

น้ำบาดาล

การเกิดและการพัฒนาที่ยั่งยืน

ผศ.ดร.ฟองสวาท สุวคนธ์ สิงหราชวรพันธ์



ศูนย์บริการเทคโนโลยีน้ำบาดาล

ภาควิชาธรณีวิทยา

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ISBN 974-658-576-2

คำนำ

น้ำบาดาลเป็นทรัพยากรที่มีคุณค่า และถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างมาก ในปัจจุบันเพื่อการอุปโภค บริโภค การอุตสาหกรรม และการท่องเที่ยว ซึ่งการพัฒนาใช้น้ำบาดาลขึ้นมาใช้นี้ หากทำในลักษณะที่ไม่ถูกต้อง จะทำให้ระดับน้ำบาดาลลดลงอย่างมาก และเป็นการลดลงที่ไม่สัมพันธ์กับการเพิ่มเติมของน้ำบาดาลตามธรรมชาติ ก่อให้เกิดผลกระทบตามมาทั้งในแง่ของแผ่นดินทรุด การแทรกซึมของน้ำทะเล การปนเปื้อนของน้ำบาดาล และอื่นๆ

เอกสารฉบับนี้ มีจุดมุ่งหมายที่จะให้ความรู้พื้นฐานด้านการเกิดน้ำบาดาล รวมทั้งการพัฒนาน้ำบาดาลขึ้นมาใช้อย่างถูกต้อง เพื่อให้เป็นการพัฒนาที่ยั่งยืน

ผศ.ดร.ฟองสวาท สุวคนธ์ สิงหาราชวรพันธุ์

ตุลาคม 2548

สารบัญ

หน้า

คำนำ

1 การเกิดน้ำบาดาล

1.1 การกระจาย	1
1.2 การไหลของน้ำใต้ดิน	5
1.3 ลักษณะของน้ำบาดาลตามธรรมชาติ	8
1.4 การเพิ่มเติมของน้ำบาดาล	14
1.5 ถ้ำและลักษณะอย่างอื่นที่เกี่ยวข้อง	16

2 การพัฒนาน้ำบาดาล

2.1 การสำรวจน้ำบาดาล	20
2.2 การเจาะบ่อ	23
2.3 การปรับปรุงและการพัฒนาบ่อ	29
2.4 การสูบทดสอบ	31
2.5 การตรวจสอบและปรับปรุงคุณภาพน้ำ	32
2.6 การบำรุงรักษา	36

เอกสารอ้างอิง

37

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 การแบ่งส่วนของน้ำใต้ดินออกเป็นสามสัณฐานอากาศ และส่วน อิมมัลชันน้ำ	2
รูปที่ 1.2 ระดับน้ำบาดาลจะมีลักษณะเป็นไปตามความไม่สม่ำเสมอ ของ ผิวดิน	3
รูปที่ 1.3 ลักษณะของกรวยน้ำลด	4
รูปที่ 1.4 ความพรุนในหินชนิดต่างๆ	6
รูปที่ 1.5 การไหลของน้ำบาดาลผ่านชั้นหินอุ้มน้ำชนิดเดียวกัน	8
รูปที่ 1.6 การเกิดน้ำพุบริเวณที่ระดับน้ำบาดาลติดกับผิวดิน	10
รูปที่ 1.7 ระดับน้ำบาดาลปลอมเกิดขึ้นเหนือหินที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ และ แยกตัวจากระดับน้ำบาดาลใหญ่	11
รูปที่ 1.8 เพื่อให้ได้น้ำบาดาลจำนวนมากควรเจาะบ่อให้ลึกลงไป ใน ส่วนที่ อิมมัลชันน้ำ	11
รูปที่ 1.9 บ่อน้ำในรูปอยู่ในสภาวะที่เรียกว่า น้ำบาดาลที่มีแรงดัน	13
รูปที่ 1.10 น้ำพุไอน้ำร้อน	14
รูปที่ 1.11 การเกิดของน้ำพุไอน้ำร้อน	15
รูปที่ 1.12 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำในบ่อดูดและปริมาณ น้ำฝน	16
รูปที่ 1.13 หลุมยุบ	18
รูปที่ 1.14 การละลายของหินปูนใต้ดินไม่เพียงแต่ก่อให้เกิดถ้ำหินงอกและหิน ย้อยเท่านั้น ยังอาจทำให้เกิดภูมิประเทศคาร์สต์ที่ผิวโลกได้อีกด้วย	19
รูปที่ 2.1 การสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะโดยการปล่อยกระแสไฟฟ้า ลงไปใต้ดิน แล้ววัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ	21
รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของเครื่องเจาะแบบกระแทก	24

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องเจาะแบบกระแทก	25
รูปที่ 2.4 ชุดอุปกรณ์กระแทกของเครื่องเจาะแบบกระแทก	25
รูปที่ 2.5 การเจาะแบบหมุนตรง	26
รูปที่ 2.6 การเจาะแบบหมุนย้อนกลับ	27
รูปที่ 2.7 หัวเจาะสำหรับการเจาะแบบหมุน	27
รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบของชุดเจาะแบบกระแทกและชุดเจาะแบบหมุน สำหรับการเจาะแบบใช้ลม	28
รูปที่ 2.9 การพัฒนาบ่อที่ถูกต้องตามวิธีการ จะมีกรวดที่ขนาดใกล้เคียง กันมากอยู่รอบท่อกรอง	30
รูปที่ 2.10 บ่อบาดาลที่กรูกรวดแล้ว	31
รูปที่ 2.11 การจัดแบ่งน้ำตามคุณภาพเพื่อใช้ในการเกษตรกรรม	35

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงความต้านทานจำเพาะของหินและแร่	22
ตารางที่ 2.2 มาตรฐานน้ำบาดาลที่จะใช้บริโภคได้ ตามประกาศกระทรวง อุตสาหกรรม ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2542) ออกตามความใน พระราชบัญญัติน้ำบาดาล พ.ศ. 2520	33

น้้าบาดาล : การเกิดและการพัฒนาที่ยั่งยืน

1 การเกิดน้้าบาดาล

1.1 การกระจาย

โดยทั่ว ๆ ไปน้้าบาดาล หมายถึง น้้าที่ถูกกักขังอยู่ในช่องว่าง รอยแยก รอยแตกของหินที่แข็งตัวและยังไม่แข็งตัวภายใต้ผิวโลก การศึกษาน้้าบาดาลส่วนใหญ่จะเน้นหนักไปในด้านการสำรวจถึงช่องว่างที่กักเก็บน้้าเอาไว้ ทั้งนี้น้้าภายใต้ผิวดินส่วนใหญ่มาจากฝน ซึ่งตกลงมายัง ผิวดิน แล้วส่วนหนึ่งซึมผ่านลงไปใต้ดิน อีกส่วนหนึ่งไหลไปสู่แม่น้ำลำธาร ซึ่งจากนั้นอาจจะซึมลงไปใต้ผิวดินด้วย

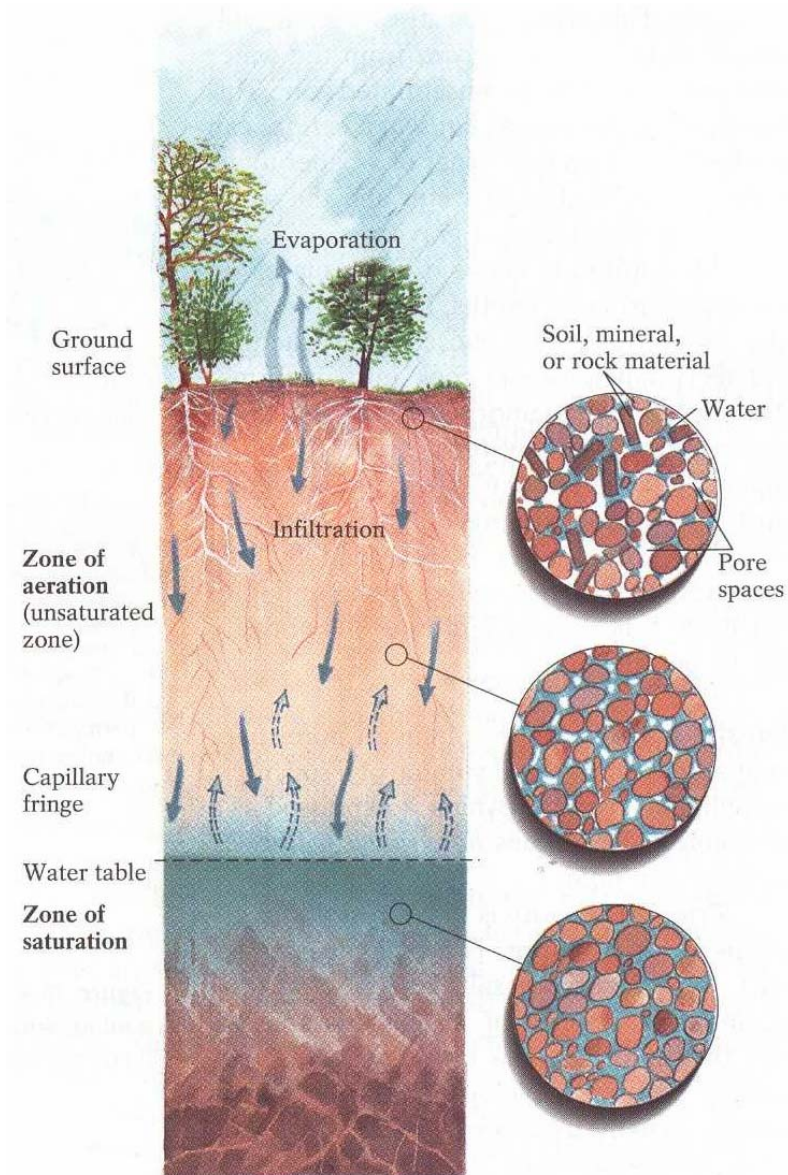
ส่วนสัมผัสอากาศและส่วนอิ่มตัวด้วยน้้า (Zones of aeration and saturation)

ส่วนสัมผัสอากาศ หมายถึง ส่วนที่อยู่ใต้ผิวดิน ในส่วนนี้ช่องว่างบางส่วนจะมีน้้า กักเก็บอยู่ และบางส่วนจะมีอากาศแทรกอยู่ น้้าใต้ดินที่ถูกกักเก็บอยู่ในส่วนนี้ เรียกว่า น้้าในดิน (Suspended water หรือ Vadose water) การที่น้้าในส่วนนี้ไม่ซึมผ่านลงไปยังส่วนที่ลึกกว่าเนื่องจากมีแรง 2 แรงมากระทำ อันแรก คือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้้ากับหิน และอันที่สอง คือ แรงยึดเกาะระหว่างโมเลกุลของน้้าด้วยกันเอง

ส่วนสัมผัสอากาศสามารถแบ่งออกเป็นสามย่อย ๆ ได้อีก 3 ส่วน คือ ส่วนความชื้นในดิน ส่วนกลาง และส่วนขอบแรงดันน้้า (belt of soil moisture, intermediate belt, and capillary fringe) น้้าที่ซึมผ่านลงมายังส่วนความชื้นในดิน บางส่วนจะถูกใช้ไปโดยพืช และบางส่วนจะระเหยกลับไปสู่บรรยากาศ แต่บางส่วนจะซึมผ่านลงไปยังส่วนกลางและถูกกักขังเอาไว้ ซึ่งเป็นผลมาจากการกระทำของแรงยึดเกาะระหว่างโมเลกุล น้้าที่อยู่ในส่วนกลางจะมีการเคลื่อนไหวน้อยมาก ยกเว้นในขณะที่มีฝนตก ซึ่งจะทำให้มีน้้าซึมลงมาจากผิวดินเข้ามาเพิ่มเติมน้้าในส่วนนี้ ในบางพื้นที่จะไม่มีส่วนกลาง โดยที่ส่วนความชื้นในดินจะวางตัวอยู่บนส่วนขอบแรงดันน้้าเลย น้้าในส่วนข้างใต้จะมีแรงดันให้ขึ้นมาสูงถึงส่วนบนของขอบแรงดันน้้า โดยจะมีความสูงเฉลี่ยประมาณ 2-3 เซนติเมตร ถึง 2 หรือ 3 เมตร

ส่วนอิ่มตัวด้วยน้้า จะวางตัวอยู่ใต้ส่วนสัมผัสอากาศ (รูปที่ 1.1) ช่องว่างในหินในส่วนนี้จะมีน้้าแทรกตัวอยู่เต็มไปหมด น้้าในส่วนนี้ เรียกว่า น้้าบาดาล (Groundwater) ผิวนบนของส่วนอิ่มตัวด้วยน้้าซึ่งต่อกับส่วนสัมผัสอากาศ เรียก ระดับน้้าบาดาล (Groundwater table หรือ Water table) การเปลี่ยนแปลงของระดับน้้าบาดาลขึ้นอยู่กับจำนวนของน้้าซึ่งผ่านลงมาจากส่วนสัมผัส

อากาศ และขึ้นอยู่กับสูญเสีหรือการถูกปล่อยออกไปของน้ำบาดาล ทั้งโดยธรรมชาติและการกระทำของมนุษย์



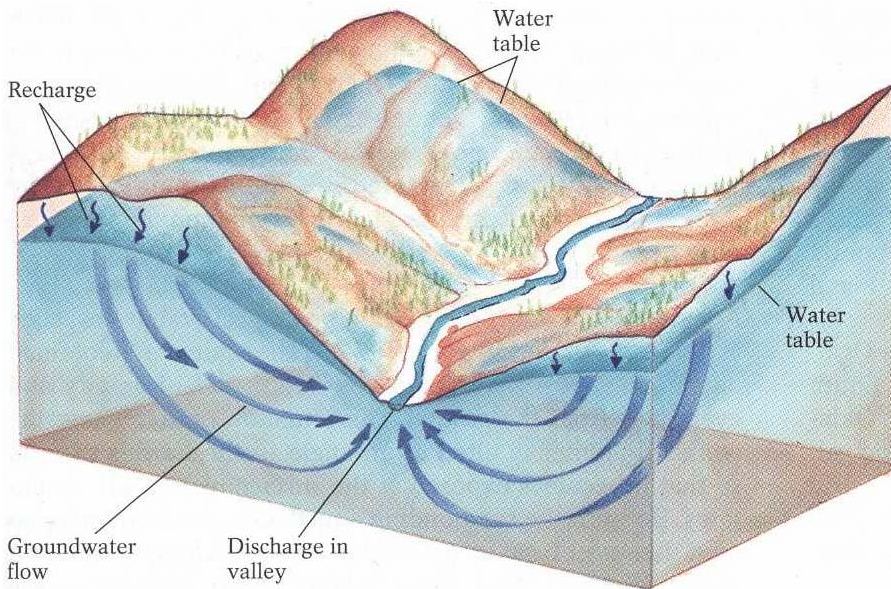
รูปที่ 1.1 การแบ่งส่วนของน้ำใต้ดินออกเป็นส่วสัมผัสอากาศ และส่วนอิมตัวด้วยน้ำ (คัดลอก

จาก Chernicoff, 1999)

ระดับน้ำบาดาล (Water table)

ระดับน้ำบาดาล คือ ระดับซึ่งไม่เรียบสม่ำเสมอ เป็นส่วนต่อของส่วนอิ่มตัวด้วยน้ำและส่วนสัมผัสอากาศ น้ำที่อยู่ส่วนล่างของระดับน้ำบาดาล คือ น้ำบาดาล และน้ำที่อยู่ส่วนบนของระดับน้ำบาดาล คือ น้ำในดิน ความหนาของส่วนสัมผัสอากาศจะแตกต่างจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง ดังนั้น ระดับน้ำบาดาลจะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยทั่ว ๆ ไประดับน้ำบาดาลจะมีลักษณะเป็นไปตามความไม่สม่ำเสมอของผิวดิน โดยจะมีระดับสูงสุดอยู่ในส่วนที่เป็นเนินเขา และมีระดับต่ำสุดอยู่ในส่วนที่เป็นหุบเขา

ในการศึกษาถึงลักษณะของระดับน้ำบาดาล ให้ลองพิจารณาตัวอย่างดังนี้ รูปที่ 1.2 แสดงให้เห็นเนินเขาซึ่งประกอบด้วยวัตถุที่เป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมด ให้สมมุติว่าในตอนแรกวัตถุนี้ไม่มีน้ำอยู่เลย หลังจากนั้นฝนตกอย่างหนัก น้ำจะค่อย ๆ ซึมผ่านลงไปภายใต้ผิวดินไปแทรกอยู่ตามช่องว่างในที่ลึก และเป็นผลให้เกิดส่วนอิ่มตัวด้วยน้ำ



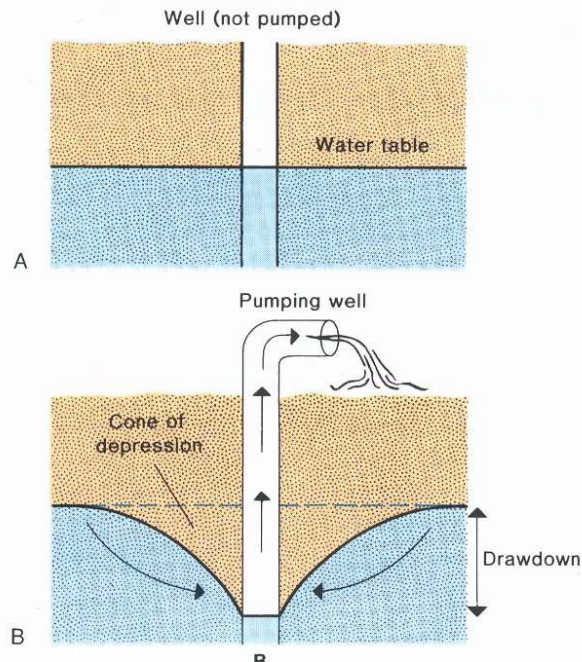
รูปที่ 1.2 ระดับน้ำบาดาลจะมีลักษณะเป็นไปตามความไม่สม่ำเสมอของผิวดิน (คัดลอกจาก Chernicoff, 1999)

เมื่อน้ำซึมผ่านลงไปมากขึ้นทุกที ผิวน้ำของส่วนอิ่มตัวด้วยน้ำจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ ระดับน้ำบาดาลในตอนแรกจะยังคงอยู่ในแนวระดับ จนกระทั่งถึงระดับของหุบเขาที่อยู่สองข้างของเนินเขา หลังจากนั้นเมื่อน้ำซึมผ่านลงมามาก น้ำบางส่วนจะหาทางระบายออกไปยังหุบเขา

อย่างไรก็ตามน้ำยังจะไหลซึมลงไปได้ผิวดินอยู่เรื่อย ๆ ทำให้ระดับน้ำบาดาลไม่สามารถคงอยู่ ในแนวระดับได้ อัตราการซึมของน้ำจะช้าลงเนื่องจากความฝืดที่เกิดขึ้นในขณะที่ไหลผ่านลงไปตามช่องว่าง และความฝืดเกิดขึ้นในระหว่างโมเลกุลของน้ำเอง ผลที่ตามมาคือ น้ำจะไปรวมตัวกันอยู่ภายใต้เนินเขามากขึ้น และระดับน้ำบาดาลจะเริ่มเปลี่ยนรูปร่างไปตามลักษณะของเนินเขา น้ำจะไหลออกอย่างรวดเร็วตามความลาดเอียงที่ชันของระดับน้ำบาดาลในบริเวณหุบเขา และจะไหลอย่างช้าเมื่อระดับน้ำบาดาลมีความลาดเอียงน้อยในบริเวณภายใต้ยอดเขา

เราสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงรูปร่างของระดับน้ำบาดาลได้โดยการทำทางระบายน้ำขึ้นตัวอย่างเช่น เจาะบ่อนขุดเขาให้ลึกลงไปถึงส่วนอึดตัวด้วยน้ำ เมื่อทำการสูบน้ำบาดาลให้ไหลขึ้นมาตามบ่อ จะทำให้ระดับน้ำบาดาลเกิดเป็นหลุมขึ้น ยิ่งสูบน้ำขึ้นมามากเท่าไร หลุมนี้ซึ่งเรียกว่ากรวยน้ำลด (cone of depression) จะยิ่งเพิ่มความกว้างและความลึกมากขึ้น (รูปที่ 1.3)

หันกลับมาพิจารณาถึงตัวอย่างที่กล่าวไปแล้ว จะพบว่าถ้าจำนวนน้ำที่เข้ามาเพิ่มเติมตามพื้นผิวหมดไป ระดับน้ำบาดาลภายใต้เนินเขาก็จะลดลงอย่างช้า ๆ ในขณะที่น้ำบาดาลไหลออกไปสู่หุบเขา และในที่สุดระดับน้ำบาดาลใต้เนินเขาจะเท่ากับระดับของพื้นหุบเขา ทำให้น้ำหยุดไหล สภาพดังกล่าวนี้จะพบทั่วไปในบริเวณทะเลทรายซึ่งมีฝนตกน้อย



รูปที่ 1.3 ลักษณะของกรวยน้ำลด (คัดลอกจาก Plummer and McGeary, 1993)

1.2 การไหลของน้ำใต้ดิน

การไหลของน้ำใต้ดินเป็นไปอย่างช้ามาก วัดโดยใช้หน่วยเป็นเซนติเมตรต่อวัน หรือในบางแห่งเป็นเซนติเมตรหรือเมตรต่อปี จะเหมาะสมสำหรับการวัดอัตราการไหลของน้ำใต้ดิน เหตุผลสำคัญที่ทำให้การไหลเป็นไปอย่างช้ามากคือ การที่น้ำจะต้องไหลผ่านช่องว่างที่แคบและจำกัด ดังนั้น จึงควรจะได้พิจารณาถึงความพรุนและความซึมได้ของวัตถุซึ่งเป็นส่วนประกอบของโลกเสียก่อนเพื่อให้เข้าใจได้ดีขึ้น

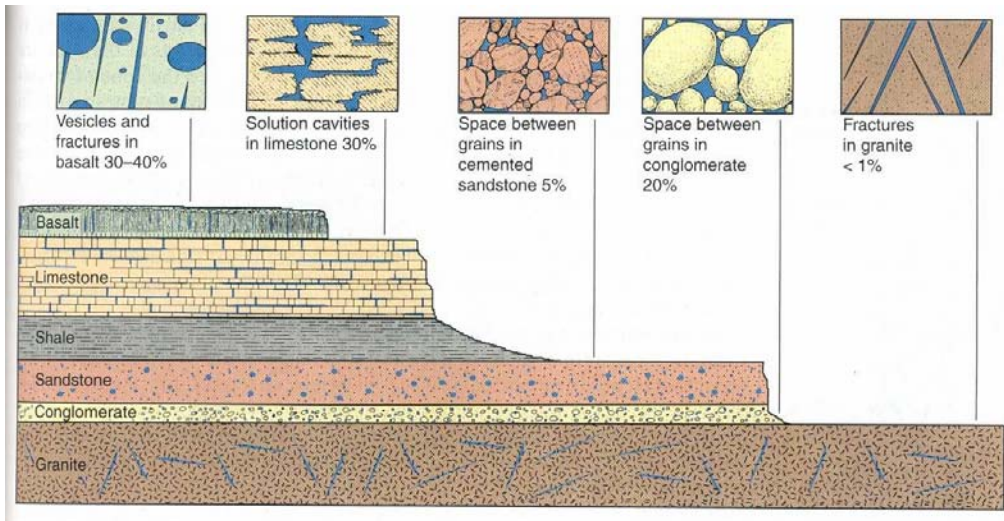
ความพรุน (Porosity)

ความพรุน หมายถึง ช่องว่างในหิน โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาตรทั้งหมด หินยิ่งมีความพรุนมากเท่าไร จะยิ่งมีช่องว่างภายในเนื้อของมันมากขึ้นเท่านั้น และช่องว่างเหล่านี้คือทางที่จะทำให้ให้น้ำใต้ดินไหลผ่านไปได้

ความพรุนแตกต่างกันออกไปตามแต่ชนิดของวัตถุ พบว่าความพรุนจะขึ้นอยู่กับรูปร่าง ลักษณะ ขนาด การคัดขนาด และการคลุกเคล้ากันของเศษหินเล็ก ๆ การทับถมของทรายที่ส่วนใหญ่เป็นเม็ดแร่ควอตซ์ที่มีลักษณะกลมและมีขนาดเกือบเท่า ๆ กัน จะมีความพรุนสูงมาก แต่เมื่อมีแร่อื่นเข้ามาปะปนในขณะที่ทับถมและเชื่อมเม็ดแร่ควอตซ์ให้ติดกันเป็นหินทราย ความพรุนจะลดลงตามจำนวนช่องว่างที่มีตัวเชื่อมเข้ามาแทรกอยู่ การทับถมกันของทรายที่มีขนาด แตกต่างกันไป โดยมีส่วนที่มีขนาดเล็ก เช่น ทรายแป้ง (silt) และดินเหนียว (clay) เข้ามาปะปนจะมีความพรุนต่ำ ทั้งนี้เพราะส่วนที่มีขนาดเล็กจะเข้าไปแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างส่วนที่มีขนาดใหญ่

หินที่มีเนื้อแน่น เช่น หินแกรนิต อาจจะไม่มีความพรุนได้ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการแตกของหิน หินเนื้อแน่นที่สามารถละลายน้ำได้ เช่น หินปูน อาจจะมีแนวที่มีการยึดเกาะกันไม่แน่น ทำให้เกิดเป็นโพรงขึ้นได้ เมื่อน้ำไปละลายเอาเนื้อของหินออกมา

ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าขอบเขตของความพรุนของวัตถุต่าง ๆ จะแตกต่างกันออกไป (รูปที่ 1.4) เช่น ดินเหนียวที่มีการทับถมใหม่ ๆ อาจจะไม่มีความพรุนถึง 60 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่หินอัคนีที่ยังไม่ผุ เช่น หินแกรนิต หินแกบโบร หรือหินออบซิเดียน อาจจะไม่มีความพรุนเพียงไม่ถึง 1 เปอร์เซ็นต์ หินที่ยังไม่แข็งตัวซึ่งเกิดจากการตกตะกอนทับถมกันของ ดินเหนียว ทรายแป้ง ทราย และกรวด มีความพรุนอยู่ในช่วงระหว่าง 20 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อตะกอนเหล่านี้แข็งตัวกลายเป็นหินตะกอน เนื่องจากการยึดติดกันหรืออัดตัวแน่นเข้า ความพรุนจะลดลงอย่างมาก ค่าเฉลี่ยของความพรุนของหินแต่ละชนิดมีความหมายน้อยมาก เพราะว่าภายในชนิดเดียวกัน ความพรุนยังจะแตกต่างกันไปอีกมาก อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปความพรุนที่น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ จัดว่าต่ำ ความพรุน 5 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ มีค่าปานกลาง และความพรุนมากกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ถือว่าสูง



รูปที่ 1.4 ความพรุนในหินชนิดต่างๆ (คัดลอกจาก Hamblin and Christiansen, 2001)

ความซึมได้ (Permeability)

น้ำบาดาลในพื้นที่หนึ่ง ๆ จะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความสามารถของชั้นหินในการที่จะกักเก็บน้ำเอาไว้ และความสามารถในการจ่ายน้ำ ซึ่งความสามารถในการที่จะดูดซึมหรือปล่อยน้ำออกมานี้ เรียกว่า ความซึมได้

อัตราการจ่ายน้ำของชั้นหินไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับความพรุนเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับขนาดของช่องว่างที่ติดต่อกันด้วย ตัวอย่างเช่น ดินเหนียว ซึ่งถึงแม้ว่าจะมีความพรุนสูง แต่ช่องว่างเล็กมาก เพราะประกอบขึ้นด้วยแผ่นเล็กๆ ของแร่ดินมารวมกัน ดังนั้นน้ำจะไหลผ่านทรายได้เร็วและง่ายกว่าดินเหนียว เพราะในดินเหนียวจะมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำกับผนังของดินมาก น้ำจะไหลผ่านทรายได้เร็วกว่า เพราะช่องว่างระหว่างเม็ดทรายกว้าง และแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำและเม็ดทรายต่ำ ดังนั้น การที่น้ำจะไหลผ่านวัตถุต่างๆ ได้ ไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของช่องว่างว่าใหญ่หรือเล็กแค่ไหน ที่สำคัญคือช่องว่างเหล่านั้นจะต้องมีทางติดต่อกันเพื่อให้ไหลผ่านได้ ถ้าช่องว่างไม่มีทางติดต่อกันน้ำไหลผ่านไม่ได้ วัตถุนั้นจะเรียกว่าเป็นวัตถุที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ (impermeable)

ชั้นหินที่น้ำซึมผ่านได้และอยู่ภายใต้ระดับน้ำบาดาล เรียกว่า ชั้นหินอุ้มน้ำ (aquifer) หินทรายและหินปูนซึ่งมีความซึมได้ เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำไปละลายเอาเนื้อหินปูนตามรอยแตกและแนวของชั้นหินออกไปทำให้เกิดเป็นช่องว่าง และส่วนของรอยแตกในหินเนื้อแน่น เช่น หินแกรนิต หินบะซอลต์ และหินแกบโบร อาจจะทำหน้าที่เป็นชั้นหินอุ้มน้ำได้ แม้ว่าความซึมได้

ของส่วนขอรอยแตกเหล่านี้อจะลดลงอย่างรวดเร็วตามความลึก ดินเหนียว หินดินดาน หินแปร และหินอัคนี มักจะเป็นชั้นหินอุ้มน้ำที่เลว

เนื่องจากการไหลของน้ำบาดาลเป็นไปอย่างช้า ๆ ดังนั้น ส่วนใหญ่การไหลจึงเป็นแบบเรียบ (laminar) ตรงข้ามกับการไหลของน้ำบนผิวดินซึ่งส่วนใหญ่เป็นแบบเชี่ยว (turbulent) ยกเว้นการไหลของน้ำบาดาลในโพรงใหญ่ ๆ ของหินปูนซึ่งจะเป็นแบบเชี่ยว ในการไหลแบบเรียบนั้น น้ำส่วนที่อยู่ติดกับผนังของหินมักจะไม่มีเคลื่อนไหว เนื่องมาจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำและผนัง ส่วนของน้ำที่อยู่ห่างออกไปจากผนังจะมีการไหลเร็วขึ้น โดยไหลเป็นแบบเรียบ ๆ น้ำที่อยู่ในส่วนกลางของช่องว่างจะไหลได้เร็วที่สุด เพราะความต้านทานต่อการไหลของน้ำจะลดน้อยลงจากผนังของหินไปสู่ส่วนกลางของช่องว่าง

พลังงานที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดการไหลของน้ำบาดาลมาจากแรงดึงดูดของโลก ซึ่งจะเป็ตัวทำให้น้ำซึมจากผิวดินลงไปข้างใต้จนถึงระดับน้ำบาดาล และไหลผ่านช่องว่างในดินและหินไปสู่แม่น้ำ ลำธาร ทะเลสาบ และน้ำพุ น้ำบนผิวดินจะไหลได้ต้องมีความลาดเอียง การไหลของน้ำบาดาลก็เช่นกัน จะเกิดขึ้นได้ระดับน้ำบาดาลต้องมีความลาดเอียงที่เรียกว่า ความลาดของแรงดัน (hydraulic gradient) ซึ่งสามารถวัดได้โดยเอาระยะทางของการไหล (จากจุดที่น้ำไหลเข้าไปจนถึงจุดที่น้ำไหลออก) ไปหารระยะทางในแนวตั้งระหว่างจุดสองจุดนี้ที่เรียกว่า แรงดันของน้ำ (head) ดังนั้น ความลาดของแรงดันจึงเขียนออกมาได้เป็น h/l เมื่อ h คือ แรงดันของน้ำ และ l คือ ระยะทางของการไหล ตัวอย่างเช่น เมื่อ h เท่ากับ 10 เมตร และ l เท่ากับ 100 เมตร ค่าของความลาดของแรงดันจะเท่ากับ 0.1 หรือ 10 เปอร์เซ็นต์

เฮนรี ดาร์ซี (Henri Darcy) วิศวกรชาวฝรั่งเศส ได้ตั้งสมการที่จะแสดงถึงอัตราการไหลของน้ำในหินขึ้นในปี ค.ศ.1856 ซึ่งในปัจจุบันเรียกว่า กฎของดาร์ซี (Darcy's law) สมการดังกล่าวคือ

$$V = K \cdot h/l$$

เมื่อ V คือความเร็วในการไหลของน้ำ (velocity)

h คือแรงดันของน้ำ (head)

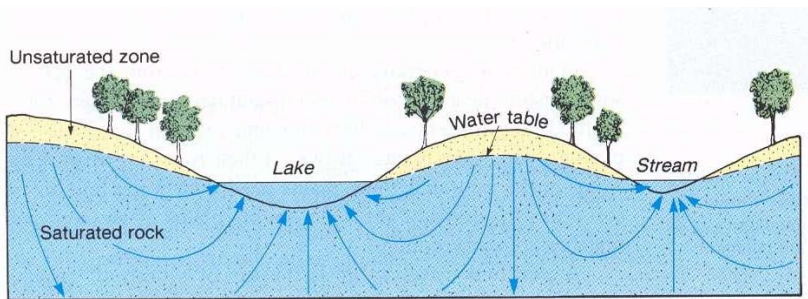
l คือระยะทางของการไหล (length of flow)

และ K คือสัมประสิทธิ์ซึ่งขึ้นอยู่กับความซึมได้ของวัตถุ แรงดึงดูดของโลกและ ความหนืดของน้ำ

เนื่องจาก h/l คือ ค่าของความลาดของแรงดัน ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่า หินที่มีความซึมได้คงที่ ความเร็วในการไหลของน้ำผ่านหินนี้จะเพิ่มมากขึ้น เมื่อค่าความลาดของแรงดันสูงขึ้น

และเนื่องจากความลาดของแรงดันคือ ความลาดเอียงของระดับน้ำบาดาล ดังนั้น จึงอาจจะกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า ความเร็วในการไหลของน้ำบาดาลจะเปลี่ยนแปลงไปตามความลาดเอียงของระดับน้ำบาดาล หรือความลาดเอียงของระดับน้ำบาดาลยิ่งมาก ความเร็วในการไหลจะยิ่งสูงขึ้นในชั้นหินอุ้มน้ำทั่ว ๆ ไป อัตราการไหลของน้ำบาดาลจะมีค่าประมาณไม่เร็วไปกว่า 1.5 เมตรต่อวัน และไม่ช้าไปกว่า 1.5 เมตรต่อปี แม้ว่าในบางครั้งอัตราการไหลอาจจะเร็วถึง 120 เมตรต่อวัน หรือบางครั้งอาจจะช้ากว่าไม่กี่เซนติเมตรต่อปี

การไหลของน้ำบาดาลตามความลาดเอียงของระดับน้ำบาดาล เป็นเพียงการไหลส่วนหนึ่งเท่านั้น เพราะในส่วนที่ลึกลงไปอีกน้ำบาดาลยังมีการเคลื่อนไหว ต่ำลงไปจากระดับน้ำบาดาลน้ำจะไหลในลักษณะเป็นส่วนโค้งกว้าง ๆ ไปสู่ทางออก เช่น แม่น้ำหรือ ลำธาร ดังในรูปที่ 1.5 น้ำบาดาลจะไหลไปสู่แม่น้ำในทุก ๆ ทิศทาง รวมทั้งไหลขึ้นมาจากส่วนล่างของร่องน้ำด้วย เราอธิบายการไหลที่เป็นลักษณะแนวโค้งนี้ได้ว่า เป็นผลเนื่องมาจากการกระทำร่วมกันของแรงดึงดูดของโลก และการที่น้ำมักจะไหลออกไปด้านข้างตามทิศทางซึ่งเป็นความลาดเอียงของระดับน้ำบาดาล การที่น้ำมักจะไหลออกไปด้านข้างนั้นเนื่องจากมันจะไหลไปสู่ส่วนที่มีความกดดันต่ำ คือ ส่วนของแม่น้ำลำธาร ดังนั้น ผลของการไหลจะไม่เป็นไปในลักษณะที่ไหลลงไปในแนวตั้ง หรือไหลออกทางด้านข้างไปสู่ร่องน้ำ แต่การไหลจะเป็นไปในลักษณะรูปโค้งไปยังแม่น้ำ



รูปที่ 1.5 การไหลของน้ำบาดาลผ่านชั้นหินอุ้มน้ำชนิดเดียวกัน (คัดลอกจาก Plummer and McGeary, 1993)

1.3 ลักษณะของน้ำบาดาลตามธรรมชาติ

จากการที่เราสมมติให้น้ำบาดาลสามารถไหลได้อย่างอิสระในทุก ๆ ทิศทาง ผ่านชั้นหินที่มีความซึมได้คงที่ และไม่จำกัดขอบเขตนั้น ตามความเป็นจริงแล้วสภาพที่เราสมมติขึ้นจะพบน้อยมาก ชั้นหินบางชั้นอาจจะมีความซึมได้มากกว่าชั้นหินอื่น ๆ ซึ่งเป็นผลทำให้น้ำไหลได้อย่างรวดเร็ว ในทิศทางที่นานไม่มากก็น้อยกับแนวของชั้นหิน แม้กระทั่งในหินที่มีเนื้อเดียวกัน น้ำบาดาลก็อาจไหลในบางทิศทางเท่านั้น

น้ำพุและบ่อน้ำ (Simple spring and well)

น้ำจะไหลซึมอย่างอิสระจากผิวดินลงไปข้างใต้ จนกระทั่งถึงชั้นหินที่ไม่ยอมให้น้ำซึมผ่าน หรือกระทั่งถึงระดับน้ำบาดาล จากนั้นมันจะไหลออกไปทางด้านข้าง ไม่ช้าหรือเร็ว น้ำส่วนนี้จะไหลกลับขึ้นมาสู่ผิวดินอีกครั้งหนึ่งในลักษณะที่เรียกว่า น้ำพุ

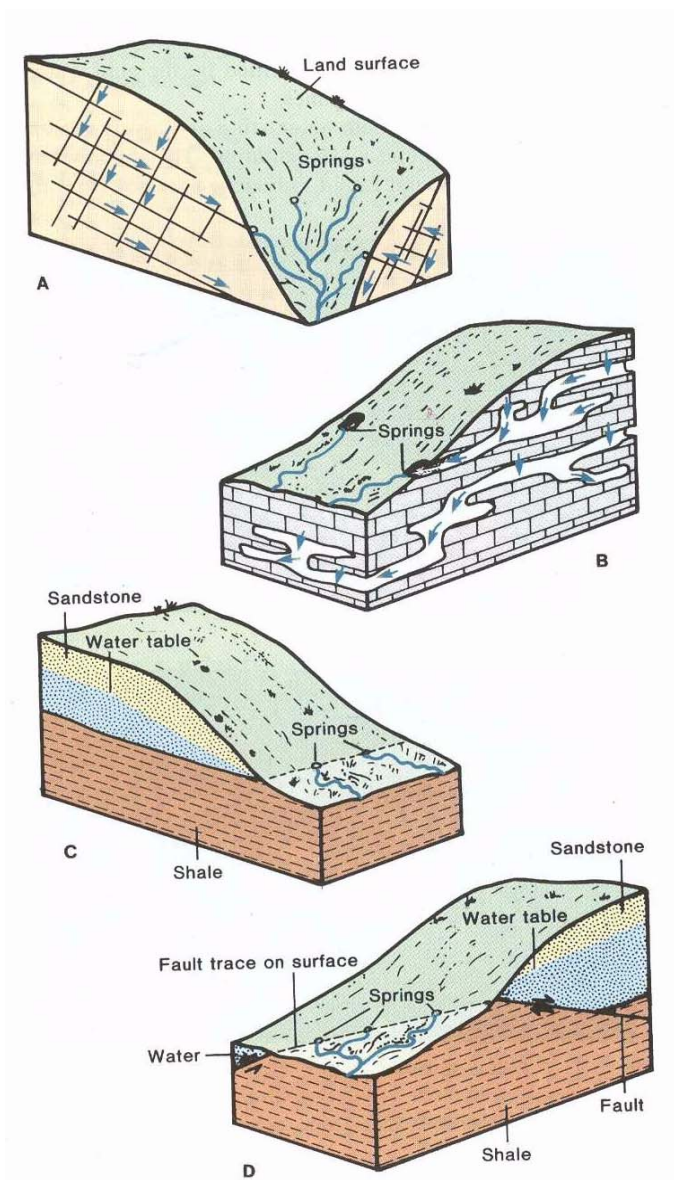
ในประวัติศาสตร์ที่ผ่านมา น้ำพุสามารถดึงดูดความสนใจของมนุษย์ได้มาก ในสมัยก่อน น้ำพุถือว่าเป็นสถานที่ศักดิ์สิทธิ์ตามความเชื่อถือทางด้านโชคลาง และในบางครั้งสถานที่ที่มี น้ำพุอยู่จะถูกสร้างเป็นวัดหรือโบสถ์ แต่ในปัจจุบันหลาย ๆ คนเชื่อว่าน้ำจากน้ำพุมีตัวยา และสามารถรักษาโรคให้หายได้ น้ำจากน้ำพุแร่ธาตุ (mineral springs-น้ำแร่) จะมีเกลือละลายอยู่ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการที่น้ำไปละลายเอาแร่ธาตุออกมาในขณะที่ไหลผ่านชั้นหินหรือดิน

โดยทั่ว ๆ ไปสามารถกล่าวได้ว่า ที่ไหนซึ่งน้ำบาดาลไหลหักเห มาสู่ส่วนที่น้ำสามารถไหลออกได้ตรงบริเวณผิวดินจะก่อให้เกิดน้ำพุ (ดูรูปที่ 1.6) ตัวอย่างในรูปที่ 1.7 ซึ่งมีเนินเขาประกอบขึ้นด้วยชั้นหินที่น้ำซึมผ่านได้ และบางส่วนเป็นชั้นหินที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ น้ำบางส่วนซึ่งไหลลงไปอาจจะถูกปิดกั้นโดยชั้นหินที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ และก่อให้เกิดส่วนที่อึดตัวด้วยน้ำส่วนเล็กๆ ขึ้น เนื่องจากระดับน้ำของส่วนที่อึดตัวด้วยน้ำน้อยอยู่เหนือจากระดับน้ำบาดาล จึงเรียกระดับน้ำบาดาลปลอม (perched water table) น้ำซึ่งไหลออกมาทางด้านข้างตามผิวบนของชั้นหินที่น้ำซึมผ่านไม่ได้นี้ จะไหลออกมาสู่ผิวดินในลักษณะของน้ำพุ ในชั้นหินที่น้ำซึมผ่านไม่ได้อาจจะมีส่วนที่มีน้ำกักขังอยู่ได้ โดยเป็นผลเนื่องมาจากรอยแตก หรือช่องว่างที่เกิดจากน้ำละลายเอาเนื้อของหินออกไป ถ้าช่องว่างเหล่านี้มีน้ำเต็มไปหมด และระดับน้ำตัดกับผิวดิน น้ำจะไหลออกมาสู่ผิวดินในลักษณะของน้ำพุ

น้ำพุเป็นผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากการตัดกันโดยธรรมชาติของผิวดินและระดับน้ำบาดาล แต่บ่อน้ำเป็นช่องทางที่ทำขึ้น หรือเป็นบ่อที่ขุดเจาะจากผิวดินลงไปยังส่วนอึดตัวด้วยน้ำ การเจาะบ่อจะได้ผลและสามารถนำน้ำขึ้นมาใช้ได้ ก็ต่อเมื่อเจาะผ่านลงไปจนถึงชั้นหินที่ยอมให้น้ำซึมผ่าน และเจาะลึกลงไปกว่าระดับน้ำบาดาล ยิ่งต้องการน้ำเป็นปริมาณมากเท่าไร ยิ่งต้องเจาะลึกลงไปจากระดับน้ำบาดาลมากเท่านั้น การสูบน้ำติดต่อกันไปเรื่อยๆ จะเป็นผลก่อให้เกิดกรวยน้ำลด ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ซึ่งเป็นผลให้รูปร่างของระดับน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลงไป และอาจจะทำให้จำนวนของน้ำที่จะไหลเข้าสู่บ่อน้อยลง (ดูรูปที่ 1.8)

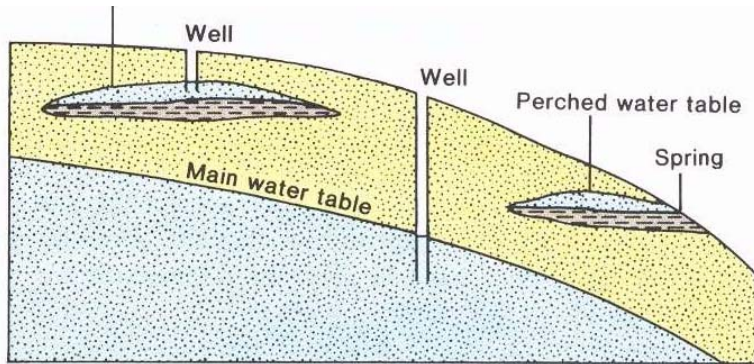
บ่อที่เจาะลงไปในพื้นที่ที่มีช่องว่างซึ่งเกิดจากน้ำละลายเอาเนื้อของหินออกไปเป็นช่องกว้าง ๆ นั้น บางเวลาอาจจะให้น้ำมาก และบางทีอาจจะไม่มีน้ำเลย ทั้งนี้เพราะในช่องว่างที่กว้าง ๆ น้ำจะไหลออกมาอย่างรวดเร็ว และยังไปกว่านั้นน้ำที่ไหลซึมลงไปจากผิวดินจะไหลลงอย่างรวดเร็ว แล้วไหลกลับเข้าสู่บ่อภายในช่วงเวลาสั้น ๆ ผลที่ตามมาก็คือ น้ำที่สูบขึ้นมาอาจจะ

สะอาดไม่เพียงพอ ทั้งนี้เพราะช่วงเวลาที่สารเจือปนต่าง ๆ จะถูกกรองออกจากน้ำโดยธรรมชาติ นั้นมีเพียงช่วงสั้น ๆ

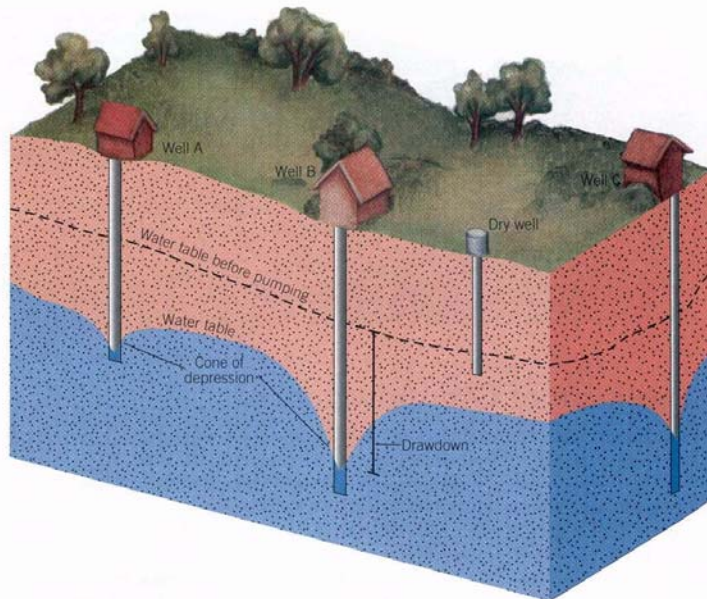


รูปที่ 1.6 การเกิดน้ำพุบริเวณที่ระดับน้ำบาดาลตัดกับผิวดิน (คัดลอกจาก Plummer and McGeary, 1993)

ในหินทราย อัตราการไหลของน้ำช้า ซึ่งจะทำให้สิ่งเจือปนต่าง ๆ ถูกกรองออกได้ แม้ว่าจะไหลผ่านในระยะทางช่วงสั้น ๆ แบคทีเรียที่มีโทษต่อร่างกายบางส่วนจะถูกทำลายโดยการกักเอาไว้ บางส่วนถูกทำลายเพราะขาดอาหารและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และบางส่วนถูกทำลายโดยสารหรือสัตว์ที่เป็นปฏิปักษ์ต่อกัน ในขณะที่น้ำไหลผ่านไปโดยเฉพาะในดิน



รูปที่ 1.7 ระดับน้ำบาดาลปลอม เกิดขึ้นเหนือหินที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ และแยกตัวจากระดับน้ำบาดาลใหญ่ (คัดลอกจาก Plummer and McGeary, 1993)



รูปที่ 1.8 เพื่อให้ได้น้ำบาดาลจำนวนมากควรเจาะบ่อให้ลึกลงไปในส่วนที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (คัดลอกจาก Dolgoff, 1998)

จากการประยุกต์กฎของดาร์ซี (Darcy's law) เราสามารถจะประมาณจำนวนน้ำที่จะสูบขึ้นมาได้จากบ่อหนึ่ง ๆ ซึ่งจำนวนน้ำที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดที่กำหนดไว้ในหนึ่งหน่วยเวลาสามารถจะคำนวณได้จากพื้นที่หน้าตัดนั้นและความเร็วของการไหล ซึ่งเขียนได้เป็น

$$V = \frac{Q}{A}$$

เมื่อ V คือ ความเร็วในการไหลของน้ำ

Q คือ ปริมาณน้ำที่ไหลในหนึ่งหน่วยเวลา

A คือ พื้นที่หน้าตัดที่น้ำไหลผ่าน

ดังนั้น จากกฎของดาร์ซี จะได้สูตรในการคำนวณหาปริมาณน้ำออกมาในรูปของความซึมได้ ความลาดของแรงดัน และพื้นที่หน้าตัด :

$$V = K \frac{h}{l} = \frac{Q}{A} \quad \text{หรือ} \quad Q = AK \frac{h}{l}$$

ซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณของน้ำที่จะสูบได้จากบ่อที่กำหนดให้ ถ้าทราบความลาดของแรงดัน h/l พื้นที่หน้าตัด A ที่น้ำไหลผ่าน และค่า K ซึ่งหมายถึงความซึมได้ของชั้นหิน ความหนืดของน้ำ และแรงดึงดูดของโลก ในการปฏิบัติจริง ๆ สิ่งที่เป็นปัญหาต่อการใช้สูตรนี้คือ การพิจารณาค่าความลาดของแรงดัน

น้ำบาดาลที่มีแรงดัน (Artesian water)

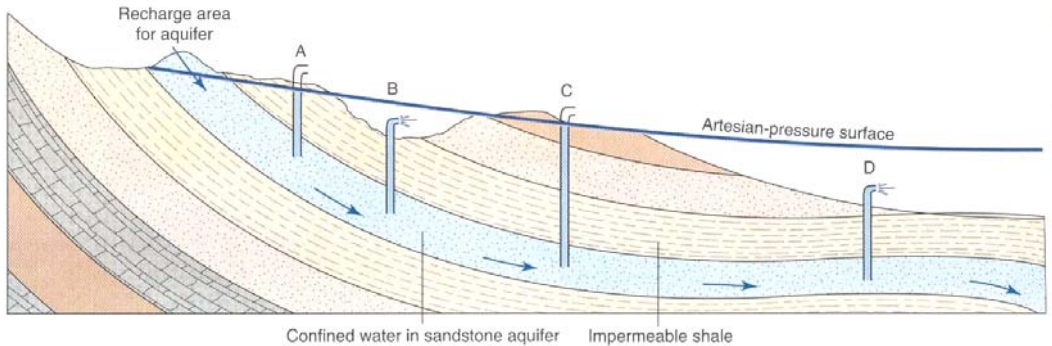
ตรงข้ามกับความคิดเห็นโดยทั่ว ๆ ไป น้ำบาดาลที่มีแรงดันไม่จำเป็นต้องขึ้นมาจากที่ลึก ๆ แต่สภาพที่จำเป็นสำหรับการที่จะก่อให้เกิดระบบของน้ำบาดาลที่มีแรงดันนั้นประกอบด้วย

1) น้ำซึ่งถูกกักเก็บไว้ในชั้นหินที่น้ำซึมผ่านได้ ที่เรียกว่า ชั้นหินอุ้มน้ำ และชั้นหินอุ้มน้ำนี้จะต้องเอียงให้ด้านหนึ่งไหลที่ผิวดินเพื่อรับน้ำ

2) ชั้นหินอุ้มน้ำนี้จะต้องปิดทับด้วยชั้นหินที่น้ำซึมผ่านไม่ได้

3) น้ำที่ถูกกักขังอยู่ในชั้นหินอุ้มน้ำ จะต้องไม่สามารถซึมลงไปสู่ข้างล่าง หรือไหลออกไปข้าง ๆ ได้

4) จะต้องมีความดันสูงพอที่จะดันน้ำให้สูงขึ้นมากกว่าระดับของชั้นหินอุ้มน้ำ ซึ่งถ้าแรงดันนี้มีค่าสูงพอ น้ำจะไหลขึ้นมาถึงผิวดินหรือพุ่งออกมาในลักษณะน้ำพุ (รูปที่ 1.9)



รูปที่ 1.9 บ่อน้ำในรูปอยู่ในสภาวะที่เรียกว่า น้ำบาดาลที่มีแรงดัน (คัดลอกจาก Hamblin and Christiansen, 2001)

น้ำพุร้อน (Thermal springs)

น้ำพุที่ให้น้ำอุ่นหรือน้ำร้อนเมื่อขึ้นมาถึงผิวดิน เรียกว่า น้ำพุร้อน (thermal springs, hot springs หรือ warm springs) ความร้อนดังกล่าวอาจเกิดจากเมื่อน้ำบาดาลไหลลึกลงไปได้ผิวโลก แล้วได้รับความร้อนจากภายในโลก และ/หรืออาจจะเป็นน้ำที่กระจายออกมาจากแมกมาแล้วพุ่งขึ้นมา น้ำร้อนที่ขึ้นมามักมีสารละลายของเกลือและก๊าซปนอยู่

น้ำพุไอน้ำร้อน (Geysers)

น้ำพุไอน้ำร้อนเป็นน้ำพุร้อนชนิดหนึ่ง ซึ่งส่วนที่พุ่งขึ้นมาส่วนใหญ่จะเป็นไอน้ำร้อนและมีน้ำร้อนปนอยู่บ้าง การพุ่งขึ้นนี้จะเกิดสลับกันเป็นช่วง ๆ กับการหยุด (รูปที่ 1.10)

การเกิดของน้ำพุไอน้ำร้อนอาจจะอธิบายได้ดังนี้ ในตอนแรกน้ำบาดาลไหลซึมลงไปสู่ใต้ผิวดินตามรอยแตกหรือช่องทางอื่น ๆ โดยธรรมชาติ และไปรวมตัวกันขังอยู่ในส่วนที่ลึกลงไป หินอัคนีที่ยังร้อนและหลอมเหลวอยู่ หรือไอร้อนที่เกิดจากหินพวกนี้จะไปทำให้อุณหภูมิของน้ำค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ในตอนนี้ความดันของน้ำยิ่งมากเท่าไร จุดเดือดจะยิ่งสูงขึ้นเท่านั้น และเนื่องจากในส่วนล่างของน้ำนี้ น้ำจะอยู่ภายใต้ความดันที่สูงมาก ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของน้ำสูงกว่า ส่วนบน ในที่สุดน้ำจะร้อนมากถึงขนาดที่ถ้า ถ้าเพิ่มความร้อนหรือลดความดันเพียงนิดหน่อยจะทำให้มันเดือด และที่จุดวิกฤตอันนี้น้ำในส่วนล่างจะได้รับความร้อนจนถึงจุดเดือด น้ำจะกลายเป็นไอก่อให้เกิดการขยายตัว แล้วดันเอาน้ำในส่วนบน รวมทั้งไอน้ำให้พุ่งขึ้นมาบนผิวดิน หลังจากนั้นไอน้ำพุ่งขึ้นมาแล้ว รอยแยกหรือรอยแตกนี้จะเริ่มมีน้ำไหลซึมเข้ามาอีก แล้วกระบวนการนี้จึงจะเริ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง (รูปที่ 1.11)



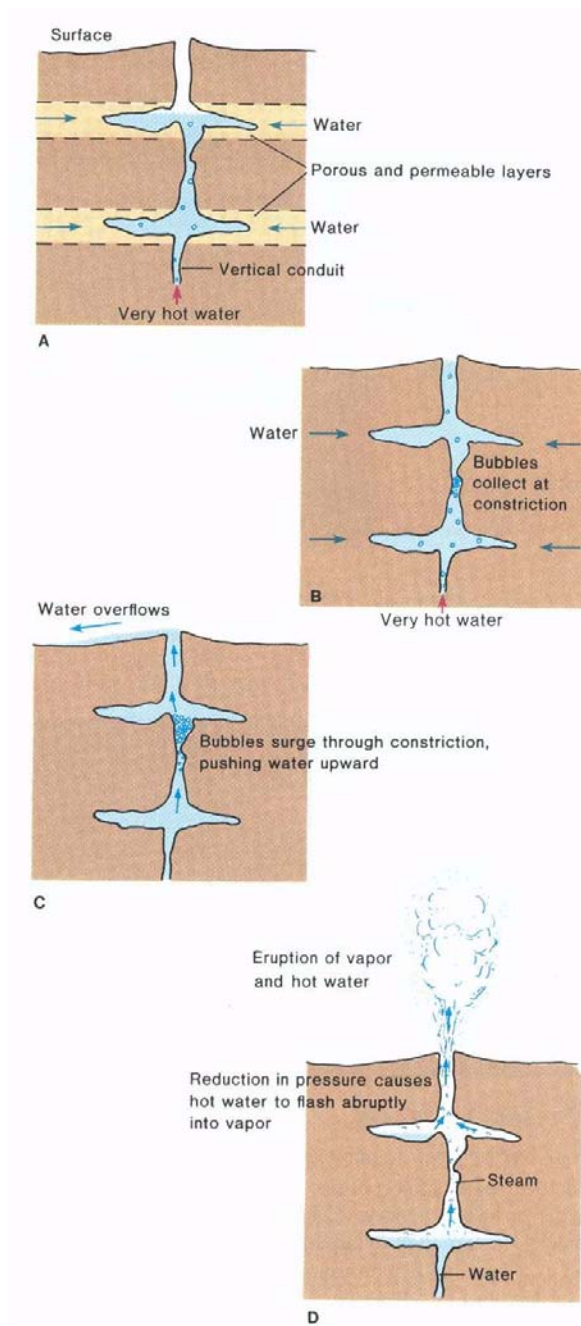
รูปที่ 1.10 น้ำพุไอน้ำร้อน (คัดลอกจาก Lutgens and Turbuck, 1996)

1.4 การเพิ่มเติมของน้ำบาดาล (Recharge of groundwater)

โดยทั่ว ๆ ไปแล้ว น้ำที่เข้าไปเพิ่มเติมแหล่งน้ำบาดาล คือ น้ำฝน ซึ่งจะซึมจากผิวดินลึกลงไปตามธรรมชาติ หรือไหลซึมลงไปตามช่องทางที่มนุษย์ทำขึ้น

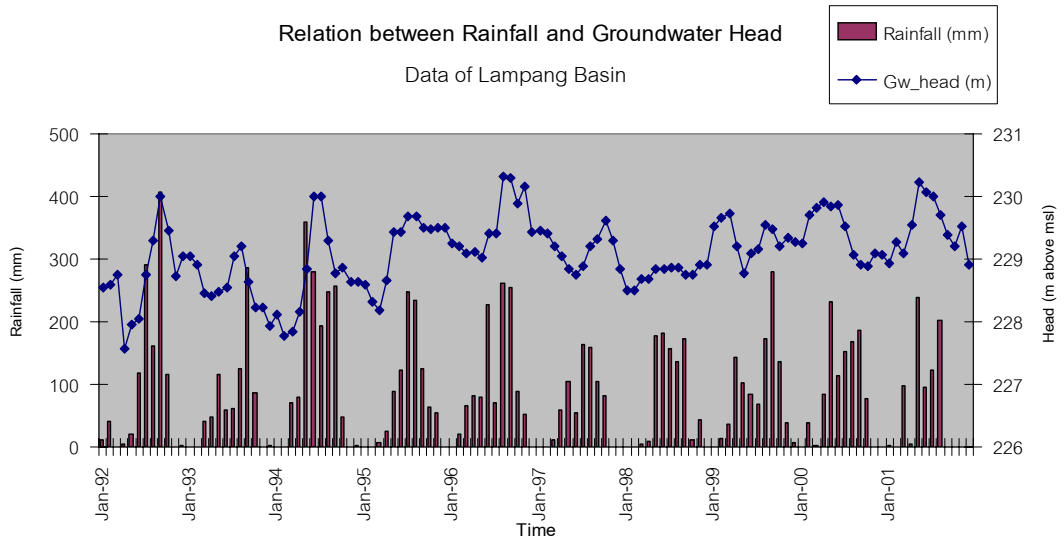
น้ำฝนบางส่วนเมื่อตกลงมาสู่ผิวดินจะซึมลงไปข้างใต้จนถึงส่วนอึดตัวด้วยน้ำ และทำให้ระดับน้ำบาดาลสูงขึ้น โดยทั่วไปเมื่อมีการบันทึกจำนวนของน้ำฝน และระดับน้ำบาดาลในช่วงเวลานานพอสมควร จะพบว่าปริมาณน้ำฝนและระดับน้ำบาดาลมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกันอยู่ (รูปที่ 1.12) แต่เนื่องจากการที่น้ำซึมลงไปได้อย่างช้า ๆ ทั้งในส่วนสัมผัสอากาศและส่วนอึดตัวด้วยน้ำ ทำให้การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลมีระยะเวลาช้าออกไปเล็กน้อย ภายหลังจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝน

จำนวนน้ำที่สามารถจะซึมลงไปถึงส่วนอึดตัวด้วยน้ำนั้น มีปัจจัยหลายอย่างที่เป็นตัวควบคุมอยู่ ตัวอย่างเช่น ในฤดูที่มีการเพาะปลูก น้ำฝนที่ตกลงมาจะเพิ่มความชื้นให้กับดินแล้วถูกพืชนำไปใช้ หรือสูญเสียไปเนื่องจากการระเหยเสียก่อน ซึ่งถ้าปริมาณน้ำที่สูญเสียไปนี้มีมาก ปริมาณน้ำฝนที่จะซึมลงไปสู่ส่วนอึดตัวด้วยน้ำจะเหลือน้อยลง ลักษณะของฝนที่ตกเป็นปัจจัยหนึ่งที่ควบคุมจำนวนน้ำที่ซึมลงไป คือถ้าฝนตกหนักและตกในช่วงเวลาสั้น ๆ น้ำฝนส่วนใหญ่จะกลาย



รูปที่ 1.11 การเกิดของน้ำพุร้อน (คัดลอกจาก Plummer and McGeary, 1993)

เป็นน้ำไหลลงไปสู่แม่น้ำลำธารมากกว่าที่จะซึมลงไปในดิน ฝนที่ตกน้อยแต่ตกเป็นช่วงเวลานาน ๆ จะทำให้น้ำฝนส่วนมากซึมลงไปในดินได้ดีกว่า ความลาดเอียงที่ชัน พื้นดินที่ขาดพืชปกคลุม หรือการที่มีชั้นหินที่ไม่ยอมให้น้ำซึมผ่านอยู่ใกล้ผิวดิน เป็นสาเหตุที่ทำให้จำนวนน้ำที่ซึมลงไปสู่ส่วนอึดตัวด้วยน้ำน้อยลงในบางครั้ง แม่น้ำลำธารจะเป็นแหล่งให้น้ำเพิ่มเติมแก่แหล่งน้ำบาดาลได้เหมือนกัน โดยน้ำจากแม่น้ำจะซึมเข้าสู่ส่วนอึดตัวด้วยน้ำของแหล่งน้ำบาดาล บางครั้งอาจจะซึมผ่านลงไปจากส่วนสัมผัสอากาศ



รูปที่ 1.12 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำบาดาลและปริมาณน้ำฝน

ในพื้นที่หลาย ๆ แห่งการเพิ่มเติมของน้ำบาดาลตามธรรมชาติ ไม่เพียงพอต่อความต้องการในการใช้น้ำของมนุษย์ผลตามาคือ การคิดค้นและศึกษาการที่จะเพิ่มเติมแหล่งน้ำบาดาลโดยการทำเทียมขึ้น ซึ่งอาจจะทำได้หลายวิธี อาทิเช่น การอัดน้ำภายใต้ความดันผ่านบ่อเจาะลงไป

1.5 ถ้าและลักษณะอย่างอื่นที่เกี่ยวข้อง (Cave and related features)

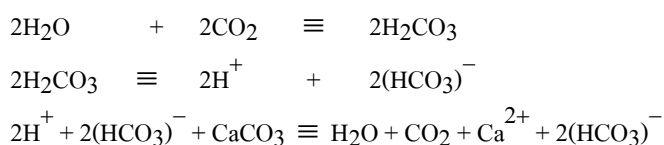
ถ้าเป็นลักษณะภูมิประเทศที่สำคัญอันหนึ่ง ซึ่งเกิดจากการกระทำของน้ำบาดาล ในขณะที่น้ำบาดาลไหลซึมลงไปได้ดี จะกัดกร่อนหินแข็งเป็นปริมาณมาก ก่อให้เกิดลักษณะเป็นห้องกว้าง ๆ หรือแคบแต่ยาว หรือเกิดธารน้ำไหลใต้ดิน ในถ้าบางแห่งจะเกิดการตกตะกอนของ

แคลเซียมคาร์บอเนตในขณะที่มีน้ำบาดาลหยดลงมาจากเพดานหรือผนังของถ้ำ ทำให้เกิดหินปูน น้ำจืด (dripstone) รูปร่างแปลก ๆ

โดยทั่ว ๆ ไปแล้วถ้ำทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่มักจะเกิดในหินปูน (CaCO_3) เป็นส่วนมาก แต่อาจจะมีถ้ำขนาดเล็กบางแห่งเกิดในหินโดโลไมต์ ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) เกลือหิน (NaCl) หินยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และหินชนิดอื่นที่ละลายน้ำได้

แคลไซต์ เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของหินปูน ซึ่งละลายได้น้อยมากในน้ำที่บริสุทธิ์ แต่จะละลายได้ดีมากในน้ำซึ่งมีกรดคาร์บอนิก(carbonic acid) เล็กน้อย โดยทั่ว ๆ ไปน้ำตามธรรมชาติจะมีกรดคาร์บอนิก(H_2CO_3) เป็นส่วนประกอบอยู่แล้ว ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของน้ำ (H_2O) กับคาร์บอนไดออกไซด์(CO_2) กรดคาร์บอนิกจะทำปฏิกิริยากับแคลไซต์ให้แคลเซียมไบคาร์บอเนต($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) ซึ่งเป็นสารละลายปนอยู่ในน้ำ ถ้าวัดแคลเซียมไบคาร์บอเนตนี้ไม่ตกตะกอน มันอาจจะไหลปนไปกับน้ำจนถึงทะเลหรือมหาสมุทร

หันมาพิจารณารายละเอียดในการที่น้ำบาดาลเป็นตัวนำสารละลายของแคลไซต์ไป แคลไซต์มีส่วนประกอบเป็นคอมเพลกซ์ คาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) (ซึ่งเกิดจากออกซิเจน 3 อะตอมล้อมรอบคาร์บอน 1 อะตอม) และแคลเซียม (Ca^{2+}) การรวมตัวของไอออนทั้งสอง เหมือนกับการที่ไฮโดรเจนไอออนกับคลอรีนไอออนมารวมตัวกันให้เกลือ (halite) การละลายของแคลไซต์จะเกิดเมื่อไฮโดรเจนไอออน H^+ อยู่ใกล้กับ CO_3^{2-} เนื่องจากแรงดึงดูดที่จะจับตัวกันระหว่างไฮโดรเจนกับออกซิเจนมีมากกว่าคาร์บอนกับออกซิเจน ดังนั้น อะตอมของไฮโดรเจนจะดึงเอาอะตอมของออกซิเจนมาจากคาร์บอเนตไอออน แล้วจับตัวกับไฮโดรเจนอีกอะตอมหนึ่งให้เป็นน้ำ ออกซิเจนอีก 2 อะตอมจะยังคงเหลือจับตัวกับคาร์บอนในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ดังนั้น แคลเซียมไอออน Ca^{2+} จะจับตัวกับไบคาร์บอเนตไอออน 2 ตัว (HCO_3^-) ให้ $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ละลายอยู่ในน้ำ ปฏิกิริยาดังกล่าวเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



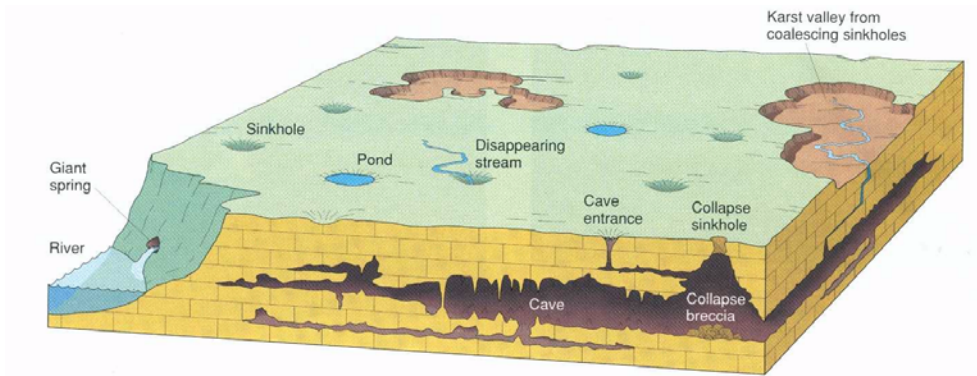
ปฏิกิริยาเคมีที่กล่าวแล้วข้างต้น คือ ปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดถ้ำและลักษณะอื่น ๆ ภายในถ้ำ ถึงแม้ว่าปฏิกิริยานี้จะสามารถทดลองได้ในห้องปฏิบัติการ หรือเกิดขึ้นได้จริง ๆ ในธรรมชาติ แต่ปฏิกิริยาดังกล่าวที่เกิดขึ้นในถ้ำอาจเปลี่ยนแปลงไปได้ เมื่อเวลาผ่านไปนาน ๆ

ลักษณะสองอย่างที่พบเสมอในถ้ำ คือ หินงอก (stalagmite) และหินย้อย (stalactite) ซึ่งเกิดจากการที่น้ำบาดาลมีส่วนประกอบเป็นแคลเซียมไบคาร์บอเนตละลายอยู่ ซึมผ่านมาตามเพดานของถ้ำแล้วหยดลงสู่พื้นถ้ำ ในขณะที่กำลังหยดอยู่นั้นจะเกิดการระเหยขึ้น คาร์บอนไดออกไซด์บางส่วนระเหยไป และแคลเซียมไบคาร์บอเนตจะตกตะกอน เวลาล่วงผ่านไปนานเท่าไร จำนวนของแคลเซียมไบคาร์บอเนตที่ตกตะกอนจะยิ่งมากขึ้น ส่วนที่ย่อยลงมาจากเพดานถ้ำ เรียกว่า หินย้อย ส่วนที่งอกจากพื้นถ้ำ เรียกว่า หินงอก

ผิวดินที่ปกคลุมอยู่บนหินที่ละลายน้ำได้ อาจเกิดลักษณะเป็นหลุม ๆ เนื่องจากน้ำละลายเอาเนื้อหินออกไป หลุมเหล่านี้เรียกว่า หลุมยุบ (sinkholes or sinks) ดังแสดงในรูปที่ 1.13 การเกิดของหลุมเหล่านี้เป็นไปได้สองอย่าง วิธีแรกคือ หินปูนที่อยู่ข้างใต้ผิวดินถูกละลายโดยตรง โดยการซึมลงไของน้ำ การละลายน้ำจะเกิดเป็นแห่ง ๆ ขึ้นอยู่กับปัจจัยในแต่ละบริเวณ อาทิเช่น บริเวณนั้นมีน้ำมากหรือหินปูนมีคุณสมบัติทางการละลายสูง ในที่สุดจะเกิดเป็นหลุมที่เรียกว่า หลุมยุบ อีกวิธีหนึ่ง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วหลุมยุบส่วนมากจะเกิดแบบนี้ คือ เกิดจากการยุบตัวลงไปเป็นโพรง ซึ่งจะทำให้หน้าไหลซึมลงไปตามหลุมนี้ ทำให้น้ำบาดาลเพิ่มขึ้น หรืออีกกรณีหนึ่ง ถ้าพื้นล่างของหลุมอุดตันทันน้ำซึมผ่านลงไปไม่ได้ เมื่อมีน้ำไหลลงไปในหลุมมาก ๆ เข้าอาจจะให้ลักษณะของทะเลสาบ ลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่ที่มีหลุมยุบปรากฏอยู่มากมาย เรียกว่า ลักษณะภูมิประเทศแบบคาร์สต์ (Karst topography) ดังในรูปที่ 1.14



รูปที่ 1.13 หลุมยุบ (คัดลอกจาก Brian and Stephen, 2000)



รูปที่ 1.14 การละลายของหินปูนใต้ดินไม่เพียงแต่ก่อให้เกิดถ้ำหินงอกและหินย้อยเท่านั้นยังอาจทำให้เกิดภูมิประเทศคาร์สต์ ที่ผิวโลกได้อีกด้วย (คัดลอกจาก Plummer and McGeary, 1993)

2 การพัฒนาน้ำบาดาล

การพัฒนาน้ำบาดาล หมายถึง วิธีการที่จะนำน้ำบาดาลจากชั้นหินที่กักเก็บน้ำอยู่ภายใต้ผิวดิน ขึ้นมาใช้ประโยชน์

ขั้นตอนของการพัฒนาน้ำบาดาล ประกอบด้วย

1. การสำรวจน้ำบาดาล
2. การเจาะบ่อ
3. การปรับปรุงและการพัฒนาบ่อ
4. การสูบทดสอบ
5. การตรวจสอบและการปรับปรุงคุณภาพน้ำ
6. การบำรุงรักษา

2.1 การสำรวจน้ำบาดาล (Groundwater Exploration)

การสำรวจน้ำบาดาล โดยทั่วไปมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทราบว่า ในบริเวณพื้นที่สำรวจมีน้ำบาดาลอยู่หรือไม่ มีปริมาณมากน้อยเท่าใด จะสามารถพัฒนาน้ำขึ้นมาใช้ได้เท่าไร คุณภาพน้ำบาดาลเป็นอย่างไร ดังนั้นการสำรวจจะต้องครอบคลุมเพียงพอที่จะตอบคำถามเหล่านี้ได้

การสำรวจแบ่งออกได้เป็น 2 แบบใหญ่ ๆ คือ

- 2.1.1 การสำรวจทางด้านธรณีวิทยาและอุทกธรณีวิทยา
- 2.1.2 การสำรวจทางด้านธรณีฟิสิกส์

2.1.1 การสำรวจทางด้านธรณีวิทยาและอุทกธรณีวิทยา (Geological and Hydrogeological Survey)

การสำรวจทางด้านธรณีวิทยา หมายถึง การสำรวจเพื่อให้ได้ข้อมูลทางด้านธรณีวิทยาที่สำคัญ ซึ่งประกอบด้วย ชนิดหินและการกระจายตัว โครงสร้างของหิน โดยที่ข้อมูลเหล่านี้ในเบื้องต้นสามารถจะศึกษาได้จากแผนที่ภูมิประเทศ แผนที่ธรณีวิทยา ภาพถ่ายทางอากาศ รวมทั้งข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียม นอกจากนั้น อาจจะต้องทำการสำรวจในภาคสนามเพิ่มเติม เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องและเป็นจริง

การสำรวจทางด้านอุทกธรณีวิทยา หมายถึง การสำรวจเพื่อให้ได้ข้อมูลทางด้านอุทกธรณีวิทยาที่สำคัญซึ่งประกอบด้วย ชนิดหินที่กักเก็บน้ำ ความพรุนและความซึมได้ของหิน อันจะช่วยบ่งชี้ถึงความสามารถในการกักเก็บและการจ่ายน้ำ โดยข้อมูลเหล่านี้ในเบื้องต้นสามารถจะ

ศึกษาได้จากแผนที่อุทกธรณีวิทยา นอกจากนั้นการศึกษาข้อมูลทางด้านอุทุนิยมวิทยา ได้แก่ ปริมาณน้ำฝน และปริมาณการระเหย จัดเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างมากเช่นกัน เนื่องจากน้ำบาดาลเกิดขึ้นได้จากการซึมลงไของน้ำฝน ไปกักเก็บอยู่ภายใต้ผิวดิน

การสำรวจด้านธรณีวิทยาและอุทกธรณีวิทยา ในภาพรวมจะให้ข้อมูลที่สำคัญบนผิวดินเท่านั้น

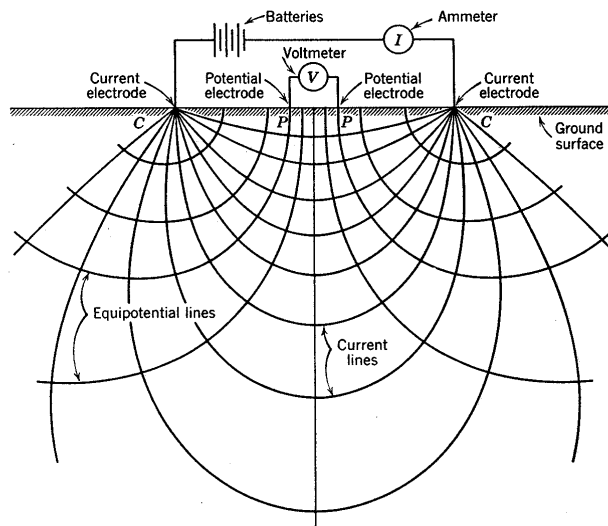
2.1.2 การสำรวจทางด้านธรณีฟิสิกส์ (Geophysical Survey)

การสำรวจทางด้านธรณีฟิสิกส์ เป็นการสำรวจโดยการวัดคุณสมบัติทางกายภาพของสิ่งที่อยู่ภายใต้ผิวดิน เพื่อแปลความหมายออกมาเป็นชนิดของหินและโครงสร้างของหิน การสำรวจจะกระทำโดยการใช้เครื่องมือที่ออกแบบมาโดยเฉพาะ ทำการตรวจวัดที่ผิวดิน จากนั้นนำข้อมูลมาแปลความหมายเพื่อให้ได้ข้อมูลภายใต้ผิวดินที่ต้องการ

การสำรวจทางด้านธรณีฟิสิกส์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดในประเทศไทย เพื่อให้ได้ข้อมูลทางด้านน้ำบาดาล คือ การสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ

การสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Resistivity Survey)

หลักการพื้นฐานของการสำรวจ ได้แก่ การปล่อยกระแสไฟฟ้าให้ผ่านลงไปยังผิวดิน แล้วทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะซึ่งเป็นสัดส่วนกลับของค่าการนำไฟฟ้า



รูปที่ 2.1 การสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะโดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าลงไปได้ดิน แล้ววัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (ดัดแปลงจาก Telford et al, 1990)

โดยทั่วไป หินซึ่งประกอบขึ้นมาจากแร่ประกอบหิน จะไม่นำไฟฟ้า ยกเว้นจะมีน้ำแทรกอยู่ในเนื้อของหิน ดังนั้นการนำไฟฟ้าของหิน จึงขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 2 ประการ คือ ปริมาณน้ำที่แทรกอยู่และคุณภาพน้ำที่แทรกอยู่ หินที่มีความพรุนดี ส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะต่ำ คุณภาพของน้ำที่แทรกอยู่เป็นตัวควบคุมค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะเช่นกัน โดยน้ำที่คุณภาพดียังมีแร่ธาตุเจือปนอยู่สูง จะนำไฟฟ้าได้ดีกว่าน้ำที่มีคุณภาพดี ส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะต่ำกว่า

ตาราง 2.1 ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของหินและแร่ (คัดลอกจากกิตติชัย วัฒนานิกกร, 2526)

ชนิดของหิน/แร่	ความต้านทานจำเพาะ (โอห์ม-เมตร)
ดินเหนียว	1-100
ตะกอนลำน้ำและทราย	10-800
หินอัคนี	
หินแอนดีไซต์	$1.7 \times 10^2 - 4.5 \times 10^4$
หินแกรนิต	$3 \times 10^2 - 10^6$
หินบะซอลต์	$10 - 1.3 \times 10^7$
หินชั้น	
หินดินดาน	$20 - 2 \times 10^3$
หินทราย	$1 - 6.4 \times 10^8$
หินปูน	$50 - 10^7$
หินแปร	
หินควอร์ตไซต์	$10 - 2 \times 10^8$
หินชีสต์	$20 - 10^4$
แร่	
คาลโคไพไรต์	$1.2 \times 10^{-5} - 0.3$
ไพไรต์	$2.9 \times 10^{-5} - 1.5$
ฟิรโรไทต์	$6.5 \times 10^{-6} - 5 \times 10^{-2}$
แคสซิเทอไรต์	$4 \times 10^{-4} - 10^4$
วุลแฟรมไต์	$10 - 10^5$
แมกนีไทต์	$5 \times 10^{-5} - 5.7 \times 10^3$

2.2 การเจาะบ่อ (Well Drilling)

การเจาะบ่อ มีวิธีการหลาย ๆ แบบที่ใช้เครื่องมือแตกต่างกันออกไป ซึ่งการเลือกวิธีการเจาะบ่อโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับชนิดของหินที่อยู่ภายใต้ผิวดินและความลึกที่ต้องการเจาะเป็นสำคัญ ในที่นี้จะอธิบายวิธีการ 3 วิธีการใหญ่ ๆ ซึ่งนิยมใช้กัน ได้แก่

2.2.1 การเจาะแบบกระแทก (Percussion Drilling/Cable Tool Drilling) การเจาะแบบนี้ โดยทั่วไปใช้กับการเจาะบ่อขนาดใหญ่ และเจาะในหินแข็ง ซึ่งหลักการของการเจาะแบบนี้ได้แก่การใช้ลวดสลิงไปร้อยกับหัวเจาะ ซึ่งมีลักษณะเหมือนลิ้ว แต่มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก แล้วยกสลิงหรือหัวเจาะให้ขึ้นลง เพื่อกระแทกให้หินแตกออก และใช้จังหวะการบิดตัวของลวดสลิงหมุนหัวเจาะคว้านให้รูกลม เศษหินที่เจาะแตกออกจะนำขึ้นมาสู่ผิวดินโดยการตักด้วยกระบอกลูก หัวเจาะส่วนใหญ่ออกแบบให้แข็งเป็นพิเศษ และมีขนาดใหญ่เล็กหลายขนาด จึงสามารถเจาะในหินได้ทุกชนิด ตามขนาดที่ต้องการได้ การทำงานใช้เครื่องยนต์และเครื่องผ่อนแรงเป็นระบบอัตโนมัติ

ข้อดีของการเจาะแบบกระแทก

- สามารถเจาะในหินได้ทุกประเภท
- เมื่อเจาะถึงชั้นน้ำ จะรู้ได้ทันที และสามารถทดสอบปริมาณน้ำในแต่ละชั้นได้ด้วย
- ไม่ต้องใช้น้ำในการเจาะมาก

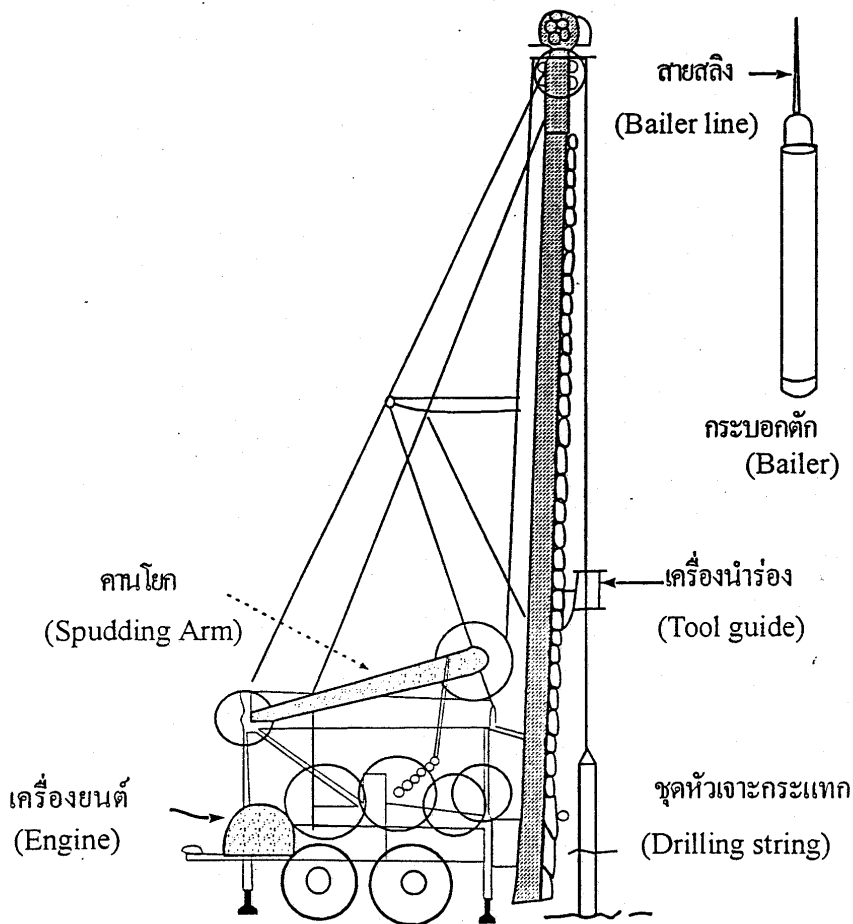
ส่วนข้อจำกัดของการเจาะแบบกระแทก ได้แก่

- เจาะได้ช้า และจะยิ่งช้าลงเมื่อเจาะในหินร่วน เนื่องจากปัญหาบ่อพัง
- การเจาะในหินแข็ง มักจะได้บ่อไม่กลม ในกรณีที่หินวางตัวเอียงเทจะทำให้บ่อคด

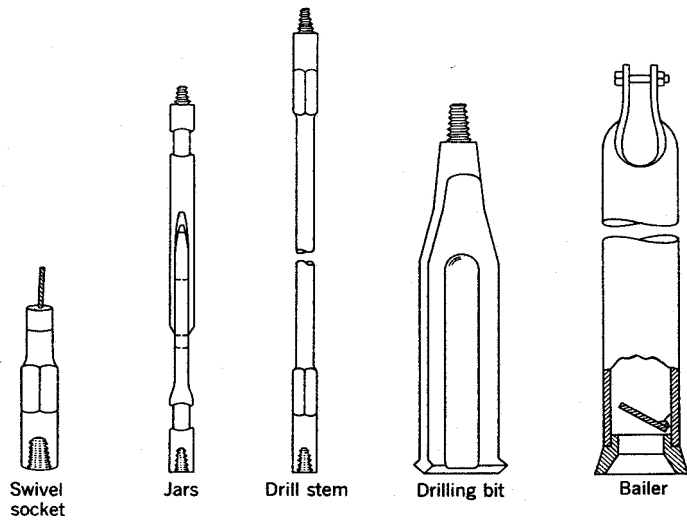
2.2.2 การเจาะแบบหมุน (Rotary Drilling)

การเจาะแบบหมุน แบ่งออกได้เป็น 2 วิธีการ คือ การเจาะแบบหมุนตรง (Direct Rotary Drilling) และการเจาะแบบหมุนย้อนกลับ (Reverse Rotary Drilling) โดยการเจาะทั้งสองแบบใช้การหมุนของหัวเจาะ พร้อม ๆ กับมีแรงกดให้หัวเจาะกดหินเป็นรูกลม แรงหรือพลังงานที่ใช้ในการหมุนมาจากเครื่องยนต์และถ่ายทอดไปสู่หัวเจาะด้วยระบบก้านเจาะซึ่งประกอบด้วย ก้านนำเจาะ ก้านเจาะ และหัวเจาะ ซึ่งอุปกรณ์ทั้งหมดทำด้วยเหล็กกล้าอย่างดี ทนแรงบิดและแรงดึงสูง ต่อเชื่อมเข้าด้วยกันด้วยข้อต่อแบบต่าง ๆ

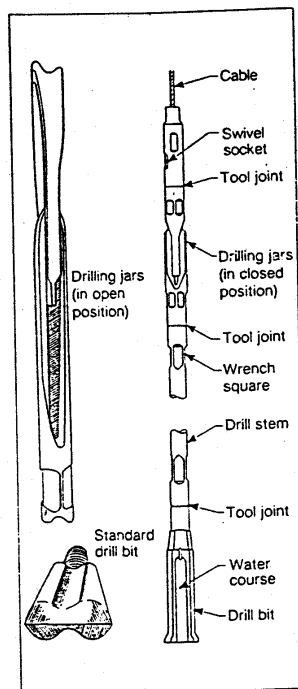
ความแตกต่างของการเจาะแบบหมุนตรงและการเจาะแบบหมุนย้อนกลับ จะอยู่ที่ลักษณะการไหลของน้ำโคลน โดยการเจาะแบบหมุนตรงนั้นหัวเจาะจะหมุนตามเข็มนาฬิกาในขณะที่เจาะ เครื่องสูบน้ำจะอัดน้ำโคลนผ่านไส้กลวงของก้านเจาะไปฉีดออกที่หัวเจาะ แล้วน้ำโคลนจะอุ้มเอาเศษหินที่เกิดจากการเจาะขึ้นมาตามช่องว่างระหว่างก้านเจาะและผนังบ่อ ในขณะที่การเจาะแบบหมุนย้อนกลับ หัวเจาะจะหมุนตามเข็มนาฬิกาเช่นกัน แต่ระบบน้ำโคลนจะไหลย้อนกลับทิศทางการกับแบบแรก กล่าวคือ น้ำโคลนจะไหลลงไปตามช่องว่างระหว่างก้านเจาะกับผนังบ่อ จากนั้นเครื่องสูบน้ำจะดูดน้ำโคลนและเศษหินที่เกิดจากการเจาะผ่านหัวเจาะเข้าสู่ไส้กลวงของก้านเจาะมาออกที่ปากบ่อ โดยผ่านหลุมตกตะกอน แล้วไหลลงสู่บ่อน้ำโคลน



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของเครื่องเจาะแบบกระแทก (คัดลอกจาก ภาควิชาเทคโนโลยีธรณี,



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องเจาะแบบกระแทก (คัดลอกจาก Todd, 1980)



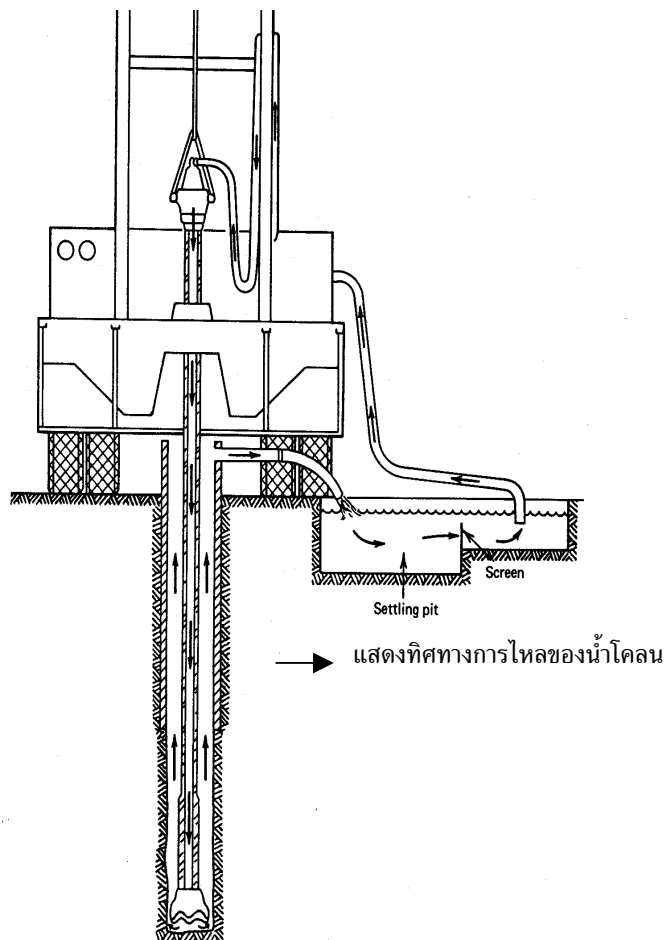
รูปที่ 2.4 ชุดอุปกรณ์กระแทกของเครื่องเจาะแบบกระแทก (คัดลอกจาก Todd, 1980)

น้ำโคลน (Drilling mud) ประกอบด้วย น้ำ เบนโทไนท์ ดินเหนียว แบริต์ และสารเพิ่มเติมทางอินทรีย์ต่าง ๆ ส่วนผสมของน้ำโคลนต้องคำนึงถึงน้ำหนักและความหนืดเป็นสำคัญ ข้อดีของการเจาะแบบหมุน ได้แก่

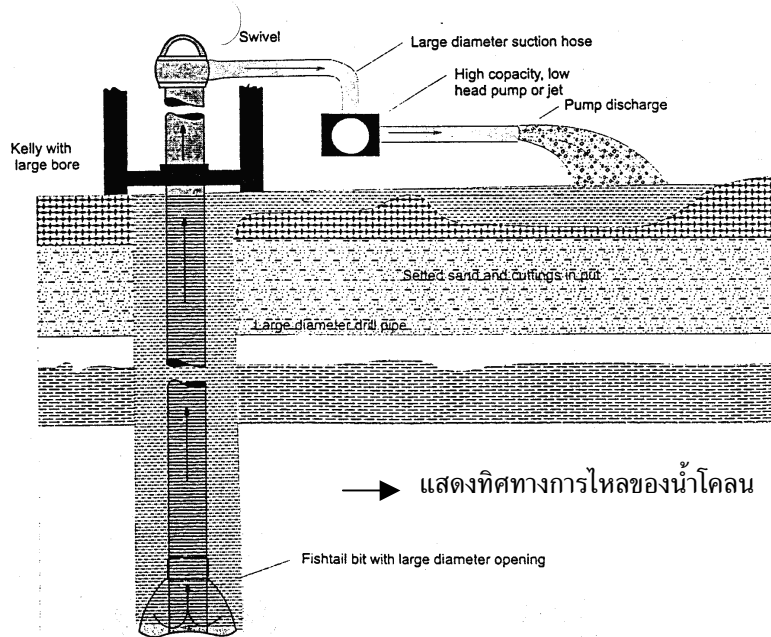
- เจาะได้เร็วและลึก
- เจาะบ่อได้ทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่

ส่วนข้อจำกัดของการเจาะแบบหมุนคือ

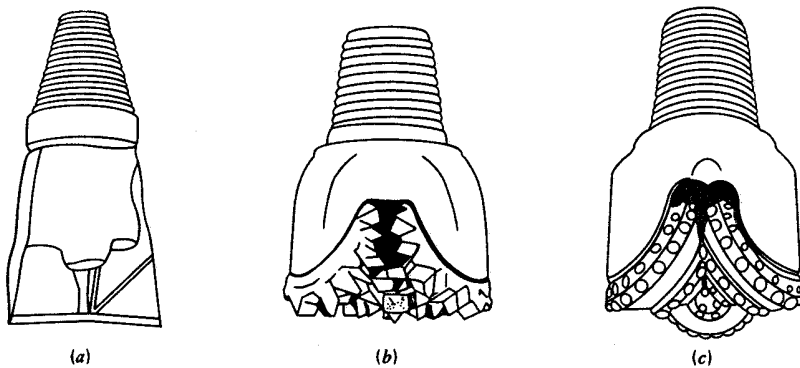
- ใช้น้ำในการเจาะมาก
- ตัวอย่างเศษหินจากการเจาะไม่แน่นอน/ให้ข้อมูลไม่ดี



รูปที่ 2.5 การเจาะแบบหมุนตรง (คัดลอกจาก ภาควิชาเทคโนโลยีธรณี, 2542)



รูปที่ 2.6 การเจาะแบบหมุนย้อนกลับ (คัดลอกจาก ภาควิชาเทคโนโลยีธรณี, 2542)

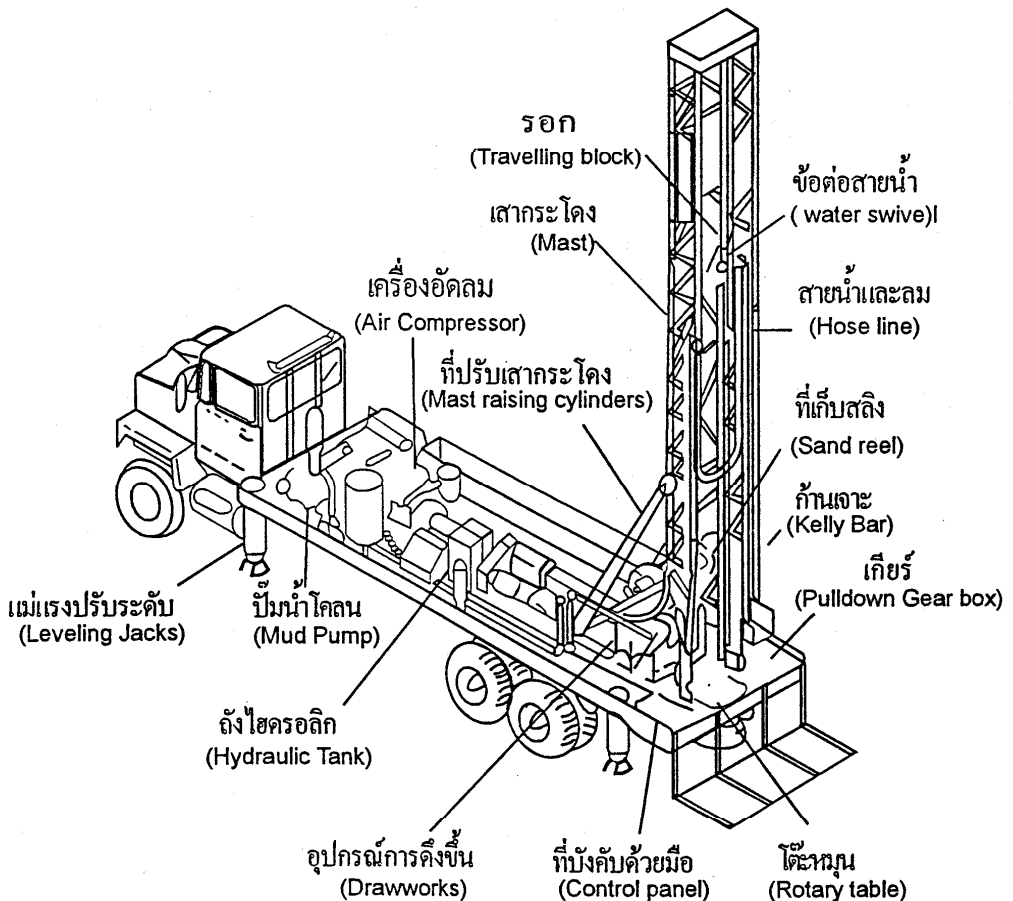


รูปที่ 2.7 หัวเจาะสำหรับการเจาะแบบหมุน (a) Fishtail bit (b) Cone-type bit (c) Carbide button bit (คัดลอกจาก ภาควิชาเทคโนโลยีธรณี, 2542)

2.2.3 การเจาะแบบใช้ลม (Air Rotary/ Hammers)

การเจาะบ่อแบบนี้ เป็นเทคนิคผสมผสานระหว่างการเจาะแบบหมุนตรงและการเจาะแบบกระแทก โดยลักษณะการเจาะจะเป็นการกระแทกชั้นหินให้ละเอียด แล้วเปลี่ยนมุมกระแทกเป็นวงกลม จากนั้นจึงนำเอาเศษหินขึ้นมายังปากบ่อโดยใช้ลม เครื่องมือสำคัญของการเจาะลักษณะนี้คือ ชูตแฮมเมอร์ ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานลมจากเครื่องอัดอากาศเป็นพลังงานกล แล้วส่งต่อไปยังหัวเจาะเพื่อกระแทก โดยชูตแฮมเมอร์จะติดตั้งอยู่ที่ช่วงปลายของก้านเจาะที่ต่อกับหัวเจาะ

การเจาะแบบใช้ลม สามารถเจาะได้ดีในหินแข็ง และเจาะได้รวดเร็ว เมื่อเจาะถึงชั้นน้ำจะทราบได้ทันที เพราะน้ำจะออกมาตามลมที่เป่า



รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบของชุดเจาะแบบกระแทกและชุดเจาะแบบหมุนสำหรับการเจาะแบบใช้ลม (คัดลอกจาก ภาควิชาเทคโนโลยีธรณี, 2542)

2.3 การปรับปรุงและการพัฒนาบ่อ (Well Completion and Well Development)

2.3.1 การปรับปรุงบ่อ (Well Completion)

การปรับปรุงบ่อหรือการทำบ่อ ได้แก่ การทำรูเจาะให้เป็นบ่อน้ำ เพื่อพัฒนาน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ประโยชน์ และเพื่อป้องกันการพังทลายของบ่อ การปรับปรุง ประกอบด้วย การออกแบบบ่อ การใส่ท่อกรู และการกรกรวด

การออกแบบบ่อ (Well Design)

การออกแบบบ่อ หมายถึง การนำรายละเอียดต่างๆ ที่ได้จากการเจาะบ่อ มาวางแผนการทำบ่อให้ได้ผลดีที่สุด ทั้งในด้านคุณภาพและปริมาณน้ำ หลักใหญ่ของการออกแบบบ่อ คือ การใส่ท่อกรูและท่อกรองให้ได้ขนาดที่เหมาะสม และอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง เช่น ท่อกรูจะต้องมีความยาวอย่างน้อย 2/3 ของความหนาของชั้นน้ำ และต้องใส่ท่อกรองให้ตรงกับตำแหน่งของชั้นน้ำ เป็นต้น

การใส่ท่อกรู (Casing)

ท่อกรูที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน แบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. ท่อกรูทึบ (Solid / Blank Casing)

เป็นท่อกลวง ผนังท่อนไม่มีรูเปิดให้น้ำไหลเข้าออกได้ ส่วนใหญ่ใช้สำหรับลงเพื่อป้องกันการพังทลายของบ่อ การปนเปื้อนของสิ่งสกปรกต่าง ๆ

2. ท่อกรูเจาะร่อง (Perforated / Slotted Casing)

เป็นท่อกรูทึบที่นำมาเจาะร่องที่ผนังของท่อ ใช้วางในตำแหน่งของชั้นน้ำที่ต้องการให้น้ำไหลเข้าบ่อ

3. ท่อกรอง (Screen)

เป็นท่อที่ทำจากลวดเส้นเล็ก ๆ พันกันเป็นตาราง ช่องว่างจะเป็นรูให้น้ำไหลเข้า เรียกว่า Slot opening หรือ Slot number ซึ่งช่องว่างระหว่างเส้นลวดจะมีขนาดต่าง ๆ กัน คิดเป็นเศษของ 1,000 ส่วนของนิ้ว เช่น Slot number 50 หมายความว่า มีช่องว่างขนาด 50/1,000 นิ้ว

ท่อกรูที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เป็นท่อเหล็กเหนียว Line pipe ซึ่งผลิตตามมาตรฐานของสถาบันปิโตรเลียมแห่งสหรัฐอเมริกา หรือ API (American Petroleum Institute) เป็นท่อที่มีความทนทาน มีอายุการใช้งานได้นาน ท่อที่นิยมใช้รองลงมาเป็นท่อเหล็กเหนียวที่เรียกว่า Standard pipe ซึ่งผลิตตามมาตรฐานของสมาคม ASTM (American Standard of Testing Material) ท่ออีกประเภทหนึ่งที่นิยมคือ ท่อเหล็กชุบสังกะสี-Galvanized steel pipe หรือที่เรียกว่า ท่อไกว่ แป้น้ำ ผลิตตามมาตรฐานของอังกฤษ (BS หรือ British Standard) เป็นท่อที่มีราคา

ถูกกว่าสองแบบแรก แต่มีระยะเวลาการใช้งานสั้น โดยเฉพาะในสภาพการที่น้ำบาดาลมีฤทธิ์กัดกร่อน

ในการปรับปรุงบ่อ จะใส่ท่อกรุตั้งแต่ปากบ่อถึงก้นบ่อ บริเวณที่เป็นชั้นน้ำจะใส่ท่อเจาะเจาะร่องหรือท่อกรอง เพื่อเป็นช่องทางให้น้ำไหลเข้าบ่อ ท่อเจาะร่องมีราคาถูกกว่าท่อกรองมาก แต่มีข้อด้อยที่มีช่องว่างให้น้ำไหลเข้าบ่อได้น้อยกว่า เนื่องจากถ้าเจาะร่องชิดกันมากจะทำให้ท่อไม่แข็งแรง

การเลือกใช้ท่อให้มีขนาดของช่องว่างที่เหมาะสม ใช้หลักการว่ายอมให้เม็ดทรายละเอียดผ่านเข้าสู่ท่อกรองหรือท่อเจาะร่องได้ประมาณ 50-60 เปอร์เซ็นต์ ทรายเม็ดหยาบหรือกรวดที่ค้างอยู่นอกท่อ จะช่วยให้น้ำซึมเข้าได้ง่ายและช่วยกรองน้ำได้ด้วย

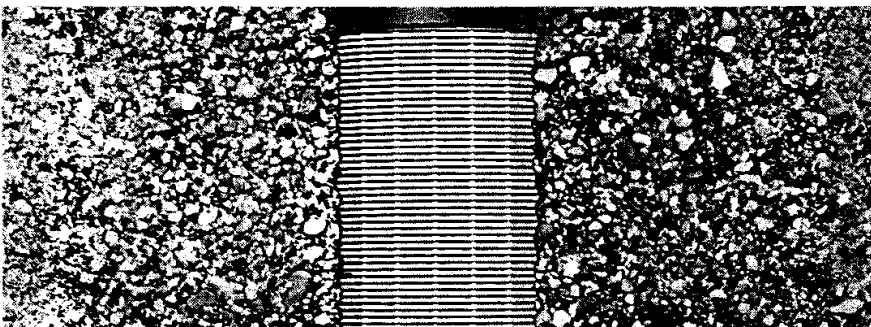
การกรุกรวด (Gravel Packing)

เนื่องจากบ่อที่เจาะมีขนาดใหญ่กว่าท่อกรุที่ใส่ลงไป ดังนั้นช่องว่างระหว่างท่อและผนังบ่อจึงต้องใส่กรวดไว้โดยรอบ เพื่อช่วยให้น้ำไหลเข้าบ่อได้โดยง่าย และยังช่วยกรองตะกอนขนาดเล็กไม่ให้ไหลเข้าบ่อ และช่วยไม่ให้ดินหรือทรายจากส่วนอื่นๆ พังลงไปทับท่อกรุท่อกรอง การกรุกรวดที่ถูกต้องจะช่วยทำให้น้ำไหลเข้าบ่อมากกว่าธรรมดา ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้กรวดที่ถูกต้องขนาด และได้สัดส่วนกับรูเปิดของท่อเจาะร่องหรือท่อกรอง

2.3.2 การพัฒนาบ่อ (Well Development)

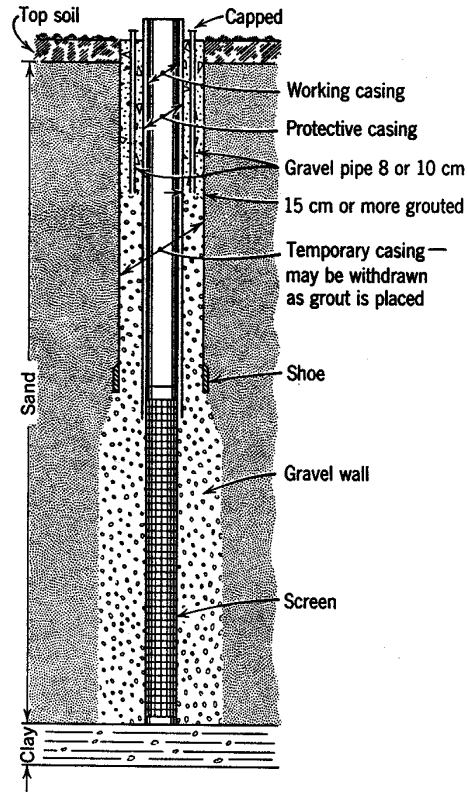
การพัฒนาบ่อมีวัตถุประสงค์ที่จะทำให้บ่อมีน้ำเพิ่มมากขึ้น ป้องกันไม่ให้ทรายไหลเข้าบ่อ และทำให้บ่อมีอายุการใช้งานได้นาน ซึ่งจะกระทำได้โดยใช้วิธีการต่างๆ เพื่อให้เม็ดกรวดทรายที่อยู่รอบบ่อเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ทำให้มีความพรุนและความซึมได้สูง

ในปัจจุบันการพัฒนาบ่อวิธีที่นิยมมากที่สุด ได้แก่ การเป่าล้างด้วยลม ซึ่งทำให้โดยการอัดลมเข้าไปในบ่อ หลังจากนั้นลมจะดันน้ำขึ้นมาพร้อมกับเม็ดทรายละเอียด การเป่าล้างจะต้องคอยดึงท่อขึ้นลงเป็นช่วง ๆ จนกว่าทรายละเอียดจะไม่เข้าบ่ออีกต่อไป



รูปที่ 2.9 การพัฒนาบ่อที่ถูกต้องตามวิธีการ จะมีกรวดที่ขนาดใกล้เคียงกันมากอยู่รอบท่อกรอง (คัดลอกจาก Todd, 1980)

รูปที่ 2.10 บ่อบาดาลที่กรูกรวดแล้ว
(คัดลอกจาก Todd, 1980)



2.4 การสูบทดสอบ (Pumping Test)

การสูบทดสอบเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องกระทำ ภายหลังจากการปรับปรุงและพัฒนาบ่อเสร็จแล้ว เพื่อให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณน้ำที่สามารถสูบขึ้นมาใช้ โดยข้อมูลเหล่านี้จะใช้เพื่อการเลือกเครื่องสูบน้ำให้ถูกต้องและเหมาะสม

การสูบทดสอบแบบธรรมดา ทำได้โดยการใช้เครื่องสูบน้ำทำการสูบน้ำออกให้มากที่สุด วัดระดับน้ำในบ่อก่อนทำการสูบ ในขณะที่สูบและหลังจากหยุดสูบแล้ว ซึ่งตัวเลขที่ได้สามารถนำไปคำนวณหาขนาดของเครื่องสูบน้ำ แต่การสูบทดสอบที่ถูกต้องตามหลักการจริงๆ สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ การสูบทดสอบชั้นหินอุ้มน้ำ และการสูบทดสอบประสิทธิภาพของบ่อ

2.4.1 การสูบทดสอบชั้นหินกักเก็บน้ำ (Aquifer Test)

การสูบทดสอบแบบนี้นิยมใช้กันแพร่หลายมาก โดยมีจุดประสงค์หลักเพื่อการศึกษาคุนสมบัติทางชลศาสตร์ของชั้นหินกักเก็บน้ำ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์ของความซึมได้

(Hydraulic Conductivity-K) ค่าสัมประสิทธิ์ของการจ่ายน้ำ (Transmissivity-T) และค่าสัมประสิทธิ์ของการกักเก็บ (Storage Coefficient-S)

วิธีการสูบทดสอบชั้นหินกักเก็บน้ำ ทำได้โดยการสูบน้ำออกจากบ่อด้วยอัตราสม่ำเสมอ ทำการวัดอัตราการสูบน้ำ วัดระดับน้ำในบ่อก่อนสูบ ในระหว่างการสูบ หลังการหยุดสูบตามเวลาต่าง ๆ ที่น้ำกำลังคืนตัว แล้วนำค่าเหล่านี้มาคำนวณโดยสมการทางด้านอุทกธรณีวิทยา เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสมบัติทางชลศาสตร์ของชั้นหินกักเก็บน้ำ

2.4.2 การสูบทดสอบประสิทธิภาพของบ่อ (Well Production Test)

การสูบทดสอบแบบนี้คล้ายคลึงกับแบบแรก แต่จุดประสงค์ของการสูบทดสอบต่างกัน โดยต้องการทราบถึงลักษณะการทำงานของบ่อ (Well Performance) ประสิทธิภาพของบ่อ (Well Efficiency) และการรบกวนกันของบ่อ (Well Interference) การสูบทดสอบสามารถทำได้ 2 ลักษณะ คือ สูบด้วยอัตราคงที่ไม่น้อยกว่า 8 ชั่วโมง หรือสูบด้วยอัตราที่เปลี่ยนแปลงโดยสูบช่วงแรกด้วยอัตราที่ต่ำในช่วงระยะเวลาหนึ่งแล้วเปลี่ยนอัตราสูบให้สูงขึ้นไปอีกเป็นขั้นตอน ในแต่ละขั้นตอนทำการวัดระดับน้ำในบ่อตามช่วงเวลาต่าง ๆ จากนั้นนำข้อมูลมาคำนวณทางด้านอุทกธรณีวิทยา เพื่อให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับการทำงานของบ่อ ประสิทธิภาพของบ่อและการรบกวนกันของบ่อ

2.5 การตรวจสอบและปรับปรุงคุณภาพน้ำ (Water Quality Test and Water Treatment)

2.5.1 การตรวจสอบคุณภาพน้ำ (Water Quality Test)

คุณภาพน้ำบาดาล มีความสำคัญต่อการพัฒนาน้ำบาดาลมากเช่นเดียวกับความสำคัญของปริมาณน้ำบาดาล เนื่องจากคุณภาพของน้ำบาดาลจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการนำไปใช้ประโยชน์ โดยทั่วไปเมื่อพัฒนาน้ำบาดาลจากพื้นที่ใด ๆ ที่ทราบถึงชนิดของชั้นหินที่กักเก็บน้ำ จะทำให้ประเมินถึงคุณภาพของน้ำได้ อาทิ น้ำบาดาลที่ได้จากหินอัคนี ส่วนใหญ่จะละลายเอาแร่ธาตุออกไปจากหินได้น้อย เนื่องจากหินอัคนีละลายน้ำได้ยาก ส่วนน้ำบาดาลที่อยู่ในหินตะกอน มีโอกาสได้รับแร่ธาตุเพิ่มมากขึ้น เพราะส่วนประกอบของหินตะกอนบางอย่างละลายน้ำได้ง่าย

ในการที่จะนำน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ประโยชน์ จะต้องมีการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์คุณภาพทั้งทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ เมื่อได้ข้อมูลแล้วจึงนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐาน เพื่อประเมินความเหมาะสมของการใช้ประโยชน์ โดยทั่วไปอาจจำแนกการใช้น้ำบาดาลได้เป็น 3 ประเภท คือ การใช้เพื่ออุปโภค-บริโภค การใช้เพื่อการเกษตรกรรม หรือการชลประทาน และการการใช้เพื่อการอุตสาหกรรม ซึ่งในการใช้งานแต่ละประเภท จะมีมาตรฐานคุณภาพน้ำที่แตกต่างกันออกไป

การใช้น้ำบาดาลเพื่อการอุปโภค-บริโภค

พิจารณาความเหมาะสม โดยการเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำบาดาลที่สามารถใช้บริโภคได้ ซึ่งออกตามความในพระราชบัญญัติน้ำบาดาล ปี 2520 ดังในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานน้ำบาดาลที่จะใช้บริโภคได้ ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2542) ออกตามความในพระราชบัญญัติน้ำบาดาล พ.ศ. 2520

คุณลักษณะทางกายภาพ	เกณฑ์กำหนดที่เหมาะสม	เกณฑ์อนุโลมสูงสุด
สี (Colour)	5 (หน่วยปลาตินัม-โคบอลต์)	15 (หน่วยปลาตินัม-โคบอลต์)
ความขุ่น (Turbidity)	5 (หน่วยความขุ่น)	20 (หน่วยความขุ่น)
ความเป็นกรด - ด่าง (pH)	7.0 - 8.5	6.5 - 9.2
คุณลักษณะทางเคมี	เกณฑ์กำหนดที่เหมาะสม (หน่วยส่วนในล้าน)*	เกณฑ์อนุโลมสูงสุด (หน่วยส่วนในล้าน)
เหล็ก (Fe)	ไม่เกิน 0.5	1.0
แมงกานีส (Mn)	ไม่เกิน 0.3	0.5
ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 1.0	1.5
สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0	15.0
ซัลเฟต (SO ₄)	ไม่เกิน 200	250
คลอไรด์ (Cl)	ไม่เกิน 250	600
ฟลูออไรด์ (F)	ไม่เกิน 0.7	1.0
ไนเตรท (NO ₃)	ไม่เกิน 45	45
ความกระด้างทั้งหมด (Total hardness as CaCO ₃)	ไม่เกิน 300	500
ความกระด้างถาวร (Non-carbonate hardness as CaCO ₃)	ไม่เกิน 200	250
ปริมาณมวลสารทั้งหมดที่ละลายได้ (Total dissolved solids)	ไม่เกิน 600	1,200
คุณลักษณะที่เป็นพิษ	เกณฑ์กำหนดที่เหมาะสม (หน่วยส่วนในล้าน)	เกณฑ์อนุโลมสูงสุด (หน่วยส่วนในล้าน)
สารหนู (As)	ต้องไม่มีเลย	0.05
ไซยาไนด์ (CN)	ต้องไม่มีเลย	0.10
ตะกั่ว (Pb)	ต้องไม่มีเลย	0.05
ปรอท (Hg)	ต้องไม่มีเลย	0.001
แคดเมียม (Cd)	ต้องไม่มีเลย	0.01
เซลีนียม (Se)	ต้องไม่มีเลย	0.01
คุณลักษณะทางแบคทีเรีย	เกณฑ์กำหนดที่เหมาะสม	
Standard plate count	ไม่เกิน 500 โคโลนีต่อลูกบาศก์เซนติเมตร	
Most probable number of coliform organism (MPN)	น้อยกว่า 2.2 ต่อร้อยลูกบาศก์เซนติเมตร	
E.Coli	ต้องไม่มีเลย	

* 1 หน่วยส่วนในล้าน = 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

การใช้น้ำบาดาลเพื่อการเกษตรกรรมหรือชลประทาน

พิจารณาจากปริมาณของโซเดียม (Na) ที่ละลายอยู่ในน้ำเป็นหลัก เนื่องจากโซเดียมจะมีผลต่อคุณสมบัติในการระบายน้ำของดิน กล่าวคือ น้ำที่มีโซเดียมสูง มักจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับดิน โดยดินจะดูดซับเอาโซเดียมไว้ แล้วปล่อยแมกนีเซียม (Mg) และแคลเซียม (Ca) ออกมา ทำให้โมเลกุลของดินเกิดการพองตัว ลดช่องว่างและความพรุน ทำให้ความชื้นได้ต่ำลง

การพิจารณาปริมาณของโซเดียม ใช้วิธีการหาค่าอัตราการดูดติดโซเดียม (SAR- Sodium Adsorption Ratio) จากสมการ

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

เมื่อหน่วยของ Na, Ca, Mg เป็น milliequivalent/liter หรือ meq/l

จากนั้นนำค่า SAR ที่ได้ไปลงจุดในตารางของวิลคอกซ์ (Wilcox Diagram) แยกออกมาเป็นชนิดของน้ำเพื่อการเกษตรกรรม โดยน้ำชนิด C1S1, C1S2, C2S1, C2S2 เป็นน้ำที่ใช้ได้ดี น้ำชนิด C1S3, C2S3, C3S3, C3S2, C3S1 หากหลีกเลี่ยงได้ไม่ควรใช้ และน้ำชนิดอื่น ๆ นอกเหนือจากนี้ไม่ควรใช้เพื่อการชลประทานโดยเด็ดขาด

การใช้น้ำบาดาลเพื่อการอุตสาหกรรม

การพิจารณาขึ้นอยู่กับชนิดของอุตสาหกรรม เช่น ถ้านำไปใช้ในหม้อต้มความดันสูง คุณภาพของน้ำต้องคงที่แน่นอน ไม่มีความกระด้างสูง ในขณะที่น้ำที่ใช้เพื่อระบบถ่ายเทความร้อน คุณภาพน้ำจะไม่มีผลสำคัญมากนัก

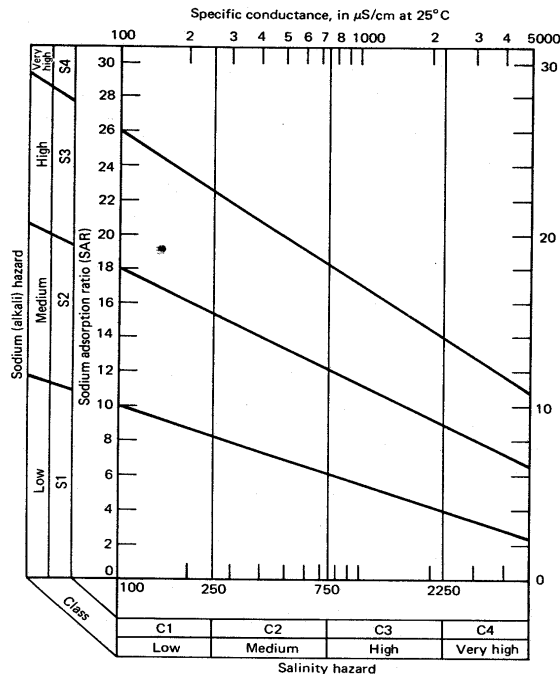
2.5.2 การปรับปรุงคุณภาพน้ำ (Water Treatment)

บางครั้งคุณภาพน้ำบาดาลที่พัฒนาขึ้นมาได้ ไม่เหมาะสมกับการใช้ประโยชน์ อาทิ น้ำมีปริมาณสารละลายเหล็กสูง ไม่สามารถใช้บริโภคได้ หรือน้ำมีปริมาณความกระด้างไม่สามารถใช้เพื่อการซักล้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยเหตุผลเหล่านี้ จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพน้ำ

กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ อาจแบ่งย่อยออกเป็นหัวข้อดังนี้

1. การกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำ

ซึ่งอาจจะทำได้หลายวิธี เช่น การเพิ่มอากาศในน้ำ การเติมสารเคมีพร้อมผสมเร็ว



รูปที่ 2.11 การจัดแบ่งน้ำตามคุณภาพเพื่อใช้ในการเกษตรกรรม (คัดลอกจาก Walton, 1970)

ด้วยการกวน การจับตัวของตะกอน และการตกตะกอน หลังจากนั้นจึงผ่านการกรอง เพื่อกำจัดสิ่งที่เป็นอันตรายในน้ำ

2. การกำจัดเหล็กและแมงกานีส

น้ำบาดาลโดยทั่วไปที่พบในประเทศไทย มักจะมีปริมาณของเหล็กและแมงกานีสสูง ซึ่งจะมีปัญหาในแง่ของการนำไปอุปโภค ก่อให้เกิดปัญหาของคราบสีเหลืองแดง ซึ่งการกำจัดเหล็กและแมงกานีสทำได้หลายวิธี เช่น การให้น้ำสัมผัสอากาศ ทำให้เหล็กตกตะกอน แล้วใช้วิธีการกรองออกหรือใช้วิธีการกรองด้วยเครื่องกรองชาวบ้านแบบง่าย ๆ หรือใช้การกรองด้วยสารกรองที่มีขายตามท้องตลาดโดยเฉพาะ เช่น Manganese green sand

3. การกำจัดความกระด้าง

ความกระด้างที่พบในน้ำมีทั้งแบบชั่วคราวและแบบถาวร น้ำกระด้างชั่วคราวกำจัดได้ด้วยการต้ม ส่วนน้ำกระด้างถาวรต้องใช้สารเคมีเข้าช่วยเพื่อให้ตกตะกอน เช่น การเติม Lime และ Soda หรือการกรองด้วย Zeolite

4. การกำจัดน้ำกร่อยหรือน้ำเค็ม

โดยทั่วไปมักจะทำในพื้นที่ซึ่งขาดแคลนน้ำที่มีคุณภาพดี วิธีการกำจัดแบ่งออกได้เป็นหลายวิธี โดยวิธีการพื้นฐานคือ การกลั่น นอกจากนั้นอาจจะใช้วิธีการเอาแผ่นกรอง หรือใช้

เรซินกรอง (Rasin) ปัจจุบันนิยมใช้วิธี Reverse Osmosis (RO) ซึ่งเป็นวิธีการที่ตรงกันข้ามกับ Osmosis

5. การฆ่าเชื้อโรค

การฆ่าเชื้อโรค วิธีการที่พบง่ายที่สุดและราคาถูก คือ การเติมคลอรีน แต่ไม่เป็นที่นิยมของผู้ใช้บริโภค เนื่องจากรสชาติไม่ดีและมีกลิ่น ในปัจจุบันวิธีการที่ได้รับความนิยม คือ การใช้แสง UV (Ultra – Violet Ray Treatment) ซึ่งจะมีผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อโรค อย่างไรก็ตาม การฆ่าเชื้อโรคจะมีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงไรขึ้นอยู่กับความเข้มของแสง และระยะเวลาในการฉายแสง

การฆ่าเชื้อโรคในน้ำ โดยเฉพาะในโครงการที่ต้องการปริมาณน้ำมากอาจใช้วิธีการเติมโอโซน (Ozone- O_3)

2.6 การบำรุงรักษา

ในการพัฒนาน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ประโยชน์ เมื่อได้ปริมาณและคุณภาพน้ำตามที่ต้องการแล้ว เมื่อใช้ไปในระยะเวลานานหรือต้องการให้ใช้งานได้นานควรมีการบำรุงรักษาทั้งในแง่ของการบำรุงรักษาบ่อบาดาล และการบำรุงรักษาอุปกรณ์เครื่องสูบน้ำ

โดยทั่วไปบ่อบาดาลจะมีประสิทธิภาพลดลง เนื่องจากปัจจัยหลายประการ อาทิ ระดับน้ำบาดาลหรือระดับแรงดันของน้ำลดลง การอุดตันของท่อเจาะร่อนหรือท่อกรอง รวมทั้งประสิทธิภาพที่ลดลงของเครื่องสูบน้ำ ซึ่งบ่อบาดาลที่มีการออกแบบไว้ดีตั้งแต่เริ่มต้น และมีการใช้งานอย่างเหมาะสมจะมีอายุการใช้งานได้นาน

วิธีการแก้ไขการอุดตันของท่อเจาะร่อนและท่อกรอง มักจะทำโดยการพัฒนาบ่อ (เหมือนกับตอนเริ่มต้นทำบ่อ) ด้วยวิธีการเป่าลม ส่วนการที่ประสิทธิภาพเครื่องสูบลดลงสามารถแก้ไขได้โดยเปลี่ยนหรือซ่อมแซมส่วนที่ชำรุดสึกหรอ ด้วยวิธีการดังกล่าว จะช่วยให้บ่อบาดาลจ่ายน้ำให้ได้ปริมาณใกล้เคียงกับของเดิม และยืดอายุของบ่อไปได้อีก ส่วนการที่ระดับน้ำบาดาลหรือระดับแรงดันน้ำลดลง จำเป็นต้องแก้ไขในภาพรวมของทั้งพื้นที่ โดยการลดปริมาณการสูบน้ำ และ/หรือ การเติมน้ำลงไปใต้ดิน ซึ่งวิธีการหลังนี้จำเป็นต้องมีข้อมูลพื้นฐานทางด้านอุทกธรณีวิทยาอย่างถูกต้องและเพียงพอ จึงจะสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกเหนือไปจากนั้นยังต้องใช้งบประมาณที่สูงมากอีกด้วย

วิธีการป้องกันการลดระดับของน้ำบาดาลหรือการลดระดับของแรงดันน้ำบาดาล เป็นวิธีที่ควรจะทำมากกว่าการแก้ไข โดยควรยึดหลักการว่า ในแหล่งน้ำบาดาลใด ๆ การสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ควรอยู่ในลักษณะที่เรียกว่า เป็นปริมาณที่ปลอดภัย หรือ Self yield ซึ่งไม่ควรจะมากไปกว่าปริมาณของน้ำฝนที่ซึมลงไปเพิ่มเติมให้แก่ น้ำบาดาลในแต่ละปี

เอกสารอ้างอิง

- Dolgoft, A., 1998, Essentials of Physical Geology: Houghton Mifflin Company, Massachusetts.
- Brian, J.S., and Stephen, C.P., 2000, The Dynamic Earth: an Introduction to Physical Geology 4th Ed.: John Wiley & Sons, Inc., USA.
- Chernicoff, S., 1999, Geology 2nd : Houghton Mifflin Company, Massachusetts.
- Grundfos International, 1988, Domestic Water Supply: Aarhus Stifsbogtrykkerie, Denmark.
- Todd, D.K., 1980, Groundwater Hydrology 2nd Ed. : John Wiley and Sons, Inc., Tokyo.
- Hamblin, W.K., and Christiansen, E.H., 2001, Earth's Dynamic Systems 9th Ed.: Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- Lutgens, F.K., and Turbuck, E.J., 1996, Foundation of Earth Science: Prentice-Hall, Inc., USA.
- Plummer, C.C., and McGeary, D., 1993, Physical Geology 6th Ed.: Wm. C. Brown Communications, Inc., USA.
- Walton, W.C., 1970, Groundwater Resource Evalution: McGraw-Hill Book Company, Tokyo.
- กิตติชัย วัฒนานุกร, 2526, การสำรวจธรณีฟิสิกส์สำหรับนักธรณีวิทยาและวิศวกร. ศูนย์หนังสือเชียงใหม่, เชียงใหม่
- เจริญ เพียรเจริญ, 2540, น้ำบาดาล – บ่อบาดาล: กรมทรัพยากรธรณี
- ภาควิชาเทคโนโลยีธรณี คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2542, เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง การบริหารและการจัดการทรัพยากรน้ำใต้ดิน, 16-19 มีนาคม 2542 ณ โรงแรมโซฟิเทล จังหวัดขอนแก่น
- ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2529, ธรณีวิทยา เล่ม 2. ไทยวัฒนาพานิช, กรุงเทพฯ.