

รายงานวิชาการ

ฉบับที่ สอพ.4/2547

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไซยาไนด์

CYANIDE INTRODUCTION

จตุรรัตน์ อาชวรัตน์ถาวร

สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน
กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่

อธิบดีกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่
นายอนุสรณ์ เนื่องผลมาก

ผู้อำนวยการสำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน
นายมณฑป วัลยะเพ็ชร

หัวหน้ากลุ่มเทคโนโลยีโลหวิทยา นายปราโมทย์ ภูพานทอง

จัดพิมพ์โดย

สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน
กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่
ถนนพระราม 6 เขตราชเทวี
กรุงเทพฯ ๑ 10400
โทรศัพท์ 0 2202 3616
โทรสาร 0 2202 3606

พิมพ์ครั้งที่ 1

มีนาคม 2547
จำนวน 10 เล่ม

ข้อมูลการลงรายการบรรณานุกรม

จุฑารัตน์ อาชวรัตน์ถาวร.

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไซยาไนด์ / โดยจุฑารัตน์ อาชวรัตน์ถาวร. --
กรุงเทพฯ ฯ : สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและ
การเหมืองแร่, 2546.

48 หน้า : ภาพประกอบ : ตาราง ; 30 ซม.

รายงานวิชาการ ฉบับที่ สอพ.4/2547

ISBN 974-91922-1-4

คำปรารภ

อุตสาหกรรมเป็นปัจจัยสำคัญต่อการขยายตัวทางเศรษฐกิจของประเทศแต่จากอดีตที่ผ่านมา อุตสาหกรรมของไทยยังไม่สามารถขยายตัวได้เท่าที่ควร เนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ หลายประการ แต่สำหรับในยุคโลกไร้พรมแดน ปัญหาหนึ่งที่ถูกหยิบยกขึ้นมาเป็นประเด็นทางการค้า คือ ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมอันเกิดจากกระบวนการผลิต และการบำบัดของเสียอย่างไม่ถูกวิธี กลายเป็นข้อกีดกันทางการค้าในตลาดโลก ยังผลให้อุตสาหกรรมของไทยไม่สามารถก้าวเข้าสู่เวทีการค้าโลกได้อย่างเต็มศักยภาพ

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ในฐานะที่มีหน้าที่ในการกำกับดูแลและให้การสนับสนุนส่งเสริมผู้ประกอบการให้สามารถดำเนินการได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ ได้เล็งเห็นและตระหนักถึงความสำคัญด้านสิ่งแวดล้อมและการพัฒนาอุตสาหกรรมให้เป็นอุตสาหกรรมสะอาดปลอดภัย และสามารถแข่งขันกับตลาดโลกได้ จึงได้ดำเนินการศึกษา เรื่อง “ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไซยาไนด์ (CYANIDE INTRODUCTION)” ขึ้น เพื่อประโยชน์ต่อผู้ประกอบการที่ต้องใช้ไซยาไนด์ในกระบวนการผลิตและผู้สนใจทั่วไป สามารถใช้ประโยชน์จากสารประกอบไซยาไนด์ได้อย่างปลอดภัย และไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่หวังเป็นอย่างยิ่งว่ารายงานวิชาการฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมของไทยได้เป็นอย่างดี

นายอนุสรณ์ เนื่องผลมาก

อธิบดีกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่

คำนำ

เมื่อก้าวถึงไซยาไนด์หลายคนอาจมีความรู้สึกว้าหวายไนด์เป็นสารพิษอันตรายต่อมนุษย์และสัตว์ และยังเป็นสารเคมีที่สามารถพบได้ทั่วไปในชีวิตประจำวัน ทำให้มนุษย์และสัตว์มีโอกาสสัมผัสไซยาไนด์ได้อยู่เสมอ แม้ว่าไซยาไนด์จะถูกจัดเป็นสารพิษแต่ก็เป็นสารเคมีที่มีประโยชน์นานัปการ ดังนั้นเพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์จากไซยาไนด์ได้อย่างปลอดภัย รายงานวิชาการฉบับนี้จึงถูกจัดทำขึ้นเพื่อเป็นสื่อให้ผู้ประกอบการได้ใช้ไซยาไนด์อย่างรู้เท่าทัน โดยคำนึงถึงอันตรายที่อาจเกิดกับพนักงาน ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม และการติดตามตรวจสอบระบบบำบัดของเสียที่มีการปนเปื้อนของไซยาไนด์ ให้สามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามผู้บริโภคไม่ควรตื่นตระหนกถึงอันตรายจากการใช้ไซยาไนด์มากเกินไป เนื่องจากในธรรมชาติมีกลไกการปรับสมดุลอยู่ตลอดเวลาหากของเสียที่เกิดขึ้นมีปริมาณไม่มากเกินไป

รายงานวิชาการฉบับนี้จะกล่าวถึงประวัติความเป็นมา สมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพ การบำบัดของเสียที่มีการปนเปื้อนของไซยาไนด์ การติดตามตรวจสอบวิเคราะห์ปริมาณไซยาไนด์ รวมถึงความเป็นพิษและการรักษาผู้ได้รับพิษจากไซยาไนด์ในเบื้องต้น ซึ่งได้รวบรวมข้อมูลที่เผยแพร่ทางอินเทอร์เน็ตจากหลายหน่วยงาน และผู้ทรงคุณวุฒิที่ได้กรุณาเอื้อเฟื้อข้อมูล เพื่อเป็นประโยชน์แก่ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมที่ผลิตหรือใช้ไซยาไนด์เป็นวัตถุดิบ ผู้ที่มีหน้าที่กำกับดูแลความปลอดภัยและผู้สนใจทั่วไป ทั้งนี้ได้รวบรวมและเรียบเรียงข้อมูลทั้งหมดเพื่อให้สามารถเข้าใจได้ง่ายขึ้นและนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

จุฑารัตน์ อชวรรัตน์ถาวร

คำขอบคุณ

ดิฉันขอขอบคุณ ดร.มณฑป วัลยะเพ็ชร ผู้อำนวยการสำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน ด้วยความเคารพอย่างยิ่ง และขอขอบคุณ นายปราโมทย์ ภูพานทอง หัวหน้ากลุ่มเทคโนโลยีโลหวิทยา นางนันทนา กัญยานุวัฒน์ นางดวงกมล สุริยฉัตร ดร.สาธิต เทอดเกียรติกุล นายธีรรุจ ตันนุกิจ และ นายรัชชัย ยงเนตร ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Dr. Terry Mudder ที่ได้เอื้อเพื่อข้อมูลที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำรายงานวิชาการฉบับนี้

สารบัญ

คำปรารภ.....	III
คำนำ.....	IV
คำขอบคุณ.....	V
บทนำ.....	1
1. แหล่งกำเนิดไซยาไนด์.....	1
2. ประวัติการสังเคราะห์ไซยาไนด์.....	2
3. การใช้สารประกอบไซยาไนด์ในอุตสาหกรรมต่างๆ.....	3
สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของไซยาไนด์.....	5
1. ประเภทของสารประกอบไซยาไนด์ (Cyanide Species).....	5
1.1 Free Cyanide.....	5
1.2 Simple Cyanide.....	6
1.3 Complex Cyanide.....	6
1.4 Total Cyanide.....	7
1.5 Cyanide Related Compound.....	7
2. สถานะของสารประกอบไซยาไนด์.....	8
2.1 สถานะของแข็ง.....	8
2.2 สถานะของเหลว.....	8
2.3 สถานะก๊าซ.....	9
3. เสถียรภาพของสารประกอบไซยาไนด์.....	10
3.1 เสถียรภาพของ Free Cyanide.....	10
3.2 เสถียรภาพของ Simple Cyanide.....	11
3.3 เสถียรภาพของ Complex Cyanide.....	11
4. ไซยาไนด์ในสิ่งแวดล้อม.....	11
4.1 การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนไซยาไนด์ (Complexation).....	11
4.2 การตกตะกอนเกลือไซยาไนด์ (Precipitation).....	11
4.3 การดูดซับสารประกอบไซยาไนด์ (Adsorption).....	12
4.4 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation).....	12
4.5 การเกิดไทโอไซยาเนต (Thiocyanate).....	12
4.6 การระเหยของไฮโดรเจนไซยาไนด์ (Volatilization).....	12
4.7 กระบวนการสลายตัวทางชีวภาพ (Biodegradation).....	12
4.8 การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis).....	12

การบำบัดไซยาไนด์.....	13
1. กระบวนการสลายตัวโดยธรรมชาติ.....	13
2. วิธีการทางกายภาพ.....	13
2.1 การเจือจาง.....	13
2.2 การผ่านเยื่อ.....	14
2.3 Electrowining.....	14
2.4 Hydrolysis/Distillation.....	14
3. วิธีการผสมผสาน.....	15
3.1 Acidification/Volatilization/Reneutralization (AVR or Mills-Crowe process).....	15
3.2 Metal Addition.....	16
3.3 Flotation.....	16
3.4 Solvent Extraction.....	17
4. วิธีการดูดซับ.....	17
4.1 แร่.....	17
4.2 ถ่านกัมมันต์.....	17
4.3 เรซิน.....	18
5. วิธีการออกซิเดชัน.....	18
5.1 Bio-Oxidation.....	18
5.2 Catalysis.....	20
5.3 Electrolysis.....	20
5.4 Chemical Addition.....	21
5.5 Photolysis.....	26
ความเป็นพิษของไซยาไนด์.....	29
1. ความเป็นพิษของไซยาไนด์.....	29
1.1 ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน.....	29
1.2 ความเป็นพิษแบบเรื้อรัง.....	30
2. ปัจจัยที่มีผลต่อระดับความเป็นพิษของไซยาไนด์.....	30
2.1 ความสามารถในการแตกตัวของสารประกอบไซยาไนด์.....	30
2.2 ความเข้มข้นของสารประกอบไซยาไนด์และวิธีการได้รับพิษ.....	31
2.3 ปัจจัยอื่นๆ.....	31
3. กลไกการเกิดพิษของไซยาไนด์.....	32
4. กลไกการกำจัดไซยาไนด์ของร่างกาย.....	33
4.1 กลไกการป้องกันไซยาไนด์เข้าสู่เซลล์ของร่างกาย.....	33
4.2 กลไกการกำจัดไซยาไนด์ภายในเซลล์ของร่างกาย.....	35

5. ผลกระทบของไซยาไนด์ต่อสิ่งมีชีวิต.....	36
5.1 ผลกระทบต่อมนุษย์.....	36
5.2 ผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ.....	37
5.3 ผลกระทบต่อนก.....	37
5.4 ผลกระทบต่อพืช.....	37
5.5 ผลกระทบต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม.....	38
6. มาตรฐานสากล.....	38
6.1 ค่ามาตรฐานไซยาไนด์.....	38
6.2 ค่ามาตรฐานสารประกอบไซยาไนด์รูปอื่น.....	39
7. การปฐมพยาบาลและการรักษาผู้ได้รับพิษไซยาไนด์.....	41
7.1 การเคลื่อนย้ายผู้ป่วย.....	41
7.2 การปฐมพยาบาล.....	41
7.3 การรักษาเฉพาะทาง.....	41
แนวทางการปฏิบัติเพื่อความปลอดภัยในการใช้ไซยาไนด์.....	44
บทวิจารณ์เกี่ยวกับการใช้ประโยชน์สารประกอบไซยาไนด์.....	45
บทสรุป.....	46
บรรณานุกรม.....	47

สารบัญญรูป

1. ความเข้มข้นของไซยาไนด์อิสระและไฮโดรเจนไซยาไนด์ที่ pH ต่าง ๆ.....	5
2. ประเภทของสารประกอบไซยาไนด์ในสภาวะต่าง ๆ.....	9
3. การสังเคราะห์ ATP.....	33
4. การขัดขวางการสร้าง ATP ของไซยาไนด์.....	33
5. กลไกการป้องกันไซยาไนด์เข้าสู่เซลล์ของเมทฮีโมโกลบิน.....	34
6. กลไกการกำจัดไซยาไนด์ของไทโอซัลเฟต.....	34

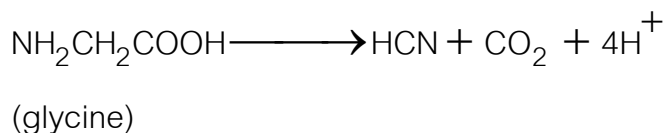
สารบัญญตาราง

1. ค่าความเสถียร (Stability Constant: log K) ของสารประกอบไซยาไนด์.....	10
2. ความเป็นพิษของสารประกอบไซยาไนด์.....	32
3. ความเข้มข้นของไซยาไนด์ที่ก่อให้เกิดพิษต่อสิ่งมีชีวิต.....	39

บทนำ

1. แหล่งกำเนิดไซยาไนด์ (Newmont, Online 2002)

ไซยาไนด์ (Cyanide) เป็นชื่อเรียกกลุ่มสารประกอบที่ประกอบด้วย คาร์บอน (Carbon: C) 1 อะตอมและไนโตรเจน (Nitrogen: N) 1 อะตอม ซึ่งมีหลายชนิด เป็นสารเคมีที่สามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติ อาจเกิดจากการทำปฏิกิริยาของสารเคมีต่างๆในธรรมชาติ หรือจากการขับถ่ายของเสีย หรือ จากการสลายตัวของสารประกอบบางชนิดในธรรมชาติโดยจุลินทรีย์พืชและสัตว์ มีพืชอย่างน้อยกว่า 1,000 ชนิดและจุลินทรีย์มากกว่า 90 สายพันธุ์ที่สามารถสังเคราะห์ไซยาไนด์ได้ ไซยาไนด์ที่ได้จากจุลินทรีย์จะเกิดจากการย่อยสลาย Glycine โดยการกระตุ้นของ Methionine หรือ Methyl group donor อื่นๆ



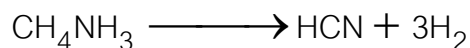
และมีพืชชั้นสูงกว่า 800 ชนิดรวมถึงพืชผลทางการเกษตรที่มีไซยาไนด์เป็นองค์ประกอบ (Cyanogenic) เช่น มันสำปะหลัง ข้าวฟ่าง ต้นไม้ ข้าวโพด อัลมอนต์และฝ้าย เป็นต้น พืชที่สามารถสังเคราะห์ Cyanoglycoside ได้ เมื่อเกิดการย่อยสลายก็จะทำให้เกิดไซยาไนด์ (Cyanogenesis) ส่วนสัตว์จำพวกแมลงหลายชนิด เช่น ตะขาบ กิ้งกือ แมลงปีกแข็ง ผีเสื้อราตรี และ ผีเสื้อ เป็นต้น สามารถสร้างไซยาไนด์และปล่อยออกมาเพื่อป้องกันอันตรายจากศัตรู นอกจากนี้ในร่างกายของมนุษย์ยังมีไซยาไนด์อยู่ในส่วนต่างๆ เช่น ในน้ำลายมีไทโอไซยาเนท 0.217 กรัมต่อลิตรขึ้นไป ในปัสสาวะอาจมีไทโอไซยาเนทได้ถึง 0.006 กรัมต่อลิตร และน้ำย่อยในกระเพาะอาหารมีไทโอไซยาเนท 0.007 กรัมต่อลิตรขึ้นไป รวมถึงวิตามินบี 12 ก็มีไซยาไนด์เป็นองค์ประกอบ (Cyanocobalamin : $\text{C}_{63}\text{H}_{88}\text{O}_{14}\text{N}_{14}\text{PCo}$) อย่างไรก็ตามแหล่งกำเนิดความเป็นพิษของไซยาไนด์ที่สำคัญมิได้เกิดจากธรรมชาติ เนื่องจากไซยาไนด์ที่เกิดขึ้นมีความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ ส่วนใหญ่เกิดจากกิจกรรมต่างๆของมนุษย์ เช่น การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ท่อไอเสียรถยนต์ และควันทูบหรี่ และนอกจากนี้ยังพบว่าผลิตภัณฑ์หลายชนิดมีไซยาไนด์เป็นส่วนประกอบ เช่น กาแฟ เกลือ สีทาบ้าน และยารักษาโรคหลายชนิด เช่น Laetrile (ยารักษาโรคมะเร็ง ซึ่งเตรียมจากเมล็ดแอปเปิ้ล) และ Sodium Nitroprusside (ยาลดความดัน) ซึ่งจะปล่อยไซยาไนด์ออกมาโดยกระบวนการเผาผลาญสารอาหารในร่างกาย

2. ประวัติการสังเคราะห์ไซยาไนด์

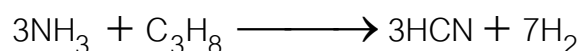
ต้นศตวรรษที่ 18 J.C.Dippel และ H.Diesbach ได้ทำการทดลอง โดยการให้ความร้อนกับเลือดด้วย Potassium Carbonate และ Green Vitrol (Iron Sulfate) ได้สารสีน้ำเงิน เรียกว่า "Berlin Blue" หรือ "Prussian Blue" ต่อมาปี 1782 นักเคมีชาวสวีเดน Karle Scheele ได้ทำการทดลองโดยการให้ความร้อนกับ Prussian Blue ด้วยกรดซัลฟูริกเจือจาง ได้ก๊าซติดไฟ ละลายน้ำได้ และให้ฤทธิ์เป็นกรด ชื่อ "Berlin Blue acid" หรือ "Prussian acid" จนถึงปัจจุบันเรียกรวมกันว่า "Hydrogen Cyanide" ซึ่งนับได้ว่า Karle Scheele เป็นนักวิทยาศาสตร์คนแรกที่สามารถสังเคราะห์ไฮโดรเจนไซยาไนด์ได้สำเร็จ คำว่า "Cyanide" เป็นคำที่มาจากคำว่า "Kyanos" ในภาษากรีก หมายถึง สีน้ำเงิน หรือ สีฟ้า หลังการค้นพบไฮโดรเจนไซยาไนด์ได้ 4 ปี Karle Scheele ก็เสียชีวิตเนื่องจากได้รับพิษจากไฮโดรเจนไซยาไนด์ในห้องปฏิบัติการ เริ่มมีการผลิตโซเดียมไซยาไนด์ (Sodium Cyanide) ครั้งแรกในปี 1834 โดยการให้ความร้อนกับ Prussian Blue และ Sodium Carbonate แล้วสกัดโซเดียมไซยาไนด์ด้วยแอลกอฮอล์เย็น (Tamura, Online 2002)

ปัจจุบันมีผู้ผลิตไซยาไนด์ที่สำคัญ 3 ราย คือ Dupont (USA), Degussa (Germany) และ ICI (England) โดยกระบวนการผลิตไฮโดรเจนไซยาไนด์ในเชิงพาณิชย์ทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่ได้รับความนิยม ได้แก่ (MacDonald, Online 2002)

- **Blausure–Methane–Ammoniak Process**

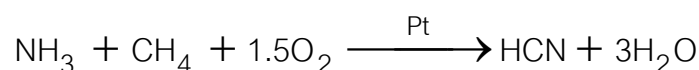


- **Shawinigan Process**



กระบวนการ Shawinigan Process เป็นปฏิกิริยาที่เป็นผลพลอยได้ (By product) จากการสังเคราะห์ Acrylonitrile มีการใช้กระบวนการนี้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจนไซยาไนด์ประมาณ 23% ของการผลิต

- **Andrussaw Process**



กระบวนการนี้เป็นการผลิตไฮโดรเจนไซยาไนด์โดยวิธีตรงค่อนข้างได้รับความนิยม ประมาณ 77% ของการผลิตไฮโดรเจนไซยาไนด์จะใช้กระบวนการนี้

การผลิตโซเดียมไซยาไนด์ (Sodium Cyanide: NaCN) ที่นิยมใช้ในเชิงพาณิชย์ มี 2 วิธี คือ

- การทำปฏิกิริยากันระหว่างโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium Carbonate : Na_2CO_3) กับ คาร์บอน (Carbon: C) และแอมโมเนีย (Ammonia: NH_3) และให้ไฮโดรเจนไซยาไนด์ทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide : NaOH)
- การให้ความร้อนกับโซเดียมเอไมด์ (Sodium Amide : NaNH_2) กับ คาร์บอน หรือ โดยการหลอมโซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride : NaCl) และแคลเซียมไซยานาไมด์ (Calcium Cyanamide : CN_2Ca) เข้าด้วยกันในเตาหลอมไฟฟ้า

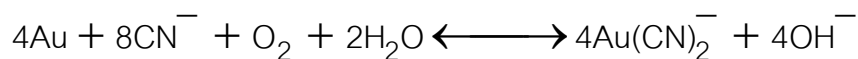
ปัจจุบันการผลิตโซเดียมไซยาไนด์ทำได้โดยการให้ไฮโดรเจนไซยาไนด์ทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้วระเหยน้ำออก

3. การใช้สารประกอบไซยาไนด์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ

ไซยาไนด์และไฮโดรเจนไซยาไนด์เป็นสารเคมีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในแต่ละปีมีการผลิตไฮโดรเจนไซยาไนด์ประมาณ 1.4 ล้านตัน ประมาณ 13% ของการผลิตใช้ในอุตสาหกรรมเหมืองทองคำ และประมาณ 87% ใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น การผลิตพลาสติก กาว สารทนไฟ เครื่องสำอาง ยารักษาโรค และอุตสาหกรรมเหล็ก (Steel Hardening) หรือ แม้แต่การใช้ไซยาไนด์เป็นอาวุธในสงครามโลกครั้งที่สอง และต่อมายังนำมาใช้ในการประหารชีวิตนักโทษในสหรัฐอเมริกา เป็นต้น (International Cyanide Management Code, Online 2002)

การแยกสกัดทองคำสามารถทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีทางกายภาพและวิธีการทางเคมี ซึ่งต้องเลือกใช้ตามความเหมาะสมกับองค์ประกอบของสินแร่ เช่น การอาศัยหลักการของความถ่วงจำเพาะของโลหะทองคำ (Gravity Process) การใช้ปรอทจับทอง (Amalgamation) ซึ่งเป็นวิธีการที่เก่าแก่ที่สุด และสามารถแยกสกัดทองคำได้เพียง 60% นอกจากนี้ปรอทยังจัดเป็นสารพิษอันตราย ปัจจุบันจึงไม่ได้รับความนิยม การใช้คลอรีน (Chlorination) กับสินแร่ทองที่ไม่สามารถใช้สองวิธีดังกล่าวข้างต้นได้ นับเป็นวิธีการที่ค่อนข้างได้รับความสนใจในการพัฒนาปรับปรุงให้สามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัย เนื่องจากอัตราการละลายทองในสินแร่สูงมากและคลอรีนก็มีราคาถูก นอกจากนี้ยังมีสารเคมีอีกหลายชนิดที่สามารถละลายทองจากสินแร่ได้ เช่น Bromine Thiourea Thiosulfate Thiocyanate Organic Nitrile และ Malononitrile เป็นต้น สารเคมีบางชนิดไม่มีการนำมาใช้ในกระบวนการแยกสกัดทองคำแล้ว เนื่องจากมีความเป็นพิษสูง เช่น Aqua Regia (Hydrochloric+Nitric) และ Selenic Acid (H_2SeO_4) และสารเคมีหลายชนิดก็มิได้มีการนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ด้วยเหตุผลหลายประการ เช่น ไทโอยูเรีย จัดเป็นสารก่อมะเร็ง จึงไม่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้และสลายตัวได้ง่าย (Kuzugudenli *et. al.*, Online 1999)

ปี 1806 Hagen ค้นพบว่าทองคำสามารถละลายได้ในสารละลายไซยาไนด์ จนกระทั่งปี 1887 J.S.MacArthur ได้พัฒนากระบวนการแยกสกัดทองคำด้วยสารละลายไซยาไนด์ นับว่ามีการนำไซยาไนด์มาใช้ในอุตสาหกรรมเหมืองทองคำมานานกว่า 100 ปี โดยมีปฏิกิริยาเคมีดังสมการของ Elsner's equation



มากกว่า 90%ของการผลิตทองคำทั่วโลกในแต่ละปีใช้ไซยาไนด์แยกสกัดทองคำออกจากสินแร่ แม้ว่าจะมีสารเคมีหลายชนิดที่สามารถใช้แยกสกัดทองคำได้ แต่ด้วยปัจจัยหลายประการ เช่น ความเป็นพิษ ประสิทธิภาพการละลายทอง และต้นทุนการผลิต ทำให้ไซยาไนด์เป็นสารเคมีที่ได้รับความนิยมสูงสุดในการแยกสกัดทอง (Cyanidation) ในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงถึง 90% แม้ว่าไซยาไนด์จะมีความเป็นพิษสูงแบบเฉียบพลัน แต่ไม่จัดเป็นสารก่อมะเร็ง ดังนั้นหากมีการจัดการที่ดี เริ่มตั้งแต่การขนย้าย การนำมาใช้ การใช้ไซยาไนด์ในปริมาณที่พอเหมาะให้เกิดของเสียที่มีไซยาไนด์ปนเปื้อนน้อยที่สุด และการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตอย่างมีประสิทธิภาพ การใช้ไซยาไนด์น่าจะเป็นวิธีการที่ดีที่สุดในปัจจุบันทั้งในเชิงเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเป็นสารเคมีที่ราคาไม่แพง และสามารถสลายตัวได้ง่าย โดยมีกลไกทางธรรมชาติที่ทำหน้าที่บำบัดควบคุมกับระบบบำบัดของเสียที่มีประสิทธิภาพ ปัจจัยสำคัญที่ทำให้ไซยาไนด์ (Total Cyanide) ในของเสียนั้นมีปริมาณสูง คือ เหล็กในสินแร่ ทำให้เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของเหล็กไซยาไนด์ นอกจากนี้โลหะอื่นในสินแร่เป็นสารมลทินแย่งทองจับไซยาไนด์ เช่น สังกะสี ทองแดง และนิกเกิล ทำให้ต้องใช้ไซยาไนด์ในปริมาณที่มากกว่าที่ควรเป็น ดังนั้นก่อนเข้าสู่กระบวนการแยกสกัดทองคำ ควรมีทำ Pre-Treatment สินแร่ เช่น การย่างแร่ เพื่อไล่กำมะถัน หรือการทำ Bio-Oxidation ด้วยแบคทีเรียที่ใช้สารประกอบซัลเฟอร์เป็นแหล่งพลังงาน และวิธีการอื่นๆ ตามความเหมาะสมของสินแร่และสารที่เป็นมลทินในสินแร่ ส่วนวิธีที่กำลังได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน คือ การละลายสินแร่ซัลไฟด์ด้วยจุลชีพ (Bioleaching) เนื่องจากเป็นวิธีการที่ปลอดภัยเหมาะสมสำหรับกรณีที่เป็นแร่เกรดต่ำ ไม่ต้องใช้พลังงาน และที่สำคัญไม่ปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์สู่บรรยากาศ แต่ข้อด้อยสำหรับวิธีการนี้ คือ อัตราการละลายทองค่อนข้างต่ำ และยังไม่มีการพัฒนาเพื่อนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตโลหะทองคำอย่างคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ ปัจจุบันที่มีการนำจุลชีพมาใช้นั้นอยู่ในลักษณะของ Bio-Oxidation ซึ่งเป็นการทำ Pre-Treatment เพื่อเตรียมแร่ก่อนเข้าสู่กระบวนการอื่นๆต่อไป (Avraamides, 1982:374-378; Utah Mining Association, Online 2001)

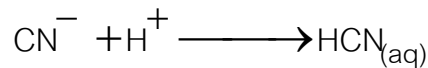
สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของไซยาไนด์

1. ประเภทของสารประกอบไซยาไนด์

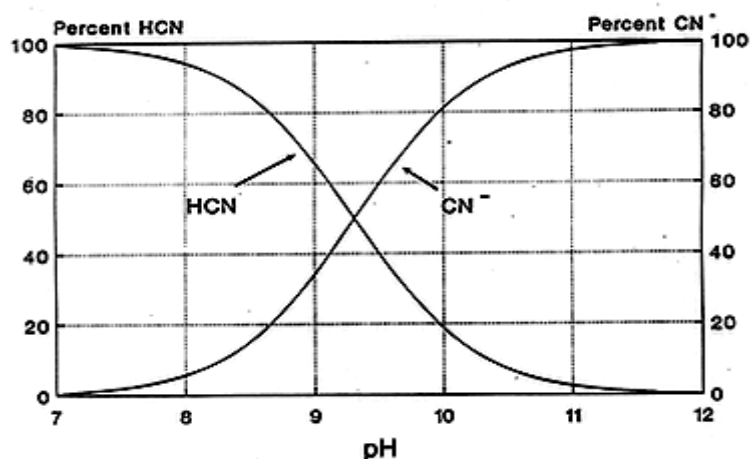
ไซยาไนด์ หมายถึง สารประกอบที่ประกอบด้วยคาร์บอน 1 อะตอมและไนโตรเจน 1 อะตอม ซึ่งมีหลายชนิด สามารถแบ่งสารประกอบดังกล่าว เป็น 5 กลุ่มหลัก ได้ดังนี้

1.1 Free Cyanide (Moran, Online 2000)

Free Cyanide หมายถึง ไซยาไนด์อิสระซึ่งอยู่ในรูปไซยาไนด์ ไอออน (Cyanide ion: CN^-) และ ไฮโดรเจนไซยาไนด์ (Hydrogen cyanide: HCN) ทั้งที่อยู่ในรูปของสารละลายและก๊าซ



ที่ pH 9.3-9.5 ไซยาไนด์ ไอออน และไฮโดรเจนไซยาไนด์จะอยู่ในภาวะสมดุล ถ้า pH 11 สารละลายจะอยู่ในรูปไซยาไนด์ไอออนมากกว่า 99% แต่ถ้า pH 7 สารละลายจะอยู่ในรูปไฮโดรเจนไซยาไนด์มากกว่า 99% แม้ว่าไฮโดรเจนไซยาไนด์จะละลายน้ำได้ แต่ถ้าอุณหภูมิและความเค็มเพิ่มขึ้น จะทำให้ความสามารถในการละลายน้อยลง



ที่มา : Botz (2001)

รูปที่ 1 ความเข้มข้นของไซยาไนด์อิสระและไฮโดรเจนไซยาไนด์ที่ pH ต่าง ๆ

1.2 Simple Cyanide (Barnes et. al., Online 2000)

Simple Cyanide หมายถึง สารประกอบโลหะไซยาไนด์อยู่ในรูปของเกลือไซยาไนด์ ซึ่งแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ตามความสามารถในการละลาย ได้แก่

1.2.1 Soluble Simple Cyanide Complex

Soluble Simple Cyanide Complex เป็นสารประกอบไซยาไนด์ที่สามารถละลายน้ำได้ง่าย โดยมีโลหะหมู่ 1 และ 2 เป็นองค์ประกอบ เช่น โซเดียมไซยาไนด์ (Sodium Cyanide: NaCN), โพแทสเซียมไซยาไนด์ (Potassium Cyanide: KCN), แคลเซียม (Calcium Cyanide: Ca (CN)₂) และรวมถึงปรอท (Mercury Cyanide: Hg(CN)₂) ด้วย เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวให้ Free Cyanide ที่มีความเป็นพิษสูง

1.2.2 Insoluble Simple Cyanide Complex

Insoluble Simple Cyanide Complex เป็นสารประกอบไซยาไนด์ที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้ยาก โดยมีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบ เช่น สังกะสี (Zinc Cyanide: Zn(CN)₂), ทองแดง (Copper Cyanide: CuCN), นิกเกิล (Nickel Cyanide: Ni(CN)₂) และเงิน (Silver Cyanide: AgCN)

1.3 Complex Cyanide (Barnes, Online 2000)

Complex Cyanide หมายถึง สารประกอบไซยาไนด์เชิงซ้อนกับโลหะอื่นๆ เช่น สังกะสี ทองแดง และ แคดเมียม เป็นต้น ซึ่งแบ่งเป็น 3 กลุ่ม ตามความสามารถในการแตกตัว (Dissociation) ดังนี้

1.3.1 Weak Acid Dissociable Cyanide

Weak Acid Dissociable Cyanide (WAD Cyanide) เป็นกลุ่มสารประกอบไซยาไนด์ที่สามารถแตกตัวได้ปานกลางถึงง่าย เมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรดอ่อน เช่น Zn(CN)₄²⁻, Cd(CN)₄²⁻ และ Cd(CN)₃⁻

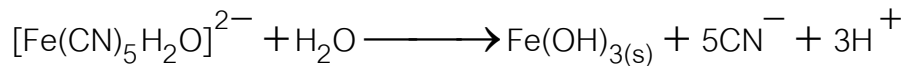
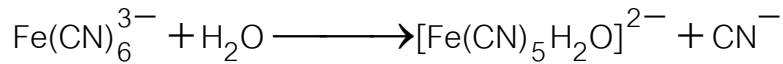
1.3.2 Moderately Strong Acid Dissociable Cyanide

Moderately Strong Acid Dissociable Cyanide เป็นสารประกอบไซยาไนด์ที่สามารถแตกตัวได้บ้างเล็กน้อยเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรดอ่อน เช่น Cu(CN)₂⁻, Cu(CN)₃²⁻, Ni(CN)₄²⁻ และ Ag(CN)₂⁻

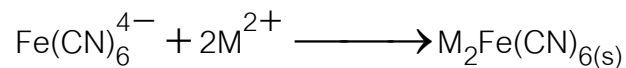
1.3.3 Strong Acid Dissociable Cyanide

Strong Acid Dissociable Cyanide (SAD Cyanide) เป็นสารประกอบไซยาไนด์ที่สามารถแตกตัวได้ยากเมื่ออยู่ในสภาพที่เป็นกรดที่อุณหภูมิห้อง แต่สามารถแตกตัวได้ดีขึ้นเมื่ออยู่ในสภาพที่เป็นกรดแก่และอุณหภูมิสูงขึ้น เช่น Fe(CN)₆⁴⁻, Fe(CN)₆³⁻, Co(CN)₆⁴⁻ และ Au(CN)₂⁻

แม้ว่า Hexacyanoferrate (II) ion $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ และ Hexacyanoferrate (III) ion $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$ จะอยู่ในสภาพที่ค่อนข้างเสถียร แต่สามารถแตกตัวให้ Free Cyanide ได้เมื่อได้รับแสงอัลตราไวโอเล็ตโดยตรง



สารประกอบในกลุ่มนี้เมื่อรวมตัวกับโลหะอีกตัวหนึ่ง (Double Metallocyanide Complex) จะเกิดตะกอนของสารประกอบเชิงซ้อน



ถ้าโลหะดังกล่าวเป็นโลหะอัลคาไลน์ เช่น $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ ตะกอนที่เกิดขึ้นจะละลายน้ำได้ อาจเกิดการแตกตัวให้ไซยาไนด์อิสระได้ แต่ถ้าเป็นโลหะหนัก เช่น $\text{Cu}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ ตะกอนที่เกิดขึ้นจะไม่ละลายน้ำ

1.4 Total Cyanide

Total Cyanide หมายถึง สารประกอบทุกตัวที่มีไซยาไนด์ไอออนเป็นองค์ประกอบ ทั้งที่แตกตัวง่ายและแตกตัวยาก ซึ่งไม่รวมไซยาเนท (Cyanate: CNO^-) และไทโอไซยาเนท (Thiocyanate: SCN^-)

1.5 Cyanide Related Compound

สารประกอบที่เกี่ยวข้องกับไซยาไนด์มีหลายชนิดอาจเกิดจากกระบวนการบำบัดไซยาไนด์หรืออาจเกิดจากการทำปฏิกิริยากับสารอื่นในธรรมชาติ ทำให้เกิดสารประกอบต่างๆ เช่น

1.5.1 Cyanate (CNO^-)

Cyanate เป็นสารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารละลายไซยาไนด์กับสารออกซิแดนท์ (Oxidizing Reagent) เช่น คลอรีน (Chlorine: Cl_2), ไฮโปคลอไรต์ (Hypochlorite: ClO^-), โอโซน (Ozone: O_3) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide: H_2O_2) ซึ่งจะถูกละลาย (Hydrolyze) กลายเป็นแอมโมเนีย (Ammonia: NH_3) และคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide: CO_2)

1.5.2 Thiocyanate (SCN^-)

Thiocyanate เป็นสารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารละลายไซยาไนด์ (Cyanide) กับไทโอซัลเฟต (Thiosulphate) หรือ ซัลไฟด์ อีออน (Sulfide ion) และสามารถ

แตกตัวได้ในกรดอ่อน แต่เป็นพิษน้อยกว่าไซยาไนด์ถึง 7 เท่า ไทโอไซยาเนทจะถูกออกซิไดซ์ (Oxidize) กลายเป็นคาร์บอเนต (Carbonate: CO_3^{2-}), ซัลเฟต (Sulfate: SO_4^{2-}) และ แอมโมเนีย (Ammonia: NH_3)

1.5.3 Cyanogen Chloride (CICN)

Cyanogen Chloride เป็นสารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารละลาย ไซยาไนด์กับไฮโปคลอไรต์ (Intermediate Compound) จากนั้นก็จะกลายเป็นไซยาเนท

1.5.4 Chloramine (NH_2Cl)

Chloramine เป็นสารประกอบที่เกิดจากการบำบัดไซยาไนด์ด้วยวิธี Alkaline Chlorination เป็นพิษน้อยกว่าไซยาไนด์แต่มีพบในปริมาณค่อนข้างสูง

1.5.5 Cyanogen (NC-CN)

Cyanogen จะเกิดในสภาพที่เป็นกรดเมื่อทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์ (Oxidizing Reagent)

1.5.6 Nitrate และ Ammonia

ไนเตรท (Nitrate: NO_3^-) และ แอมโมเนีย (Ammonia: NH_3) เป็นสารที่เกิดจากการสลายตัวของสารประกอบต่าง ๆ ข้างต้น ถ้ามีความเข้มข้นสูง ก็จะเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ

2. สถานะของสารประกอบไซยาไนด์

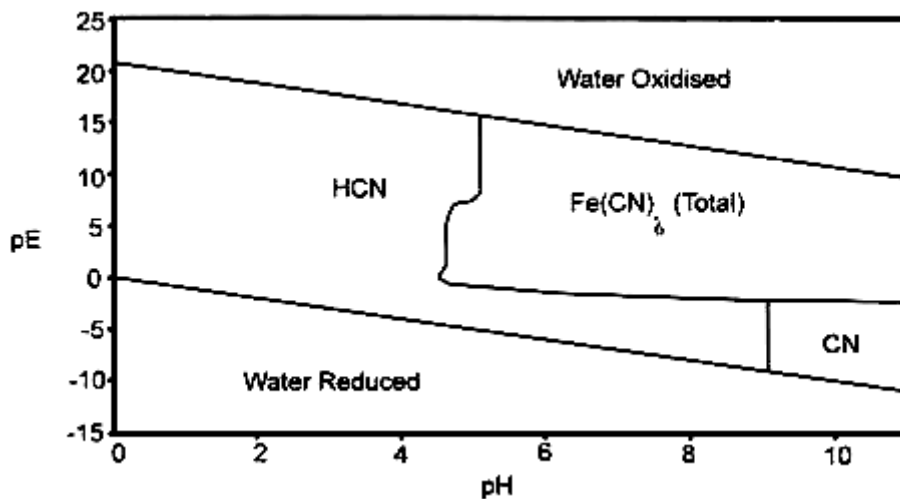
ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ไซยาไนด์จะอยู่ในสถานะที่เป็นได้ทั้งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ซึ่งอาจอยู่ในรูปของ Free Cyanide, Simple Cyanide หรือ Complex Cyanide ก็ได้ (Meehan, Online 2000)

2.1 สถานะของแข็ง

ไซยาไนด์ที่อยู่ในสถานะของแข็งจะอยู่ในรูปของ Complex cyanide ซึ่งอาจเป็น Metallo Cyanide หรือ Alkaline Cyanide หรืออาจอยู่ในรูป Alkaline Metallic Cyanide และ นอกจากนี้อาจอยู่ในรูปของ Double Metallic Cyanide เช่น Turnbull's blue $\text{Fe}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]_2$ และ Prussian Blue $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$ ซึ่งเกิดได้ดีในช่วง pH ที่ค่อนข้างกว้างและในสภาวะ Anoxic Condition

2.2 สถานะของเหลว

ในสถานะที่เป็นของเหลว ไซยาไนด์อาจอยู่ในรูปของ Free Cyanide, Simple Cyanide หรือ Complex Cyanide ขึ้นอยู่กับค่า pH และ Redox Potential ของสารละลาย ถ้า pH ต่ำกว่า 9.2 ไซยาไนด์จะอยู่ในรูปไซยาไนด์ ไอออน หรือ ไฮโดรเจนไซยานิก มีโลหะและธาตุต่างๆ มากมายเกิดเป็นสารประกอบกับไซยาไนด์



ที่มา : Meehan (2000)

รูปที่ 2 ประเภทของสารประกอบไซยาไนด์ในสภาวะต่างๆ คัดลอกจาก

จากกราฟจะเห็นว่าถ้าสารละลายอยู่ในสภาวะที่เป็นกรดและ Reducing Condition ไฮโดรเจนไซยาไนด์ จะเป็นสารประกอบหลักในสารละลาย ในขณะที่อยู่ในสภาวะที่เป็นกลางจนถึงสภาวะที่เป็นเบสและอยู่ในสภาวะ Oxidizing Condition เหล็กไซยาไนด์ (Iron Cyanide: $\text{Fe}(\text{CN})_{6\text{total}}$) จะเป็นสารประกอบหลักในสารละลาย ถ้าอยู่ในสภาวะที่เป็นเบสสูงและอยู่ในช่วง Reducing Condition สารประกอบไซยาไนด์จะอยู่ในรูปไซยาไนด์ไอออน

2.3 สถานะของก๊าซ

ไฮโดรเจนไซยาไนด์ หรือ ไซยาไนด์ ไอออนที่อยู่ในสถานะที่เป็นของเหลวสามารถเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกลางถึงกรดอ่อนไซยาไนด์ไอออนจะกลายเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์ซึ่งเป็นสารที่มีความสามารถในการระเหยได้ดีเมื่อสัมผัสกับอากาศ และเมื่อสารประกอบไซยาไนด์อยู่ในรูปของก๊าซก็จะเป็นพิษสูงมาก

3. เสถียรภาพของสารประกอบไซยาไนด์

สารประกอบไซยาไนด์แต่ละชนิดมีเสถียรภาพต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของการแตกตัว (Dissociation Constant) หรือ ค่าความเสถียรของสารประกอบ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อุณหภูมิ แสงแดด และอื่นๆ

3.1 เสถียรภาพของ Free Cyanide

Free Cyanide เป็นสารประกอบไซยาไนด์กลุ่มที่มีเสถียรภาพต่ำสุด ไซยาไนด์ไอออน จะเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ได้อย่างรวดเร็วเกือบ 100% เมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกลางถึงกรดอ่อน ก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์มีความเป็นพิษสูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งต่อระบบการหายใจ

ตารางที่ 1 ค่าความเสถียร (Stability Constant: log K) ของสารประกอบไซยาไนด์

สารเคมี	สูตรเคมี	ค่าความเสถียร (log K)
Hexacyanocobaltate	$[\text{Co}(\text{CN})_6]^{3-}$	64.0
Hexacyanoferrate(III)	$[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$	43.6
Mercurycyanide	$[\text{Hg}(\text{CN})_4]^{2-}$	41.4
Hexacyanoferrate(II)	$[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$	35.4
Tetracyanonickelate	$[\text{Ni}(\text{CN})_4]^{2-}$	31.8
Tetracyanocuprate	$[\text{Cu}(\text{CN})_4]^{3-}$	30.3
Tricyanocuprate	$[\text{Cu}(\text{CN})_3]^{2-}$	23.5
Dicyanoargenate	$[\text{Ag}(\text{CN})_2]^-$	21.0
Dicyanocuprate	$[\text{Cu}(\text{CN})_2]^-$	18.8
Tetracyanozincate	$[\text{Zn}(\text{CN})_4]^{2-}$	16.9
Tetracyanocadmiate	$[\text{Cd}(\text{CN})_4]^{2-}$	16.8
Zinc Cyanamide	$\text{Zn}(\text{CN})_2$	11.1
Cadmium Cyanide	$\text{Cd}(\text{CN})_2$	11.0
Hexacyanomanganate	$[\text{Mn}(\text{CN})_4]^{3-}$	9.7
Hydrogen Cyanide	HCN	9.2
Zinc Cyanide	ZnCN^+	5.3

ที่มา : U.S.EPA (1994) และ Meehan (2000)

3.2 เสถียรภาพของ Simple Cyanide

Simple Cyanide เป็นสารประกอบไซยาไนด์กลุ่มที่มีเสถียรภาพค่อนข้างต่ำ เนื่องจากเป็นสารประกอบที่สามารถละลายน้ำได้ ทำให้เกิดไซยาไนด์ ไอออน ที่สามารถเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ได้อย่างรวดเร็ว

3.3 เสถียรภาพของ Complex Cyanide

Complex Cyanide เป็นสารประกอบไซยาไนด์กลุ่มที่มีเสถียรภาพสูงกว่าสองกลุ่มแรก แต่ Weak Acid Dissociable Cyanide และ Moderately Strong Acid Dissociable Cyanide สามารถแตกตัวได้ง่ายเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรดอ่อนๆ ส่วนกลุ่มของ Strong Acid Dissociable Cyanide ซึ่งดูเหมือนว่าจะเป็กลุ่มสารประกอบไซยาไนด์ที่มีความเป็นพิษน้อยที่สุด เนื่องจากค่อนข้างมีเสถียรภาพสูง แตกตัวได้ยาก ก็สามารถแตกตัวให้ไซยาไนด์ ไอออนได้ เมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรดแก่หรือได้รับแสงอัลตราไวโอเล็ต

4. ไซยาไนด์ในสิ่งแวดล้อม

ไซยาไนด์เป็นสารประกอบที่เป็นส่วนประกอบในสิ่งมีชีวิตและผลิตภัณฑ์หลายชนิด ทำให้มนุษย์และสัตว์มีโอกาสสัมผัสไซยาไนด์ในชีวิตประจำวันค่อนข้างสูง แต่ด้วยความสมดุลของธรรมชาติ ทำให้เกิดกลไกต่างๆ เพื่อลดหรือทำลายพิษของไซยาไนด์ (International Cyanide Management Code, Online 2002)

4.1 การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนไซยาไนด์ (Complexation)

ไซยาไนด์จะเกิดปฏิกิริยากับโลหะต่างๆ ได้สารประกอบเชิงซ้อนหรือไอออนที่มีเสถียรภาพสูงกว่าไซยาไนด์ไอออนและไฮโดรเจนไซยาไนด์ เช่น $Zn(CN)_4^{2-}$, $Cd(CN)_4^{2-}$, $Cd(CN)_3^-$, $Cu(CN)_2^-$, $Cu(CN)_3^{2-}$, $Ni(CN)_4^{2-}$ และ $Ag(CN)_2^-$

4.2 การตกตะกอนเหล็กไซยาไนด์ (Precipitation)

เหล็กไซยาไนด์ (Iron Cyanide) จะเกิดการตกตะกอนกับโลหะอื่น เช่น เหล็ก ทองแดง นิกเกิล แมงกานีส ตะกั่ว สังกะสี แคดเมียม ดีบุก และเงิน กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของเหล็กไซยาไนด์ (Double Metallo cyanide Complex) เช่น $Cu_2Fe(CN)_6$, $Ni_2Fe(CN)_6$, $Zn_2Fe(CN)_6$ และ $Fe_4[Fe(CN)_6]_3$

๘ การดูดซับสารประกอบไซยาไนด์ (Adsorption)

สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในดิน เช่น อนุภาคของดินเหนียว เฟลต์สปาร์ ออกไซด์ของอะลูมิเนียม เหล็ก และ แมงกานีส สามารถดูดซับไซยาไนด์ไว้ได้ เป็นการลดการแพร่กระจายหรือความรุนแรงของพิษ จากนั้นโดยกลไกการกำจัดพิษของธรรมชาติจะเกิดการสลายตัวของไซยาไนด์อย่างช้า ๆ

4.4 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation)

ไซยาไนด์จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ไซยาเนทซึ่งมีพิษน้อยกว่า ปฏิกิริยานี้จะเกิดได้ดีเมื่ออยู่ในสภาวะที่มี Strong Oxidizing Agent เช่น โอโซน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือ ไฮโปคลอไรต์ แต่การดูดซับไซยาไนด์ของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในดินจะช่วยกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในธรรมชาติได้

4.5 การเกิดไทโอไซยาเนท (Thiocyanate)

ไซยาไนด์จะทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์ซึ่งอาจอยู่ในรูปของซัลเฟอร์อิสระหรือสารประกอบซัลเฟอร์ กลายเป็นไทโอไซยาเนทที่มีพิษน้อยกว่า

4.6 การระเหยของไฮโดรเจนไซยาไนด์ (Volatilization)

การระเหยของไฮโดรเจนไซยาไนด์สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในสภาพที่เป็นสารละลายและสภาพที่อยู่ในดิน เมื่อ pH ลดลง, อุณหภูมิสูงขึ้น และมีการเติมอากาศเพื่อเพิ่มก๊าซออกซิเจน ถ้าเป็นการระเหยอย่างช้า ๆ ก็จะไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมบริเวณนั้น

4.7 กระบวนการสลายตัวทางชีวภาพ (Biodegradation)

ไซยาไนด์สามารถเกิดการสลายตัวได้ทั้งในสภาวะที่มีออกซิเจน (Aerobic Condition) และสภาวะที่ไร้ออกซิเจน (Anaerobic Condition)

4.8 การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

ไฮโดรเจนไซยาไนด์จะถูกไฮโดรไลซ์กลายเป็นกรดฟอร์มิก (Formic Acid) หรือ แอมโมเนียม ฟอร์มเมท (Ammonium Formate) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ แต่ก็สามารถเกิดได้ถ้าอยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจน (Aerobic Condition)

ปฏิกิริยาและกระบวนการต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้นสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติ ถ้าอยู่ในสภาวะที่เอื้ออำนวยและความเข้มข้นของไซยาไนด์ไม่สูงเกินไป เป็นกลไกทางธรรมชาติเพื่อความสมดุลของสิ่งแวดล้อม

การบำบัดไซยาไนด์ (Cyanide Treatment)

ไซยาไนด์เป็นสารเคมีที่พบได้ในธรรมชาติทั้งจากพืชและสัตว์ โดยสมดุลของธรรมชาติจะมีกระบวนการทำลายพิษของไซยาไนด์ แต่จะดำเนินไปอย่างช้าๆ ซึ่งไม่สามารถรองรับของเสียที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมได้ ดังนั้นมนุษย์จึงต้องหาวิธีการบำบัดไซยาไนด์อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสม หลักการบำบัดไซยาไนด์สามารถจำแนกได้ 2 ประเภทหลัก คือ (Young, Online 2002)

การทำลายพิษไซยาไนด์ (Destruction Process) โดยใช้หลักการเปลี่ยนรูปไซยาไนด์เป็นสารประกอบอื่นที่มีพิษน้อยกว่าไซยาไนด์

การนำไซยาไนด์กลับมาใช้ใหม่ (Recovery Process) เป็นการแยกไซยาไนด์ออกจากของเสียแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการผลิต

ทั้งการทำลายพิษไซยาไนด์ (Destruction Process) และ การนำไซยาไนด์กลับมาใช้ใหม่ (Recovery Process) อาจต้องใช้หลายวิธีการผสมผสานกัน ทั้งทางเคมี กายภาพ และชีวภาพ เพื่อประสิทธิภาพในการบำบัดไซยาไนด์ ส่วนการเลือกใช้วิธีการใดในการบำบัด ต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายอย่างประกอบกัน เช่น ลักษณะของเสีย ประสิทธิภาพการบำบัดที่ต้องการและค่าใช้จ่ายในการบำบัดของเสีย

1. กระบวนการสลายตัวโดยธรรมชาติ (Natural Degradation)

การสลายตัวโดยธรรมชาติเกิดจากหลายปฏิกิริยา เช่น Hydrolysis Photodegradation, Chemical Biological Oxidation และ การตกตะกอนในรูปสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ แต่กระบวนการหลัก คือ การแยกตัวของสารประกอบเชิงซ้อนไซยาไนด์ของโลหะ และการระเหยเป็นก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการสลายตัว ได้แก่ pH อุณหภูมิ แสงแดด และการเติมอากาศ ถ้าอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม ปัจจัยแวดล้อมทางธรรมชาติจะเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการสลายตัวของไซยาไนด์ได้ดียิ่งขึ้น

2. วิธีการทางกายภาพ

การจัดการไซยาไนด์โดยวิธีการทางกายภาพ เป็นวิธีการอย่างง่ายเหมาะสำหรับกรณีที่มีของเสียปริมาณไม่มาก ซึ่งสามารถทำได้ดังนี้

2.1 การเจือจาง (Dilution)

การเจือจางเป็นวิธีการลดพิษของไซยาไนด์ที่ง่ายและต้นทุนต่ำ แต่ไม่ช่วยได้รับการยอมรับ เนื่องจากปริมาณไซยาไนด์รวมทั้งหมดที่ปล่อยออกไม่เปลี่ยนแปลงและเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของไซยาไนด์ในดินและน้ำผิวดิน

2 การผ่านเยื่อ (Membrane)

การแยกไซยาไนด์จากสารละลายโดยการผ่านเยื่อสามารถทำได้ 2 วิธี ดังนี้

2.2.1 Electrodialysis

วิธี Electrodialysis ทำได้โดยใส่สารละลายไซยาไนด์ที่ต้องการทำให้บริสุทธิ์ในครึ่งเซลล์แคโทด หรือ ขั้วลบ เนื่องจากไซยาไนด์มีประจุลบจะแพร่ผ่านเยื่อมาครึ่งเซลล์แอโนด หรือขั้วบวก เป็นการแยกไซยาไนด์ออกจากสารละลาย

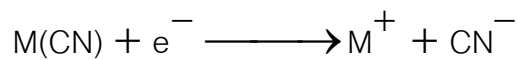
2.2.2 Reverse Osmosis

วิธี Reverse Osmosis เป็นวิธีที่ใช้แรงดันทำให้น้ำแพร่ผ่านเยื่อ เป็นการแยกน้ำออกจากสารละลายไซยาไนด์

ทั้งสองวิธีดังกล่าวข้างต้น สามารถใช้แยกสารประกอบไซยาไนด์ได้ทั้งที่อยู่ในรูปไซยาไนด์อิสระและสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะไซยาไนด์

2.3 Electrowining

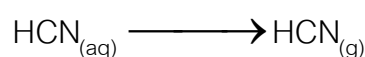
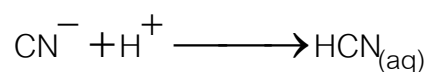
Electrowining เป็นวิธีการที่ใช้ในการแยกทองคำและโลหะออกจากสารละลาย แต่สามารถใช้แยกไซยาไนด์อิสระจาก SAD Cyanide และ WAD Cyanide ได้เช่นกัน โดยการรับอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทด วิธีนี้เหมาะสำหรับกรณีที่สารละลายมีความเข้มข้นสูง



แต่วิธีนี้ไม่สามารถใช้กำจัดไทโอไซยาเนตได้ ไซยาไนด์อิสระที่เกิดต้องผ่านกระบวนการบำบัดโดยการทำลายพิษ ลดพิษ หรือ การนำกลับมาใช้ใหม่ต่อไป สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบได้ด้วยการใช้ Steel Wool ซึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากเป็นขั้วแคโทด กวนสารละลาย เพิ่มอุณหภูมิและ pH และใช้ตัวนำที่เหมาะสม

2.4 Hydrolysis / Distillation

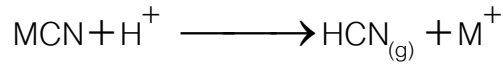
ไซยาไนด์อิสระทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในน้ำ ได้สารละลายไฮโดรเจนไซยาไนด์ และระเหยกลายเป็นก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ ถ้าก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากพอก็สามารถดักจับใน Conventional Absorption Scrubbing Tower และ นำกลับไปใช้ใหม่ได้ แต่ไทโอไซยาเนต WAD และ SAD Cyanide ไม่สามารถใช้วิธีนี้ได้



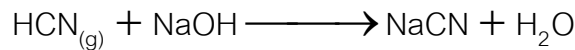
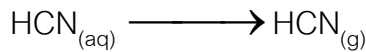
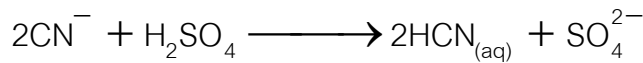
3. วิธีการผสมผสาน

3.1 Acidification/Volatilization/Reneutralization (AVR or Mills-Crowe Process)

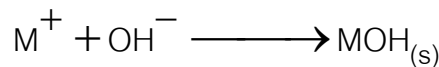
AVR or Mills-Crowe Process เป็นวิธีการบำบัดไซยาไนด์โดยการนำกลับมาใช้ใหม่ (Recovery) เป็นกระบวนการที่ใช้ได้ดีกับของเสียที่ไซยาไนด์มีความเข้มข้นปานกลางถึงสูงและมีอัตราการไหลสูงหรือต่ำก็ได้ โดยการทำให้ไซยาไนด์อยู่ในสภาพที่เป็นกรด (Acidification) ที่ pH ต่ำกว่า 8.0 ไซยาไนด์อิสระและ WAD Cyanide จะทำปฏิกิริยากับกรด ได้ก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ระเหยไปในอากาศ (Volatilization) ปฏิกิริยาเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติ โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะละลายน้ำได้กรดคาร์บอนิก ทำให้ pH ลดต่ำลง เกิดก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์



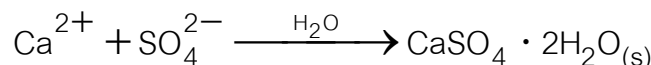
แต่ถ้าต้องการนำไซยาไนด์กลับมาใช้ใหม่ก็จะต้องให้ก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide: NaOH) ซึ่งจะสามารถดักจับไซยาไนด์ได้ประมาณ 70-95% ทั้งที่อยู่ในรูปของสารละลายและน้ำทิ้งปนกากแร่ (Slurry)



หลังจากทำ Acidification แล้วต้องปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง (Reneutralization) ทำให้ไอออนของโลหะตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ (Metal Hydroxide)



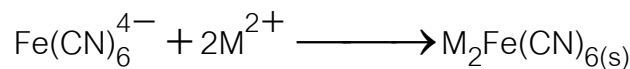
ถ้าใช้กรดซัลฟูริก (Sulphuric Acid: H_2SO_4) ทำ Acidification และใช้ปูนขาว (Calcium Hydroxide: $\text{Ca}(\text{OH})_2$) ทำการปรับสภาพ จะทำให้เกิดตะกอนของยิปซัม ซึ่งยากแก่การแยกออกจากน้ำ



แก้ปัญหาดังกล่าวโดยการใชกรดตัวอื่น เช่น กรดไนตริก (Nitric acid: HNO_3) หรือใช้เบสตัวอื่น เช่น โซดาไฟ (Sodium Hydroxide: NaOH) นอกจากนี้ ไอออนของทองแดงในสารละลายจะทำให้การ Recovery ไซยาไนด์ทำได้ยาก จึงต้องตกตะกอนไอออนของทองแดงด้วยโซเดียมซัลไฟด์ (Sodium Sulphide: Na_2S_2) ได้เป็นตะกอนของคอปเปอร์ซัลไฟด์ (Copper Sulphide: Cu_2S)

3.2 Metal Addition

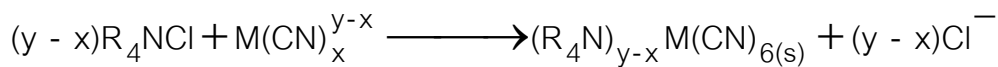
การเติมโลหะเป็นการทำให้ไซยาไนด์อยู่ในรูป SAD complex เช่น การเติม Fe^{2+} หรือ Fe^{3+} ทำให้เกิด Hexacyanoferrate (II) ion $[Fe(CN)_6]^{4-}$ และ Hexacyanoferrate (III) ion $[Fe(CN)_6]^{3-}$ ตามลำดับ แต่สารประกอบที่ได้อาจเกิดปฏิกิริยากับแสง (Photodegradation) ดังนั้นจึงมีการเติมโลหะซ้อนอีก เช่น เหล็ก ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี เพื่อให้เกิดการตกตะกอนเป็นโลหะเชิงซ้อนของเหล็กไซยาไนด์ โดยที่ Hexacyanoferrate (II) ion $[Fe(CN)_6]^{4-}$ จะทำปฏิกิริยากับโลหะที่เติมลงไปได้เลย



แต่ถ้าเป็น Hexacyanoferrate (III) ion $[Fe(CN)_6]^{3-}$ จะไม่ทำปฏิกิริยากับโลหะที่เติมลงไป ต้องรีดิวซ์ Hexacyanoferrate (III) ion ให้เป็น Hexacyanoferrate (II) ion ก่อน โดยการเติมโซเดียมซัลไฟต์ (Sodium Sulphite: Na_2SO_3) หรือ โซเดียมไดซัลไฟต์ (Sodium Disulphite: $NaHSO_3$) เป็น Reducing Agent และมี Zn และ Cu เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ pH ประมาณ 5-7

3.3 Flotation

การทำ Flotation เกิดขึ้นครั้งแรกตั้งแต่ปี 1880 เพื่อแยกแร่ออกจากสินแร่ ต่อมาจึงได้มีการปรับปรุงระบบมาใช้กับการบำบัดไซยาไนด์ การแยกไซยาไนด์ด้วยวิธี Flotation เป็นการแยก SAD Cyanide แล้วเกิดเป็นตะกอนโดยธรรมชาติหรือโดยการเติมโลหะเพื่อช่วยในการตกตะกอน ซึ่งจะช่วยป้องกันการสลายตัวเป็นไซยาไนด์อิสระ การทำ Flotation ทำได้โดยเติมสาร Heteropolar Surfactant ซึ่งส่วนมากจะเป็นสารกลุ่ม Cationic Amine เช่น Tricaprylmethyl Ammonium Chloride (R_4NCl) เพื่อทำปฏิกิริยากับสารประกอบ Anionic SAD Cyanide แล้วตกตะกอนเป็นเกลือเชิงซ้อนของสารอินทรีย์



ตะกอนที่ได้อาจอยู่ในรูปสารแขวนลอยหรืออาจมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า วิธีนี้เหมาะสำหรับการแยก SAD Cyanide มากกว่า WAD Cyanide

3.4 Solvent Extraction

เทคนิค Solvent Extraction เริ่มใช้ครั้งแรกประมาณกลางปี 1950 ในกระบวนการผลิตยูเรเนียม และจากนั้นมาอีก 10 ปี ก็ได้รับความนิยมทั่วโลกจากการประยุกต์มาใช้กับกระบวนการผลิตทองแดง สารที่ใช้เป็น Solvent Extraction เป็นสารอินทรีย์จึงไม่รวมตัวกับน้ำ และมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำและมีความสามารถในการละลายที่เฉพาะเจาะจง เมื่อเติมสารที่ใช้เป็น Solvent Extraction กับสารละลายที่ต้องการบำบัดแล้วไซยาไนด์จะแยกตัวออกมาอยู่ในชั้นของ Solvent Extraction สมการการเกิดปฏิกิริยามีลักษณะเดียวกันกับ Flotation สารละลายที่ใช้เป็น Solvent Extraction สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

4. วิธีการดูดซับ (Adsorption method)

วิธีการดูดซับไซยาไนด์เป็นการแยกไซยาไนด์ออกจากสารละลายโดยอาศัยวัสดุต่างๆที่มีสมบัติในการดูดซับ เช่น แร่บางชนิด ถ่านกัมมันต์ และ เรซิน โดยหลักการแล้วไซยาไนด์ที่ถูกดูดซับไว้จะถูกแยกออกอีกครั้งในสารละลายที่มีปริมาณน้อย ทำให้ได้สารละลายไซยาไนด์เข้มข้นและวัสดุดูดซับดังกล่าวก็สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

4.1 แร่

ดิน ของเสีย และสินแร่ ที่มีแร่ Ilmenite (FeTiO_3), Hematite (Fe_2O_3), Bauxite ($\text{AlO} \cdot \text{OH} / \text{Al}(\text{OH})_3$) และ Pyrite (FeS_2) รวมถึงกลุ่มแร่ Feldspars , Zeolite และดินเหนียว มีสมบัติในการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนโลหะของไซยาไนด์ได้ เช่น $\text{Cd}(\text{CN})_3^-$, $\text{Cu}(\text{CN})_4^{3-}$, $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$, $\text{Ni}(\text{CN})_4^-$ และ $\text{Zn}(\text{CN})_4^{2-}$ แต่ไม่สามารถดูดซับไซยาไนด์อิสระ การดูดซับไซยาไนด์ของตะกอนดินประกอบด้วย 2 ขั้นตอนที่สำคัญ คือ การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) และการตกตะกอน (Precipitation) การดูดซับสารประกอบไซยาไนด์ของตะกอนดินขึ้นอยู่กับอำนาจไฟฟ้าสถิตของตะกอนและน้ำ สารประกอบไซยาไนด์อาจถูกดูดซับไว้เพียงช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น แต่เมื่อสภาพของดิน น้ำ และอากาศเปลี่ยนไป ไซยาไนด์ก็อาจถูกปล่อยลงสู่ลำน้ำได้ดินได้อีก

4.2 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่เตรียมจากวัตถุดิบที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ไม้ ถ่านหิน และกะลามะพร้าว สมบัติของถ่านกัมมันต์ขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมและชนิดของวัตถุดิบ เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีความพรุนตัวและพื้นที่ผิวสัมผัสสูง ทำให้ประสิทธิภาพและอัตราการดูดซับค่อนข้างสูง นอกจากนี้ยังสามารถดูดซับได้ทั้งสารที่เป็นประจุบวก ประจุลบและเป็นกลาง โดยการแลกเปลี่ยนไอออน การเกิด Chelate และปฏิกิริยา Coulombic

4.3 เรซิน

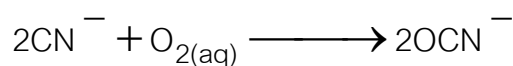
เรซินเป็นเม็ดโพลีเมอร์ที่มีผิวที่มีสมบัติต่าง ๆ กัน เช่น การเกิด Chelate หรือ การแลกเปลี่ยนไอออน ประสิทธิภาพการดูดซับขึ้นอยู่กับสมบัติหรือความสามารถในการเกิด Chelate หรือการแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์กับเรซิน พบว่า เรซินทนทานต่อ สารอินทรีย์ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อายุการใช้งานยาวนานกว่าและสามารถ คายสารดูดซับได้เร็วกว่า ปัจจุบันเรซินที่ใช้ในการแยกกำจัดไซยาไนด์ในอุตสาหกรรมจะเป็น Chelation Resin เรซินมีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะไซยาไนด์ได้อย่างดี แต่สามารถดูดซับ ไทโอไซยาเนทได้เพียงเล็กน้อย การดูดซับของเรซินขึ้นอยู่กับชนิดของเรซิน การละลายและ การปรับสภาพเรซินเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

5. วิธีการออกซิเดชัน (Oxidation method)

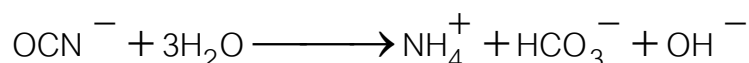
การกำจัดไซยาไนด์ด้วยวิธีการต่างๆ เช่น วิธีทางกายภาพ, วิธีการทำให้เกิด สารประกอบเชิงซ้อน และวิธีการใช้สารที่มีคุณสมบัติในดูดซับ ยังคงมีสารประกอบไซยาไนด์ที่เกิด จากการบำบัดที่ยังเป็นพิษ ต้องทำการบำบัดก่อนการปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม แต่วิธีการดังกล่าว เป็นวิธีการแยกและนำไซยาไนด์กลับมาใช้ใหม่ ถ้าต้องการทำลายไซยาไนด์ จำเป็นต้องให้ไซยาไนด์ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

5.1 Bio-Oxidation

สิ่งมีชีวิตจำพวกแบคทีเรีย เห็ดรา สาหร่าย ยีสต์ และพืชหลายชนิด มีเอนไซม์และ กรดอะมิโนที่สามารถออกซิไดซ์ไซยาไนด์ในธรรมชาติได้ กลไกสำคัญของ Bio-Oxidation คือ การเปลี่ยนไซยาไนด์เป็นไซยาเนท (Cyanate: OCN^-) ซึ่งมีพิษน้อยกว่า



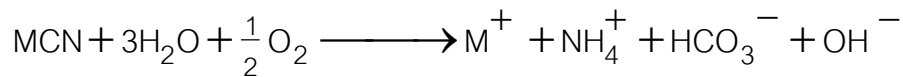
ออกซิเจนที่ใช้ในปฏิกิริยาอาจอยู่ในรูปของเหลวหรือก๊าซก็ได้ มีสารตัวกลาง (Intermediate) หลายตัวที่เกิดในปฏิกิริยา ขึ้นอยู่กับชนิดของสิ่งมีชีวิตที่ใช้ในกระบวนการ Bio-Oxidation, ชนิด ของสารประกอบไซยาไนด์ และสภาพของสารละลาย เช่น ความเข้มข้นของไซยาไนด์ pH และ อุณหภูมิ ไซยาเนทเป็นสารตัวกลาง (Intermediate) ตัวหนึ่งที่เกิดขึ้นและถูกไฮโดรไลซ์กลายเป็น แอมโมเนียมไอออน (Ammonium ion: NH_4^+) และคาร์บอเนตไอออน (Carbonate ion: HCO_3^-)



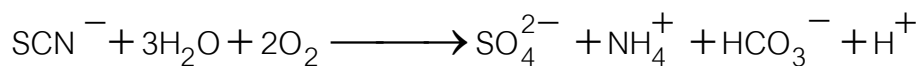
ปฏิกิริยาข้างต้นสามารถเกิดได้ดีในสภาพที่สารละลายมี pH ประมาณ 7 ที่อุณหภูมิห้อง อย่างไรก็ตาม แอมโมเนียมไอออน (Ammonium ion : NH_4^+) ที่เกิดขึ้นก็จัดเป็นสารพิษเช่นกัน จึงต้องทำ การบำบัดโดยใช้วิธีไนตริฟิเคชัน (Nitrification) หรือ ดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification)

แบคทีเรียทั้งกลุ่มที่ใช้ ออกซิเจน (Aerobic Bacteria) และไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Bacteria) สามารถย่อยสลายไซยาไนด์ได้โดยได้ไซยาไนด์เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน และไนโตรเจน โดยแบคทีเรียกลุ่มที่ใช้ ออกซิเจนจะออกซิไดซ์ไซยาไนด์ไปเป็นฟอร์มเมท (Formate) ได้ทั้งทางตรงและทางอ้อม และถูกออกซิไดซ์ต่อไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbondioxide: CO₂) โดยเอนไซม์ฟอร์มเมท ไฮโดรจีเนส (Formate Hydrogenase Enzyme) ตามลำดับ แต่ถ้าอยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจนไซยาไนด์จะถูกย่อยสลายในสภาวะ Methanogenic Condition เป็นแอมโมเนีย (Ammonia: NH₃) และ ฟอร์มเมท (Formate) จากนั้นก็จะถูกออกซิไดซ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์อย่างรวดเร็ว

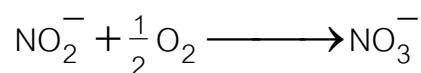
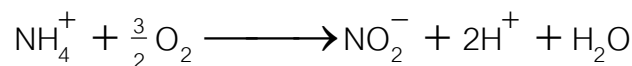
Pseudomonas paucimobilis ที่เป็นแบคทีเรียที่ใช้ในการเมตาบอลิซึมไซยาไนด์ในน้ำใน Rotating Biological Contractor สามารถใช้บำบัด SAD Complex ได้



และสามารถเปลี่ยนไทโอไซยาเนต (Thiocyanate: SCN⁻) เป็นแอมโมเนียมได้



กรดที่เกิดขึ้นจากการบำบัดไทโอไซยาเนต จะช่วยปรับสภาพความเป็นเบสที่เกิดจากการบำบัดไซยาเนตและโลหะไซยาไนด์ ส่วนแอมโมเนียมไอออนที่เกิดขึ้นจะถูกบำบัดต่อไปโดย Nitrification Bacteria ไดไนไตรท์ (Nitrite: NO₂⁻) และเปลี่ยนเป็นไนเตรต (Nitrate: NO₃⁻) ได้อย่างรวดเร็ว



นอกจากนี้ยังเติมปูนขาวเพื่อตกตะกอนซัลเฟต (Sulfate: SO₄²⁻) และ คาร์บอนไดออกไซด์เป็นยิปซัมและแคลไซต์ (Calcite: CaCO₃) ในธรรมชาติมีแบคทีเรียหลายชนิดที่สามารถย่อยสลายไซยาไนด์ได้ทั้งในกลุ่มที่ใช้ ออกซิเจน (Aerobic Bacteria) และไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Bacteria) เช่น *Alcaligenes* และ *Achromobacter* เป็นต้น นอกจากนี้ *Thiobacillus thiooxydans*, *Thiobacillus thiooxydans* และ *Thiobacillus denitrificans* ก็เป็นแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายไทโอไซยาเนตได้เช่นกัน

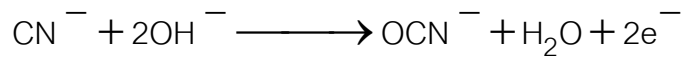
5.2 Catalysis

ถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นตัวดูดซับไซยาไนด์ถ้าเกิดในบริเวณที่มีก๊าซออกซิเจนแล้ว ถ่านกัมมันต์จะถูกกระตุ้นให้เกิดการออกซิไดซ์ไซยาไนด์เป็นไซยาเนท และถ้ามีทองแดงจะยิ่งทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น และถ้ามีทองแดงมากเกินไปจะเป็นการกระตุ้นให้เกิดการไฮโดรไลซิสของไซยาเนท วิธีนี้สามารถใช้ได้ดีกับไซยาไนด์อิสระ WAD และ SAD บางตัว

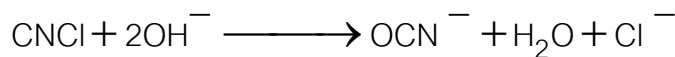
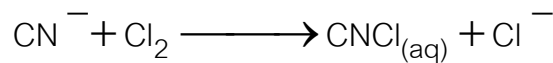
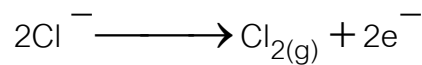
5.3 Electrolysis

การทำลายไซยาไนด์ด้วยวิธี Electrolysis มีปัจจัยพื้นฐานเหมือนกับ Electrowining แต่ต่างกันที่ Electrolysis จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไซยาไนด์อิสระที่ขั้วแอโนดแทนที่จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของสารประกอบโลหะไซยาไนด์ที่ขั้วแคโทด Electrolysis มี 2 แบบ คือ

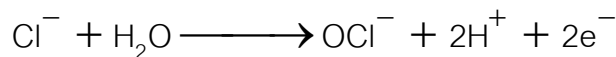
- Electro-oxidation โดยไซยาไนด์จะเกิดปฏิกิริยาโดยตรง ดังนี้



- Electro-chlorination โดยไซยาไนด์จะเกิดปฏิกิริยาตามลำดับ ดังนี้



จากปฏิกิริยาจะเกิดคลอโรไซยาโนเจน (Chlorocyanogen: CNCl) หรือก๊าซน้ำตา เป็นสารตัวกลาง (Intermediate) และมีคลอไรต์ไอออนเกิดขึ้นซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ และเพื่อเป็นการลดการเกิดคลอเรต (ClO_3^-) ควรควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 40-50 องศาเซลเซียส แต่ในสภาวะดังกล่าวทำให้เกิดไฮโปคลอไรต์ (Hypochlorite: ClO^-)



ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันไซยาไนด์ต่อไปได้อีก ไฮโปคลอไรต์จัดเป็นสารพิษ โดยเฉพาะอย่างยิ่งต่อปลา ดังนั้นจึงต้องควบคุมการระบายน้ำทิ้ง นอกจากนี้ยังต้องควบคุม pH ให้สูงกว่า 11 เพื่อป้องกันการระเหยของก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์และก๊าซคลอโรไซยานิก การกำจัดไซยาไนด์โดยวิธี Electro-Chlorination มีประสิทธิภาพสูงกว่าวิธี Electro-Oxidation แต่ Electrolysis ทั้งสองแบบสามารถใช้บำบัดพิษไทโอไซยาเนทและ WAD Cyanide ได้ แต่ไม่สามารถใช้กับ SAD Cyanide ได้

5.4 Chemical Addition

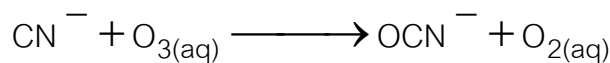
วิธีการบำบัดไซยาไนด์ที่ได้รับความนิยม คือ การเติมสารเคมีที่ทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ เพื่อรับอิเล็กตรอนจากไซยาไนด์และได้ไซยาเนทซึ่งมีความเป็นพิษน้อยกว่าไซยาไนด์เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยา ตัวอย่างสารออกซิไดซ์ที่นิยมใช้ เช่น ออกซิเจน (Oxygen: O₂), โอโซน (Ozone: O₃), ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (Hydrogenperoxide: H₂O₂), คลอรีน (Chlorine: Cl₂), ไฮโปคลอไรต์ (Hypochlorite: ClO₃⁻) และ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulphurdioxide: SO₂)

5.4.1 Oxygen/Atmospheric Oxidation Reaction

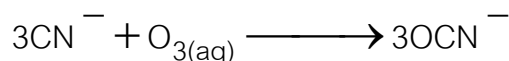
การทำลายพิษของไซยาไนด์ในธรรมชาติ เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ซึ่งอาจอยู่ในรูปของก๊าซหรือของเหลวก็ได้ และปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีถ้ามีการกวนสารละลายปนกากแร่ (Slurry) และเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการทำลายพิษไซยาไนด์ด้วยถ่านกัมมันต์และแบคทีเรียแบบใช้ออกซิเจน เป็นวิธีที่ค่อนข้างใช้ได้ผลดีกับไทโอไซยาเนทและ WAD cyanide

5.4.2 Ozonation

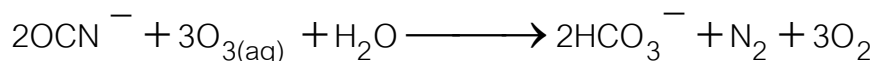
โอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงกว่าออกซิเจน โดยจะทำหน้าที่เปลี่ยนไซยาไนด์เป็นไซยาเนท อาจเติมคอปเปอร์ อีออน หรือ แมงกานีส อีออน เพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยา รูปแบบการเกิดปฏิกิริยามี 2 แบบ คือ



ออกซิเจนที่เกิดขึ้นสามารถออกซิไดซ์ไซยาไนด์ต่อไปได้อีก เป็นปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูง



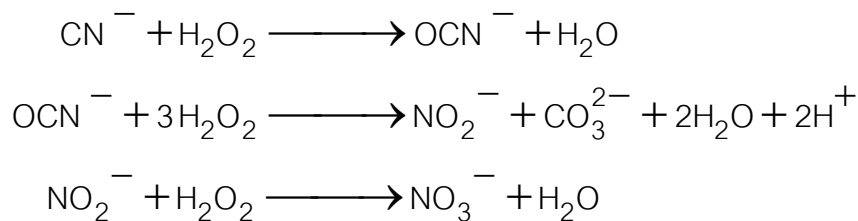
และกรณีที่มีโอโซนมากเกินไป ไซยาเนทจะถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอเนตและก๊าซไนโตรเจน



การทำปฏิกิริยา Ozonation ต่อไป เป็นการหลีกเลี่ยงการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไซยาเนท ไม่ทำให้เกิดไนไตรท์และไนเตรท และยิ่งไปกว่านั้น โอโซนสามารถทำปฏิกิริยากับไทโอไซยาเนทและ WAD cyanide ได้ดี แต่ไม่สามารถทำลาย SAD cyanide ได้ ข้อดีสำหรับการใช้โอโซน คือ ประสิทธิภาพของ Ozonation จะลดลงถ้า pH สูงกว่า 11 ซึ่งเป็นระดับของ pH ที่ป้องกันการเกิดก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์และอีกประการหนึ่ง คือ ค่าใช้จ่ายในการผลิตโอโซนค่อนข้างสูง

5.4.3 Degussa Process (Hydrogen peroxide)

Degussa Process เป็นกระบวนการบำบัดไซยาไนด์ที่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide: H_2O_2) เป็นตัวออกซิไดซ์ เหมาะกับของเสียกรณีที่เป็นสารละลายมากกว่า กรณีที่เป็นน้ำทิ้งปนกากแร่ (Slurry) เนื่องจากน้ำทิ้งปนกากแร่จะต้องใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มากกว่ากรณีที่เป็นสารละลาย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงกว่าออกซิเจนแต่ เบากว่าโอโซน อาจอยู่ในรูปของสารละลาย $50\%H_2O_2$ ในทางทฤษฎีใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.31 กรัมต่อไซยาไนด์ 1 กรัม แต่ในทางปฏิบัติใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2.0-8.0 กรัมต่อ ไซยาไนด์ 1 กรัมที่ pH ประมาณ 9.0-9.5 โดยมีสารละลายคอปเปอร์, วานาเดียม, ทังสเทน หรือ เงิน 5-50 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการบำบัด ไซยาไนด์อิสระและ WAD cyanide ที่เป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะบางตัว เช่น สังกะสี ทองแดง และแคดเมียม แต่การตกตะกอนเหล็กไซยาไนด์ต้องทำที่ pH ต่ำกว่านี้ นอกจากนี้ยังสามารถเร่ง ปฏิกิริยาได้ด้วยการเพิ่มอุณหภูมิ เพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยา หรือ ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากเกินไป ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์ได้ ไซยาเนท และถ้ามีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มากเกินไป ไซยาเนทจะเกิดปฏิกิริยาต่อไปกลายเป็นไนไตรท์ ไนเตรท และคาร์บอนเนต

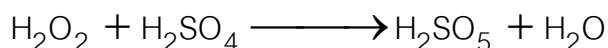


ในสภาวะที่เป็นกรด ไซยาเนทจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนีย Degussa Process สามารถทำลาย WAD cyanide ได้ดี แต่ไม่สามารถใช้กับไทโอไซยาเนท หรือ SAD Cyanide ได้มีการนำกระบวนการบำบัดไซยาไนด์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มาพัฒนาเพื่อ กำจัดไซยาไนด์ทุกรูปรวมทั้งโลหะหนักด้วย โดยแบ่งการทำงานเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

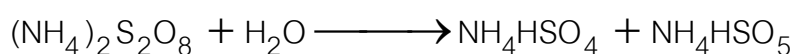
- ขั้นแรก ให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogenperoxide: H_2O_2) และโซเดียม ไทโอซัลเฟต (Sodiumthiosulphate: NaSCN) ทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์อิสระ (Free Cyanide) และ WAD Cyanide จนได้ไทโอไซยาเนท
- ขั้นที่สอง เติม Stryldimethylbenzyl Ammonium Chloride เพื่อตกตะกอน เหล็กไซยาไนด์
- ขั้นที่สาม เติม Ferric Sulphate เพื่อตกตะกอนโลหะอื่น ๆ

5.4.4 Caro's acid

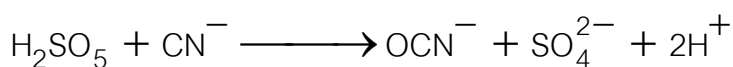
Caro's acid หรือ กรดเปอร์ออกซีโมโนซัลฟูริก (Peroxymonosulphuric Acid: H_2SO_5) สามารถเตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดซัลฟูริก (Sulfuric Acid: H_2SO_4) กับ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogenperoxide: H_2O_2)



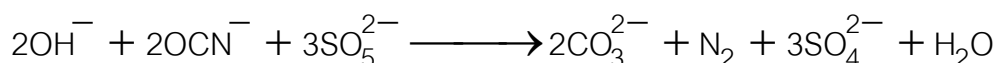
หรืออาจเตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis Reaction) ของแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (Ammoniumpersulphate: $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$)



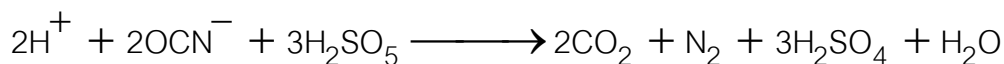
Caro's acid เป็นสารที่สลายตัวได้รวดเร็วมากจึงไม่นิยมใช้ ยกเว้นกรณีที่ไม่สามารถใช้วิธีอื่นได้ ในทางทฤษฎีใช้ Caro's acid 4.39 กรัมต่อไซยาไนด์ 1 กรัม แต่ในทางปฏิบัติใช้ Caro's acid ประมาณ 5-15 กรัมต่อไซยาไนด์ 1 กรัม โดยจะทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์ได้ไซยาเนท ที่ pH 10.0 Caro's acid สามารถใช้ได้กับไทโอไซยาเนท และ WAD cyanide โดยไม่ต้องใช้คอปเปอร์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ไม่สามารถใช้กับ SAD cyanide ได้



และถ้ามี Caro's acid มากเกินพอจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสไซยาเนทเป็นคาร์บอเนตและก๊าซไนโตรเจนต่อไป



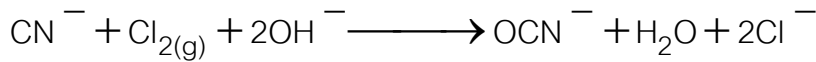
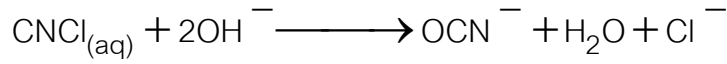
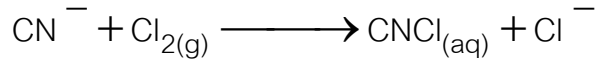
แต่ถ้าอยู่ในสภาวะที่เป็นกรด จะเกิดการกระตุ้นปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสไซยาเนทดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



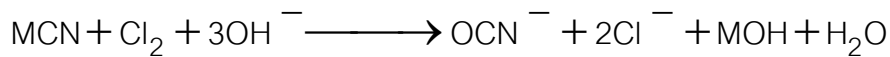
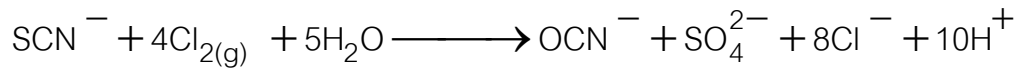
5.4.5 Alkaline Chlorination

Alkaline Chlorination เป็นวิธีบำบัดไซยาไนด์ที่สามารถใช้กับไซยาไนด์อิสระและ WAD Cyanide ในรูปของสารละลายได้ดีกว่าในรูปของน้ำทิ้งปนกากแร่ (Slurry) เนื่องจากน้ำทิ้งปนกากแร่ต้องใช้คลอรีนในปริมาณสูง โดยอาจใช้คลอรีนที่อยู่ในรูปของเหลว ในทางทฤษฎีใช้คลอรีน 2.73 กรัมต่อไซยาไนด์ 1 กรัม แต่ในทางปฏิบัติใช้คลอรีน 3-8 กรัมต่อไซยาไนด์ 1 กรัม ที่ pH สูงกว่า 10.0 เพื่อให้มั่นใจได้ว่าสารประกอบไซยาโนเจนคลอไรด์ (Cyanogen Chloride: CNCl) จะกลายเป็นไซยาเนทได้อย่างสมบูรณ์ ส่วนโลหะต่างในสารละลายจะตกตะกอนเป็นไฮดรอกไซด์ของโลหะ

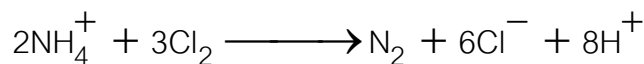
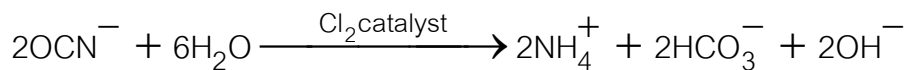
กระบวนการนี้สามารถทำได้อย่างรวดเร็ว ประหยัด และสามารถลดปริมาณไซยาไนด์ในของเสียได้ต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ใช้สารเคมีในการปรับ pH ค่อนข้างมาก ใช้คลอรีนซึ่งจัดเป็นสารพิษในปริมาณสูง และไม่สามารถทำลาย SAD Cyanide ได้



นอกจากนี้ ก๊าซคลอรีนยังทำปฏิกิริยากับไทโอไซยาเนต และสารประกอบเชิงซ้อนโลหะไซยาไนด์ ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



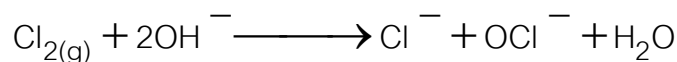
ถ้ามีก๊าซคลอรีนมากเกินไป ไซยาเนตจะทำปฏิกิริยาต่อไปจนได้ก๊าซไนโตรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



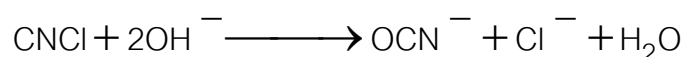
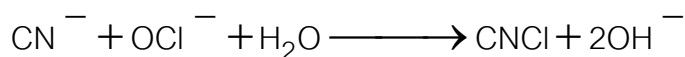
จากการใช้ก๊าซคลอรีนและไฮดรอกไซด์มากเกินไปทำให้ยากต่อการควบคุม pH ให้สูงกว่า 10

5.4.6 Hypochlorite Alkaline Chlorination

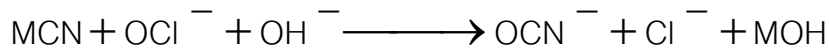
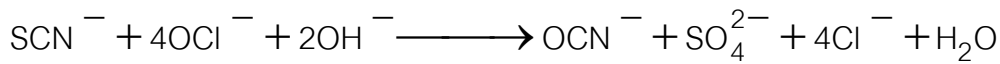
ไฮโปคลอไรต์ (Hypochlorite: OCl^-) สามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของก๊าซคลอรีน



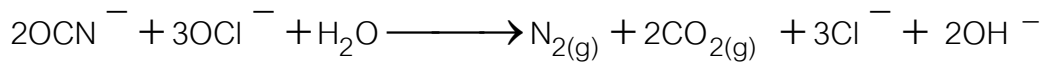
ปฏิกิริยาการทำลายไซยาไนด์โดยไฮโปคลอไรต์คล้ายกับวิธี Alkaline Chlorination



ไฮโปคลอไรต์สามารถทำปฏิกิริยากับไทโอไซยาเนตและ WAD cyanide ได้ แต่ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับ SAD Cyanide ได้



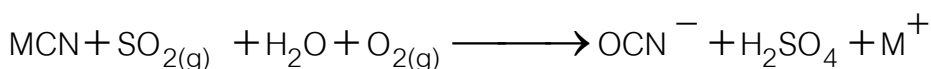
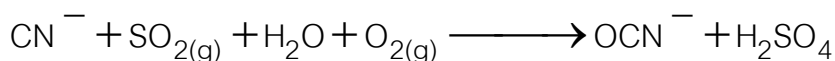
และถ้ามีไฮโปคลอไรต์มากเกินไป ไฮยาเนตจะถูกเปลี่ยนเป็นไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์



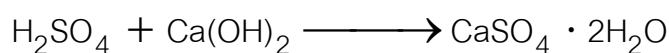
5.4.7 Inco Process

Inco Process เป็นกระบวนการบำบัดไซยาไนด์ที่ใช้สารประกอบซัลเฟอร์เป็นแหล่งกำเนิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulphurdioxide: SO_2) และเติมอากาศให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) กับไซยาไนด์อิสระและสารประกอบเชิงซ้อนโลหะไซยาไนด์หรือไทโอไซยาเนตจะได้ไซยาเนตซึ่งมีพิษน้อยกว่า และสามารถเติม cupric หรือ nickel cation เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ ส่วนเหล็กไซยาไนด์ก็จะเกิดปฏิกิริยาดกตะกอนเป็นสารประกอบโลหะเชิงซ้อนของเหล็กไซยาไนด์ ที่ pH ประมาณ 5-6 ส่วนโลหะอื่นจะตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ของโลหะ ดังนั้นปฏิกิริยาที่สำคัญในการบำบัดไซยาไนด์ด้วย Inco Process มี 3 ปฏิกิริยาที่สำคัญ ดังนี้

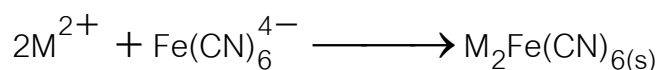
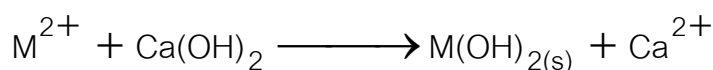
- ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) ของไซยาไนด์อิสระ WAD Cyanide และไทโอไซยาเนต



- ปฏิกิริยาการปรับสภาพความเป็นกรด (Neutralization Reaction)



- ปฏิกิริยาการตกตะกอน (Precipitation Reaction) ของเหล็กไซยาไนด์และโลหะอื่น



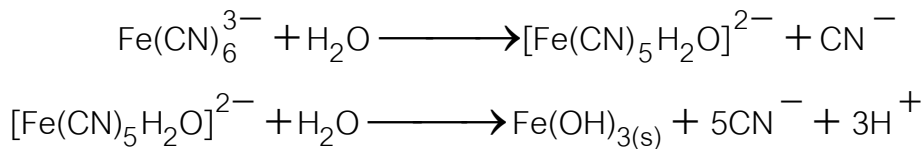
ในทางทฤษฎีใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 2.46 กรัมต่อไซยาไนด์ 1 กรัม แต่ในทางปฏิบัติใช้ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 3.5-4.5 กรัมต่อไซยาไนด์ 1 กรัม ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ใช้อาจอยู่ในรูปของกากหรือใช้โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ (Sodium Metabisulphite: Na₂S₂O₅) เป็นแหล่งกำเนิดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ก็ได้ ปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีที่ pH ประมาณ 9 ซึ่งสามารถควบคุม pH ได้โดยการเติมปูนขาว แต่จะทำให้เกิดตะกอนของไฮดรอกไซด์และยิปซัม ซึ่งยากต่อการบำบัด

5.5 Photolysis

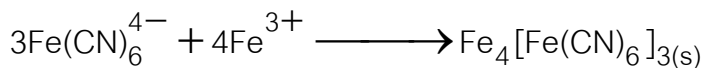
แสงเป็นปัจจัยหนึ่งที่ช่วยส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน โดยเป็นแหล่งพลังงานกระตุ้นการถ่ายเทอิเล็กตรอน การเกิดปฏิกิริยา Photolysis มี 3 แบบ คือ

5.5.1 Direct Photolysis

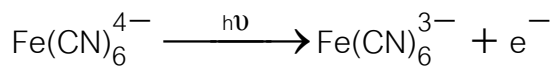
Direct Photolysis เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นโดยไม่ต้องมี Photosensitizers ซึ่งสามารถใช้ได้ดีกับ WAD และ SAD cyanide โดยเฉพาะสารประกอบเชิงซ้อน Hexacyanoferrate (III) ion [Fe(CN)₆³⁻] แต่ทำให้เกิดไซยาไนด์อิสระ



Fe(OH)₃ จะทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์อิสระและ Ferrihexacyanide กลายเป็นตะกอน Prussian Blue



ส่วน Hexacyanoferrate(II)ion [Fe(CN)₆⁴⁻] เมื่อได้รับแสงอัลตราไวโอเล็ตจะเปลี่ยนรูปเป็น Hexacyanoferrate(III)ion [Fe(CN)₆³⁻]



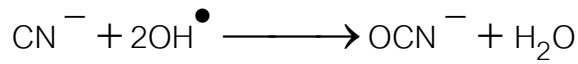
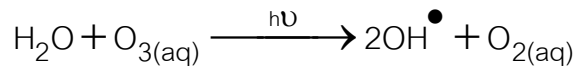
5.5.2 Homogeneous Photolysis and Photocatalysis

Homogeneous Photolysis เป็นวิธีที่ใช้สารละลายเป็นตัวรับแสง สามารถใช้ร่วมกับการทำปฏิกิริยา Chemical Oxidation เป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ทำให้ลดปริมาณการใช้สารเคมีและสามารถทำลาย SAD cyanide ได้ด้วย เช่น

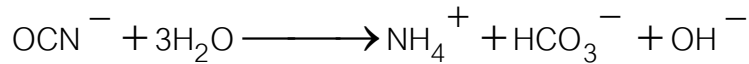
1) การใช้ Homogeneous Photolysis กับ Ozone

โอโซนสามารถทำลายได้ทั้งไซยาไนด์อิสระ WAD และ SAD Cyanide จากความเข้มข้น 1-100,000 ppm จนความเข้มข้นต่ำกว่า 0.1 ppm การเพิ่มความเข้มแสง ความเข้มข้นของโอโซนและอุณหภูมิของสารละลายจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น ให้ผลดีกว่าการใช้วิธี

Ozonation เพียงอย่างเดียว เนื่อง Hydroxyl Radical ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาไม่มี อิเล็กตรอน ทำให้สามารถรับอิเล็กตรอนจากไทโอไซยาเนท WAD และ SAD Cyanide ได้ง่าย



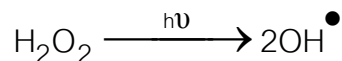
จากนั้นไซยาเนทก็จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส



หรืออาจทำปฏิกิริยา Photolytic Ozonation จนได้คาร์บอนेटไอออนและก๊าซไนโตรเจน ไนโตรที่ หรือ ไนเตรท

2) Photolytic Peroxidation Reaction

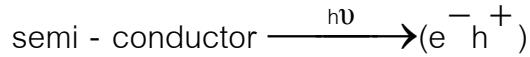
Photolytic Peroxidation Reaction เป็นปฏิกิริยาที่ใช้แสงควบคู่กับการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยให้ Hydroxyl Radical ดังปฏิกิริยา



ให้ผลการทำลายไซยาไนด์อิสระ ไทโอไซยาเนท WAD และ SAD cyanide เกือบ 100% ปฏิกิริยาการเกิด hydroxyl radical เกิดได้อย่างรวดเร็วมากจนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยังไม่ทำปฏิกิริยากับไซยาเนทและเช่นเดียวกัน ถ้าเพิ่มความเข้มข้น ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และอุณหภูมิของสารละลายก็จะเป็นการกระตุ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยา ถ้าปฏิกิริยาลิ้นสุดที่ไซยาเนทอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อไซยาไนด์ เป็น 1 : 1 ถ้าเกิดไนเตรทขึ้นอัตราส่วนจะเป็น 5 : 1 การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นวิธีที่ค่อนข้างน่าสนใจเนื่องจากค่าใช้จ่ายค่อนข้างต่ำและง่ายต่อการเก็บรักษา แต่ต้องใช้สารเคมีมากเกินพอเพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดอย่างสมบูรณ์ ทำให้ต้องทำการบำบัดสารเคมีที่มากเกินพอและยากแก่การแยกสารละลายเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่และง่ายต่อการเก็บรักษา แต่ต้องใช้สารเคมีมากเกินพอเพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดอย่างสมบูรณ์ ทำให้ต้องทำการบำบัดสารเคมีที่มากเกินพอและยากแก่การแยกสารละลายเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

5.5.3 Heterogeneous Photocatalysis

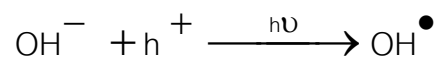
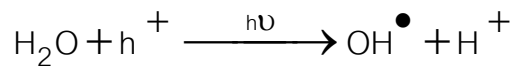
Heterogeneous Photocatalysis เป็นวิธีที่ใช้ของแข็งเป็นตัวรับแสง (Solid photosensitizer) โดยแสงจะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนใน Valence band ข้ามช่องว่างไปยัง Conductant Band ของสารกึ่งนำไฟฟ้า (Semi-Conductor) ทำให้เกิดช่องโปรตอนใน Valence Band และเกิดช่องอิเล็กตรอนใน Conductant Band



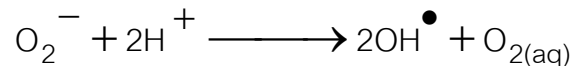
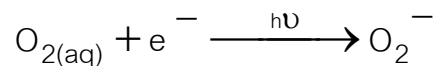
ช่องโปรตอนและอิเล็กตรอนดังกล่าวจะกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox Reaction) ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจะถูกดูดซับที่สารกึ่งตัวนำและเนื่องต่อการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ

Heterogeneous Photocatalysis ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

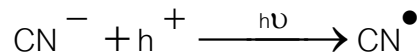
1) การสร้าง Hydroxyl Radical โดยปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction) ของน้ำหรือไฮดรอกไซด์ใน Valence band



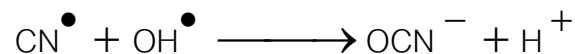
2) การสร้าง hydroxyl radical โดยปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนละลายกับอิเล็กตรอนในสภาวะถูกกระตุ้นใน Conduction band เป็น Superoxide (O_2^-)



3) การสร้าง Cynyl Radical



Hydroxyl Radical ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับ Cynyl Radical ได้ไซยาเนท



แล้วไซยาเนทก็ทำปฏิกิริยากับ Hydroxyl Radical ต่อไปตามที่ได้กล่าวมาแล้ว จากการทดสอบด้วยสเปกโตรสโคป ชี้ให้เห็นว่า ปฏิกิริยาไม่ขึ้นกับประเภทของสารกึ่งตัวนำ อย่างไรก็ตามนิยมใช้ออกไซด์ของโลหะมากกว่า เนื่องจากมีเสถียรภาพสูงกว่าสารกึ่งตัวนำประเภทอื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง TiO_2 เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีประสิทธิภาพสูง ช่องว่างอิเล็กตรอนมีความเสถียรและ Band Gap ใหญ่ 3.2 eV หรืออาจช่วยให้ช่องว่างอิเล็กตรอนเสถียรขึ้นโดยเติมแพลทินัมและโรเดียมที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ

ความเป็นพิษของไซยาไนด์

ไซยาไนด์เป็นสารประกอบที่สามารถพบได้ทั่วไปทั้งในร่างกายมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ อีกกว่า 1,000 ชนิด แต่สารประกอบไซยาไนด์ทุกรูปเป็นพิษต่อคนและสัตว์ อาจอยู่ในรูปของสารละลายหรือก๊าซ สามารถเข้าสู่ร่างกายอย่างรวดเร็วได้หลายทาง เช่น ทางลมหายใจ ทางปาก และการดูดซึมของผิวหนัง อันตรายจากการได้รับพิษไซยาไนด์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น วิธีการรับสารพิษ ความเข้มข้น และรูปของสารประกอบ พิษของไซยาไนด์มักจะเป็นอาการแบบเฉียบพลัน ปัจจุบันยังไม่มีหลักฐานใดบ่งชี้ว่าไซยาไนด์เป็นสารก่อมะเร็ง สารก่อกลายพันธุ์ หรือเกิดการสะสมในสิ่งมีชีวิตและไม่มีการถ่ายเทในห่วงโซ่อาหาร

1. ความเป็นพิษของไซยาไนด์ (Mineral and Energy, 1992)

ไซยาไนด์เป็นสารประกอบที่มีอยู่ในพืชกว่า 1,000 ชนิด ทำให้มนุษย์และสัตว์มีโอกาสได้รับไซยาไนด์ได้ง่าย ทั้งจากอาหาร กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม คัญบู่หรี และท่อไอเสียรถยนต์ ซึ่งอาจจะเป็นทางลมหายใจ ทางปาก หรือการสัมผัส สามารถแบ่งการได้รับพิษเป็น 2 แบบ ดังนี้

1.1 ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน

ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน มักเกิดกับผู้ที่ต้องทำงานที่เกี่ยวข้องกับการใช้หรือการผลิตสารประกอบไซยาไนด์ในปริมาณความเข้มข้นสูง เป็นระยะเวลาสั้น ๆ เป็นอันตรายต่อระบบสมองและหัวใจ อาจถึงตายได้ในเวลาไม่กี่นาที สามารถเข้าสู่ร่างกายได้หลายทาง ได้แก่

1.1.1 ทางลมหายใจ

ก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์จะเกิดการแลกเปลี่ยนก๊าซที่ปอด เข้าสู่กระแสเลือด ความรุนแรงของพิษขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไซยาไนด์และระยะเวลาในการสัมผัส

1.1.2 ทางผิวหนังสัมผัส

สารละลายไซยาไนด์มีสภาพเป็นเบสสูง มีฤทธิ์กัดกร่อน ถูกดูดซึมเข้าสู่ผิวหนังอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะบริเวณที่มีบาดแผล ทำให้เกิดผื่นตามผิวหนัง ไอของก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์จะทำลายเรตินาและประสาทตา ทำให้ตาบอด

1.1.3 ทางปาก

ไซยาไนด์จะดูดซึมเข้าสู่ผนังชั้นในของกระเพาะอาหารได้อย่างรวดเร็ว อัตราการดูดซึมขึ้นอยู่กับพื้นที่ว่างในกระเพาะอาหาร นอกจากนี้กรดในกระเพาะอาหารยังทำให้เกิดการแตกตัวของสารประกอบไซยาไนด์ได้เพิ่มขึ้น

1.2 ความเป็นพิษแบบเรื้อรัง

ความเป็นพิษแบบเรื้อรังมักเกิดจากการรับประทานอาหารที่มีไซยาไนด์ในปริมาณความเข้มข้นต่ำแต่ได้รับเป็นระยะเวลานาน มักไม่ค่อยพบความเป็นพิษแบบเรื้อรังและไม่ทำให้เป็นอันตรายถึงตายได้ เนื่องจากร่างกายมนุษย์มีกลไกการลดพิษของไซยาไนด์ทำให้ไม่เกิดการสะสมในร่างกาย แต่จะส่งผลกระทบต่อระบบการหายใจ หายใจติดขัด เจ็บหน้าอก ปวดศีรษะ อาเจียน ต่อมไทรอยด์โต และยังมีผลต่อการเกิดโรคต่างๆที่เกี่ยวกับระบบการหายใจ สมอ และการมองเห็น เช่น *Demyelination, Lesions of the Optic Nerve, Ataxia, Hypertonia, Leber's Optic Atrophy*, คอพอกและยังสามารถยับยั้งการทำงานของต่อมไทรอยด์ แต่ไม่มีหลักฐานใดบ่งชี้ว่าไซยาไนด์เป็นสารก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ (Mutagenic) สารก่อมะเร็ง (Carcinogenic) หรือทำให้เกิดความผิดปกติต่อการเจริญเติบโตของทารกในครรภ์ (Teratogenic)

2. ปัจจัยที่มีผลต่อระดับความเป็นพิษของไซยาไนด์ (Moran, Online 2000)

ระดับความเป็นพิษของไซยาไนด์ต่อร่างกายมนุษย์ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ ดังนี้

2.1 ความสามารถในการแตกตัวของสารประกอบไซยาไนด์

ระดับความเป็นพิษของไซยาไนด์ขึ้นอยู่กับความสามารถในการแตกตัวของสารประกอบไซยาไนด์ โดยแบ่งระดับความเป็นพิษได้ 3 ระดับ ดังนี้

2.1.1 ระดับความเป็นพิษสูง

ถ้าเกิดการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเจนไซยาไนด์ (Hydrogen Cyanide: HCN) โซเดียมไซยาไนด์ (Sodium Cyanide: NaCN) โพแทสเซียมไซยาไนด์ (Potassium Cyanide: KCN) และแคลเซียมไซยาไนด์ (Calcium Cyanide: CaCN)

2.1.2 ระดับความเป็นพิษปานกลาง

ถ้าเกิดการแตกตัวของสารประกอบกลุ่มที่แตกตัวได้ยาก เช่น *Acrylonitrile Silver Cyanide* และ *Cyanogen Bromide*

2.1.3 ระดับความเป็นพิษต่ำ

กลุ่มของสารประกอบที่ไม่แตกตัวในร่างกาย เช่น *Cyanoacrylates, Potassium Ferricyanide* และ *Prussian Blue (Ferri-Ferrocyanide)* จะมีระดับความเป็นพิษต่ำกว่าสารประกอบที่แตกตัวได้เร็ว

2.2 ความเข้มข้นของสารประกอบไซยาไนด์และวิธีการได้รับสารพิษ

2.2.1 ทางปาก

ถ้าได้รับไซยาไนด์ทางปาก (Ingestion) ค่า Lethal Dose 50% (LD_{50}) เท่ากับ 50-200 ppm หรือ 1-3 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักร่างกาย (กิโลกรัม)

2.2.2 ทางลมหายใจ

ถ้าได้รับไซยาไนด์ทางลมหายใจ (Inhalation) ค่า Lethal Concentration 50% (LC_{50}) เท่ากับ 100-300 ppm จะตายภายในเวลา 10-60 นาที แต่ถ้าได้รับไซยาไนด์ 2,000 ppm จะตายภายใน 1 นาที

2.2.3 ทางผิวหนัง

ถ้าได้รับไซยาไนด์ทางผิวหนัง (Contact) ค่า LD_{50} เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักร่างกาย (กิโลกรัม)

2.3 ปัจจัยอื่น ๆ

นอกจากปัจจัยสำคัญดังกล่าวข้างต้นแล้ว ระดับความเป็นพิษยังขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ อีกหลายประการ เช่น

2.3.1 อัตราเร็วในการได้รับสารพิษ

เนื่องจากกลไกการกำจัดพิษไซยาไนด์ของร่างกายสามารถเกิดได้อย่างมีประสิทธิภาพแต่ค่อนข้างช้า ดังนั้นถ้าร่างกายได้รับไซยาไนด์ในปริมาณสูงต่อครั้งจะทำให้ร่างกายไม่สามารถกำจัดไซยาไนด์ได้ทัน

2.3.2 ระดับไอโอดีน

เนื่องจากปริมาณของไทโอไซยาเนตซึ่งเกิดจากกลไกการลดพิษไซยาไนด์ของร่างกายส่งผลกระทบต่อการทำงานของต่อมไทรอยด์ และโดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าร่างกายอยู่ในสภาวะที่ขาดไอโอดีน ทั้งไซยาไนด์และไทโอไซยาเนตทำให้เกิดอาการโรคคอพอกและทำให้ปริมาณฮอร์โมน *Thyroid Stimulating Hormone (TSH)* เพิ่มขึ้นในรายที่ขาดไอโอดีน

2.3.3 กรดอะมิโนกลุ่มซัลเฟอร์ (Sulfur Amino Acid) ในร่างกาย

เนื่องจากกลไกการกำจัดพิษไซยาไนด์ของร่างกายต้องการ *Sulfur Donor* เช่น *Cystine* และ *Cysteine persulfide* เป็นต้น ซึ่งเป็นอีกหนึ่งกลไกที่ช่วยลดพิษไซยาไนด์ในร่างกาย

2.3.4 ปริมาณเอนไซม์

ปริมาณเอนไซม์ที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาการกำจัดพิษของไซยาไนด์ เช่น *Rhodanese*, *Thiosulfate Reductase*, *Mercaptopyruvate Sulfrutransferase*

2.3.5 ลักษณะทั่วไปของผู้ป่วย

ลักษณะทั่วไปของผู้ป่วย เช่น อายุ เพศ น้ำหนัก ระดับความเครียด และอื่น ๆ ซึ่งต้องพิจารณาเป็นรายบุคคล

ตารางที่ 2 ความเป็นพิษของสารประกอบไซยาไนด์

สารประกอบ	สูตรทางเคมี	สถานะ	TLV ^{/1}	LD ₅₀ ^{/2}
Hydrogen cyanide	HCN	Gas	5 mg/m ³	1 mg/kg human
Potassium cyanide	KCN	Solid	5 mg/m ³	10 mg/kg rat 2.85 mg/kg human
Sodium cyanide	NaCN	Solid	5 mg/m ³	6.44 mg/kg rat 2.85 mg/kg human
Cyanogen chloride	CNCl	Gas	0.3 ppm	
Sodium cyanate	NaCNO	Solid		260 mg/kg mice
Potassium cyanate	KCNO	Solid		320 mg/kg mice
Potassium ferricyanide	K ₃ [Fe(CN) ₆]	Solid		1,600 mg/kg rat

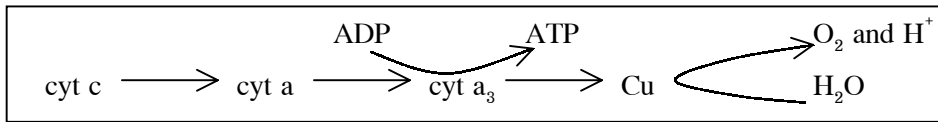
TLV^{/1} = Threshold Limit Values

LD₅₀^{/2} = Lethal Dose 50% of population

ที่มา : U.S. EPA (2000)

3. การกลไกเกิดพิษของไซยาไนด์ (USAMRICD, 2002)

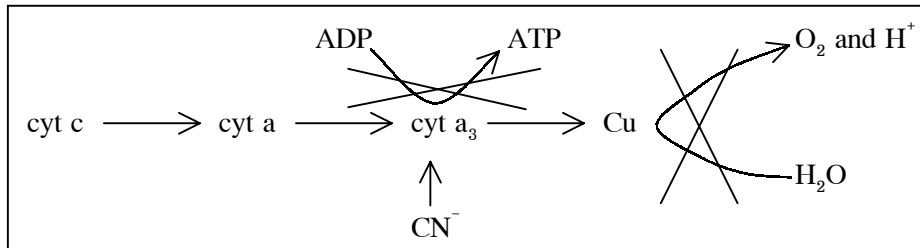
เมื่อไซยาไนด์เข้าสู่กระแสเลือด จะรวมตัวกับ Fe³⁺ ในไซโตโครมออกซิเดส (Cytochrome Oxidase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ช่วยในการถ่ายทอดอิเล็กตรอนในไมโทคอนเดรียของเซลล์ในระหว่างการสังเคราะห์ ATP (Adenosin Triphosphate) ไซยาไนด์จะสามารถสร้างพันธะกับไซโตโครมออกซิเดสได้ ทั้งในรูปออกซิไดซ์ และ รีดิวซ์ อัตราการเกิดปฏิกิริยากับไซโตโครมออกซิเดสในรูปออกซิไดซ์ช้ากว่าแต่ได้พันธะที่แข็งแกร่งกว่าการทำปฏิกิริยากับไซโตโครมออกซิเดสในรูปรีดิวซ์ เมื่อเอนไซม์ดังกล่าวไม่สามารถทำหน้าที่ได้ เซลล์ไม่สามารถใช้ออกซิเจนในเลือดได้ ทำให้เกิดภาวะพร่องออกซิเจน (Cytotoxic Hypoxia หรือ Cellular Asphyxiation) การขาดออกซิเจนทำให้กระบวนการเผาผลาญสารอาหาร (Metabolism) เปลี่ยนจากกระบวนการใช้ออกซิเจน (Aerobic) เป็นกระบวนการที่ไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic) ทำให้เกิดการสะสมแลคเตทในเลือด (Lactate Acidosis) จากการเกิดภาวะ Hypoxia และ Lactate Acidosis จะทำให้เกิดการกดระบบประสาทส่วนกลาง มีผลให้การหายใจหยุดชะงักและถึงตายได้



(ATP = Adenosine Triphosphate, ADP = Adenosine Diphosphate , cyt = Cytochrome oxidase)

ที่มา : USAMRICD (2002)

รูปที่ 3 การสังเคราะห์ ATP



(ATP = Adenosine Triphosphate, ADP = Adenosine Diphosphate , cyt = Cytochrome oxidase)

ที่มา : USAMRICD (2002)

รูปที่ 4 การขัดขวางการสร้าง ATP ของไซยาไนด์

4. กลไกการกำจัดไซยาไนด์ของร่างกาย (USAMRICD, Online 2002; Baskin and Brewer Online 1997)

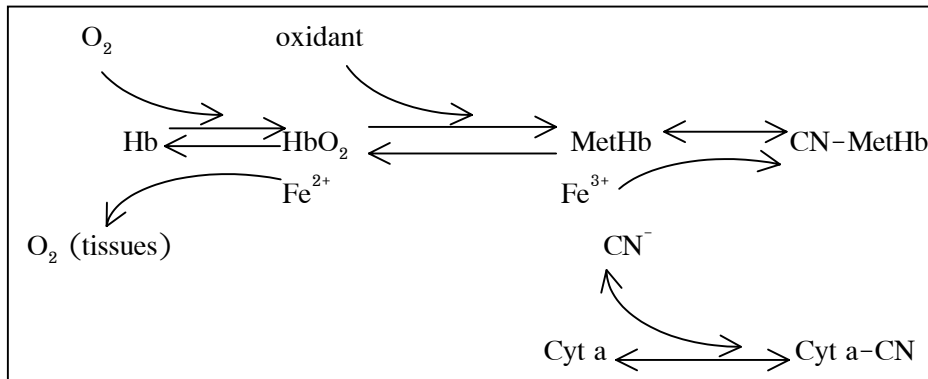
ในชีวิตประจำวันทั้งมนุษย์และสัตว์มีโอกาสสัมผัสกับสารประกอบไซยาไนด์อยู่ตลอดเวลาเนื่องจากอาหารหลายชนิดมีสารประกอบไซยาไนด์เป็นส่วนประกอบ และนอกจากนี้อุตสาหกรรมหลายอย่างที่ต้องใช้สารประกอบไซยาไนด์ในกระบวนการผลิต เช่น อุตสาหกรรมพลาสติก เหล็ก และเหมืองทองคำและโลหะมีค่าอื่น ๆ ถ้าได้รับไซยาไนด์ในปริมาณเล็กน้อย ร่างกายมีกลไกที่สามารถกำจัดไซยาไนด์ออกได้

4.1 กลไกป้องกันไซยาไนด์เข้าสู่เซลล์

4.1.1 การทำปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบไซยาไนด์กับเหล็ก Fe³⁺ ในเมทฮีโมโกลบิน (Methemoglobin)

ร่างกายสามารถกำจัดไซยาไนด์โดยไซยาไนด์จะทำปฏิกิริยากับเมทฮีโมโกลบิน ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างฮีโมโกลบินกับสารออกซิไดซ์ เช่น ไนไตรท์ (Nitrite: NO₂) ไดเมทิลอะมิโนฟีโน (Dimethylaminopheno:DMAP) และ อะมิโนโพรไพโอฟีนอน (Aminopropiophenone:PAPP) เป็นกลไกการป้องกันการเข้าสู่เซลล์ของไซยาไนด์ที่สำคัญ ไซยาไนด์จะสามารถจับ Fe³⁺ ในเมทฮีโมโกลบิน (Methemoglobin) ได้ดีกว่า Fe³⁺ ใน Cytochrome Oxydase ดังนั้นไซยาไนด์จึงทำปฏิกิริยากับ Fe³⁺ ในเมทฮีโมโกลบิน กลายเป็นไซยาโนเมทฮีโมโกลบิน (Cyanomethemoglobin) ซึ่งไม่เป็นพิษต่อร่างกาย เป็นสารประกอบที่มีเสถียรภาพสูงกว่า

ไซยาไนด์ ดังนั้น เมื่อไซยาไนด์อยู่ในร่างกายในรูปสารประกอบดังกล่าวก็จะทำให้ปริมาณไซยาไนด์อิสระในเลือดลง ดังแผนภาพ

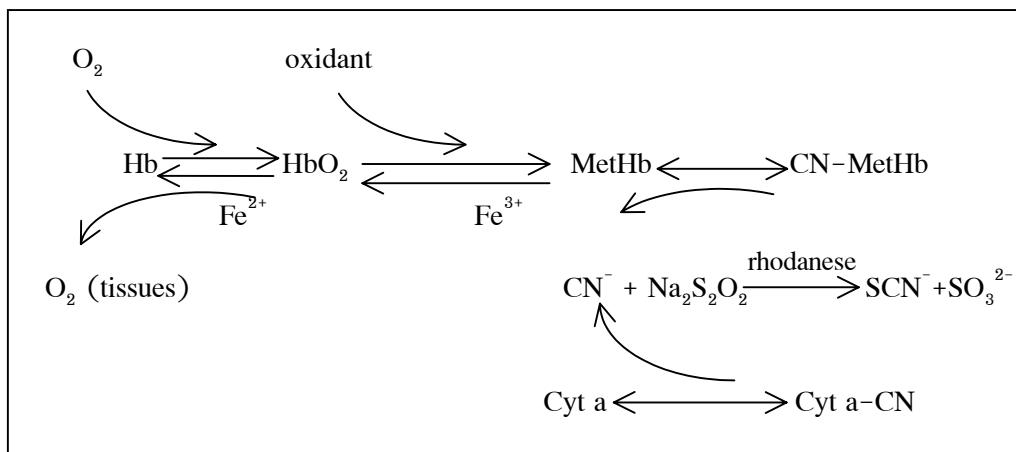


(Hb = Hemoglobin, MetHb = Methemoglobin)

ที่มา : USAMRICD (2002)

รูปที่ 5 กลไกการป้องกันไซยาไนด์เข้าสู่เซลล์ของเมทฮีโมโกลบิน

จากนั้นไซยาไนด์เมทฮีโมโกลบินจะค่อยแตกตัวให้ไซยาไนด์ที่ละน้อยเพื่อให้ไทโอซัลเฟตในร่างกายทำหน้าที่กำจัดไซยาไนด์ต่อไป ดังแผนภาพ



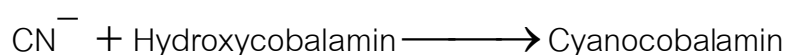
(Hb = Hemoglobin, MetHb = Methemoglobin)

ที่มา : USAMRICD (2002)

รูปที่ 6 กลไกการกำจัดไซยาไนด์ของไทโอซัลเฟต

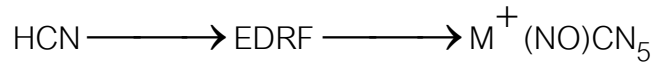
4.1.2 การทำปฏิกิริยาระหว่างไซยาไนด์กับไฮดรอกซีโคบาลามิน (Hydroxycobalamin)

ไซยาไนด์สามารถทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซีโคบาลามิน (Hydroxycobalamin) ซึ่งเป็นวิตามินบี12 ตัวหนึ่ง กลายเป็นวิตามินบี12 อีกตัวหนึ่ง คือ ไซยาโนโคบาลามิน (Cyanocobalamin) โดยไม่ต้องมีเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



4.1.3 การทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ในร่างกาย เช่น

- การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับ *Endothelial-Derived Relaxing Factor (EDRF)* ซึ่งทำหน้าที่เสมือนไนตริก ออกไซด์



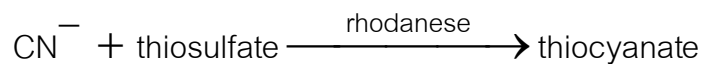
- การขัดขวางการเข้าสู่เซลล์โดย *Carbonic Anhydrase*
- การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะหนักหรือสารอินทรีย์อื่นในร่างกาย เช่น โคบอลต์ (Cobalt) และโมลิบดีนัม (Molybdenum)

4.2 กลไกการกำจัดไซยาไนด์ภายในเซลล์

กลไกการกำจัดไซยาไนด์ภายในเซลล์ โดยการทำปฏิกิริยากับสารเคมีบางอย่างในร่างกาย ได้สารใหม่ที่มีพิษน้อยกว่าไซยาไนด์ เช่น การเกิดปฏิกิริยาโดยการกระตุ้นของเอนไซม์ *Rhodanese, Mercaptopyruvate Sulfurtransferase, Thiosulfate Reductase, Cystathionase* และ *Albumin* (ทำหน้าที่เสมือนเอนไซม์กระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาการลดพิษด้วยสารประกอบซัลเฟอร์)

4.2.1 การทำปฏิกิริยากับไทโอซัลเฟต (Thiosulfate)

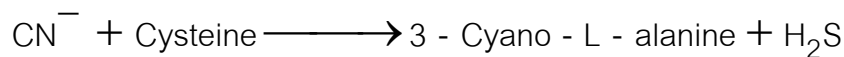
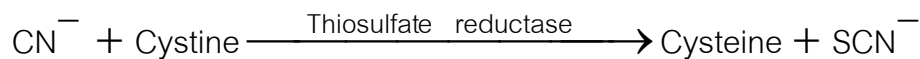
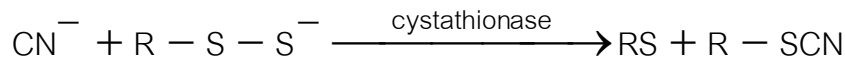
การกำจัดไซยาไนด์โดยการเปลี่ยนรูปเป็นไทโอไซยาเนตเป็นกลไกการกำจัดไซยาไนด์ที่สำคัญของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ไซยาไนด์ประมาณ 60-80% จะถูกกำจัดโดยวิธีนี้ โดยไซยาไนด์จะทำปฏิกิริยากับไทโอซัลเฟต (Thiosulfate) ในร่างกายกลายเป็นไทโอไซยาเนต (Thiocyanate: SCN^-) โดยการกระตุ้นของเอนไซม์ *Rhodanese, 3-Mercaptopyruvate Sulfurtransferase* หรือ *Thiosulfate Reductase* ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่พบได้ทั่วไปในร่างกายของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม แต่เอนไซม์ *Rhodanese* ที่อยู่ในเนื้อเยื่อตับในส่วนของไมโทคอนเดรีย (Mitochondria) จะทำหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด



ไทโอไซยาเนตจะถูกขับออกทางปัสสาวะโดยใช้เวลาหลายวัน เนื่องจากเอนไซม์ในร่างกายทำงานได้ค่อนข้างช้าและปริมาณไทโอซัลเฟตในร่างกายค่อนข้างต่ำ นอกจากนี้อัตราการเกิดปฏิกิริยาในแต่ละคนหรือในสิ่งมีชีวิตที่ต่างชนิดกันก็แตกต่างกัน แม้ว่าไทโอไซยาเนตจะมีพิษน้อยกว่าไซยาไนด์ถึง 7 เท่า แต่อาจเกิดการสะสมในเนื้อเยื่อและมีผลต่อการทำงานของต่อมไทรอยด์ (Thyroid Gland) และบางครั้งไทโอไซยาเนตก็จะถูกออกซิไดซ์กลับมาเป็นซัลเฟตและไซยาไนด์ในเลือดโดยการเร่งปฏิกิริยาของฮีโมโกลบินซึ่งทำหน้าที่เหมือน *Peroxidase* ได้อีก แสดงว่าไซยาไนด์และไทโอไซยาเนตจะอยู่ในระบบสมดุล ในภาวะปกติของเหลวในร่างกายมนุษย์จะมีอัตราส่วนของไซยาไนด์ต่อไทโอไซยาเนตเป็น 1:1,000

4.2.2 การทำปฏิกิริยากับสารประกอบกลุ่มที่ให้ซัลเฟอร์ (Sulfane Sulfur Donor)

ปัจจัยสำคัญต่อกลไกการกำจัดไซยาไนด์ในร่างกาย คือ สารประกอบกลุ่มที่ให้ซัลเฟอร์ เช่น Polythionate, Thiosulfonate, Persulfide, Polysulfide, Disulfide และสารประกอบซัลเฟอร์ โดยมีเอนไซม์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ *Rhodanese*, *Mercaptopyruvate Sulfurtransferase*, *Thiosulfate Reductase*, *Cystathionase* และ *Albumin* เช่น



5. ผลกระทบของไซยาไนด์ต่อสิ่งมีชีวิต (International Cyanide Management Code, Online 2002)

5.1 ผลกระทบต่อมนุษย์

ไซยาไนด์เป็นสารเคมีที่ส่งผลกระทบต่อระบบการทำงานส่วนต่างๆ ของร่างกายหลายระบบ เช่น

- ระบบเลือด ทำให้ความดันเลือดต่ำ
- ระบบหัวใจ ทำให้อัตราการเต้นของหัวใจไม่ปกติ
- ระบบการหายใจ ทำให้การหายใจขัดข้อง
- ระบบประสาท ทำให้เกิดอาการมึนงง ชาตสติ
- ระบบสายตา ทำให้ประสิทธิภาพการมองเห็นลดลง
- ระบบการเผาผลาญสารอาหาร ทำให้การสร้างพลังงานลดน้อยลง

ความรุนแรงของอาการจากการได้รับพิษไซยาไนด์ขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นชนิดของสารประกอบ ปริมาณการดูดซับ และระยะเวลาในการสัมผัส ถ้ามีความเข้มข้นสูงอาจถึงตายได้ภายในเวลาไม่กี่นาที

- อาการขั้นไม่รุนแรง จะมีอาการอ่อนเพลีย หายใจขัดข้อง ปวดศีรษะ หน้ามืด วิงเวียน กระวนกระวายและอาเจียน ถ้าได้รับในปริมาณไม่มากนัก เมื่อเคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกจากบริเวณที่สัมผัสไซยาไนด์ ก็จะมีอาการดีขึ้น
- อาการขั้นรุนแรง อาจทำให้การหายใจหยุดชะงัก หหมดสติ และอาจถึงตายได้

5.2 ผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ

สิ่งมีชีวิตในน้ำที่จะได้รับผลกระทบจากพิษของไซยาไนด์จะเป็นกลุ่มของสัตว์น้ำโดยเฉพาะอย่างยิ่งต่อปลาซึ่งเป็นสัตว์ที่ไวต่อความเป็นพิษของไซยาไนด์ที่สุด เช่น ความเข้มข้นของไซยาไนด์ 5-7.2 ไมโครกรัมต่อลิตร มีผลทำให้ว่ายน้ำช้าลง ยับยั้งระบบสืบพันธุ์ ความเข้มข้นของไซยาไนด์ 20-76 ไมโครกรัมต่อลิตร ทำให้ตาย และถ้าความเข้มข้นสูงกว่า 200 ไมโครกรัมต่อลิตร จะเกิดความเป็นพิษอย่างรวดเร็ว ส่วนสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง ที่ความเข้มข้นของไซยาไนด์ประมาณ 30-100 ไมโครกรัมต่อลิตร ทำให้ถึงตายได้ นอกจากนี้ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน อายุ (Life Stage) และสภาพของสิ่งมีชีวิตก็มีผลต่อระดับความเป็นพิษของไซยาไนด์เช่นกัน ส่วนสาหร่ายและพืชน้ำสามารถทนทานต่อระดับความเป็นพิษของไซยาไนด์ได้สูงกว่าปลาและสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังและจะไม่แสดงผลกระทบใดเมื่อความเข้มข้นของไซยาไนด์ 160 มิลลิกรัมต่อลิตรหรือมากกว่านั้น ปริมาณไซยาไนด์ที่อยู่ในระดับที่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำแต่จะไม่มีผลกระทบต่อพืชน้ำ

5.3 ผลกระทบต่อนก

นกเป็นสัตว์ที่มีความไวต่อพิษของไซยาไนด์รองลงมาจากปลา เนื่องจากนกสามารถเปลี่ยนไซยาไนด์เป็นไทโอไซยาเนทได้อย่างรวดเร็ว หลังจากกินอาหารหรือน้ำที่มีการปนเปื้อนของไซยาไนด์ภายใน 1.5-5 นาที หรือ มากกว่า 10 นาทีในนกชนิดที่มีความทนทานสูง จะมีอาการหอบ กระพริบตา น้ำลายไหลและเชื่องซึม แต่ถ้าได้รับในปริมาณความเข้มข้นสูงจะมีอาการหายใจขัด และอาจถึงตายได้ภายใน 15-30 นาที นกสามารถกินน้ำที่มี WAD Cyanide ได้โดยไม่เกิดอันตรายในทันที แต่ WAD Cyanide จะไปแตกตัวในกระเพาะซึ่งมีสภาพเป็นกรดและทำให้เกิดไซยาไนด์อิสระที่เป็นพิษ ค่า LD₅₀ ของนกจะอยู่ระหว่าง 0.8-1.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักตัว

5.4 ผลกระทบต่อพืช

ในปี 1993 ได้มีการทำการทดลองปลูกพืชในบ่อกักเก็บกากแร่ ปรากฏว่าไซยาไนด์ในบ่อกักเก็บกากแร่ไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช ในส่วนรายละเอียดคงต้องมีการศึกษาวิจัยต่อไป

5.5 ผลกระทบต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม

พิษของไซยาไนด์ต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมค่อนข้างพบได้บ่อยมาก เนื่องจากพืชจำนวนมากมีสารประกอบไซยาไนด์ (Cyanogenic Plant) เช่น ข้าวฟ่าง ข้าวโพด กะหล่ำปลี เมล็ดอัลมอนด์ และมันสำปะหลัง เป็นต้น ความเข้มข้นของสารประกอบไซยาไนด์ในพืชเหล่านี้ขึ้นอยู่กับฤดูกาล เช่น ในช่วงฤดูใบไม้ผลิความเข้มข้นของสารประกอบไซยาไนด์ก็จะสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้สภาพอากาศที่แห้งแล้งยังเป็นปัจจัยกระตุ้นให้เกิดการสะสมสาร Cyanogenic Glycoside ในพืชบางชนิด ค่า LD₅₀ ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมจะอยู่ในช่วง 2.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักตัว (สุนัขจิ้งจอก) และ 6-10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักตัว (หนูขาว) เมื่อได้รับพิษแบบเฉียบพลัน สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมจะแสดงอาการภายใน 10 นาทีหลังจากการกินอาหารที่มีการปนเปื้อนของไซยาไนด์ จะมีอาการกล้ำเนื้อ กระตุก น้ำลายไหล ปัสสาวะ การหายใจติดขัด การทำงานของกล้ามเนื้อไม่ประสานกัน หอบ และชัก ดูเหมือนว่าวัวจะเป็นสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่ไวต่อพิษของไซยาไนด์ที่สุด รองลงมาได้แก่ แกะ ม้า และ หมู ส่วนกวางจะเป็นสัตว์ที่ทนต่อพิษของไซยาไนด์ได้เป็นอย่างดี

6. มาตรฐานสากล

6.1 ค่ามาตรฐานไซยาไนด์ (กรมควบคุมมลพิษ, กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, ออนไลน์ 2547; OSHA, Online 2002)

ค่ามาตรฐานของสารประกอบไซยาไนด์ในรูปของ CN และ HCN ที่กำหนดขึ้นของแต่ละสถาบันจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับเกณฑ์ที่ใช้ในการกำหนดค่ามาตรฐาน เช่น

- ความปลอดภัยในการทำงาน OSHA PEL (The Occupational Safety and Health Administration Permissible Exposure Limit) ACGIH TLV (The American Conference of Government Industrial Hygienists) กำหนดปริมาณไซยาไนด์ที่ร่างกายสามารถรับได้ไม่เกิน 10 ppm หรือ 11 mg/m³ สำหรับการทำงาน 8 ชั่วโมง
- ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน OSHA PEL (The Occupational Safety and Health Administration Permissible Exposure Limit) ACGIH TLV (The American Conference of Government Industrial Hygienists) กำหนดปริมาณไซยาไนด์ที่ร่างกายสามารถรับได้ทางผิวหนังไม่เกิน 4.7 ppm หรือ 5 mg/m³ ทุกๆ 15 นาที
- ความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตอื่น U.S. EPA (Environmental Protection Agency) กำหนดปริมาณไซยาไนด์สำหรับสัตว์น้ำจืดไว้ไม่เกิน 5.2 ไมโครกรัมต่อลิตร และสำหรับสัตว์น้ำเค็มและสัตว์ป่าไม่เกิน 1.0 ไมโครกรัมต่อลิตร มาตรฐานของประเทศไทย กำหนดปริมาณไซยาไนด์ในแหล่งน้ำใต้ดินและแหล่งน้ำผิวดินไว้ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้ยังกำหนดปริมาณไซยาไนด์ในอากาศ โดยกำหนดปริมาณไซยาไนด์ในฝุ่น(CN)ไว้ไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และกำหนดปริมาณไซยาไนด์ในอากาศ (HCN) ไว้ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร

6.2 ค่ามาตรฐานสารประกอบไซยาไนด์รูปอื่น (Moran, Online 2000)

ค่าที่กำหนดของแต่ละสถาบันเป็นการกำหนดปริมาณไซยาไนด์ในรูปไซยาไนด์อิสระ แต่ไม่ได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานสำหรับสารประกอบไซยาไนด์ในรูปอื่น อย่างไรก็ตามได้มีการวิจัยหลายท่านที่พยายามทำการทดลองความเป็นพิษของสารประกอบไซยาไนด์ในรูปอื่น เช่น

6.5.1 สารประกอบไซยาไนด์เชิงซ้อนกับโลหะ (Metal Cyanide Complexes)

สารประกอบไซยาไนด์เชิงซ้อนกับโลหะจัดเป็นสารประกอบไซยาไนด์ที่เป็นพิษน้อยกว่าไซยาไนด์ในรูปอื่น อย่างไรก็ตามสารประกอบเหล่านี้ก็อาจแตกตัวให้สารประกอบไฮโดรเจนไซยาไนด์ ได้ ซึ่งทำให้เกิดความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิต นอกจากนี้สารประกอบโลหะไซยาไนด์บางชนิดยังมีความเป็นพิษโดยตัวของโลหะเอง เช่น สารประกอบเงิน ทองแดง และนิกเกิลไซยาไนด์ หรือแม้แต่เหล็กไซยาไนด์ซึ่งไม่เป็นพิษแต่เมื่อสัมผัสกับแสงแดดก็จะแตกตัวให้ไซยาไนด์อิสระ Ingles และ Scott พบว่าปริมาณความเข้มข้นของสารประกอบไซยาไนด์เชิงซ้อนกับโลหะต่อไปนี้จะทำให้เกิดความเป็นพิษแบบเฉียบพลันต่อสัตว์น้ำ

6.5.2 สารประกอบไซยาไนด์อินทรีย์ (Organic Cyanide Compound)

สารประกอบไซยาไนด์อินทรีย์เป็นสารประกอบไซยาไนด์ที่มีความหลากหลายมากความเป็นพิษก็จะแตกต่างกันตามแต่ละชนิด เช่น Malano Nitrile ซึ่งใช้ในการแยกสกัดทองคำจากสินแร่มีความเป็นพิษเช่นเดียวกับไซยาไนด์อิสระ

ตารางที่ 3 ความเข้มข้นของสารประกอบไซยาไนด์ที่ก่อให้เกิดพิษต่อสิ่งมีชีวิต

สารประกอบ	ระดับความเข้มข้น (mg/l)
Sodium cyanide	0.02-0.3
Potassium cyanide	0.02-0.3
Zinc cyanide	0.02-0.3
Cadmium cyanide	0.02-0.3
Copper cyanide	0.4-4.0
Nickel cyanide	0.4 (pH 6.5)-730 (pH 8.0)
Iron cyanide	300 (in darkness) less than 0.2 (in light)
Iron cyanide (Environmental Australia 1998)	860-1,210 (in dark) 35 (in light)

ที่มา : Moran (2000)

6.5.3 ไซยาโนเจน คลอไรด์ (Cyanogen Chloride)

ไซยาโนเจนคลอไรด์เป็นสารตัวกลาง (Intermediate Compound) ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างไฮโปคลอไรต์ (Hypochlorite) กับไซยาไนด์ในสภาพที่เป็นเบส ก็มีความเป็นพิษต่อปลาสูงกว่าไซยาไนด์อิสระ

6.5.4 ไซยาเนท (Cyanate)

ไซยาเนทเป็นสารประกอบหลักที่เกิดจากกระบวนการลดพิษของไซยาไนด์และสามารถคงอยู่ในน้ำได้ เป็นพิษต่อปลาเทราต์ ที่ระดับความเข้มข้น 13-82 มิลลิกรัมต่อลิตร

6.5.5 ไทโอไซยาเนท (Thiocyanate)

ไทโอไซยาเนทเป็นพิษต่อมนุษย์ที่ระดับความเข้มข้นเกินกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ปกติคนที่ไม่สูบบุหรี่จะมีไทโอไซยาเนท 1-4 มิลลิกรัมต่อลิตรในน้ำเลือดส่วนคนที่สูบบุหรี่จะมีประมาณ 3-12 มิลลิกรัมต่อลิตร) เป็นพิษต่อปลาที่ระดับความเข้มข้น 90-200 มิลลิกรัมต่อลิตร และ เป็นพิษต่อปลา บรูก เทราต์ ที่ระดับความเข้มข้น 24-70 มิลลิกรัมต่อลิตร

6.5.6 คลอรามีน (Chlormine)

คลอรามีนเป็นผลจากกระบวนการ Alkaline Chlorination มีความเป็นพิษน้อยกว่าไซยาไนด์ แต่มักมีความเข้มข้นสูงกว่า U.S. EPA วิเคราะห์ปริมาณคลอรามีนในรูปของคลอรีนทั้งหมด (Residual Chlorine Concentration) สำหรับสัตว์น้ำจืดไม่ควรเกิน 11-19 ไมโครกรัมต่อลิตร

6.5.7 แอมโมเนีย (Ammonia)

U.S. EPA รายงานความเป็นพิษของแอมโมเนียต่อปลาอยู่ที่ความเข้มข้น 0.083-4.6 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังมีบางรายงานกล่าวว่าระดับความเป็นพิษของสารประกอบที่เกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างไซยาไนด์กับแอมโมเนียซึ่งร้ายแรงกว่าความเป็นพิษของสารประกอบแต่ละชนิดอีก

7 การปฐมพยาบาลและการรักษาผู้ได้รับพิษไซยาไนด์ (Baskin and Brewer, Online 1997; Bhattacharya, Online 2000)

7.1 การเคลื่อนย้ายผู้ป่วย

ผู้ป่วยที่ได้รับพิษไซยาไนด์ควรได้รับการเคลื่อนย้ายออกจากบริเวณที่มีการปนเปื้อนของไซยาไนด์ไปในบริเวณที่มีอากาศถ่ายเทสะดวกและทำความสะอาดร่างกาย

7.2 การปฐมพยาบาล

ผู้ป่วยที่ได้รับพิษไซยาไนด์ควรได้รับการปฐมพยาบาลอย่างถูกต้องก่อนนำตัวส่งแพทย์ โดยการปฐมพยาบาลเบื้องต้นเริ่มจากการดูว่าผู้ป่วยหมดสติหรือไม่ เป็นการรักษาแบบประคับประคอง ต้องระวังเรื่องการหายใจ ถ้าผู้ป่วยมีภาวะหายใจล้มเหลวต้องช่วยหายใจ

- ถ้ายังไม่หมดสติและได้รับพิษโดยการกิน ให้ทำให้อาเจียน แล้วให้ออกซิเจน 100% และทำความสะอาดร่างกายและเสื้อผ้าที่เปื้อนไซยาไนด์
- ถ้าผู้ป่วยหมดสติและไม่หายใจให้ใช้เครื่องช่วยหายใจแล้วรีบไปพบแพทย์ด่วน

7.3 การรักษาเฉพาะทาง

7.3.1 ยารักษาพิษไซยาไนด์

ยาที่ให้ผลการรักษาผู้ป่วยที่ได้รับพิษจากไซยาไนด์มีหลายชนิดโดยแบ่งเป็นกลุ่ม ๆ ได้ดังนี้

1) กลุ่มยาที่สร้างเมทฮีโมโกลบิน (Methemoglobin Former)

กลุ่มยาที่สร้างเมทฮีโมโกลบินซึ่งเป็นสารที่จับกับไซยาไนด์ได้ดีกว่าไซโตโครมออกซิเดส ทำให้ร่างกายสามารถกลับเข้าสู่กระบวนการใช้ออกซิเจน (Aerobic Metabolism) แต่ในการใช้ยารักษาในกลุ่มนี้จะทำให้หลอดเลือดขยายตัว ดังนั้นในการใช้ยาควรหมั่นวัดความดันเลือดอยู่เสมอและไม่สามารถวัดปริมาณเมทฮีโมโกลบินในเลือดได้ ซึ่งถ้ามีมากเกินไปอาจเป็นอันตรายต่อร่างกายได้

- **Amyl Nitrite** การดมยาชนิดนี้เป็นการรักษาผู้ได้รับพิษไซยาไนด์ที่เป็นที่รู้จักมาเป็นเวลานาน แต่มีข้อเสียที่ว่าไม่สามารถเพิ่มปริมาณเมทฮีโมโกลบินให้มากกว่า 6% ซึ่งในการรักษาจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณเมทฮีโมโกลบินให้ได้มากกว่า 15%

- **Sodium Nitrite** การใช้ยาชนิดนี้จะสามารถเพิ่มปริมาณเมทฮีโมโกลบินได้ถึง 20% ภายในเวลา 5-15 นาที

- **4-Dimethylaminophenol** เป็นยาที่ให้ผลการรักษาที่รวดเร็ว และเป็นพิษน้อย ในปริมาณ 3 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักร่างกายสามารถเพิ่มปริมาณเมทฮีโมโกลบินได้ถึง 15% ภายในเวลา 1 นาที

- กลุ่มอื่น ๆ เช่น Hydroxylamine, Aminophenone และอนุพันธ์

2) กลุ่มสารประกอบที่ให้ซัลเฟอร์ (Sulfur Donors)

ยากกลุ่มสารประกอบที่ให้ซัลเฟอร์ ได้แก่ ไทโอซัลเฟต (Thiosulfate) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์ได้ไทโอไซยาเนต (Thiocyanate: SCN^-)

3) กลุ่มสารประกอบโคบอลต์ (Cobalt Containing Compound)

ยากกลุ่มสารประกอบโคบอลต์เป็นกลุ่มยาที่มักจะทำให้เกิดผลข้างเคียงเนื่องจากมีโคบอลต์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญ แต่ได้มีการปรับปรุงยากกลุ่มนี้เพื่อให้สามารถใช้ได้ในบางสถานการณ์ ซึ่งบางประเทศก็ยินยอมให้ใช้ยากกลุ่มนี้ได้

- **Dicobalt Edetate (Kelocyanor)** ปัจจุบันประเทศฝรั่งเศสและอังกฤษใช้ Dicobalt Edetate 300 มิลลิกรัมในสารละลายกลูโคส เป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการรักษาผู้ป่วยด้วยพิษไซยาไนด์

- **Hydroxycobalamin** เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยม มีความเป็นพิษต่ำแม้ใช้ในปริมาณสูง เนื่องจาก Hydroxycobalamin เป็นวิตามินบี12 ชนิดหนึ่ง เมื่อทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์จะได้ Cyanocobalamin ซึ่งเป็นวิตามินบี12 อีกชนิดหนึ่ง ข้อเสียของ Hydroxycobalamin คือ ราคาแพง ต้องใช้ในปริมาณมากและสลายตัวได้ง่ายเมื่อโดนแสง

- กลุ่มอื่น ๆ เช่น Cobaltous Chloride, Cobaltous Acetate, Cobaltous Histidine และ Sodium Cobalt Nitrite

4) กลุ่มยาที่อยู่ระหว่างการทดลอง (Investigational Drugs)

ยากกลุ่มนี้เป็นยาที่อยู่ระหว่างการทดลองกับสัตว์ซึ่งมีหลายชนิดที่ให้ผลการรักษาที่ดีในสัตว์ทดลอง และบางชนิดอาจมีการนำมาใช้แล้วในบางประเทศ

- **กลุ่มอะมิโนฟีนอนและอนุพันธ์ (Aminophenol and Derivatives)** เช่น p-Aminopropiophenone (PAPP), p-Aminooctanoyphenone (PAOP), p-Nitrosopropiophenone (PNPP) และ p-Hydroxy Aminopropiophenone (PHAPP) จะช่วยลดปริมาณไซยาไนด์ในเซลล์เม็ดเลือดแดง และโซเดียมไทโอซัลเฟตจะช่วยส่งเสริมการทำงานของยากกลุ่มนี้ให้ทำหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

● **กลุ่มสร้างสารประกอบไซยาโนไฮไดริน (Cyanohydrin-Forming Drug)** คือ กลุ่มสารประกอบอัลดีไฮด์ และ คาร์บอนิล (Aldehydes and Carbonyl-Related Compounds) เช่น Pyruvate, Ketoglutaric acid, Glyxal และ Reducing Sugars จะเปลี่ยนไซยาไนต์ให้อยู่ในรูปไซยาโนไฮไดริน (Cyanohydrin Form) เป็นการส่งเสริมการทำงานของไนโตรทียาและสารเคมีต่างที่ใช้ในการรักษาผู้ป่วยที่ได้รับพิษจากไซยาไนต์ทั้งที่ใช้อยู่ในปัจจุบันและที่อยู่ในระหว่างการทดลองควรเป็นสารเคมีที่ทำหน้าที่คล้ายกับสารเคมีที่ทำหน้าที่กำจัดไซยาไนต์ของร่างกายหรือมีลักษณะเป็นการกระตุ้นกลไกการกำจัดไซยาไนต์ของร่างกาย โดยคำนึงถึงประสิทธิภาพและความปลอดภัยของผู้ป่วยเป็นสำคัญ

7.3.2 ตัวอย่างการรักษาพิษไซยาไนต์

การรักษาเฉพาะทางมีลักษณะเป็นการส่งเสริมการกำจัดไซยาไนต์ของร่างกายโดยการเปลี่ยนรูปไซยาไนต์ให้อยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษ จากนั้นกลไกของร่างกายจะค่อยๆกำจัดไซยาไนต์ออกหรืออาจมีการให้ยาเพื่อส่งเสริมการกำจัดออกของร่างกาย ดังนั้นขั้นตอนการรักษาจึงแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

1) ขั้นแรก การทำให้ร่างกายมีเมทฮีโมโกลบิน

การทำให้ร่างกายมีเมทฮีโมโกลบินทำได้โดยใช้โซเดียมไนไตรท์ (Sodium Nitrite: NaNO_2) 6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หรือ 300 มิลลิกรัมในผู้ใหญ่ (3% Sodium Nitrite 10 ml) ให้ทางหลอดเลือดดำช้าๆ เพื่อให้ Fe^{3+} ในเมทฮีโมโกลบินแย่งไซยาไนต์ที่จับอยู่กับ Fe^{3+} ในไซโตโครมออกซิเดส กลายเป็นไซยาโนเมทฮีโมโกลบิน ไซโตโครมออกซิเดสก็จะกลับมาทำงานตามปกติ แต่ต้องคอยตรวจวัดความดันเลือดและความคุมมิให้ปริมาณเมทฮีโมโกลบินเกิน 35%–40% เนื่องจากถ้าเลือดมีปริมาณเมทฮีโมโกลบินมากเกินไปอาจเป็นอันตรายถึงชีวิต

2) ขั้นที่สอง การขับไซยาไนต์ออกจากร่างกาย

การขับไซยาไนต์ออกจากร่างกายสามารถทำได้โดยการให้โซเดียมไทโอซัลเฟต (Sodium Thiosulfate) 412.5 มิลลิกรัมต่อน้ำหนัก 1 กิโลกรัม หรือ 12.5 กรัม ในผู้ใหญ่ (25% Sodium Thiosulfate 50 ml) ทางหลอดเลือดดำหลังจากให้โซเดียมไนไตรท์ เป็นการเพิ่มปริมาณไทโอซัลเฟตในร่างกาย ไซยาไนต์จะเปลี่ยนรูปเป็นโซเดียมไทโอไซยาเนต (Sodium Thiocyanate) และถูกขับออกจากร่างกายทางไตต่อไป

การรักษาหรือบำบัดผู้ป่วยได้รับพิษไซยาไนต์ ในแต่ละประเทศอาจแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของประเทศนั้นๆ เนื่องจากสารเคมีหลายชนิดที่ใช้รักษาในปัจจุบันมีผลข้างเคียงบางชนิดมีความเป็นพิษสูงและบางชนิดก็เป็นสารก่อมะเร็ง ดังนั้นในการเลือกใช้จำเป็นต้องศึกษาข้อมูลอย่างละเอียดถี่ถ้วนเพื่อความปลอดภัย

แนวทางการปฏิบัติเพื่อความปลอดภัยในการใช้ไซยาไนด์

แนวทางการปฏิบัติในการใช้สารประกอบไซยาไนด์อย่างปลอดภัย (Mineral and Energy, 1992) เป็นแนวทางที่คำนึงถึงระบบการป้องกันภัยส่วนบุคคล ระบบการป้องกันภัย การเก็บรักษาและการขนย้ายวัตถุมีพิษ และการเตรียมความพร้อมกรณีเกิดเหตุฉุกเฉินของสถานประกอบการ ดังนี้

- เก็บในบรรจุภัณฑ์ที่ปิดสนิทและเหมาะสม
- ไม่ถ่ายเทสารเคมีลงบรรจุภัณฑ์อื่น
- เก็บแยกจากสารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นกรด
- เก็บในที่แห้งและมีอากาศถ่ายเทสะดวก
- มีสัญลักษณ์เตือน “เขตอันตราย” ในบริเวณที่เก็บไซยาไนด์
- ควรมีอุปกรณ์ช่วยขนย้าย เพื่อหลีกเลี่ยงการสัมผัสสารเคมีอันตราย
- มีการป้องกันอันตรายส่วนบุคคลและมีอุปกรณ์ช่วยเหลือเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉิน
- มีการออกแบบโรงงานที่ดี เพื่อความสะดวกในการขนย้ายสารเคมีอันตรายและการให้ความช่วยเหลือกรณีเกิดเหตุฉุกเฉิน
- ก่อนทำการบำรุงรักษาเครื่องจักรอุปกรณ์ที่สัมผัสไซยาไนด์ต้องทำการลดพิษไซยาไนด์
- ใช้สารเคมีดับเพลิงที่ไม่ทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์ เช่น BCF Fire Extinguishers
- มีการควบคุมการเข้าออกบริเวณเก็บสารเคมีอันตราย
- มีการซักซ้อมการเกิดเหตุฉุกเฉิน
- มีการจัดฝึกอบรมให้ความรู้พนักงานเกี่ยวกับการใช้สารเคมีอันตรายอย่างปลอดภัย
- ตรวจสอบการทำงานของ ชุด อุปกรณ์ป้องกัน และชุดปฐมพยาบาลอยู่เสมอ
- มีบุคลากรที่ได้รับการฝึกอบรมการปฐมพยาบาลผู้ได้รับพิษไซยาไนด์อย่างน้อย 1 คน
- และมาตรการอื่น ๆ ตามความเหมาะสม

บทวิจารณ์เกี่ยวกับการใช้ประโยชน์สารประกอบไซยาไนด์

ไซยาไนด์เป็นสารเคมีที่มีใช้อยู่ทั่วไปในอุตสาหกรรมต่างๆ แต่ปัจจุบันอุตสาหกรรมที่สำคัญที่ใช้ไซยาไนด์ในกระบวนการผลิต คือ อุตสาหกรรมการผลิตโลหะทองคำ ความเป็นพิษของไซยาไนด์ก็เป็นสิ่งที่ต้องตระหนักอยู่เสมอ เนื่องจากเป็นสารพิษแบบเฉียบพลัน ในการใช้ประโยชน์ไซยาไนด์ต้องมีมาตรการความปลอดภัย และการติดตามตรวจสอบ มิให้เกิดการรั่วไหลทั้งจากคลังเก็บวัตถุดิบและกระบวนการผลิต โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ไซยาไนด์ในบ่อกักเก็บกากแร่ซึ่งต้องมีระบบป้องกันการรั่วไหลและทำการฟื้นฟูสภาพของบ่อบำบัดของเสียที่มีไซยาไนด์ปนเปื้อนให้อยู่ในสภาพที่ปลอดภัยและสามารถใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้นเพื่อการใช้ไซยาไนด์อย่างปลอดภัยทั้งในกระบวนการผลิตและการจัดการของเสียที่มีการปนเปื้อนไซยาไนด์อย่างมีประสิทธิภาพ ผู้ประกอบการที่ต้องใช้ไซยาไนด์เป็นวัตถุดิบหรือเป็นหลักในกระบวนการผลิต จึงควรศึกษาสมบัติของไซยาไนด์ทั้งด้านกายภาพและทางด้านเคมี ความเป็นพิษของไซยาไนด์ การปฐมพยาบาลผู้ได้รับพิษไซยาไนด์ และการจัดการไซยาไนด์อย่างเหมาะสม เพื่อเตรียมความพร้อมในการรับมือกับไซยาไนด์ทั้งในแง่ของการป้องกันและการแก้ไขปัญหา รวมถึงวิธีการกำจัดไซยาไนด์อย่างเหมาะสม วิธีการกำจัดไซยาไนด์มีด้วยกันหลายวิธี ทั้งที่อยู่ในรูปของการลดพิษ และการนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งทั้งสองแนวทางมีข้อดีและข้อด้อยต่างกัน ในแง่ของการลดพิษเป็นวิธีการที่ดีและสามารถทำได้หลายวิธี แต่ต้องคำนึงถึงเสถียรภาพของสารประกอบที่เกิดจากกระบวนการบำบัด นับเป็นวิธีการที่ดีวิธีหนึ่ง เนื่องจากเป็นการชะลอการเกิดก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์และลดความเข้มข้นของไฮโดรเจนไซยาไนด์ในอากาศ ซึ่งเป็นก๊าซพิษที่ส่งผลกระทบต่อตรงอย่างเฉียบพลันต่อระบบหายใจของสิ่งมีชีวิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งสัตว์ที่มีความไวต่อพิษของไซยาไนด์อย่างนกและปลา ส่วนในแง่ของการนำกลับมาใช้ใหม่ ก็เป็นวิธีการลดต้นทุนและลดปริมาณของเสียที่จะปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ถ้าระบบที่ใช้ไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอจะทำให้อัตราเสี่ยงต่อการได้รับพิษไซยาไนด์สูงมาก ดังนั้นการเลือกใช้วิธีการบำบัดไซยาไนด์ ต้องพิจารณาตามความเหมาะสมของสภาพของเสียและองค์ประกอบอื่นในของเสีย เช่น ปริมาณและชนิดของสารประกอบในของเสีย รวมถึงกฎหมายและข้อกำหนดต่างๆ ของประเทศแต่ละในภาคปฏิบัติอาจต้องอาจต้องใช้วิธีการบำบัดมากกว่า 1 วิธี ควบคู่กับใช้วิธีการพึ่งพาธรรมชาติ เช่น วิธีการใช้แสงแดด (Photolysis) และวิธีการใช้จุลชีพ (Bio-Oxidation) เพื่อเป็นการลดปริมาณการใช้สารเคมีที่อาจตกค้างในสิ่งแวดล้อม การกำหนดมาตรฐานเพื่อการควบคุมการปล่อยของเสียมาตรฐานและข้อกำหนดแนวทางการฟื้นฟูสภาพเหมืองและบ่อกักเก็บกากแร่ เพื่อเป็นการแสดงความรับผิดชอบต่อสิ่งแวดล้อมและสังคม ควรมีการกำหนดและบังคับใช้อย่างจริงจัง

บทสรุป

ไซยาไนด์มีแหล่งกำเนิดทั้งจากธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ ซึ่งในธรรมชาติมีสิ่งมีชีวิตหลายชนิดที่สามารถสร้างสารประกอบไซยาไนด์ได้ แต่อยู่ในปริมาณความเข้มข้นต่ำ ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต และสารประกอบไซยาไนด์บางรูปยังเป็นประโยชน์ต่อมนุษย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำไซยาไนด์มาใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรม ซึ่งผู้ที่ค้นพบไซยาไนด์เป็นคนแรก คือ J.C.Dippel และ H.Diesbach และได้มีการพัฒนาเรื่อยมาจนสามารถนำมาใช้ได้จริงในอุตสาหกรรม จากคุณสมบัติหลายประการของไซยาไนด์ทำให้ไซยาไนด์ได้รับความนิยมในเชิงพาณิชย์ และอุตสาหกรรมการผลิตโลหะทองคำ ซึ่งนิยมใช้ไซยาไนด์แยกสกัดทองคำจากสินแร่ ค่อนข้างได้รับความสนใจทั้งในแง่ของผลผลิตที่ได้ ประสิทธิภาพการผลิตและของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต เนื่องจากไซยาไนด์เป็นสารพิษแบบเฉียบพลัน และมีอยู่ในหลายรูปที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เนื่องจากสามารถแตกตัวและเกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ เช่น Free Cyanide Simple Cyanide และ WAD Cyanide ส่วนไซยาไนด์ที่อยู่ในรูปของ SAD Cyanide มีความเสถียรสูงกว่ารูปอื่น แต่ก็ยังสามารถแตกตัวได้ในกรดแก่ให้สารประกอบที่เป็นอันตราย แต่ในเชิงสิ่งแวดล้อมรูปของไซยาไนด์ที่ได้รับความสนใจเป็นพิษ คือ Total Cyanide ซึ่งเป็นกลุ่มของสารประกอบทุกตัวที่มีไซยาไนด์เป็นองค์ประกอบ ถ้าปริมาณไซยาไนด์ในสิ่งแวดล้อมไม่สูงเกินไป ธรรมชาติมีกลไกที่สามารถลดความเป็นพิษของไซยาไนด์ได้ เช่น การเกิดสารประกอบอื่นที่มีความเป็นพิษน้อย การตกตะกอนเหล็กไซยาไนด์ และกระบวนการสลายตัวทางชีวภาพ เป็นต้น ความรุนแรงของการได้รับพิษไซยาไนด์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดของสารประกอบ ความเข้มข้นและวิธีการได้รับสารพิษ ปริมาณไอโอดีนและเอนไซม์ในร่างกาย ในสภาวะปกติร่างกายมนุษย์จะมีกลไกการกำจัดไซยาไนด์โดยการทำปฏิกิริยากับ Fe^{3+} ในเมทฮีโมโกลบิน การเปลี่ยนรูปเป็นวิตามินบี 12 ชนิดหนึ่ง และสารอื่นๆในร่างกายจนเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษหรือมีความเสถียรสูงขึ้น สิ่งมีชีวิตที่ได้รับผลกระทบจากพิษของไซยาไนด์มากที่สุด คือ มนุษย์และสัตว์ ส่วนพืชยังไม่พบว่าส่งผลกระทบอย่างไร ซึ่งต้องมีการศึกษาวิจัยถึงผลกระทบต่อพืชและสัตว์ที่กินพืชที่ได้รับไซยาไนด์จากสิ่งแวดล้อมต่อไป สำหรับในปัจจุบันเพื่อให้การใช้ประโยชน์ไซยาไนด์เป็นไปด้วยความปลอดภัย ควรปฏิบัติตามแนวทางเพื่อความปลอดภัยและมาตรฐานการปล่อยของเสียไซยาไนด์อย่างเคร่งครัด และให้การอบรมแก่พนักงานให้มีความรู้ในการใช้ไซยาไนด์อย่างปลอดภัยและการปฐมพยาบาลผู้ได้รับพิษอย่างถูกต้อง

บรรณานุกรม

หนังสือ

- Avraamides, J. "Prospects for Alternative Leaching Systems for Gold: A Review." Carbon-In-Pulp Technology for the Extraction of Gold. Dec., 1982. pp. 374-378.
- Minerals and Energy, Department. Cyanide Management Guideline. Western Australia, 1992.

ฐานข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์

- กรมควบคุมมลพิษ, กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. "มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน" (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก : <http://www.pcd.go.th/?=32.35390137,2547>.
- กรมควบคุมมลพิษ, กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. "มาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน" (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก : <http://www.pcd.go.th/?=32.35390137,2547>.
- ATSDR. "Cyanide." (Online). Available: <http://www.atsdr.cdc.gov/tfacts8.html>, 2001.
- Bahattacharya, R. "Antidotes to Cyanide Poisoning." (Online). Available: <http://www.ijp-online.com/archives/2000/032/02/r0094-0101re.pdf>
- Barnes, Doen E., Wright, Peter J., Graham, Sandra M. and Jones-Watson, Elaine A. "Techniques for the Determination of Cyanide in a Process Environment: A Review." (Online). Available: http://www.crpq.cnrs-nancy.fr/Geostandards/GN_pdf.v24/msvm105.pdf, 2000.
- Baskin, Steven I. and Brewer, Thomas G. "Cyanide Poisoning." (Online). Available: http://www.vnh.org/MedAspChemBioWar/chapters/chapter_10.htm, 1997.
- Botz, M.M. "Overview of Cyanide Treatment Methods." (Online). Available: <http://www.cyantists.com/treat.htm>, 2001.
- Gallerani, Peter A., Lord, Jeff and Klink, Kevin. "Wastewater Treatment of Cyanide." (Online). Available: <http://www.processengineer.com/pdfs/cyanide--all.pdf>, 2000.
- Hyoung-Joo Kim, Lianhai Lu, Jae-Hyun Kim, Chung-Hak Lee, Taeghwan Hyeon, Wonyong Choi and Ho-In Lee. "UV Light Induced Photocatalytic Degradation of Cyanides in Aqueous Solution over Modified TiO₂." (Online). Available: <http://journal.kcsnet.or.kr/publi/bul/bu01n12/1371.pdf>, 2001.
- International Cyanide Management Code. "Cyanide Facts." (Online). Available: http://www.cyanidecode.org/library/cyanide_facts.html, 2002.
- Japan Small and Medium Enterprise, Cooperation. "Environmental Technology." (Online). Available: http://www.apec-vc.or.jp/co-op/mekki/docs/2_3_00.htm, 2002.
- Kuzugudenli, Omer E. and Kantar, Cetin. "Alternatives to Gold Recovery by Cyanide Leaching." (Online). Available: <http://fbc.erciyes.edu.tr/Turkce/eufbedergisi/DER99/119-127.pdf>, 1999.
- Loredo, J. "Cyanide removal from gold mining laboratory experiments." (Online). Available: http://www.image-train.net/products/proceedings_first/chapter_15.pdf
- MacDonald, Martin. "Cyanide." (Online). Available: <http://www.metlabsolutions.com/business.htm>, 2002.
- Meehan, Samantha Maree. "The Aqueous Chemistry of Cyanide and Nitrogen." (Online). Available: http://thesis.lib.unimelb.edu.au/adt-root/uploads/approved/adtVU2002.0068/public/05_Ch3.pdf, 2000.
- Moran, Robert. "Cyanide Uncertainties." (Online). Available: [http://www.eireview.org/eir/eirhome.nsf/\(DocLibrary\)/4255D0784BD4023F85256BFB006E9686/\\$FILE/Cyanide_Uncertainties%20\(Feiler\).pdf](http://www.eireview.org/eir/eirhome.nsf/(DocLibrary)/4255D0784BD4023F85256BFB006E9686/$FILE/Cyanide_Uncertainties%20(Feiler).pdf), 2000.

Newmont. "Cyanide." (Online). Available: <http://www.marthamine.co.nz/cyanide.html>, 2002.

OSHA. "Cyanide (as CN)" (Online). Available: http://www.osha.gov/dts/chemicalsampling/data/CH_230400.html, 2002.

Solomonson, Larry P. "Cyanide as A Metabolic Inhibitor." (Online). Available: <http://www.manafoods.com/solomon.htm>, 2002.

Solvay Interlox, Inc. "Cyanide Detoxification with Hydrogen Peroxide." (Online). Available: <http://www.solvayinterlox.com/pdfs/brochures/si-cyanidedetox.pdf>, 2001.

Souren, Angelina W.M.G. "Living with Cyanide." (Online). Available: <http://gs.wustl.edu/archives/gn/gn105.pdf>, 2000.

Stoltenow, Charlie and Lardy, Greg. "Prussic Acid Poisoning." (Online). Available: <http://www.ext.nodak.edu/extpubs/ansci/livestoc/v11150w.htm>, 1998.

Tamura, Yuriko. "History." (Online). Available: <http://web1.caryacademy.org/chemistry/rushin/StudentProjects/CompoundWebSites/2002/SodiumCyanide/history.htm>, 2002.

USAMRICD. "Cyanide." (Online). Available: https://www.rke.vaems.org/wvems/Libraryfiles/Dis/03_23.pdf, 2002.

U.S. EPA (1994). "Treatment of Cyanide Heap Leaches and Tailings." (Online). Available: <http://www.epa.gov/epaoswer/other/mining/techdocs/cyanide.pdf>, 1994.

US Peroxide, Co. "Inorganic Pollutant Cyanide Treatment with Peroxygen Compounds." (Online). Available: <http://www.h2o2.com/applications/industrialwastewater/cyanide.html>, 2002.

Utah Mining Association. "Gold Production." (Online). Available: <http://www.utahmining.org/newsletters/01dec.htm>, 2001.

Worksafe, Western Australia. "Cyanide Information on Handling, Storage and First-Aid." (Online). Available: <http://www.safetyline.wa.gov.au/pagebin/hazshazd0005.htm>, 1997.

Young, C.A. "The Daylight Solution: Ultraviolet Radiation and the Remediation of Cyanide-Containing Water and Acid-Mine Drainage." (Online). Available: <http://www.mtech.edu/Research/research/1999%20Research/Young.htm>, 2002.

Young, C.A. and Jordan, T.S. "Cyanide Remediation: Current and Past Technologies." (Online). Available: <http://www.engg.ksu.edu/HSRC/95Proceed/young.pdf>, 2002.