

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เหมืองแร่และผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม (Mining and Environmental Impacts)

Lottermoser (2003) กล่าวว่า ผลกระทบหลักของเหมืองบนดินสามารถเกิดได้ทั้งก่อน ระหว่าง และหลังการประกอบกิจการซึ่งผลกระทบจากกิจกรรมการทำเหมืองประกอบไปด้วย การตัดต้นไม้เตรียมพื้นที่ การสร้างถนน โครงสร้าง การสำรวจ การขุดเจาะและการระเบิด การวางท่อระบายน้ำ บ่อดักตะกอน และการขุดขน เป็นต้น โดยผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของเหมืองส่วนใหญ่จะเป็นอันตรายที่มาจากของเสียจากการทำเหมือง บ่อกักเก็บของเสียของเหมืองจะส่งผลโดยตรงต่อระบบนิเวศของเหมือง ผลการศึกษาพบว่าของเสียของเหมืองหลายพื้นที่ต้องได้รับการแยก รักษา และลดปริมาณการออกซิเดชัน ความเป็นพิษ และการผูกมัดสีกร่อน เพื่อให้พื้นที่เก็บของเสียดังกล่าวสามารถนำมาใช้ประโยชน์อื่นๆ ได้หลังสิ้นสุดโครงการ หากไม่มีการควบคุมปริมาณของเสีย น้ำเสีย ศักยภาพการเกิดวัสดุที่เป็นอันตราย วัสดุที่เป็นกรด หรือวัสดุที่ก่อสารกำมะถันตรงสีก็จะเพิ่มขึ้น การปนเปื้อนนี้ก็จะกระจายไปในชั้นบรรยากาศ ระบบน้ำ ระบบนิเวศ อันเป็นผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งสิ้น โดยปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เลวร้ายที่สุดด้านปัญหาคอนคุณภาพน้ำคือ น้ำเหมืองเป็นกรด (Acid Mine Drainage, AMD)

2.2 น้ำเหมืองเป็นกรด (Acid Mine Drainage, AMD)

นุชนาท นาคำ (2550) ให้ความหมาย น้ำเหมืองเป็นกรด (AMD) คือ น้ำที่ระบายออกจากบริเวณโครงการเหมืองแร่ที่ถูกทิ้งร้าง ซึ่งมีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ต่ำ และยังสามารถประกอบด้วยโลหะหนักต่างๆ เช่น อะลูมิเนียม (Al) สังกะสี (Zn) สารหนู (As) และแมงกานีส (Mn) ละลายอยู่ในปริมาณสูง โดยปกติการเกิดน้ำเหมืองเป็นกรดสามารถเกิดขึ้นได้เองอย่างช้าๆ เนื่องจากการสึกกร่อนผูกมัดตามธรรมชาติของชั้นดินและชั้นหิน แต่อัตราการเกิดน้ำที่มีฤทธิ์เป็นกรดนี้จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อชั้นดินและหินซึ่งมีแร่ซัลไฟด์เป็นองค์ประกอบได้รับการรบกวน

Todd and Reddick (1997) ศึกษา น้ำเหมืองเป็นกรด โดยการรวบรวมงานวิจัยที่เคยมีผู้ทำการศึกษาเกี่ยวกับน้ำเหมืองเป็นกรดในหลายๆด้าน เริ่มตั้งแต่ให้คำจำกัดความน้ำเหมืองเป็นกรด การเกิดออกซิเดชันของแร่ไพไรต์ องค์ประกอบที่ทำให้เกิดน้ำเหมืองเป็นกรด พื้นที่ที่จะเกิด

ปัญหาจ่าน้ำเหม็นองเป็นกรด รวมไปถึงวิธีการทดลอง การแก้ไข และการป้องกันน้ำเหม็นองเป็นกรด สรุปได้ว่ารูปแบบของการจัดการน้ำเหม็นองเป็นกรดกำลังมีการเปลี่ยนแปลงซึ่งดูได้จากงานวิจัยและเทคโนโลยีใหม่ๆที่เกิดขึ้น ทำให้เกิดการร่วมมือระหว่างรัฐบาลและเอกชนในการจัดสรรงบประมาณให้กับพื้นที่ที่ถูกวางกรอบว่าจะได้รับความเสียหายในอนาคต แม้ว่าต้นทุนในการจัดการน้ำเหม็นองเป็นกรดนี้จะสูงมาก แต่มันก็คุ้มค่าต่อสภาพแวดล้อมและสังคมในระยะยาว

2.3 การเกิดน้ำเหม็นองเป็นกรด

น้ำเหม็นองเป็นกรด (AMD) เกิดจากผลการออกซิเดชันของแร่ซัลไฟด์ที่สัมผัสกับชั้นบรรยากาศ เนื่องจากกิจกรรมของเหมืองทำให้เกิดกรดซัลฟิวริก และผลิตผลจากการออกซิเดชัน (Changul, 2008: 16) การสะสมของโลหะในเหมือง (เช่น Cu, Pb, Zn, Au, Ni, U และ Fe) แร่ฟอสเฟต ชั้นถ่านหิน หินน้ำมัน และทราย ต่างก็มีศักยภาพการออกซิเดชันของแร่ซัลไฟด์ที่ก่อให้เกิดน้ำเหม็นองเป็นกรดได้ โดยถ่านหิน และกองเก็บถ่านหิน พื้นที่เก็บหางแร่ กองหินทิ้ง และพื้นที่ชะล้างต่างๆ ที่กล่าวมามีศักยภาพเป็นต้นกำเนิดกรดได้ทั้งใต้ดิน หน้าเหมือง และพื้นที่บริเวณรอบเหมือง โดยน้ำเหม็นองเป็นกรดมักแสดงลักษณะดังนี้

- น้ำมีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) น้อยกว่า 5.5
- พบพืชและสัตว์ในพื้นที่ถูกรบกวนหรือมีอาการขาดน้ำ
- เกิดตะกอนทั่วไปทั้งในท้องน้ำและพื้นดิน
- น้ำมีสีขุ่น หรือใสแต่เป็นพิษ
- พบสาหร่ายมากมายและแบคทีเรียตระกูลสไลม์ (slimes)

อย่างไรก็ตามไม่ใช่ทุกเหมืองที่มีซัลไฟด์เป็นองค์ประกอบในหินแล้วจะก่อให้เกิดน้ำเหม็นองเป็นกรด เนื่องจากการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมไม่ได้จำกัดเฉพาะการเกิดน้ำเหม็นองเป็นกรด มันอาจเกิดขึ้นในธรรมชาติ ที่มีการระบายอัลคาไลลงสู่สิ่งแวดล้อมได้ด้วย (Lottermoser, 2003: 85 - 87)

Rawat and Singh (1982) ได้ทำการศึกษาการเกิดน้ำเหม็นองเป็นกรดทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือของเหมืองถ่านหินในอินเดีย โดยได้ศึกษาตัวอย่างถ่านหินเพื่อหาค่าผลรวมซัลเฟอร์ ซัลเฟอร์ในรูปของไพไรต์ ซัลเฟอร์ในรูปซัลเฟต และค่าซัลเฟอร์ในรูปอินทรีย์โมเลกุล จากตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์ ศึกษาการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย และการชะล้างของเหล็กและซัลเฟอร์ออกไซด์โดยแบคทีเรีย ที่สัมพันธ์กับค่าความเป็นกรด ซึ่งผลที่ได้ทำให้ทราบว่าอัตรา

ความเป็นกรดของชั้นหินนั้นไม่ขึ้นกับปริมาณซัลเฟอร์รวมในถ่านหิน และซัลเฟอร์ในรูปของอินทรีย์โมเลกุลที่เป็นซัลเฟอร์หลัก แต่ทิศทางของมันจะเกี่ยวข้องกับซัลเฟอร์ที่อยู่ในไพไรต์ และแบคทีเรีย *Thiobacillus ferrooxidans* (Iron and sulfur-oxidizing bacteria) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยพบเป็นองค์ประกอบหลักจากการสังเคราะห์บนน้ำในเหมืองที่มีสภาพเป็นกรด

Atkins and Pooley (1982) ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของกลไกทางชีวภาพที่ส่งผลต่อการเกิดน้ำเหมืองเป็นกรดในเหมืองถ่านหิน โดยศึกษาเปรียบเทียบการออกซิเดชันของไพไรต์ที่เปลี่ยนซัลเฟอร์เป็นกรดซัลฟิวริกระหว่างไพไรต์ที่มีและไม่มีแบคทีเรียในสภาวะกรดที่อุณหภูมิ 35°C พบว่าแบคทีเรียมีส่วนช่วยในการเกิดออกซิเดชัน เนื่องจากเอนไซม์ของมันจะเข้าไปช่วยย่อยไพไรต์ผ่านทางเมมเบรน (Membrane) หากไพไรต์ยังมีขนาดเล็กการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันก็จะมีได้มาก ซึ่งแบคทีเรียที่ออกซิเดชันกลุ่มแร่ซัลไฟด์ได้แก่ *Thiobacillus thiooxidans* และ *Thiobacillus ferrooxidans* ไพไรต์จากอินทรีย์ชนิดที่ต่างกันเมื่อชะล้างสมบูรณ์จะให้ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) อยู่ในช่วง 1 – 2 เหมือนกัน โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันที่สมบูรณ์ของไพไรต์ที่แสดงในกลไกทางชีวภาพมีอยู่สองส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งเป็นขบวนการซัลไฟด์ไพไรต์ที่เป็นตัวแทนของธาตุซัลเฟอร์ออกจากพื้นผิวซัลไฟด์ ส่วนที่สองคือแบคทีเรียมีการสร้างเพอริกซัลไฟด์ขึ้นใหม่ในปฏิกิริยาออกซิเดชันลำดับแรกของไพไรต์และมีครึ่งชีวิตเท่ากับชั้นตะกอนเหล็ก แต่แบคทีเรียที่ช่วยในการชะล้างไพไรต์นั้นเป็นเพียงตัวเร่งปฏิกิริยาเท่านั้นเพราะมันไม่เพียงพอที่จะเป็นต้นกำเนิดในการทำให้เกิดน้ำเหมืองเป็นกรดแม้ว่ามันจะมีมากในธรรมชาติก็ตาม

Lottermoser (2003) กล่าวว่า ซัลไฟด์ (Sulfide) เป็นองค์ประกอบย่อยที่พบได้ทั่วไปบนพื้นผิวโลก ในบางสภาพแวดล้อมทางธรณีเป็นองค์ประกอบหลักในหิน ซัลไฟด์จะถูกทำลายด้วยกลไกการออกซิเดชันต่างๆ โดยไพไรต์ (Pyrite) เป็นแร่ที่พบมากในกลุ่มแร่ซัลไฟด์ และเกิดในเกือบทุกชนิดสภาพแวดล้อมทางธรณี โดยทั่วไปมันเกิดพร้อมกับการสะสมตัวของถ่านหินและแร่โลหะ ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาถึงปฏิกิริยาออกซิเดชันของไพไรต์กันอย่างแพร่หลาย ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไพไรต์เกิดขึ้นเมื่อแร่สัมผัสกับออกซิเจน โดยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้สามารถเกิดได้ทั้งที่มีจุลินทรีย์และไม่มีจุลินทรีย์ในสิ่งมีชีวิตและสิ่งไม่มีชีวิตตามกระบวนการทางเคมี ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไพไรต์นั้นสามารถสรุปได้ดังนี้

- การออกซิเดชันโดยออกซิเจน ซึ่งเป็นการออกซิเดชันทางตรงในสิ่งไม่มีชีวิต

- การออกซิเดชันโดยออกซิเจน ซึ่งเป็นการออกซิเดชันทางตรงด้วยจุลินทรีย์ในสิ่งมีชีวิต
- การออกซิเดชันโดยออกซิเจนและเหล็ก ซึ่งเป็นการออกซิเดชันทางอ้อมในสิ่งไม่มีชีวิต
- การออกซิเดชันโดยออกซิเจนและเหล็ก ซึ่งเป็นการออกซิเดชันทางอ้อมด้วยจุลินทรีย์ในสิ่งมีชีวิต

ปฏิกิริยาเคมีของการเกิดน้ำเหม็นองเป็นกรดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไพไรต์ ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน (นุชนาท นาคำ, 2550) ดังนี้

ขั้นตอนแรกเกิดจากไพไรต์เกิดการออกซิเดชันด้วยออกซิเจนทำให้ซัลเฟอร์ (Sulfur, S) ถูกออกซิไดซ์กลายเป็นซัลเฟต (Sulfate, SO_4^{2-}) และเหล็กเฟอร์รัส (Ferrous, Fe^{2+}) ถูกปล่อยเป็นอิสระ



ขั้นตอนที่สองเป็นการเปลี่ยนเหล็กเฟอร์รัส (Fe^{2+}) เป็นเหล็กเฟอริก (Ferric, Fe^{3+}) โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ภายใต้สภาวะที่เป็นกรด (pH 2 – 3) แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ค่าความเป็นกรดต่างประมาณ 5 (pH = 5) รวมถึงแบคทีเรียบางชนิดมีผลช่วยในการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นปฏิกิริยานี้จึงเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราเร็วในการสลายตัวของไพไรต์



ขั้นตอนที่สามปฏิกิริยาอาจเกิดการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของเหล็ก โดยการแตกตัวของโมเลกุลของน้ำ เกิดเป็นตะกอนของเหล็กเฟอริก (Ferric hydroxide, $\text{Fe}(\text{OH})_3$) ซึ่งมีสีส้มเหลือง เรียกว่า "Yellowboy" ซึ่งตะกอนนี้จะเกิดขึ้นที่ค่าความเป็นกรดต่างสูงกว่า 3.5 (pH > 3.5)



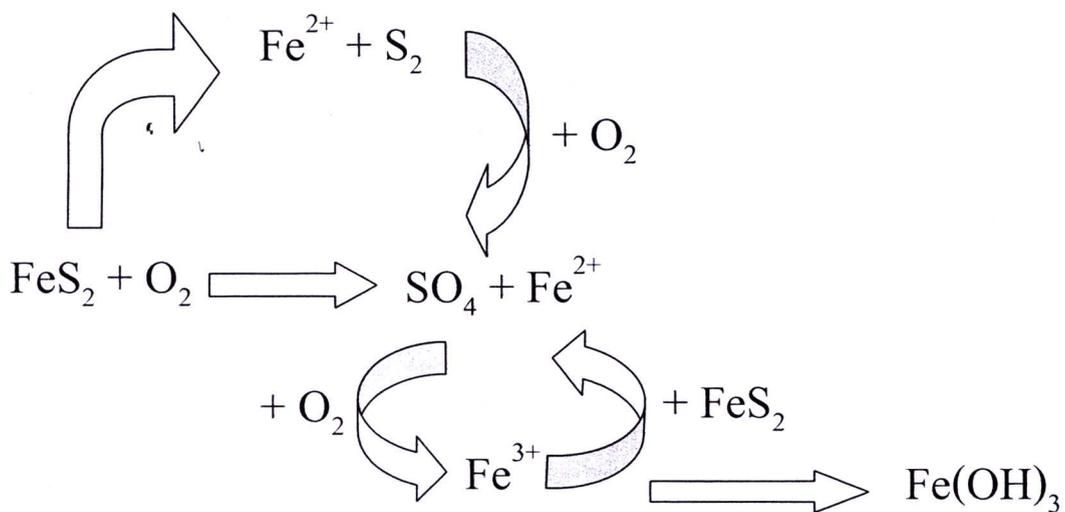
ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการรวมระหว่างปฏิกิริยาที่ 1 ถึง 3 คือการออกซิเดชันไพไรต์เป็นเหล็กเฟอริก โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเป็นวัฏจักรอย่างต่อเนื่องและรวดเร็วจนกว่าเหล็กเฟอริกหรือไพไรต์จะหมด



สรุปภาพรวมของการเกิดปฏิกิริยาจะได้ดังนี้



จากสมการจะได้กรดซัลฟิวริกซึ่งจะชะล้างสู่แหล่งน้ำบริเวณใกล้เคียงทำให้เกิดน้ำเหม็นองเป็นกรด (AMD) และการปนเปื้อนของโลหะหนัก ส่งผลกระทบต่อพืชและสัตว์ในบริเวณนั้นๆ โดยทิศทางการเกิดปฏิกิริยาแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนภาพอย่างง่ายแสดงทิศทางการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไพไรต์ (Lottermoser, 2003)

2.4 การประเมินศักยภาพการเกิดน้ำเหม็นองเป็นกรด (Acid Generation Potential)

Lottermoser (2003) กล่าวถึงความถูกต้องในการทำนายศักยภาพการเกิดกรดจากของเสียประเภทซัลไฟด์จำเป็นต้องมีความเข้าใจที่ดีเกี่ยวกับทฤษฎี ภายภาพทางธรณี ธรณีเคมี และลักษณะของแร่ซัลไฟด์ โดยข้อมูลต่างๆที่นำมาทำนายศักยภาพการเกิดกรดนั้นประกอบไปด้วย

- แบบจำลองทางธรณีวิทยา
- ข้อมูลรายละเอียดจากธรณีวิทยา ธรณีเคมี แร่วิทยา และจากกล้องจุลทรรศน์
- การทดสอบทางธรณีเคมีทั้งด้านสถิต (Static Test) และด้านจลศาสตร์ (Kinetic Test)
- แบบจำลองการเคลื่อนตัวของออกซิเจน และกระบวนการทางธรณีเคมี



แบบจำลองทางธรณีวิทยา (Geological Modeling)

แบบจำลองทางธรณีเป็นเทคนิคพื้นฐานในการประเมินศักยภาพการเกิดกรดของของเสียซัลไฟด์ ซึ่งเกี่ยวเนื่องกับการตกตะกอน และแบบจำลองทางธรณีวิทยายังถูกนำมาใช้ในการศึกษาการลดปัญหาการเกิดกรด ซึ่ง Lottermoser (2003) ได้สรุปชนิดการตกตะกอนของแร่และศักยภาพการเกิดน้ำเหมืองเป็นกรดดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงชนิดการตกตะกอนของแร่ที่สอดคล้องกับศักยภาพการเกิดน้ำเหมืองเป็นกรด (AMD) (Lottermoser, 2003)

ลำดับที่	ชนิดการตกตะกอน	ศักยภาพการเกิดกรด
1	Sedimentary exhalative massive sulfide	
2	deposits; Coal	
3	Volcanogenic massive sulfide deposits	
4	Epithermal gold deposits	
5	Mesothermal gold deposits	
6	Polymetallic vein deposits	
7	Calc – alkaline porphyry copper deposits	
8	Alkalic porphyry copper deposits	
9	Orthomagmatic chromium – nickel deposits	
10	Broken Hill type lead – zinc deposits	
11	Greisen tin deposits	
12	Kimberlites and lamproite diamond deposits	
13	Mississippi Valley type lead – zinc deposits	
14	Skarn deposits	
	Carbonatite deposits	Least AMD prone

อย่างไรก็ตามวิธีการยอมมีข้อจำกัดในหลายๆด้านเช่น พื้นที่ผิวของไพไรต์ ปริมาณของซัลไฟด์ในกองหินทิ้งหรือองค์ประกอบแร่ในน้ำเหมือง และการตกสะสมของแร่ การเปรียบเทียบมีความน่าเชื่อถือต่ำ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
 - ห้องสมุดงานวิจัย
 วันที่ 22 ต.ค. 2555
 เลขทะเบียน 247019
 เลขเรียกหนังสือ

การทดสอบทางธรณีเคมี (Geochemical Tests)

การทดสอบทางธรณีเคมีควรดำเนินการโดยตรวจสอบรายละเอียดทางธรณีเคมีและแร่ของวัสดุ โดยเฉพาะรายละเอียดข้อมูลองค์ประกอบแร่ของของเสียจากการทดสอบทางสถิต (Static Test) และไคเนติก (Kinetic Test)

สถิต (Static Test) เป็นการทดสอบทางธรณีเคมีของวัสดุซัลไฟด์เพื่อใช้ทำนายศักยภาพการเกิดกรดของตัวอย่าง ซึ่งการทดสอบนี้จะค่อนข้างซับซ้อนเนื่องจากสามารถวัดได้ทั้งผลิตภัณฑ์ที่เป็นกรด และการกลับมาเป็นกลาง ประกอบกับมีตัวช่วยใช้แทนค่าหลายตัว เช่น อเมริกาเหนือใช้เป็น Acid Potential (AP) Neutralization Potential (NP) Net Neutralization Potential (NNP) Neutralization Potential Ratio (NPR) ในออสเตรเลีย และเอเชียแปซิฟิกใช้เป็น Maximum Potential Acidity (MPA) Acid Neutralizing Capacity (ANC) และ Net Acid Production Potential (NAPP) ซึ่งการทดสอบแบบสถิตนี้แบ่งได้เป็น 3 ส่วนหลักคือ

- ค่าการอิ่มตัวของความเป็นกรดต่าง (Saturated paste pH) และค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (electrical conductivity)
- Acid Base Accounting (ABA Test)
- Net Acid Generation (NAG Test) หรือ Net Acid Production (NAP Test)

ไคเนติก (Kinetic Test) เป็นการลอกเลียนแบบการสึกกร่อนและการออกซิเดชันของตัวอย่างที่เป็นของเสียซัลไฟด์ ซึ่งทั่วไปจะใช้เพื่อติดตามผลของการทดสอบสถิต โดยการทดสอบแบบไคเนติกนี้จะเปิดให้ของเสียซัลไฟด์สัมผัสกับอากาศและน้ำตลอดเวลาโดยระยะเวลาทดสอบเป็นเดือนจนถึง 2 – 3 ปี การทดลองนี้เป็นการเร่งปฏิกิริยาเพื่อทำแบบจำลองการผุกร่อนในระยะยาวของวัสดุให้ได้ผลในระยะเวลานั้น โดยจะเพิ่มน้ำให้กับตัวอย่างของเสียมากกว่าในภาคสนาม

2.5 วิธีการทดสอบศักยภาพความเป็นกรด (Methods of Acid Generation Potential)

Bradham and Caruccio (1990) ทำการศึกษาเปรียบเทียบการวิเคราะห์ทางแร่ด้วยวิธี Acid Base Accounting, Cells, Columns และ Soxhlets โดยได้ทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนศักยภาพความเป็นกรด จากการทดสอบ 10 ตัวอย่าง ใน 60 ครั้ง เป็นเวลา 8 เดือน ซึ่งผลที่ปรากฏ

มีทั้งการชะล้างกรดและการชะล้างต่าง ที่แสดงในทุกตัวอย่าง ยกเว้นใน air locked ของการทดสอบแบบ columns ซึ่งค่าความเป็นกรดของมันจะขึ้นอยู่กับปริมาณของด่างและวัสดุกรดในตัวอย่างโดยไม่มีกรดชะล้าง และจากการเปรียบเทียบสรุปได้ว่าการทำนายโดยวิธี columns มีความแม่นยำน้อยที่สุด (ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์) รองลงมาคือวิธี Acid Base Accounting ตามด้วยวิธี Soxhlet และวิธี Cell มีความแม่นยำมากที่สุด (100 เปอร์เซ็นต์) การเปรียบเทียบแต่ละวิธีการทดสอบดังแสดงตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบเทคนิคการวิเคราะห์แต่ละวิธี (Bradham and Caruccio, 1990)

Tests	Method	Advantages	Disadvantages
Acid Base Accounting (Sobek et al., 1978)	Whole rock analyses completed on a pulverized sample. Acid potential related to sulfur content, neutralization potential determined by hot acid digestion with HCl.	Easy to perform, quick turn-around time, useful in areas that are acid or alkaline prone. Relatively inexpensive.	Does not relate to kinetic data. Assumes parallel release of acidity and alkalinity.
Soxhlet Reactor (Renton et al., 1988)	Leachate generated on pulverized sample which is cycled in a soxhlet reactor. During interim, sample is stored at 105°C	Easy to perform quick turn-around time, purported kinetic data.	Expensive apparatus, extremely aggressive oxidation of sample.

Tests	Method	Advantages	Disadvantages
Humidity Cells (Caruccio, 1968)	Crushed rock is placed in humidified atmosphere and leached periodically. Volume and character of leachate related to rock weight to produce alkaline/acid production potential.	Produces kinetic data, rates of acidity per unit weight of sample obtained, approximates field conditions.	Long time required, large data base generated. Relatively expensive.
Colum Weathering Test (Hood and Oerter, 1984)	Field sample placed in large columns and leached periodically. Leachate is analyzed and related to rock weight.	Best approximator of field conditions.	Same as above, in addition, large volume of samples required channelization problem encountered.

Lapakko and Lawrence (1993) ปรับปรุงการทดสอบวิธี Net Acid Production (NAP Test) โดยเปรียบเทียบคุณภาพการทำงานหลายวิธีคือ 1)เปรียบเทียบคุณภาพระหว่างวิธี NAP Test กับวิธี ABA Test 2)เปรียบเทียบคุณภาพระหว่างวิธี ABAประยุกต์ กับวิธี B.C. Research Initial 3) เปรียบเทียบคุณภาพของค่า NP สุทธิ โดยการทดสอบ NAP Test กับวิธีการทดสอบอื่นๆ และ 4) เปรียบเทียบคุณภาพของค่า NP สุทธิ กับการวิเคราะห์แรงแนตัวอย่าง ซึ่งผลที่ได้คือค่า NP สุทธิ ในการทดสอบ NAP จะมีค่าสูงกว่าในการทดสอบอื่นๆ เนื่องจากการย่อยของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่มีมากคือ 95 – 99 เปอร์เซ็นต์ ของซัลไฟด์จะมีการออกซิไดซ์ขณะทำการทดสอบ การทดสอบด้วย NAP มีข้อดีคือไม่ต้องใช้ค่าซัลเฟอร์รวม และค่า NP สุทธิ ที่สูงนั้นก็อยู่ในปริมาณที่ยอมรับได้

Monterroso and Macias (1998) ทำนายศักยภาพการเกิดกรดของหน้าดินเหมืองถ่านหิน โดยการวัดค่าความเป็นกรดของตัวอย่างที่ละลายน้ำ ค่าร้อยละของซัลเฟอร์ และค่าความเป็นกรดต่าง (pH) หลังจากทำปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เสร็จสมบูรณ์ แล้วนำมาคำนวณหาปริมาณของคาร์บอนเนตในดิน เพื่อจำแนกชนิดของวัสดุตามศักยภาพการเกิดกรด และหาปริมาณอัตราส่วนของคาร์บอนเนต(ในที่นี้คือหินปูน) ที่เหมาะสมต่อการป้องกันหรือแก้ไขปัญหาการเกิดกรด ซึ่งผลที่ได้คือความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละของซัลเฟอร์กับค่า NAP เป็นส่วนช่วยในการทำนายค่าความเป็นกรด โดยค่าร้อยละซัลเฟอร์รวมอยู่ในช่วง 0.01- 3.00 และค่า NAP อยู่ระหว่าง 1.2 – 85.00 กิโลกรัมคาร์บอนเนต (kg $CaCO_3$) และในทางการค้านิยมใช้ปูนขาว (Lime) ในการควบคุมค่าการเกิดกรดของดินที่มีค่าซัลเฟอร์รวมสูง

Campbell, Lindsay and Clemens (2001) ศึกษาศักยภาพการเกิดกรดของหินทิ้งและถ่านหินในเหมืองถ่านหิน ประเทศนิวซีแลนด์ โดยการศึกษาลักษณะทางธรณีวิทยาจากลำดับชั้นหินของพื้นที่ แล้ววิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านหินด้วยสัดส่วนต่ำสุดของเบส (CNK) จากกราฟ A-CNK-FM และหาค่าความเป็นกรดจากค่า Chemical Index of Alteration (CIA) ค่ารีแอคทีฟซัลเฟอร์ (Reactive sulfur) ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence (XRF) แล้วใช้ ABA Test ในการระบุศักยภาพการเกิดกรดด้วยกราฟที่แบ่งตามอัตราส่วนของเบสต่อกรด สรุปได้ว่าวัสดุหินทิ้งที่ก่อให้เกิดกรดคือหินทรายแป้งที่สะสมตัวแบบทะเลสาบ และวัสดุหลักที่ให้อัลคาไลต์เป็นชั้นหินตะกอนภูเขาไฟยุคมีโซโซอิก (Mesozoic)

Skousen et al. (2002) ศึกษาการใช้ ABA Test เพื่อการทำนายคุณภาพการระบายน้ำของพื้นที่หลังการทำเหมือง โดยการนำตัวอย่างจาก 56 แห่งของเหมืองทางตะวันตกของรัฐเวอร์จิเนียมาทดสอบหาปริมาณมวลดิน และหาค่า MPA NP NNP และอัตราส่วนของ NP กับ MAP ที่สัมพันธ์กับการทำนายคุณภาพน้ำเหมืองเป็นกรดหลังการทำเหมือง ซึ่งผลที่ได้พบว่าวิธีการคิดปริมาณมวลดินแบบ Pennsylvania Department of Environmental Protection (PADEP) ให้ค่าที่ใกล้เคียงที่สุด และค่า NNP กับค่า NP/MPA มีความสัมพันธ์ที่ดีต่อการทำนายคุณภาพน้ำเท่ากับการวิเคราะห์น้ำจากผิวดิน จากการเปรียบเทียบพบว่า ABA Test เป็นเครื่องมือที่ดีในการใช้ตรวจวัดคุณภาพผิวดินก่อนการทำเหมืองและคุณภาพน้ำหลังการทำเหมืองโดยในการศึกษานี้สรุปเกณฑ์ที่บอกค่าศักยภาพการเกิดกรดของแต่ละบุคคลไว้ดังตารางที่ 2.3 และเลือกใช้เกณฑ์ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 สรุปเกณฑ์คุณภาพน้ำจากการศึกษาในพื้นที่ตะวันตกของรัฐเวอร์จิเนีย และเพนซิลเวเนีย (Skousen et al., 2002)

ABA parameter	Calculated value (Mg/1000Mg)	Predicted water quality	Source
NP	<20	Net acid	Pretoro and Rauch, 1988
	>40	Net alkaline	
	<10	Net acid	Brady et., 1994
	>21	Net alkaline	
Net NP (NNP)	<10	Net acid	diPretoro and Rauch, 1988
	>30	Net alkaline	
	<20	Net acid	Erickson and Hedin, 1988
	>80	Net alkaline	
	<0	Net acid	Brady et., 1994
	>12	Net alkaline	
	<0	Net acid	Skousen et al., 1987
	>15	Net alkaline	
NP to MPA ratio (NPR)	<1	Net acid	Perry, 1998
	>2	Net alkaline	

ตารางที่ 2.4 ตารางเปรียบเทียบค่า Acid Base Accounting (ABA Test) (Skousen et al., 2002)

ABA parameter	Calculated value (Kg CaCO ₃ /ton)	Predicted water quality
NP	<10	Net acid
	>21	Net alkaline
Net NP (NNP)	<0	Net acid
	>12	Net alkaline
NP to MPA ratio (NPR)	<1	Net acid
	>2	Net alkaline

Liao et al. (2007) ศึกษาถึงขอบเขตของค่า NAG Test ในการทำนายศักยภาพการเกิดกรดในกองหินทิ้งของเหมือง โดยทำการศึกษาค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ค่าซัลเฟอร์รวม ค่าซัลเฟอร์ในรูปของไพไรต์ ค่า NAG ค่า ANC และค่า NAG pH ของ 180 ตัวอย่าง จาก 17 เหมืองในประเทศจีน แล้วนำมาเขียนกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า NAG และค่า NAG pH จากกราฟทำให้ทราบถึงขอบเขตของการเกิดกรดเป็นดังแสดงในตารางที่ 2.5 ส่วนค่า ANC และค่าซัลเฟอร์นั้นจะใช้ร่วมกันในการตัดสินค่าความเป็นกรดในกรณีที่วัสดุเป็นกรดมีค่ามากกว่า 50 กิโลกรัมซัลฟิวริกต่อตัน ($\text{kg H}_2\text{SO}_4/\text{t}$) และจะแบ่งชนิดของวัสดุเกิดกรดได้ละเอียดกว่าวิธีการ NAG Test

ตารางที่ 2.5 แสดงเกณฑ์ในการทำนายศักยภาพการเกิดกรด (Liao et al., 2007)

NAG pH	Calculated NAG	Predicted quality
≥ 5	0 – 2	Low or Nonacid forming
$2.5 < \text{NAG pH} < 5$	2 – 50	Moderate acid forming
≤ 2.5	>50	High acid forming

Changul et al. (2009) ประเมินศักยภาพความเป็นกรดของหินทิ้งในเหมืองทองอัคราประเทศไทย โดยการประเมินนี้ใช้วิธีการตรวจสอบความเป็นกรดต่างของเปลือกดินและชั้นหินด้วยการใช้วิธี ABA Test และค่าการเกิดกรดสุทธิ (Net Acid Generate, NAG) โดยการคำนวณค่า NAPP ที่ได้จากผลต่างของ MAP กับ ANC เพื่อระบุพื้นที่และชั้นหินที่ก่อให้เกิดกรด โดยพื้นที่ทดสอบคือชั้นหินบริเวณบ่อเหมือง และพื้นที่หินทิ้ง เพื่อสรุปผลประเมินพื้นที่ก่อให้เกิดกรด (Potential Acid Forming, PAF) และพื้นที่ไม่ก่อให้เกิดกรด (Non Acid Forming, NAF) ซึ่งผลที่ได้คือหินที่มีศักยภาพในการเกิดกรด (PAF) ได้แก่ หินซิลิซิไฟด์ ลาปิลี ทัฟฟ์ (Silicified Lapilli Tuff) และหินเชียร์ทัฟฟ์ (Sheared Tuff) โดยเกณฑ์ที่ใช้ในการสรุปผลแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 แสดงหลักเกณฑ์การจำแนกศักยภาพการเกิดกรดด้วยวิธี ABA test (Changul et al., 2009 cited in Hutchison and Ellison, 1992 cited in Lei and Watkins, 2005)

Category	NAPP ($\text{kg H}_2\text{SO}_4/\text{ton}$)
Potentially acid generating	>20
Non-acid generating	< - 20
Zone of uncertainty	-20 < NAPP < + 20

Stewart, Miller and Smart (2006) ศึกษาถึงความก้าวหน้าของลักษณะการเกิดกรดของหินทิ้งในเหมือง จากการทดลองด้วยวิธี ABA Test NAG Test Acid Buffering Characteristic Curve Test (ABCC Test) และวิธี Leach Column โดยทำการเปรียบเทียบผล ANC ที่คำนวณค่าแคลเซียม ค่าแมกนีเซียมคาร์บอเนตจากแร่ซิเดอไรต์ (Siderite) กับแร่ตัวอย่างโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เป็นตัวช่วยในการออกซิไดซ์ แล้วนำกราฟไปใช้แปลความหมายในวิธี ABCC Test และสุดท้ายทำการเปรียบเทียบค่า Kinetic NAG Test กับค่าการทดลองแบบ Leach Column ซึ่งผลที่ได้คือค่า NAPP และ NAG เป็นวิธีที่น่าเชื่อถือมากกว่าวิธีอื่น และจากกราฟของ ABCC ช่วยบอกความสัมพันธ์ของหินทิ้งสำหรับบางตัวอย่างที่ผลจาก ANC ไม่ชัดเจน และวิธี Kinetic NAG Test สามารถทำนายผลได้เหมือนกับ Leach Column ในระยะเวลาที่สั้นกว่า และทำการเปรียบเทียบค่าระหว่าง NAG Test กับ ABA Test โดยกราฟระหว่าง NAG pH กับ NAPP เพื่อแยกศักยภาพของหินที่ก่อให้เกิดกรดตามเกณฑ์ที่แสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 แสดงเกณฑ์การพิจารณาศักยภาพความเป็นกรดด้วยการเปรียบเทียบผลของ ABA Test และ NAG Test (Stewart, Miller and Smart, 2006)

NAPP	NAG pH	Predicted Quality
> 0	< 4.4	Potential Acid Forming (PAF)
≤ 0	< 4.5	Uncertainty
> 0	≥ 4.5	
≤ 0	≥ 4.4	Non Acid Forming (NAF)

2.6 เทคนิคการป้องกันและกำจัดน้ำเหมืองเป็นกรด (Treatment Programs)

นุชนาท นาคำ (2550) กล่าวถึงวิธีการในการบำบัดน้ำเหมืองมีฤทธิ์เป็นกรดมีหลักการคือการเติมวัสดุเพื่อช่วยเพิ่มค่าความเป็นกรดให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม และลดความสามารถในการละลายของโลหะที่ทำให้เกิดการตกตะกอน ซึ่งวิธีหลักในการบำบัดมีด้วยกัน 2 ด้านคือการบำบัดทางเคมี (Active Treatment) และการบำบัดด้วยกระบวนการทางธรรมชาติ (Passive Treatment)

การบำบัดทางเคมี (Active Treatment) เป็นการใส่สารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นด่างเติมลงไปลงในน้ำเพื่อทำให้น้ำที่เป็นกรดมีความเป็นกลาง ซึ่งสารเคมีที่นิยมใช้ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) และแอมโมเนีย (NH_3) เป็นต้น โดยมีวิธีการดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 รายละเอียดการใช้สารเคมีในการบำบัดน้ำเหมืองเป็นกรด (นุชนาท นาคำ, 2550)

วัสดุ/วิธีการ	รายละเอียด
หินปูน (Limestone หรือ <i>calcium carbonate</i> ; CaCO_3)	เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมวิธีหนึ่ง เนื่องจากหินปูนมีราคาถูก การใช้งานไม่ยุ่งยาก และตะกอนที่ได้จับตัวเป็นก้อนทำให้ง่ายในการกำจัด แต่มีข้อเสียคือ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานและระบบการกำจัดมีประสิทธิภาพต่ำ เนื่องจากโมเลกุลของหินปูนอาจถูกเคลือบด้วยเหล็กที่เกิดจากการตกตะกอน ทำให้การบำบัดน้ำเหมืองเป็นกรดที่มีปริมาณเหล็กสูงไม่สามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงไม่สามารถกำจัดแมงกานีสได้
ปูนขาว (Hydrated lime หรือ <i>calcium hydroxide</i> ; Ca(OH)_2)	เป็นสารเคมีที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเหมืองเป็นกรด โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ถ่านหิน เพราะมีราคาถูก การใช้งานง่าย ปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ แต่หลังการบำบัดอาจทำให้เกิดตะกอนปริมาณสูงมาก (เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้หินปูน) และต้องใช้งบลงทุนเริ่มต้นที่สูงเนื่องจากโรงบำบัดมีขนาดใหญ่
โซดาแอสช (Soda ash หรือ <i>sodium carbonate</i> ; Na_2CO_3)	นิยมใช้บำบัดน้ำเหมืองเป็นกรดที่เป็นลำน้ำสายเล็กๆ ซึ่งอยู่ในพื้นที่ห่างไกล ข้อเสียคือ สารเคมีที่ใช้มีราคาแพง (เมื่อเทียบกับหินปูน) และตะกอนไม่ค่อยตกตะกอน
โซดาไฟ (Caustic soda หรือ <i>sodium hydroxide</i> ; NaOH)	เป็นสารเคมีที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเหมืองเป็นกรดที่มีปริมาณแมงกานีสสูง และกระแสน้ำไหลอย่างช้าๆ แต่ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงและมีอันตรายในการจัดการสารเคมี

วัสดุ/วิธีการ	รายละเอียด
แอมโมเนีย (Ammonia; NH_3)	เป็นสารเคมีที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเหมืองเป็นกรดที่มีปริมาณเหล็กและแมงกานีสสูง รวมถึงมีราคาถูกกว่าโซดาไฟ และทำได้ยากและมีอันตราย ดังนั้นการใช้แอมโมเนียจึงไม่เป็นที่นิยม และถ้ามีการนำไปใช้จะต้องมีมาตรการเฝ้าระวังที่เหมาะสม

การบำบัดด้วยกระบวนการทางธรรมชาติ (Passive Treatment) คือการใช้สารเคมีและปฏิกิริยาทางชีวภาพที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติมาช่วยในการบำบัด ซึ่งมีเทคนิคดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 รายละเอียดการใช้กระบวนการทางธรรมชาติในการบำบัดน้ำเหมืองเป็นกรด (นุชนาท นาคำ, 2550)

วัสดุ/วิธีการ	รายละเอียด
<i>Constructed Wetland</i>	เป็นการใช้จุลชีพที่อาศัยในดินและน้ำรวมทั้งการใช้พืชที่ขึ้นในบริเวณพื้นที่เปียก (Wetland) ในการกำจัดโลหะที่ละลายในน้ำ โดยวิธีนี้สามารถกำจัดเหล็กได้ดีกว่าแมงกานีส และจะให้ประสิทธิภาพสูงเมื่อใช้บำบัดกระแสน้ำที่ไหลช้า (ประมาณ 1-2 แกลลอนต่ออนาที) แต่จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดโลหะขึ้นอยู่กับฤดูกาล เช่น ประสิทธิภาพการกำจัดจะลดลงในฤดูหนาว
<i>Open Limestone channel/Anoxic Limestone Drain</i>	เป็นเทคนิคที่ไม่ยุ่งยาก ก่อสร้างโดยการขุดคูแล้วเติมหินปูน การละลายของหินปูนจะช่วยเพิ่มความเป็นด่างและทำให้มีค่าความเป็นกรดสูงขึ้น แต่การตกตะกอนของเหล็กและอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นอาจเคลือบปูนไว้ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง

วัสดุ/วิธีการ	รายละเอียด
<i>Diversion Well</i>	เป็นการนำน้ำที่เป็นกรดไปใส่ในบ่อที่บรรจุด้วยหินปูนบดหยาบ ซึ่งการเคลือบของเหล็กที่ตกตะกอนจะไม่เกิดขึ้นเนื่องจากการจัดให้มีกระแสที่เชี่ยวไหลผ่านบ่อตลอดเวลา ทำให้ระบบการบำบัดมีประสิทธิภาพสูง แต่ต้องมีการเติมหินปูนแทนที่อย่างสม่ำเสมอ

โดยวิธีการบำบัดด้วยกระบวนการธรรมชาติ มีข้อดีกว่าระบบบำบัดทั่วไป (Conventional Active Treatment) เนื่องจากไม่ต้องมีการเติมสารเคมี และเป็นกระบวนการที่ไม่สิ้นเปลืองตลอดจนมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและการบำรุงรักษาระบบน้อยกว่า การบำบัดทางเคมี แต่มีข้อเสียคือต้องใช้ระยะเวลาในการบำบัด และทราบพื้นที่ขอบเขตรวมถึงปริมาณกรดที่เกิดขึ้นชัดเจน หากพื้นที่มีปัญหาน้ำเป็นกรดมากและขยายบริเวณกว้างแล้วควรเลือกใช้วิธีการบำบัดทางเคมีจะดีกว่า