

รายงานวิชาการ

ฉบับที่ สอพ. 3/2550

## โซยาไนต์กับอุตสาหกรรมเหมืองแร่ทองคำ

สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน  
กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่

รายงานวิชาการ

ฉบับที่ สอพ. 3/2550

ไซยาไนต์กับอุตสาหกรรมเหมืองแร่ทองคำ

ปรีชา จารุวาระกุล

สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน  
กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่

อธิบดีกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่  
นายอนุสรณ์ เนื่องผลมาก

ผู้อำนวยการสำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน  
นายสุรพงษ์ เชียงทอง

หัวหน้ากลุ่มอุตสาหกรรมพื้นฐาน 4 นางนันทนา กันยานุวัฒน์

จัดพิมพ์โดย

กลุ่มอุตสาหกรรมพื้นฐาน 4 สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน  
กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่  
ถนนพระรามที่ 6 เขตราชเทวี กรุงเทพฯ. 10400  
โทรศัพท์ 0 2463 5942  
โทรสาร 0 2464 2054

พิมพ์ครั้งที่ 1

กันยายน 2550  
จำนวน 20 เล่ม

ข้อมูลการลงรายการบรรณานุกรม

ปรีชา จารุวาระกุล.

ไซยาไนต์กับอุตสาหกรรมเหมืองแร่ทองคำ / โดย ปรีชา จารุวาระกุล.--

กรุงเทพฯ : กลุ่มอุตสาหกรรมพื้นฐาน 4 สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน กรมอุตสาหกรรม  
พื้นฐานและการเหมืองแร่, 2550.

49 หน้า : ภาพประกอบ : ตาราง ; 30 ซม.

รายงานวิชาการ ฉบับที่ สอพ. 3/2550.

## สารบัญ

	หน้า
คำขอบคุณ .....	VII
บทนำ .....	1
วัตถุประสงค์ .....	2
ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับไซยาไนด์ .....	3
ความหมายของไซยาไนด์ .....	3
แหล่งกำเนิดไซยาไนด์ .....	3
แหล่งกำเนิดในธรรมชาติ .....	3
ไซยาไนด์ที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้น .....	4
พิษของไซยาไนด์ .....	5
ประโยชน์ของไซยาไนด์ .....	7
อุตสาหกรรมเหมืองแร่ทองคำ .....	8
กระบวนการผลิตทองคำด้วยไซยาไนด์ .....	8
การเตรียมแร่ .....	9
การละลายทองคำด้วยสารละลายไซยาไนด์ .....	10
การชะล้างทองคำออกจากถ่านกัมมันต์และทำให้บริสุทธิ์ .....	12
สารประกอบไซยาไนด์ที่เกิดจากกระบวนการแยกสกัดทองคำจากแร่ .....	12
Free cyanide .....	13
Simple cyanide compound .....	13
Cyanide complex .....	14
สารประกอบไซยาไนด์อื่นๆ .....	16
สารประกอบอื่นๆ .....	17
เสถียรภาพของสารประกอบไซยาไนด์ .....	18
การบำบัดไซยาไนด์หลังกระบวนการสกัดทองคำ .....	19
Natural degradation .....	19
Chemical oxidation .....	21
Iron-cyanide precipitation .....	23
Biological treatment .....	24
เทคนิคการวิเคราะห์ไซยาไนด์ในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ทองคำ .....	27
การวิเคราะห์ Total cyanide ด้วยการกลั่น .....	28
การวิเคราะห์ WAD cyanide ด้วยการกลั่น .....	31

การวิเคราะห์ WAD cyanide ด้วย Picric acid .....	32
การวิเคราะห์ Free cyanide โดยการไตเตรทด้วย Silver nitrate .....	32
การวิเคราะห์ Free cyanide ด้วย Ion Selective Electrode .....	33
การวิเคราะห์ไซยาไนด์ด้วย Ion Chromatography .....	33
การวิเคราะห์ไซยาไนด์ด้วย Automated Ligand Exchange .....	34
สารรบกวนการวิเคราะห์ไซยาไนด์ .....	35
ตัวออกซิไดส์ .....	35
ซัลไฟต์ .....	36
ไทโอไซยาเนท .....	36
ไนไตรต์และไนเตรต .....	37
คาร์บอนเนต .....	37
ไทโอซัลเฟต ซัลไฟต์และสารประกอบซัลเฟอร์อื่นๆ .....	37
โลหะต่างๆ .....	37
การเก็บรักษาตัวอย่าง .....	38
แนวทางการป้องกันแก้ไขผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่ทองคำ .....	39
การควบคุมและป้องกันการปนเปื้อนของสารมลพิษในสิ่งแวดล้อม .....	39
ด้านอุทกวิทยา .....	39
ด้านปฐพีวิทยา .....	40
ด้านอากาศ .....	40
ด้านสุขภาพอนามัยและความปลอดภัย .....	41
การติดตามเฝ้าระวังการปนเปื้อนของสารมลพิษสู่สิ่งแวดล้อม .....	42
ด้านอุทกวิทยา .....	42
ด้านปฐพีวิทยา .....	43
ด้านอากาศ .....	43
ด้านสุขภาพอนามัยและความปลอดภัย .....	43
การแก้ไขปัญหาการปนเปื้อนของสารมลพิษในสิ่งแวดล้อม .....	44
ด้านอุทกวิทยา .....	44
ด้านปฐพีวิทยา .....	44
ด้านอากาศ .....	45
ด้านสุขภาพอนามัยและความปลอดภัย .....	45
บทสรุป .....	47
เอกสารอ้างอิง .....	49

## สารบัญรูป

	หน้า
1. ขั้นตอนการผลิตทองคำจากแร่ทองคำ .....	9
2. ความสัมพันธ์ของความเป็นกรดต่าง (pH) ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดไฮโดรเจนไซยาไนด์และ ไซยาไนด์ไอออนที่อุณหภูมิ 25°C .....	11
3. วัฏจักรของไซยาไนด์ .....	20
4. องค์ประกอบทางเคมีในการวิเคราะห์ total cyanide, WAD cyanide และ free cyanide .....	27
5. อุปกรณ์การกลั่นไซยาไนด์ .....	30

## สารบัญตาราง

	หน้า
1. ปริมาณความเข้มข้นไซยาไนด์ในพืชชนิดต่างๆ .....	4
2. ความสัมพันธ์ในการตอบสนองของมนุษย์และสัตว์ต่อปริมาณความเข้มข้นของการได้รับแก๊ส ไฮโดรเจนไซยาไนด์ในอากาศ .....	6
3. ประเภทของไซยาไนด์และสารประกอบไซยาไนด์ที่เกิดในกระบวนการแยกสกัดทองคำจากแร่ ทองคำ .....	12
4. ค่าคงที่ความเสถียรของสารเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะต่างๆ .....	18
5. การสลายตัวของไซยาไนด์ในบ่อกักเก็บกากแร่ด้วยกระบวนการทางธรรมชาติ .....	20
6. ประสิทธิภาพการบำบัดไซยาไนด์ด้วยเทคนิคต่างๆ .....	26
7. การวิเคราะห์ total cyanide และ WAD cyanide โดยการกลั่น ด้วยวิธีของ APHA ใน สารละลายที่มี thiocyanate .....	31
8. การเปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์ WAD cyanide ด้วย distillation และ OIA-1677 เมื่อใช้ สารละลายมาตรฐานไซยาไนด์เข้มข้น 2.00 mg/l .....	34

## รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

APHA	=	American Public Health Association
ASTM	=	American Society for Testing and Material
g/l	=	กรัมต่อลิตร
ISO	=	The International Organization for Standardization
mg.kg <sup>-1</sup>	=	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
mg/l	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
°C	=	องศาเซลเซียส
ppm	=	หนึ่งในล้านในล้านส่วน (parts per million)
USEPA	=	United State Environmental Protection Agency

## บทนำ

การประกอบการอุตสาหกรรมเหมืองแร่ทองคำในประเทศไทยเริ่มเป็นที่รู้จัก และได้รับการกล่าวถึงมากขึ้น สืบเนื่องมาจากการสำรวจพบว่า ประเทศไทยมีพื้นที่ที่มีศักยภาพแหล่งแร่ทองคำกระจายอยู่ทั่วไป และปัจจุบันมีบริษัทเอกชน 2 ราย ได้เปิดดำเนินการผลิตทองคำในเชิงพาณิชย์ คือ บริษัท อัครา ไมนิ่ง จำกัด และ บริษัท ทุงคำ จำกัด โดยการใช้สารไซยาไนด์ในขั้นตอนการแต่งแร่ ซึ่งจากประสบการณ์การทำเหมืองแร่ก็เป็นที่น่าตกใจว่าย่อมส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ตั้งแต่การระเบิดหิน การแต่งแร่ และการประกอบโลหกรรม ทำให้ธรรมชาติเสียสมดุล และไม่อาจฟื้นคืนสภาพดั้งเดิมในระยะเวลาสั้น ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมด้านต่างๆ ตามมา ยิ่งไปกว่านั้นการดำเนินกิจกรรมของเหมืองแร่ทองคำมีการใช้สารเคมีที่เป็นพิษในปริมาณมาก ส่งผลให้ชุมชนที่อยู่ใกล้เคียงพื้นที่โครงการเกิดความวิตกกังวล รู้สึกไม่ปลอดภัยในการดำเนินชีวิต แต่อย่างไรก็ดี ถ้าผู้ประกอบการอุตสาหกรรมเหมืองแร่ทองคำมีการจัดการระบบสิ่งแวดล้อมที่ดีและมีการควบคุมอย่างเคร่งครัด ด้วยความตระหนักถึงประโยชน์แก่ผู้ปฏิบัติงาน ผู้ที่เกี่ยวข้อง ประชาชน และสังคมโดยรวม การประกอบการเหมืองแร่ทองคำย่อมส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด

ด้วยบทบาทและภารกิจหนึ่งของกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ คือ การกำกับการดูแลการประกอบการเหมืองแร่ การแต่งแร่ และการประกอบโลหกรรม ให้เป็นไปตามกฎระเบียบที่กำหนด พร้อมทั้งการตรวจติดตามคุณภาพสิ่งแวดล้อม เพื่อเฝ้าระวังปัญหามลพิษที่อาจเกิดจากการประกอบการ ผู้เขียนจึงได้จัดทำเอกสารวิชาการเรื่อง ไซยาไนด์กับอุตสาหกรรมเหมืองแร่ทองคำ เพื่อรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับไซยาไนด์ กระบวนการสกัดทองคำออกจากแร่ด้วยไซยาไนด์ ซึ่งอันที่จริงเทคโนโลยีการสกัดทองคำออกจากแร่ด้วยไซยาไนด์มีด้วยกันหลายวิธี แต่วิธีที่นำเสนอเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมทั่วโลก พร้อมทั้งอธิบายสารประกอบไซยาไนด์ต่างๆ ที่มักพบในขั้นตอนการสกัดทองคำ การบำบัดของเสียไซยาไนด์ที่เกิดขึ้น และเทคนิคการตรวจวิเคราะห์ปริมาณไซยาไนด์ รวมถึงแนวทางการป้องกันแก้ไขผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการประกอบการเหมืองแร่ทองคำ ซึ่งประกอบด้วย การควบคุมป้องกันสารพิษ การติดตามเฝ้าระวังสารมลพิษ และการแก้ไขปัญหามลพิษจากการประกอบการ เพื่อใช้เป็นแหล่งความรู้ เสริมความเข้าใจ เสริมสร้างความปลอดภัยในการทำงานให้ผู้ที่เกี่ยวข้องมีองค์ความรู้ที่ถูกต้อง ซึ่งจะช่วยบรรเทาความวิตกกังวลและปัญหาสิ่งแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้นได้



## วัตถุประสงค์

1. เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับหน่วยงานราชการในการติดตามตรวจสอบและป้องกันการเกิดผลกระทบจากการประกอบกิจการการทำเหมืองแร่ทองคำด้วยไซยาไนด์
2. เพื่อใช้เป็นเอกสารให้ความรู้แก่บุคคลทั่วไปที่สนใจเรื่องการทำอุตสาหกรรมเหมืองแร่ทองคำด้วยไซยาไนด์

# ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับไซยาไนด์

## 1. ความหมายของไซยาไนด์

ไซยาไนด์ (cyanide, CN) เป็นสารประกอบเคมีที่ประกอบด้วยคาร์บอน (C) 1 อะตอม และไนโตรเจน (N) 1 อะตอม โดยโมเลกุลยึดติดกันด้วยพันธะสาม ( $C \equiv N$ ) มีประจุรวมเป็น  $-1$  โดยเลขออกซิเดชันของคาร์บอนและไนโตรเจนมีค่าเท่ากับ  $+2$  และ  $-3$  ตามลำดับ จึงมีสูตรทางเคมี คือ  $CN^-$

ไซยาไนด์สามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติ และมนุษย์ก็สามารถสังเคราะห์ขึ้นได้ด้วย โดยแหล่งกำเนิดไซยาไนด์ในธรรมชาติมีมากกว่า 2,000 แหล่ง เช่น แมลง แบคทีเรีย สาหร่าย รา และพืชตระกูลสูงต่างๆ เป็นต้น ส่วนไซยาไนด์ที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้นนั้นมีทั้งที่อยู่ในสถานะแก๊ส คือ แก๊สไฮโดรเจนไซยาไนด์ (hydrogen cyanide; HCN) และสถานะของแข็ง ได้แก่ โซเดียมไซยาไนด์ (sodium cyanide; NaCN) โพแทสเซียมไซยาไนด์ (potassium cyanide; KCN) และแคลเซียมไซยาไนด์ (calcium cyanide;  $Ca(CN)_2$ ) โดยไซยาไนด์ที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นนี้จะนำมาใช้ในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ แต่เนื่องจากไซยาไนด์จัดเป็นสารเคมีที่มีพิษและอาจทำให้เสียชีวิตได้ หากกลืนหรือสูดดมในปริมาณที่มากพอ ดังนั้น การศึกษาทำความเข้าใจเกี่ยวกับคุณสมบัติของไซยาไนด์จึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยเฉพาะผู้ที่เกี่ยวข้องและผู้ที่สัมผัสใช้งานโดยตรง เพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการทำงานและยังช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่งด้วย (Logsdon et al., 1999)

## 2. แหล่งกำเนิดไซยาไนด์

### 2.1 แหล่งกำเนิดในธรรมชาติ

คาร์บอนและไนโตรเจนเป็นธาตุที่มีอยู่รอบๆ ตัวเรา โดยประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ ของอากาศที่เราหายใจก็ประกอบไปด้วยธาตุทั้งสอง นอกจากนี้ธาตุดังกล่าวยังเป็นองค์ประกอบของกรดอะมิโน ซึ่งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานที่สำคัญในโมเลกุลของสิ่งมีชีวิตต่างๆ รวมถึงมนุษย์ด้วย ในธรรมชาติพืชและสัตว์บางชนิดสามารถสังเคราะห์ไซยาไนด์ได้และใช้เป็นกลไกป้องกันอันตรายจากนักล่าในห่วงโซ่อาหาร แต่สิ่งมีชีวิตจำนวนมากก็สามารถปรับตัวให้ทนต่อไซยาไนด์หรือขับสารนี้ออกจากร่างกายได้

แหล่งกำเนิดไฮโดรเจนไซยาไนด์ในธรรมชาติจะอยู่ในรูปของสารประกอบที่มีลักษณะคล้ายน้ำตาลที่เรียกว่า amygdalin ซึ่งพบได้ในผลไม้ ผัก เมล็ด และถั่วต่างๆ เช่น แอปริคอต พืช ถั่วงอก ข้าวโพด มะม่วงหิมพานต์ เซอร์รี่ มันฝรั่ง และถั่วเหลือง เป็นต้น (Logsdon et al., 1999) โดยปริมาณไซยาไนด์ในพืชบางชนิดแสดงดังตารางที่ 1

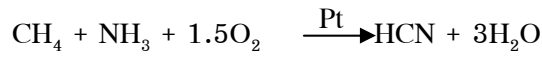
ตารางที่ 1 ปริมาณความเข้มข้นไซยาไนด์ในพืชชนิดต่าง ๆ คัดลอกจาก Logsdon et al., 1999

ชนิดของพืช	ความเข้มข้นของไซยาไนด์ (mg.kg <sup>-1</sup> )
มันสำปะหลังที่ส่วนต่าง ๆ ดังนี้	
- ใบ	377-500
- หัวมัน	138
- หัวมันอบแห้ง	46-100
- หัวมันบด	81
หน่อไม้	Max. 8,000
ถั่วลิมา (Lima bean)	2,100
อัลมอนต์	280-2,500
ข้าวฟ่าง	Max. 2,500

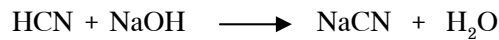
จากตารางที่ 1 จะพบว่า พืชแต่ละชนิดและส่วนต่างๆ ของพืชนั้น มีปริมาณไซยาไนด์แตกต่างกัน โดยเมื่อโครงสร้างของเซลล์พืชที่มีไซยาไนด์เป็นองค์ประกอบถูกทำลาย ไซยาไนด์จะถูกไฮโดรไลซิสอย่างรวดเร็ว กลายเป็นแก๊สไฮโดรเจนไซยาไนด์ที่มีพิษ ดังนั้นการบริโภคพืชประเภทนี้จึงเป็นที่รู้จักกันดีว่าเป็นแหล่งผลิตไซยาไนด์ที่อาจเป็นอันตรายต่อคนและสัตว์ได้ นอกจากนี้สิ่งมีชีวิตอื่นๆ ที่ไม่ใช่พืชก็สามารถสังเคราะห์ไซยาไนด์ได้ เช่น รา แบคทีเรีย ตะขาบ กิ้งกือ แมลงเต่าทอง มอธส์ และผีเสื้อ เป็นต้น

## 2.2 ไซยาไนด์ที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้น

ไฮโดรเจนไซยาไนด์เป็นสารเคมีชนิดแรกในกลุ่มไซยาไนด์ที่ถูกสังเคราะห์ขึ้น เป็นแก๊สที่ไม่มีสี มีกลิ่นขมคล้ายเมล็ดอัลมอนต์ และนำไปใช้เป็นสารเริ่มต้นในการสังเคราะห์สารประกอบไซยาไนด์อื่นๆ ต่อไป โดยทั่วไปไฮโดรเจนไซยาไนด์มักถูกสังเคราะห์ขึ้นจากการทำปฏิกิริยาของแอมโมเนีย (NH<sub>3</sub>) และแก๊สธรรมชาติ (แก๊สมีเทน, CH<sub>4</sub>) ในสภาวะที่มีออกซิเจน ที่อุณหภูมิประมาณ 1200°C โดยใช้แพลทินัม (platinum, Pt) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังปฏิกิริยาที่ 1 (Wikipedia, 2007) ในแต่ละปีอัตราการผลิตไฮโดรเจนไซยาไนด์อยู่ที่ประมาณ 1.4 ล้านตันต่อปี โดย 13% ของปริมาณนี้ถูกนำไปสังเคราะห์โซเดียมไซยาไนด์ ดังปฏิกิริยาที่ 2 ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของไฮโดรเจนไซยาไนด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วระเหยเอาน้ำออก เรียกกระบวนการผลิตนี้ว่า neutralization-wet process (The Mining Journal Limited, 2001) และนำไปใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับโลหะ เช่น การทำเหมืองแร่ทองคำ การชุบโลหะ และเครื่องประดับ ส่วนที่เหลืออีก 87% นำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในชีวิตประจำวัน



ปฏิกิริยาที่ 1



ปฏิกิริยาที่ 2

นอกจากนี้กิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ เช่น การกลั่นน้ำมัน การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงรถยนต์ การสูบบุหรี่ และการรับประทานอาหารที่มีไซยาไนด์เป็นองค์ประกอบ เช่น อัลมอนต์ ถั่วโลมา กาแฟ และเกลือ ก็สามารถปล่อยไซยาไนด์ออกมาได้เช่นกัน (International Cyanide Management Institute, 2006a)

### 3. พิษของไซยาไนด์

ไซยาไนด์เป็นสารเคมีที่มีความเป็นพิษสูง ที่สามารถพบได้ทั่วไปในสิ่งแวดล้อมซึ่งอาจเป็นผลมาจากกระบวนการทางธรรมชาติและจากกิจกรรมต่างๆ ในภาคอุตสาหกรรมดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยไซยาไนด์สามารถเข้าสู่ร่างกายได้ทั้งทางปาก การหายใจ และการดูดซึมผ่านผิวหนังและตา โดยระดับความรุนแรงจากพิษของไซยาไนด์จะขึ้นอยู่กับปัจจัย 4 ประการ ได้แก่ ชนิดของสิ่งมีชีวิต ระยะเวลาการได้รับ ปริมาณที่ได้รับ และเส้นทางการได้รับ เช่น การหายใจ การกลืน หรือการฉีด เป็นต้น

สำหรับมนุษย์ การสัมผัสหรือสูดดมไซยาไนด์ปริมาณสูงที่กระจายตัวอยู่ในอากาศแค่เพียงระยะเวลาสั้นๆ จะมีผลต่อการทำงานของสมองและหัวใจ เนื่องจากไซยาไนด์จะรวมตัวกับเอนไซม์ที่มีชื่อว่า cytochrome oxidase ซึ่งมีหน้าที่ขนถ่ายอิเล็กตรอนในกระบวนการสังเคราะห์ ATP (Adenosin Triphosphate) กลายเป็นสารเชิงซ้อนที่มีความเสถียรสูง ทำให้เซลล์ไม่สามารถใช้ออกซิเจนที่ละลายอยู่ในกระแสเลือดได้เต็มที่ ส่งผลให้กระบวนการเมตาบอลิซึมของร่างกายมนุษย์เปลี่ยนจากสถานะที่ใช้ออกซิเจนเป็นสถานะที่ไร้ออกซิเจน ทำให้เกิดการสะสมแลคเตทปริมาณสูงในเลือด จึงเป็นสาเหตุให้เกิดการกดระบบประสาทส่วนกลาง มีผลให้การหายใจหยุดชะงักและเสียชีวิตได้ในที่สุด ส่วนการสัมผัสไซยาไนด์แม้เพียงปริมาณน้อยๆ แต่เป็นระยะเวลานานก็จะทำให้เกิดอาการหายใจติดขัด ปวดหัวใจ อาเจียน ปวดศีรษะ และต่อมไทรอยด์เกิดการขยายตัว ตัวอย่างเช่น การบริโภคมันสำปะหลังดิบในปริมาณมาก จะทำให้มีไซยาไนด์ในเลือดสูง ส่งผลให้มือและเท้ามีอาการอ่อนแรง ทรงตัวไม่ได้ ตาพร่ามัว และหูอื้อ เป็นต้น โดยระดับความเป็นพิษของไซยาไนด์ต่อสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2

นอกจากนี้ นก สัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังที่อาศัยอยู่ในน้ำ และปลา ก็เป็นสิ่งมีชีวิตที่มีความไวต่อไซยาไนด์มาก ปลาหลายชนิดอาจมีความสามารถในการว่ายน้ำและการสืบพันธุ์ลดลง ระบบการหายใจขัดข้อง ระบบการเจริญเติบโตผิดปกติ และตกเป็นเหยื่อได้ง่าย ถ้าได้รับไซยาไนด์อิสระ (free cyanide) ในปริมาณ 5-7.5 ไมโครกรัมต่อลิตร ( $\mu\text{g}/\text{l}$ ) โดยปลาบางชนิดอาจถึงตายได้ ถ้าได้รับไซยาไนด์อิสระในปริมาณ 20-76  $\mu\text{g}/\text{l}$  และที่ความเข้มข้นสูงกว่า 200  $\mu\text{g}/\text{l}$  จะเป็นพิษอย่างเฉียบพลันกับปลาส่วนใหญ่ ส่วนสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังที่อาศัยอยู่ในน้ำอาจเสียชีวิตได้ เมื่อได้รับไซยาไนด์อิสระเข้มข้น 30-100  $\mu\text{g}/\text{l}$  สำหรับช่วงความเข้มข้นของไซยาไนด์ที่เป็นอันตรายและอาจทำให้นกตายได้ในช่วงกว้างๆ คือ 0.8-11.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ( $\text{mg}/\text{kg}$ ) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของนกนั้นๆ โดยนกจะแสดงอาการหอบ น้ำลายไหล กระพริบตา เชื่องซึม หายใจติดขัด และอาจตายได้ในที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม นกที่สามารถทนพิษได้นานเกิน 1 ชั่วโมง อาจฟื้นกลับมาได้ เนื่องจากกระบวนการเมตาบอลิซึมในร่างกายนกจะเปลี่ยนไซยาไนด์

ไปเป็นไทโอไซยาเนท และสารประกอบอื่นๆ ที่เป็นพิษน้อยลง (International Cyanide Management Institute, 2006a)

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ในการตอบสนองของมนุษย์และสัตว์ต่อปริมาณความเข้มข้นของการได้รับแก๊สไฮโดรเจนไซยาไนด์ในอากาศ คัดลอกจาก Environment Australia, 1998

ประเภท	ความเข้มข้นของ HCN (ppm)	การตอบสนอง
มนุษย์	270	เสียชีวิตทันที
	181	เสียชีวิตหลังได้รับ 10 นาที
	135	เสียชีวิตหลังได้รับ 30 นาที
	110-135	เสียชีวิตหลังได้รับ 30-60 นาที หรือนานกว่านี้
	45-55	ทนได้นาน 30-60 นาที โดยไม่แสดงอาการเฉียบพลัน
	18-36	แสดงอาการเล็กน้อยหลังได้รับนานหลายชั่วโมง
หนู	1300	ตายทันทีหลังได้รับ 1-2 นาที
	110	ตายทันทีหลังได้รับ 45 นาที
	45	ตายทันทีหลังได้รับ 2.5-4 ชั่วโมง
แมว	315	ตายอย่างรวดเร็ว
	180	ตาย
	125	ได้รับพิษอย่างชัดเจนภายใน 6-7 นาที
สุนัข	315	ตายอย่างรวดเร็ว
	115	ตาย
	90	อาจทนได้นานเป็นชั่วโมง และตายหลังจากนั้น
	30-65	อาเจียน ชักกระตุก และอาจตายได้
	30	อาจทนได้
กระต่าย	315	ตาย
	120	ไม่แสดงอาการชัดเจน

#### 4. ประโยชน์ของไซยาไนด์

ไซยาไนด์เป็นสารเคมีที่มีคุณสมบัติเฉพาะและไวต่อการเกิดปฏิกิริยา จึงนิยมนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ทำให้ในชีวิตประจำวันมนุษย์มีโอกาสนสัมผัสกับไซยาไนด์ผ่านการใช้ผลิตภัณฑ์นั้นๆ เช่น วิตามิน เครื่องประดับ อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ สารดับเพลิง เครื่องสำอางค์ สีย้อมผ้า น้ำยาล้างเล็บ สีทาบ้าน ยารักษาโรค และเกลือ เป็นต้น (Logsdon et al., 1999)

โดยไซยาไนด์ประมาณ 80% ที่ถูกผลิตขึ้นจะถูกนำมาใช้ในการผลิตสารอนินทรีย์ เช่น ไนทริล ไนลอน และพลาสติกอะครีลิก และอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น การผลิตโลหะ การชุบแข็งเหล็ก การล้างภาพถ่าย และยางสังเคราะห์

เหล็กไซยาไนด์ (iron cyanide) นิยมนำมาใช้เป็น anti-caking additive เพื่อผลิตเกลือที่ใช้โรยบนถนนที่มีหิมะ หรือที่เรียกว่า road salt เพื่อละลายหิมะและน้ำแข็งที่ทับถมกันอยู่ ส่วนแก๊สไฮโดรเจนไซยาไนด์มักนำมาใช้ผลิตยากำจัดวัชพืชและสัตว์ที่ทำลายพืชผล เช่น หนู และแมลงต่างๆ

นอกจากนี้ ไซยาไนด์ยังเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของยารักษาโรคจำนวนไม่น้อย เช่น laetrile ยารักษาโรคมะเร็ง และ nitroprusside ยาลดความดันโลหิตสูง และยังนำมาใช้งานทางการแพทย์อื่นๆ ได้แก่ การตกแต่งสีกรรม และการลบรอยแผลเป็นต่างๆ

การทำเหมืองแร่ก็เป็นอีกอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการใช้ไซยาไนด์ โดยตั้งแต่ปี 1887 สารละลายไซยาไนด์ถูกนำมาใช้เพื่อสกัดโลหะมีค่า เช่น ทองคำและเงินออกจากแร่ และยังคงถูกนำมาใช้เป็นสารช่วยการลอยตัว (flotation reagent) ในการแยกโลหะพื้นฐาน เช่น ตะกั่ว ทองแดง และ สังกะสี เป็นต้น

จะเห็นได้ว่าถ้าปราศจากไซยาไนด์ กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เหล่านี้อาจไม่สามารถดำเนินไปได้ ดังนั้นแม้เป็นที่ทราบกันดีว่าไซยาไนด์เป็นสารเคมีที่มีพิษ แต่ถ้านำมาใช้งานอย่างถูกต้องและระมัดระวัง ก็จะทำให้เกิดความปลอดภัยในการทำงานและไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

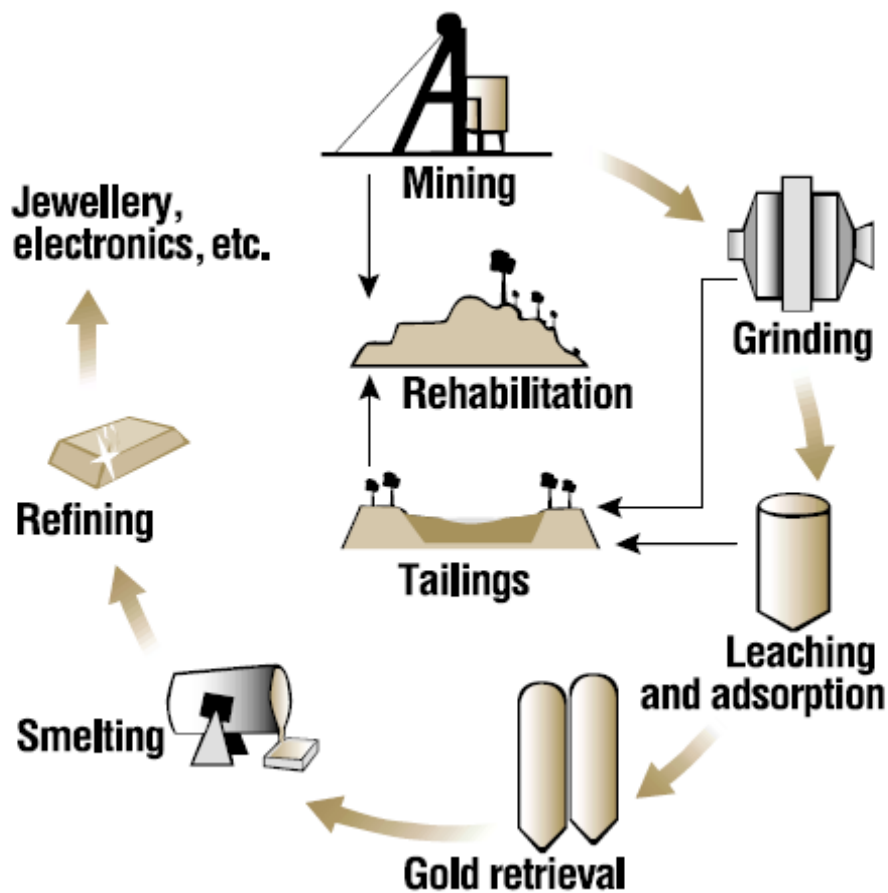
# อุตสาหกรรมเหมืองแร่ทองคำ

## 1. กระบวนการผลิตทองคำด้วยไซยาไนด์

ไซยาไนด์ถูกนำมาใช้ในกิจกรรมของเหมืองแร่เป็นครั้งแรกในปี 1887 ที่ประเทศนิวซีแลนด์และแอฟริกา เพื่อสกัดทองคำและโลหะอื่นๆ เช่น เงิน ตะกั่ว ทองแดง ออกจากแร่ เนื่องจากทองคำมักพบในแร่คุณภาพต่ำ คือ แร่ที่มีปริมาณทองคำไม่เกิน 10 กรัมต่อตัน หรือประมาณ 0.001 % โดยน้ำหนัก ซึ่งถ้าทำการแยกทองคำในแร่ดังกล่าวด้วยวิธีทางกายภาพ เช่น การบดหยาบ (crushing) การบดละเอียด (grinding) และการแยกโดยอาศัยความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะ (gravity separation) จะไม่สามารถแยกสกัดทองคำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นการสกัดทองคำด้วยสารเคมีโดยการใช้สารละลายไซยาไนด์จึงได้รับความนิยม เพราะสามารถสกัดทองคำได้มากกว่า 90 % จึงนับว่าเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงและมีความคุ้มค่าอีกด้วย (Mudder et al., 2001; Environmental Australia, 1998)

นอกจากการใช้ไซยาไนด์แล้ว ยังพบว่ามีสารเคมีอื่นๆ ที่สามารถนำมาใช้แยกทองคำออกจากแร่ได้ เช่น คลอไรด์ (Cl) โบรไมด์ (Br) ไทโอยูเรีย (thiourea) และไทโอซัลเฟต (thiosulfate) เป็นต้น แต่เนื่องจากสารประกอบเชิงซ้อนของทองคำกับสารดังกล่าวมีความเสถียรน้อยกว่าสารเชิงซ้อนของไซยาไนด์ และการใช้สารดังกล่าวมีความเสี่ยงต่อมนุษย์ สัตว์ และสิ่งแวดล้อมสูง อีกทั้งมีราคาค่อนข้างแพง จึงไม่นิยมนำมาใช้ (International Cyanide Management Institute, 2006c)

โดยทั่วไปกระบวนการผลิตทองคำด้วยการใช้สารละลายไซยาไนด์ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังรูปที่ 1 คือ การนำแร่ที่ขุดได้มาบดให้มีขนาดตามต้องการ จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการทางเคมีเพื่อแยกโลหะ เช่น ทองคำ เงิน และทองแดง ออกจากสินแร่ แล้วนำโลหะผสมที่สกัดได้ไปหลอม (smelting) และทำการแยกทองคำให้บริสุทธิ์ (refining) เพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ



รูปที่ 1 ขั้นตอนการผลิตทองคำจากแร่ทองคำ คัดลอกจาก Logsdon et al., 1999

### 1.1 การเตรียมแร่

การเตรียมแร่เป็นขั้นตอนการทำให้แร่อยู่ในสภาพที่เหมาะสม เพื่อสามารถสกัดทองคำออกมาได้มากที่สุดเมื่ออยู่ในสารละลายไซยาไนด์ โดยลำดับแรกให้ทำการบดแร่ให้มีขนาดเล็กลง หลังการบดหากพบว่าแร่ประกอบด้วยเม็ดทองคำ (free gold) ให้นำไปผ่านการแยกโดยวิธี gravity separation ก่อน เนื่องจากเม็ดทองคำมีอนุภาคขนาดใหญ่และสามารถทำการแยกทางกายภาพได้ จึงไม่ต้องสิ้นเปลืองเวลาในการละลายทองคำด้วยไซยาไนด์ และหลังการคัดแยกเม็ดทองคำออกแล้ว ให้นำแร่ส่วนที่เหลือมาทำการสกัดทองคำด้วยสารละลายไซยาไนด์ต่อ โดยแร่ที่ผ่านการเตรียมแร่จะอยู่ในสภาพของเหลวลักษณะคล้ายโคลนที่เรียกว่า slurry เนื่องจากมีการเติมน้ำขณะทำการบดแร่

นอกจากนี้ ถ้าสินแร่ที่นำมาสกัดเป็นแร่จำพวกซัลไฟด์ (sulfide mineral) หรือแร่คาร์บอน (carbonaceous mineral) ควรนำไปผ่านการปรับสภาพก่อน (pre-treatment) เนื่องจากไซยาไนด์สามารถละลายซัลไฟด์ซึ่งอยู่ในแร่ได้ดีกว่าทองคำ เกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่าไทโอไซยาเนต (thiocyanate) ทำให้สิ้นเปลืองปริมาณไซยาไนด์ ส่วน carbonaceous mineral สามารถดูดซับทองคำที่ละลายในสารละลายไซยาไนด์ได้ ทำให้เกิดการสูญเสียทองคำไป ซึ่งเทคนิคทั่วไปในการทำ pre-treatment มีดังนี้ (International Cyanide Management Institute, 2006c)



### 1.1.1 Bio-oxidation

Bio-oxidation เป็นกระบวนการออกซิไดส์แร่ในน้ำด้วยแบคทีเรียที่บริโภคน้ำตาลเพื่อกำจัดซัลเฟอร์ในแร่

### 1.1.2 Pressure oxidation

Pressure oxidation คือ การใช้ออกซิเจนและความร้อนภายใต้ความดันสูง โดยสารละลายจะถูกควบคุมให้มีสภาวะเป็นกรดหรือด่างก็ได้ขึ้นอยู่กับกระบวนการที่ใช้ เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมซัลเฟอร์จะถูกออกซิไดส์และกำจัดออกไป

### 1.1.3 Roasting

Roasting เป็นการให้ความร้อนและอากาศเพื่อเผาไล่ซัลเฟอร์ออกจากแร่ ซึ่งเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมมากที่สุด แต่การเผาแร่ทำให้เกิดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) ในปริมาณมากสู่บรรยากาศ ดังนั้นการบำบัดแก๊สพิษด้วยการเสปร์ย์น้ำหรือ scrubbing จึงเป็นสิ่งจำเป็น และทำให้ได้กรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เป็นผลพลอยได้

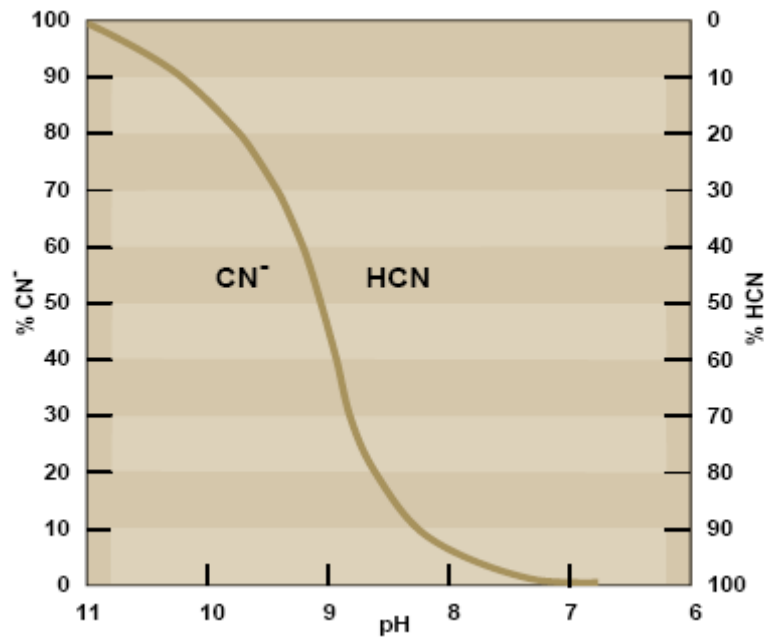
### 1.1.4 Chemical oxidation

Chemical oxidation คือ การใช้กรดไนตริกที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ เพื่อออกซิไดส์แร่

## 1.2 การละลายทองคำด้วยสารละลายไซยาไนด์

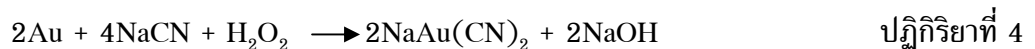
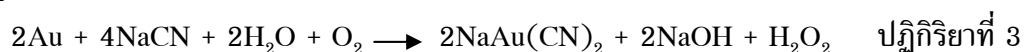
การทำเหมืองแร่ทองคำจะใช้สารละลายไซยาไนด์เจือจาง โดยละลายไซยาไนด์หรือโพแทสเซียมไซยาไนด์ ในน้ำให้มีความเข้มข้นประมาณ 0.01 ถึง 0.05 % (100–500 part per million; ppm) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของแร่ เช่น ถ้าแร่มีโลหะหรือสารอื่นๆ ที่สามารถทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์ได้ จะทำให้ไซยาไนด์บางส่วนถูกใช้ไป จึงต้องเพิ่มปริมาณไซยาไนด์ให้มากพอเพื่อจะสามารถละลายทองคำออกมาให้มากที่สุด ซึ่งเทคนิคการใช้สารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายในการสกัดโลหะต่างๆ เรียกว่า hydrometallurgy

นอกจากนี้ pH ของสารละลายจะถูกควบคุมให้มีค่าระหว่าง 10 ถึง 11 ด้วยการเติมปูนขาว (lime) ก่อนการเติมไซยาไนด์ เพื่อให้ไซยาไนด์ที่เติมลงไปอยู่ในรูปของไซยาไนด์ไอออน ( $\text{CN}^-$ ) ที่สามารถละลายทองคำได้ดี และป้องกันการเกิดแก๊สไฮโดรเจนไซยาไนด์ซึ่งเป็นแก๊สที่มีพิษสูง ดังรูปที่ 2 โดยจะเห็นว่าปริมาณ HCN มีค่าลดลงเมื่อ pH สูงขึ้น ขณะที่  $\text{CN}^-$  จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น

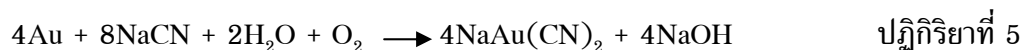


รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ของความเป็นกรดต่าง (pH) ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดไฮโดรเจนไซยาไนด์และไซยาไนด์ไอออน ที่อุณหภูมิ 25°C คัดลอกจาก Mudder et al., 2001

นำแร่และสารละลายไซยาไนด์ที่ผ่านการเตรียมแล้วใส่ลงในถังปฏิกิริยา เพื่อสกัดทองคำออกจากแร่ เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนไซยาไนด์กับทองคำ เรียกขั้นตอนนี้ว่า leaching และขณะกระบวนการสกัดจะใช้ออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดส์ด้วย ซึ่งนิยมใช้มากกว่าอากาศ เนื่องจากออกซิเจนจะช่วยเพิ่มอัตราการละลายทองคำ และทำให้สารอื่นไม่ไวต่อการทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์ โดยสารประกอบเชิงซ้อนไซยาไนด์กับทองคำที่เกิดขึ้นจะมีความเสถียรสูงและละลายอยู่ในสารละลาย ทำให้สามารถแยกออกมาจากมลทินที่ไม่ละลายได้ โดยสารละลายที่อุดมทองคำนี้เรียกว่า pregnant solution ปฏิกิริยาการละลายทองคำด้วยไซยาไนด์คาดว่าประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ดังปฏิกิริยาที่ 3 และ 4 โดยมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) เป็นสาร intermediate (Mudder et al., 2001)



ผลรวมของปฏิกิริยาทั้งสองเรียกว่า สมการของเอลส์เนอร์ (Elsner's equation) ดังปฏิกิริยาที่ 5



จากนั้นเติมถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เพื่อไปดูดซับทองคำในสารละลาย แล้วแยกเม็ดถ่านที่อุดมทองคำไว้จากสารละลายด้วยการกรองผ่านตะแกรง นำเม็ดถ่านกัมมันต์ไปสกัดทองคำออกในขั้นตอนต่อไป โดยในทางปฏิบัติพบว่านอกจากทองคำแล้วโลหะอื่นๆ เช่น เงิน และทองแดงก็อาจถูกดูดซับในเม็ดถ่านกัมมันต์ด้วย

### 1.3 การชะล้างทองคำออกจากถ่านกัมมันต์และทำให้บริสุทธิ์

ทองคำที่ถูกดูดซับด้วยเม็ดถ่านกัมมันต์จะถูกชะล้างออกมาให้อยู่ในสารละลายอีกครั้งด้วยการใช้สารละลายผสมของโซเดียมไซยาไนด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อน ความเข้มข้น 0.1 และ 1 % ตามลำดับ จากนั้นแยกทองคำในสารละลายออกด้วย electrowinning ซึ่งเป็นการใช้กระแสไฟฟ้าจับทองคำออกจากสารละลาย โดยทองคำและโลหะอื่นๆ จะไปพอกตัวอยู่ที่ขั้วไฟฟ้า จากนั้นนำโลหะผสมทองคำที่ได้ไปถลุงเพื่อแยกมลทินออก เหลือเพียงโลหะทองคำและเงินเป็นส่วนใหญ่ นำแท่งโลหะมีค่าที่ได้ไปทำให้บริสุทธิ์ (refining) เพื่อให้ได้โลหะทองคำบริสุทธิ์ที่พร้อมจำหน่ายต่อไป (Logsdon et al., 1999)

### 2. สารประกอบไซยาไนด์ที่เกิดจากกระบวนการแยกสกัดทองคำจากแร่

ขณะกระบวนการสกัดทองคำด้วยสารละลายไซยาไนด์ นอกจากจะได้สารเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับทองคำแล้ว โลหะอื่นๆ ที่เป็นองค์ประกอบในแร่ก็สามารถทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์ เกิดเป็นสารประกอบและสารเชิงซ้อนของไซยาไนด์มากมาย ซึ่งการศึกษาคุณลักษณะทางเคมีของสารประกอบไซยาไนด์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแยกสกัดทองคำจากแร่ จะช่วยให้เกิดความเข้าใจในแง่ความปลอดภัยและอันตรายจากสารประกอบเหล่านี้ที่มีต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม โดยสารประกอบไซยาไนด์ที่พบได้ในสารละลายขณะดำเนินการสกัดทองคำ สามารถจำแนกออกเป็น 4 ประเภทใหญ่ๆ คือ free cyanide, simple cyanide compound, cyanide complex และสารประกอบไซยาไนด์อื่นๆ (cyanide related compound) ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ประเภทของไซยาไนด์และสารประกอบไซยาไนด์ที่เกิดในกระบวนการแยกสกัดทองคำจากแร่ทองคำ ดัดแปลงจาก Mudder et al., 2001

Classification	Compound
1. Free cyanide	$\text{CN}^-$ , HCN
2. Simple cyanide compound	
- Soluble simple cyanide compound	NaCN, KCN, $\text{Ca}(\text{CN})_2$ , $\text{Hg}(\text{CN})_2$
- Insoluble simple cyanide compound	$\text{Zn}(\text{CN})_2$ , $\text{Cd}(\text{CN})_2$ , $\text{Ni}(\text{CN})_2$ , CuCN, AgCN
3. Cyanide complex	
- Weak cyanide complex	$\text{Zn}(\text{CN})_4^{2-}$ , $\text{Cd}(\text{CN})_3^-$ , $\text{Cd}(\text{CN})_4^{2-}$
- Moderately strong cyanide complex	$\text{Cu}(\text{CN})_2^-$ , $\text{Cu}(\text{CN})_3^{2-}$ , $\text{Ni}(\text{CN})_4^{2-}$ , $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$
- Strong cyanide complex	$\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ , $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ , $\text{Co}(\text{CN})_6^{4-}$ , $\text{Au}(\text{CN})_2^-$
4. Cyanide related compound	$\text{OCN}^-$ , $\text{SCN}^-$

## 2.1 Free cyanide

Free cyanide (CN free) คือ ไฮยาไนต์อิสระที่อยู่ในรูปของแอนไอออน ( $\text{CN}^-$ ) และกรดไฮโดรไซยานิก (hydrocyanic acid; HCN) หรือแก๊สไฮโดรเจนไฮยาไนต์ โดยอัตราส่วนปริมาณของ  $\text{CN}^-$  และ HCN นี้ขึ้นอยู่กับความเป็นกรดต่างของระบบ ดังรูปที่ 2 โดย hydrocyanic acid เป็นกรดอ่อนที่เมื่อละลายในของเหลวจะแตกตัวเป็นไฮยาไนต์ไอออน ดังปฏิกิริยาที่ 6



ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิและ pH ค่าหนึ่ง  $\text{CN}^-$  และ HCN จะมีปริมาณเท่ากันซึ่งถูกกำหนดโดยสมการที่ 1

$$K = \frac{[\text{H}^+][\text{CN}^-]}{[\text{HCN}]} = 2.03 \times 10^{-10}, \text{pKa} = 9.31 \text{ (ที่ } 20^\circ\text{C)} \quad \text{สมการที่ 1}$$

ดังนั้นค่า pH ของระบบจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการสกัดทองคำด้วยไฮยาไนต์ เพราะที่ pH ประมาณ 10.5 หรือมากกว่า ไฮยาไนต์อิสระส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของ  $\text{CN}^-$  ที่พร้อมจะทำปฏิกิริยากับทองคำ กลายเป็นสารเชิงซ้อนที่เสถียร ซึ่งสามารถแยกออกมาจากแร่ได้ และยังเป็น การป้องกันการสูญเสียไฮยาไนต์เนื่องจากการระเหยของ HCN ด้วย

โดยทั่วไปในแหล่งน้ำธรรมชาติจะมีค่า pH อยู่ที่ประมาณ 5.0 ถึง 8.5 ดังนั้น free cyanide จะปรากฏอยู่ในรูปของ HCN และอาจสูญเสียไปจากการระเหย เนื่องจาก HCN มีจุดเดือดต่ำและมีความดันไอสูง จึงสามารถระเหยได้ง่าย โดยเฉพาะที่บริเวณผิวน้ำซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างอากาศและน้ำ

## 2.2 Simple cyanide compound

Simple cyanide compound หมายถึง สารประกอบของไฮยาไนต์และโลหะที่อยู่ในรูปของเกลือของกรดไฮโดรไซยานิก สารประกอบไฮยาไนต์ในกลุ่มนี้มีประจุรวมเป็นกลาง เนื่องจากประจุบวกของโลหะจะสมดุลกับประจุลบของไฮยาไนต์ ซึ่งแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ตามความสามารถในการละลาย ดังนี้

### 2.2.1 Soluble simple cyanide compound

Soluble simple cyanide compound เป็นกลุ่มที่ละลายน้ำได้ง่าย โดยมีโลหะหมู่ I และ II เป็นองค์ประกอบ เช่น KCN, NaCN,  $\text{Ca}(\text{CN})_2$  และรวมถึงปรอท ( $\text{Hg}(\text{CN})_2$ ) ด้วย เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวได้ไฮยาไนต์อิสระ เช่น ปฏิกิริยาที่ 7 และ 8 จากนั้นไฮยาไนต์อิสระจะทำปฏิกิริยากับน้ำ กลายเป็น HCN ดังปฏิกิริยาที่ 9



### 2.2.2 Insoluble simple cyanide compound

Insoluble simple cyanide compound เป็นกลุ่มที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้ยาก เป็นสารประกอบไซยาไนด์กับโลหะต่างๆ ได้แก่ สังกะสี แคลเดียม ทองแดง นิกเกิล และเงิน ซึ่งมีสูตรทางเคมีดังนี้  $Zn(CN)_2$ ,  $Cd(CN)_2$ ,  $Ni(CN)_2$ ,  $CuCN$  และ  $AgCN$

## 2.3 Cyanide complex

Cyanide complex หมายถึง สารเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะต่างๆ ในกระบวนการสกัดทองคำในสินแร่ทองคำ ซึ่งนอกจากไซยาไนด์จะทำปฏิกิริยากับทองคำแล้ว ยังสามารถเกิดปฏิกิริยากับโลหะอื่นๆ ที่เป็นองค์ประกอบของแร่ได้อีกด้วย เช่น เหล็ก ทองแดง สังกะสี นิกเกิล และเงิน โดยสารเชิงซ้อนของไซยาไนด์สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

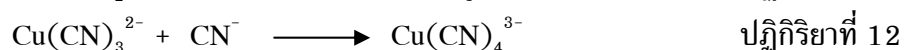
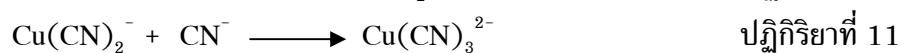
### 2.3.1 Weak cyanide complex

Weak cyanide complex เป็นสารเชิงซ้อนของไซยาไนด์ที่สามารถแตกตัวได้ง่าย เมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรดอ่อน เช่น  $Zn(CN)_4^{2-}$ ,  $Cd(CN)_3^-$ ,  $Cd(CN)_4^{2-}$

### 2.3.2 Moderately strong cyanide complex

Moderately strong cyanide complex เป็นสารเชิงซ้อนของไซยาไนด์ที่สามารถแตกตัวได้เล็กน้อย เมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรดอ่อน เช่น  $Cu(CN)_2^-$ ,  $Cu(CN)_3^{2-}$ ,  $Ni(CN)_4^{2-}$ ,  $Ag(CN)_2^-$

โดยสารเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะในกลุ่มนี้สามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เมื่อความเข้มข้นของไซยาไนด์ในสารละลายเพิ่มขึ้น เรียกกลไกนี้ว่า step-wise manner ตัวอย่างของกลไก แสดงดังปฏิกิริยาที่ 10 ถึง 12

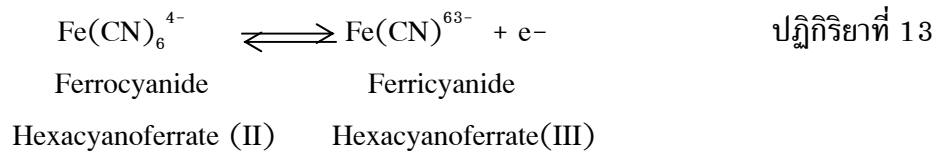


สัดส่วนของสารเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะชนิดต่างๆ กัน จะมีปริมาณแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไซยาไนด์ ชนิดของโลหะ และ pH ของสารละลาย

### 2.3.3 Strong cyanide complex

Strong cyanide complex เป็นสารเชิงซ้อนของไซยาไนด์ที่แตกตัวได้ยากเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรด ที่อุณหภูมิห้อง แต่สามารถแตกตัวได้ดีขึ้นในสภาวะที่เป็นกรดแก่และอุณหภูมิสูงขึ้น โดยโลหะที่จัดเป็นสารเชิงซ้อนในกลุ่มนี้ ประกอบด้วย เหล็ก ทองคำ และโคบอลต์ ซึ่งสลายตัวช้ากว่าสารเชิงซ้อนในกลุ่ม weak และ moderately strong complexed cyanide มาก แต่เนื่องจากโคบอลต์เป็นธาตุที่พบปริมาณน้อยมาก ๆ ในแร่ ต่างจากเหล็กซึ่งเป็นธาตุที่พบมากในแร่ทั่วไป ดังนั้นเมื่อก้าวถึงสารเชิงซ้อนในกลุ่ม strong cyanide complex จึงมักหมายถึง เหล็กไซยาไนด์ (iron cyanide) หรือ hexacyanoferrate

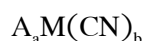
สารเชิงซ้อน iron cyanide ส่วนใหญ่ประกอบด้วย ferrocyanide ( $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ ) และ ferricyanide ( $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ ) โดยไซยาไนด์จะทำปฏิกิริยากับเหล็กซึ่งอยู่ในสภาพรีดิวซ์ คือ มีประจุ +2 กลายเป็นสารเชิงซ้อน hexacyanoferrate (II) หรือ ferrocyanide จากนั้น ferrocyanide จะถูกออกซิไดส์อย่างรวดเร็ว กลายเป็น hexacyanoferrate (III) หรือ ferricyanide ซึ่งเหล็กที่ถูกออกซิไดส์จะมีประจุ +3 ดังปฏิกิริยาที่ 13



Hexacyanoferrate (II) สามารถสังเคราะห์ขึ้นได้ด้วยการเติม ferrous hydroxide ในสารละลายที่มี free cyanide ที่ pH น้อยกว่า 9 แต่ ferricyanide นั้นไม่สามารถสังเคราะห์ได้โดยตรงจาก ferri hydroxide กับไซยาไนด์ เนื่องจาก ferri hydroxide ไม่ละลายในน้ำ ดังนั้นการสังเคราะห์จึงต้องอาศัยปฏิกิริยาออกซิเดชันของ ferrocyanide เพียงอย่างเดียว

Hexacyanoferrate จัดเป็นสารเชิงซ้อนที่เฉื่อย เนื่องจากมีความเสถียรสูงและมีความเป็นพิษต่ำ การทำลายโมเลกุล hexacyanoferrate ในสภาวะที่ไม่มีแสงแดดเข้ามาเกี่ยวข้องนั้น จะต้องใช้กระบวนการเฉพาะ แต่ในสภาพแวดล้อมที่ต้องเผชิญกับแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความเข้มสูง ๆ hexacyanoferrate จะเกิดปฏิกิริยา photolysis และ hydrolysis โดยโมเลกุลน้ำจะเข้าแทนที่โมเลกุลไซยาไนด์ในสารเชิงซ้อน ทำให้เกิดการสลายตัวกลายเป็น free cyanide ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้

สารในกลุ่มนี้เมื่อรวมตัวกับโลหะอีกตัวหนึ่ง (double metalocyanide complex) จะเกิดตะกอนของสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งถ้าเป็นโลหะอัลคาไลจะได้ alkali-metal cyanide complex ซึ่งมีสูตรทางเคมี ดังนี้



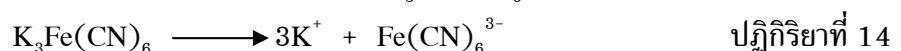
เมื่อ A คือ alkali metal cation (เช่น  $\text{Na}^+$  หรือ  $\text{K}^+$ )

M คือ transition series metal (เช่น Fe, Cu, Co, Ni, Cr และ Zn)

a คือ number of cation

b คือ number of cyanide group

ตัวอย่างเช่น  $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$  คือ สูตรโมเลกุลของ potassium ferricyanide ที่เมื่อละลายในน้ำจะแตกตัวให้ alkali metal cation และสารเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะที่มีประจุรวมเป็นลบ ดังปฏิกิริยาที่ 14 แต่ถ้าเป็นโลหะหนัก เช่น ทองแดง จะได้ตะกอนของ  $\text{Cu}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$  ซึ่งมีความเสถียรและไม่ละลายน้ำ



## 2.4 สารประกอบไซยาไนด์อื่น ๆ

สารประกอบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับไซยาไนด์สามารถเกิดขึ้นได้จากกระบวนการสกัดทองคำ การบำบัดน้ำเสีย และการกำจัดไซยาไนด์ ประกอบด้วย ไทโอไซยาเนท และไซยาเนท

### 2.4.1 ไทโอไซยาเนท (thiocyanate)

ไทโอไซยาเนท ( $\text{SCN}^-$ ) เกิดจากการทำปฏิกิริยาของไซยาไนด์กับกำมะถัน (sulfur; S) โดย sulfur ที่ใช้เกิดจากการทำปฏิกิริยาของปูนขาวหรือไซยาไนด์กับแร่ pyrrhotite หรือจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของ sulphide ion ซึ่งละลายออกจากแร่ซัลไฟด์ ค่าคงที่ของการแตกตัว (dissociation constant) ของกรดไทโอไซยานิก (thiocyanic acid;  $\text{HSCN}$ ) มีค่าใกล้ๆ ศูนย์ และ  $\text{SCN}^-$  จะปรากฏในสารละลายที่มีค่า pH มากกว่า 2 ไทโอไซยาเนทจัดเป็นสารเคมีที่มีความเป็นพิษน้อยกว่าไซยาไนด์ นอกจากนี้ยังสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะต่าง ๆ เช่น เงิน พรอท ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสี เกิดเป็นเกลือที่ไม่ละลายน้ำ

เนื่องจากไทโอไซยาเนทสามารถถูกออกซิไดส์ได้ง่ายกว่าไซยาไนด์ จึงสามารถสลายตัวได้ง่ายจากปฏิกิริยาของสิ่งมีชีวิตหรือจากการใช้สารเคมี กลายเป็นสารต่างๆ เช่น ไซยาเนท ไนเตรท แอมโมเนีย คาร์บอนเนต และซัลเฟต ซึ่งหากสะสมในปริมาณมากพอ ก็อาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้

### 2.4.2 ไซยาเนท (cyanate)

ตัวออกซิแดนซ์ เช่น คลอรีน ( $\text{chlorine}$ ;  $\text{Cl}_2$ ) โอโซน ( $\text{ozone}$ ;  $\text{O}_3$ ) ออกซิเจน ( $\text{oxygen}$ ;  $\text{O}_2$ ) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{hydrogen peroxide}$ ;  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) สามารถเปลี่ยนไซยาไนด์ไปเป็นไซยาเนท ( $\text{OCN}^-$ ) ได้ ไซยาเนทเป็นสารเคมีที่มีความเป็นพิษน้อยกว่าไซยาไนด์ โดยกระบวนการละลายทองคำออกจากแร่มีการสังเคราะห์ hydrogen peroxide ขึ้นด้วย ดังปฏิกิริยาที่ 3 ไซยาเนทจึงมักปรากฏในสารละลายจากกระบวนการผลิตทองคำ แต่พบว่าไม่มีการสะสมในสารละลายมากนัก เนื่องจากไซยาเนทจะเกิดปฏิกิริยา hydrolysis แล้วกลายเป็นแอมโมเนียต่อไป

## 2.5 สารประกอบอื่น ๆ

### 2.5.1 แอมโมเนีย (ammonia)

แหล่งกำเนิดแอมโมเนียที่เกิดจากการทำเหมืองแร่ มาจากสารที่เหลือจาก blasting agents ซึ่งเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงผสมของแอมโมเนียมไนเตรท ที่ใช้ในการระเบิดหินและจากปฏิกิริยา hydrolysis ของไซยาเนท โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยา hydrolysis ของไซยาเนทจะเกิดขึ้นช้ามากในสารละลายต่าง แต่อัตราการเกิดจะเพิ่มขึ้นในสารละลายที่ร้อนและมี pH ต่ำกว่า 6 นอกจากนี้ไซยาไนด์บางส่วนในขั้นตอนการชะล้างทองคำออกจากเม็ดถ่านกัมมันต์ด้วยสารละลายไซยาไนด์ที่ร้อน ก็สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้วกลายเป็นแอมโมเนียได้

เนื่องจากแอมโมเนียสามารถเกิดปฏิกิริยากับโลหะต่าง ๆ เช่น ทองแดง นิกเกิล เงิน และสังกะสี ที่ pH สูงกว่า 9 กลายเป็นสารเชิงซ้อนเอมีน (amine complexes) ที่ละลายน้ำได้ ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัดโลหะต่าง ๆ ด้วยการตกตะกอนโลหะในรูปของไฮดรอกไซด์

### 2.5.2 ไนเตรท (nitrate)

ไนเตรท ( $\text{NO}_3^-$ ) ส่วนใหญ่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไซยาไนด์และปฏิกิริยาออกซิเดชันของแอมโมเนียจากสิ่งมีชีวิตและสารเคมี แม้ว่าไนเตรทจัดเป็นสารเคมีที่ไม่เป็นพิษและมีความเสถียรในธรรมชาติ แต่ถ้าในน้ำดื่มมีปริมาณไนเตรทมากพอ อาจทำให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ โดยเฉพาะเด็กทารกและเด็กเล็กๆ ได้ นอกจากนี้ไนเตรทยังเป็นสารอาหารที่ช่วยเร่งการเจริญเติบโตของสาหร่ายในน้ำ ทำให้ออกซิเจนที่ละลายในน้ำถูกนำไปใช้เพื่อการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้สิ่งมีชีวิตอื่นๆ ที่อาศัยอยู่ในน้ำขาดออกซิเจนและอาจตายได้

## 3. เสถียรภาพของสารประกอบไซยาไนด์

ไซยาไนด์อิสระเป็นกลุ่มที่มีเสถียรภาพต่ำสุด ไซยาไนด์ไอออนจะเปลี่ยนเป็นแก๊สไฮโดรเจนไซยาไนด์ได้อย่างรวดเร็ว เมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกลางถึงกรดอ่อน

Simple cyanide compound ในกลุ่มที่ละลายน้ำได้ง่ายจะมีเสถียรภาพค่อนข้างต่ำ เนื่องจากเมื่อละลายน้ำแล้ว ทำให้เกิดไซยาไนด์ไอออนที่สามารถเปลี่ยนรูปเป็นแก๊สไฮโดรเจนไซยาไนด์ได้อย่างรวดเร็ว

ส่วน complex cyanide เป็นกลุ่มที่มีเสถียรภาพสูงกว่าสองกลุ่มแรก โดยที่ weak cyanide complex และ moderately strong cyanide complex สามารถแตกตัวได้ง่าย เมื่ออยู่ในสภาวะเป็นกรดอ่อน จึงมีเสถียรภาพต่ำกว่ากลุ่ม strong cyanide complex ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่มีพันธะเคมีกับไซยาไนด์เป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดความเสถียรของสารเชิงซ้อนในกลุ่มนี้ โดยพบว่าสารเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับสังกะสีและแคดเมียมมีความเสถียรต่ำสุด ส่วนสารเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็กและโคบอลต์มีความเสถียรสูงสุด แต่ในสภาวะที่เป็นกรดแก่หรือมีความเข้มข้นสูง สารเชิงซ้อนของเหล็กและโคบอลต์อาจแตกตัวและให้ไซยาไนด์ไอออนได้ โดยค่าความเสถียรของสารเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4 จะเห็นว่า สารเชิงซ้อนของไซยาไนด์ในกลุ่มของ strong cyanide complex จะมีความเสถียรสูงที่สุด



ตารางที่ 4 ค่าคงที่ความเสถียรของสารเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะต่าง ๆ คัดลอกจาก Mudder et al., 2001

Complex Ion	Stability Constant
$\text{Zn}(\text{CN})_3^-$	$10^{16.0}$
$\text{Cd}(\text{CN})_4^{2-}$	$10^{17.9}$
$\text{Zn}(\text{CN})_4^{2-}$	$10^{19.6}$
$\text{Ag}(\text{CN})_2^-$	$10^{20.5}$
$\text{Ag}(\text{CN})_3^{2-}$	$10^{21.4}$
$\text{Cu}(\text{CN})_2^-$	$10^{21.7}$
$\text{Cu}(\text{CN})_3^{2-}$	$10^{27.0}$
$\text{Cu}(\text{CN})_4^{3-}$	$10^{28.5}$
$\text{Ni}(\text{CN})_4^{2-}$	$10^{30.2}$
$\text{Cr}(\text{CN})_6^{3-}$	$10^{33.0}$
$\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$	$10^{35.4}$
$\text{Au}(\text{CN})_2^-$	$10^{37.0}$
$\text{Hg}(\text{CN})_4^{2-}$	$10^{39.0}$
$\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$	$10^{42.3}$
$\text{Co}(\text{CN})_6^{3-}$	$10^{73.0}$

อัตราการสลายตัวของสารเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะต่าง ๆ กลายเป็น free cyanide นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความเข้มของแสงแดด อุณหภูมิของน้ำ ค่าความเป็นกรดต่าง ปริมาณ total dissolved solid และความเข้มข้นของสารเชิงซ้อนของไซยาไนด์ เป็นต้น โดยพบว่า เมื่อ pH และความเข้มข้นของสารเชิงซ้อนมีค่าลดลง จะมีผลทำให้เกิด free cyanide มากขึ้น (Mudder et al., 2001)

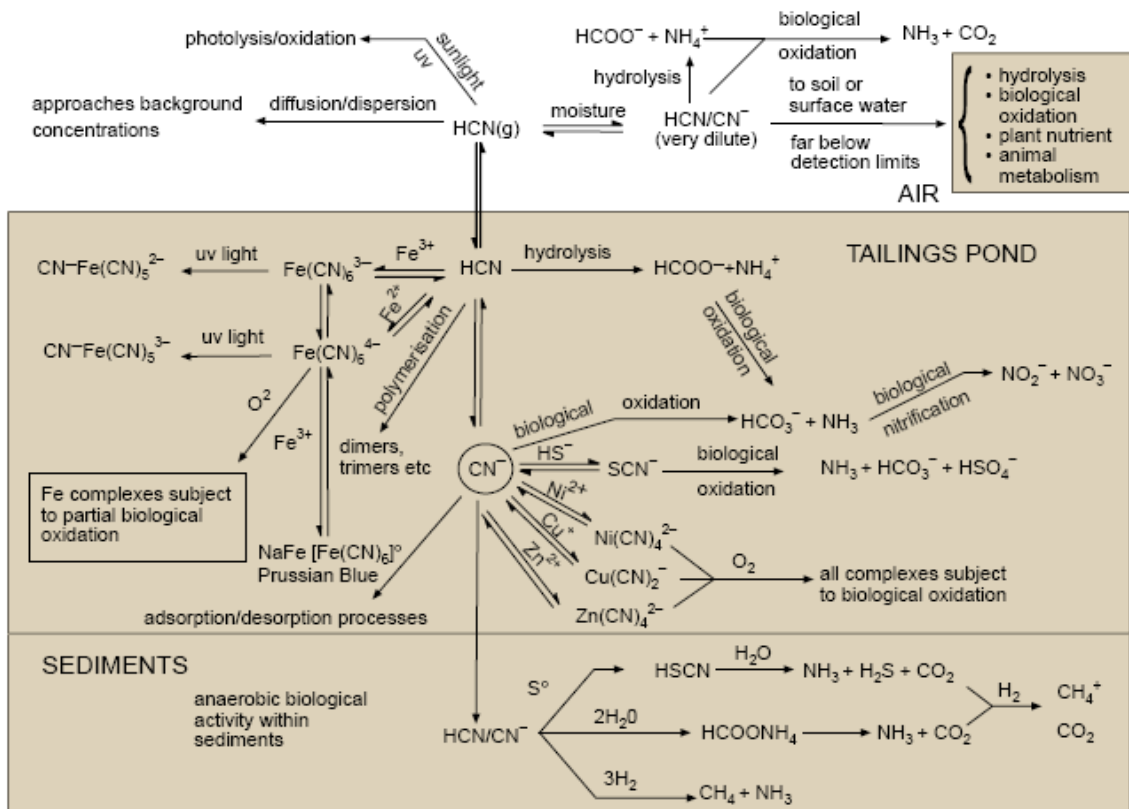
#### 4. การบำบัดไซยาไนด์หลังกระบวนการสกัดทองคำ

เมื่อทองคำถูกชะล้างออกจากสินแร่ เหลือเพียงกากแร่ที่ไม่มีทองคำในสารละลาย แต่ยังคงมีไซยาไนด์อยู่ จึงต้องนำของเสียที่เกิดขึ้นไปทำการบำบัดไซยาไนด์ให้อยู่ในเกณฑ์ที่ควบคุม ก่อนปล่อยทิ้งสู่บ่อกักเก็บกากแร่หรือแหล่งน้ำธรรมชาติ เพื่อให้มั่นใจได้ว่าไซยาไนด์ที่ตกค้างจะไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม กระบวนการลดปริมาณไซยาไนด์ในสารละลายทั้งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ หรือการใช้สารเคมีเรียกว่า attenuation โดยวิธีบำบัดไซยาไนด์ที่นิยมใช้ประกอบด้วย 4 วิธีหลัก ๆ ได้แก่ (Logsdon et al., 1999)

- Natural degradation
- Chemical oxidation
- Precipitation
- Biodegradation

#### 4.1 Natural degradation

Natural degradation คือ กลไกทางธรรมชาติที่เปลี่ยนไซยาไนด์ให้อยู่ในรูปที่เป็นพิษน้อยลง ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการระเหยไปของแก๊สไฮโดรเจนไซยาไนด์ และปัจจัยทางธรรมชาติอื่นๆ เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชันของสิ่งมีชีวิต (biological oxidation) การตกตะกอน (precipitation) ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และการสลายตัวด้วยแสงแดด (photolysis) ดังรูปที่ 3 นอกจากนี้ในบ่อกักเก็บกากแร่ (tailings pond) ไซยาไนด์และสารประกอบไซยาไนด์อาจถูกดูดซับไว้ที่พื้นผิวของแร่และอินทรีย์โมเลกุลในดิน หรือแพร่กระจายไปกับน้ำใต้ดินได้



รูปที่ 3 วัฏจักรของไซยาไนด์ คัดลอกจาก Logsdon et al., 1999

จากการศึกษาการสลายตัวของไซยาไนด์ด้วยกระบวนการทางธรรมชาติจากการดำเนินการของเหมืองแร่ทองคำหลายๆ แห่ง พบว่าเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณไซยาไนด์ได้ ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การสลายตัวของไซยาไนด์ในบ่อกักเก็บกากแร่ด้วยกระบวนการทางธรรมชาติ คัดลอกจาก Logsdon et al., 1999

Mine	CN entering the tailings system (mg.L <sup>-1</sup> )	CN discharging from the tailings system (mg.L <sup>-1</sup> )
Lupin, NWT, Canada	184	0.17
Holt McDermott, Ontario, Canada	74.8	0.02
Cannon, Washington, USA	284	< 0.05
Ridgeway, South Carolina, USA	480	0.09
Golden Cross, New Zealand	6.8 (WAD CN)	0.33 (WAD CN)

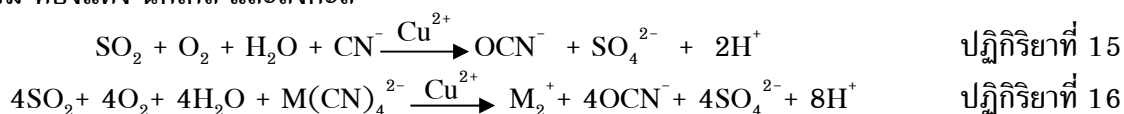
หมายเหตุ การบำบัดไซยาไนด์ด้วยกระบวนการทางธรรมชาติขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการบำบัด โดยรายละเอียดเพิ่มเติมสามารถศึกษาได้จากเอกสารอ้างอิงข้างต้น

#### 4.2 Chemical oxidation

Chemical oxidation คือ กระบวนการกำจัดไซยาไนด์โดยการออกซิไดส์ด้วยสารเคมี เพื่อเปลี่ยนไซยาไนด์เป็นสารประกอบที่มีพิษน้อยลง โดยเทคนิค chemical oxidation มีหลายวิธี ได้แก่ (The Mining Journal Limited, 2001)

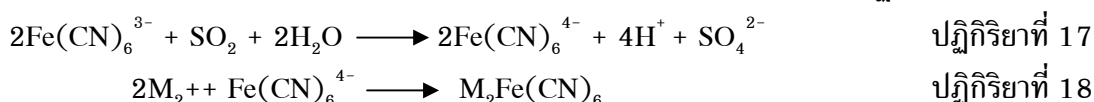
##### 4.2.1 กระบวนการ Inco SO<sub>2</sub>/air

Inco SO<sub>2</sub>/air ได้รับการพัฒนาขึ้นโดยบริษัทเหมืองแร่ในประเทศแคนาดาที่มีชื่อว่า Inco หลักการของกระบวนการนี้คือ การใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) และอากาศ เพื่อออกซิไดส์ไซยาไนด์อิสระ และ weak-moderately strong complexed cyanide กลายเป็นไซยาเนต (cyanate, OCN<sup>-</sup>) ที่มีอันตรายน้อยลง โดยใช้ทองแดงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังปฏิกิริยาที่ 15 และ 16 เมื่อ M คือ โลหะต่างๆ เช่น แคดเมียม ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี

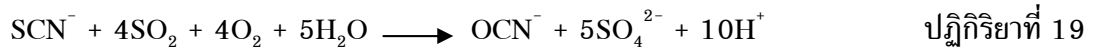


โดย SO<sub>2</sub> ในปฏิกิริยาอาจใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์เหลว (liquid sulphur dioxide) หรือ โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ (sodium metabisulphite; Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) ส่วนทองแดงที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามาจาก สารละลาย copper sulphate (CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O) ขณะกระบวนการบำบัดต้องควบคุม pH ให้อยู่ที่ประมาณ 8 ถึง 9 ด้วยการเติม lime เพื่อลดความเป็นกรดที่เกิดขึ้น (H<sup>+</sup>) จากปฏิกิริยา

การกำจัด iron cyanide จะเริ่มด้วยปฏิกิริยารีดักชันของ ferricyanide (Fe(CN)<sub>6</sub><sup>3-</sup>) กลายเป็น ferrocyanide (Fe(CN)<sub>6</sub><sup>4-</sup>) ดังปฏิกิริยาที่ 17 จากนั้น ferrocyanide จะทำปฏิกิริยากับโลหะอื่นๆ เช่น ทองแดง นิกเกิล หรือสังกะสี เกิดเป็นตะกอนแล้วแยกตัวออกจากสารละลาย ดังปฏิกิริยาที่ 18



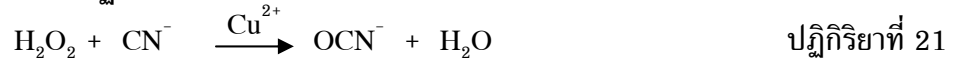
ขณะการบำบัดโลหะที่ละลายในน้ำซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของ WAD cyanide อาจเกิดการตกตะกอนในรูปของสารประกอบไฮดรอกไซด์ได้ นอกจากนี้ไทโอไซยาเนทยังสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกลายเป็นไซยาเนท ดังปฏิกิริยาที่ 19 จากนั้นเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไซยาเนทกลายเป็นไบคาร์บอเนต ดังปฏิกิริยาที่ 20



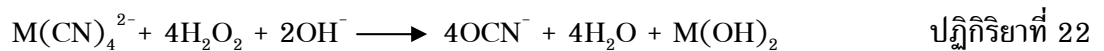
เทคนิคการกำจัดไซยาไนด์ด้วยวิธีนี้สามารถนำไปใช้ได้ทั้งในของเหลวที่เป็นสารละลายและ slurry ซึ่งมีปริมาณไซยาไนด์ต่ำถึงค่อนข้างสูง

#### 4.2.2 กระบวนการ hydrogen peroxide

การกำจัดไซยาไนด์ด้วย hydrogen peroxide มีกระบวนการคล้ายคลึงกับ Inco  $\text{SO}_2/\text{air}$  เพียงแต่เปลี่ยนมาใช้ hydrogen peroxide แทนซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และยังคงใช้ทองแดงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ pH ประมาณ 9 ถึง 9.5 ดังปฏิกิริยาที่ 21 ได้ไซยาเนทเป็นผลิตภัณฑ์



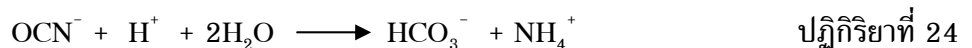
กระบวนการนี้นิยมนำมาใช้บำบัดไซยาไนด์ในสารละลายมากกว่าใน slurry เนื่องจากใน slurry ประกอบไปด้วยของแข็ง ทำให้สิ้นเปลืองปริมาณ hydrogen peroxide มาก การใช้ hydrogen peroxide นี้มีประสิทธิภาพในการออกซิไดส์ free cyanide และ weak-moderately strong cyanide complexes ดังปฏิกิริยาที่ 22 แล้วตกตะกอนในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์ แต่ hydrogen peroxide ไม่สามารถออกซิไดส์ iron cyanide ได้ โดย iron cyanide จะถูกกำจัดออกด้วยการตกตะกอนในรูปของ copper-iron-cyanide complex ที่ไม่ละลายน้ำ ดังปฏิกิริยาที่ 23



เมื่อ M คือ โลหะต่างๆ เช่น แคดเมียม ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี



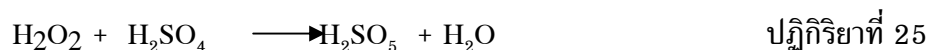
hydrogen peroxide จะไม่ทำปฏิกิริยากับไทโอไซยาเนท ส่วนไซยาเนทที่เกิดขึ้นจะเกิดปฏิกิริยา hydrolysis กลายเป็นแอมโมเนียและไบคาร์บอเนต ดังปฏิกิริยาที่ 24



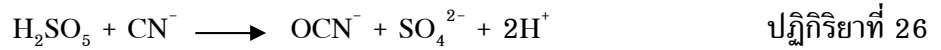
เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการบำบัดสารละลายที่มีปริมาณ free cyanide และ WAD cyanide ไม่สูงนัก (Mudder et al., 2001)

#### 4.2.3 Caro's Acid

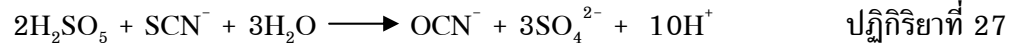
Caro's acid คือ peroxymonosulphuric acid ( $\text{H}_2\text{SO}_5$ ) ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้นกับกรดซัลฟูริก ดังปฏิกิริยาที่ 25 เมื่อสังเคราะห์ Caro's acid แล้วจะต้องนำไปใช้ทันที เนื่องจากเป็นกรดที่ไม่เสถียร สลายตัวได้ง่าย โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง



Caro's acid จะออกซิไดส์ทั้ง free cyanide และ weak-moderately strong cyanide complex อย่างรวดเร็ว กลายเป็นไซยาเนทและกรดซัลฟูริก ดังปฏิกิริยาที่ 26



เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการบำบัดไซยาไนด์ใน slurry ซึ่งไม่ต้องใช้ทองแดงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจาก Caro's acid จะออกซิไดส์ไซยาไนด์แล้ว ยังสามารถออกซิไดส์ไทโอไซยาเนทบางส่วนกลายเป็นไซยาเนทและซัลเฟต ดังปฏิกิริยาที่ 27 จึงอาจทำให้เกิดการสูญเสีย Caro's acid บางส่วนไป

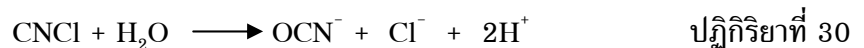


#### 4.2.4 Alkaline Chlorination

กระบวนการ Alkaline Chlorination ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน โดยในขั้นแรก free cyanide และ weak-moderately strong cyanide complex จะถูกเปลี่ยนไปเป็นไซยาโนเจนคลอไรด์ (cyanogen chloride; CNCl) อย่างรวดเร็วด้วยการใช้คลอรีน (chlorine; Cl<sub>2</sub>) หรือไฮโปคลอไรต์ (hypochlorite; OCl<sup>-</sup>) ดังปฏิกิริยาที่ 28 และ 29



เนื่องจาก cyanogen chloride สามารถระเหยได้ง่าย หากสารละลายมีค่า pH ต่ำกว่า 8 จึงต้องควบคุม pH ของสารละลายให้อยู่ระหว่าง 10.5 ถึง 11.5 จากนั้น cyanogen chloride จะถูกไฮโดรไลซ์กลายเป็นไซยาเนทในขั้นตอนที่ 2 ดังปฏิกิริยาที่ 30



หากในสารละลายมีปริมาณคลอรีนมากพอ ไซยาเนทที่เกิดขึ้นจะถูกไฮโดรไลซ์ต่อกลายเป็นแอมโมเนียและคาร์บอเนต ดังปฏิกิริยาที่ 31 และหากคลอรีนหรือไฮโปคลอไรต์ถูกเติมมากขึ้นอีก แอมโมเนียจะทำปฏิกิริยาต่อกลายเป็นแก๊สไนโตรเจน ดังปฏิกิริยาที่ 32



นอกจากนี้คลอรีนยังสามารถออกซิไดส์ไทโอไซยาเนท กลายเป็นไซยาเนทและซัลเฟต ดังปฏิกิริยาที่ 33

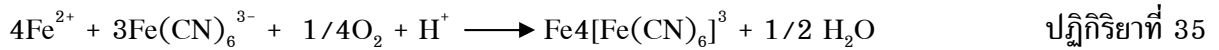
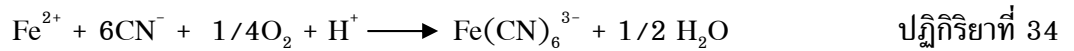


กระบวนการ alkaline chlorination เป็นเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการกำจัด WAD cyanide ไทโอไซยาเนท และแอมโมเนีย ในสารละลายใส และบางส่วนของ iron cyanide ก็อาจถูกกำจัดออกด้วย แต่เนื่องจากกระบวนการนี้จะให้ประสิทธิภาพสูงเมื่อในสารละลายมีปริมาณไซยาไนด์ต่ำ และต้องใช้สารเคมีปริมาณมาก จึงไม่นิยมนำมาใช้มากนัก

#### 4.3 Iron-Cyanide Precipitation

Iron-cyanide precipitation เป็นกระบวนการบำบัดไซยาไนด์ด้วยการตกตะกอน โดยอาศัยหลักการที่ว่า เมื่อเติม ferro iron (Fe<sup>2+</sup>) ลงในของเหลวที่มีไซยาไนด์อยู่ free cyanide, weak-moderately strong complexed cyanide และ iron cyanide จะทำปฏิกิริยากับ ferro iron ทำให้เกิดสารประกอบมากมาย ทั้งที่ละลายน้ำได้และไม่ละลายน้ำ ซึ่งมีความเป็นพิษน้อยลง โดยส่วนใหญ่ประกอบด้วย ferricyanide

(Fe(CN)<sub>6</sub><sup>3-</sup>) ดังปฏิกิริยาที่ 34 ที่ละลายน้ำได้ และตะกอนสีฟ้าของ Prussian blue (Fe<sub>4</sub>[Fe(CN)<sub>6</sub>]<sub>3</sub>) ดังปฏิกิริยาที่ 35 ที่สามารถแยกออกจากของเหลวได้



นอกจากนี้สารเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะอื่นๆ ในของเหลวก็สามารถตกตะกอนในรูปของ metal-iron cyanide complex ได้อีกด้วย ตัวอย่างเช่น copper-iron cyanide complex (Cu<sub>2</sub>Fe(CN)<sub>6</sub>) ดังนั้นการบำบัดด้วยวิธีนี้ไซยาไนด์จะถูกเปลี่ยนเป็นสารที่มีความเสถียรและมีพิษน้อยลง แต่ทั้งนี้ต้องควบคุมสภาวะการตกตะกอนให้เหมาะสม พร้อมทั้งแยกตะกอนออกจากของเหลว มิฉะนั้นตะกอนที่ได้อาจเกิดการละลายกลับ (redissolution) ไปในสารละลายได้อีก

#### 4.4 Biological Treatment

Biological treatment คือ กระบวนการกำจัดไซยาไนด์ด้วยจุลินทรีย์หลากหลายชนิดทั้งที่เป็นแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจน (aerobic bacteria) และแบคทีเรียที่ไม่ต้องใช้ออกซิเจน (anaerobic bacteria) โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

##### 4.4.1 Aerobic biological process

Aerobic biological process หมายถึง การบำบัดไซยาไนด์ด้วยจุลินทรีย์ ในสภาวะที่มีออกซิเจนละลายในน้ำเพื่อสลายไซยาไนด์ แล้วทำให้เกิดสารประกอบเคมีจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ตัวอย่างเช่น ไซยาไนด์ (CN<sup>-</sup>) ถูกออกซิไดส์กลายเป็นไซยาเนท (OCN<sup>-</sup>) และการออกซิไดส์แอมโมเนีย (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) กลายเป็นไนเตรต (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

##### 4.4.2 Anaerobic biological process

Anaerobic biological process หมายถึง การบำบัดไซยาไนด์ด้วยจุลินทรีย์ ในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน แล้วทำให้เกิดสารประกอบเคมีจากปฏิกิริยารีดักชัน เช่น การเกิดปฏิกิริยารีดักชันของซัลเฟต (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) กลายเป็นซัลไฟด์ (S<sup>2-</sup>)

##### 4.4.3 Anoxic biological process

Anoxic biological process หมายถึง การบำบัดไซยาไนด์ด้วยจุลินทรีย์ที่ไม่ต้องใช้ ออกซิเจนในการสลายไซยาไนด์ ในสภาวะที่มีออกซิเจนปริมาณน้อยมาก ๆ ละลายในน้ำหรือสภาวะที่ไร้ออกซิเจน ตัวอย่างเช่น การเกิดปฏิกิริยา denitrification ของจุลินทรีย์ที่ใช้ไนเตรต (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) เพื่อการเจริญเติบโต แล้วให้แก๊สไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) เป็นผลผลิต

โดยการบำบัดไซยาไนด์ด้วยจุลินทรีย์จะให้ประสิทธิภาพสูง เมื่อมีการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ให้เหมาะสม ดังนี้

1) อุณหภูมิที่เหมาะสมในการบำบัดด้วย aerobic bacteria และ anaerobic bacteria คือ 10 ถึง 30 °C และ 25 ถึง 45 °C ตามลำดับ

2) ค่า pH ที่เหมาะสมในการบำบัดด้วย aerobic bacteria และ anaerobic bacteria คือ 6.0 ถึง 9.0 และ 6.5 ถึง 7.5 ตามลำดับ

3) ควบคุมปริมาณออกซิเจนให้เพียงพอหรือมีประมาณหรือมากกว่า 1 ถึง 2 mg/l ในการบำบัดด้วย aerobic bacteria ส่วนการบำบัดด้วย anaerobic bacteria นั้นจะต้องไม่มีออกซิเจนเลย

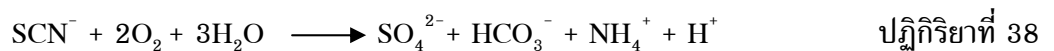
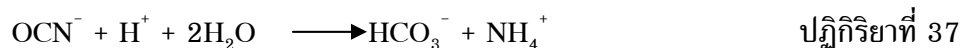
4) จัดเตรียมสารอาหารที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ประกอบด้วยไนโตรเจนและฟอสฟอรัสให้เพียงพอ

ในกระบวนการ aerobic biological treatment ไฮยาไนต์อิสระจะถูกออกซิไดส์ด้วยจุลินทรีย์หลายสายพันธุ์ เช่น Pseudomonas, Alcaligenes และ Achromobacter กลายเป็นไฮยาเนท ดังปฏิกิริยาที่

36



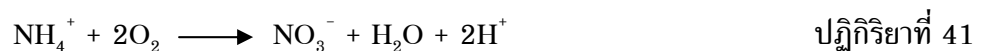
ส่วน weak-moderately strong cyanide complex จะถูกกำจัดออก โดยสารเชิงซ้อนโลหะจะถูกดูดซับบน biofilm (แบคทีเรียที่รวมตัวกันเป็นแผ่นๆ) จากนั้นไฮยาไนต์จะถูกเปลี่ยนเป็นไฮยาเนท ขณะที่ iron cyanide จะไม่ถูกทำให้สลายไป แต่จะถูกกำจัดไปด้วยการตกตะกอน (precipitation) และการดูดซับ (adsorption) นอกจากนี้ จุลินทรีย์ยังสลายไฮยาเนทปริมาณมากที่ถูกผลิตขึ้นเป็นแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) และไบคาร์บอเนต ( $\text{HCO}_3^-$ ) ดังปฏิกิริยาที่ 37 สำหรับไทโอไฮยาเนทจะถูกเปลี่ยนเป็นแอมโมเนีย ซัลเฟต และไบคาร์บอเนต ดังปฏิกิริยาที่ 38



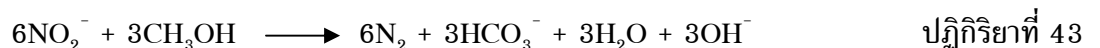
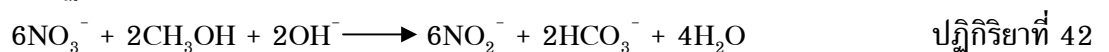
แอมโมเนียจะถูกออกซิไดส์ด้วยจุลินทรีย์ที่สามารถตรึงไนโตรเจน (nitrifying organisms) กลายเป็นไนไตรต์ (nitrite) และไนเตรต (nitrate) ตามลำดับ ดังปฏิกิริยาที่ 39 และ 40



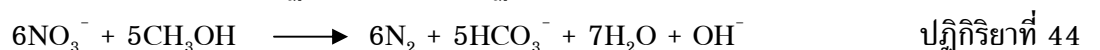
โดยปฏิกิริยาสุทธิแสดงดังปฏิกิริยาที่ 41 จะพบว่าเป็นปฏิกิริยาที่ใช้ต่าง แต่ได้กรดเป็นผลิตภัณฑ์ จึงจำเป็นต้องรักษาระดับความเป็นต่างขณะเกิดปฏิกิริยาให้เหมาะสม



จากนั้นไนไตรต์และไนเตรตจะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สไนโตรเจนด้วยจุลินทรีย์ ในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน ดังปฏิกิริยาที่ 42 และ 43



ผลรวมของทั้ง 2 ปฏิกิริยา แสดงดังปฏิกิริยาที่ 44



กระบวนการกำจัดไฮยาไนต์ด้วยจุลินทรีย์เป็นกระบวนการที่ง่ายไม่ซับซ้อน ราคาไม่แพง และสามารถบำบัดไฮยาไนต์ได้ทุกรูปแบบรวมถึง iron cyanide โดยโลหะจะถูกกำจัดออกด้วยกระบวนการดูดซับ (adsorption) และการตกตะกอน (precipitation) ในรูปของซัลไฟด์ นอกจากนี้การกำจัดไฮยาไนต์แล้ว ยังสามารถกำจัดสารประกอบไฮยาไนต์อื่นๆ ได้อีกด้วย เช่น ไทโอไฮยาเนท ไฮยาเนท แอมโมเนีย ไนเตรต และซัลเฟต

ประสิทธิภาพและการนำไปใช้บำบัดของเหลวจากการทำเหมืองแร่ทองคำด้วยเทคนิคการบำบัดไซยาไนด์ที่ได้กล่าวมาทั้งหมด สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6 จะเห็นได้ว่าเทคนิคที่สามารถนำมาใช้กำจัด WAD cyanide และ iron cyanide ทั้งในสารละลายและ slurry คือ Inco SO<sub>2</sub>/air, iron precipitation และ natural attenuation

ตารางที่ 6 ประสิทธิภาพการบำบัดไซยาไนด์ด้วยเทคนิคต่างๆ คัดลอกจาก The Mining Journal Limited, 2001

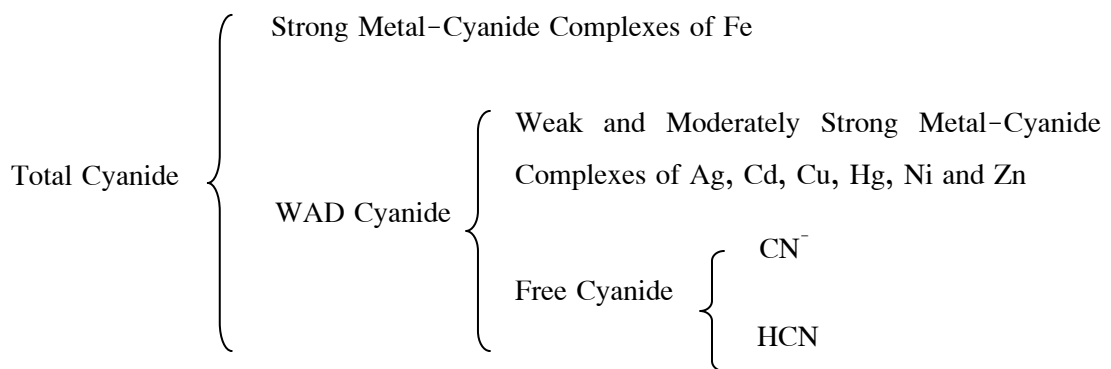
Treatment Process	Iron Cyanide	WAD Cyanide	Slurry	Solution
	Removal	Removal	Application	Application
SO <sub>2</sub> /Air	x	x	x	x
Hydrogen Peroxide	x	x		x
Caro's Acid		x	x	
Alkaline Chlorination	x	x		x
Iron Precipitation	x	x	x	x
Biological Treatment	x	x		x
Natural Attenuation	x	x	x	x



## เทคนิคการวิเคราะห์ไซยาไนด์ในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ทองคำ

การวิเคราะห์ไซยาไนด์เป็นอีกหนึ่งขั้นตอนสำคัญในการทำเหมืองแร่ทองคำ ทั้งนี้เพื่อควบคุมและติดตามตรวจสอบปริมาณไซยาไนด์ทั้งในระหว่างกระบวนการสกัดทองคำ ภายหลังจากการบำบัดน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่บ่อกักเก็บกากแร่ และติดตามการปนเปื้อนของไซยาไนด์ในแหล่งน้ำธรรมชาติ เพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นทั้งกับมนุษย์ สัตว์และสิ่งแวดล้อม โดยทั่วไปของเหลวที่เกิดจากกระบวนการสกัดทองคำด้วยไซยาไนด์มักประกอบไปด้วยสารประกอบต่างๆ มากมาย เช่น ซัลไฟด์ ไทโอไซยาเนท ไซยาเนท คาร์บอเนต ไทโอซัลเฟต ไนไตรต์ ไนเตรต และโลหะต่างๆ เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้อาจรบกวนการวิเคราะห์ไซยาไนด์ มีผลทำให้ความถูกต้องแม่นยำของผลการวิเคราะห์คลาดเคลื่อนไป ประกอบกับในปัจจุบันเทคนิคการวิเคราะห์ไซยาไนด์มีหลากหลายวิธี ดังนั้นการเลือกวิธีวิเคราะห์ให้เหมาะสมกับสารตัวอย่าง เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องแม่นยำและเชื่อถือได้ ผู้วิเคราะห์จำเป็นต้องพิจารณาข้อดีข้อเสียของเทคนิคนั้นๆ พร้อมทั้งทราบชนิดและปริมาณสารรบกวนในสารตัวอย่างซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อผลการวิเคราะห์ ตลอดจนวิธีการลดผลกระทบจากสารรบกวนนั้นๆ

โดยทั่วไปการวิเคราะห์ปริมาณไซยาไนด์ในกิจกรรมการทำเหมืองแร่ทองคำ สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ ไซยาไนด์ทั้งหมด (total cyanide) ไซยาไนด์ที่สลายตัวได้ง่ายในกรดอ่อน (weak acid dissociable (WAD) cyanide) และไซยาไนด์อิสระ (free cyanide) ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีในการวิเคราะห์ total cyanide, WAD cyanide และ free cyanide คัดลอกจาก Mudder et al., 2001

Total cyanide หมายถึง สารประกอบไซยาไนด์ทุกชนิดที่ปรากฏอยู่ในสารละลาย ประกอบด้วย ไซยาไนด์อิสระ และสารเชิงซ้อนไซยาไนด์กับโลหะต่างๆ ยกเว้นโคบอลต์ (Co) แต่หากแหล่งแร่ใดมีปริมาณโคบอลต์สูงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดสารเชิงซ้อนไซยาไนด์กับโคบอลต์ได้มาก ในกรณีนี้การวิเคราะห์หา total cyanide ควรคำนึงถึงสารเชิงซ้อนไซยาไนด์กับโคบอลต์ด้วย เช่น เหมืองแร่ทองคำหลายแห่งในประเทศออสเตรเลีย

WAD cyanide ประกอบด้วยไซยาไนด์อิสระ (free cyanide) และสารเชิงซ้อนไซยาไนด์กับโลหะต่างๆ จำพวก weak และ moderately strong cyanide complex ซึ่งสามารถสลายตัวได้ในสภาวะกรดอ่อน

Free cyanide หมายถึง ไซยาไนด์ที่ไม่ได้อยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน ได้แก่ ไซยาไนด์แอนไอออน ( $CN^-$ ) และไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN)

ดังนั้น ค่า total cyanide อาจมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ WAD cyanide และ WAD cyanide อาจมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ free cyanide โดยการเลือกวิธีวิเคราะห์ไซยาไนด์ที่เหมาะสมนั้นควรคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1. ความรู้พื้นฐานทางเคมีเกี่ยวกับไซยาไนด์
2. ข้อดีและข้อเสียของวิธีวิเคราะห์ เนื่องจากความแตกต่างทั้งสภาวะ และ matrix ทางเคมี
3. ข้อจำกัดของอุปกรณ์และความชำนาญของผู้วิเคราะห์
4. ความรู้ในการขจัดผลกระทบอันเนื่องมาจากสารรบกวน (interferences)
5. ตระหนักถึงข้อเท็จจริงที่ว่า การลดผลกระทบของสารรบกวนหนึ่งอาจนำไปสู่การรบกวน

อื่นๆ

## 1. การวิเคราะห์ Total cyanide ด้วยการกลั่น

การวิเคราะห์ total cyanide ด้วยการกลั่นเป็นวิธีที่ได้รับความนิยม เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ไม่ซับซ้อน ราคาไม่แพง อีกทั้งผลการวิเคราะห์มีความน่าเชื่อถือ และมีขีดจำกัด (detection limit) ในการหาต่ำถึง 0.02 mg/l แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความชำนาญของผู้วิเคราะห์และสารรบกวนในสารตัวอย่างด้วย โดยวิธีการวิเคราะห์ที่เป็นมาตรฐานนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ได้แก่

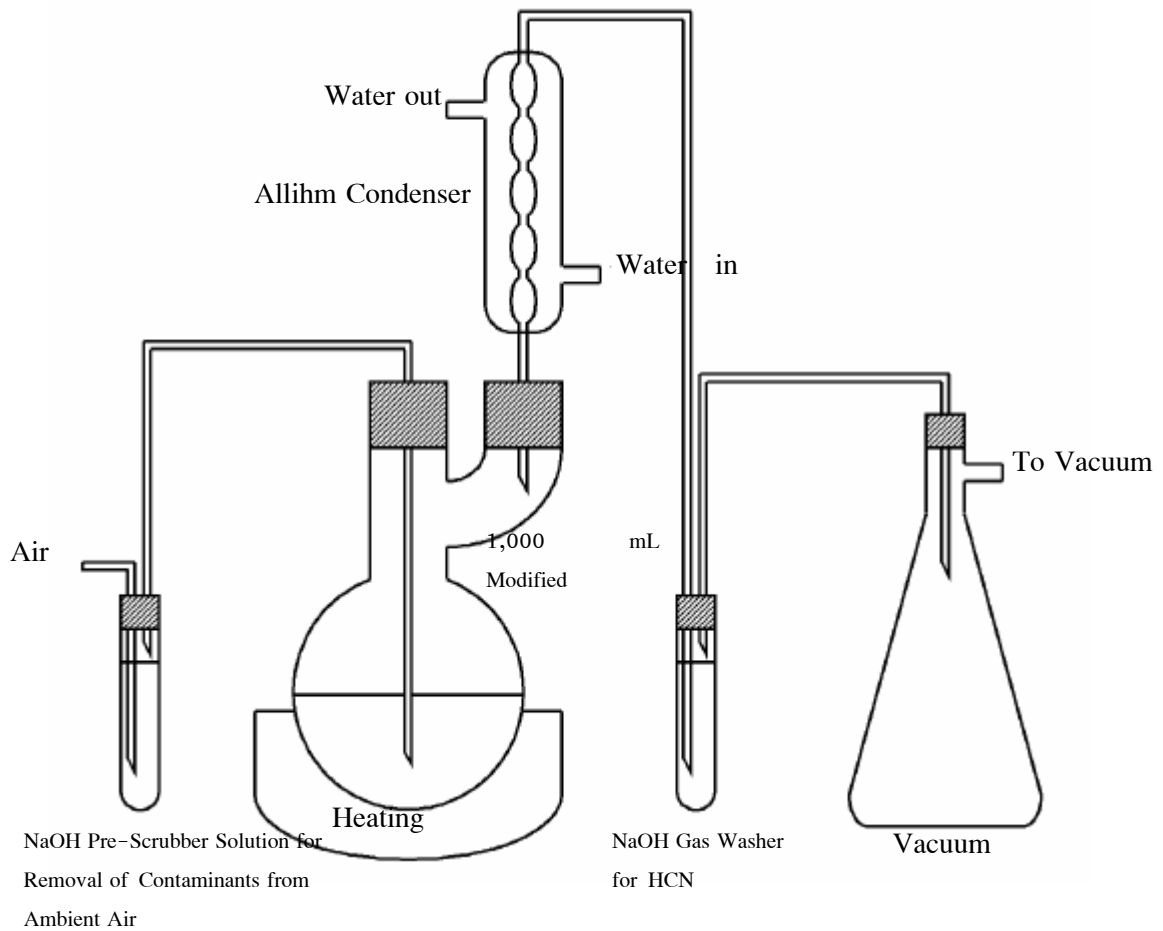
1. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater ของ American Public Health Association (APHA)

2. Methods for Chemical Analysis of Water and Waste: Total and Amenable Cyanide: Distillation; Method 9010 และ Total and Amenable Cyanide: Automated Colorimetric With Off-Line Distillation; Method 9012 ของ United State Environmental Protection Agency (USEPA)

3. Water Quality : Determination of Total and Easily Liberated Cyanide; Method 6703 ของ International Organization for Standardization (ISO)

4. Standard Test Methods for Cyanides in Water; Method D2036-A และ Standard Test Methods for Cyanides in Water—Automated Methods for Total Cyanide, Acid dissociable Cyanide and Thiocyanate; Method D4374 ของ American Society for Testing and Material (ASTM)

การวิเคราะห์ total cyanide ตามวิธีมาตรฐานข้างต้นมีหลักการต่างๆ ไปคล้ายคลึงกัน กล่าวคือ กลั่นสารตัวอย่างในสภาวะที่เป็นกรดแก่และสูญญากาศเล็กน้อย ตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์ total cyanide ตามวิธีมาตรฐานของ APHA จะทำโดยการปรับ pH ของสารตัวอย่างให้น้อยกว่า 2 ด้วยการเติมกรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) เพื่อสลายพันธะของสารเชิงซ้อนไซยาไนด์กับโลหะต่างๆ โดยเฉพาะเหล็ก พร้อมทั้งเติม magnesium chloride เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นนำไปกลั่นด้วยอุปกรณ์ ดังรูปที่ 5 ขณะการกลั่นไซยาไนด์อิสระและสารประกอบเชิงซ้อนไซยาไนด์กับโลหะต่างๆ ในสารละลายจะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) ซึ่งระเหยได้ง่าย ลอยไปพร้อมกับอากาศและถูกดักจับไว้ในสารละลายต่างซึ่งบรรจุอยู่ในอีกภาชนะหนึ่ง (absorber) จากนั้นนำสารละลายไซยาไนด์ในสารละลายต่างที่ได้ไปวิเคราะห์เชิงปริมาณ โดยการไตเตรตด้วย silver nitrate หรือการวัดสีด้วยเครื่อง spectrophotometer โดยการใช้ pyridine, barbituric acid และ chloramines-T ทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์ กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไซยาไนด์ที่มีสีม่วงแดง แล้วนำไปวัดความเข้มข้นของไซยาไนด์ที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสม



รูปที่ 5 อุปกรณ์การกลั่นไซยาไนด์ คัดลอกจาก Mudder et al., 2001

ในการวิเคราะห์หาปริมาณ total cyanide มีสารรบกวนการวิเคราะห์จำนวนไม่น้อย แต่ที่รู้จักกันดี คือ thiocyanate (SCN) และ sulfide แม้ว่าสารดังกล่าวจะเป็นสารที่เกี่ยวข้องกับไซยาไนด์ แต่ไม่จัดเป็นสารเชิงซ้อนไซยาไนด์ ดังนั้นการวิเคราะห์ total cyanide หรือไซยาไนด์ชนิดอื่นๆ จะไม่รวม thiocyanate และ sulfide โดยตัวอย่างการรบกวนที่เกิดขึ้นจาก thiocyanate แสดงดังตารางที่ 7 จะเห็นได้ว่าปริมาณ total cyanide ที่วิเคราะห์ได้มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเกินจากปริมาณไซยาไนด์ที่มีอยู่จริง ซึ่งคาดว่าเกิดจากการใช้สภาวะกลั่นที่รุนแรง กล่าวคือ มีความเป็นกรดสูง ทำให้เกิดการแตกตัวของ thiocyanate แล้วปลดปล่อยโมเลกุลไซยาไนด์ออกมา แต่ thiocyanate ไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ WAD cyanide ดังนั้นเพื่อลดการรบกวนที่อาจเกิดขึ้นการปรับสภาพสารตัวอย่างก่อนการกลั่นจึงเป็นสิ่งจำเป็น

ตารางที่ 7 การวิเคราะห์ total cyanide และ WAD cyanide โดยการกลั่น ด้วยวิธีของ APHA ในสารละลายที่มี thiocyanate คัดลอกจาก Mudder et al., 2001

Free Cyanide Concentration (mg/L CN)	Thiocyanate Concentration (mg/L CN)	Analysed Total Cyanide (mg/L CN)	Analysed WAD Cyanide (mg/L CN)
0.2	0	0.197	0.202
0.2	101	0.255	0.197
0.2	101	0.240	0.196
0.2	101	0.189	0.205
Average (0.2 mg/L CN, 101 mg/L SCN)		0.228	0.199
0.2	202	0.388	0.207
0.2	202	0.317	0.203
0.2	202	0.237	0.198
Average (0.2 mg/L CN, 202 mg/L SCN)		0.314	0.203
0.0	200	0.051	0.013

## 2. การวิเคราะห์ WAD Cyanide ด้วยการกลั่น

วิธีวิเคราะห์ WAD cyanide ด้วยการกลั่นของ APHA, ISO; method 6703 (easily liberated cyanide) และ ASTM; method D2036 เป็นวิธีที่ได้รับความนิยม หลักการโดยทั่วไป คือ การกลั่นสารตัวอย่างที่ pH 4.5 นานประมาณ 1 ชั่วโมง ทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนไซยาไนด์ ซึ่งจะถูกดักจับไว้ในสารละลายต่าง จากนั้นนำสารละลายไซยาไนด์ในต่างที่ได้ไปวิเคราะห์หาไซยาไนด์เชิงปริมาณด้วยการไตเตรตหรือการวัดสี โดยใช้อุปกรณ์การกลั่นเหมือนกับการวิเคราะห์ total cyanide ดังรูปที่ 5 เพียงแต่สภาวะที่ใช้สำหรับการกลั่น WAD cyanide รุนแรงน้อยกว่า และเทคนิคนี้มี detection limit อยู่ที่ประมาณ 0.02 mg/l

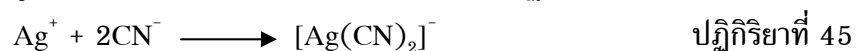
การวิเคราะห์ WAD cyanide เป็นการหาไซยาไนด์ในรูปของ free cyanide และ weak-moderately strong complexed cyanide เช่น สารเชิงซ้อนไซยาไนด์กับทองแดง สังกะสี แคดเมียม และนิกเกิล เท่านั้น โดยไม่รวม strongly complexed cyanide เช่น เหล็ก และ โคบอลต์ จึงไม่จำเป็นต้องทำการกลั่นที่สภาวะรุนแรง ดังนั้นสารรบกวนจำพวก thiocyanate และ sulfide จึงไม่มีผลกระทบต่อวิเคราะห์มากนัก

### 3. การวิเคราะห์ WAD Cyanide ด้วย Picric Acid

การวิเคราะห์ WAD cyanide ด้วย picric acid เป็นอีกวิธีหนึ่งที่เชื่อถือได้ โดยขั้นตอนการวิเคราะห์ประกอบด้วย การทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนไซยาไนด์กับ picric acid ในสถานะที่มี nickel และให้ความร้อนใน water bath นานประมาณ 20 นาที จากนั้นนำไปวัดการดูดกลืนแสงในช่วง visible range ด้วยเครื่อง spectrophotometer เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ต้องใช้สภาวะที่รุนแรงเหมือนการกลั่น มีความสะดวก และเสียค่าใช้จ่ายไม่สูง จึงนิยมนำไปใช้หาปริมาณ WAD cyanide ใน pilot plant แต่เนื่องจากวิธีนี้มีค่า detection limit ค่อนข้างสูง คือ ประมาณ 0.5 mg/l ดังนั้นการวิเคราะห์สารละลายตัวอย่างที่มีปริมาณไซยาไนด์น้อยๆ อาจมีความคลาดเคลื่อนได้ โดยในบางประเทศ เช่น ออสเตรเลีย และแอฟริกาใต้ ไม่แนะนำให้ใช้วิธีนี้ เนื่องจากการควบคุมคุณภาพน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตทองคำมักกำหนดค่า WAD cyanide ไว้ต่ำกว่า detection limit ของวิธีนี้

### 4. การวิเคราะห์ Free Cyanide โดยการไตเตรตด้วย Silver nitrate

การไตเตรตด้วย silver nitrate ถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณ free cyanide และนำมาไตเตรตกับสารละลายต่างที่ได้จากการกลั่นเพื่อหา WAD และ total cyanide โดยใช้อินดิเคเตอร์ (indicator) ที่มีความไวต่อ silver เช่น rhodanine และ potassium iodide (KI) เป็นตัวบ่งจุดยุติของการไตเตรต หลักการของวิธี คือ โมเลกุลของไซยาไนด์อิสระในสารตัวอย่างจะทำปฏิกิริยากับเงินจากสารละลายมาตรฐาน silver nitrate ( $\text{AgNO}_3$ ) เกิดเป็นสารเชิงซ้อนไซยาไนด์กับเงิน ดังปฏิกิริยาที่ 45



ขณะการไตเตรตต้องควบคุม pH ของสารละลายให้เป็นค่าสูง เพื่อป้องกันการสูญเสียไซยาไนด์จากการระเหยของแก๊สไฮโดรเจนไซยาไนด์ ( $\text{HCN}$ ) ที่จุดยุติโมเลกุลของ free cyanide จะทำปฏิกิริยาจนหมด ดังนั้น silver ส่วนที่เหลือจึงรวมตัวกับ rhodanine แล้วทำให้สีของสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพูอมน้ำตาล (Massachusetts Department of Environmental Protection, 2004)

#### ข้อควรคำนึงในการไตเตรตด้วย silver nitrate

1. Silver nitrate ไม่เพียงทำปฏิกิริยากับ free cyanide anion ( $\text{CN}^-$ ) ในสารละลายเท่านั้น แต่ยังสามารถทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์เกือบทั้งหมดที่สร้างพันธะกับ Zn และบางส่วนของไซยาไนด์ที่สร้างพันธะกับ Cu ได้อีกด้วย ดังนั้นผลการวิเคราะห์ปริมาณ free cyanide โดยการไตเตรตด้วย silver nitrate ในสารตัวอย่างที่มี Zn และ Cu ละลายอยู่ จึงมีความคลาดเคลื่อน และไม่ใช้ผลการวิเคราะห์ free cyanide ที่แท้จริง

2. การวิเคราะห์หาปริมาณ free cyanide โดยการไตเตรตด้วย silver nitrate จะให้ผลวิเคราะห์ที่แสดงค่า free cyanide ที่แท้จริง เมื่อในสารตัวอย่างไม่มีสารเชิงซ้อนไซยาไนด์กับโลหะต่างๆ (ยกเว้นเหล็ก) ดังนั้นการนำวิธีการไตเตรตด้วย silver nitrate มาใช้วิเคราะห์ WAD cyanide และ total cyanide ภายหลังจากการกลั่น จึงเป็นวิธีที่เหมาะสม

3. ขณะการไตเตรตด้วย silver nitrate ต้องควบคุม pH ของสารละลายให้สูงกว่า 11 เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่แสดงปริมาณไซยาไนด์ที่มีอยู่ทั้งหมดในสารละลาย ถ้าทำการไตเตรตที่ pH ต่ำกว่านี้ ปริมาณ free cyanide ที่วิเคราะห์ได้อาจมีค่าลดลง เนื่องจากการสูญเสียไซยาไนด์ในรูปของแก๊สไฮโดรเจนไซยาไนด์ ดังนั้นการตรวจเช็คค่า pH ขณะการไตเตรตจึงเป็นปัจจัยสำคัญ

4. การไตเตรตจะสิ้นสุดเมื่อถึงจุดยุติ โดยทั่วไปจะสังเกตได้จากสีของสารละลายที่เปลี่ยนไป แต่เนื่องจากผู้วิเคราะห์แต่ละคนมองเห็นระดับความเปลี่ยนแปลงของสีไม่เหมือนกัน ทำให้ผลการวิเคราะห์เกิดความคลาดเคลื่อนได้ เพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ผู้วิเคราะห์ควรได้รับการฝึกฝนจนเกิดความชำนาญ หรือควรเลือกใช้การไตเตรตแบบอัตโนมัติ (automatic titration)

## 5. การวิเคราะห์ Free Cyanide ด้วย Ion Selective Electrode

เป็นวิธีการใช้ขั้วไฟฟ้าซึ่งบอกเฉพาะไอออน เพื่อวัดความเข้มข้นของไซยาไนด์ในสารละลายเปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง โดยขณะทำการวัดต้องกวนสารละลายตลอดเวลา นำค่าที่วัดได้ไปเปรียบเทียบกับ calibration curve ซึ่งเตรียมจากสารละลายมาตรฐานไซยาไนด์ที่มีความเข้มข้นต่างๆ และมี matrix เช่นเดียวกับสารตัวอย่าง การหาปริมาณ free cyanide ด้วยวิธีนี้จะให้ผลวิเคราะห์ที่แม่นยำ เมื่อในสารละลายมีปริมาณไซยาไนด์มากกว่า 0.5 mg/l นอกจากจะนำมาใช้หาปริมาณ free cyanide แล้ว ยังสามารถนำไปวิเคราะห์หาปริมาณ total cyanide และ WAD cyanide ในสารละลายต่างที่ได้จากการกลั่นอีกด้วย

## 6. การวิเคราะห์ไซยาไนด์ด้วย Ion Chromatography

Ion Chromatography ถูกนำมาใช้เพื่อจำแนกชนิดของสารเชิงซ้อนไซยาไนด์กับโลหะต่างๆ เนื่องจากสารประกอบเชิงซ้อนไซยาไนด์กับโลหะชนิดต่างๆ จะให้ spectra ที่แตกต่างกัน โดยความเข้มของ spectra (intensity spectra) จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นของสารเชิงซ้อนไซยาไนด์กับโลหะนั้นๆ วิธีนี้สามารถใช้วิเคราะห์หาสารเชิงซ้อนไซยาไนด์กับโลหะต่างๆ เช่น ทอง เงิน ทองแดง โคบอลต์ เหล็ก โครเมียม และนิกเกิล เป็นต้น โดยเทคนิคนี้สามารถวิเคราะห์ไซยาไนด์ที่มีปริมาณน้อยๆ ถึง 0.001 mg/l แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่า salinity ด้วย อย่างไรก็ตาม วิธี Ion Chromatography ยังไม่ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากเครื่องมือมีราคาค่อนข้างแพงและผู้วิเคราะห์ต้องมีความชำนาญสูง

## 7. การวิเคราะห์ไซยาไนด์ด้วย Automated Ligand Exchange

ในปี 1999 USEPA ได้พัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์ไซยาไนด์ ที่เรียกว่า method OIA-1677 เพื่อหาปริมาณ WAD cyanide โดยหลักการของวิธีมีดังนี้ เตรียมสารละลายตัวอย่างด้วยการเติม ligand exchange reagent เพื่อให้สาร ligand exchange ทำปฏิกิริยากับโลหะต่างๆ เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีความเสถียรสูง ทำให้โมเลกุลไซยาไนด์ถูกปล่อยให้เป็นอิสระ จากนั้นสารละลายจะถูกทำให้อยู่ในสภาวะกรดด้วย hydrochloric acid เพื่อเปลี่ยนไซยาไนด์อิสระให้อยู่ในรูปของแก๊สไฮโดรเจนไซยาไนด์ที่สามารถแพร่ผ่าน membrane ไปยังสารละลายต่าง จากนั้นใช้ขั้วไฟฟ้าระบบ silver/silver chloride electrode วัดความเข้มข้นของไซยาไนด์ในสารละลาย เทคนิคนี้มีความรวดเร็ว มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ด้วยการกลั่น ดังแสดงในตารางที่ 8 และไม่มีการรบกวนจาก thiocyanate แต่สำหรับ sulfide ยังคงเป็นสารรบกวนที่มีผลกระทบอยู่ จึงต้องปรับสภาพตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์ นอกจากนี้ยังสามารถ

พัฒนาไปสู่วิธีการวิเคราะห์ free cyanide และ total cyanide แต่ข้อเสียของเทคนิคนี้ก็คือ อุปกรณ์ที่ใช้มีราคาแพง

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์ WAD cyanide ด้วย distillation และ OIA-1677 เมื่อใช้สารละลายมาตรฐานไซยาไนด์เข้มข้น 2.00 mg/l คัดลอกจาก Mudder and others, 2001

Metal Complex	% CN Recovery	
	Distillation	OIA-1677
Cd	101.6	100.0
Zn	100.9	98.5
Ag	99.0	100.0
Ni	97.3	103.0
Cu	96.0	99.0
Hg	58.9	99.0
Au	0	0
Co	0	2.0
Fe(II)	0	0
Fe(III)	0	0

## 8. สารรบกวนการวิเคราะห์ไซยาไนด์ (Analytical Interferences)

ความถูกต้อง (accuracy) และความแม่นยำ (precision) ของผลการวิเคราะห์อาจคลาดเคลื่อนไปได้ทั้งในทางบวกและลบ ถ้าในสารตัวอย่างมีสารรบกวนอยู่ โดยวิธีการทดสอบไซยาไนด์ที่กล่าวมาล้วนได้รับผลกระทบจากสารรบกวนชนิดต่างๆ ในปริมาณที่แตกต่างกัน

การวิเคราะห์ WAD cyanide เพื่อวัดปริมาณ weakly complexed cyanide เป็นวิธีที่ได้รับผลกระทบจากสารรบกวนน้อยที่สุด ซึ่งแตกต่างจากการวิเคราะห์ total cyanide ด้วยเทคนิค ion selective electrode และการวิเคราะห์ free cyanide ด้วยการไตเตรต ที่ได้รับอิทธิพลจากสารรบกวนหลายชนิด โดยสารประกอบที่รบกวนการวิเคราะห์ไซยาไนด์มีดังนี้

- สารออกซิไดส์ (oxidizing agent)
- ซัลไฟด์ (sulfide)
- ไทโอไซยาเนต (thiocyanate)
- ไนไตรต์และไนเตรต (nitrite and nitrate)
- คาร์บอเนต (carbonate)
- ไทโอซัลเฟต ซัลไฟต์และสารประกอบซัลเฟอร์อื่นๆ (thiosulphate, sulphite and other sulphur compound)
- โลหะต่างๆ (metal)



## 8.1 ตัวอย่างออกซิไดส์

ตัวอย่างออกซิไดส์มักทำให้ผลการวิเคราะห์ไซยาไนด์คลาดเคลื่อนไปในทางลบ เนื่องจากตัวอย่างออกซิไดส์จะทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์ในสารละลายระหว่างการเก็บรักษาและการขนย้ายตัวอย่าง ตัวอย่างออกซิไดส์ที่มักพบในสารละลายที่เกิดจากการทำเหมือง คือ คลอรีน ( $\text{Cl}_2$ ) ออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ )

วิธีที่ถูกต้องในการควบคุมตัวอย่างออกซิไดส์เหล่านี้ คือ การกำจัดออกโดยทันที ตามหลักวิธีทดสอบตัวอย่างออกซิไดส์ของ ASTM สามารถทำได้โดยหยดสารตัวอย่างบน potassium iodide-starch paper ที่ชุ่มด้วย acetate buffer ถ้าเกิดสีน้ำเงินแสดงว่าสารตัวอย่างมีตัวอย่างออกซิไดส์อยู่ในปริมาณที่มากพอจะทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์ได้ วิธีกำจัดตัวอย่างออกซิไดส์ที่ได้รับการยอมรับคือ การเติม sodium arsenite ให้มีความเข้มข้นประมาณ 0.1 g/l นอกจากนี้ยังพบว่ามีสารเคมีอื่นๆ อีกที่สามารถกำจัดตัวอย่างออกซิไดส์ได้ เช่น sodium thiosulphate, sodium hydrogen sulphite, ascorbic acid, oxalic acid และ stannous chloride แต่สารเหล่านี้อาจก่อให้เกิดปัญหาอื่นในการวิเคราะห์ไซยาไนด์ได้ โดยนักวิจัย รายงานว่าการใช้ sodium arsenite มีผลกระทบน้อยที่สุดต่อการวิเคราะห์

## 8.2 ซัลไฟด์

ซัลไฟด์ หมายถึง สารประกอบที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบรวมถึง thiocyanate ( $\text{SCN}^-$ ) ซัลไฟด์จัดเป็นสารรบกวนจำพวกหนึ่งที่รู้จักกันดี และมักพบในของเหลวที่เกิดจากกระบวนการผลิตและน้ำทิ้งจากการทำเหมือง โดยทั่วไปซัลไฟด์อิสระ ( $\text{S}^{2-}$ ) จะปรากฏเมื่อสารละลายอยู่ในสภาพที่ขาดออกซิเจน ทำให้ไซยาไนด์ถูกออกซิไดส์ด้วยซัลไฟด์กลายเป็น thiocyanate อย่างเร็วรวด ที่ pH สูงขึ้น โดยนักวิจัยกล่าวว่า ซัลไฟด์ในรูปของ hydrogen sulphide ( $\text{H}_2\text{S}$ ) ถูกวิเคราะห์ร่วมด้วยในการวิเคราะห์ไซยาไนด์ สารรบกวนตัวนี้สามารถกำจัดออกโดยการทำให้ตกตะกอนในรูปของซัลไฟด์ที่ไม่ละลาย สารเคมีที่นิยมนำมาใช้ตกตะกอนซัลไฟด์ คือ lead carbonate, cadmium carbonate, lead acetate, cadmium nitrate, bismuth citrate, bismuth nitrate และ permanganate อย่างไรก็ตาม พบว่าตะกอนของซัลไฟด์สามารถละลายออกมาในสารละลายได้อีก ซึ่งอาจทำให้ผลการวิเคราะห์คลาดเคลื่อนไป ดังนั้นควรกรองตะกอนออกก่อนการเก็บรักษาและวิเคราะห์ตัวอย่าง

## 8.3 ไทโอไซยาเนท

ไทโอไซยาเนทเป็นสารรบกวนในหลาย ๆ วิธีทดสอบไซยาไนด์ ไทโอไซยาเนทในสารละลายเกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาของซัลไฟด์ในแร่กับไซยาไนด์ที่ถูกเติมในการกระบวนการสกัดทองคำ โดยในสภาวะกรดซึ่งมีออกซิแดนซ์ที่รุนแรง ไทโอไซยาเนทจะแตกตัวกลายเป็นไซยาไนด์อิสระและซัลเฟอร์ จากนั้นซัลเฟอร์จะถูกออกซิไดส์กลายเป็น oxysulphur anions ทำให้การวิเคราะห์ไซยาไนด์ที่สภาวะนี้มีค่าสูงขึ้น การกลั่นสารตัวอย่างในสภาวะที่เป็นกรดแก่จะทำให้ thiocyanate เปลี่ยนไปเป็นซัลไฟด์อย่างช้า ๆ แล้วระเหยไปพร้อมกับสารไฮโดรเจนไซยาไนด์ไปยังอุปกรณ์ดูดซับ (absorber) ซึ่งเป็นปัญหาหลักที่รบกวนการวิเคราะห์ total cyanide เนื่องจาก thiocyanate และสารต่างๆ ที่เกิดจากการสลายตัวของ thiocyanate สามารถทำปฏิกิริยากับ chloramines-T ในขั้นตอนการทำให้เกิดสีก่อนนำไปวัดด้วย spectrophotometer ทำให้ผลการวิเคราะห์ไซยาไนด์มีค่าสูงเกินความเป็นจริง โดยนักวิจัยระบุว่า thiocyanate

ความเข้มข้น 1.0 mg/l สามารถทำให้เกิดสีเท่ากับการเกิดสีจากไซยาไนด์ที่เข้มข้น 0.45 mg/l สำหรับการวิเคราะห์ WAD cyanide ซึ่งทำในสภาวะกรดที่ไม่รุนแรงนัก การรบกวนจาก thiocyanate ถือว่าน้อยมาก ๆ โดยนักวิจัยหลายท่านแนะนำให้ใช้สารประกอบของแคดเมียมในการตกตะกอนผลผลิตของซัลไฟด์ก่อนผ่านไปยังอุปกรณ์ดูดซับ

#### 8.4 ไนไตรต์และไนเตรต

ทั้งไนไตรต์และไนเตรตอาจถูกพิจารณาเป็นสารรบกวนที่สำคัญในหลายวิธีของการทดสอบ แม้จะมีไนเตรตในปริมาณต่ำ หรือเพียงประมาณ 25 mg/l ไนไตรต์อาจทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนไซยาไนด์ระหว่างการกลั่นมีผลทำให้ผลการวิเคราะห์คลาดเคลื่อน โดยเฉพาะการวิเคราะห์ total cyanide แม้ว่าโดยปกติสารรบกวนจะให้ผลกระทบในด้านบวก แต่การเติมไนไตรต์ลงในสารละลายอาจทำให้เกิดผลกระทบในด้านลบได้ โดย ASTM แนะนำให้เติม sulphamic acid ลงในสารตัวอย่างก่อนการกลั่น เพื่อลดการรบกวนจากไนไตรต์และไนเตรต

#### 8.5 คาร์บอนเนต

การกลั่นภายใต้สภาวะกรดที่รุนแรง ทำให้คาร์บอนเนตที่ความเข้มข้นสูง ๆ กลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีผลทำให้ปริมาณ NaOH ในอุปกรณ์ดูดซับมีปริมาณลดลง

#### 8.6 ไทโอซัลเฟต ซัลไฟต์และสารประกอบซัลเฟอร์อื่น ๆ

สารประกอบซัลเฟอร์หลากหลายชนิดถูกทำให้เกิดขึ้นขณะการกลั่น ประกอบด้วย hydrogen sulphide, sulphur dioxide และ sodium sulphite ส่วน thiosulphate จะสลายตัวเกิดเป็นซัลเฟอร์และ sulphurous acid กลายเป็น  $SO_2$  ขณะกลั่น ซึ่งกระบวนการสลายตัวของ thiosulphate และสารประกอบซัลเฟอร์เหล่านี้จะไปทำให้สีของสารเชิงซ้อนไซยาไนด์ที่จะนำไปวัดด้วย spectrophotometer จางลง ทำให้ผลการทดสอบหาปริมาณไซยาไนด์มีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง

การลดผลกระทบจากสารรบกวนในกลุ่มนี้สามารถทำได้โดยการใช้ hydrogen peroxide อย่างไรก็ตาม การเติม hydrogen peroxide ที่มากเกินไปอาจส่งผลให้ไซยาไนด์ถูกออกซิไดส์อย่างรวดเร็ว ทำให้ปริมาณไซยาไนด์ที่วิเคราะห์ได้ลดลง

#### 8.7 โลหะต่าง ๆ

โลหะบางชนิดที่มีปริมาณสูงอาจรบกวนการวิเคราะห์ไซยาไนด์ ตัวอย่างเช่น mercuric chloride และ copper chloride ที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อาจยับยั้งการวิเคราะห์ไซยาไนด์ โดยเฉพาะเมื่อมี thiocyanate ปรากฏอยู่ด้วย เนื่องจากปรอท (Hg) เป็นธาตุที่ระเหยได้ง่ายจึงอาจถูกดักจับใน absorber ก่อให้เกิดผลกระทบในด้านลบต่อผลการวิเคราะห์ นอกจากนี้ เหล็ก โคบอลต์ และปรอทสามารถเกิดสารเชิงซ้อนกับไซยาไนด์ที่มีความเสถียรสูงมาก ซึ่งอาจไม่สามารถสลายพันธะได้ง่าย ทำให้ผลการวิเคราะห์มีค่าลดลง

## 9. การเก็บรักษาตัวอย่าง (Sample Preservation)

การนำสารตัวอย่างออกจากแหล่งกำเนิดอาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางเคมีและชีวภาพ นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบต่างๆ ในสารตัวอย่างได้ ดังนั้นการวิเคราะห์สารตัวอย่างทันทีหลังการเก็บนับเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์อาจไม่สามารถทำได้ทันทีหลังการชักตัวอย่าง เพื่อรักษาสารที่ต้องการวิเคราะห์ให้อยู่ในสภาพเดิมให้มากที่สุด การเก็บรักษาตัวอย่างให้ถูกต้องจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญในงานวิเคราะห์

ก่อนการเก็บตัวอย่างควรสวมเสื้อผ้า แวนตา ถุงมือ และรองเท้าที่มิดชิด เนื่องจากตัวอย่างอาจมีองค์ประกอบที่อาจระคายเคือง หรือเป็นอันตรายต่อร่างกายได้หากสัมผัสโดยตรง สารตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์ไซยาไนด์มักอยู่ในรูปของเหลว ซึ่งการเก็บรักษาโดยทั่วไปสามารถทำได้ดังนี้ หากสารตัวอย่างมีของแข็งปนอยู่ ให้กรองตะกอนออก หากสารตัวอย่างมีสารรบกวน เช่น สารออกซิแดนซ์ thiocyanate และ sulfide สูง ควรปรับสภาพสารตัวอย่างก่อน เช่น การเติม sodium arsenite เพื่อลดการรบกวนจากตัวออกซิแดนซ์ และการเติม lead carbonate เพื่อลดผลกระทบจาก sulfide จากนั้นปรับสารละลายให้มีค่า pH อยู่ที่ประมาณ 12 ด้วย sodium hydroxide ถ่ายสารละลายและตะกอนของแข็งที่กรองไว้ใส่ขวดพลาสติกที่สะอาด พร้อมทั้งปิดฝาให้สนิท เก็บไว้ในที่มืดและเย็นที่อุณหภูมิประมาณ 4 °C (International Cyanide Management Institute, 2006b; Massachusetts Department of Environmental, 2004)

# แนวทางการป้องกันแก้ไขผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากอุตสาหกรรม เหมืองแร่ทองคำ

การประกอบกิจการอุตสาหกรรมเหมืองแร่และโลหกรรม ย่อมส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้นการจัดเตรียมมาตรการป้องกันแก้ไขผลกระทบสิ่งแวดล้อม ซึ่งประกอบไปด้วย การควบคุมและป้องกันสารมลพิษ การติดตามเฝ้าระวังปัญหามลพิษ และการแก้ไขปัญหามลพิษที่เกิดจากการประกอบกิจการ จึงเป็นแนวทางสำคัญที่จะช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการประกอบกิจการต่าง ๆ ให้น้อยที่สุด

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ได้ร่วมกับคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล จัดทำโครงการกำหนดมาตรฐานมลพิษและการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมเหมืองแร่และโลหกรรมชนิดแร่ทองคำ ได้ข้อสรุปแนวทางการป้องกันแก้ไขผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่ทองคำ ดังนี้

## 1. การควบคุมและป้องกันการปนเปื้อนของสารมลพิษในสิ่งแวดล้อม

### 1.1 ด้านอุทกวิทยา

การจัดการด้านอุทกวิทยาหรือน้ำผิวดินคือ การจัดการระบบน้ำให้เป็นระบบปิด เพื่อควบคุมและป้องกันการปนเปื้อนของสารมลพิษสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งมีแนวทางดังนี้

1.1.1 จัดให้มีการขุดระบายน้ำในบริเวณต่างๆ เช่น หน้าเหมือง ริมถนนในเขตพื้นที่ประทานบัตร และรอบกองแร่และเศษดินเศษหินก่อนเข้าทำการละลายแร่ เพื่อป้องกันน้ำฝนไหลบ่าในบริเวณเหมือง และป้องกันการชะล้างโลหะหนักที่เป็นองค์ประกอบในแร่ปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำ กรณีเกิดน้ำเหมืองเป็นกรด

1.1.2 กรณีจำเป็นต้องระบายน้ำทิ้ง ให้ทำการบำบัดน้ำที่จะระบายให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งก่อนปล่อยสู่ภายนอก เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของไซยาไนด์และโลหะหนักต่างๆ โดยจำเป็นต้องได้รับความเห็นชอบจากหน่วยงานของรัฐที่รับผิดชอบดูแลก่อนดำเนินการ

1.1.3 จัดให้มีบ่อเกรอะสำหรับรองรับน้ำ เพื่อทำให้ดินเกิดการตกตะกอนก่อนผ่านไปยังบ่อพักน้ำทิ้ง และให้แน่ใจว่าไม่มีตะกอนโลหะหนักปล่อยทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม

1.1.4 จัดให้มีบ่อกักเก็บตะกอนกากแร่และน้ำที่ใช้แล้วจากการแต่งแร่ที่มีความแข็งแรง พื้นบ่อทำด้วยวัสดุที่สามารถป้องกันการรั่วซึม และบ่อมีขนาดเพียงพอที่จะรองรับของเสียดังกล่าวได้ตลอดระยะเวลาการทำเหมือง

1.1.5 ตำแหน่งของโรงแต่งแร่และบ่อกักเก็บกากแร่ต้องอยู่ห่างจากแหล่งน้ำอย่างน้อย 500 เมตร

## 1.2 ด้านปฐพีวิทยา

การจัดการควบคุมและป้องกันการปนเปื้อนของสารมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมด้านปฐพีวิทยา มีแนวทางดังนี้

1.2.1 สร้างรั้ว กำแพง หรือปลูกต้นไม้ล้อมรอบพื้นที่โครงการ

1.2.2 ควบคุมและป้องกันไม่ให้ตะกอนดินจากการชะล้างของน้ำฝน รวมถึงตะกอนและกากแร่ที่เหลือจากการแต่งแร่ออกจากพื้นที่โครงการ

1.2.3 นำตะกอนกากแร่ที่เกิดจากการแต่งแร่กลับมาใช้ประโยชน์ในกิจกรรมเหมืองแร่

1.2.4 พื้นที่รอบฐานบ่อกักเก็บกากแร่ควรออกแบบให้สามารถตรวจสอบการรั่วซึมได้ง่าย และป้องกันการพังทลาย เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการปนเปื้อนในดินที่อยู่นอกเขตโครงการ

1.2.5 กรณีมีพื้นที่บ่อกักเก็บกากแร่จำกัด ควรสร้างจุดปล่อยกากแร่โดยรอบบ่อหลาย ๆ

จุด

1.2.6 ไม่นำดิน ตะกอน หรือเศษดินเศษหินที่เกิดจากการทำเหมืองและการแต่งแร่ไปถมที่นอกพื้นที่โครงการ เนื่องจากดินและหินดังกล่าวอาจมีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง ซึ่งอาจชะล้างออกมาปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้

1.2.7 ภายหลังสิ้นสุดโครงการ ให้ปรับปรุงฟื้นฟูพื้นที่และสภาพดิน พร้อมทั้งปลูกพืชคลุมดิน ไม้ยืนต้น หรือพืชเศรษฐกิจที่เหมาะสมในบริเวณพื้นที่ที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์ โดยเฉพาะพื้นที่บ่อกักเก็บกากแร่

1.2.8 พื้นฟูพื้นที่ที่ผ่านการทำเหมือง เช่น พัฒนาเป็นแหล่งท่องเที่ยว หรือ พิพิธภัณฑ์เหมืองแร่ เพื่อใช้เป็นแหล่งความรู้และการศึกษาวิจัยสำหรับประชาชนทั่วไป

## 1.3 ด้านอากาศ

การจัดการควบคุมและป้องกันการปนเปื้อนของสารมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมด้านอากาศ มีแนวทางดังนี้

1.3.1 ฉีดพรมน้ำตามทางลูกรังซึ่งเป็นเส้นทางในการขนส่งภายในโครงการ และบริเวณเส้นทางคมนาคมหลักที่ผ่านชุมชน เพื่อลดการฟุ้งกระจายของฝุ่นละออง

1.3.2 ปลูกต้นไม้ตามแนวขวางของทิศทางลม เพื่อป้องกันกระแสลมพัดพาฝุ่นที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมเหมืองออกไปสู่ภายนอก

1.3.3 จำกัดความเร็วของยานพาหนะที่ใช้วิ่งภายในโครงการ เพื่อลดการฟุ้งกระจายของฝุ่นละออง

1.3.4 รถบรรทุกหิน ดิน ทราย และวัสดุก่อสร้างต่างๆ ต้องคลุมด้วยผ้าใบให้มิดชิด เพื่อป้องกันฝุ่นฟุ้งกระจาย

1.3.5 จัดให้มีบ่อน้ำ เพื่อล้างล้อรถบรรทุกที่วิ่งผ่าน ก่อนออกจากพื้นที่หน้าเหมือง

1.3.6 เส้นทางเดินรถควรลาดยางแอสฟัลต์หรือนิยมน้ำบ่อ

1.3.7 จัดเก็บสารอันตรายให้เป็นระเบียบ และทำความสะอาดบริเวณสถานที่ทำงานเป็นประจำ เพื่อป้องกันอันตรายจากการทำงาน

#### 1.4 ด้านสุขภาพอนามัยและความปลอดภัย

การจัดการควบคุมและป้องกันการปนเปื้อนของสารมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมด้านสุขภาพอนามัยและความปลอดภัย จำแนกเป็น 3 ด้าน คือ ผู้ประกอบการ พนักงาน และประชาชนทั่วไปที่อาศัยอยู่รอบข้างพื้นที่โครงการ มีแนวทางดังนี้

##### 1.4.1 ด้านผู้ประกอบการ

1.4.1.1 จัดหาอุปกรณ์ป้องกันอันตราย เช่น หน้ากากกันฝุ่น ถุงมือ แวนตา ปลีกอุดหู หมวก รองเท้าปิดชิด และเสื้อผ้าที่เหมาะสมกับการปฏิบัติงานในบริเวณต่างๆ พร้อมทั้งจัดให้มีบริการซักรีดให้กับพนักงาน เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษสู่ภายนอก

1.4.1.2 วางแผนการปฏิบัติงานการใช้สารเคมีที่เป็นอันตราย เช่น ไซยาไนด์ สารเคมีที่มีฤทธิ์กัดกร่อน และสารไวไฟต่างๆ เพื่อความปลอดภัยในการทำงาน โดยดำเนินการตั้งแต่ระบบการป้องกันภัย การจัดเก็บรักษา การขนย้าย การบำบัด และการเตรียมความพร้อมกรณีเกิดเหตุฉุกเฉิน เช่น การจัดให้มีห้องล้างตัว อุปกรณ์ปฐมพยาบาล และยา

1.4.1.3 จัดให้มีโรงอาหาร น้ำดื่ม อ่างล้างมือ ห้องอาบน้ำสระผม ห้องเปลี่ยนชุดทำงาน ห้องเก็บอุปกรณ์ความปลอดภัย และชุดทำงานส่วนบุคคลอย่างเพียงพอ รวมถึงส่งเสริมให้พนักงานมีสุขอนามัยส่วนบุคคลที่ดี

1.4.1.4 จัดช่วงเวลาการทำงาน เพื่อลดการได้รับสารที่มีอันตรายต่อสุขภาพ

1.4.1.5 ให้ความรู้ด้านสุขศึกษาแก่พนักงานให้ทราบถึงอันตรายจากสารเคมี การใช้งานสารเคมีอย่างถูกต้อง การป้องกันอันตรายจากการใช้สารเคมี ตลอดจนกระตุ้นให้พนักงานปฏิบัติตามกฎระเบียบอย่างเคร่งครัด

1.4.1.6 จัดแผนการตรวจสอบสุขภาพพนักงานทุก 6 เดือน พร้อมทั้งรายงานผลให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องทราบ

1.4.1.7 จัดให้มีสวัสดิการต่างๆ เช่น ประกันการเจ็บป่วยจากการทำงาน สถานที่พักผ่อน จัดให้มีงานรื่นเริงเป็นครั้งคราวหรือจัดหาสิ่งจูงใจอื่นๆ เพื่อให้พนักงานปฏิบัติงานด้วยความสบายใจและมีประสิทธิภาพในการทำงานยิ่งขึ้น

##### 1.4.2 ด้านพนักงาน

พนักงานหรือผู้ปฏิบัติงานในพื้นที่โครงการควรปฏิบัติดังนี้

1.4.2.1 ผู้ปฏิบัติงานที่ทำงานสัมผัสกับสารพิษต้องใส่เสื้อ แวนตา ถุงมือรองเท้า ป้องกันให้มิดชิด

1.4.2.2 ใช้อุปกรณ์ป้องกันอันตรายที่จัดเตรียมไว้อย่างเคร่งครัด

1.4.2.3 พนักงานที่ต้องสัมผัสกับไซยาไนด์อย่างใกล้ชิด ต้องระมัดระวังการทำงานเป็นพิเศษ เช่น การเปิดถังเก็บ การละลายเม็ดโซเดียมไซยาไนด์ และการทำความสะอาดไซยาไนด์ที่ตกหล่นหรือรั่วไหล

1.4.2.4 ห้ามรับประทาน ดื่ม หรือเคี้ยว ตลอดจนสูบบุหรี่ในพื้นที่ที่มีการใช้สาร  
ไซยาไนด์

1.4.2.5 การปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับไซยาไนด์จะต้องทำงานเป็นคู่ เมื่อคนหนึ่ง  
ทำงานให้อีกคนเป็นผู้สังเกตการณ์หรือช่วยเหลือกรณีเกิดเหตุการณ์ฉุกเฉิน

1.4.2.6 พนักงานควรล้างมือทุกครั้งหลังปฏิบัติงานเสร็จ

1.4.2.7 หากมีผู้ได้รับสารพิษจากไซยาไนด์ให้ดำเนินการปฐมพยาบาลเบื้องต้น  
ทันที

1.4.2.8 บันทึกสถิติพร้อมกับการจัดทำรายงานการเกิดอุบัติเหตุจากการ  
ปฏิบัติงานทุกครั้ง

### 1.4.3 ด้านประชาชนทั่วไปที่อาศัยอยู่บริเวณรอบข้างพื้นที่โครงการ

1.4.3.1 ประชาสัมพันธ์ให้ความรู้เกี่ยวกับผลกระทบต่อสุขภาพอนามัย และพิษ  
ของโลหะหนักและไซยาไนด์ พร้อมทั้งวิธีปฏิบัติตน เพื่อป้องกันการรับสารพิษเข้าสู่ร่างกาย

1.4.3.2 สนับสนุนให้ประชาชนปลูกพืชคลุมดินในพื้นที่โล่งเตียน เพื่อลดการฟุ้ง  
กระจายของฝุ่นซึ่งอาจมีโลหะหนักปะปนด้วย

1.4.3.3 หลีกเลี่ยงและป้องกันการจัดตั้งชุมชนใหม่ในบริเวณพื้นที่ศักยภาพแหล่ง  
แร่

1.4.3.4 ติดตามตรวจสอบการปล่อยทิ้งของเสียจากพื้นที่โครงการให้เป็นไปตาม  
กฎหมาย และมาตรฐานต่าง ๆ

## 2. การติดตามเฝ้าระวังการปนเปื้อนของสารมลพิษสู่สิ่งแวดล้อม

การติดตามเฝ้าระวังการปนเปื้อนของสารมลพิษสู่สิ่งแวดล้อม ทั้งด้านอุทกวิทยา ด้าน  
ปฐพีวิทยา ด้านอากาศ และด้านความปลอดภัยและสุขภาพอนามัยของคน มีแนวทางการดำเนินการดังนี้

### 2.1 ด้านอุทกวิทยา

2.1.1 ดำเนินการตรวจสอบคุณภาพน้ำเป็นประจำทุกเดือน โดยเก็บตัวอย่างน้ำทั้งใน  
บริเวณพื้นที่ทำเหมือง แอ่งแร่ และพื้นที่ใกล้เคียง จากนั้นรายงานผลการตรวจสอบให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง  
ทราบ พร้อมทั้งเก็บรวบรวมข้อมูลคุณภาพน้ำเป็นสถิติ เพื่อประโยชน์ในการเฝ้าระวังการปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำ

2.1.2 ดำเนินการตรวจสอบคุณภาพตะกอนดินในน้ำเป็นประจำทุกเดือน โดยเก็บ  
ตัวอย่างตะกอนดินทั้งในบริเวณพื้นที่ทำเหมือง แอ่งแร่ และพื้นที่ใกล้เคียง พร้อมทั้งเก็บรวบรวมข้อมูล  
คุณภาพตะกอนดินในน้ำเป็นสถิติ เพื่อประโยชน์ในการเฝ้าระวังการปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำ

### 2.2 ด้านปฐพีวิทยา

2.2.1 ตรวจสอบคุณภาพดินในพื้นที่โครงการและบริเวณพื้นที่เพาะปลูกใกล้เคียงเป็น  
ประจำทุกเดือน พร้อมทั้งเก็บรวบรวมข้อมูลและเปรียบเทียบสถิติ เพื่อประโยชน์ในการเฝ้าระวังการ  
ปนเปื้อน

2.2.2 ศึกษาและรวบรวมมาตรการลดปริมาณโลหะหนักในดิน ทั้งทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพ

## 2.3 ด้านอากาศ

2.3.1 ตรวจสอบปริมาณไซยาไนด์ในอากาศในบริเวณพื้นที่ที่พนักงานปฏิบัติงานอยู่เสมอ ด้วยการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนไซยาไนด์โดยใช้เครื่องมือแบบพกพา

2.3.2 จัดให้มีเครื่องมือตรวจวัดปริมาณไซยาไนด์ในอากาศแบบอัตโนมัติที่มีการส่งสัญญาณทั้งทางแสงและเสียง เพื่อเป็นสัญญาณเตือนภัยแก่ผู้ปฏิบัติงานในพื้นที่นั้น ๆ โดยเฉพาะบริเวณเหนือถังกวนไซยาไนด์

2.3.3 ตรวจสอบคุณภาพอากาศ เช่น ปริมาณฝุ่นทั้งหมด ฝุ่นโลหะหนัก ไซยาไนด์ และฝุ่นที่ตัวพนักงานเป็นประจำทุก 3 เดือน โดยเก็บตัวอย่างทั้งในบริเวณภายในและภายนอกพื้นที่โครงการ โดยเฉพาะบริเวณชุมชนที่อยู่ใต้ทิศทางลม พร้อมทั้งเก็บรวบรวมข้อมูลคุณภาพอากาศเป็นสถิติเปรียบเทียบอยู่เสมอ

2.3.4 จัดเตรียมมาตรการรองรับกรณีเกิดมีมลพิษทางอากาศเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วหรือคุณภาพอากาศมีความผิดปกติ

## 2.4 ด้านสุขภาพอนามัยและความปลอดภัย

2.4.1 พนักงานทุกคนที่เกี่ยวข้องกับการใช้ไซยาไนด์ต้องได้รับการฝึกอบรมในด้านต่างๆ เป็นอย่างดี เช่น ความเป็นพิษของไซยาไนด์หากเกิดการรั่วไหลขณะขนส่ง จัดเก็บ และกำจัด มาตรการด้านความปลอดภัย การป้องกันรักษาสุขภาพ การป้องกันรักษาสีแฉดล้อม กระบวนการทำงานที่เกี่ยวข้องกับไซยาไนด์และสารเคมีอื่นๆ และมาตรการป้องกันภัยกรณีเกิดเหตุการณ์ฉุกเฉิน

2.4.2 จัดให้มีการตรวจสุขภาพพนักงานเป็นระยะๆ เสมอ

2.4.3 จัดทำรายงานการตรวจสุขภาพและอุบัติเหตุให้ผู้รับผิดชอบ และเก็บรวบรวมรายงาน การขาด การลา การเจ็บป่วย อุบัติเหตุ และอื่นๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลศึกษาในการหามาตรการควบคุมป้องกันที่เหมาะสมต่อไป

2.4.4 ประชาสัมพันธ์ให้ความรู้แก่ชุมชนที่อยู่ในพื้นที่ใกล้เคียงกับโครงการ หรืออุปโภคบริโภคแหล่งน้ำสายเดียวกับโครงการที่มีการปล่อยน้ำทิ้งสู่ธรรมชาติ เกี่ยวกับผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยจากพิษของโลหะหนักและไซยาไนด์ พร้อมทั้งเสนอมาตรการปฏิบัติตน เพื่อป้องกันสารดังกล่าวเข้าสู่ร่างกาย

2.4.5 รณรงค์ให้ประชาชนในชุมชนมีส่วนร่วมในการติดตามตรวจสอบ การปล่อยทิ้งของเสียของโครงการ ให้เป็นไปตามกฎหมาย และมาตรฐานสากล

2.4.6 เสริมสร้างการมีส่วนร่วมโดยให้ประชาชนมีการเฝ้าระวังอาการพิษจากไซยาไนด์และโลหะหนัก โดยเฉพาะชุมชนในพื้นที่ที่มีความเสี่ยง



### 3. การแก้ไขปัญหาการปนเปื้อนของสารมลพิษในสิ่งแวดล้อม

การแก้ไขปัญหาการปนเปื้อนของสารมลพิษในสิ่งแวดล้อมจากการประกอบกิจการเหมืองแร่ทองคำ ควรมีการดำเนินการดังนี้

#### 3.1 ด้านอุทกวิทยา

3.1.1 ให้มีการเก็บขังน้ำและระบายน้ำจากการทำเหมืองในช่วงการผลิตแร่ ตลอดจนน้ำจากการหลากบนผิวดิน

3.1.2 ทำคันดินรอบขอบลานทิ้งดิน เพื่อดักน้ำฝนที่ไหลลงจากร่องรับน้ำสู่บ่อดักตะกอน ป้องกันการพังทลายของลานดินทิ้ง

3.1.3 จัดเตรียมแผนการป้องกัน กรณีเกิดเหตุการณ์เขื่อนกักเก็บกากแร่พังพวย เช่น

- ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบสิ่งแวดล้อม เช่น การซึมผ่านของทางแร่สู่ใต้น้ำและสันเขื่อน และรอยร้าวภายในเขื่อน

- ตรวจสอบและบำรุงรักษาเขื่อนอย่างสม่ำเสมอ

- ตรวจสอบระบบการระบายน้ำฝนให้สามารถระบายได้สะดวกและรวดเร็ว อย่างน้อยปีละ 1 ครั้ง

- สร้างสันเขื่อนเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มปริมาณความจุให้มากยิ่งขึ้น และช่วยชะลอการพังทลาย

3.1.4 จัดเตรียมมาตรการป้องกันแก้ไข กรณีเกิดการรั่วไหลของไซยาไนด์ โดยเริ่มจากการออกแบบสถานที่ การจัดเก็บ การบำรุงรักษา การติดตามประเมินผล และการจัดทำแผนป้องกันอุบัติเหตุ เพื่อลดผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นให้น้อยที่สุด

3.1.5 จัดเตรียมมาตรการดำเนินการที่ชัดเจน กรณีเกิดอุบัติเหตุและการพังทลายอย่างรวดเร็วและรุนแรง

#### 3.2 ด้านปฐพีวิทยา

3.2.1 จัดหามาตรการลดปริมาณการดูดซึมไซยาไนด์ของรากพืช เช่น การเติมแร่บางชนิดที่ช่วยให้เกิดการดูดซับไซยาไนด์ในดิน ลดการดูดซึมผ่านระบบรากของพืช หรือ การปลูกต้นไม้บางชนิดที่มีคุณสมบัติทนทานและสามารถดูดซึมโลหะและไซยาไนด์ได้เป็นอย่างดี โดยหลังการเก็บเกี่ยวก็จะนำไปกำจัดโดยการเผา

3.2.2 ก่อนสิ้นสุดโครงการ ควรนำเปลือกดินที่ได้จากการเปิดเหมืองมาปิดทับบริเวณที่ดินที่ถมเต็มแล้ว พร้อมทั้งปลูกต้นไม้โตเร็วหรือพืชคลุมดิน เพื่อลดการชะล้างตะกอนบริเวณที่ทิ้งดินจากน้ำฝน

3.2.3 จัดทำโซนนิ่งพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนไซยาไนด์ให้ชัดเจน เพื่อให้การบริหารจัดการสะดวก และปลอดภัย

3.2.4 นำเทคโนโลยีที่ทันสมัยมาใช้ในการจัดทำฐานข้อมูลแผนที่มลพิษ เช่น ระบบ GIS เพื่อการตัดสินใจที่ถูกต้องแม่นยำในการป้องกันแก้ไข

### 3.3 ด้านคุณภาพอากาศ

3.3.1 ดำเนินการลดปริมาณฝุ่นละอองจากการประกอบการให้มากที่สุด เพื่อลดการแพร่กระจายในอากาศ เช่น การฉีดพรมน้ำ หรือการใช้ช่องเหลวที่มีคุณสมบัติในการจับฝุ่นได้ดี ถ้าตรวจพบว่าปริมาณฝุ่นทั้งในและนอกสถานประกอบการมีความเข้มข้นสูงกว่ามาตรฐาน

3.3.2 กำจัดให้พนักงานสวมใส่อุปกรณ์ที่เหมาะสมทุกครั้ง ขณะการกำจัดฝุ่นหรือสารมลพิษในอากาศ

### 3.4 ด้านสุขภาพอนามัยและความปลอดภัย

#### 3.4.1 มาตรการระยะสั้น

3.4.1.1 กรณีตรวจพบว่า มีพนักงานได้รับสารพิษในระดับใกล้เคียงหรือสูงกว่ามาตรฐาน ให้ดำเนินการเปลี่ยนงานให้พนักงานไปทำงานในสิ่งแวดล้อมอื่นที่จะไม่เกี่ยวข้องกับสารพิษดังกล่าว

3.4.1.2 ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการปฏิบัติตนที่ถูกสุขลักษณะหรือการใช้อุปกรณ์อย่างถูกต้องแก่พนักงานและผู้เกี่ยวข้อง เพื่อลดความเสี่ยงในการสัมผัสสิ่งแวดล้อมที่อาจมีการปนเปื้อนของโลหะหนักทั้งในน้ำ ดิน และอาหาร

3.4.1.3 จัดหามาตรการควบคุมไม่ให้เกิดการปนเปื้อนจากโลหะหนักแพร่กระจายออกไป

3.4.1.4 ดำเนินการให้การรักษาแก่ผู้ที่ได้รับสารพิษและโลหะหนักในร่างกายอย่างเร่งด่วน

3.4.1.5 ประชาสัมพันธ์ให้ประชาชนที่อยู่ใกล้เคียงได้เข้าใจสภาพปัญหาและระดับความเสี่ยงอย่างถูกต้อง เพื่อไม่ให้เกิดความหวาดกลัว หรือวิตกกังวลมากเกินไป

3.4.1.6 จัดทำป้ายเตือนอย่างชัดเจนตามบริเวณใกล้สารพิษ และห้ามบุคคลที่ไม่เกี่ยวข้องเข้าใกล้

#### 3.4.2 มาตรการระยะยาว

3.4.2.1 ก่อนเริ่มดำเนินการโครงการ ควรประเมินผลกระทบต่อสุขภาพ เพื่อระบุความเสี่ยง ขนาดของผลกระทบ และการจัดการความเสี่ยง

3.4.2.2 เก็บตัวอย่างสิ่งแวดล้อมในบริเวณที่มีโอกาสเสี่ยงมาวิเคราะห์เป็นประจำ เพื่อเฝ้าระวังการปนเปื้อนอย่างต่อเนื่อง

3.4.2.3 จัดให้มีแผนการตรวจสุขภาพของประชาชนที่อาศัยอยู่ในพื้นที่เสี่ยงเป็นระยะ ๆ อย่างต่อเนื่อง เพื่อเฝ้าระวังผลกระทบต่อสุขภาพ

3.4.2.4 สร้างความเข้าใจเกี่ยวกับปัญหาความเสี่ยงแก่ประชาชนให้ถูกต้อง เพื่อประชาชนจะได้นำไปปรับเปลี่ยนพฤติกรรมให้เหมาะสมในการเผชิญและจัดการกับความเสี่ยง

## บทสรุป

ไซยาไนด์นอกจากจะเป็นสารเคมีที่พบได้ในธรรมชาติแล้ว มนุษย์ก็ยังสามารถสังเคราะห์ขึ้นได้ด้วย โดยไซยาไนด์ปริมาณน้อย ๆ ที่ปรากฏในธรรมชาติ มีแหล่งกำเนิดมาจาก แมลง แบคทีเรีย สาหร่าย และพืชต่าง ๆ ส่วนไซยาไนด์ที่สังเคราะห์ขึ้นจะนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ยารักษาโรค เครื่องประดับ วิตามิน อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ สารดับเพลิง เครื่องสำอาง สีย้อมผ้า สีทาบ้าน ยางสังเคราะห์ และเกลือ เป็นต้น ดังนั้นการนำไซยาไนด์มาใช้ในการอุตสาหกรรมจึงไม่ใช่เรื่องแปลกใหม่ แต่อย่างไรก็ดี ไซยาไนด์จัดเป็นสารพิษที่มีอันตรายสูง ถ้าได้รับสารนี้ในปริมาณที่มากพอก็อาจทำให้เสียชีวิตได้ ดังนั้นผู้ประกอบการจึงจำเป็นต้องมีระบบการจัดการด้านความปลอดภัย และสิ่งแวดล้อมที่ดี

ไซยาไนด์เป็นสารเคมีชนิดหนึ่งในจำนวนไม่กี่ชนิดที่สามารถละลายทองคำในน้ำได้ และได้รับความนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ทองคำ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการสกัดสูงและใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำ จึงสมเหตุผลทั้งทางด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ โดยไซยาไนด์เริ่มนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ทองคำตั้งแต่ปี 1887 จนกระทั่งปัจจุบัน โดยมีหลักการ คือ การชะล้างทองคำที่อยู่ในแร่ที่บดจนมีขนาดเล็กด้วยสารละลายไซยาไนด์ โมเลกุลของทองคำจะทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์ กลายเป็นสารเชิงซ้อนที่มีความเสถียรและละลายน้ำได้ จึงสามารถแยกออกจากของแข็งได้ จากนั้นใช้ถ่านกัมมันต์ดูดซับโมเลกุลสารเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับทองคำ เพื่อแยกทองคำออกแล้วทำให้บริสุทธิ์อีกครั้งด้วยเทคนิค electrowinning แต่เนื่องจากในกระบวนการสกัดทองคำ ไซยาไนด์สามารถทำปฏิกิริยากับโลหะอื่น ๆ ที่เป็นองค์ประกอบในแร่ เกิดเป็นสารเชิงซ้อนของไซยาไนด์ ซึ่งบางชนิดไม่อาจสลายตัวได้ง่าย และอาจทำให้เกิดการปนเปื้อนหรือสะสมในห่วงโซ่อาหาร นำไปสู่ปัญหาสุขภาพและสิ่งแวดล้อมต่อไป ดังนั้นการบำบัดของเสียที่เกิดขึ้นจึงไม่ใช่เพียงการกำจัดไซยาไนด์เท่านั้น แต่ยังต้องคำนึงถึงโลหะอื่น ๆ ที่เป็นองค์ประกอบในแร่อีกด้วย ซึ่งจากข้อมูลที่รวบรวมได้อาจกล่าวได้ว่าเทคนิคที่เหมาะสมในการกำจัดไซยาไนด์ สารเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะ และสารอื่นๆ ได้ในของเสียจากกระบวนการผลิตทองคำทั้งที่อยู่ในรูปของ slurry หรือสารละลาย คือ การบำบัดตามธรรมชาติหรือการใช้แสงอัลตราไวโอเลต Inco process และ iron precipitation แต่อย่างไรก็ตาม การเลือกวิธีการบำบัดไซยาไนด์ที่เหมาะสมก็ควรพิจารณาจากแหล่งแร่ที่นำมาสกัดทองคำเป็นสำคัญ สำหรับการตรวจวัดปริมาณไซยาไนด์สามารถตรวจสอบได้หลายวิธี แต่วิธีที่เหมาะสมและให้ผลการตรวจวิเคราะห์ที่ถูกต้องก็คือ การวิเคราะห์หาปริมาณ WAD cyanide ด้วยการกลั่น เนื่องจากสภาวะที่ใช้ในการตรวจสอบไม่รุนแรงนัก ทำให้ไม่มีการรบกวนจากสารอื่นๆ มากนัก อีกทั้ง WAD cyanide น่าจะเป็นตัวแปรที่บ่งถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้เป็นอย่างดี เนื่องจากไซยาไนด์ในกลุ่มนี้สามารถสลายตัวได้ในสภาวะที่เป็นกรดอ่อน ซึ่งเป็นสภาวะที่พบได้ในธรรมชาติทั่วไป การตรวจวิเคราะห์ไซยาไนด์ถือเป็นเรื่องสำคัญที่ละเลยไม่ได้ เนื่องจากจะเป็นตัวกำหนดว่าของเสียนั้น ๆ อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ปลอดภัยต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมหรือไม่ ซึ่งหากการตรวจวิเคราะห์มีความคลาดเคลื่อนสูงก็อาจนำไปสู่การตัดสินใจที่ผิดพลาดได้

การดำเนินการของอุตสาหกรรมเหมืองแร่ทองคำ หรือเหมืองอื่น ๆ ย่อมส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้นการจัดการเหมืองแร่ที่ดีจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่จะต้องมีการศึกษาและ

จัดทำแผนงานก่อนโครงการจะเริ่มดำเนินการ เพื่อขจัดปัญหาที่อาจเกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อมให้น้อยที่สุด โดยการจัดเตรียมมาตรการป้องกันแก้ไขผลกระทบสิ่งแวดล้อมให้ครอบคลุมทุกด้าน ได้แก่ ด้านอุทกวิทยา ด้านปฐพีวิทยา ด้านอากาศ และด้านสุขภาพอนามัยและความปลอดภัย โดยนอกจากการป้องกันแก้ไขแล้ว ผู้ประกอบการยังจะต้องดำเนินการติดตามตรวจสอบคุณภาพสิ่งแวดล้อมด้านต่างๆ เพื่อเฝ้าระวังปัญหา รวมทั้งประชาสัมพันธ์ให้ชุมชนที่อยู่ใกล้เคียงพื้นที่โครงการได้เข้าใจแนวทางการปฏิบัติตน เพื่อป้องกันอันตรายจากสารมลพิษที่เกิดจากการประกอบการ และร่วมติดตามเฝ้าระวังปัญหาสิ่งแวดล้อมไปพร้อมกับผู้ประกอบการ ทำให้การประกอบกิจกรรมเหมืองแร่ทองคำเป็นไปอย่างโปร่งใส รับผิดชอบต่อสังคม เป็นมิตรกับชุมชน และไม่สร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

## เอกสารอ้างอิง

- คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์, 2550, โครงการกำหนดมาตรฐานมลพิษและการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมเหมืองแร่และโลหกรรมชนิดแร่ทองคำ จังหวัดพิจิตรและเพชรบูรณ์, หน้า 9-1 ถึง 9-33.
- Environment Australia, 1998, Cyanide Management, viewed 21/03/2007, [http://www.natural-resources.org/minerals/cd/ea\\_cyan.htm](http://www.natural-resources.org/minerals/cd/ea_cyan.htm), p. 24-36.
- International Cyanide Management Institute, 2006a, Environmental and Health Effect of Cyanide, viewed 27/04/05, [http://www.cyanidecode.org/cyanide\\_use.php](http://www.cyanidecode.org/cyanide_use.php), 3 p.
- International Cyanide Management Institute, 2006b, Sampling and Analysis of Cyanide in Gold Mining Operations, viewed 17/03/2007, [http://www.cyanidecode.org/cyanide\\_sampling.php](http://www.cyanidecode.org/cyanide_sampling.php), 5 p.
- International Cyanide Management Institute, 2006c, Use of Cyanide in the Gold Industry, viewed on 19/07/2007, [http://www.cyanidecode.org/cyanide\\_use.php](http://www.cyanidecode.org/cyanide_use.php), 3 p.
- Logsdon, M.J., Hagelstein, K. and Mudder, T.I., 1999, THE MANAGEMENT OF CYANIDE IN GOLD EXTRACTION, INTERNATIONAL COUNCIL ON METALS AND THE ENVIRONMENT, Canada, April, 40 p.
- Massachusetts Department of Environmental Protection Bureau of Waste Site Cleanup, 2004, Quality Assurance and Quality Control Requirements and Performance Standards for SW-846 Method 9014, Total Cyanide and the MADEP Physiologically Available Cyanide (PAC) Protocol, viewed 05/05/2007, <http://www.mass.gov/dep/cleanup/laws/7000mcp.pdf>, 20 p.
- Mudder, T.I, Botz, M.M. and Smith, A., 2001, Chemistry and Treatment of Cyanidation Wastes, 2nd Edition, Mining Journal Books LTD, London, 373 p.
- The Mining Journal Limited, 2001, Mining Environmental Management: Cyanide treatment methods by Botz, M., Friary Press, London, Vol3, No.3, 44 p.
- Wikipedia, 2007, Hydrogen cyanide, viewed 17/03/2007, <http://www.wikipedia.org/wiki/hydrogencyanide>, 4 p.