PSI หรือเท่ากับ 0.3 bar โดยประมาณ หรืออีกหนึ่งตัวอย่าง ณ มุมหนึ่งของระบบส่งน้ำของแปลงชลประทานอยู่ต่ำกว่าแรงดันน้ำ ณ พื้นที่ต้นน้ำ (water source) 20 ฟุต ส่วนอีกมุมหนึ่งมีพื้นที่สูงกว่าแรงดันต้นน้ำอยู่ 12 ฟุต ในพื้นที่ที่ต่ำกว่า 20 ฟุต จะมีแรงดันน้ำลดลงจากแรงดันน้ำเริ่มต้นเท่ากับ 20 x 0.433 PSI หรือเท่ากับ 8.7 PSI ส่วนในพื้นที่สูงกว่า 12 ฟุต จะมีแรงดันน้ำลดลงจากจุดเริ่มต้นกับ 12 x 0.433 PSI หรือเท่ากับ 5 PSI (ที่มา www. irrigationtutorials.com/) ดังนั้นการจะติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น sprinkler ก็ต้องคำนึงถึงด้วยเช่นกัน ทั้งนี้เพื่อให้การกระจายน้ำเป็นไปอย่างทั่วถึงทั้งแปลงโดยที่มีแรงดันสุดท้ายอย่างน้อย 0.7-1.5 bar

9.4 ระบบกระจายน้ำของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล

ก่อนที่กรมทรัพยากรน้ำบาดาลจะถูกสถาปนาขึ้น มีหน่วยงานที่ปฏิบัติงานพัฒนาน้ำบาดาลอยู่ 4 หน่วยงาน ได้แก่กองน้ำบาดาล กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม กองพัฒนาบ่อบาดาล กรมโยธาธิการ กองพัฒนาแหล่งน้ำ กรมการเร่งรัดพัฒนาชนบท กระทรวงมหาดไทย และกองพัฒนาน้ำสะอาด กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข แต่ละหน่วยงานที่กล่าวมาข้างต้นจะมีระบบกระจายน้ำโดยใช้น้ำบาดาลเป็นน้ำต้นทุนตามรูปแบบของตนเอง เรียกว่าระบบประปาหมู่บ้านบ้าง ระบบประปาชนบทบ้าง ต่อมาเมื่อมีการปฏิรูประบบราชการได้มีการรวมหน่วยงานทั้ง 4 หน่วยข้างต้นแล้วสถาปนาเป็นกรมทรัพยากรน้ำบาดาล สังกัดกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ในวันที่ 3 ตุลาคม 2545 และระบบประปาต่าง ๆ ได้ถูกถ่ายโอนให้ไปอยู่ในความรับผิดชอบของกรมส่งเสริมการปกครองท้องถิ่น สังกัดกระทรวงมหาดไทย

งานจัดหาแหล่งน้ำหรือแม้กระทั่งงานเจาะบ่อน้ำบาดาลที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางบ่อตอนบนไม่เกิน 100 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) และปริมาณการใช้น้ำบาดาลไม่เกินวันละ 10 ลูกบาศก์เมตร ถูกถ่ายโอนไปให้กรมส่งเสริมการปกครองท้องถิ่นเป็นหน่วยงานที่ดูแล และกรมทรัพยากรน้ำบาดาลจะดำเนินการเจาะบ่อน้ำบาดาลที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางบ่อตอนบนมากกว่า 100 มิลลิเมตรและปริมาณการใช้น้ำบาดาลมากกว่าวันละ 10 ลูกบาศก์เมตร ต่อมากรมทรัพยากรน้ำบาดาลได้รับการจัดสรรงบประมาณให้ดำเนินโครงการต่าง ๆ มากมาย อาทิโครงการพัฒนาน้ำบาดาลเพื่อการเกษตร รูปแบบต่าง ๆ หรือโครงการจัดหาน้ำอุปโภคบริโภคให้กับประชาชน หรือโครงการจัดหาน้ำสะอาดให้กับโรงเรียนขนาดต่าง ๆ ที่สังกัดสานักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน (สพฐ.) เป็นต้น ซึ่งมีรายละเอียดโครงการดังนี้

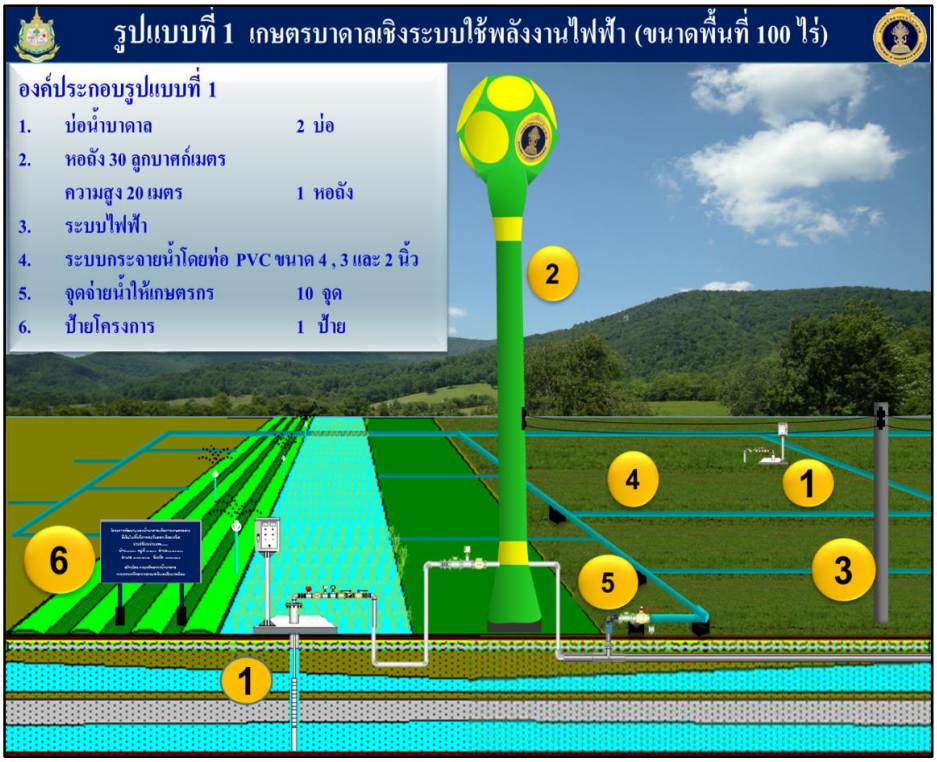
9.4.1 ระบบกระจายน้ำโครงการน้ำบาดาลเพื่อการเกษตร

ระบบกระจายน้ำโครงการน้ำบาดาลเพื่อการเกษตรของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล จัดออกเป็น 3 รูปแบบ ขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่การเกษตร และแหล่งพลังงาน ดังนี้

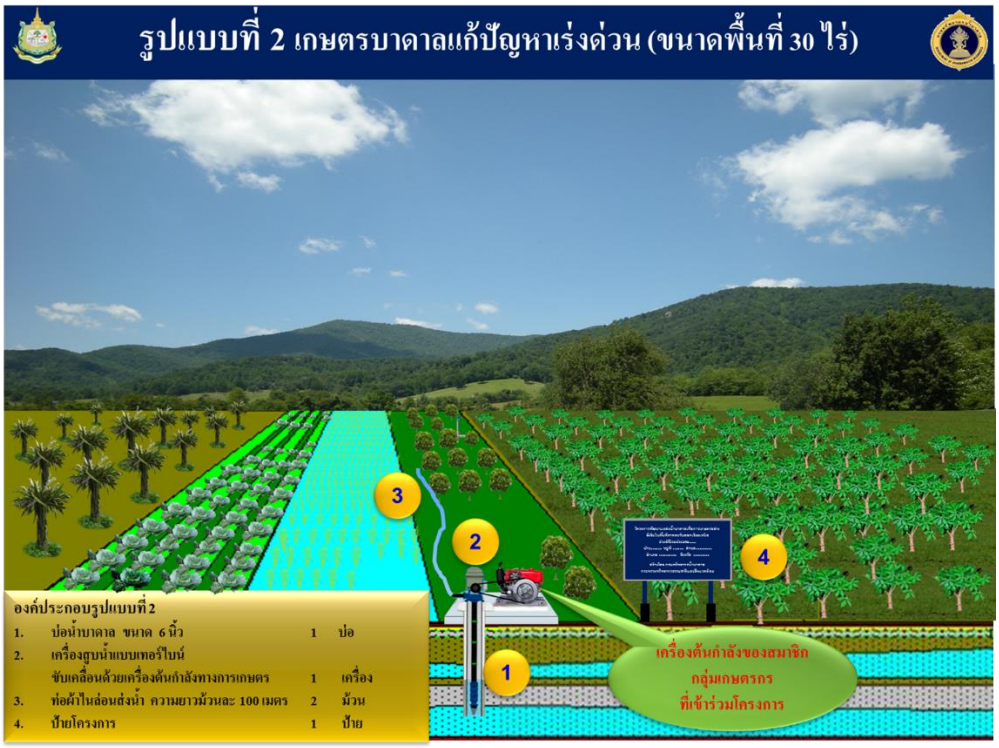
1) เกษตรบาดาลเชิงระบบใช้พลังงานไฟฟ้า (ขนาดพื้นที่ 100 ไร่) มีองค์ประกอบดังนี้ (รูปที่ 9-6)
- บ่อน้ำบาดาล จำนวน 2 บ่อ
- หอถึงขนาดความจุ 30 ลูกบาศก์เมตร สูง 20 เมตร
- ระบบไฟฟ้าบ้าน
- ท่อส่งน้ำ PVC ขนาด 4 นิ้ว 3 นิ้ว และ 2 นิ้ว มีความยาวรวม 1000 เมตร
- จุดจ่ายน้ำให้เกษตรกร จำนวน 10 จุด

2) เกษตรบาดาลเชิงระบบพลังงานแสงอาทิตย์ (พื้นที่ 80 ไร่) มีองค์ประกอบดังนี้ (รูปที่ 9-7)
- บ่อน้ำบาดาล จำนวน 1 บ่อ
- หอถึงขนาดความจุ 20 ลูกบาศก์เมตร สูง 20 เมตร
- ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar cell)
- ท่อส่งน้ำ PVC ขนาด 2 นิ้ว และ 1 นิ้ว มีความยาวรวม 1000 เมตร
- จุดจ่ายน้ำให้เกษตรกร จำนวน 6 จุด

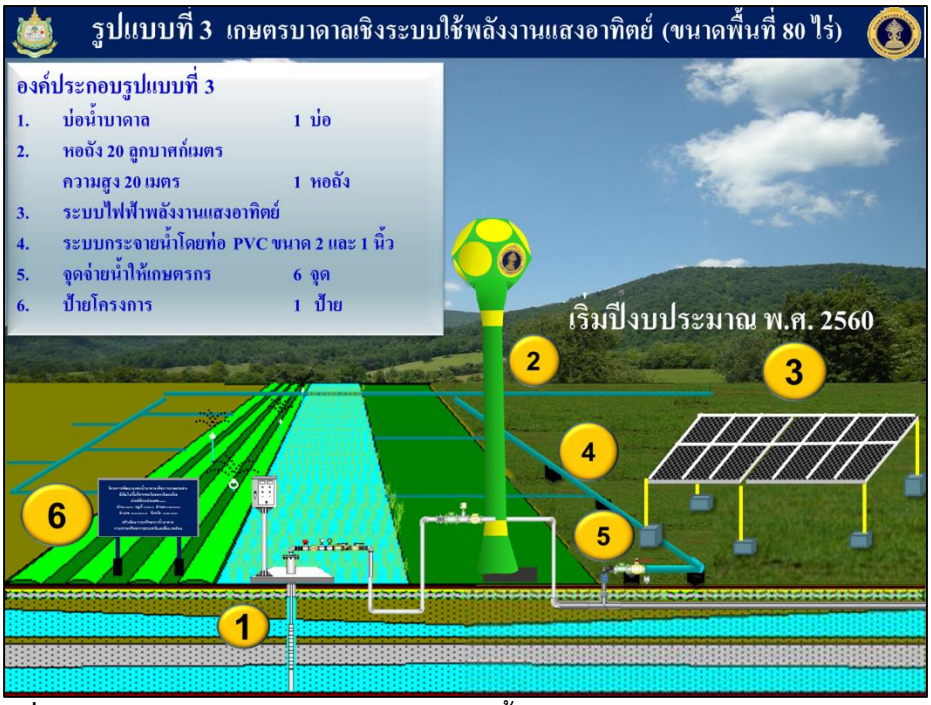
3) เกษตรบาดาลแก้ไขปัญหาเร่งด่วน (พื้นที่ 30 ไร่) มีองค์ประกอบดังนี้ (รูปที่ 9-8)
- บ่อน้ำบาดาล จำนวน 1 บ่อ
- เครื่องสูบน้ำแบบเทอร์ไบน์ 1 เครื่อง
- ท่อน้ำผ้าใบยาว 100 เมตร จำนวน 2 ม้วน



รูปที่ 9-6 แสดงองค์ประกอบของระบบกระจายน้ำโครงการเกษตรบาดาลเชิงระบบใช้พลังงานไฟฟ้า (ขนาดพื้นที่ 100 ไร่)



รูปที่ 9-7 แสดงองค์ประกอบของระบบกระจายน้ำโครงการเกษตรบาดาลแก้ไขปัญหาเร่งด่วน (ขนาดพื้นที่ 30 ไร่)



รูปที่ 9-8 แสดงองค์ประกอบของระบบกระจายน้ำโครงการเกษตรบาดาลเชิงระบบใช้พลังงานแสงอาทิตย์ (ขนาดพื้นที่ 80 ไร่)

9.4.2 ระบบกระจายน้ำโครงการสำรวจและพัฒนาแหล่งน้ำบาดาลเพื่อสนับสนุนน้ำดื่มสะอาดให้กับโรงเรียนทั่วประเทศ

กรมทรัพยากรน้ำบาดาลได้จัดทำโครงการน้ำดื่มสะอาดเพื่อสนับสนุนโรงเรียนสังกัดกรมสามัญศึกษาขั้นพื้นฐาน (สพฐ.) เพื่อยกระดับคุณภาพชีวิตของเด็กนักเรียนและผู้ปกครองที่อยู่ตามชนบท มาอย่างต่อเนื่องหลายปี โดยมีหลักเกณฑ์การคัดเลือก ดังนี้

1) ไม่มีระบบประปา
2) ไม่มีแหล่งน้ำและน้ำสะอาดใช้ภายในโรงเรียนหรือแหล่งน้ำที่มีอยู่มีปริมาณน้ำไม่เพียงพอต่อการใช้ตลอดปี
3) อยู่ในพื้นที่จังหวัด หรือหมู่บ้านที่ถูกประกาศให้เป็นพื้นที่ภัยแล้งอย่างต่อเนื่องมาเป็นเวลาหลายปี
4) มีศักยภาพบาดาลเพียงพอที่จะพัฒนาขึ้นมาใช้ได้ตลอดปี
5) มีปัญหาด้านคุณภาพน้ำ และไม่มีระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ

องค์ประกอบของระบบกระจายน้ำโครงการสำรวจและพัฒนาแหล่งน้ำบาดาลเพื่อสนับสนุนน้ำดื่มสะอาดให้กับโรงเรียนทั่วประเทศ ประกอบด้วย (รูปที่ 9-9)

1) บ่อน้ำบาดาล จำนวน 1 บ่อ
2) หอถังความจุ 12 ลูกบาศก์เมตร สูง 12 เมตร
3) ระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำแบบ reverse osmosis (R.O.)
4) อาคารผลิตน้ำดื่ม

รูปที่ 9-9 แสดงองค์ประกอบของระบบกระจายน้ำโครงการสำรวจและพัฒนาแหล่งน้ำบาดาลเพื่อสนับสนุนน้ำดื่มสะอาดให้กับโรงเรียนทั่วประเทศ

9.4.3 ระบบกระจายน้ำโครงการพัฒนาแหล่งน้ำบาดาลเพื่อสนับสนุนน้ำดื่มสะอาดให้กับสถานศึกษาและชุมชน (ขนาดกลางและขนาดใหญ่)

ระบบกระจายน้ำโครงการพัฒนาแหล่งน้ำบาดาลเพื่อสนับสนุนน้ำดื่มสะอาดให้กับสถานศึกษาและชุมชนขนาดกลาง (รูปที่ 9-10)

องค์ประกอบของระบบ

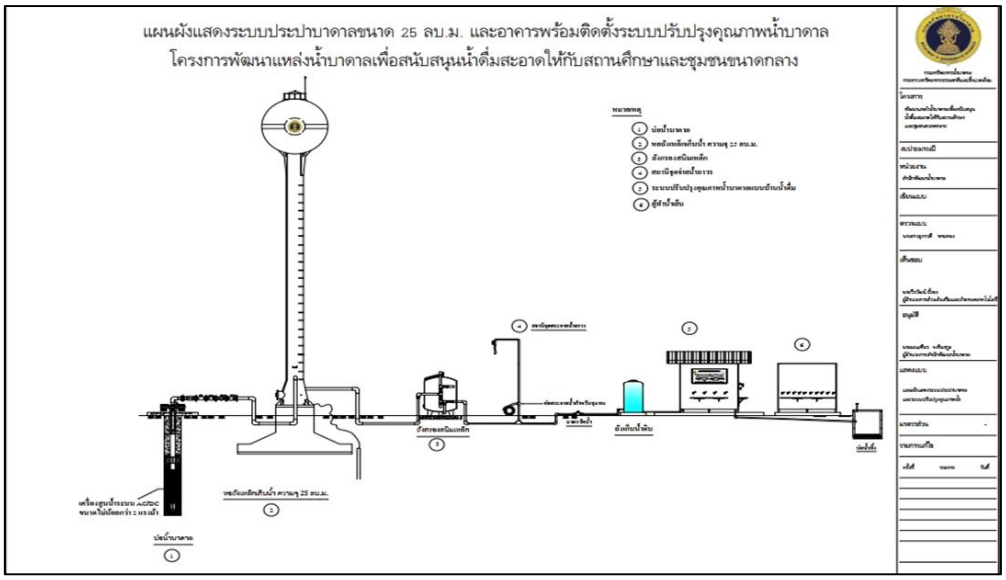
1. บ่อน้ำบาดาลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) จำนวน 1 บ่อ
2. เครื่องสูบน้ำแบบจุ่มใต้น้ำขนาด 3 แรงม้า 220 โวล์ จำนวน 1 ชุด
3. หอถังเหล็กเก็บน้ำขนาดความจุ 20 ลูกบาศก์เมตร
4. ถังกรองสนิมเหล็ก
5. สถานีจุดจ่ายน้ำถาวร
6. ระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลแบบบ้านน้ำดื่ม
7. ตู้ทำน้ำเย็น

ระบบกระจายน้ำโครงการพัฒนาแหล่งน้ำบาดาลเพื่อสนับสนุนน้ำดื่มสะอาดให้กับสถานศึกษาและชุมชนขนาดใหญ่ (รูปที่ 9-11)

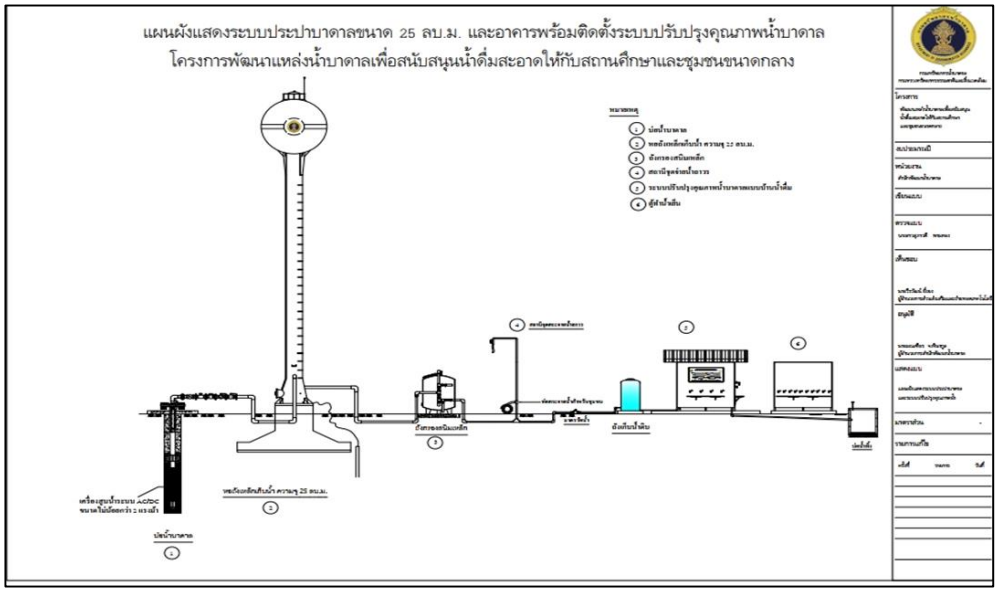
องค์ประกอบของระบบ

1. บ่อน้ำบาดาลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) จำนวน 1 บ่อ
2. เครื่องสูบน้ำแบบจุ่มใต้น้ำขนาด 3 แรงม้า 220 โวล์ จำนวน 1 ชุด
3. หอถังเหล็กเก็บน้ำขนาดความจุ 20 ลูกบาศก์เมตร
4. ถังกรองสนิมเหล็ก

5. สถานีจุดจ่ายน้ำถาวร
6. ระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาลแบบบ้านน้ำดื่ม
7. ตู้ทำน้ำเย็น



รูปที่ 9-10 แสดงระบบกระจายน้ำโครงการพัฒนาแหล่งน้ำบาดาลเพื่อสนับสนุนน้ำดื่มสะอาดให้กับสถานศึกษาและชุมชนขนาดกลาง

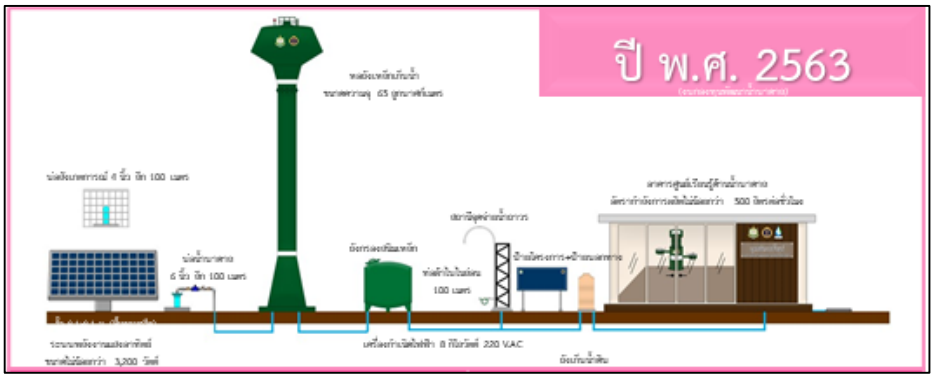


รูปที่ 9-11 แสดงระบบกระจายน้ำโครงการพัฒนาแหล่งน้ำบาดาลเพื่อสนับสนุนน้ำดื่มสะอาดให้กับสถานศึกษาและชุมชนขนาดใหญ่

9.4.4 โครงการศึกษาสำรวจจุดจ่ายน้ำบาดาลเพื่อประชาชนตามถนนสายหลักทั่วประเทศ ปี พ.ศ. 2563 จำนวน 24 แห่ง (รูปที่ 9-12)

องค์ประกอบของระบบ

1. บ่อน้ำบาดาลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว ลึก 100 เมตร จำนวน 1 บ่อ
2. บ่อสังเกตการณ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว ลึก 100 เมตร จำนวน 1 บ่อ
3. เครื่องสูบน้ำแบบจุ่มใต้น้ำขนาด 3 แรงม้า 220 โวล์ จำนวน 1 ชุด
4. ชุดผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาดไม่น้อยกว่า 3,200 วัตต์ จำนวน 1 ชุด
5. หอถังเก็บน้ำขนาดความจุ 65 ลูกบาศก์เมตร 1 หอ
6. ถังกรองสนิมเหล็ก 1 ถัง
7. สถานีจุดจ่ายน้ำถาวร 1 จุด
8. ป้ายแสดงรายละเอียดโครงการ
9. ถังเก็บน้ำดิบ
10. อาคารศูนย์เรียนรู้ด้านน้ำบาดาลอัตราการผลิตไม่น้อยกว่า 500 ลิตรต่อชั่วโมง

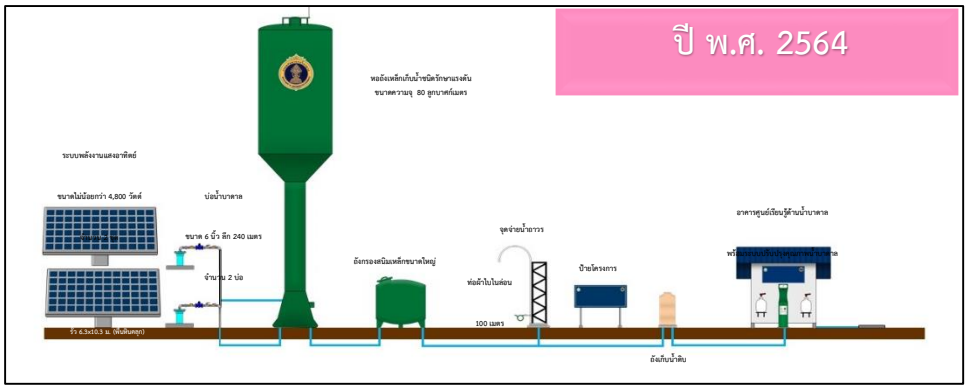


รูปที่ 9-12 แสดงองค์ประกอบของระบบในโครงการศึกษาสำรวจจุดจ่ายน้ำบาดาลเพื่อประชาชนตามถนนสายหลักทั่วประเทศ ปี พ.ศ. 2563

9.4.5 โครงการศึกษาสำรวจจุดจ่ายน้ำบาดาลเพื่อประชาชนตามถนนสายหลักทั่วประเทศ ปี พ.ศ. 2564 แบบใช้พลังงานแสงอาทิตย์ จำนวน 8 แห่ง (รูปที่ 9-13)

องค์ประกอบของระบบ

1. บ่อน้ำบาดาลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว ลึก 200 เมตร จำนวน 2 บ่อ
2. เครื่องสูบน้ำแบบจุ่มใต้น้ำขนาด 3 แรงม้า 220 โวล์ จำนวน 2 ชุด
3. ชุดผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (solar cell) ขนาดไม่น้อยกว่า 4,800 วัตต์ จำนวน 2 ชุด
4. หอถังเก็บน้ำขนาดความจุ 80 ลูกบาศก์เมตร 1 หอ
5. ถังกรองสนิมเหล็ก 1 ถัง
6. สถานีจุดจ่ายน้ำถาวร 1 จุด
7. ป้ายแสดงรายละเอียดโครงการ
8. ถังเก็บน้ำดิบ และ 9. อาคารศูนย์เรียนรู้ด้านน้ำบาดาลพร้อมระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ

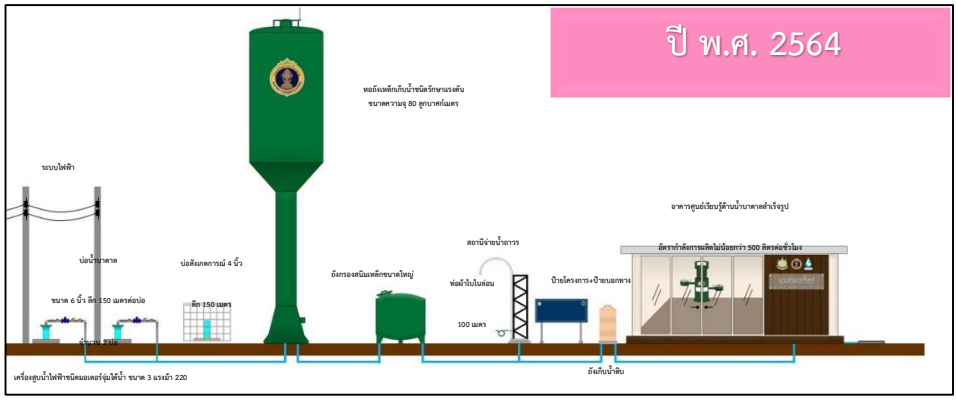


รูปที่ 9-13 แสดงองค์ประกอบของระบบในโครงการศึกษาสำรวจจุดจ่ายน้ำบาดาลเพื่อประชาชน แบบพลังงานแสงอาทิตย์ตามถนนสายหลักทั่วประเทศ ปี พ.ศ. 2564

9.4.6 โครงการศึกษาสำรวจจุดจ่ายน้ำบาดาลเพื่อประชาชนตามถนนสายหลักทั่วประเทศ ปี พ.ศ. 2564 แบบใช้ระบบไฟฟ้า จำนวน 43 แห่ง (รูปที่ 9-14)

องค์ประกอบของระบบ

1. บ่อน้ำบาดาลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว ลึก 150 เมตร จำนวน 2 บ่อ
2. บ่อสังเกตการณ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ลึก 150 เมตร จำนวน 1 บ่อ
3. เครื่องสูบน้ำแบบจุ่มใต้น้ำขนาด 3 แรงม้า 220 โวล์ จำนวน 2 ชุด
4. หอถังเก็บน้ำขนาดความจุ 80 ลูกบาศก์เมตร 1 หอ
5. ถังกรองสนิมเหล็ก 1 ถัง
6. สถานีจุดจ่ายน้ำถาวร 1 จุด
7. ป้ายแสดงรายละเอียดโครงการ
8. ถังเก็บน้ำดิบ
9. อาคารศูนย์เรียนรู้ด้านน้ำบาดาลสำเร็จรูป ที่มีอัตราการผลิตไม่น้อยกว่า 500 ลิตรต่อชั่วโมง

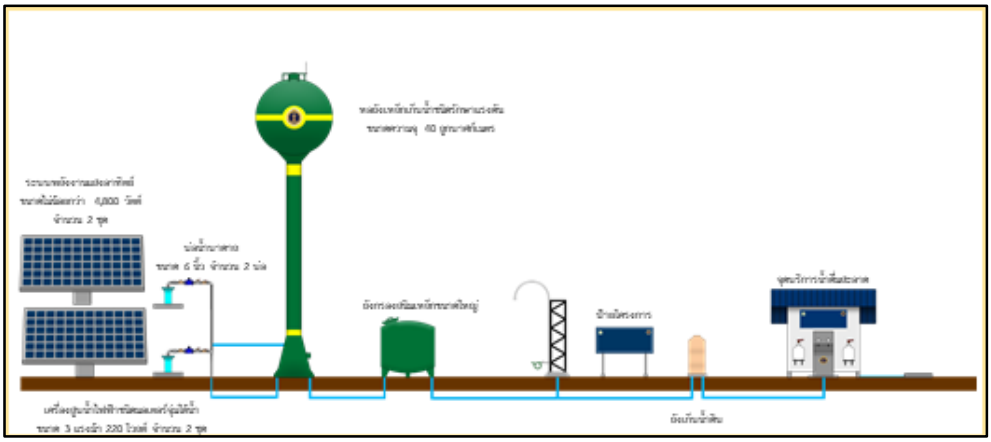


รูปที่ 9-14 แสดงองค์ประกอบของระบบในโครงการศึกษาสำรวจจุดจ่ายน้ำบาดาลเพื่อประชาชน แบบใช้ระบบไฟฟ้าตามถนนสายหลักทั่วประเทศ ปี พ.ศ. 2564

9.4.7 โครงการศึกษาการพัฒนาน้ำบาดาลเพื่อความมั่นคงระดับชุมชน ปี 2563 (งบกลาง) จำนวน 70 แห่ง (รูปที่ 9-15)

องค์ประกอบของระบบ

1. บ่อน้ำบาดาลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว จำนวน 2 บ่อ
2. เครื่องสูบน้ำแบบจุ่มใต้น้ำขนาด 3 แรงม้า 220 โวล์ จำนวน 2 ชุด
3. ชุดพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาดไม่น้อยกว่า 4,800 วัติ จำนวน 2 ชุด
4. หอถังเก็บน้ำขนาดความจุ 40 ลูกบาศก์เมตร 1 หอ
5. ถังกรองสนิมเหล็ก 1 ถัง
6. สถานีจุดจ่ายน้ำถาวร 1 จุด
7. ป้ายแสดงรายละเอียดโครงการ
8. ถังเก็บน้ำดิบ
9. จุดบริการน้ำดื่มสะอาด

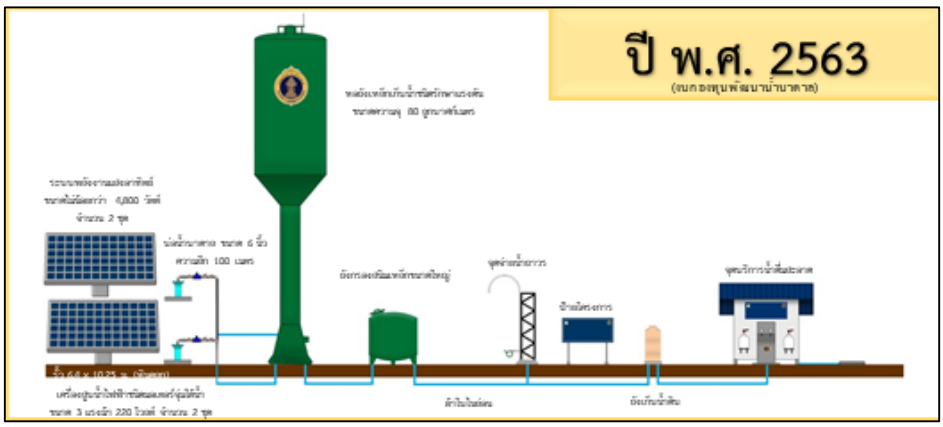


รูปที่ 9-15 แสดงองค์ประกอบของระบบในโครงการศึกษาการพัฒนาน้ำบาดาลเพื่อความมั่นคงระดับชุมชน ปี 2563 (งบกลาง)

9.4.8 โครงการศึกษาการพัฒนาน้ำบาดาลเพื่อความมั่นคงระดับชุมชน ปี 2563 (งบกองทุนพัฒนาน้ำบาดาล) จำนวน 46 แห่ง (รูปที่ 9-16)

องค์ประกอบของระบบ

1. บ่อน้ำบาดาลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว ความลึก 100 เมตร จำนวน 2 บ่อ
2. เครื่องสูบน้ำแบบจุ่มใต้น้ำขนาด 3 แรงม้า 220 โวล์ จำนวน 2 ชุด
3. ชุดพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาดไม่น้อยกว่า 4,800 วัติ จำนวน 2 ชุด
4. หอถังเก็บน้ำขนาดความจุ 40 ลูกบาศก์เมตร 1 หอ
5. ถังกรองสนิมเหล็ก 1 ถัง
6. สถานีจุดจ่ายน้ำถาวร 1 จุด
7. ป้ายแสดงรายละเอียดโครงการ
8. ถังเก็บน้ำดิบ
9. จุดบริการน้ำดื่มสะอาด

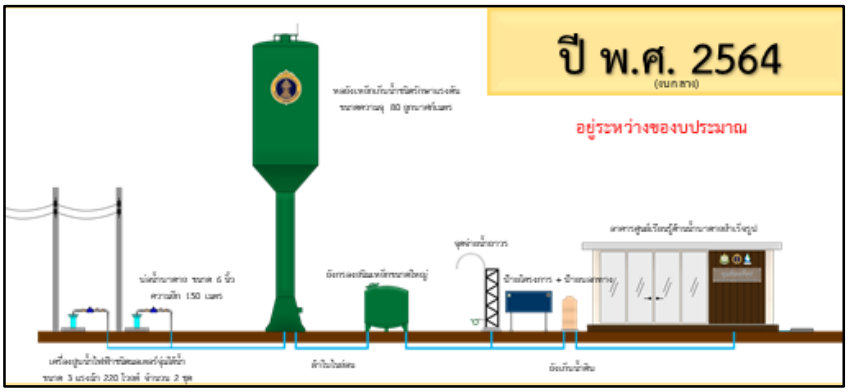


รูปที่ 9-16 แสดงองค์ประกอบของระบบในโครงการศึกษาการพัฒนาน้ำบาดาลเพื่อความมั่นคงระดับชุมชน ปี 2563 (งบกองทุนพัฒนาน้ำบาดาล)

9.4.9 โครงการศึกษาการพัฒนาน้ำบาดาลเพื่อความมั่นคงระดับชุมชน ปี 2564 (งบกลาง และอยู่ระหว่างของบประมาณ) จำนวน 178 แห่ง (รูปที่ 9-17)

องค์ประกอบของระบบ

1. บ่อน้ำบาดาลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว ความลึก 150 เมตร จำนวน 2 บ่อ
2. เครื่องสูบน้ำแบบจุ่มใต้น้ำขนาด 3 แรงม้า 220 โวล์ จำนวน 2 ชุด
3. หอถังเก็บน้ำขนาดความจุ 80 ลูกบาศก์เมตร 1 หอ
4. ถังกรองสนิมเหล็ก 1 ถัง
5. สถานีจุดจ่ายน้ำถาวร 1 จุด
6. ป้ายแสดงรายละเอียดโครงการ และป้ายบอกทาง
7. ถังเก็บน้ำดิบ
8. อาคารศูนย์เรียนรู้ด้านน้ำบาดาลสำเร็จรูป



รูปที่ 9-17 แสดงองค์ประกอบของระบบในโครงการศึกษาการพัฒนาน้ำบาดาลเพื่อความมั่นคงระดับชุมชน ปี 2564 (งบกลาง)

9.4.10 โครงการจัดหาแหล่งน้ำบาดาลที่มีคุณภาพเพื่อใช้ในการบรรเทาและแก้ไขปัญหาความขาดแคลนน้ำของประชาชนในพื้นที่แล้งซ้ำซากและมีปัญหาคุณภาพน้ำเค็มในภาคะวันออกเฉียงเหนือ (ปี พ.ศ. 2559-2560)

องค์ประกอบของโครงการ

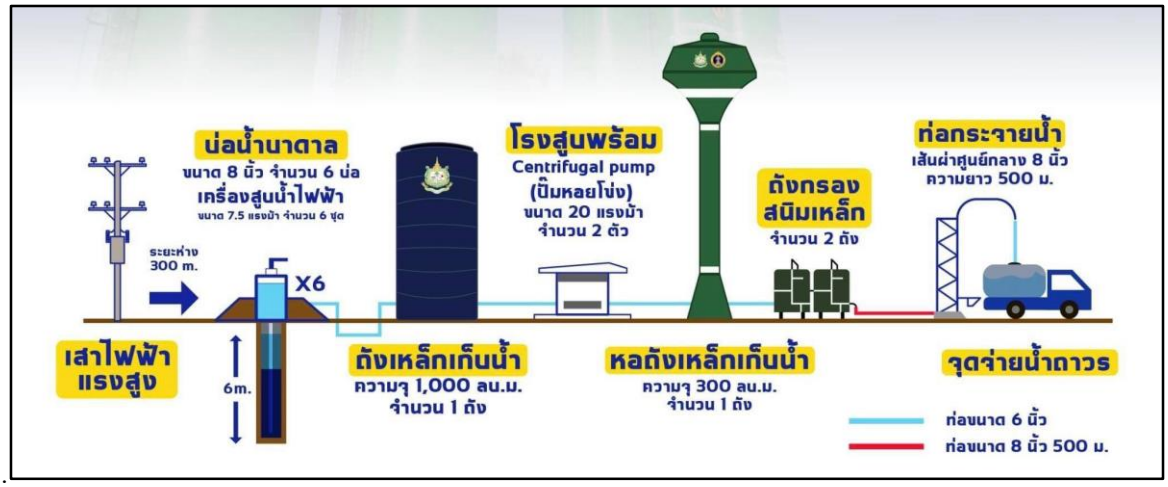
1. บ่อน้ำบาดาลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว ลึก 150 เมตร 2 บ่อ
2. บ่อสังเกตการณ์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว ลึก 150 เมตร 2 บ่อ
3. หอถังความจุ 20 ลูกบาศก์เมตร สูง 20 เมตร 2 ถัง
4. ระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ 2 ชุด
5. ท่อจายน้ำ HDPE เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว ความยาวไม่น้อยกว่า 6 กิโลเมตร
6. จุดจ่ายน้ำหน้าบ้านเรือน 200 จุด (1 จุดต่อ 1 ครัวเรือน)

รูปที่ 9-18 แสดงหอถังกักเก็บและส่งน้ำและระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำในโครงการจัดหาแหล่งน้ำบาดาลที่มีคุณภาพเพื่อใช้ในการบรรเทาและแก้ไขปัญหาความขาดแคลนน้ำของประชาชนในพื้นที่แล้งซ้ำซากและมีปัญหาคุณภาพน้ำเค็มในภาคะวันออกเฉียงเหนือ

9.4.11 โครงการส่งน้ำบาดาลระยะไกลเพื่อแก้ไขปัญหาภัยแล้ง กรมทรัพยากรน้ำบาดาล

องค์ประกอบของโครงการ

1. บ่อน้ำบาดาลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว ลึก 250 เมตร 6 บ่อ
2. ถังเหล็กเก็บน้ำความจุ 1000 ลูกบาศก์เมตร จำนวน 1 ถัง
3. หอถังความจุ 300 ลูกบาศก์เมตร สูง 30 เมตร 1 ถัง
4. โรงสูบน้ำพร้อมเครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่งขนาด 20 แรงม้า 1 ระบบ
5. ถังกรองสนิมเหล็กจำนวน 2 ถัง
6. จุดจ่ายน้ำถาวร 1 จุด
7. ท่อส่งน้ำขนาด 6 นิ้ว และ 8 นิ้ว ความยาวรวมไม่น้อยกว่า 10 กิโลเมตร



i.

รูปที่ 9-19 แสดงองค์ประกอบของโครงการส่งน้ำบาดาลระยะไกลของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล

บทที่ 10
การบริหารจัดการน้ำบาดาลและการอนุรักษ์น้ำบาดาล
(Groundwater Management and Groundwater Conservation)

10.1 แนวทางการบริหารโครงการที่ได้รับการส่งมอบจากกรมทรัพยากรน้ำบาดาล

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการพัฒนาน้ำบาดาลขึ้นมาใช้อย่างเป็นระบบ หน่วยงานที่รับผิดชอบโครงการจะจัดอบรมการใช้และบำรุงรักษาระบบ อุปกรณ์ทุกอย่างให้แก่ผู้แทนชุมชนหรือผู้แทนองค์กรส่วนท้องถิ่น พร้อมสอนการใช้งานและมอบคู่มือให้แล้ว ก็จะส่งมอบองค์ประกอบของระบบทั้งหมดให้แก่ชุมชนหรือองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น (อปท.) ซึ่งถือว่าหมดภาระรับผิดชอบต่อโครงการนั้น ณ ชุมชนแห่งนั้น ชุมชนหรือ อปท. ต้องจัดตั้งกลุ่มขึ้นมาเพื่อบริหารจัดการระบบทั้งหมด ซึ่งองค์ประกอบหลักของกลุ่มโดยทั่วไปได้แก่ประธานกลุ่มผู้ใช้น้ำ รองประธานกลุ่มผู้ใช้น้ำ เหรัญญิก กรรมการฝ่ายต่าง ๆ และกรรมการและเลขานุการ เป็นต้น โดยคณะกรรมการมีหน้าที่ดังนี้

1. กำหนดอัตราค่าใช้น้ำขึ้นมาเอง สามารถกำหนดได้เองโดยไม่ต้องอิงราคาค่าใช้น้ำของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล
2. จัดเก็บค่าใช้น้ำบาดาลและนำเงินรายได้เข้ากองทุนซึ่งกลุ่มเป็นผู้จัดตั้งขึ้น
3. ควบคุมการใช้น้ำให้มีประสิทธิภาพและประสิทธิผล โดยการสูบน้ำบาดาลไม่เกินวันละ 16 ชั่วโมงต่อบ่อ
4. บำรุงรักษาระบบกระจายน้ำ ระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ หรือบ่อน้ำบาดาล โดยใช้เงินที่จัดเก็บจากค่าใช้น้ำมาเป็นค่าใช้จ่าย
5. หากเป็นโครงการพัฒนาน้ำบาดาลเพื่อการเกษตร ให้หาวิธีการต่อยอดการใช้ประโยชน์น้ำบาดาลจากกลุ่มผู้ใช้น้ำมาเป็นกลุ่มผู้ผลิตจากผลิตผลทางการเกษตร
6. ในกรณีที่มีแหล่งน้ำผิวดินเพียงพอในฤดูฝน ให้พิจารณาใช้น้ำผิวดินร่วมด้วยเพื่อให้ชั้นน้ำบาดาลและบ่อน้ำบาดาลได้ฟื้นสภาพ (conjunctive uses) ซึ่งเป็นการบริหารจัดการการใช้ทรัพยากรน้ำแบบบูรณาการ (Integrated Water Ressources Management: IWRM)
7. รณรงค์และประชาสัมพันธ์ให้กลุ่มผู้ใช้น้ำ นักเรียน เด็ก และเยาวชนให้รู้จักคุณค่าของทรัพยากรน้ำบาดาล ใช้ทรัพยากรอย่างชาญฉลาด (wisely use) หากปฏิบัติได้ตามคำแนะนำข้างต้นแล้ว “การบริหารจัดการอย่างยั่งยืน (Sustainable Development)” ก็จะเกิดขึ้น

10.2 พระราชบัญญัติน้ำบาดาล (Groundwater Acts)

พระราชบัญญัติน้ำบาดาล พ.ศ. 2520 ถูกตราขึ้นเนื่องจากในปัจจุบันนี้ มีการเจาะน้ำบาดาลและการใช้น้ำบาดาลกันอย่างกว้างขวาง และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอีกในอนาคต แต่ยังไม่มีการควบคุมให้เป็นไปโดยถูกต้องตามหลักวิชาการ จนปรากฏว่าแหล่งน้ำบาดาลบางแห่งเกิดขาดแคลนหรือเสียหายซึ่งถ้าปล่อยให้มีสภาพเช่นนี้ต่อไป อาจเกิดความเสียหายต่อทรัพยากรของชาติ หรือทำให้สิ่งแวดล้อมเป็นพิษ หรือเป็นอันตรายแก่ทรัพย์สิน หรือสุขภาพของประชาชน สมควรมีมาตรการป้องกันอันเหมาะสม เพื่อประโยชน์แก่ประเทศชาติและประชาชน จึงจำเป็นต้องตราพระราชบัญญัตินี้ขึ้น

10.2.1 สาระสำคัญของพระราชบัญญัติน้ำบาดาล พ.ศ. 2520

มาตรา ๓ ตามพระราชบัญญัติ นี้

“น้ำบาดาล” หมายความว่า น้ำใต้ดินที่เกิดอยู่ในชั้นดิน กรวด ทราย หรือหิน ซึ่งอยู่ลึกจากผิวดินเกินความลึกที่รัฐมนตรีประกาศในราชกิจจานุเบกษา แต่จะกำหนดลึกน้อยกว่าสิบเมตรมิได้

“เจาะน้ำบาดาล” หมายความว่า กระทำแก่ชั้นดิน กรวด ทราย หรือหิน เพื่อให้ได้มาซึ่งน้ำบาดาล

หรือเพื่อระบายน้ำลงบ่อน้ำบาดาล

"บ่อน้ำบาดาล" หมายความว่า บ่อน้ำที่เกิดจากการเจาะน้ำบาดาล

"เขตน้ำบาดาล" หมายความว่า เขตท้องที่ที่รัฐมนตรีกำหนดให้เป็นเขตน้ำบาดาลโดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา

"กิจการน้ำบาดาล" หมายความว่า การเจาะน้ำบาดาล การใช้น้ำบาดาล หรือการระบายน้ำลงบ่อน้ำบาดาล

"ใช้น้ำบาดาล" หมายความว่า นำน้ำจากบ่อน้ำบาดาลขึ้นมาใช้

"ระบายน้ำลงบ่อน้ำบาดาล" หมายความว่า กระทำการใดๆ เพื่อถ่ายเทน้ำ หรือของเหลวอื่นใดลงบ่อ

"ผู้รับใบอนุญาต" หมายความว่า ผู้ได้รับอนุญาตตามพระราชบัญญัตินี้ ในกรณีที่นิติบุคคลเป็นผู้ได้รับใบอนุญาต ให้หมายถึงผู้ซึ่งนิติบุคคลแต่งตั้งให้ดำเนินกิจการด้วย

"ผู้ออกใบอนุญาต" หมายความว่า อธิบดีหรือผู้ซึ่งอธิบดีมอบหมาย

"คณะกรรมการ" หมายความว่า คณะกรรมการน้ำบาดาล

"พนักงานน้ำบาดาลประจำท้องที่" หมายความว่าผู้ซึ่งอธิบดีอธิบดีแต่งตั้งให้มีหน้าที่ตามพระราชบัญญิตินี้

"พนักงานเจ้าหน้าที่" หมายความว่า ผู้ซึ่งรัฐมนตรีแต่งตั้งให้ปฏิบัติตามพระราชบัญญัตินี้

"อธิบดี" หมายความว่า อธิบดีกรมทรัพยากรน้ำบาดาล

"รัฐมนตรี" หมายความว่า รัฐมนตรีผู้รักษาการตามพระราชบัญญัตินี้

10.2.2 มาตราอื่นๆ ของ พ.ร.บ. น้ำบาดาลซึ่งเป็นแผนแม่บทการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาล

มาตรา ๔ ตามพระราชบัญญัตินี้ไม่ใช้บังคับแก่กระทรวงทบวง กรม หรือองค์กรของรัฐที่มีหน้าที่เกี่ยวกับการจัดหาน้ำอุปโภคบริโภค หรือเพื่อเกษตรกรรมในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการเจาะน้ำบาดาลและการใช้น้ำบาดาล เว้นแต่ในเขตท้องที่ที่รัฐมนตรีโดยคำแนะนำของคณะกรรมการประกาศกำหนดให้เป็นเขตวิกฤติการณ์น้ำบาดาลที่ต้องปฏิบัติตามพระราชบัญญัตินี้

เขตวิกฤตการณ์น้ำบาดาล ต้องเป็นเขตที่ที่มีการสูบน้ำขึ้นมาใช้ในปริมาณที่มากกว่าปริมาณน้ำที่ไหลลงสู่ชั้นน้ำบาดาล จนอาจทำให้เกิดการทรุดตัวของแผ่นดิน หรือการแพร่กระจายของน้ำเค็มเข้าสู่ชั้นน้ำบาดาล หรือการลดตัวลงของระดับน้ำยในชั้นน้ำบาดาลหรือผลกระทบสำคัญอื่นต่อสิ่งแวดล้อม กระทรวง ทบวง กรม หรือองค์การของรัฐตามวรรคหนึ่ง ต้องปฏิบัติตามประกาศที่ออกตามมาตรา ๖ และปฏิบัติตามมาตรา ๒๓

มาตรา ๕ การกำหนดเขตท้องที่ใดให้เป็นเขตน้ำบาดาลตามพระราชบัญญิตินี้ ให้รัฐมนตรีโดยคำแนะนำของคณะกรรมการมีอำนาจกำหนดโดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา

ในกรณีที่การสูบน้ำบาดาลในเขตท้องที่ใดจะทำให้ชั้นน้ำบาดาลเสียหาย หรือเสื่อมสภาพ หรืออาจก่อให้เกิดความเสียหายแก่ทรัพยากรของชาติ หรือทำให้สิ่งแวดล้อมเป็นพิษ หรือเป็นอันตรายแก่ทรัพย์สินหรือสุขภาพของประชาชน หรือทำให้แผ่นดินทรุด ให้รัฐมนตรีโดยคำแนะนำของคณะกรรมการมีอำนาจกำหนดเขตท้องที่นั้นให้เป็น <u>เขตห้ามสูบน้ำบาดาล</u> โดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา

การเปลี่ยนแปลงเขตน้ำบาดาลหรือเขตห้ามสูบน้ำบาดาล หรือการยกเลิกเขตน้ำบาดาลหรือเขตห้ามสูบน้ำบาดาลที่ได้ประกาศกำหนดไว้ ให้ให้รัฐมนตรีโดยคำแนะนำของคณะกรรมการ ประกาศในราชกิจจานุเบกษา

มาตรา ๖ ให้รัฐมนตรีโดยคำแนะนำของคณะกรรมการมีอำนาจประกาศในราชกิจจานุเบกษา

กำหนดหลักเกณฑ์และมาตรการในทางวิชาการสำหรับการเจาะน้ำบาดาล การเลิกเจาะน้ำบาดาล การใช้น้ำบาดาลแบบอนุรักษ์ การระบายน้ำลงบ่อน้ำบาดาล การเลิกใช้บ่อน้ำบาดาล การป้องกันด้านสาธารณสุข และการป้องกันในเรื่องสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ

กำหนดวิธีการให้ความคุ้มครองแก่คนงาน และความปลอดภัยต่อบุคคลภายนอก

มาตรา ๗ ให้รัฐมนตรีโดยคำแนะนำของคณะกรรมการมี *อำนาจออกกฎกระทรวง* กำหนดอัตราค่าใช้น้ำบาดาลในแต่ละท้องที่ที่มีน้ำประปาใช้ ไม่เกินอัตราสูงสุดของค่าน้ำประปาในท้องที่นั้น ในกรณีที่ท้องที่ใดไม่มีน้ำประปาใช้ อัตราค่าใช้น้ำบาดาลในท้องที่นั้นต้องไม่เกินอัตราสูงสุดของค่าน้ำประปาในจังหวัดที่ท้องถิ่นนั้นตั้งอยู่ และให้ยกเว้นค่าใช้น้ำบาดาลแก่ผู้รับใบอนุญาตใช้น้ำบาดาลซึ่งใช้ในการอุปโภคบริโภค ทั้งนี้ไม่รวมถึงการใช้น้ำบาดาลของโรงงานอุตสาหกรรม

(๒) ประเภทการใช้น้ำบาดาล หลักเกณฑ์ วิธีการ และเงื่อนไขการเรียกเก็บ ลดหย่อน หรือยกเว้นค่าใช้น้ำบาดาล

(๒/๑) อัตราค่าอนุรักษ์น้ำบาดาลที่เรียกเก็บเพิ่มจากผู้รับใบอนุญาตใช้น้ำบาดาลในเขตวิกฤตการณ์น้ำบาดาล

(๒/๒) หลักเกณฑ์ วิธีการ และเงื่อนไขในการเรียกเก็บ ลดหย่อน หรือยกเว้นค่าอนุรักษ์น้ำบาดาลที่เรียกเก็บในเขตวิกฤตการณ์น้ำบาดาล

(๓) อัตราค่าวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำหรือของเหลว ค่าคัดสำเนาเอกสาร ค่ารับรองสำเนา และค่าตรวจสอบเอกสาร

(๔) หลักเกณฑ์ วิธีการ และเงื่อนไขการให้เอกชนจัดเก็บค่าใช้น้ำบาดาล และค่าอนุรักษ์น้ำบาดาล

สิทธิของเอกชนตามสัญญาว่าจ้างให้จดเก็บค่าใช้น้ำบาดาล ค่าอนุรักษ์น้ำบาดาล ตาม (๔) จะโอนหรือให้ผู้อื่นรับช่วงไม่ได้

มาตรา ๗ ทวิ เพื่อเป็นการส่งเสริมความรู้ความสามารถของช่างเจาะน้ำบาดาล ให้กรมทรัพยากรน้ำบาดาลจัดให้มีบริการฝึกอบรมและสัมมนาวิชาการเจาะน้ำบาดาลแก่ช่างเจาะน้ำบาดาลทั้งของภาครัฐและเอกชน ตลอดจนให้บริการปรึกษาและแนะนำทางวิชาการแก่ช่างเจาะน้ำบาดาลดังกล่าว

มาตรา ๗ ตรี ให้กรมทรัพยากรน้ำบาดาลจัดให้มีการจดทะเบียนช่างเจาะน้ำบาดาล ซึ่งมีพื้นความรู้ต่ำกว่าระดับประกาศณียบัตรวิชาชีพ ตามหลักเกณฑ์ วิธีการ และเงื่อนไขที่รัฐมนตรีประกาศในราชกิจจานุเบกษา และให้กรมทรัพยากรน้ำบาดาลจัดให้มีการฝึกอบรมและสัมมนาทางวิชาการเจาะน้ำบาดาลให้แก่ช่างเจาะน้ำบาดาลดังกล่าว

มาตรา ๗ จัตวา ให้จัดตั้งกองทุนพัฒนาน้ำบาดาลขึ้นในกรมทรัพยากรน้ำบาดาล เรียกโดยย่อว่า “กพน.” โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นทุนค่าใช้จ่ายในการศึกษา วิจัย พัฒนา และอนุรักษ์แหล่งน้ำบาดาลและสิ่งแวดล้อม

มาตรา ๗ เบญจ เงิน กพน. ให้ใช้จ่ายเพื่อกิจการดังต่อไปนี้

การศึกษา สำรวจ วิจัย และการวางแผนแม่บทเพื่อการพัฒนาและอนุรักษ์แหล่งน้ำบาดาลและสิ่งแวดล้อม

(๒) การช่วยเหลือและอุดหนุนกิจการใดๆ ที่เกี่ยวกับการทดแทนและอนุรักษ์แหล่งน้ำบาดาล

(๓) ค่าใช้จ่ายการบริหาร กพน. ตามที่ตกลงกับกระทรวงการคลัง

(๔) ค่าใช้จ่ายในการจ้างเอกชนจัดเก็บค่าใช้น้ำบาดาล และค่าอนุรักษ์น้ำบาดาล

การใช้จ่ายเงิน กพน. ตามวรรคหนึ่ง ให้เป็นไปตามแผนแม่บทที่จัดทำตามมาตรา ๗ สัตต

มาตรา ๗ สัตต ให้คณะกรรมการบริหาร กพน. มีอำนาจหน้าที่ดังต่อไปนี้

(๑) ควบคุมการใช้จ่ายเงินหรือทรัพย์สินของ กพน. เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ในมาตรา ๗ จัตวา วรรคหนึ่ง

(๒) เสนอแผนแม่บทเพื่อการพัฒนาและอนุรักษ์แหล่งน้ำบาดาลและสิ่งแวดล้อมเพื่อขอความเห็นชอบจากคณะกรรมการ

(๓) เสนอแนะรัฐมนตรีให้ออกประกาศตามมาตรา ๗ จัตวา

(๔) เสนอและรายงานต่อคณะกรรมการเกี่ยวกับการดำเนินงานของ กพน.

(๕) ฯลฯ

อย่างไรก็ตาม ได้มีกฎกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมประกาศเพิ่มเติมว่า **"น้ำบาดาล หมายความว่า น้ำใต้ดินที่เกิดอยู่ในชั้นดิน กรวด ทราย หรือหิน ซึ่งอยู่ลึกจากผิวดินเกิน 15 เมตร"**

10.2.3 เกณฑ์การเก็บค่าใช้น้ำ

ในเขตท้องที่กรุงเทพมหานคร จังหวัดนนทบุรี จังหวัดปทุมธานี จังหวัดพระนครศรีอยุธยา จังหวัดสมุทรปราการ จังหวัดสมุทรสาคร และจังหวัดนครปฐม คิดอัตราค่าใช้น้ำลูกบาศก์เมตรละ 8.50 บาท ในเขตท้องที่กรุงเทพมหานคร จังหวัดนนทบุรี จังหวัดปทุมธานี จังหวัดพระนครศรีอยุธยา จังหวัดสมุทรปราการ จังหวัดสมุทรสาคร และจังหวัดนครปฐม คิดอัตราค่าอนุรักษ์น้ำบาดาลลูกบาศก์เมตรละ 8.50 บาท พื้นที่นอกเหนือจากพื้นที่ดังกล่าวและมีน้ำประปาใช้ คิดอัตราค่าใช้น้ำลูกบาศก์เมตรละ 3.50 บาท พื้นที่นอกเหนือจากพื้นที่ดังกล่าวแต่ไม่มีน้ำประปาใช้ ได้รับยกเว้นค่าใช้น้ำบาดาลกดังต่อไปนี้

- การใช้น้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค ทั้งนี้ไม่รวมถึงการใช้น้ำของโรงงานอุตสาหกรรม
- การใช้น้ำบาดาลเพื่อการเพาะปลูก
- การใช้น้ำบาดาลในการเลี้ยงสัตว์ เฉพาะในส่วนที่ไม่เกินวันละห้าสิบลูกบาศก์เมตร

รูปที่ 10-1 แสดงอัตราการจัดเก็บค่าใช้น้ำในนอกเขตวิกฤตการณ์น้ำบาดาล รูปที่ 10-2 แสดงอัตราการจัดเก็บค่าใช้น้ำบาดาลในเขตวิกฤตการณ์น้ำบาดาล 7 จังหวัด และรูปที่ 10-3 แสดงอัตราการจัดเก็บค่าอนุรักษ์น้ำบาดาลในเขตวิกฤตการณ์น้ำบาดาล 7 จังหวัด

รูปที่ 10-1 แสดงรายละเอียดอัตราการจัดเก็บค่าใช้น้ำในนอกเขตวิกฤตการณ์น้ำบาดาล

รูปที่ 10-2 แสดงอัตราการจัดเก็บค่าใช้น้ำบาดาลในเขตวิกฤตการณ์น้ำบาดาล 7 จังหวัด

รูปที่ 10-3 แสดงรายละเอียดอัตราการจัดเก็บค่าอนุรักษ์น้ำบาดาลในเขตวิกฤตการณ์น้ำบาดาล 7 จังหวัด

10.3 สถานการณ์น้ำบาดาลในประเทศไทย

ประเทศไทยมีพื้นที่ 513,115 ตารางกิโลเมตร หรือประมาณ 321 ล้านไร่ แบ่งออกเป็น 6 ภูมิภาคคือ ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลาง ภาคตะวันตก ภาคตะวันออก และภาคใต้ มีทั้งสิ้น 27 แอ่งน้ำบาดาล (รูปที่ 10-4) โดยลักษณะภูมิประเทศที่เป็นพื้นที่เติมน้ำบาดาลและแหล่งเติมน้ำบาดาล (recharge area and recharge agents) ของแต่ละภูมิภาคที่สำคัญ อ้างอิงจาก วิชญ์ จอมวิญญาณ์, ภูมิศาสตร์ประเทศไทย, มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี, 2520 ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

ภาคเหนือ สามารถจำแนกลักษณะภูมิประเทศออกได้เป็น 2 ลักษณะคือที่เป็นเทือกเขาสูงและที่ราบระหว่างหุบเขาหรือที่ราบลุ่มแม่น้ำ พื้นที่ราบคิดเป็นประมาณ 1 ใน 4 ของพื้นที่ทั้งหมด เทือกเขาทั้งหมดวางตัวในแนวเหนือใต้ ได้แก่เทือกเขาถนนธงชัย เทือกเขาแดนลาว เทือกเขาผีปันน้ำ และเทือกเขาหลวงพระบาง มีแม่น้ำสายหลักได้แก่แม่น้ำปิง แม่น้ำวัง แม่น้ำยม แม่น้ำน่าน แม่น้ำอิง แม่น้ำลาว และแม่น้ำกก

ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีลักษณะภูมิประเทศเป็นที่ราบสูง (plateau) รู้จักกันในชื่อที่ราบสูงโคราช (Khorat Plateau) ครอบคลุมพื้นที่ถึง 1 ใน 3 ของประเทศไทย มีเทือกเขาสำคัญที่ได้แด่เทือกเขาภูพานที่วางตัวในแนวตะวันตก-ตะวันออก แบ่งที่ราบสูงโคราชออกเป็น 2 แอ่งได้แก่แอ่งอุดร-สกลนคร ทางฝั่งเหนือและแอ่งโคราช-อุบล ทางฝั่งใต้ มีแม่น้ำสำคัญได้แก่แม่น้ำโขง แม่น้ำชี แม่น้ำสงคราม แม่น้ำเลย และแม่น้ำมูล

ภาคกลาง ลักษณะภูมิประเทศร้อยละ 90 ของภาคกลางนั้นเป็นที่ราบลุ่มกว้างใหญ่ของแม่น้ำสายใหญ่หลายสาย มีเทือกเขาสูงที่สำคัญได้แก่เทือกเขาเพชรบูรณ์ที่เป็นที่กั้นพรมแดนระหว่างภาคกลางกับภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นอกจากนั้นยังมีเทือกเขาดงพญาเย็นซึ่งกั้นพรมแดนระหว่าภาคกลางกับภาคตะวันออก สำหรับแม่น้ำที่สำคัญที่เป็นแหล่งกำเนิดของชั้นหินให้น้ำหินร่วนในพื้นที่ภาคกลางได้แก่แม่น้ำเจ้าพระยา แม่น้ำป่าสัก แม่น้ำลพบุรี แม่น้ำน้อย และแม่น้ำท่าจีน

ภาคตะวันตก ภาคตะวันตกประกอบไปด้วย 5 จังหวัดได้แก่จังหวัดตาก กาญจนบุรี ราชบุรี เพชรบุรี และจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ลักษณะภูมิประเทศส่วนใหญ่เป็นเทือกเขาที่วางตัวในแนวเหนือ-ใต้ เทือกเขาที่สำคัญได้แก่เทือกเขาถนนธงชัยที่ทอดยาวมาจากภาคเหนือ และเทือกเขาตะนาวศรี ที่ทอดผ่านทางทิศตะวันตก

ของจังหวัดราชบุรี เพชรบุรี และประจวบคีรีขันธ์ แม่น้ำที่สำคัญได้แก่แม่น้ำแควใหญ่หรือแม่น้ำศรีสวัสดิ์ แม่น้ำแควน้อยหรือแม่น้ำไทรโยค แม่น้ำแม่กลอง แม่น้ำเพชรบุรี แม่น้ำปราณบุรี และแม่น้ำภาชี

ภาคตะวันออก ลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่ภาคตะวันออกจะแบ่งออกเป็นสองส่วนได้แก่ส่วนที่เป็นเทือกเขาสูง และพื้นที่ราบลุ่มน้ำ เทือกเขาที่สำคัญในภาคตะวันออกได้แก่เทือกเขาจันทบุรี ที่วางตัวอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ อยู่ในแนวรอยต่อระหว่างจังหวัดจันทบุรีและตราด และยังเป็นพรมแดนกั้นระหว่างประเทศไทยกับประเทศกัมพูชาอีกด้วย เทือกเขาบรรทัดที่วางตัวอยู่ในแนวเกือบเหนือ-ใต้ ที่วางตัวทางฝั่งตะวันออกของจังหวัดตราดและยังเป็นพรมแดนกั้นระหว่างประเทศไทยกับประเทศกัมพูชาอีกเช่นกัน อีกหนึ่งเทือกเขาที่สำคัญคือเทือกเขาสันกำแพง ซึ่งวางตัวอยู่ในแนวตะวันออก-ตะวันตก เป็นแนวกั้นระหว่างภาคตะวันออกและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ แม่น้ำที่สำคัญที่ทำให้เกิดพื้นที่ราบลุ่มน้ำในภาคตะวันออกได้แก่ แม่น้ำบางปะกง แม่น้ำประแสร์ แม่น้ำระยอง แม่น้ำจันทบุรี แม่น้ำเวฬุ และแม่น้ำเมืองตราด

ภาคใต้ ลักษณะภูมิประเทศในภาพรวมของภาคใต้คือคาบสมุทรที่ถูกขนาบด้วยทะเลอันดามันทางทิศตะวันตก และอ่าวไทยทางทิศตะวันออก เทือกเขาสำคัญได้แก่เทือกเขาภูเก็ตที่พาดตัวเป็นแนวเหนือ-ใต้ เริ่มตั้งแต่ทางทิศตะวันตกของจังหวัดชุมพร จังหวัดระนอง จังหวัดสุราษฎร์ธานี จังหวัดพังงา และมาสิ้นสุดที่จังหวัดภูเก็ต เทือกเขานครศรีธรรมราชที่ทอดตัวในแนวเหนือ-ใต้ อยู่ใจกลางคาบสมุทร ผ่านจังหวัดนครศรีธรรมราช จังหวัดพัทลุง และจังหวัดสงขลา เทือกเขาสันกาลาคีรีที่ทอดตัวทางด้านทิศใต้ของจังหวัดยะลาและจังหวัดนราธิวาส และเป็นเทือกเขาที่กั้นพรมแดนระหว่างประเทศไทยและประเทศมาเลเซีย สำหรับแม่น้ำที่สำคัญที่ก่อให้เกิดที่ราบลุ่มน้ำในภาคใต้ประกอบด้วยแม่น้ำตาปี แม่น้ำคีรีรัฐ แม่น้ำหลังสวน แม่น้ำกระบุรี แม่น้ำตรัง แม่น้ำสายบุรี แม่น้ำอู่ตะเภา แม่น้ำปัตตานี และแม่น้ำโก-ลก

จากลักษณะภูมิประเทศดังกล่าวข้างต้นประกอบกับข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา แผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน แผนที่ชนิดดิน ลักษณะทางธรณีวิทยา และอุทกธรณีวิทยาของแต่ละภูมิภาค กรมทรัพยากรน้ำบาดาลได้คำนวณปริมาณกักเก็บน้ำบาดาลแยกเป็นภูมิภาคได้ดังนี้

ภาคเหนือ มีปริมาณน้ำบาดาลกักเก็บอยู่ใต้ดิน 166,860 ล้าน ลบ.ม. คิดเป็น 14.7 % ของปริมาณกักเก็บทั่วประเทศ

ภาคตะวันออกฉียงเหนือ มีปริมาณน้ำบาดาลกักเก็บอยู่ใต้ดิน 241,312 ล้าน ลบ.ม. คิดเป็น 21.2 % ของปริมาณกักเก็บทั่วประเทศ

ภาคกลาง มีปริมาณน้ำบาดาลกักเก็บอยู่ใต้ดิน 412,856 ล้าน ลบ.ม. คิดเป็น 36.3 % ของปริมาณกักเก็บทั่วประเทศ

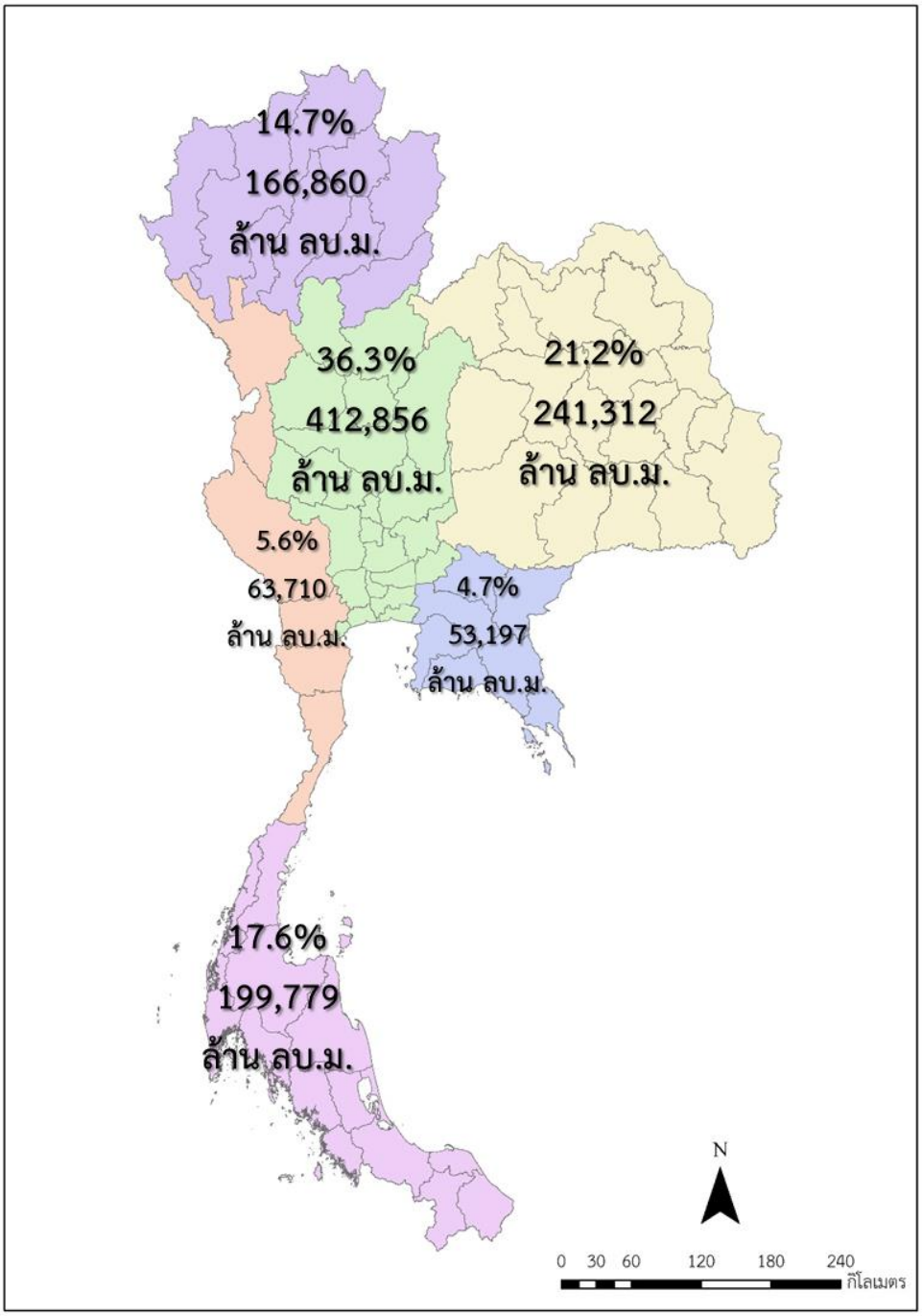
ภาคตะวันตก มีปริมาณน้ำบาดาลกักเก็บอยู่ใต้ดิน 63,710 ล้าน ลบ.ม. คิดเป็น 5.6 % ของปริมาณกักเก็บทั่วประเทศ

ภาคตะวันออก มีปริมาณน้ำบาดาลกักเก็บอยู่ใต้ดิน 53,197 ล้าน ลบ.ม. คิดเป็น 4.7 % ของปริมาณกักเก็บทั่วประเทศ

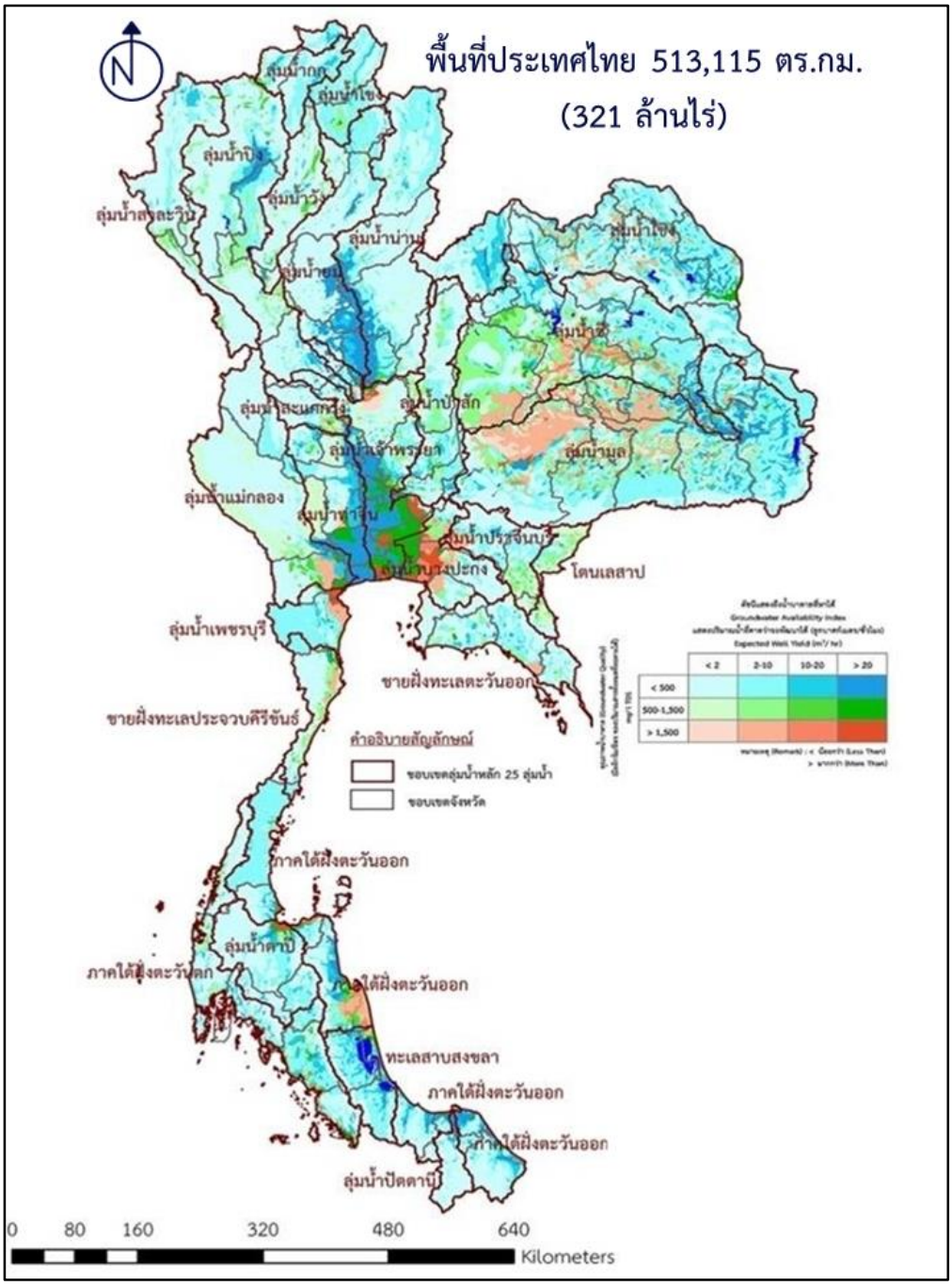
ภาคใต้ มีปริมาณน้ำบาดาลกักเก็บอยู่ใต้ดิน 199,779 ล้าน ลบ.ม. คิดเป็น 17.6 % ของปริมาณกักเก็บทั่วประเทศ

ผลรวมของปริมาณการกักเก็บน้ำบาดาลของประเทศไทยคือ 1.137 ล้านล้าน ลบ.ม. ปริมาณน้ำเพิ่มเติมรายปี (คำนวณจากปริมาณน้ำฝนและขนาดของพื้นที่รับน้ำ) 72,987 ล้าน ลบ.ม. ปริมาณน้ำที่สามารถพัฒนาได้หรือปริมาณการใช้น้ำที่ปลอดภัย (safe yield) ซึ่งคำนวณจากประมาณร้อยละ 60 ของปริมาณการเติมน้ำรายปี เท่ากับ 45,386 ล้าน ลบ.ม./ปี แต่ปริมาณการใช้น้ำในปัจจุบันในพื้นที่ทั่วประเทศมีเพียง 14,741 ล้าน ลบ.ม./ปี ตัวเลขต่าง ๆ ข้างต้น แสดงให้เห็นว่ายังมีปริมาณน้ำบาดาลที่กักเก็บอยู่ใต้ดินมากพอที่จะ

พัฒนาขึ้นมาใช้ประโยชน์ได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทรัพยากรน้ำบาดาล (groundwater resources environment) รูปที่ 10-4 แสดงปริมาตรกักเก็บของน้ำบาดาลแยกเป็นรายภูมิภาคของประเทศไทย รูปที่ 10-5 แสดงแผนที่น้ำบาดาลซึ่งรวบรวมและดัดแปลงมาจากแผนที่น้ำบาดาลมาตราส่วน 1:100;000 ของประเทศไทย และรูปที่ 10-6 แสดงปริมาณน้ำบาดาลของประเทศไทย ปริมาณการเติมน้ำบาดาลรายปี ปริมาณการใช้น้ำที่ปลอดภัยรายปี ปริมาณการใช้น้ำบาดาลรายปี และการจำแนกปริมาณการใช้ประโยชน์จากน้ำบาดาลของประเทศไทย



รูปที่ 10-4 แสดงปริมาตรกักเก็บของน้ำบาดาลแยกเป็นรายภูมิภาคของประเทศไทย



รูปที่ 10-5 แสดงแผนที่น้ำบาดาลซึ่งรวบรวมและดัดแปลงมาจากแผนที่น้ำบาดาล มาตราส่วน 1:100;000 ของประเทศไทย

ปริมาณน้ำบาดาลที่กักเก็บ 1.137 ล้านล้าน ลบ.ม.

ปริมาณน้ำที่เพิ่มเติม 72,987 ล้าน ลบ.ม. /ปี

ปริมาณน้ำบาดาลที่สามารถพัฒนาได้ 45,386 ล้าน ลบ.ม./ปี

ปริมาณการใช้น้ำในปัจจุบัน 14,741 ล้าน ลบ.ม./ปี

แบ่งเป็น - อุปโภคบริโภค 1,223 ล้าน ลบ.ม.
- เกษตรกรรม 12,741 ล้าน ลบ.ม.
- อุตสาหกรรม 777 ล้าน ลบ.ม.

86.43 % **8.30 %** **5.27 %**

รูปที่ 10-6 แสดงปริมาณน้ำบาดาลของประเทศไทย ปริมาณการเติมน้ำบาดาลรายปี ปริมาณการใช้น้ำที่ปลอดภัยรายปี ปริมาณการใช้น้ำบาดาลรายปี และการจำแนกปริมาณการใช้ประโยชน์จากน้ำบาดาลของประเทศไทย

10.4 ผลกระทบที่เกิดจากการใช้น้ำบาดาลเกินสมดุล (impacts of groundwater over-exploitation)

10.4.1 การเหือดแห้งของชั้นหินให้น้ำ (groundwater mining) - โดยทั่วไปแล้วทรัพยากรน้ำบาดาลจะมีการเติมทดแทนตามธรรมชาติอยู่ทุกปี หากมีการสูบน้ำบาดาลไม่เกินปริมาณที่มีการเติมทดแทนรายปี จะไม่เกิดผลกระทบต่อระดับน้ำบาดาลในชั้นหินให้น้ำนั้น ๆ แต่เมื่อใดที่มีการเจาะบ่อน้ำบาดาลแบบกระจุกตัว และมีการสูบขึ้นมาใช้พร้อมกันเป็นระยะเวลานาน ๆ ระดับน้ำบาดาลอาจลดลงได้ และหากใช้มากเกินกว่าความสามารถไหลเติมทดแทนรายปีเป็นระยะเวลานานต่อเนื่องกัน ชั้นหินให้น้ำนั้นอาจแห้งไปได้ เราเรียกว่า การเหือดแห้งของชั้นหินให้น้ำ (groundwater mining) หรือ overdraft หรือ “สูบมากจนเหือดแห้ง”

10.4.2 แผ่นดินทรุด (land subsidence) – จริง ๆ แล้วการเกิดแผ่นดินทรุดนั้นเกิดได้หลายปัจจัย แต่ในที่นี้ผู้เขียนจะขอกล่าวถึงแผ่นดินทรุดที่เกิดจากการสูบน้ำบาดาลมากเกินปริมาณที่สามารถไหลเติมได้ตามธรรมชาติ สำหรับน้ำบาดาลในชั้นหินที่เป็นหินร่วนนั้น น้ำจะถูกกักเก็บอยู่ในช่องว่างระหว่างตะกอน หากชั้นหินให้น้ำยังมีความอิ่มตัว ย่อมจะมีแรงพยุงในตัวเอง แต่เมื่อมีการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้จะเปลี่ยนให้ช่องว่างมีน้ำแทรกอยู่เหล่านั้นที่ กลับกลายเป็นช่องว่างที่เต็มไปด้วยอากาศ ทำให้แรงพยุงตัวในชั้นหินให้น้ำลดลงอย่างต่อเนื่อง ในที่สุดด้วยปัจจัยของน้ำหนักที่กดทับจากผิวดินด้านบน (load of overburden) ประกอบกับการสั่นสะเทือน (vibration) ต่าง ๆ เช่นการตอกเสาเข็ม การสั่นสะเทือนจากการวิ่งของยานพาหนะด้านบน จะทำให้ชั้นหินให้น้ำนั้นถูกบีบอัดตัว (compaction) ให้แคบและบางลง จึงทำให้ผิวดินด้านบนทรุดตัวลงได้

10.4.3 การรุกล้ำของน้ำเค็ม (saltwater intrusion) – สำหรับชั้นน้ำบาดาลจืดที่อยู่ติดกับชายฝั่งทะเล ตามธรรมชาติแล้ว จะมีช่วงรอยต่อระหว่างชั้นน้ำบาดาลจืดกับน้ำทะเล (fresh groundwater-saline groundwater interface) อยู่เสมอ โดย Ghyben และ Herzberg ได้ศึกษาร่วมกันแล้วพบความสัมพันธ์ที่เรียกว่า Ghyben-Herzberg Relation หรือ Ghyben-Herzberg Principle ที่มีสาระสำคัญกล่าวไว้ว่า ความลึกของรอยต่อระหว่างน้ำบาดาลจืดกับน้ำบาดาลเค็ม (Z) จะอยู่ที่ 40 เท่าของระดับน้ำบาดาลจืดเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง (h) เขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Z = h^{*}\rho_f / \rho_s - \rho_f$$

เมื่อ z คือความลึกของรอยต่อระหว่างน้ำบาดาลจืดกับน้ำบาดาลเค็ม

ρ_f คือความหนาแน่นของน้ำจืด มีค่าเท่ากับ 1.000 กรัม/ลบ.ซม.

ρ_s คือความหนาแน่นของน้ำทะเล มีค่าเท่ากับ 1.025 กรัม/ลบ.ซม.

h คือความสูงของระดับน้ำบาดาลจืดเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง

เขียนได้ใหม่เป็น

$$Z = h^{*}1.000/ 1.025-1.000$$

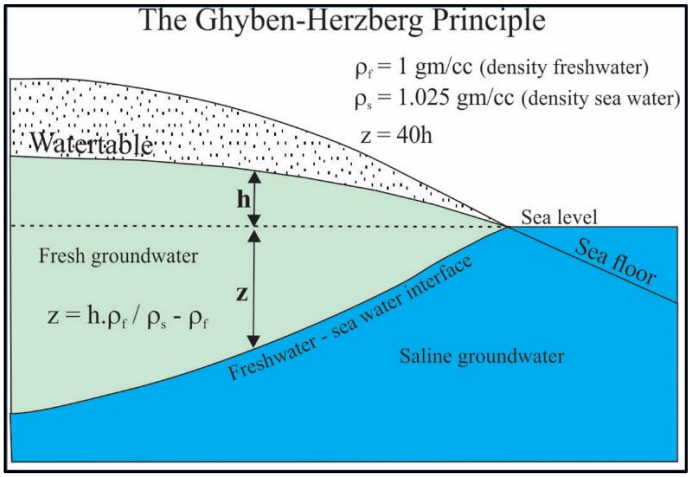
$$\Downarrow$$

$$Z = h^{*}1.000/ 0.025$$

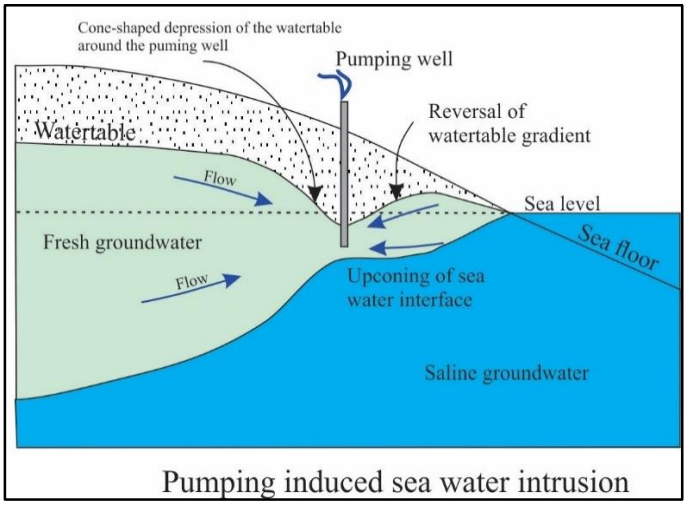
$$\Downarrow$$

$$Z = 40h$$

ในกรณีที่สูบน้ำจากบ่อน้ำบาดาลริมชายฝั่งมาใช้ จะทำให้ระดับน้ำบาดาลจืดลดลง (ค่า h น้อยลง) จะทำให้รอยต่อระหว่างชั้นน้ำบาดาลจืดและชั้นน้ำบาดาลเค็มขยับขึ้นมาตื้นขึ้น ทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการรุกล้ำของของน้ำเค็ม (saltwater intrusion) และ ณ ตำแหน่งของบ่อสูบจะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการรุกล้ำของน้ำเค็มในแนวดิ่ง (saltwater upconing) รูปที่ 10-7 แสดงลักษณะรอยต่อระหว่างน้ำบาดาลจืดกับน้ำบาดาลเค็มในสภาวะสมดุลตามธรรมชาติหรือในสภาวะที่ไม่มีการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ และรูปที่ 10-8 แสดงแสดงลักษณะรอยต่อระหว่างน้ำบาดาลจืดกับน้ำบาดาลเค็มในสภาวะที่สูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ ทำให้เกิดการรุกล้ำของน้ำเค็มและการรุกล้ำของน้ำเค็มในแนวดิ่ง



รูปที่ 10-7 แสดงลักษณะรอยต่อระหว่างน้ำบาดาลจืดกับน้ำบาดาลเค็มในสภาวะสมดุลตามธรรมชาติหรือในสภาวะที่ไม่มีการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้

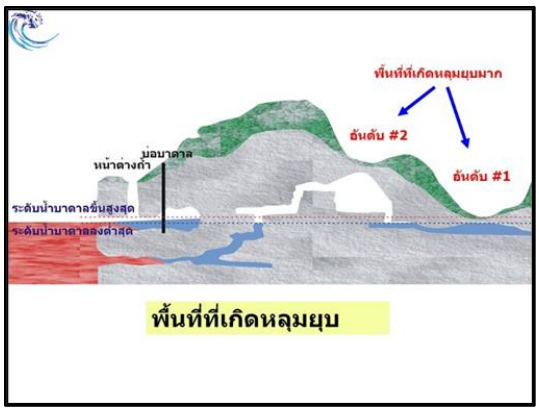


รูปที่ 10-8 แสดงแสดงลักษณะรอยต่อระหว่างน้ำบาดาลจืดกับน้ำบาดาลเค็มในสภาวะที่สูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ ทำให้เกิดการรุกล้ำของน้ำเค็มและการรุกล้ำของน้ำเค็มในแนวดิ่ง

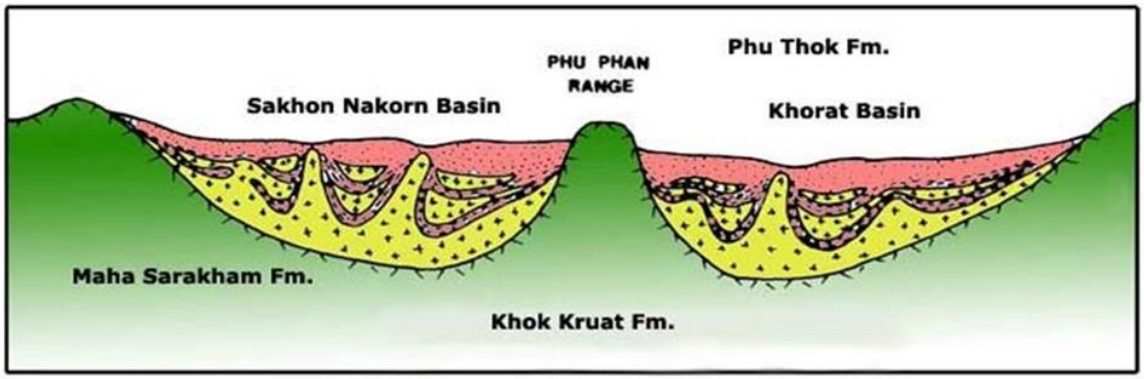
10.4.4 การเกิดหลุมยุบ (collapse sinkhole/salt depression sinkhole)

การเกิดหลุมยุบโดยแท้จริงแล้วเกิดได้ด้วยหลายเหตุปัจจัย แต่ที่เกิดจากการใช้หรือระบบการไหลของน้ำบาดาล (groundwater flow system) นั้น สามารถจำแนกได้ 2 ปรากฏการณ์ ดังนี้

1) หลุมยุบที่เกิดจากการละลายของโพรงหินปูนใต้ดิน – เกิดขึ้นโดยกระบวนการละลายของหินปูนที่รองรับอยู่ใต้ดินซึ่งตัวทำละลายได้แก่น้ำฝนที่ซึมลงสู่ใต้ดิน ซึ่งโดยธรรมชาติแล้ว น้ำฝนเมื่อตกถึงพื้นดินแล้ว จะมีสภาพเป็นกรดคาร์บอนิกอ่อน อันเกิดจากการที่น้ำ (H_2O) ละลายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในอากาศกลายสภาพเป็นกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) ซึ่งมีฤทธิ์เป็นกรดอ่อนๆ เมื่อซึมลงไปถึงชั้นหินปูน ($CaCO_3$) ที่รองรับอยู่ใต้ดิน น้ำฝนก็จะทำปฏิกิริยากับหินปูนโดยการละลาย (dissolution) เมื่อผ่านระยะเวลาเป็นหมื่นเป็นแสนปี หินปูนที่รองรับอยู่ก็จะกลายเป็นโพรงถ้ำใต้ดิน หากการละลายยังเป็นแบบต่อเนื่องจนทำให้เพดานถ้ำค่อยๆ บางลง เรื่อยๆ เมื่อถึงเวลาหนึ่งน้ำหนักของดินที่อิ่มน้ำที่กดทับอยู่ด้านบน จะกดให้เพดานโพรงถ้ำใต้ดินถล่มลงมาหลายเป็นหลุมยุบ (collapse sinkhole) รูปที่ 10-9 แสดงลักษณะการละลายและหลุมยุบที่เกิดขึ้น
2) หลุมยุบที่เกิดจากการละลายของโดมเกลือ (salt depression sinkhole) – เกิดขึ้นเมื่อน้ำบาดาลไหลผ่านพื้นที่ที่รองรับด้วยชั้นเกลือหิน หรือโดมของเกลือหินที่ถูกแรงทาง tectonic ดันตัวให้ตัดผ่านหินที่อายุอ่อนกว่าขึ้นมาใกล้ผิวโลก และต่อมาจะถูกน้ำบาดาลที่ไหลผ่านละลายยอดโดมเกลือไปเรื่อยๆ จนเกิดช่องว่างใต้ผิวดิน ต่อมาดินที่ปิดทับอยู่ด้านบนก็จะถล่มลงมา กลายเป็นหลุมยุบที่เรียกว่า salt depression sinkhole หนองน้ำขนาดใหญ่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทยเช่น หนองหาร จ.สกลนคร บึงสีฐาน บึงแก่นนคร บึงหนองโคตร อ.เมือง จ. ขอนแก่น จะเกิดด้วยสาเหตุนี้ทั้งหมด รูปที่ 10-10 แสดงลักษณะของโดมเกลือที่เกิดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ



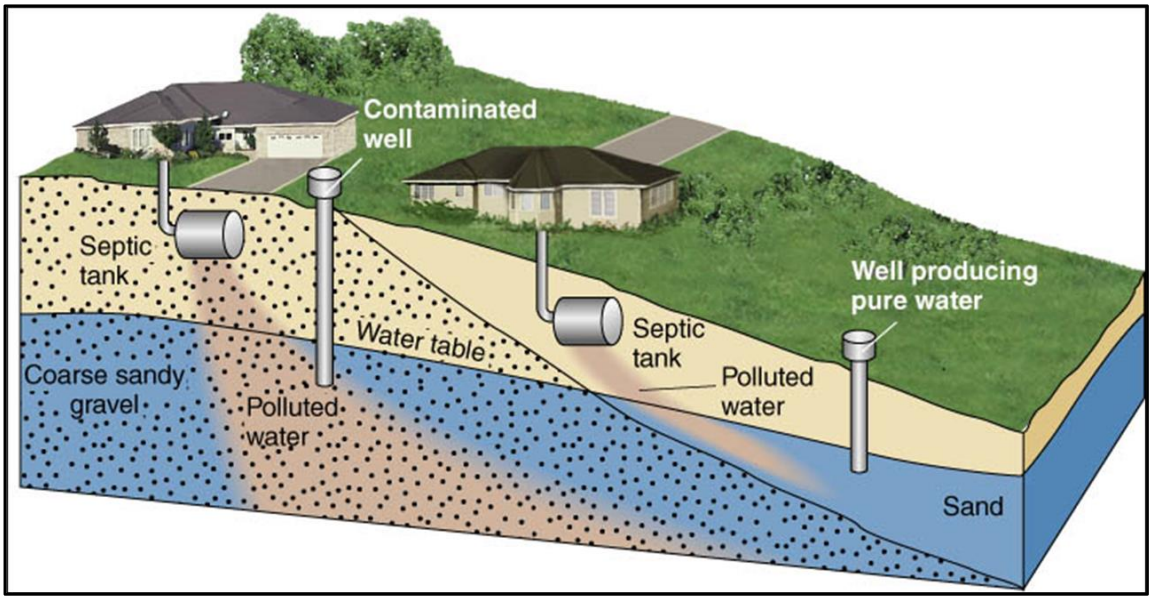
รูปที่ 10-9 แสดงลักษณะการละลายจนเกิดโพรงถ้ำใต้ดิน (ภาพซ้าย-ภาพจากเฟสบุ๊ก Chaiporn Siripornpibul) และหลุมยุบที่เกิดขึ้นในพื้นที่ที่รองรับด้วยหินปูนพื้นที่ อ.เนินมะปราง จ. พิษณุโลก (ภาพขวา-ภาพจากเฟสบุ๊กเพจ กรมทรัพยากรธรณี)



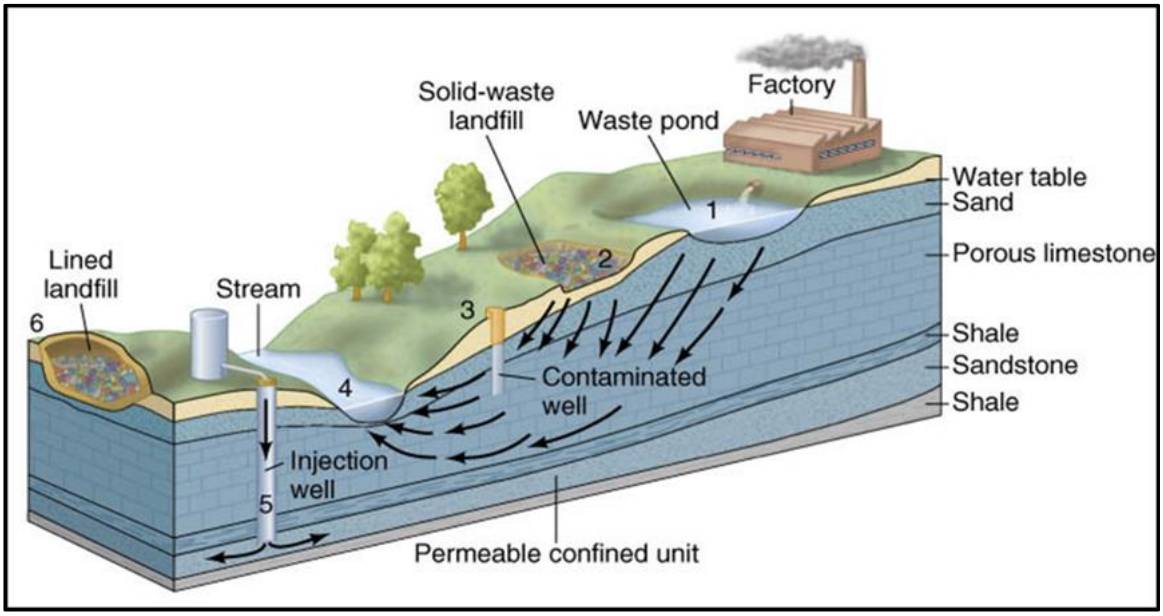
รูปที่ 10-10 แสดงลักษณะการตัดผ่านชั้นหินด้านบนของโดมเกลือ (สีเหลือง) ขึ้นมาใกล้ผิวดินและต่อมาถูกละลายโดยน้ำบาดาลไหลผ่าน ทำให้เกิดช่องว่างใต้ผิวดินและเกิดหลุมยุบแบบ salt Depression sinkhole ในที่สุด (ที่มา: ปกรณ์ สุวานิช, โพแทช-เกลือหิน ธรณีประวัติ การวิวัฒนาการโครงสร้างของหินชุดมหาสารคาม, กรมทรัพยากรธรณี, 2535)

10.5 การปนเปื้อนในน้ำบาดาล (Groundwater Contamination)

การปนเปื้อนในน้ำบาดาล ส่วนใหญ่แล้วจะเกิดจากการกระทำของมนุษย์ไม่ว่าจะเป็นการรั่วซึมจากบ่อพักน้ำเสีย (septic tank/cesspool) ของบ้านเรือนที่อยู่อาศัย การรั่วซึมจากหลุมฝังกลบขยะ (leachate from landfill) บ่อทิ้งกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม (waste pond) ยาฆ่าแมลง (pesticide) จากฟาร์มต่างๆ การรั่วซึมจากถังกักเก็บน้ำมันใต้ดินในสถานีบริการน้ำมัน (leaking of underground storage tank) การชะละลายของเกลือจากถนน (road salt) ที่ใช้ในการละลายหิมะ เป็นต้น สารปนเปื้อนในน้ำบาดาล (contaminants in groundwater) แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือสารปนเปื้อนที่มาจากแหล่งเดียว (point source) ยกตัวอย่างเช่นบ่อทิ้งกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม (industrial waste pond) การรั่วซึมของถังน้ำมันใต้ดิน การรั่วซึมจากหลุมฝังกลบขยะ (leachate from landfill) เป็นต้น และสารปนเปื้อนที่กระจายทั่วพื้นที่ (nonpoint source) ยกตัวอย่างเช่นยาฆ่าแมลงตามฟาร์มต่างๆ หรือฝนกรด (acid rain) ที่แผ่กระจายตัวเป็นบริเวณกว้าง รูปที่ 10-11 และรูปที่ 10-12 แสดงตัวอย่างของแหล่งปนเปื้อนที่มีผลต่อคุณภาพน้ำบาดาลที่เป็นทั้ง point source และ nonpoint source และเป็นอันตรายต่อชีวิตของผู้ใช้น้ำ การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำบาดาล (mass transport) มีหลายแบบ ยกตัวอย่างเช่นการไหลของสารละลาย (solute) ไปกับการไหลของน้ำบาดาล (advection) การเคลื่อนที่แบบกระจายและผสมไปในน้ำ บาดาล (hydrodynamic mixing and dispersion) และการแพร่กระจาย (diffusion) จากพื้นที่ที่มีความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่มากกว่าไปสู่พื้นที่ที่มีการปนเปื้อนในน้ำบาดาลน้อยกว่า เป็นต้น



รูปที่ 10-11 แสดงตัวอย่างของแหล่งปนเปื้อนที่มีผลต่อคุณภาพน้ำบาดาล



รูปที่ 10-12 แสดงตัวอย่างของแหล่งปนเปื้อนที่มีผลต่อคุณภาพน้ำบาดาล

10.6 การฟื้นฟูทรัพยากรน้ำบาดาล (Groundwater Remediation)

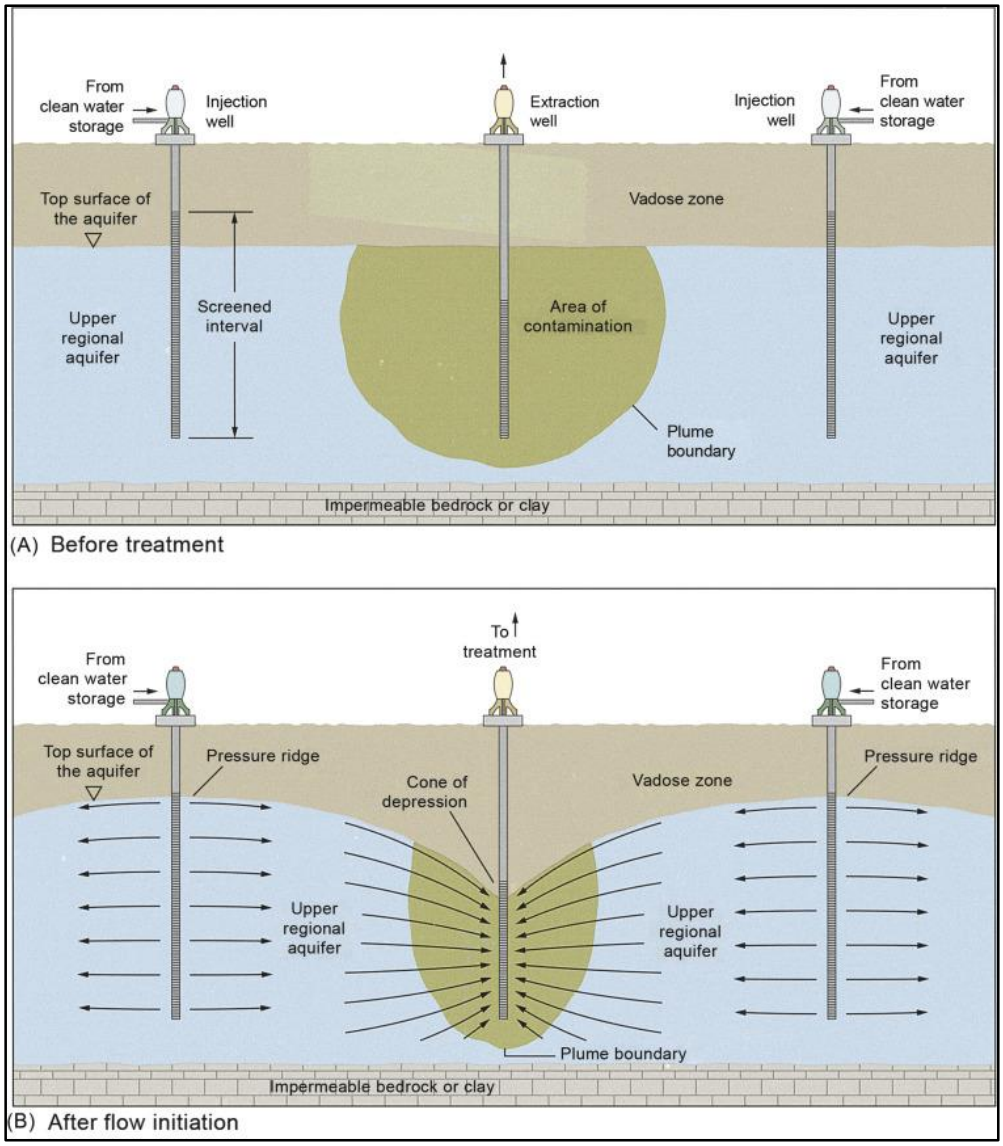
เมื่อน้ำบาดาลเกิดการปนเปื้อนแล้ว จะส่งผลกระทบต่อผู้ใช้น้ำในวงกว้างและถ้าหากว่าเราไม่ทำอะไรเลยสารปนเปื้อนก็จะยังคงอยู่ในระบบการไหลของน้ำบาดาล และแพร่กระจายออกไปเป็นวงกว้างโดยเฉพาะพื้นที่ที่อยู่ปลายทิศทางการไหลของน้ำบาดาลซึ่งจะทำให้คุณภาพน้ำบาดาลแย่ลง (deterioration) ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องหรือมีส่วนได้ส่วนเสีย (stakeholders) ต้องหาวิธีการจัดการสารปนเปื้อนโดยวิธีการใดวิธีการหนึ่ง แต่ก่อนที่จะเลือกใช้วิธีบำบัดเราจะต้องวิเคราะห์หาลักษณะทางอุทกธรณีวิทยาและปัจจัยที่เกี่ยวข้อง (site characterization) เสียก่อนเพื่อจะได้เลือกวิธีการที่เหมาะสม วิธีการฟื้นฟูทรัพยากรน้ำบาดาลอย่างเป็นรูปแบบที่เป็นที่นิยม (conventional methods) มีดังนี้

10.6.1 วิธีการสูบออกและบำบัด (Pump-and-Treat) - วิธีการสูบและบำบัดเป็นวิธีที่ใช้กันบ่อยมากในการควบคุมไม่ให้สารปนเปื้อนเคลื่อนที่ออกจากแหล่งปนเปื้อน วิธีการก็คือสูบน้ำบาดาลที่ถูกปนเปื้อนขึ้นมาสู่ผิวดิน แล้วทำการบำบัดจนคุณภาพกลับมาดีเหมือนเดิม แล้วก็ปล่อยให้ทิ้งไปหรืออาจอัดกลับสู่ชั้นหินให้น้ำ (re-injection) ก็ได้ ข้อดีของวิธีการสูบออกและบำบัด ได้แก่สามารถกำจัดสารปนเปื้อนได้อย่างรวดเร็วและหมดจด ใช้เวลาน้อย และใช้งบประมาณไม่มาก รูปที่ 10-13 แสดงรูปแบบการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำบาดาลแบบสูบและบำบัด (pump-and-treat) ที่แสดงให้เห็นว่านอกจากการสูบสารปนเปื้อนออกแล้ว ยังมีการอัดฉีดน้ำสะอาดลงบ่อน้ำบาดาลที่อยู่ข้างๆ มวลของสารปนเปื้อน (contaminant plume) เพื่อดันมวลของสารปนเปื้อนให้เข้าไปใกล้บ่อสูบมากขึ้นและเร็วขึ้นอีกด้วย

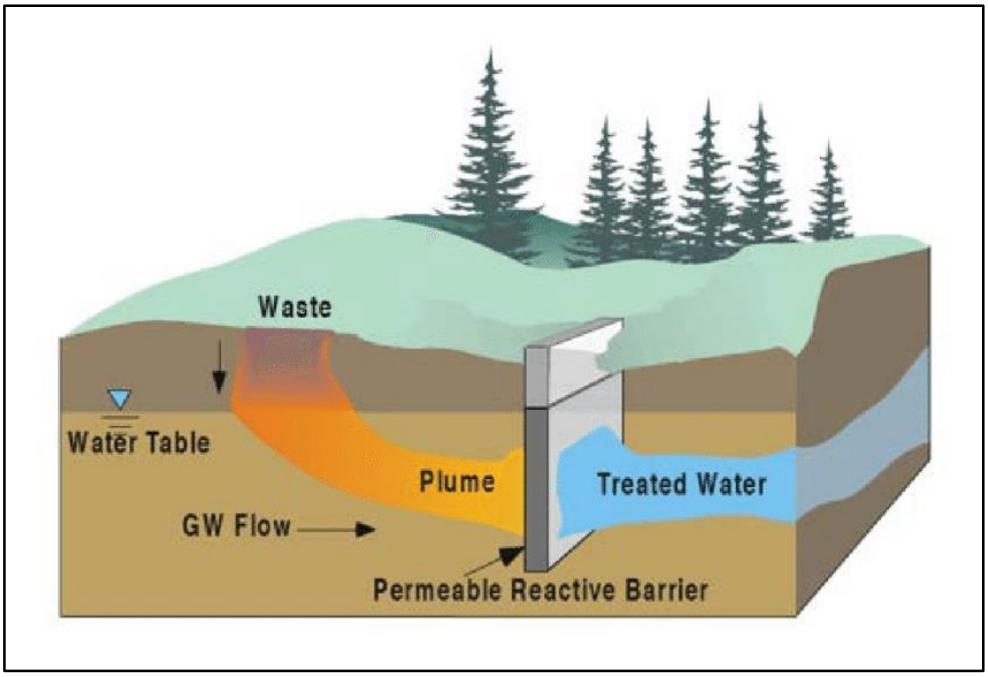
1.6.2 วิธีให้สารปนเปื้อนไหลผ่านและทำปฏิกิริยากับแนวกั้นที่ยอมให้ของเหลวซึมผ่าน (Permeable Reactive Barrier: PRB) – วิธีการ PRB นี้ จะใช้วธีการออกแบบก่อสร้างแนวกำแพง (barrier) กั้น สารปนเปื้อนขวางทิศทางการไหลของน้ำบาดาลที่พาสารปนเปื้อนมาโดยกระบวนการ convection แนวกำแพงนี้จะมีคุณสมบัติยอมให้ของเหลวไหลผ่านได้ (permeable) และออกแบบให้ประกอบด้วยสารเคมีบางชนิดที่มีคุณสมบัติทำปฏิกิริยาทางเคมี (chemical reaction) เพื่อทำให้สารปนเปื้อนเจือจางลงหรือหมดไปเมื่อไหลผ่านพ้นแนวกำแพงนั้น รูปที่ 10-14 แสดงหลักการของการออกแบบการบำบัดสารปนเปื้อนโดยวิธี Permeable Reactive Barrier และรูปที่ 10-15 แสดงการใช้สารเฉพาะในแนวกำแพงที่สามารถทำปฏิกิริยาการสารปนเปื้อนที่มีคุณสมบัติทางเคมีเฉพาะตัว

10.6.3 การเติมอากาศอยู่กับที่ (in-situ air sparging) – วิธีเติมอากาศอยู่กับที่จะใช้ในกรณีที่สาร

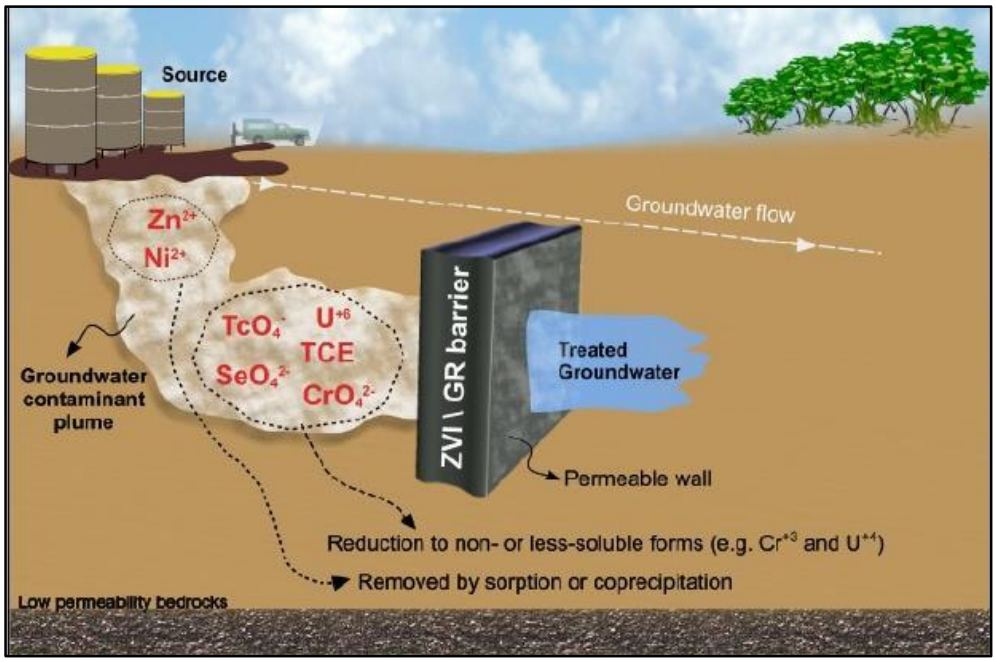
ปนเปื้อนเป็นประเภทสารอินทรีย์ระเหย (volatile organic compounds: VOCs) เช่นสารปนเปื้อนจากการรั่วซึมของถังกักเก็บเชื้อเพลิงใต้ดิน โดยการเจาะบ่อเติมอากาศให้ทะลุลงไปใต้ชั้นที่ถูกปนเปื้อน 1-2 บ่อ แล้วแต่ความเหมาะสม และขุดบ่อเพื่อสูบอากาศขึ้นให้ความลึกอยู่เหนือชั้นที่ถูกปนเปื้อน เราจะปล่อยอากาศจากเครื่องอัดอากาศ (air compressor) แรงดันสูง อากาศที่อัดลงไปจะทำให้สารอินทรีย์ระเหยที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำบาดาลแปรสภาพเป็นไอ (vapor) และจะมีบ่ออีกบ่อหนึ่งสูบไอออกจากบ่อและถูกส่งไปกำจัดสารปนเปื้อนต่อไป รูปที่ 10-16 และรูปที่ 10-17 แสดงองค์ประกอบทั่วไปและลักษณะการทำงานของวิธี in-situ air sparging บางครั้งการบำบัดแบบนี้ก็ถูกเรียกว่า soil vapor extraction: SVE เช่นกัน



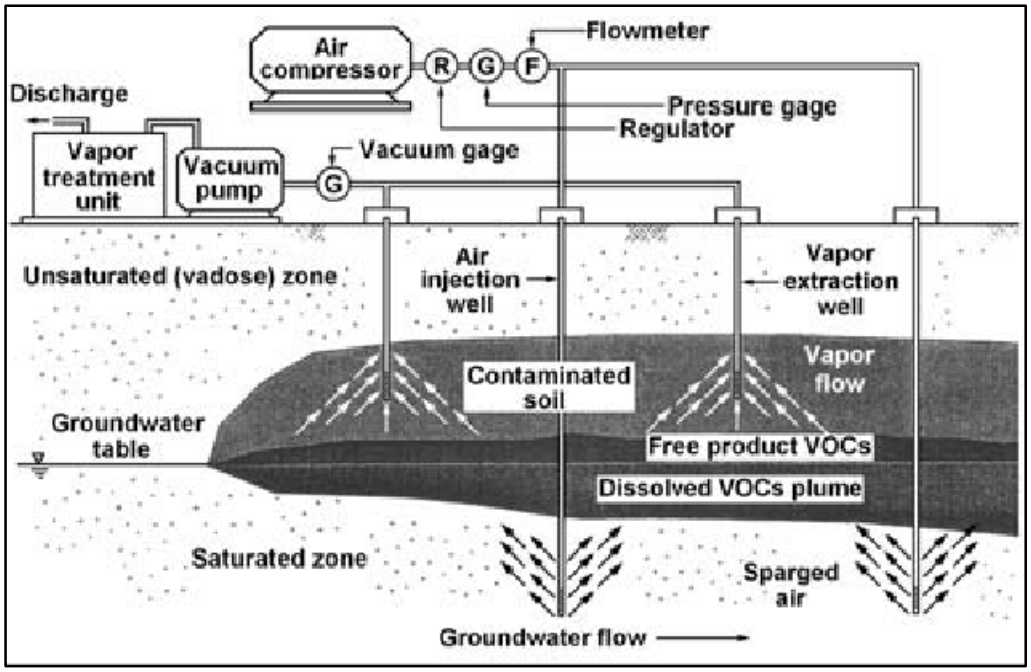
รูปที่ 10-13 แสดงรูปแบบการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำบาดาลแบบสูบและบำบัด (pump-and-treat) ภาพบนแสดงองค์ประกอบก่อนสูบ ภาพล่างแสดงองค์ประกอบขณะสูบสารปนเปื้อนออกจากน้ำบาดาล ขณะเดียวกันก็มีการอักน้ำเพื่อดันมวลของสารปนเปื้อนให้เข้าใกล้บ่อสูบด้วย



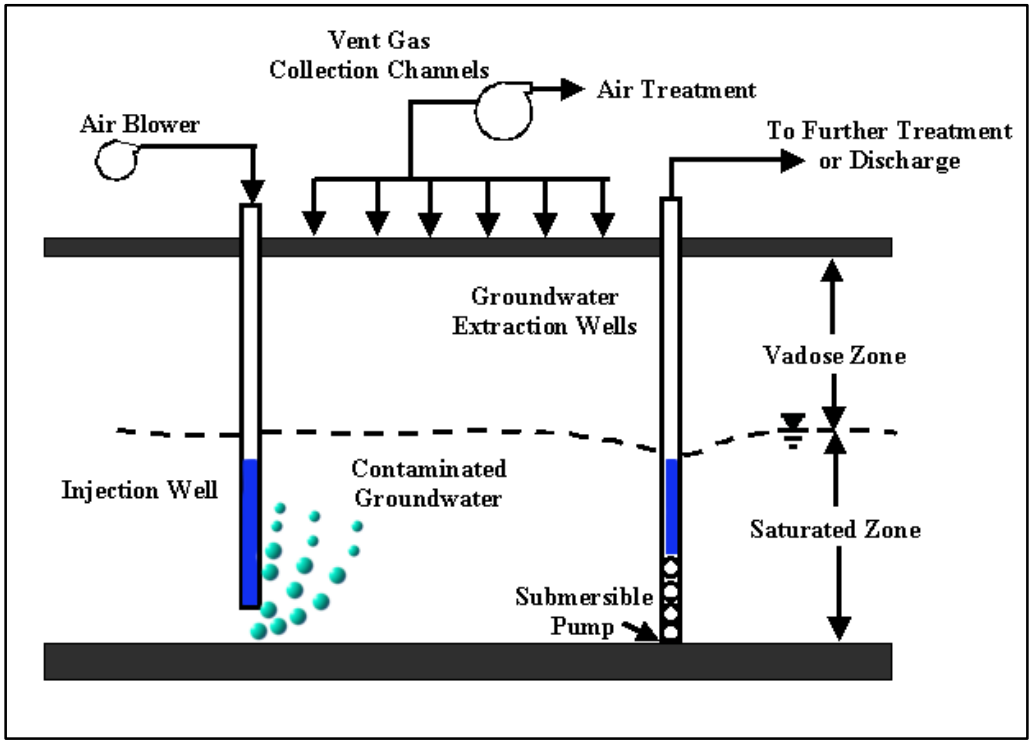
รูปที่ 10-14 แสดงรูปแบบวิธีให้สารปนเปื้อนไหลผ่านและทำปฏิกิริยากับแนวกั้นที่ยอมให้ของเหลวซึมผ่าน (Permeable Reactive Barrier: PRB)



รูปที่ 10-15 แสดงรูปแบบวิธีให้สารปนเปื้อนไหลผ่านและทำปฏิกิริยากับแนวกั้นที่ยอมให้ของเหลวซึมผ่านและตัวกำแพงถูกออกแบบให้ใช้สารเคมีเฉพาะเพื่อบำบัดสารปนเปื้อนเฉพาะตัว

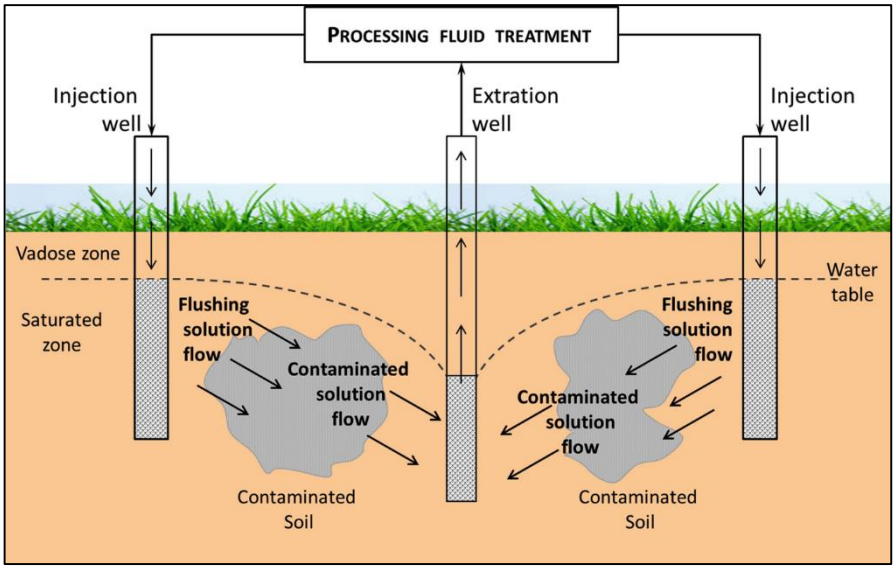


รูปที่ 10-16 แสดงรูปแบบการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำบาดาลแบบ in-situ air sparging



รูปที่ 10-17 แสดงรูปแบบการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำบาดาลแบบ in-situ air sparging แบบง่าย

10.6.4 การชะล้างอยู่กับที่โดยใช้ (in-situ flushing) – วิธีนี้เหมาะสมกับสารปนเปื้อนในน้ำบาดาลที่ใช้สารละลาย (reactive agent) ที่เหมาะสมกับสารปนเปื้อนนั้นๆ ลงไปในบ่อและสารละลายนั้นจะไหลไปกับน้ำบาดาลไปในทิศทางการไหลของน้ำบาดาลจนไปถึงพื้นที่ที่ถูกปนเปื้อนที่ถูกสารปนเปื้อนแตกตัวและละลายอยู่ในน้ำบาดาล สารละลายนี้จะชะ (flush) สารปนเปื้อนออกจากเม็ดตะกอนของชั้นหินอุ้มน้ำ หรือแม้แต่ออกจากน้ำบาดาลเอง แล้วสารละลายก็จะถูกสูบกลับขึ้นไปโดยบ่อสูบที่ตั้งอยู่ท้านทิศทางการไหลของน้ำบาดาล น้ำบาดาลที่ถูกปนเปื้อนที่ถูกสูบออกมาจะถูกนำไปบำบัดโดยวิธีเฉพาะที่เหมาะสมกับชนิดของสารปนเปื้อนนั้นๆ จนคุณภาพน้ำดีพอแล้วจะถูกอัดกลับลงไปสู่ชั้นน้ำบาดาลเช่นเดิมผ่านบ่ออัดน้ำ (injection well) รูปที่ 10-18 แสดงรูปแบบวิธีการกำจัดสารปนเปื้อนแบบ in-situ flushing



รูปที่ 10-18 แสดงรูปแบบวิธีการกำจัดสารปนเปื้อนแบบ in-situ flushing

10.7 การอนุรักษ์น้ำบาดาล (groundwater conservation)

ถึงแม้ว่าทรัพยากรน้ำบาดาลจะมีอยู่ในปริมาณมาก เมื่อเทียบกับแหล่งน้ำผิวดินที่อยู่ในบริเวณเดียวกัน และยังเป็นทรัพยากรที่มนุษย์ทุกคนสามารถเข้าถึงและนำมาใช้ได้ (common resource) แต่หากใช้โดยไม่ระมัดระวัง แหล่งน้ำบาดาลก็อาจจะเสียหายและไม่สามารถใช้ได้อีกต่อไปได้เช่นกัน ดังนั้นการอนุรักษ์น้ำบาดาลจึงมีความสำคัญมาก และมีหลายวิธีการ แต่ผู้เขียนจะขอสรุปเป็นประเด็นหลักๆ ไว้ดังต่อไปนี้

10.7.1 ไม่ใช้น้ำบาดาลเกินสมดุล (no overdraft of groundwater resources)

โดยธรรมชาติแล้วชั้นหินให้น้ำบาดาลจะมีการไหลเติมอยู่ตลอดปี ถึงแม้จะไม่ใช่ฤดูฝนก็ยังคงมีการเต็มน้ำบาดาล ทั้งนี้เนื่องจากกว่าที่น้ำฝนจะไหลซึมลงไปจนถึงชั้นหินให้น้ำนั้น จะใช้ระยะเวลาค่อนข้างนาน แหล่งน้ำบาดาลบางแห่งมีพื้นที่รับน้ำ (recharge area) อยู่ไกลหลายสิบหลายร้อยกิโลเมตร แต่หากเราใช้น้ำบาดาลมากกว่าปริมาณที่น้ำบาดาลไหลเติม (overdraft) ระดับน้ำบาดาลก็จะลดลงเรื่อยๆ บ่อน้ำบาดาลตื้นก็จะค่อยๆ แห้งไป และในที่สุดบ่อน้ำบาดาลระดับลึกก็จะแห้งไปด้วยเรียกปรากฏการณ์แบบนี้ว่า mining the aquifer หรือการทำให้ชั้นหินให้น้ำแห้งไป ดังนั้น เพื่อป้องกันการเหือดแห้งของชั้นหินให้น้ำ ผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย (stakeholder) จะต้องมีการศึกษาสมดุลของแหล่งน้ำบาดาลนั้นๆ ต้องรู้ตัวเลยให้ได้ว่าแอ่งน้ำบาดาล นั้นๆ มีปริมาณน้ำที่เติมเข้าสู่ระบบเป็นรายปีเป็นตัวเลขเท่าใด แล้วกำหนดปริมาณการใช้น้ำที่ปลอดภัย (safe yield)

ของแอ่งน้ำบาดาลใดๆ โดยทั่วไปจะกำหนดเป็นตัวเลยไม่เกินร้อยละ 60-70 ของปริมาณน้ำที่เติมรายปี เป็นปริมาณการใช้น้ำที่ปลอดภัยของแอ่งน้ำบาดาลใดๆ เมื่อกำหนดตัวเลขได้แล้ว ก็ต้องออกระเบียบหรือกฎหมายน้ำบาดาล (Groundwater Acts) มาบังคับใช้เพื่อไม่ให้มีการสูบน้ำรวม ๆ กันแล้วเกินตัวเลขของ safe yield

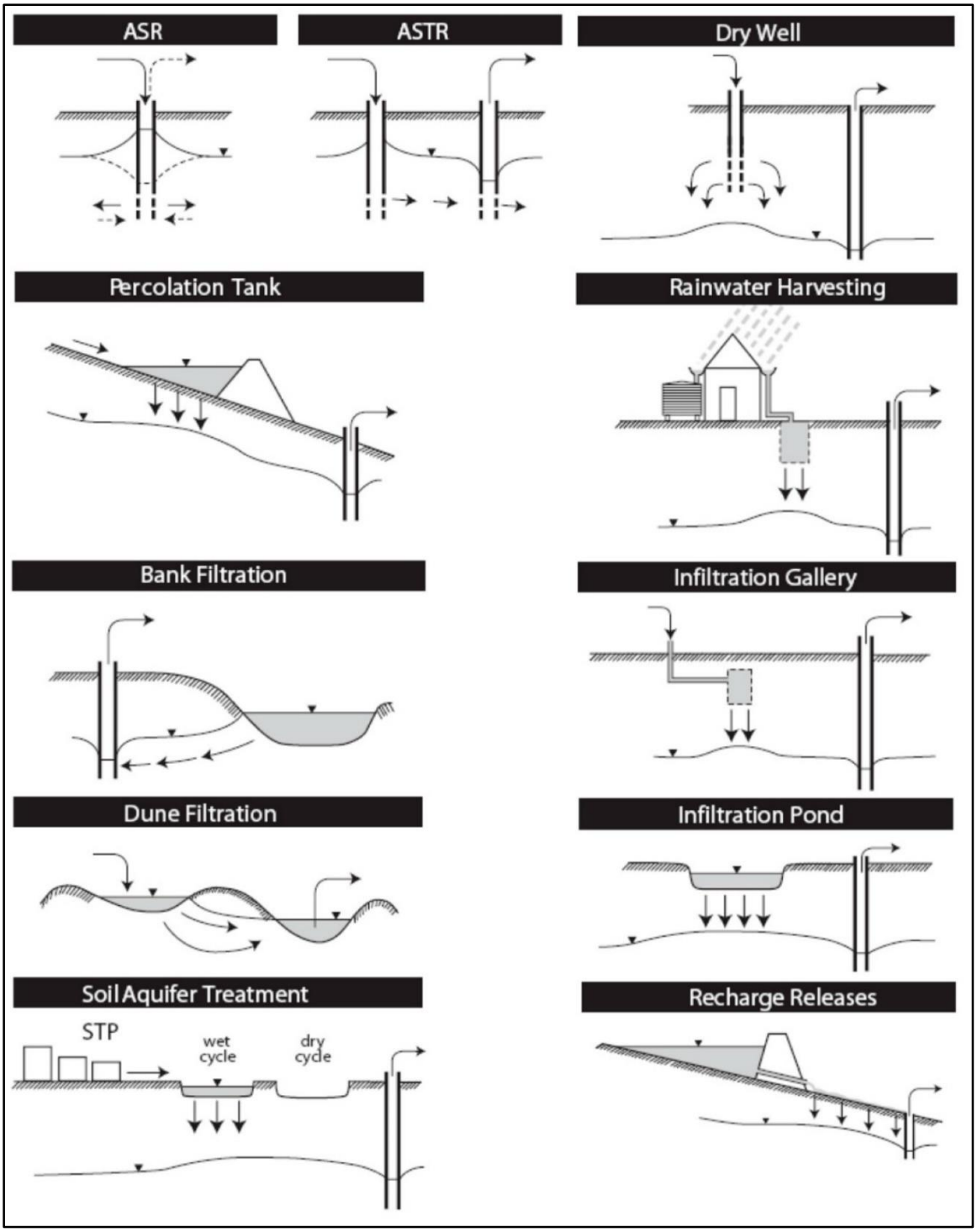
10.7.2 ไม่ทำให้เกิดการปนเปื้อนในน้ำบาดาล (avoid contaminating groundwater resources)

ดังที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่แล้วเกี่ยวกับการปนเปื้อนในน้ำบาดาลว่าการปนเปื้อนส่วนใหญ่จะเกิดจากการกระทำของมนุษย์เกือบทั้งสิ้น ดังนั้นมนุษย์ต้องหลีกเลี่ยงที่จะทำให้แหล่งน้ำบาดาลถูกปนเปื้อนโดยใช้มาตรการป้องกันที่เหมาะสม เช่นไม่ให้มีการรั่วซึมของกากของเสียอุตสาหกรรม (industrial waste pond) หลุมกลบทิ้งขยะชุมชน (community landfill) ถังทิ้งน้ำเสียของบ้าน (household septic tank) ถังน้ำมันกักเก็บน้ำมันใต้ดินของสถานีบริการน้ำมัน เป็นต้น ทั้งนี้การก่อสร้างสิ่งต่างๆ ที่กล่าวถึง ต้องคำนึงถึงผลเสียที่อาจเกิดขึ้นกับสิ่งแวดล้อมน้ำบาดาล (groundwater environment) เป็นอันดับต้น ๆ อย่าประหยัดงบประมาณในการก่อสร้างสิ่งสำคัญเหล่านี่

10.7.3 การจัดการด้านเติมน้ำน้ำบาดาล (Managed Aquifer Recharge: MAR)

เมื่อสูบน้ำบาดาลมาใช้ในฤดูแล้งหรือฝนทิ้งช่วง ก็ควรหาวิธีการเติมน้ำที่อาจมีมากเกินพอในฤดูฝนลงไปคืนชั้นน้ำบาดาลด้วยเช่นกัน ทั้งนี้เพื่อเป็นการทดแทนน้ำที่สูบออกมาใช้ หาไม่แล้วหรือน้ำที่ไหลล้นผิวดินเหล่านั้นก็จะไหลลงสู่แม่น้ำ ลำคลอง ซึ่งในที่สุดแล้วก็จะไหลลงสู่ทะเล มหาสมุทร ซึ่งเป็นสิ่งที่น่าเสียดาย การเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลมีหลากหลายวิธีมากและมีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในหลายประเทศทั่วโลก ดังต่อไปนี้ รูปที่ 10-19 แสดงวิธีการต่างๆ ในการจัดการด้านการเติมน้ำบาดาล (Manage Aquifer Recharge: MAR) (ที่มา: Dillon, 2005)

- ASR/ASTR หมายถึง aquifer storage and recovery/aquifer storage, transport and recovery คือการเติมน้ำลงชั้นน้ำบาดาลขนาดลึกแล้วสูบขึ้นมาใช้เมื่อจำเป็น
- Dry well คือการเติมน้ำผ่านบ่อแห้ง
- Percolation tank คือการเติมน้ำผ่านฝายเติมน้ำ
- Rainwater harvesting คือการเติมน้ำโดยการเก็บเกี่ยวน้ำฝนจากหลังคาแล้วเติมลงบ่อระดับตื้น
- Bank filtration คือการเติมน้ำผ่านตะกอนริมตลิ่งแม่น้ำ
- Filtration gallery คือการเติมน้ำผ่านโถงเติมน้ำใต้ดิน
- Dune filtration คือการเติมน้ำผ่านสันทรายริมตลิ่ง
- Infiltration pond คือการเติมน้ำผ่านสระเติมน้ำ
- Soil aquifer treatment คือการเติมน้ำและการบำบัดผ่านชั้นดินและชั้นหินให้น้ำ
- Recharge release คือการเติมน้ำโดยการระบายจากแหล่งกักเก็บ



รูปที่ 10-19 แสดงวิธีการต่างๆ ในการจัดการด้านการเติมน้ำบาดาล (Manage Aquifer Recharge: MAR) (ที่มา: Dillon, 2005)

10.7.4 ควบคุมการรุกล้ำของน้ำเค็ม (Control of saltwater Intrusion)

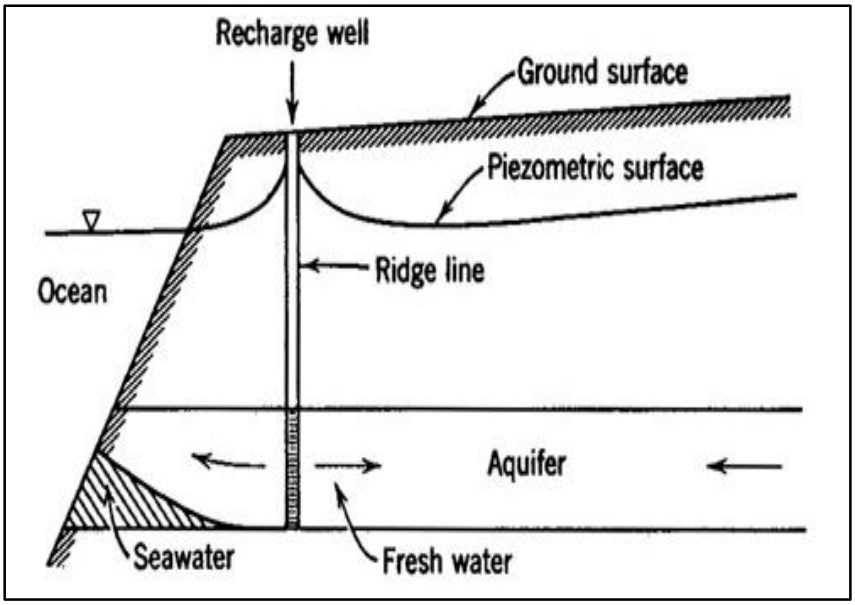
ดังที่กล่าวมาแล้วว่าการรุกล้ำของน้ำเค็มที่มีผลกระทบต่อทรัพยากรน้ำบาดาลโดยเฉพาะพื้นที่ที่มีชั้นหินให้น้ำแบบทรายชายหาดที่มีความหนาไม่มาก หากเราสูบน้ำบาดาลมากเกินไปจนระดับน้ำบาดาลจืดลดลงมาก โอกาสที่น้ำเค็มจะเข้ามาสู่ชั้นน้ำบาดาลจืดจะมีสูงมาก ดังนั้นจึงควรมีมาตรการ (measures) เพื่อควบคุมการรุกล้ำของน้ำเค็ม วิ่งก็มีหลายมาตรการ ดังต่อไปนี้

1) การปรับเปลี่ยนรูปแบบการสูบน้ำ – โดยการวางตำแหน่งของบ่อน้ำบาดาลให้ใกล้แผ่นดินมากขึ้น เนื่องจาก ณ ตำแหน่งที่ใกล้แผ่นดินมากกว่า ระดับน้ำบาดาลจืดจะอยู่สูงกว่าระดับน้ำทะเลปานกลางมาก ดังนั้นรอยต่อระหว่างน้ำจืดกับลิ่มน้ำเค็มจะอยู่ลึกกว่าพื้นที่ที่ไกลแผ่นดินออกไป และจะสูบน้ำมาดาลจืดได้มากขึ้น

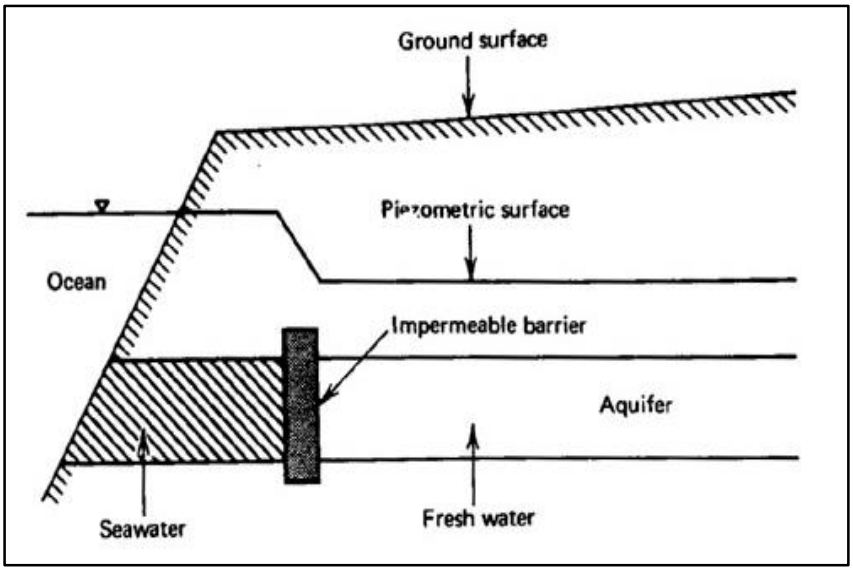
2) การอัดเพิ่มเติมน้ำเป็นแนว (recharge by Injection barrier) – โดยการขุดเจาะบ่อเติมน้ำ (injection well) เป็นแนวขนานกับชายฝั่งทะเลแล้วอัดน้ำจืดลงไป การกระทำเช่นนี้จะทำให้ระดับน้ำบาดาลจืดอยู่สูงขึ้น รอยต่อระหว่างน้ำจืดกับลิ่มน้ำเค็มจะอยู่ลึกลงไปมาก สามารถสูบน้ำจืดขึ้นมาใช้ได้ ซึ่งอาจเป็นน้ำจืดจากชั้นน้ำบาดาลเดิมหรือเป็นน้ำจืดที่อัดเติมลงไป รูปที่ 10-20 แสดงรูปแบบของการเติมน้ำแบบ injection barrier

3) ทำแนวสูบน้ำ (extraction barrier) – จะคล้ายๆ กับแนวบ่ออัดน้ำ แต่วิธีนี้จะสูบน้ำจากบ่อที่อยู่เป็นแนวนี้แทน การกระทำเช่นนี้จะทำให้ลิ่มน้ำเค็มถูกควบคุมโดยการสูบน้ำเป็นแนวและจะไม่รูกล้ำเข้าไปในแผ่นดินไปปนเปื้อนแหล่งน้ำจืดได้ สำหรับน้ำกร่อยที่สูบขึ้นมา อาจสูบทิ้งไปในทะเลหรือหากมีความจำเป็นต้องใช้น้ำ อาจต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการทำน้ำกร่อยให้เป็นน้ำจืดโดยวิธีที่เรียกว่า desalination

4) การสร้างกำแพงใต้ดินกั้นน้ำเค็ม (underground dam หรือ subsurface barrier) วิธีการนี้สร้างเพื่อป้องกันการรุกล้ำของน้ำทะเล วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างอาจเป็นแอสฟัลท์ หรือเบนโทไนท์ผสม หรือซีเมนต์ก็ได้ รูปที่ 10-21 แสดงลักษณะกำแพงใต้ดินกันน้ำเค็ม



รูปที่ 10-20 แสดงรูปแบบของการเติมน้ำแบบ Injection Barrier (ที่มา Todd, 1980 ใน "น้ำบาดาล" โดยทวีศักดิ์ ระมิงค์วงศ์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2546)



รูปที่ 10-21 แสดงลักษณะกำแพงใต้ดินกันน้ำเค็ม (ที่มา Todd, 1980 ใน "น้ำบาดาล" โดยทวีศักดิ์ ระมิงค์วงศ์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2546)

10.7.5 ซ่อมระบบท่อประปา (fixed plumbing)

ให้ตรวจสอบจุดรั่วซึม (leaks) ของท่อน้ำในบ้าน ในห้องน้ำ ในสวน และก๊อกน้ำอยู่เสมอ หากพบว่ามีการรั่วซึมต้องรีบซ่อมหรือเปลี่ยนอุปกรณ์ การปล่อยให้รั่วซึมโดยไม่ดำเนินการใด ๆ เลย จะทำให้เราสูญเสียน้ำไปโดยเปล่าประโยชน์และมักจะมากกว่าที่เราคิด

10.7.6 ใช้น้ำอย่างชาญฉลาด (use water wisely)

ยกตัวอย่างเช่นปิดก๊อกน้ำทันทีที่ไม่มีความจำเป็นต้องใช้ เช่นในขณะที่แปรงฟัน เราสามารถช่วยลดการใช้น้ำได้ หรือโดยการเปลี่ยนอุปนิสัยส่วนตัวก็ได้เช่นกัน เช่นใช้เวลาอาบน้ำให้สั้นลงกว่าที่เคยทำเป็นประจำ หรือเวลาล้างจานชามด้วยเครื่อง ก็ให้ล้างในปริมาณหรือจำนวนจานชามสูงสุดที่เครื่องสามารถล้างได้ อย่าล้างจานชามเพียง 3-4 ใบด้วยเครื่องล้างจาน หรือแม้แต่เปลี่ยนโถชักโครกที่ใช้น้ำน้อยลง ที่กล่าวมาจัดเป็นการใช้น้ำอย่างชาญฉลาดทั้งสิ้น

10.7.7 จัดการของเสียที่เป็นสารเคมีอย่างเหมาะสม (manage chemical waste)

สารเคมีมีอยู่ทั่วไปในบ้านแม้กระทั่งในสบู่หรือแชมพู ในน้ำยาล้างห้องน้ำหรือน้ำยาถูพื้นจะมีสารเคมีที่เป็นอันตราย (harmful chemicals) ซึ่งในที่สุดก็จะถูกชะล้างลงไปอยู่ในถังเกรอะ (septic tank) ใต้พื้นบ้าน และจะซึมลงดินแล้วจะไปปนเปื้อนในน้ำบาดาล กรณีเช่นเดียวกันนี้จะเกิดขึ้นคล้ายกับการปล่อยของเสียของโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้นควรจะใช้สารเคมีในบ้านเท่าที่จำเป็น

10.7.8 จัดการของเสียในครัวเรือนอย่างเหมาะสม (manage household waste)

โดยการแยกขยะแห้ง ขยะเปียก และขยะอันตราย ซึ่งขยะแห้งอาจนำกลับมาใช้ใหม่ (recycle) ได้ ส่วนขยะเปียกอาจนำมาผลิตเป็นปุ๋ยสำหรับต้นไม้ได้เช่นกัน สำหรับขยะอันตรายหรือเคมีนั้น ไม่ควรทิ้งบนพื้นดินซึ่งอาจถูกน้ำฝนชะละลายแล้วซึมลงไปปนเป้อนกับน้ำบาดาลได้ ควรแยกทิ้งตามที่ที่เทศบาลจัดให้

10.7.9 นำกลับมาใช้อีกหากเป็นไปได้ (reuse whenever possible)

การไม่ทิ้งของใช้เก่า ๆ เช่นเสื้อผ้า พลาสติก เครื่องแก้ว ถุงกระดาษ หรือเฟอร์นิเจอร์เก่าที่ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ง่ายโดยกระบวนการทางชีววิทยา (biodegradable) จะช่วลลดโอกาสการปนเปื้อนในน้ำบาดาลได้ และการนำกลับมาใช้ใหม่โดยเปลี่ยนแปลงรูปแบบหรือวัตถุประสงค์ของการใช้จะช่วยลดขยะได้เช่นกันและจะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดผลกระทบต่อดินและน้ำบาดาล

10.7.10 หลีกเลี่ยงหรือลดการใช้ยาฆ่าแมลง (avoid or reduse pesticides usuage)

เราย่อมรู้กันดีว่าในยาฆ่าแมลงมีสารเคมีอันตรายอยู่หลายชนิด และมันไม่ดีแน่ ๆ ถ้ามันไปปนเปื้อนในน้ำบาดาล และโชคไม่ดีนักที่เกษตรกรมักจะใช้ยาฆ่าแมลงเพื่อกำจัดศัตรูพืชซึ่งมีโอกาสที่จะถูกน้ำชะซึมลงสู่ใต้ดินแล้วไปปนเปื้อนในน้ำบาดาล แม้กระทั่งสวนหลังบ้านของเราเอง ดังนั้นถ้าหลีกเลี่ยงหรือลดการใช้ยาฆ่าแมลงลงบ้างย่อมเป็นผลดีต่อแหล่งน้ำบาดาล

10.7.11 บำรุงรักษาถังเกรอะอย่างเหมาะสม (maintain septic tanks properly)

การวางตำแหน่งของถังเกรอะ (septic tank) หรือแม้กระทั่งบ่อเกรอะของส้วมซึม (pit latrine/pit toilet) ควรวางให้ห่างไกลจากแหล่งน้ำบาดาลระดับตื้น เนื่องจากมีโอกาสที่แบคทีเรียจะซึมเข้าไปปนเปื้อนกับน้ำบาดาลได้ ควรมีการบพรุงรักษาถังเกรอะอยู่เสมอเพื่อให้มั่นใจว่าไม่มีรอยรั่ว (leaks) หรือเกิดการอุดตัน (clogging)

10.7.12 อนุรักษ์หรือเก็บเกี่ยวน้ำฝน (conserve or harvest rainwater)

การรองน้ำฝนไว้ใช้และการใช้น้ำฝนแทนน้ำบาดาลจะช่วยในการอนุรักษ์น้ำบาดาลได้เป็นอย่างดี เมื่อมีฝนตกลงในสระจนระดับน้ำในสระสูงขึ้นก็ควรใช้น้ำในสระรดน้ำต้นไม้ สำหรับน้ำฝนนั้น เราสามารถเก็บเกี่ยวจากหลังบ้าน โรงนาได้ แล้วก็เก็บไว้ในถังสำหรับดื่มกิน ส่วนที่ไหลล้นออกจากถังเก็บก็สามารถระบายลงบ่อขุดหรือบ่อวงระดับตื้น เพื่อเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นได้ต่อไป

10.7.13 บำรุงรักษาสวนอย่างชาญฉลาด (maintain garden wisely)

เมื่อต้องทำสวนและต้องรดน้ำต้นไม้ มีข้อแนะนำว่าควรจะรดน้ำต้นไม้ตอนเช้าตรู่หรือในตอนที่ดวงอาทิตย์ไม่อยู่ตรงศรีษะ เนื่องจากการรดน้ำต้นไม้ตอนกลางวันในขณะที่มีแสงแดดร้อนและดินมีความร้อนจะทำให้สูญเสียน้ำจำนวนมากไปในการระเหย (evaporation) ควรจะปลูกต้นไม้ที่ไม่ต้องการน้ำและปุ๋ยมากและทนต่อศัตรูพืชเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้ยาฆ่าแมลง และการมีต้นไม้ใหญ่ไว้ในสวนก็จะช่วยอนุรักษ์น้ำได้เช่นกัน เพราะว่ารากของต้นไม้ใหญ่จะสามารถอุ้มน้ำฝนที่ตกมาได้เยอะและร่มเงาของต้นไม้ใหญ่จะช่วยให้ดินไม่ถูกแสงแดด จึงลดอัตราการระเหยของน้ำในดินได้ดี

10.7.14 ให้ความรู้แก่ผู้ใช้น้ำ (educate water users) ข้อนี้สำคัญมากคือต้องให้ความรู้ว่าทรัพยากรน้ำบาดาลนั้นเป็นทรัพยากรที่เปราะบาง อ่อนไหว และเสียหายได้ง่าย ดังนั้นไม่ควรทำให้แหล่งน้ำบาดาลถูกปนเปื้อนหรือถูกใช้ไปจนหมดสิ้น และต้องมีเหลืออยู่ให้คนรุ่นหลังได้มีแหล่งน้ำสะอาดที่มีคุณค่าได้ใช้ด้วยเช่นกัน และนอกจากนี้แล้วต้องบอกให้ผู้ที่ได้รับการถ่ายทอดความรู้จากเราให้นำไปถ่ายทอดความรู้ต่อ ๆ ไปด้วย ทั้งนี้เพื่อเป็นการอนุรักษ์ทรัพยากรน้ำบาดาลอย่างยั่งยืน

(ที่มาของ ข้อ 10.7.5 ถึงข้อ 10.7.14: https://www.livpure.com/blog/10-ways-to-conserve-groundwater-that-actually-work)

บรรณานุกรม (Biblyography)

กรมทรัพยากรธรณี, (2552), **ธรณีวิทยาประเทศไทย**

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, (2551), **ชุดมาตรฐานการปฏิบัติงานด้านการปฏิบัติงานด้านการสำรวจอุทกธรณีวิทยาและแผนที่น้ำบาดาล**, รายงานฉบับสมบูรณ์ (เล่มที่ 2/10), โครงการจัดทำมาตรฐานการเจาะสำรวจ และ พัฒนาบ่อน้ำบาดาล โดยมหาวิทยาลัยขอนแก่น

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, (2551), **ชุดมาตรฐานการปฏิบัติงานด้านการปฏิบัติงานด้านการสำรวจอุทกธรณีวิทยาและแผนที่น้ำบาดาล**, รายงานฉบับสมบูรณ์ (เล่มที่ 3/10), โครงการจัดทำมาตรฐานการเจาะ สำรวจ และ พัฒนาบ่อน้ำบาดาล โดยมหาวิทยาลัยขอนแก่น

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, (2551), **ชุดมาตรฐานการปฏิบัติงานด้านการปฏิบัติงานด้านการสำรวจอุทกธรณีวิทยาและแผนที่น้ำบาดาล**, รายงานฉบับสมบูรณ์ (เล่มที่ 4/10), โครงการจัดทำมาตรฐานการเจาะ สำรวจ และ พัฒนาบ่อน้ำบาดาล โดยมหาวิทยาลัยขอนแก่น

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, (2551), **ชุดมาตรฐานการปฏิบัติงานด้านการปฏิบัติงานด้านการสำรวจอุทกธรณีวิทยาและแผนที่น้ำบาดาล**, รายงานฉบับสมบูรณ์ (เล่มที่ 5/10), โครงการจัดทำมาตรฐานการเจาะ สำรวจ และ พัฒนาบ่อน้ำบาดาล โดยมหาวิทยาลัยขอนแก่น

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, (2551), **ชุดมาตรฐานการปฏิบัติงานด้านการปฏิบัติงานด้านการสำรวจอุทกธรณีวิทยาและแผนที่น้ำบาดาล**, รายงานฉบับสมบูรณ์ (เล่มที่ 6/10), โครงการจัดทำมาตรฐานการเจาะสำรวจ และ พัฒนาบ่อน้ำบาดาล โดยมหาวิทยาลัยขอนแก่น

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, (2551), **ชุดมาตรฐานการปฏิบัติงานด้านการปฏิบัติงานด้านการสำรวจอุทกธรณีวิทยาและแผนที่น้ำบาดาล**, รายงานฉบับสมบูรณ์ (เล่มที่ 7/10), โครงการจัดทำมาตรฐานการเจาะ สำรวจ และ พัฒนาบ่อน้ำบาดาล โดยมหาวิทยาลัยขอนแก่น

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, (2551), **ชุดมาตรฐานการปฏิบัติงานด้านการปฏิบัติงานด้านการสำรวจอุทกธรณีวิทยาและแผนที่น้ำบาดาล**, รายงานฉบับสมบูรณ์ (เล่มที่ 8/10), โครงการจัดทำมาตรฐานการเจาะ สำรวจ และ พัฒนาบ่อน้ำบาดาล โดยมหาวิทยาลัยขอนแก่น

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, (2551), **ชุดมาตรฐานการปฏิบัติงานด้านการปฏิบัติงานด้านการสำรวจอุทกธรณีวิทยาและแผนที่น้ำบาดาล**, รายงานฉบับสมบูรณ์ (เล่มที่ 9/10), โครงการจัดทำมาตรฐานการเจาะ สำรวจ และ พัฒนาบ่อน้ำบาดาล โดยมหาวิทยาลัยขอนแก่น

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, (2520), **พระราชบัญญัติน้ำบาดาล**

กิตติชัย วัฒนานิกร, (2525), **การสำรวจธรณีฟิสิกส์สำหรับนักธรณีวิทยาและวิศวกร**, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

เจริญ เพียรเจริญ, (2540), **น้ำบาดาล-บ่อบาดาล**, กรมทรัพยากรธรณี

ทวีศักดิ์ ระมิงค์วงศ์, น้ำบาดาล, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2546

ธันดร ออกวะลา, (2553), **กลศาสตร์ของไหล**, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นพดล ภูมิวิเศษ, (2550**) ไฟล์การนำเสนอการสำรวจธรณีฟิสิกส์แบบ Dipole-Dipole**, ส่วนธรณีวิทยา, สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน,

บริษัทดีไวพลัส จำกัด, (2555), **โครงการศึกษาเพิ่มประสิทธิภาพของระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล**, รายงานฉบับสุดท้าย, กรมทรัพยากรน้ำบาดาล

เพียงตา สาตรักษ์, (2550), **ธรณีฟิสิกส์เพื่อการสำรวจใต้ผิวดิน**, มหาวิทยาลัยขอนแก่น

มหิปพงศ์ วรกุล, (2553) **คู่มือการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน-หินจากหลุมเจาะ**, กรมทรัพยากรน้ำบาดาล

มนตรี พิรุณเกษตร, (2550), **กลศาสตร์ของไหล**, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิชญ์ จอมวิญญาณ์, (2520), **ภูมิศาสตร์ประเทศไทย**, มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

สายสุณีย์ พุทธาคุณเจริญ, (2546), **ชลศาสตร์**, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ราชบัณฑิตสถาน, (2544), **พจนานุกรมศัพท์ธรณีวิทยา**, ราชบัณฑิตสถาน

ลัดดา วรรณขาว และคณะ, (2544), **กลศาสตร์ดิน: ทฤษฎีและปฏิบัติการ**, มหาวิทยาลัยขอนแก่น

วิชัย ศรีบุญลือ, (2546), **อุทกวิทยา**, มหาวิทยาลัยขอนแก่น

Assaad, F, LaMoreaux, P.E., et al, (2004), **Field Methods for Geologists and Hydrogeologists**, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Chantra, P.C., (2016), **Groundwater Geophysics in Hard Rock**, CRC Press/Balkema,

Dillon, P.J., (2002), **Management of Aquifer Recharge for Sustainability**, Swets and Zeitlinger B.V., The Netherlands

Dillon, P.J., et al, (2009), **Managed Aquifer Recharge: An Introduction**, Waterlines Report Series No. 13

Dominico, P.A., Schwartz, F.W., (1998), **Physical and Chemical Hydrogeology**, 2nd Edition, John Willey & Sons Inc.

Fetter, C.W., (2001), **Applied Hydrogeology**, Prentice-Hall Inc.

Freeze, R.A., Cherry, J.A., (1979), **Groundwater**, Prentice-Hall Inc, New Jersey, U.S.A

Gupta, S.K., (2011), **Modern Hydrology and Sustainable Water Management**, Wiley-Blackwell

Hammer, M.J., Hammer, M.J.Jr, (2004), **Water and Wasterwater Technology**, 5th Edition, Prentice-Hall Inc, New Jersey, U.S.A

Hiskock, K.M., (2005), **Hydrogeology: Principles and Practice**, Blackwell Science Limited

Kearry, K., Brooks, M., and Hill, I., (2002), **An Introduction to Geophysical Exploration**, 3rd Edition, Blackwell Science Limited

Keys, W.S., (1997), **A Practical Guide to Borehole Geophysics in Environmental Exploration**, CRC Press Inc.

Kirsch R. (Ed.), (2009), **Groundwater Geophysics: A Tool for Hydrogeology**, 2nd Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Roscoe Moss Company, (1990), **Handbook of Ground Water Development**, John Willey & Sons Inc.

Sterret, R.J., (2007), **Groundwater and Wells**, 3rd Edition, Johnson Screens, Weatherford Company

Stein, J, Starkweather A.W.Jr., (1997), **Drilling: The Manual of Methods, Applications, and Management**, Australian Drilling Compant Training Committee Limited, 4th Edition, CRC Press LLC

Swanson, R.G., (1981), **Sample Examination Manual**, The Amerigan Association of Petroleum Gelogists, Oklahoma, U.S.A.

Walker, J.D., Cohen, H.A., (2007), **The Geoscience Handbook: AGI Data Sheets**, 4th Edition, American Geological Institute

Weight, W.D., Sonderregger, J.L., (2001), **Manual of Applied Field Hydrogeology**, Magraw-Hill

Serra, O., **Fundamental of Well-log Interpretation**, 3rd Impression, Elsevier Science-Publishers B.V.

www.wikipedia.com

http://maps.grida.no/go/graphic/qanat

http://www.acogok.org/water/groundwater-oklahoma/aquifer-and-rock-types/

http://www.geosciences.unl.edu/~phanson/pictures2.htm

https://sites.google.com/site/nathchya2/phaph-cak-dawtheiym

https://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air-photos/air-photos/about-aerial-photography/9689

http://www.satit.up.ac.th/BBC07/AroundTheWorld/geo/19.htm

https://www.slideshare.net/PIRPASHA/geophysical-methods-of-soilfoundation-testing

https://en.wikipedia.org/wiki/Mud_weight#

https://waterwelljournal.com/first-look-four-steps-mixing-good-drilling-fluid/

https://www.chemstar.com/2014/06/comparing-water-based-muds-oil-based-muds/

https://www.drillingmanual.com/2020/09/drilling-lag-time-calculations-calculator.html

www.drillingformulas.com

https://indonesian.alibaba.com/

https://www.hatarilabs.com/ih-en/what-is-a-piper-diagram-and-how-to-create-one

https://www.google.com/search?q=groundwater+flow+regime

https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/fluid-dynamics/major-head-loss-friction-loss/

https://www.livpure.com/blog/10-ways-to-conserve-groundwater-that-actually-work

www.geothai.net