

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

การชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้านั้นจะมีวัตถุประสงค์แตกต่างกันออกไป เช่น การชุบเพื่อป้องกันการเสียดสีบนวงจรไฟฟ้าในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ การชุบเคลือบผิวเครื่องประดับเพื่อความสวยงาม หรือการชุบรองพื้นเพื่อเป็นการเพิ่มความหนาของโลหะ ป้องกันการสึกหรอจากการขีดข่วน เป็นต้น การชุบเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าที่นิยม และใช้กันทั่วไปในวงการอุตสาหกรรม ได้แก่ การชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง นิกเกิล โครเมียม และโครเมียมชนิดแข็ง ส่วนการชุบผิวตกแต่ง ได้แก่ การชุบทอง เงิน โรเดียม และนิกเกิลดำ เป็นต้น

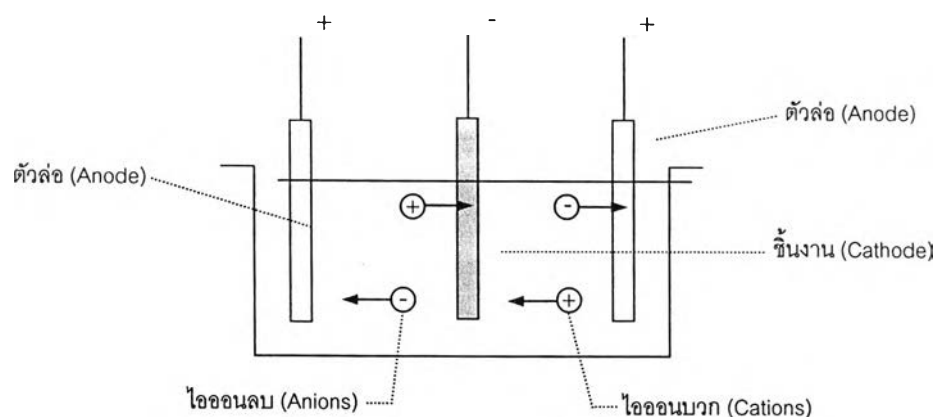
2.1.1 หลักการเบื้องต้นของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า หมายถึง การนำเอาชิ้นงานหรือวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าได้มาเคลือบผิวด้วยโลหะที่ต้องการโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา ทำโดยการนำเอาชิ้นงานที่ต้องการชุบต่อเข้ากับขั้วลบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนโลหะที่จะให้ไปเคลือบผิวชิ้นงานจะต่อเข้ากับขั้วบวก ซึ่งเรียกว่า ตัวล่อ ซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นโลหะชนิดเดียวกับผิวของชิ้นงานที่จะไปเคลือบผิวเสมอไป แล้วนำเอาชิ้นงานและตัวล่อจุ่มในน้ำยาชุบซึ่งมีไอออนของโลหะที่ให้เคลือบผสมอยู่ จากนั้นปรับกระแสไฟฟ้าให้เกิดแรงเคลื่อนกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม จะทำให้ไอออนของโลหะที่อยู่ในน้ำยาชุบโลหะเกิดปฏิกิริยา (สุชาติ และคณะ, 2542) ดังรูปที่ 2-1 โดยที่ขั้วลบ ไอออนของโลหะซึ่งเป็นไอออนบวกในสารละลายจะวิ่งไปรับอิเล็กตรอนที่ขั้วลบ แล้วเกิดเป็นโลหะเคลือบที่ผิวชิ้นงาน ดังสมการ



ส่วนที่ขั้วบวก ถ้าโลหะที่จะนำไปเคลือบเป็นโลหะชนิดเดียวกันกับชิ้นงาน โลหะนั้นก็จะเกิดการออกซิไดซ์ ให้อิเล็กตรอนกับวงจรภายนอก และไอออนบวกจะสลายลงสู่สารละลาย ดังสมการ





รูปที่ 2-1 หลักการชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า (สุชาติ และคณะ, 2542)

2.1.2 ขั้นตอนในการชุบโลหะ

รูปแบบขั้นตอนการชุบโลหะอย่างง่าย ประกอบไปด้วย การเตรียมชิ้นงาน ซึ่งหมายถึง การขัดผิวชิ้นงานจนได้ขนาดและความเรียบตามต้องการ จากนั้นชิ้นงานจะถูกทำความสะอาดเพื่อกำจัดไขมัน และนำไปจุ่มกรดเพื่อนำเอาสนิมออก ต่อจากนั้นก็นำชิ้นงานไปชุบในน้ำยาซึ่งควบคุมสภาวะการชุบตามที่กำหนด หลังจากเสร็จแล้วนำไปอบแห้ง สุดท้ายจะได้ชิ้นงานตามต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 2-2

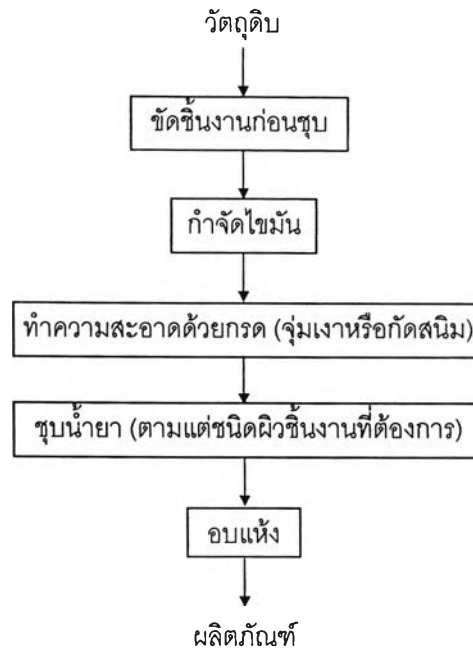
ความซับซ้อนของขั้นตอนในการชุบโลหะจะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่เป็นวัตถุชุบ และชนิดของผิวโลหะที่ต้องการชุบ โดยวัตถุชุบส่วนมากจะเป็นเหล็ก เหล็กหล่อ ทองเหลือง อะลูมิเนียม

2.1.2.1 การขัดชิ้นงานก่อนชุบ แบ่งออกเป็นการขัดหยาบ และการขัดละเอียด โดยการขัดหยาบเป็นการขัดขั้นแรก โดยขัดเอารอยขีดข่วนเล็กๆ หรือบริเวณที่ไม่สม่ำเสมอออก โดยใช้ลวดขัดที่เคลือบด้วยทรายหยาบ ส่วนการขัดละเอียดเป็นการขัดต่อเพื่อลบรอยจากการขัดหยาบทำให้ชิ้นงานเรียบ โดยใช้ลวดขัดที่มีทรายละเอียดเบอร์ 280 ขึ้นไป นอกจากนี้ในกรณีที่ชิ้นงานเล็กมากๆ อาจขัดโดยการใช้นิ้วที่มีหินขัดบรรจุอยู่ภายใน

2.1.2.2 การกำจัดไขมัน ทำได้โดยการใช้วิธีดังต่อไปนี้

- กำจัดโดยใช้ไอระเหยไตรคลอโรเอทิลีน (Vapor degreasing) ทำโดยการนำชิ้นงานจุ่มในถังบรรจุไตรคลอโรเอทิลีน และให้ความร้อนจนถึง 86 องศาเซลเซียส ซึ่งไตรคลอโรเอทิลีนจะกลายเป็นไอน้ำกระทบกับท่อขัดทำความสะอาดบริเวณปากของถังและชิ้นงาน และกลั่นตัวจับอยู่บนผิวโลหะทำการชำระล้างไขมัน หรือน้ำมันลงสู่ถัง

- กำจัดโดยใช้ด่างร้อน (Soak clean) ทำโดยการแช่ชิ้นงานในถังเหล็กหรือถัง สแตนเลสที่บรรจุด้วยด่าง และมีเครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้าทำงานอยู่



รูปที่ 2-2 ขั้นตอนการซุบโลหะด้วยไฟฟ้าอย่างง่าย (สาโรช, 2535)

2.1.2.3 การทำทำความสะอาดด้วยกรดหรือจุ่มเงา (Pickling and dipping) เป็นการกัดเอาสนิมเหล็ก เหล็กกล้า ออกไซด์ของทองแดง นิเกิล และทองแดงผสมอื่นออกจากผิวโลหะ โดยการใช้กรดซัลฟูริกความเข้มข้นประมาณ 5-10% หรืออาจจะใช้กรดไฮโดรคลอริกในอัตราส่วน 1:5 โดยปริมาตร (กรด 1 ส่วนต่อน้ำ 5 ส่วน) ส่วนกรดอินทรีย์อื่นๆที่มีการใช้งาน ได้แก่ กรดโครมิก กรดไฮโดรฟลูออริก กรดไนตริก และกรดฟอสฟอริก เป็นต้น

โดยบ่อยครั้งอาจจะมีการใช้กรดอินทรีย์ เช่น กรดอะซิติก กรดซิตริก กรดฟอร์มิก กรดออกซาลิก และอัสดีทีเอ มาใช้เป็นน้ำยาทำความสะอาดผิว (Moyer, 1994) ซึ่งกรดอินทรีย์นั้นจะมีสภาพความเป็นกรดน้อยกว่า ดังนั้นปัญหาเรื่องการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจึงน้อยกว่าการใช้กรดอินทรีย์

2.1.2.4 การซุบโลหะประเภทต่างๆ (สาโรช, 2535)

ก) การซุบทองแดง เป็นการซุบเคลือบผิวชิ้นแรกก่อนนำไปซุบโลหะชนิดอื่น เช่น ซุบงานที่มีรอยบัดกรีบนสังกะสีผสมก่อนที่จะนำไปซุบนิเกิล เพราะหากเอาชิ้นงานที่มีรอยบัดกรีหรืองานที่มีสังกะสีผสมอยู่ไปซุบในน้ำยานิเกิล สังกะสีจะละลายในน้ำยานิเกิลทันที การซุบทองแดงแบ่งออกเป็น การซุบทองแดงแบบต่าง และแบบกรด การซุบแบบต่างนั้นจะมีกำลังการเคลือบผิวดีมาก และการเกาะจับติดแน่น เหมาะสำหรับการซุบรองพื้นชิ้นแรกก่อนการซุบแบบกรด

และชุบนิกเกิลเงา ส่วนงานสังกะสีหล่อที่ไม่สามารถชุบทองแดงแบบกรดได้โดยตรง ก็ต้องนำมาชุบทองแดงแบบต่างก่อน โดยทั่วไปการชุบทองแดงแบบต่าง สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

- แบบสไตรค์ (Strike Bath)
- แบบร็อกเชล (Rochelle Bath)
- แบบประสิทธิภาพสูง (High efficiency Bath)

ส่วนการชุบแบบกรดนั้นจะขึ้นงานที่ได้จะมีความเงางามมาก นิยมใช้ชุบผิวโลหะเพื่อเพิ่มความหนาของทองแดงที่รองพื้นก่อนทำการชุบด้วยนิกเกิลเงา

ข) การชุบนิกเกิล การชุบเคลือบนิกเกิลลงบนเหล็ก ทองเหลือง และโลหะอื่นๆ นั้น ทำเพื่อรักษาและป้องกันเนื้อโลหะ และยังทำให้ผิวดูสวยงาม โดยปกติแล้วจะตามด้วยการชุบโครเมียม เพราะจะทำให้ง่ายต่อการทำความสะอาด การชุบนิกเกิลสามารถแบ่งออกได้หลายประเภทดังต่อไปนี้

- นิกเกิลด้าน (Dull Nickel) ใช้ชุบชิ้นงานที่ไม่เหมาะกับการชุบนิกเกิลเงา
- นิกเกิลกึ่งเงา (Semi bright Nickel) ชุบรองพื้นก่อนชุบนิกเกิลเงา
- นิกเกิลเงา (Bright Nickel) ชุบรองพื้นก่อนชุบโครเมียม ทอง หรือทองเหลือง
- นิกเกิลดำ (Black Nickel) ใช้ในงานซึ่งไม่ต้องการให้เกิดการสะท้อนแสง เช่น กรอบแว่นตา
- นิกเกิลซาติน (Satin Nickel) ได้สีเหลือบเหมือนสีแพร หรือผิวไข่มุกเงา
- นิกเกิลแบบหนา (Heavy electrodeposition of Nickel) ชุบงานที่สึกหรอ

ค) ชุบโครเมียม การชุบแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ ชุบเพื่อความสวยงาม (Decorative Chromium) และชนิดหนา (Hard Chromium) การชุบเพื่อความสวยงามหรือชนิดบางนั้น จำเป็นต้องมีการชุบรองพื้นก่อนทำการชุบโครเมียม เพราะโครเมียมเป็นโลหะที่แข็งแต่เปราะมาก การชุบชนิดบางโดยตรงบนเหล็กจะเกิดรูพรุนอยู่ทั่วไป และทำให้หลุดร่อนได้ การชุบทำได้โดยการรองพื้นชิ้นงานด้วยทองแดงก่อนชุบนิกเกิล และรองพื้นด้วยนิกเกิลก่อนชุบโครเมียม เหมาะสำหรับงานที่เป็นเหล็ก เหล็กหล่อ โลหะผสม ฯลฯ ตัวล่อโครเมียมใช้โลหะผสมระหว่างตะกั่วกับดีบุก หรือโลหะผสมระหว่างตะกั่วกับพลวง โดยอัตราส่วนตะกั่ว 93% กับดีบุก 7% หรือตะกั่ว 92% กับพลวง 8% ตามลำดับ

ส่วนการชุบชนิดแข็ง (Hard Chromium) นั้น สามารถทำการชุบได้โดยตรง ไม่ต้องมีการชุบทองแดง หรือนิกเกิลรองพื้นก่อน โดยคุณสมบัติของชิ้นงานหลังจากการชุบโครเมียมจะเป็นดังนี้

- สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานต่ำ
- มองดูสวยงาม
- ใช้แม่เหล็กดูดได้

ง) การชุบทอง ทองเป็นโลหะที่มีค่าสูง สามารถละลายได้ดีในกรดกัดทอง มีคุณสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี สีสวยงาม นิยมชุบในชิ้นงานที่เป็นเครื่องประดับ หรือในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ชุบบนแผ่นวงจรพิมพ์ ต่อมาได้มีการปรับปรุงน้ำยาชุบโดยการผสมโลหะอื่นลงไป ทำให้ผิวชุบอยู่ในรูปของทองอัลลอยด์ ซึ่งมีผิวที่แข็งกว่าเนื้อทองธรรมดา ใช้ชุบบนเครื่องใช้ที่ต้องการให้ทนต่อการสัมผัสเสียดสี เช่น นาฬิกา ขอบแว่นตา หรือไฟแช็ค เป็นต้น น้ำยาชุบทองแบ่งได้เป็น น้ำยาชุบทองชนิดเป็นกลาง น้ำยาชุบทองแบบกรด และน้ำยาชุบทองแบบไม่มีไซยาไนด์

จ) การชุบสังกะสี นิยมใช้กับชิ้นส่วนของรถยนต์ การชุบชิ้นงานที่เป็นเหล็กสามารถทำได้โดยตรงไม่ต้องมีการชุบรองพื้น การชุบมีทั้งการชุบสังกะสีแบบกรด และการชุบสังกะสีแบบด่าง การชุบแบบด่างสามารถแบ่งได้เป็นแบบมีไซยาไนด์สูง มีไซยาไนด์ต่ำ และไม่มีไซยาไนด์ การชุบแบบกรดนั้นจะไม่มีไซยาไนด์เป็นส่วนผสม

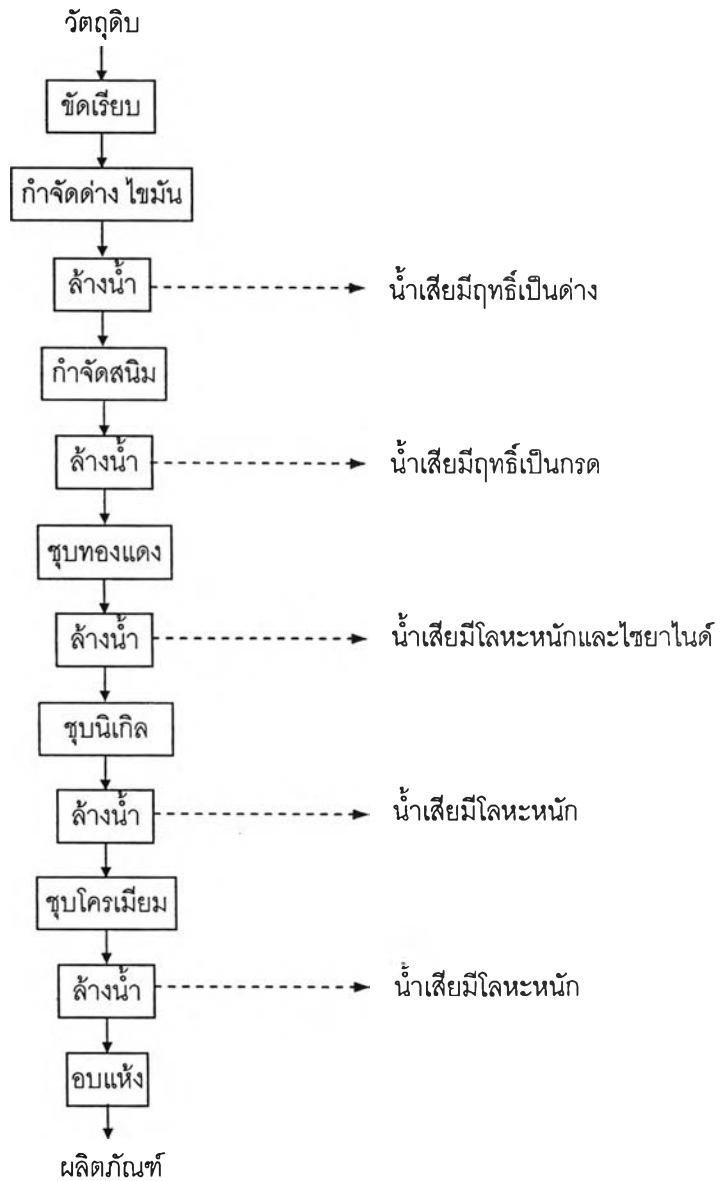
2.1.3 แหล่งที่มาและลักษณะน้ำเสีย

น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะมาจากแหล่งต่างๆ ดังต่อไปนี้

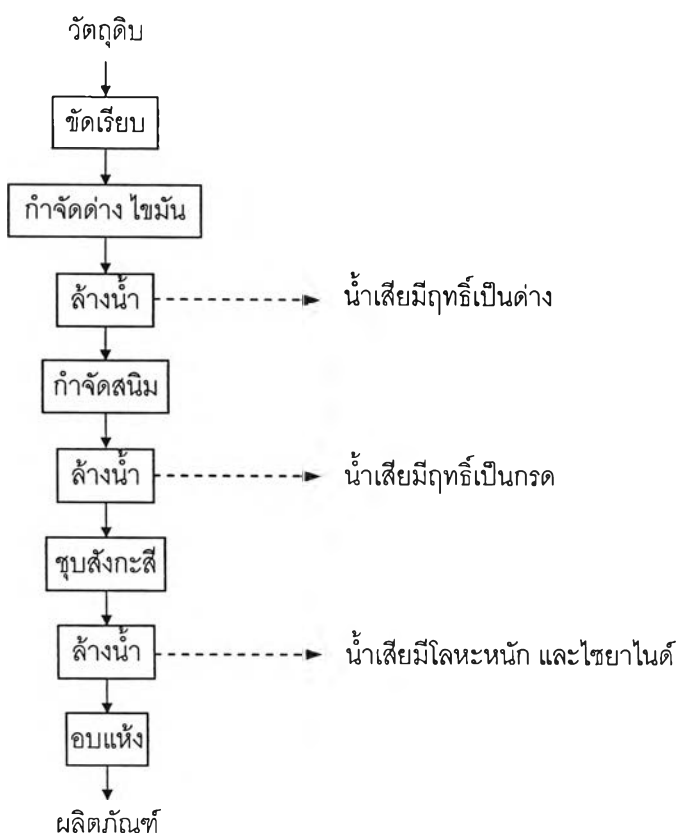
- น้ำล้างจากขั้นตอนการกำจัดไขมัน และน้ำมัน
- น้ำล้างจากขั้นตอนการจุ่มเงา และกำจัดสนิม
- น้ำล้างชิ้นงานภายหลังจากการชุบน้ำยา
- น้ำยาที่เสื่อมคุณภาพหรือไหลออกมาโดยอุบัติเหตุ
- น้ำล้างทำความสะอาดเครื่องมือ และบริเวณสถานที่

มลพิษที่ปล่อยออกมาจากโรงงานปริมาณสูง ได้แก่ น้ำล้างจากขั้นตอนการกำจัดน้ำมัน และไขมัน น้ำเสียจากขั้นตอนการจุ่มเงาและกำจัดสนิม และน้ำล้างชิ้นงานภายหลังจากการชุบน้ำยา น้ำเสียทั้งสามส่วนนี้จะเกิดอย่างต่อเนื่องในขั้นตอนการผลิต ส่วนน้ำเสียเนื่องจากการทิ้งน้ำยาที่เสื่อมคุณภาพ หรือไหลมาเนื่องจากอุบัติเหตุจะมีมลพิษสูง แต่นานๆจึงจะเกิดขึ้นสักครั้ง และน้ำล้างทำความสะอาดเครื่องมือและบริเวณสถานที่ จะมีความเข้มข้นของสารมลพิษต่ำ และปริมาณ

ไม่มากนัก สำหรับแหล่งกำเนิดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะโดยทั่วไปแสดงในรูปที่ 2-3 รูปที่ 2-4 และตารางที่ 2-1



รูปที่ 2-3 แผนผังขั้นตอนการชุบโครเมียม (สาโรช, 2535)



รูปที่ 2-4 แผนผังขั้นตอนการซุบสังกะสี (สาโรช, 2535)

ตารางที่ 2-1 แหล่งกำเนิดสารที่เป็นพิษจากกระบวนการซุบโลหะด้วยไฟฟ้า (วลัยรัตน์, 2542)

สารที่เป็นพิษ		แหล่งกำเนิด	วิธีบำบัด
น้ำมัน	สารประเภทไขมัน	การเตรียมชิ้นงานก่อนซุบ	การแยกไขมัน
ของแข็ง	ยาขัด ,ทราย	การขัด	ตกตะกอน
กรด	กรดกำมะถัน ,กรดเกลือ ,กรดไนตริก ,กรดกัดแก้ว ,กรดฟอสฟอริก ,กรดน้ำส้ม	การจุ่มกรดกระตุ้นผิว , การขัดเงาด้วยสารเคมี	ทำให้เป็นกลาง
ด่าง	โซดาไฟ ,โซเดียมคาร์บอเนต ,โซเดียมซลิเกต ,โซเดียมฟอสเฟต	ต้มล้างไขมัน ,ทำให้เป็นกลาง ,กัดผิวอลูมิเนียม	ทำให้เป็นกลาง
ไซยาไนด์	สารประกอบไซยาไนด์ต่าง ๆ	ล้างด้วยไฟฟ้า หรือจากถังซุบ	ทำการออกซิเดชันโดยใช้สารประเภทคลอรีน
โลหะหนักในรูปของไอออน	โลหะที่มีค่า ,ทองแดง ,นิกเกิล ,เหล็ก ,แคดเมียม ,สังกะสี ,อลูมิเนียม ,แมงกานีส	อยู่ในน้ำยาซุบและจากการเตรียมก่อนซุบ	ใช้ต่าง

ตารางที่ 2-1 แหล่งกำเนิดสารที่เป็นพิษจากกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (วลัยรัตน์, 2542)
(ต่อ)

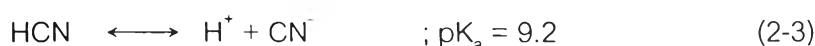
กรดโครมิก	กรดโครมิก	น้ำยาชุบ ,การทำโครเมต	ทำการรีดักชันและตกตะกอน
ไอออนเชิงซ้อน	ไอออนเชิงซ้อนของทองแดง และนิกเกิล	น้ำยาชุบ	ทำให้สารประกอบเชิงซ้อนเกิดการแยกตัว ทำให้เป็นกลางแล้วจึงตกตะกอน

2.2 ไซยาไนด์

2.2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไซยาไนด์

ไซยาไนด์ (Cyanide) หมายถึง ไอออนของไซยาไนด์ทั้งหมดในสารประกอบไซยาไนด์ ซึ่งสามารถตรวจวัดได้ในรูปของไซยาไนต์ไอออน (CN⁻) โดยในแหล่งน้ำผิวดินทั่วไป และในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะจะพบไซยาไนต์ทั้งในรูปของไซยาไนต์ไอออน และสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนต์ ประเภทของไซยาไนต์ที่สำคัญด้านการจัดการน้ำเสีย ได้แก่

2.2.1.1 ไซยาไนต์อิสระ (Simple Cyanide) หมายถึง ไซยาไนต์ในรูปของก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) หรือกรดไฮโดรไซยานิก (Hydrocyanic Acid) และไซยาไนต์ไอออน (CN⁻) ไฮโดรเจนไซยาไนต์เป็นกรดอ่อนที่ระเหยได้ง่าย สัดส่วนของไซยาไนต์ไอออนต่อไฮโดรเจนไซยาไนต์ (CN⁻:HCN) จะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชและค่าคงตัวของการแตกตัวเป็นไอออน (K_a) ของไฮโดรเจนไซยาไนต์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.6×10^{-10} ที่ 25 องศาเซลเซียส ตามสมการ 2-3 หรือสามารถดูได้จากรูปที่ 2-5 ดังนั้นในแหล่งน้ำผิวดินทั่วไปซึ่งมีพีเอชประมาณ 7 จะพบไซยาไนต์ในรูปของไฮโดรเจนไซยาไนต์มากกว่าที่จะอยู่ในรูปของไซยาไนต์ไอออน



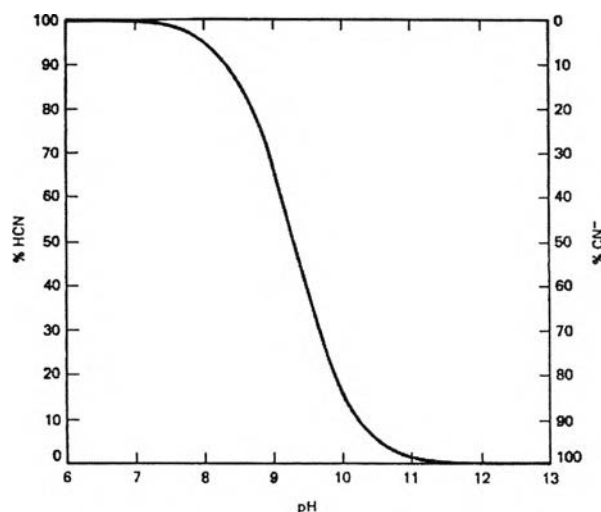
2.2.1.2 สารประกอบของไซยาไนต์กับโลหะอัลคาไลน์ เช่น โพตัสเซียมไซยาไนต์ (KCN) และโซเดียมไซยาไนต์ (NaCN) เป็นต้น มีสูตรทั่วไปเป็น A(CN)_x

เมื่อ A หมายถึง โลหะอัลคาไลน์ หรือแอมโมเนียมไอออน (NH₄⁺)

X หมายถึง วาเลนซ์ของโลหะอัลคาไลน์ หรือจำนวนของไซยาไนต์

ไอออน

โปตัสเซียมไซยาไนด์ และโซเดียมไซยาไนด์ เป็นสารประกอบที่ไม่เสถียร ระเบิดได้ง่าย มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว มีกลิ่นเหม็น ละลายน้ำได้ดี ถ้าอยู่ในสถานะที่เป็นกรด หรือเป็นกลาง ความเข้มข้นจะลดลงร้อยละ 80 ในระยะเวลา 3 วัน มีความเป็นพิษสูงมาก เมื่อสูดดมเข้าไปจะระคายเคืองต่อเยื่อทางเดินหายใจ เกิดอาการวิงเวียนศีรษะ และระคายเคืองต่อผิวหนัง



รูปที่ 2-5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไซยาไนด์ไอออน และกรดไฮโดรไซยานิคที่พีเอชต่าง ๆ (Benefield et al., 1982)

2.2.1.3 สารประกอบไซยาไนด์กับโลหะหนัก เช่น คอปเปอร์ (II) ไซยาไนด์ ($\text{Cu}(\text{CN})_2$) ซิลเวอร์ไซยาไนด์ (AgCN) และซิงค์ไซยาไนด์ ($\text{Zn}(\text{CN})_2$) เป็นต้น เป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้น้อยมาก แต่จะละลายได้ดีขึ้นเมื่ออยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะ ซึ่งมีสารประกอบของไซยาไนด์กับโลหะอัลคาไลน์ประกอบอยู่ด้วย

2.2.1.4 สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะ เช่น โปตัสเซียมเฟอร์โรไซยาไนด์ ($\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$) และโปตัสเซียมโคบอลโตไซยาไนด์ ($\text{K}_3\text{Co}(\text{CN})_6$) เป็นต้น แทนด้วยสูตรทั่วไป คือ $\text{A}_x\text{M}(\text{CN})_x$

โดยที่ A หมายถึง โลหะอัลคาไลน์

Y หมายถึง จำนวนอะตอมโลหะอัลคาไลน์ที่มีในสารประกอบ

M หมายถึง โลหะหนัก (ได้แก่ Fe, Cd, Cu, Ni, Ag และ Zn)

X หมายถึง จำนวนของไซยาไนด์ไอออน

สารประกอบเชิงซ้อนเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับสังกะสี (Zn) หรือแคดเมียม (Cd) สามารถแตกตัวได้เกือบสมบูรณ์ในสารละลายเจือจาง และเป็นพิษต่อสัตว์น้ำที่พีเอชเป็นกลาง สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับนิกเกิล (Ni) ทองแดง (Cu(I)) หรือเงิน (Ag) จะมีเสถียรภาพสูง แต่มีความเป็นพิษน้อยกว่ากรดไฮโดรไซยานิก (HCN) ส่วนสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเฟอร์ริก (Fe(III)) หรือโคบอลต์ (Co) จะมีเสถียรภาพสูงมาก มีความเป็นพิษสูง และสามารถถูกสลายด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต ได้เป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์

2.2.1.5 ไซยาโนเจนคลอไรด์ (Cyanogen chloride, CNCl) เป็นสารประกอบที่ระเหยได้ง่าย ละลายน้ำได้เล็กน้อย และมีความเป็นพิษสูงมาก เกิดขึ้นจากกระบวนการบำบัดไซยาไนด์ในน้ำเสียโดยใช้วิธีออกซิเดชันด้วยคลอรีน ตามสมการ 2-4



นอกจากไซยาไนด์ทั้ง 5 ประเภทนี้แล้ว ยังสามารถพบสารประกอบของไซยาไนด์ประเภทอื่นที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ ไธโอไซยาเนต (Thiocyanate) และไซยาเนต (Cyanate) โดยสารประกอบของไธโอไซยาเนตสามารถสลายตัวให้ไฮโดรเจนไซยาไนด์ได้ตามสมการ 2-5



สารประกอบไซยาเนต เป็นผลมาจากปฏิกิริยาขั้นที่สองของการบำบัดไซยาไนด์ในน้ำเสีย โดยการออกซิเดชันด้วยคลอรีน ซึ่งไซยาเนตจะสลายตัวในน้ำที่มีพีเอชต่ำหรือมีสภาพเป็นกลาง ตามสมการ 2-6



2.2.2 ความเป็นพิษต่อมนุษย์

ไซยาไนด์เป็นสารที่มีพิษร้ายแรงต่อมนุษย์และสัตว์ เมื่อเข้าสู่ร่างกายจะทำปฏิกิริยารวมตัวกับฮีโมโกลบิน และเอนไซม์ไซโตโครมออกซิเดส (Cytochrome oxidase) ซึ่งจำเป็นต่อกระบวนการหายใจภายในเซลล์ ทำให้เซลล์ไม่สามารถนำออกซิเจนไปใช้งานได้ และก่อให้เกิดอาการพิษ คือ ปวดศีรษะ หายใจช้า อาเจียน กระวนกระวาย หัวใจเต้นเร็ว แรงดันเลือดต่ำ ชักหมดสติ และถึงแก่ความตายได้

มีการรายงานไว้ว่าความเข้มข้นของไซยาไนด์เพียง 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร ก็จะมีความเป็นพิษอย่างร้ายแรงต่อปลาสายพันธุ์ต่างๆ (Benefield et al., 1982) ตารางที่ 2-2 ได้แสดงข้อมูลความเป็นพิษของไซยาไนด์ในรูปต่างๆที่มีใช้ในกระบวนการชุบโลหะ สำหรับในประเทศไทยได้มีการกำหนดมาตรฐานของไซยาไนด์โดยหน่วยงานต่างๆ ไว้ ดังแสดงในตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-2 ความเป็นพิษของสารประกอบไซยาไนด์ในรูปต่างๆ (U.S. EPA, 2000)

สารประกอบ	สูตร	สถานะ	TLV	LD ₅₀
ไฮโดรเจนไซยาไนด์	HCN	ก๊าซ	5 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (มนุษย์)
โปตัสเซียมไซยาไนด์	KCN	ของแข็ง	5 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (หนู) 2.85 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (มนุษย์)
โซเดียมไซยาไนด์	NaCN	ของแข็ง	5 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	6.44 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (หนู) 2.85 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (มนุษย์)
ไซยาโนเจนคลอไรด์	CNCl	ก๊าซ	0.3 พีพีเอ็ม	
โซเดียมไซยาเนต	NaCNO	ของแข็ง		260 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (หนู)
โปตัสเซียมไซยาเนต	KCNO	ของแข็ง		320 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (หนู)
โปตัสเซียมเฟอร์ไซยาไนด์	K ₃ [Fe(CN) ₆]	ของแข็ง		1600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (หนู)

TLV (Threshold Limit Value) : ค่าความเข้มข้นสูงสุดของสารมลพิษที่มนุษย์สามารถรับได้ โดยทั่วไปเป็นมาตรฐานเพื่อความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน หรือ 40 ชั่วโมงต่อสัปดาห์

LD₅₀ : ความเข้มข้นของสารมลพิษในรูปของมิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของน้ำหนักร่างกายที่ทำให้สัตว์ทดลองมีชีวิตเหลือรอดอยู่ร้อยละ 50 ภายหลังจากการสัมผัสในเวลาหนึ่งๆ

ตารางที่ 2-3 ความเข้มข้นของไซยาไนด์สูงสุดของมาตรฐานต่างๆในประเทศไทย

มาตรฐานน้ำทิ้งลงบ่อน้ำบาดาล (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 5 (พ.ศ. 2521))	มีค่าสูงสุด 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 332 (พ.ศ. 2521))	ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
มาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539))	ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
มาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลสำหรับการบริโภค (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2542))	ต้องไม่มีเลย แต่ได้กำหนดเกณฑ์อนุโลมสูงสุดไว้ให้มีได้ไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 2-3 ความเข้มข้นของไซยาไนด์สูงสุดของมาตรฐานต่างๆในประเทศไทย (ต่อ)

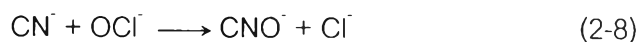
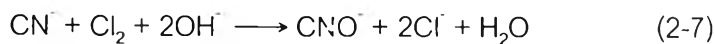
มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539))	ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
มาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท (ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 135 (พ.ศ. 2534))	ไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร
มาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่ง (ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 7 (พ.ศ. 2537))	คุณภาพน้ำทะเลชายฝั่งประเภทที่ 2-4 กำหนดให้มีไม่เกิน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร
มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน (ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537))	แหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2-4 กำหนดให้มี ค่าไม่เกินกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร
มาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน (ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20 (พ.ศ. 2543))	ต้องไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.2.3 การกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสีย

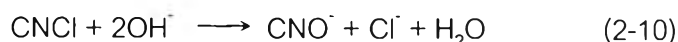
ในการกำจัดไซยาไนด์นั้น จะต้องอาศัยกระบวนการออกซิเดชันและรีดักชัน โดยการเติมสารเคมีที่เป็นตัวรีดิวซ์หรือออกซิไดซ์ ซึ่งไซยาไนด์จะถูกออกซิไดซ์ และเปลี่ยนรูปไปเป็นสารอื่นที่มีความเป็นพิษน้อยกว่าหรือไม่มีความเป็นพิษ ซึ่งวิธีการต่างๆที่มีการใช้กำจัดนั้นสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

2.2.3.1 การออกซิไดซ์ด้วยคลอรีน หรืออัลคาไลน์คลอรีเนชัน (Alkaline chlorination) เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยการเติมโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaOCl) หรือก๊าซคลอรีนร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งจะสามารถออกซิไดซ์ไซยาไนด์ไปเป็นไซยาเนตอย่างรวดเร็วเมื่อพีเอชมากกว่า 10 และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาประมาณ 30 นาทีถึง 2 ชั่วโมง ซึ่งไซยาเนตที่เกิดขึ้นนั้นจะมีความเป็นพิษน้อยกว่าไซยาไนด์อย่างมาก (ประมาณ 1000 เท่า) จากนั้นไซยาเนตจะถูกออกซิไดซ์ต่อไปด้วยคลอรีนที่มากเกินไป กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และก๊าซไนโตรเจน (N₂) ที่พีเอชตั้งแต่ 10 ขึ้นไป และอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส พบว่าจะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานหลายชั่วโมง แต่หากน้ำเสียมีพีเอชอยู่ในช่วง 8.0-8.5 จะใช้เวลาทำปฏิกิริยาเพียง 1 ชั่วโมง กลไกของปฏิกิริยาดังกล่าวสรุปได้เป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เป็นการออกซิไดซ์ไซยาไนด์ไปเป็นไซยาเนต ซึ่งสมการต่อไปนี้จะสามารถใช้ในการคำนวณปริมาณสารเคมีที่ต้องใช้ในปฏิกิริยาขั้นตอนแรก

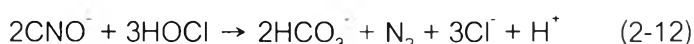


อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจริงนั้นซับซ้อนกว่าปฏิกิริยาตามสมการ 2-7 และ 2-8 ซึ่ง Chamberlain และ Synder (1965) ได้เสนอว่าการออกซิไดซ์ไซยาไนด์ไปเป็น ไซยาเนตนั้นจะเกิดไซยาโนเจนคลอไรด์ขึ้นก่อน ดังสมการต่อไปนี้



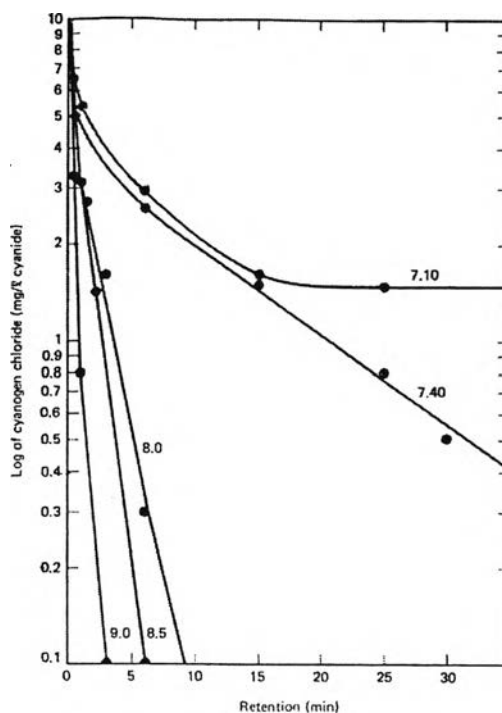
การออกซิไดซ์ไซยาไนด์ไปเป็นไซยาโนเจนคลอไรด์ จะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วที่ทุกช่วงพีเอช แต่การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไซยาโนเจนคลอไรด์ไปเป็นไซยาเนตนั้น จะเกิดได้ช้าเมื่อพีเอชมีค่าประมาณ 7.0 แต่จะเกิดอย่างรวดเร็วเมื่อพีเอชอยู่ในช่วง 8.5-9.0 (รูปที่ 2-6) ดังนั้นปฏิกิริยาขั้นแรกจึงควรมีพีเอชประมาณ 9.0-10.0 เพื่อที่จะแน่ใจว่าปฏิกิริยาที่ 2-10 นั้นเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการเปลี่ยนไซยาเนตไปเป็นไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) และก๊าซไนโตรเจน (N_2) โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อมีคลอรีนที่มากเกินพอ และพีเอช 8.5 กลไกของปฏิกิริยาเป็นไปตามสมการ 2-11 และ 2-12

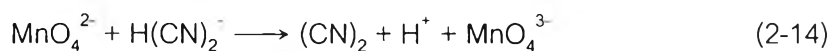


พบว่ากรดไฮโปคลอรัส (Hypochlorous acid, HOCl) จะเป็น Active Chlorine Species ที่ไปทำลายไซยาเนต ซึ่งกรดไฮโปคลอรัสเพียงเล็กน้อยก็จะสามารถออกซิไดซ์ไซยาเนตได้ เช่น ที่พีเอช 8.5 (กรดไฮโปคลอรัสประมาณ 10%) ไซยาเนตจะถูกออกซิไดซ์ได้เกือบหมดภายใน 10 นาที และเมื่อพีเอชมีค่าลดลงจะทำให้เกิดการออกซิไดซ์ได้เร็วยิ่งขึ้น

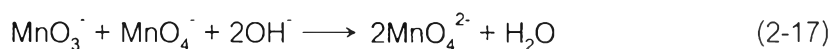
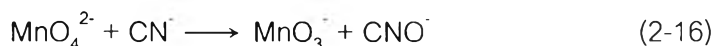
2.2.3.2 การออกซิไดซ์ด้วยโปตัสเซียมเปอร์มังกาเนต (Permanganate oxidation) เป็นการทำลายไซยาไนด์ในน้ำเสียโดยการออกซิไดซ์ด้วยโปตัสเซียมเปอร์มังกาเนต (KMnO_4) ที่พีเอช 12-14 แต่หาที่พีเอช 6-9 จะเกิดก๊าซไซยาโนเจน ($(\text{CN})_2$) ซึ่งมีความเป็นพิษสูงชัน และที่พีเอชต่ำกว่า 6 ปฏิกิริยานี้จะไม่เกิดขึ้น กลไกของปฏิกิริยาเมื่อพีเอช 6-12 จะเป็นไปตามสมการที่ 2-13 ถึง 2-15



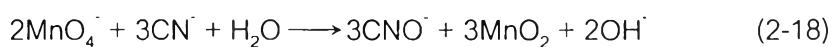
รูปที่ 2-6 ผลของพีเอชที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไซยาโนเจนคลอไรด์ไปเป็นไซยานเนต (Benefield et al., 1982)



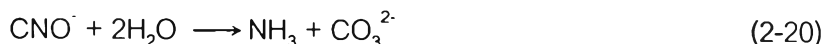
เมื่อพีเอชมีค่าเท่ากับ 12-14 และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือโปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ในการปรับพีเอชนั้น กลไกของปฏิกิริยาจะเป็นไปตามสมการ 2-16 และ 2-17



ในกรณีที่พีเอชมีค่า 12-14 เช่นเดียวกัน แต่ใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในการปรับพีเอช จะเกิดแมงกานีสออกไซด์ (MnO_2) ขึ้น และสามารถตกตะกอนได้ตามสมการ 2-18



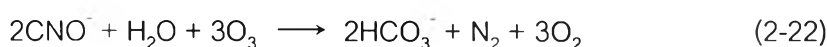
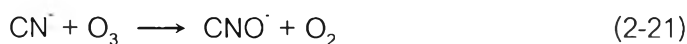
2.2.3.3 การออกซิไดซ์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide oxidation) โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เติมลงไปจะไปออกซิไดซ์ไซยาไนด์ไปเป็นไซยาเนต และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะถูกรีดิวซ์เป็นน้ำ ดังสมการ 2-19 และ 2-20



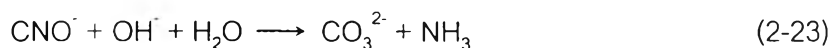
ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้เมื่อพีเอชมีค่าสูงกว่า 9 โดยมีช่วงที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 10 ถึง 11 ดังนั้นการเกิดก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ซึ่งเป็นพิษนั้นจึงไม่เกิดขึ้น

สำหรับการกำจัดไซยาไนด์ไอออนอิสระแล้ว ในการใช้งานโดยทั่วไปจะต้องใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3-6 โมล ในการทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์ 1 โมล โดยอัตราการทำปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไซยาไนด์ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ส่วนเกิน และอุณหภูมิ โดยการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาเช่น ทองแดง จะช่วยเร่งปฏิกิริยาให้สามารถเกิดขึ้นได้เร็วขึ้น (รูปที่ 2-7)

2.2.3.4 การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน (Ozonation) เป็นการทำลายไซยาไนด์ในน้ำเสียโดยการเติมโอโซน (O_3) ลงไป โดยโอโซนที่เติมลงไปจะทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์ โดยไซยาไนด์จะถูกเปลี่ยนเป็นไซยาเนต ซึ่ง Selm (1959) และ Tyler et al. (1951) เชื่อว่าการออกซิไดซ์ไซยาเนตไปเป็นไนโตรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์จะเป็นไปตามปฏิกิริยาดังนี้

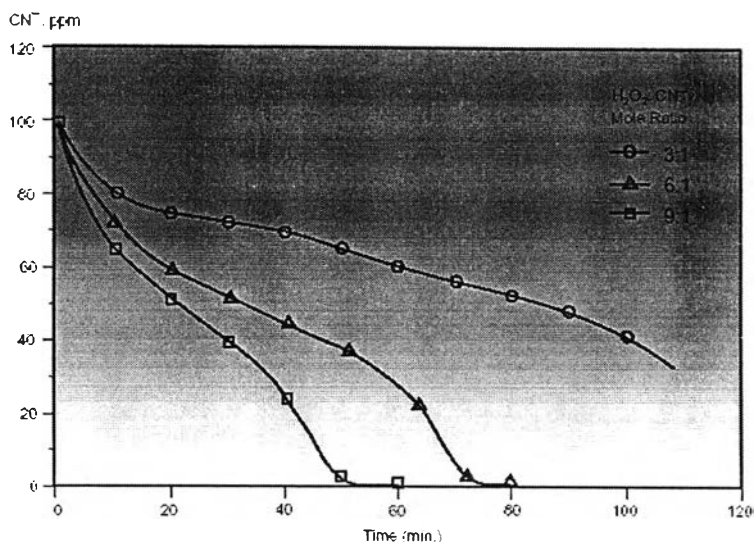


ในสารละลายที่มีพีเอชเป็นด่างนั้น ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไซยาเนตจะเกิดขึ้น ดังสมการ



จากนั้นแอมโมเนียที่เกิดขึ้นจะถูกออกซิไดซ์ต่อไปได้เป็นไนเตรต ซึ่งปฏิกิริยาที่สังเกตได้โดย Singer และ Zilli (1975) เป็นไปดังนี้





รูปที่ 2-7 การทำลายไซยาไนด์โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อมีการเติมทองแดง 25 มิลลิกรัมต่อลิตร (Solvay Interlox, 2001)

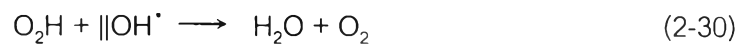
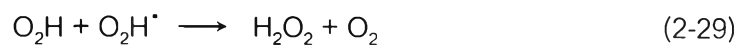
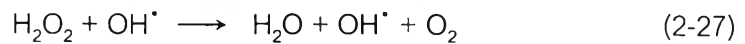
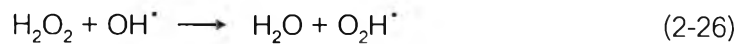
โดยที่พีเอช 9-12 จะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาประมาณ 10-15 นาที และเมื่อมีการเติมทองแดงลงไปปริมาณเล็กน้อยจะสามารถเร่งปฏิกิริยาให้เกิดได้เร็วขึ้น โดยวิธีนี้จะสามารถทำลายสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับนิเกิล สังกะสี แคดเมียม หรือทองแดงได้ แต่สำหรับสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโคบอลต์ ทอง หรือเหล็กจะทำลายได้ยากแม้ว่าจะเติมตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ทองแดง หรือแมงกานีส ลงไปก็ตาม แต่ว่าการใช้โอโซนร่วมกับรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะช่วยให้สามารถออกซิไดส์สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้ได้อย่างสมบูรณ์

2.2.3.5 กระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet oxidation) การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตจะทำให้สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ เช่น เฟอร์ไรต์ และเฟอร์ไรต์ไซยาไนด์แตกตัวได้บางส่วน การออกซิไดส์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับการเติมโอโซน หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะช่วยให้สามารถออกซิไดส์สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะได้อย่างสมบูรณ์ ข้อจำกัดของการออกซิไดส์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต คือ สามารถใช้ได้เฉพาะสารละลายที่ค่อนข้างใส เนื่องจากน้ำเสียจะต้องไหลผ่านเพื่อรับรังสีอัลตราไวโอเล็ตเข้มข้นอย่างต่อเนื่อง การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl Radical, OH[•]) ซึ่งเป็นสารออกซิไดส์ที่รุนแรง สามารถที่จะออกซิไดส์สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเหล็กได้ แหล่งกำเนิดแสงที่เหมาะสมจะให้รังสีอัลตราไวโอเล็ตในช่วงความยาวคลื่น 200 ถึง 280 นาโนเมตร ซึ่งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และโอโซนจะสามารถดูดซับรังสีในช่วงนี้ไว้ได้ ข้อดีของการออกซิไดส์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับโอโซน และรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับ

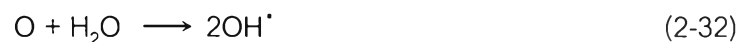
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ คือ ไม่เกิดสารที่ไม่พึงประสงค์ เช่น แอมโมเนีย การออกซิไดซ์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตยังสามารถที่จะใช้ร่วมกับ Fenton's reagent และไททาเนียมไดออกไซด์ได้อีกด้วย

สมการด้านล่างได้สรุปปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือโอโซนร่วมกับการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต (U.S. EPA, 2000)

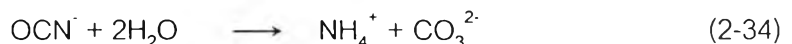
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ :

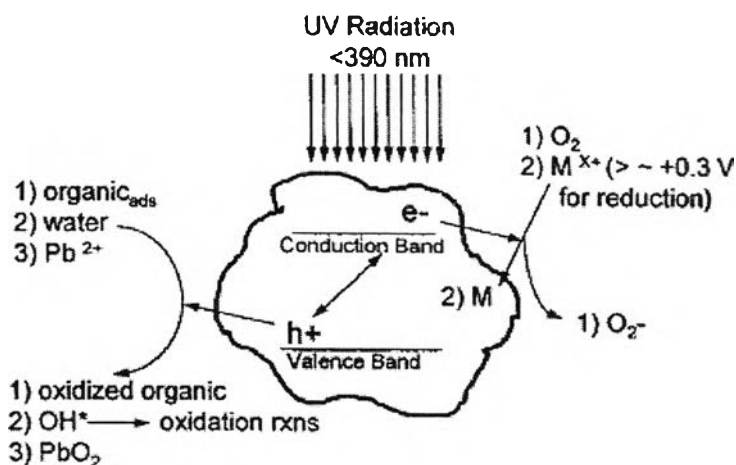


โอโซน :



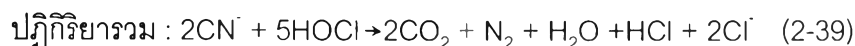
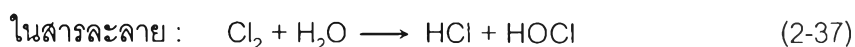
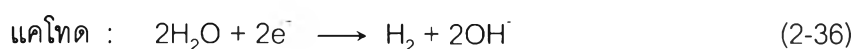
ส่วนการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์นั้น เมื่อไททาเนียมไดออกไซด์ได้รับรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 390 นาโนเมตร ซึ่งตรงกับพลังงาน Band gap ของไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้าง Anatase ที่เท่ากับ 3.2 eV (Chiang et al., 2002) ก็จะสร้างอนุมูลไฮดรอกซิล ขึ้นที่ผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ (รูปที่ 2-8) ซึ่งอนุมูลไฮดรอกซิลนั้นเป็นสารออกซิแดนซ์ที่รุนแรงมาก (Vohra และ Davis, 2000) ซึ่งผลผลิตของปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้จะได้เป็นไฮยาเนต ซึ่งสามารถที่จะถูกออกซิไดซ์ต่ออย่างรวดเร็วบนผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ต่อไปได้เป็นไนเตรต และคาร์บอเนต หรืออาจจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไฮยาเนตขึ้นได้ ทำให้แอมโมเนีย และคาร์บอเนตมีค่าสูงขึ้น (Chiang et al., 2003) ดังสมการที่ 2-33 และ 2-34





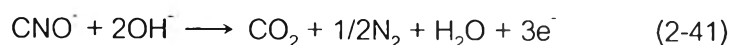
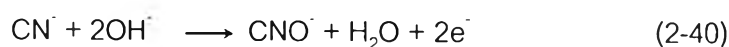
รูปที่ 2-8 แผนผังแสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนผิวของไททาเนียมไดออกไซด์เมื่อได้รับรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Madden et al., 1997)

2.2.3.6 กระบวนการออกซิเดชันตัวด้วยไฟฟ้า (Electrochemical processes) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีด้วยกัน ซึ่งในวิธีแรกนี้ เป็นวิธีการทางไฟฟ้าเคมีโดยอ้อม โดยจะเป็นการผลิตไฮโปคลอไรต์ (OCI) จากโซเดียมคลอไรด์ที่เติมลงไป จากนั้นไฮโปคลอไรด์ที่เกิดขึ้นจะไปทำลายไซยาไนด์ต่อไป วิธีนี้สามารถใช้ได้ดีกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไซยาไนด์น้อยกว่า 500 มิลลิกรัมต่อลิตร (Ogutveren et al., 1999) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นไปดังนี้

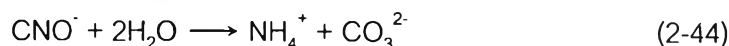


ส่วนวิธีที่สองจะเหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไซยาไนด์สูงๆ (มากกว่า 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งวิธีการนี้จะเป็นการออกซิเดชันที่แอนอดโดยตรง โดยจะเปลี่ยนไซยาไนด์ไปเป็นไซยาเนต ซึ่งจะถูกละลายต่อไปได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ หรือออกซาลेटไฮดรอกไซด์ขึ้นอยู่กับพีเอช (Ogutveren et al., 1999) ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นไปดังนี้

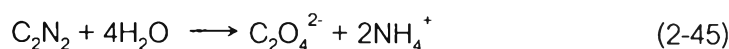
ในสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง (พีเอช 12) :



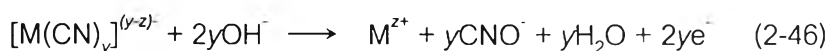
ในสารละลายที่เป็นกลางและเป็นด่างอ่อน (พีเอช 7.0-11.7) :



ในสารละลายที่เป็นกรดอ่อน (พีเอช 5.2-6.8) :



ส่วนในน้ำเสียอุตสาหกรรมที่ประกอบไปด้วยไซยาไนด์ และโลหะหนัก เช่น แคดเมียม (Cd) ทองแดง (Cu) นิกเกิล (Ni) สังกะสี (Zn) และเหล็ก (Fe) นั้น ไซยาไนด์จะเข้าไปรวมตัวอย่างรวดเร็วกับไอออนของโลหะหนัก M^{2+} ได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เสถียร $[\text{M}(\text{CN})_y]^{(y-2)-}$ กลไกในการสลายตัวของสารประกอบเชิงซ้อนนี้ยังไม่มีที่ยืนยัน แต่ได้มีการเสนอไว้อยู่ 2 กลไกด้วยกัน โดยในกลไกแรกเป็นการออกซิเดชันโดยตรงของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์ไปเป็นไซยาเนต ซึ่งจะเกิดขึ้นที่แอโนด



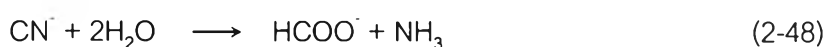
ส่วนกลไกที่สองนี้เกี่ยวข้องกับการแตกตัวทางเคมีของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์ในสารละลาย ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นดังนี้



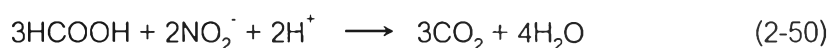
จากนั้นจึงเกิดการออกซิเดชันของไซยาไนด์อิสระไปเป็นไซยาเนตต่อไป ดังสมการ 2-40 ถึง 2-45 ที่ได้แสดงไว้ข้างต้นแล้ว (Tan et al, 1985)

ผลกระทบของโลหะหนักต่อการออกซิเดชันของไซยาไนด์นั้น ได้มีการรายงานไว้หลายราย (Dart et al., 1963; El-Ghaoui et al., 1982; Hine et al., 1986; Ho et al., 1990) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า สังกะสี ทองแดง นิกเกิล และแคดเมียม จะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีขึ้น ส่วนในขณะที่เหล็กจะส่งผลเสียต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไซยาไนด์

2.2.3.7 การออกซิเดชันด้วยความร้อน (Thermal oxidation) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการทำลายไซยาไนด์ การทำลายไซยาไนด์ด้วยความร้อน สามารถที่จะใช้ได้ทั้งการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิสูง และการเผาไหม้ ที่อุณหภูมิระหว่าง 140 องศาเซลเซียส ถึง 200 องศาเซลเซียส และพีเอช 8 ไซยาไนด์จะถูกไฮโดรไลซ์อย่างรวดเร็วเกิดเป็นฟอร์มेट (HCOO⁻) และแอมโมเนีย (Hartinger, 1994) แรงดันที่ต้องใช้สูงถึง 100 บาร์ แต่กระบวนการนี้สามารถที่จะบำบัดของเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงความเข้มข้นที่กว้าง และสามารถใช้ได้กับทั้งน้ำล้างชิ้นงาน และสารละลายเข้มข้น



หากมีไนไตรต์เข้ามาด้วย ฟอर्मेट และแอมโมเนียสามารถที่จะถูกทำลายได้ในถึงปฏิกรณ์แบบหลอด (Tube reactor) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ดังสมการต่อไปนี้



2.2.3.8 วิธีการอื่นๆที่ใช้ในการบำบัดไซยาไนด์ ซึ่งได้มีการนำเสนอ หรือมีการใช้งานอยู่น้อยในทางปฏิบัติ เช่น

- การตกตะกอนไซยาไนด์ด้วยเกลือของ Fe(II) (Hartinger, 1994)
- การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Patterson, 1985)
- กระบวนการคาสโตน (Kastone process) (Patterson, 1985)
- การทำลายด้วยออกซิเจน (Hartinger, 1994)
- การทำลายด้วย SO₂/Air (INCO, 1993)
- การทำลายด้วย Fenton's reagent (Eilbeck และ Mattock, 1987)

2.2.4 ทบทวนเอกสารการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดไซยาไนด์

เพ็ชรจิตต์ (2527) ทำการศึกษาลักษณะของน้ำเสีย และสภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณไซยาไนด์ในน้ำเสียจากกระบวนการชุบโลหะด้วยทองแดง โดยวิธีการออกซิเดชันด้วยเกลือไฮโปคลอไรท์ และทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ในแบบจำลอง พบว่าน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะจำนวน 22 แห่งในเขตกรุงเทพมหานครมีปริมาณไม่มากนัก สามารถกำจัดแบบเบตซ์ได้ พีเอชของน้ำเสียที่มีไซยาไนด์เป็นส่วนประกอบจะมีสภาพเป็นด่าง ความเข้มข้นของ

ไชยาไนต์ในน้ำเสียของโรงงานแต่ละแห่งจะแตกต่างกัน โดยอยู่ในช่วง 4.40-1,667.45 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดไชยาไนต์ในน้ำทิ้ง (ร้อยละ 99.67) คือ ใช้อัตราส่วนโดยโมลของไชยาไนต์ต่อโซเดียมไฮโปคลอไรท์ 1 ต่อ 4 และเวลาทำปฏิกิริยา 15 นาที เมื่อนำค่าสภาวะที่เหมาะสมนี้ไปใช้กับแบบจำลองพบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับร้อยละ 98.98 และเมื่อทดลองกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไชยาไนต์ต่างๆกันในช่วง 200-1,044 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของไชยาไนต์ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดไชยาไนต์

สารโรซ (2535) ทำการศึกษาแนวทางในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ ครอบคลุมการชุบโครเมียม การชุบทองแดง การชุบนิกเกิล และการชุบสังกะสี และน้ำเสียจริงจากโรงงานเป็นกรณีตัวอย่าง โดยได้ทำการเปรียบเทียบการใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์ และแคลเซียมไฮโปคลอไรท์ ในการออกซิไดส์ไชยาไนต์ให้เป็นไซยาเนต โดยไชยาไนต์ในน้ำเสียจะมีความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งผลการทดลองพบว่า การใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์และแคลเซียมไฮโปคลอไรท์ 1.25 เท่า สามารถกำจัดไชยาไนต์ได้อย่างสมบูรณ์ และเมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดพบว่า การใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรท์จะเสียค่าใช้จ่ายน้อยกว่าการใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์ประมาณ 50%

ชลชัย และคณะ (2540) ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ ซึ่งมีการปนเปื้อนของโลหะหนักและไชยาไนต์ ซึ่งผลการทดลองบำบัดน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบทองที่มีพีเอช 11 และมีความเข้มข้นของไชยาไนต์เท่ากับ 58.78 มิลลิกรัมต่อลิตร จะต้องใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์ประมาณ 2.26 เท่าของที่ใช้ในทางทฤษฎีในการกำจัดไชยาไนต์ และตกตะกอนทางเคมีของโลหะหนัก โดยทำการขยายเวลาของการออกซิไดส์ในขั้นที่หนึ่งจากเดิม 20 นาทีเป็น 1 ชั่วโมงจะทำให้โลหะหนักทั้งคอปเปอร์ และนิกเกิลมีความเข้มข้นที่เหลืออยู่ต่ำกว่ามาตรฐาน และสามารถกำจัดไชยาไนต์ได้หมด

วิสิทธิ์ (2540) ทำการศึกษาลักษณะของน้ำเสีย สภาวะที่เหมาะสม และประสิทธิภาพในการบำบัดไชยาไนต์ในน้ำทิ้งจากกระบวนการชุบโลหะด้วยสังกะสีโดยวิธีออกซิเดชันด้วยโปตัสเซียมเปอร์มังกาเนต ซึ่งจากการศึกษาน้ำทิ้งที่ปนเปื้อนไชยาไนต์ พบว่าน้ำเสียชนิดนี้มีสภาพเป็นด่าง มีค่าพีเอชระหว่าง 11.1-12.5 และมีความเข้มข้นของไชยาไนต์อยู่ในช่วง 315-442 มิลลิกรัมต่อลิตร และโดยสรุปแล้วสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดไชยาไนต์ในน้ำทิ้ง คือ อัตราส่วนโดยโมลของไชยาไนต์ต่อโปตัสเซียมเปอร์มังกาเนต 1 ต่อ 2 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 15 นาที ซึ่งสามารถบำบัดไชยาไนต์ได้ถึงร้อยละ 100 ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดไชยาไนต์

ในน้ำที่ดังกล่าวนี้อย่างยิ่งพบอีกว่านอกจากสามารถบำบัดไซยาไนด์ได้หมดแล้ว ยังสามารถบำบัดสารมลพิษต่างๆ ได้แก่ ซีโอดี และสังกะสี เป็นต้น ได้ดีในระดับหนึ่งด้วย แต่ว่าของแข็งละลายในน้ำจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากเดิมมากภายหลังจากการบำบัด

ชุตินพงษ์ และปริยพันธ์ (2542) ทำการศึกษาการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตเพื่อสลายพันธะของสารประกอบไซยาไนด์เชิงซ้อนออกมาเป็นไซยาไนด์ไอออนอิสระ โดยศึกษานิตและกำลังวัตต์ของหลอดอัลตราไวโอเล็ตที่ใช้ ความเข้มข้นของสารละลายไอออนโลหะทั้ง 5 ชนิดที่สามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไซยาไนด์ ได้แก่ Fe(III) Ni(II) Cu(II) Cd(II) และ Ag(I) รวมทั้งระยะเวลาในการฉายแสงที่ให้เปอร์เซ็นต์การสลายตัวมากที่สุด ซึ่งผลการทดลองพบว่า หลอดอัลตราไวโอเล็ตชนิดฆ่าเชื้อกำลัง 20 วัตต์สามารถทำให้สารละลายไซยาไนด์เชิงซ้อนของเหล็กที่มีความเข้มข้น 0.05 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สลายตัวได้มากที่สุด 28.96% ที่เวลา 10 นาที และทำให้สารละลายไซยาไนด์เชิงซ้อนของนิกเกิลที่มีความเข้มข้น 0.1 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรสลายตัวได้มากที่สุด 26.83% ที่เวลา 20 นาที สำหรับสารละลายไซยาไนด์เชิงซ้อนของคอปเปอร์ แคดเมียม และซิลเวอร์ หลอดอัลตราไวโอเล็ตชนิดฟลูออเรสเซนต์กำลัง 15 และ 40 วัตต์ไม่มีผลต่อการสลายพันธะ แต่หลอดอัลตราไวโอเล็ตชนิดฆ่าเชื้อกำลัง 20 วัตต์ทำให้ไซยาไนด์ไอออนอิสระเกิดการรวมตัวกับไอออนโลหะเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้มากขึ้น

Zeevalkink et al. (1980) ทำการศึกษาถึงกลไก และจลนศาสตร์ของการทำลายไซยาไนด์ในน้ำด้วยโอโซน โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโปตัสเซียมไซยาไนด์ไปเป็นไซยาเนตนั้น จะทำการวัดในสารละลายที่มีสภาพเป็นด่าง (พีเอช 11.8) และอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้สภาวะดังกล่าว อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นอันดับหนึ่งเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของโอโซนในน้ำ แต่ว่าจะไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของไซยาไนด์ อัตราการออกซิเดชันจะมีค่าสูงจนกระทั่งการเปลี่ยนรูปของไซยาไนด์จะถูกจำกัดโดยการถ่ายเทมวล จากการทำตุลมวลแสดงให้เห็นว่าการใช้โอโซน 1 โมลจะสามารถออกซิไดซ์ไซยาไนด์ได้เท่ากับ 1 โมล

ซึ่งจากกลไกที่เสนอขึ้นมาสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของไซยาไนด์ ทำให้สามารถทำนายสมการอัตราการทำปฏิกิริยาได้ดังนี้

$$R = k_{CN} [O_3][CN]^{1/2} \quad (k_{CN} = 135 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ kmol}^{-1/2})$$

Ho et al. (1990) ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำทิ้งด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี โดยถึงปฏิกรณ์ที่ใช้จะบรรจุแอโนดที่ทำมาจากสเตนเลส ส่วนน้ำเสียที่ใช้จะเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากการนำคอปเปอร์ไซยาไนด์มาละลายในสารละลายของโปตัสเซียมไซยาไนด์ ให้มีค่าอัตราส่วนไซยาไนด์ต่อคอปเปอร์ R เท่ากับ 4.6 10 และ ∞ โดย R ที่มีค่าเท่ากับ ∞ หมายความว่า เป็นสารละลายโปตัสเซียมไซยาไนด์เพียงอย่างเดียว ซึ่งจากผลการทดลองพบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะลดความเข้มข้นของไซยาไนด์จาก 1,400 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้มีค่าต่ำกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายในระยะเวลา 4-20 ชั่วโมง และมีอัตราการใช้พลังงานเท่ากับ 5-13 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัมไซยาไนด์ อีกทั้งยังได้มีการพัฒนาสมการออกแบบเพื่อที่จะใช้ในการทำนายอัตราการสลายตัวของไซยาไนด์ที่ปริมาตรถึงปฏิกรณ์ และกระแสไฟฟ้าที่กำหนด

Futakawa et al. (1994) ทำการสรุปการดำเนินงานตั้งแต่ปี 1991 ของโรงงานนำร่องที่ตั้งอยู่ที่ Sendai ของบริษัท NPC Sendai Works โดยระบบที่ใช้ในการบำบัดเป็นระบบ OG-CWO น้ำเสียที่เข้าโรงบำบัดจะเป็นน้ำเสียที่มีค่าซีไอดีสูง ซึ่งองค์ประกอบหลักของน้ำเสียนี้ คือโปตัสเซียมเฟอโรไซยาไนด์ ($K_4[Fe(CN)_6]$) หรือ โปตัสเซียมเพอโรไซยาไนด์ ($K_2[Fe(CN)_6]$) มีค่าไซยาไนด์ทั้งหมดเท่ากับ 14,100 มิลลิกรัมต่อลิตร โรงบำบัดมีความสามารถในการบำบัด 2 ตัน/วันรับน้ำเสียทั้งหมดจากกระบวนการผลิต Tuff ride ซึ่งผลการดำเนินงานในส่วนของกำจัดไซยาไนด์พบว่าสามารถกำจัดไซยาไนด์ได้เหลือน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสามารถที่จะปล่อยลงท่อระบายน้ำได้

Dhamo (1996) ทำการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าของไซยาไนด์ในเซลล์แบบไฮโดรโซโคลนที่ใช้แกรไฟต์เป็นแอโนด โดยน้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียเจือจางจากการล้างชิ้นงานในกระบวนการชุบโลหะ ซึ่งประกอบไปด้วย $K[Ag(CN)_2]$ KCN และ K_2CO_3 ซึ่งจากผลการทดลองสรุปได้ว่า ที่ความเข้มข้นของไซยาไนด์ในช่วง 2.5-0.69 กรัมต่อลิตร การกำจัดไซยาไนด์จะเกิดขึ้นด้วยอัตราค่อนข้างคงที่ ≈ 0.73 กรัมต่อชั่วโมง ($\approx 8 \times 10^{-4}$ โมลต่อชั่วโมง)

Augugliaro et al. (1999) ทำการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไซยาไนด์ไอออนอิสระ ในสารแขวนลอยของโททาเนียมไดออกไซด์ Degussa P-25 และมีการเติมอากาศ ซึ่งมีการนำไปปรับแสงอาทิตย์โดยระยะเวลาที่น้ำในส่วนที่รับแสงอาทิตย์เท่ากับ 108 วินาที อีกทั้งยังได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของสารประกอบอินทรีย์ ได้แก่ ฟีนอล หรือสารออกซิแดนซ์ที่รุนแรง ได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อีกด้วย โดยได้ทำการสังเกตอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสงโดยอาศัยพารามิเตอร์ต่อไปนี้ (1) ความเข้มข้นของไซยาไนด์ : 0.19-2.4 มิลลิโมลาร์ (2) ปริมาณ

ของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1-0.5 กรัมต่อลิตร (3) ความเข้มข้นของฟีนอล ภายใต้สภาวะที่ทำการทดลอง จลนศาสตร์ของปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสงของไฮยาไนต์จะไม่ขึ้นกับความเข้มข้นเริ่มต้นของ ไฮยาไนต์ และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา แต่จะมีผลจากความเข้มข้นของฟีนอล และไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์ อีกทั้งได้ทำการสังเกตกลไกของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น พบว่ามีไฮยาเนต ไนเตรต และ คาร์บอเนต เป็นผลิตภัณฑ์หลักของปฏิกิริยา การทำดูลมวอลของไนโตรเจนจะทำได้ภายใต้สภาวะที่ ใช้สารออกซิแดนซ์ที่รุนแรงเท่านั้น ซึ่งได้เสนอแนะว่าอาจจะเกิดสารประกอบของไนโตรเจนที่ระเหย ได้ง่ายขึ้นภายใต้สภาวะที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ไม่รุนแรง

Ogutveren et al. (1999) ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ Bipolar Trickle Tower ซึ่งบรรจุวงแหวนแกรไฟต์เพื่อเป็นอิเล็กโทรดในการกำจัดไฮยาไนต์จากน้ำทิ้ง พบว่าทั้งการ ออกซิไดซ์โดยตรง และโดยอ้อมนั้นมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดสำหรับการกำจัดไฮยาไนต์ทั้งแบบแบบตื้นที่มีการเวียนน้ำกลับ และแบบต่อเนื่อง ความเข้มข้นของไฮยาไนต์ในสารละลายจะถูกลดจาก 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือน้อยกว่า 60 มิลลิกรัมต่อลิตร และจาก 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือน้อย กว่า 30 มิลลิกรัมต่อลิตร มีอัตราการใช้พลังงานในช่วง 18.4-26.8 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/กิโลกรัม ไฮยาไนต์ที่ถูกกำจัดไประหว่างการดำเนินงานแบบต่อเนื่อง ในกรณีที่ความเข้มข้นของไฮยาไนต์ เท่ากับ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร จะสามารถกำจัดไฮยาไนต์ทั้งหมดได้โดยใช้พลังงานเท่ากับ 78.5 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/กิโลกรัมไฮยาไนต์ อย่างไรก็ตามที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากัน การลดความเข้มข้น ของไฮยาไนต์ให้มีค่าเหลือ 30 มิลลิกรัมต่อลิตรนั้น จะใช้พลังงานเพียง 8.75 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ กิโลกรัม โดยในระหว่างการบำบัด อัตราการกำจัดจะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของไฮยาไนต์ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเพื่อลดความเข้มข้นของไฮยาไนต์จาก 30 มิลลิกรัมต่อลิตรให้เป็นศูนย์ (70 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/กิโลกรัม) มากกว่าที่ต้องใช้เพื่อลดความเข้มข้น จาก 300 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 30 มิลลิกรัมต่อลิตรอย่างมาก (8.75 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/กิโลกรัม) มากไปกว่านั้น ยังสามารถที่จะลดความเข้มข้นของไฮยาไนต์จาก 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้เหลือน้อยกว่า 300 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการ ใช้พลังงานเพียงเล็กน้อย (3 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/กิโลกรัม ไฮยาไนต์ที่ถูกกำจัด เท่ากับ 3.6 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตรของน้ำเสียที่บำบัด) เมื่อ ดำเนินงานแบบแบบตื้น การกำจัดไฮยาไนต์ทั้งหมดสามารถที่จะทำได้ที่ทุกๆความเข้มข้นเริ่มต้น พลังงานที่ใช้สำหรับการทดลองนี้เท่ากับ 5.51 สำหรับ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร 5.14 สำหรับ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร 6.3 สำหรับ 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ในหน่วยกิโลวัตต์-ชั่วโมง/กิโลกรัมไฮยาไนต์ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสำหรับถังปฏิกรณ์นี้สามารถหาได้ โดยมีค่าเฉลี่ย 4.35×10^{-4} เมตร/วินาที

Carrillo-Pedroza et al. (2000) ทำการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไซยาไนด์ด้วยไอโซน โดยทำการทดลองที่พีเอช อัตราการเติมไอโซน อัตราการไหลของก๊าซ และความเข้มข้นของไซยาไนด์ต่างๆ โดยน้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งผลการทดลองแสดงว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไซยาไนด์สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ ซึ่งจะเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเมื่อเทียบกับกับความเข้มข้นของไอโซนในก๊าซผสม และเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของไซยาไนด์ในสารละลาย โดยค่าคงที่อัตราซึ่งหาได้จากการทำปฏิกิริยามีค่าประมาณ 10^{-5} โมล/ลิตร-วินาที การประมาณปริมาณไอโซนที่ต้องใช้จากสมการพบว่าต้องใช้ไอโซน 1 โมล ในการทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์ 1 โมล ซึ่งจะได้ไซยาเนต 1 โมล จากนั้นได้ทำการยืนยันผลที่ได้นี้โดยการทดลองกับน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่จำนวน 2 แห่งในเม็กซิโกอีกครั้งหนึ่ง

Gijzen et al. (2000) ทำการศึกษาถึงผลกระทบของไซยาไนด์ต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ โดยน้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีส่วนประกอบเป็นแป้ง และกรดไขมันระเหยง่าย พบว่าการใช้ถังปฏิกรณ์แบบยูเอเอสบีที่มีระยะเวลาพักน้ำเท่ากับ 12 ชั่วโมง สามารถที่จะสร้างความคุ้นเคยให้แบคทีเรียที่มีความเคยชินกับไซยาไนด์ได้ที่มีความเข้มข้นสูงถึง 125 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการประเมินระดับของไซยาไนด์ในน้ำทิ้งแสดงว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์จะมีค่าอยู่ระหว่าง 91% ถึง 93% ที่อัตราการระเหยของไซยาไนด์ประมาณ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร-วัน ผลกระทบของไซยาไนด์ในการยับยั้งการผลิตมีเทนนั้น พบว่าจะมีผลต่อแบคทีเรียกลุ่มที่ใช้อะซีเตตมากกว่ากลุ่มที่ใช้ไฮโดรเจนเป็นอาหาร ซึ่งจากการค้นพบในการศึกษานี้ได้แสดงถึงศักยภาพของระบบไร้อากาศในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียที่มีไซยาไนด์ปนเปื้อนอยู่ได้

Szpyrkowicz et al. (2000) ทำการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางไฟฟ้าอย่างรวดเร็วของไซยาไนด์ และการนำทองแดงจากน้ำล้างชิ้นงานซึ่งตกตะกอนอยู่บนแคโทดกลับมาใช้งานใหม่ โดยใช้แอโนดที่ทำมาจาก Ti/Pt ซึ่งทั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรง และออกซิเดชันโดยอ้อมในตัวกลางที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงพบว่าสามารถเกิดขึ้นได้ แต่ว่าการออกซิเดชันโดยตรงจะให้ผลที่ดีกว่า เนื่องจากมีการใช้พลังงานที่น้อยกว่า ซึ่งผลการทดลองแสดงว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงภายใต้สภาวะที่เป็นต่าง จะทำให้เกิดชั้นฟิล์มบางๆบนแอโนดซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนการเกิดตะกอนทองแดงอย่างรวดเร็วบนแคโทดนั้นสามารถที่จะเกิดขึ้นได้ถ้ากระทำที่พีเอช 13 หรือสูงกว่า กระบวนการสามารถอธิบายได้ด้วยจลนศาสตร์อันดับหนึ่ง โดยมีค่าคงที่อัตราสำหรับการกำจัดทองแดงเท่ากับ 0.013 ชั่วโมง⁻¹ สำหรับสภาวะที่มีความเป็นต่างมาก การใช้พลังงานสำหรับการสลายทองแดงพิสูจน์ได้ว่าเป็นส่วนกลับกับความเข้มข้นของทองแดง

เริ่มต้น สำหรับน้ำเสียที่มีทองแดง 1,100 มิลลิกรัมต่อลิตร จะต้องใช้พลังงานเท่ากับ 5.46 กิโลวัตต์ ในการกำจัดทองแดง 1 กิโลกรัม ประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้า (Current efficiency) สำหรับการกำจัดซีโอดีมีค่า 100% หรือมากกว่า ซึ่งสามารถชี้ให้เห็นว่าเกิดปฏิกิริยาอื่นขึ้นอย่างรวดเร็ว นอกเหนือจากการปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดนั้น ไชยาไนต์ทั้งหมดจะมี ค่าลดลงจาก 250 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 7.9 มิลลิกรัมต่อลิตร

Kim et al. (2001) ทำการศึกษาการกำจัดไชยาไนต์โดยใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยใช้หลอดยูวีชนิด High pressure mercury กำลัง 400 วัตต์ โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของไชยาไนต์ เท่ากับ 1.92×10^{-3} โมลต่อลิตร และไททาเนียมไดออกไซด์ 0.2 กรัมในสารละลาย 300 มิลลิลิตร และปริมาณโลหะที่ใช้กำหนดให้คงที่เท่ากับ 6% โดยน้ำหนัก พบว่าไททาเนียมไดออกไซด์ Degussa P-25 ที่ถูกกระตุ้นโดยนิเกิล คอปเปอร์ โคบอลต์ และ ซิลเวอร์จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ ว่องไวในการนำมาใช้กำจัดไชยาไนต์ การทำงานของ Ni-Cu/TiO₂ ที่ทุกอัตราส่วนของ Cu/Ni จะมี ค่าสูงกว่าการใช้ Ni/TiO₂ หรือ Cu/TiO₂ เพียงอย่างเดียว ซึ่งหมายความว่า การใช้เงินิเกิลร่วมกับ ทองแดงจะมีผลการทำงานที่เสริมกัน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้อัตราส่วน Cu/Ni เท่ากับ 0.3 จะมีการ ทำงานที่ดีที่สุด

Aguado et al. (2002) ทำการศึกษาถึงการนำเอาไททาเนียมไดออกไซด์ มาใช้เป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยาในการออกซิไดซ์ไชยาไนต์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้เตรียมได้ จากโปตัสเซียมไชยาไนต์ และเฮกซะไชยาโนเฟอเรต ให้มีความเข้มข้นไชยาไนต์เริ่มต้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา (TiO₂) ที่ใช้ในแต่ละชุดการทดลองเท่ากับ 0.5 กรัม/ลิตร พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 11.5 และใช้หลอดยูวีชนิด Medium pressure mercury (Heraeus TQ-150) กำลัง 150 วัตต์ และมีการเวียนสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตเพื่อใช้ป้องกัน ความร้อนของสารละลายที่สูงเกินไป และเพื่อตัดรังสียูวีที่มีความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 300 นาโนเมตร ซึ่งผลการทดลองสรุปได้ว่าการใช้ซิลิกาเป็นวัสดุรองรับ (Support) นั้น เป็นวิธีที่ดีในการเตรียมวัสดุ ที่มีไททาเนียมไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก โดยจะช่วยในการทำงานของปฏิกิริยาออกซิเดชัน ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตของไชยาไนต์ และเพิ่มคุณสมบัติในการตกตะกอนให้ดีขึ้น ซึ่งการใช้ซิลิกา ที่มีโครงสร้างขนาดปานกลางเช่น SBA-15 จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดไชยาไนต์ไอออนอิสระดี ที่สุด ซึ่งพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับ Degussa P-25 แต่ประสิทธิภาพในการตกตะกอนจะดีกว่า

Cheng et al. (2002) ทำการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของคอปเปอร์ไชยาไนต์ โดยเมื่อพีเอชมีค่าต่ำ การทำลายไชยาไนต์เชื่อว่าจะถูกเร่งปฏิกิริยาโดยปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการ

ดูดซับ $[\text{Cu}(\text{CN})_3]^{2-}$ และ $[\text{Cu}(\text{CN})_3]^{3-}$ ส่วนที่พีเอชสูง จะสังเกตเห็นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างรวดเร็วเมื่อมีความต่างศักย์ประมาณ 0.75 โวลต์เทียบกับ Hg/HgO อีกทั้งจะเกิดขึ้นฟิล์มสีดำของคอปเปอร์ออกไซด์ขึ้น การเกิดการปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ดีขึ้นนี้เชื่อว่าเกี่ยวข้องกับการเกิดขึ้นของ $\text{Cu}(\text{III})$ ที่ว่องไว อีกทั้งยังได้วิเคราะห์ถึงจุดเปลี่ยนแปลงระหว่างที่พีเอชสูง และพีเอชต่ำ เป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นไซยาไนด์ และทองแดงด้วย การเกิดอิเล็กโทรไลซิสของสารละลายของคอปเปอร์ไซยาไนด์ที่ความต่างศักย์ 0.90 โวลต์ จะสามารถออกซิไดซ์ไซยาไนด์ไปเป็นไซยาเนตได้เกือบทั้งหมด จากนั้นจะเกิดการออกซิไดซ์ของไซยาเนตต่อไปเป็นไนเตรต ชั้นฟิล์มของคอปเปอร์ออกไซด์พบว่าปฏิกิริยา ซึ่งจะออกซิไดซ์ไฮดรอกไซด์ไปเป็นออกซิเจน และไซยาเนตไปเป็นไนเตรต

Dabrowski et al. (2002) ทำการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไซยาไนด์อิสระโดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ และการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยได้ทำการหาอัตราการออกซิไดซ์ไซยาไนด์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ความเข้มข้นของไซยาไนด์เริ่มต้น พีเอช ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา ก๊าซที่ใช้ และอุณหภูมิต่างๆ พบว่าเป็นไปตามจลนศาสตร์อันดับหนึ่งเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของไซยาไนด์ การใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างรังสีอัลตราไวโอเล็ตและออกซิเจน จะมีผลให้อัตราการออกซิไดซ์ไซยาไนด์อิสระเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า อย่างไรก็ตามอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะไม่ขึ้นกับความดันย่อยของออกซิเจน (0.2 – 1.0 บรรยากาศ) ที่อัตราการไหลของก๊าซในช่วงที่ทำการศึกษา ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิจาก 20 องศาเซลเซียสไปเป็น 35 องศาเซลเซียสนั้น ไม่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไซยาไนด์

Ismail et al. (2003) ทำการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุดในการเตรียม $\text{V}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$ ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้แอมโมเนียมเมตาวานาเดต (Ammonium metavanadate, AMV) แทนวานาเดียมแอลคอกไซด์ (Vanadium alkoxides) ซึ่งมีราคาแพง โดยใช้เทคนิคการเตรียมแบบ Sol-gel โดยสารเคมีที่ใช้เตรียมได้แก่ Ammonium metavanadate, Tetraethylorthosilicate (TEOS), 98% $\text{Si}[\text{OC}_2\text{H}_5]_4$ และเอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) ซึ่งผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเจลของ $\text{V}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$ คือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง วานาเดียม/ซิลิกา เท่ากับ 1:1 และ $\text{TEOS}:\text{H}_2\text{O}:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ เท่ากับ 1:8:4 โดยโมล ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 10 นาที ที่สภาวะการเตรียมเหล่านี้ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ของ $\text{V}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$ จะเท่ากับ 98.5% และมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 310 ตารางเมตรต่อกรัม โดยในการทดลองจะใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิด Black light-blue (F18W-BLB) ซึ่งให้ความยาวคลื่นเท่ากับ 365 นาโน

เมตร และความเข้มข้นของไซยาไนด์เริ่มต้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จลนศาสตร์ของการกำจัดไซยาไนด์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $V_2O_5-SiO_2$ พบว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

Parga et al. (2003) ทำการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ โดยวิธีต่างๆที่เลือกมาใช้นั้น ได้แก่ การออกซิเดชันด้วยคลอรีนไดออกไซด์ (ClO_2) การออกซิเดชันด้วยโอโซน (O_3) และการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตโดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยในการออกซิเดชันด้วยคลอรีนไดออกไซด์นั้น น้ำเสียที่ใช้จะเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของไซยาไนด์เริ่มต้นเท่ากับ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองที่ค่าพีเอชเท่ากับ 9.20 2.57 และ 11.23 ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ไซยาไนด์อิสระนั้นจะสามารถถูกทำลายได้ทุกค่าของพีเอช แต่ว่าสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์จะทำลายได้ดีเมื่อสารละลายมีพีเอชสูง โดยประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์อิสระจะเท่ากับ 99.9% ที่ทุกพีเอช และประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์จะเท่ากับร้อยละ 58.8 25.2 และ 78.8ที่พีเอช 9.20 2.57 และ 11.23 ตามลำดับ

ผลการทดลองโดยใช้การออกซิเดชันด้วยโอโซนนั้นพบว่า อัตราการออกซิไดส์ไซยาไนด์จะเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเมื่อเทียบกับอัตราการเติมโอโซน ซึ่งสามารถเขียนแทนได้โดยสมการ

$$\text{อัตราการออกซิเดชัน, มก./ลิตร-นาที่} = (190.53 \pm 15)(\text{อัตราการเติมโอโซน, กรัม/นาที่})$$

และเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของไซยาไนด์ในน้ำเสีย โดยมีค่าคงที่อัตราประมาณ 10^{-5} โมล/ลิตร-วินาที ส่วนผลการทดลองโดยการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตโดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้น พบว่าจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อพีเอชมีค่าเท่ากับ 10 โดยจะมีประสิทธิภาพเมื่อใช้แสงอาทิตย์เท่ากับร้อยละ 100 โดยน้ำเสียที่ใช้จะเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากโปตัสเซียมเฟอร์ริไซยาไนด์ ($K_3Fe(CN)_6$) มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1 มิลลิโมลาร์

Barakat, Chen และ Huang (2004) ได้ทำการศึกษาเพื่อที่อธิบายถึงผลของ Cu(II) ไอออนที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ โดยทำการทดลองที่พารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความเข้มข้นของรังสีอัลตราไวโอเล็ต ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา เวลา และอัตราส่วนคอปเปอร์ต่อไซยาไนด์ต่างๆ โดยในการทดลองมีสภาวะดังนี้ ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้นเท่ากับ 10^{-3} โมลาร์ คอปเปอร์ที่ใช้เติมในรูปของ $Cu(ClO_4)_2 \cdot 6H_2O$ ความเข้มข้นในช่วง 10^{-2} ถึง 10^{-3} โมลาร์ และกำลังไอออนคงที่ 0.1 โมลาร์ พีเอช 11 ซึ่งผลการทดลองแสดงว่าประมาณ 78% ของไซยาไนด์อิสระ

(10^{-3} โมลาร์) สามารถถูกกำจัดหลังจากเวลาในการทดลองผ่านไป 4 ชั่วโมง เมื่อมีไททาเนียมไดออกไซด์ 1 กรัมต่อลิตร และพีเอชเท่ากับ 11 คอปเปอร์ไอออน (10^{-2} โมลาร์) สามารถกำจัดได้หมดโดยใช้เวลาที่สั้นกว่า (3 ชั่วโมง) การมีทั้ง Cu(II) และ CN^- จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดทั้ง CN^- และคอปเปอร์ เมื่ออัตราส่วน Cu:CN⁻ เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดจะเพิ่มขึ้นด้วย

การเพิ่มความเข้มข้นของรังสีอัลตราไวโอเล็ตจาก 100 วัตต์ เป็น 200 วัตต์ จะทำให้อัตราการกำจัดไซยาไนด์ให้มีค่าสูงสุดคงที่ได้ในเวลาที่ยาว (ประมาณ 150 นาที) ส่วนการเพิ่มความเข้มข้นของไททาเนียมไดออกไซด์จะทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจนถึงไททาเนียมไดออกไซด์ 1 กรัมต่อลิตร แต่เมื่อเพิ่มขึ้นไปมากกว่านี้จะทำให้ประสิทธิภาพมีค่าลดลง เนื่องมาจากไททาเนียมไดออกไซด์ที่มากเกินไปจะไปบังทางเดินแสง

2.3 อีดีทีเอ (Ethylenediamine tetra-acetic acid, EDTA)

2.3.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอีดีทีเอ

อีดีทีเอเป็นสารคีเลตที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เช่น การชุบโลหะ การทำน้ำอ่อน สิ่งทอ และการผลิตกระดาษและเยื่อกระดาษ (Davis และ Green, 1999) หรืออาจจะมีการใช้ในกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดออกไซด์ของโลหะออกจากพื้นผิวที่ต้องมีการถ่ายเทความร้อน เช่น หม้อไอน้ำ หรือเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เนื่องจากอีดีทีเอมีความสามารถในการที่จะสร้างสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะได้ (Madden et al., 1997) อีกทั้งยังมีการใช้อีดีทีเอเป็นน้ำยากัดสนิมในกระบวนการชุบโลหะอีกด้วย เนื่องจากอีดีทีเอจะมีสภาพเป็นกรดอ่อน ซึ่งลักษณะและสมบัติโดยทั่วไปของอีดีทีเอ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2-4 และลักษณะของโครงสร้างโมเลกุลของอีดีทีเอได้แสดงไว้ในรูปที่ 2-9

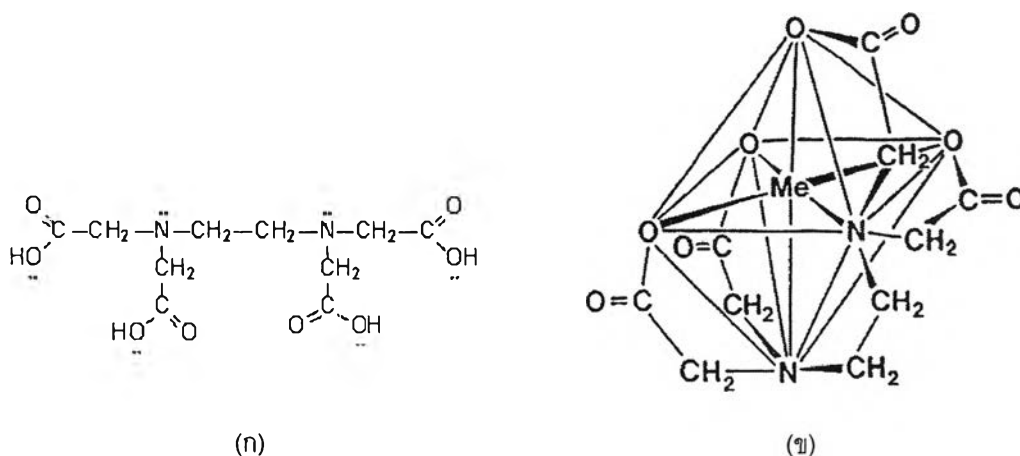
2.3.2 ความเป็นพิษของอีดีทีเอ

สำหรับผลกระทบของอีดีทีเอต่อมนุษย์นั้น จะไม่มีผลกระทบโดยตรง แต่จะมีผลกระทบทางอ้อมมากกว่า เนื่องจากอีดีทีเอเป็นสารประกอบที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำเสียมีค่าสูงขึ้น อีดีทีเอยังสามารถที่จะทำจับตัวกับโลหะหนักที่เป็นพิษจากดิน และตะกอน ทำให้โลหะหนักสามารถละลายลงสู่แหล่งน้ำ ดังนั้นจึงมีโอกาสที่โลหะหนักจะเข้าไปยังสิ่งมีชีวิตมีเพิ่มมากขึ้น (Rämo และ Sillanpää, 2001)

2.3.3 การกำจัดอิตีทีเอในน้ำเสีย

วิธีการกำจัดอิตีทีเอที่มีการรายงานไว้มีอยู่หลายวิธี ได้แก่

- การใช้โอโซน (Gilbert และ Hoffmann-Glewe , 1990)
- การทำลายโดยใช้ความร้อน (Motekaitis et al., 1982)
- การออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตโดยใช้ไททานเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Madden et al., 1997; Davis และ Green, 1999; Vohra และ Davis, 2000)
- การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Rämo และ Sillanpää, 2001)
- การออกซิเดชันด้วยสารเคมีที่เป็นสารออกซิแดนท์ผสม (Tucker et al., 1999)
- การใช้คลอรีนอัลตราโซนิกร่วมกับ Fenton's reagent หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Chitra et al., 2003)



รูปที่ 2-9 (ก) โครงสร้างของอิตีทีเอโดยทั่วไป และ (ข) เมื่อมีการจับกับโลหะหนัก

ตารางที่ 2-4 ลักษณะและสมบัติของอิตีทีเอ

ลักษณะปรากฏ	ผงสีขาว
สูตรโมเลกุล	$C_{10}H_{16}O_8N_2$
น้ำหนักโมเลกุล	292.25
ค่า Chelation	3.39 มิลลิโมล/กรัม
พีเอช	2.5-3.0 (สารละลายอิ่มตัว)
การละลายน้ำสูงสุด	0.1 % โดยน้ำหนักที่ 25 องศาเซลเซียส

2.3.4 ทบทวนเอกสารการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดอิตีทีเอ

Gilbert และ Hoffmann-Glewe (1990) ทำการศึกษาการทำลายอิตีทีเอด้วยการเติมไอโชน (ความเข้มข้นเริ่มต้น 1 มิลลิโมล/ลิตร และอัตราการเติมไอโชน 10 มิลลิกรัม/ลิตร-นาท) ในสารละลายเป็นฟังก์ชันของพีเอช ที่พีเอช 3 ได้ทำการตรวจพบ Ethylenediamine diacetic acid, Iminodiacetic acid, Nitrilotriacetic acid, Glyoxylic-, Oxalic-, Glycine, กรดฟอร์มิก, แอมโมเนีย, ไนเตรต และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พร้อมทั้งวัดความเข้มข้นเป็นฟังก์ชันของอัตราการเติมไอโชนอีกด้วย ส่วนที่พีเอช 7 ผลผลิตภัณฑของการออกซิเดชันก็จะเหมือนกับพีเอช 3 ยกเว้นจะไม่เกิดกรดฟอร์มิก และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ขึ้น

การทำดุลมวลคาร์บอนแสดงว่า ที่พีเอช 3 84% และที่พีเอช 7 68-81% ของคาร์บอนอินทรีย์อยู่ในรูปของผลิตภัณฑ์ที่สามารถตรวจวัดได้ หลังจากอิตีทีเอถูกทำลายไป 100% แล้วผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนั้นสามารถที่จะย่อยสลายทางชีวภาพได้ ในขณะที่เมื่อมี Ca^{2+} และ Cd^{2+} จะมีผลกระทบการกำจัดอิตีทีเอเพียงเล็กน้อย ส่วน Fe^{3+} นั้นจะไม่มีผลใดๆต่ออัตราการทำลายอิตีทีเอ

Madden et al. (1997) ทำการศึกษาการนำเอาไททานเนียมไดออกไซด์มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการออกซิได้อิตีทีเอด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต รวมถึงสารประกอบเชิงซ้อนของอิตีทีเอกับโลหะหนักด้วย การทดลองกระทำโดยใช้ไททานเนียมไดออกไซด์ (Degussa P-25) 0.1% โดยน้ำหนัก มีความเข้มข้นของอิตีทีเอเริ่มต้นเท่ากับ 0.8 มิลลิโมลาร์ และพีเอชคงที่ ซึ่งผลการทดลองพบว่า สารประกอบเชิงซ้อนที่ต่างกันก็จะมีอัตราการออกซิเดชันที่แตกต่างกันอย่างมาก : $Cu(II)-EDTA > Pb(II)-EDTA \gg EDTA > Ni(II)-EDTA \approx Cd(II)-EDTA \approx Zn(II)-EDTA \gg \gg Cr(III)-EDTA$ โดยประสิทธิภาพในการกำจัด $Cu(II)-EDTA$ นั้นจะมีค่าประมาณ 60%

อัตราการกำจัดที่ไอซี และการเกิดฟอร์มัลดีไฮด์ ระหว่างการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะมีค่าใกล้เคียงกับการออกซิได้อิตีทีเอด้วยไฟฟ้า ได้มีการทดลองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการออกซิเดชันของ $Ni(II)-EDTA$ ซึ่งเกิดการย่อยสลายได้ช้า ซึ่งการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อย่างต่อเนื่อง จะช่วยเพิ่มอัตราการออกซิเดชัน $Ni(II)-EDTA$ ได้ อีกทั้งการที่มี $Cu(II)$ อยู่ในน้ำเสียก็จะมีส่วนช่วยในการเร่งให้เกิดการแลกเปลี่ยนลิแกนด์อย่างรวดเร็ว จาก $Ni(II)-EDTA$ ไปอยู่ในรูป $Cu(II)-EDTA$ ซึ่งสามารถออกซิไดส์ได้ง่ายกว่า

Tucker et al. (1999) ได้ทำการทดลองทำลายอิตีทีเอ โดยการใช้ Fenton's reagent และสารออกซิแดนท์ผสม (ประกอบไปด้วย Cl_2 , $HOCl$, ClO_2 และ H_2O_2) ร่วมกับการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งผลที่ได้พบว่าการใช้สารออกซิแดนท์ผสมจะมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการใช้ Fenton's Reagent อีกทั้งยังพบว่า ถ้ามี Mn^{2+} , Cr^{3+} หรือ Fe^{3+} ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ

เข้มข้นของอีดีทีเอ การทำลายอีดีทีเอจะเกิดได้อย่างรวดเร็ว แต่เมื่อความเข้มข้นของ Cr^{3+} หรือ Mn^{2+} สูงกว่าอีดีทีเอ อัตราการทำลายอีดีทีเอจะมีค่าลดลง ในกรณีที่มีการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต ร่วมกับการใช้สารออกซิแดนท์ผสมในการบำบัดสารประกอบเชิงซ้อน Co^{2+} -EDTA หรือ Cu^{2+} -EDTA จะส่งผลให้อีดีทีเอสูญเสียความสามารถในการจับกับโลหะหนักไป

Rodriguez et al. (1999) ทำการทดลองทำลายอีดีทีเอในน้ำทิ้งที่ไม่มีคลอรีน โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่ประกอบไปด้วย Vanillin, Glyxol, Sodium formate, Sodium acetate และอีดีทีเอ ส่วนวิธีการที่ใช้ ได้แก่ การใช้โอโซน การใช้โอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ การใช้โอโซนร่วมกับรังสีอัลตราไวโอเล็ต การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับโอโซน และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยทำการทดลองที่พีเอชเท่ากับ 7 และ 11 ผลการทดลองพบว่า การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับโอโซน นั้นจะมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด การใช้โอโซนเพียงอย่างเดียวไม่สามารถทำลายอีดีทีเอได้ การใช้กระบวนการร่วมกันระหว่างรังสีอัลตราไวโอเล็ต โอโซน (พีเอช 7 นาน 15 นาที) และการบำบัดทางชีวภาพมีประสิทธิภาพอย่างมากในการกำจัดทั้งคิแลนท์ (98%) และซีไอดี (95%)

Korhonen et al. (2000) ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดอีดีทีเอในน้ำเสียจากการฟอกขาว ซึ่งในการทดลองได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโอโซนในการกำจัด Na-EDTA สารประกอบเชิงซ้อน Fe^{3+} -EDTA และสารประกอบเชิงซ้อนในน้ำทิ้งจากการฟอกขาว ซึ่งผลการทดลองพบว่า การใช้โอโซนเพียงเล็กน้อยจะสามารถทำลาย Na-EDTA ได้ในสัดส่วนที่มาก ซึ่งผลนั้นจะหายไปเมื่ออีดีทีเอรวมตัวกับโลหะหนักเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ส่วนสารประกอบเชิงซ้อนในน้ำทิ้งจากการฟอกขาว พบว่าสามารถออกซิไดซ์ได้ง่ายกว่าสารละลายของ Fe^{3+} -EDTA เพียงอย่างเดียว การเปลี่ยนแปลงของพีเอชเริ่มต้นไม่มีผลอย่างชัดเจนในการกำจัด Na-EDTA การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นจะไม่เพิ่มอัตราการย่อยสลายของอีดีทีเอในน้ำทิ้งจากการฟอกขาว

Rämo และ Sillanpää (2001) ทำการศึกษการทำลายอีดีทีเอ ด้วยระบบไหลต่อเนื่องที่พีเอชเป็นต่าง (พีเอช 10-11) และมีสภาวะเหมือนกับที่ใช้ในการฟอกขาวกระดาษ ผลการทดลองซึ่งวัดโดยก๊าซโครมาโตกราฟี ถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ และค่าเปอร์เซ็นต์ของอีดีทีเอที่เหลืออยู่ก็คำนวณจากหลักการนี้เช่นกัน มีการประเมินปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่สลายไป ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าภายใต้สภาวะที่ทำการทดลองนี้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหลืออยู่เฉลี่ยเท่ากับ 94% และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 79% ไฮโดรเจนออกไซด์ที่สลายไประหว่างการทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 26%

Emilio et al. (2002) ศึกษาการย่อยสลายของอีดีทีเอที่พีเอช 3 โดยใช้กระบวนการ ferrioxalate/H₂O₂ และมีการรับแสงจากดวงอาทิตย์ พบว่าในทุกกรณีจะเกิดการกำจัดที่ไอซีอย่างรวดเร็ว มีค่าเกือบถึง 100% เมื่อเวลาหลังจากรับแสงผ่านไป 1 ชั่วโมงภายใต้สภาวะการทดลองที่ดีที่สุด เพื่อที่จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีที่ดีที่สุดจะต้องมีการควบคุมพีเอชให้คงที่ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น...แต่หว่า การเพิ่มความเข้มข้นของเพอร์ออกซาลेटจะมีผลให้อัตราการกำจัดอีดีทีเอลดลง เนื่องจากอาจจะเกิดการแข่งกันในการแย่งออกซาลेटระหว่างอีดีทีเอ กับผลิตภัณฑ์จากการย่อยสลาย เมื่อไม่มีการเติมออกซาลेट อีดีทีเอสามารถที่จะเกิดการย่อยสลายได้อย่างดี และมีอัตราการกำจัดที่ไอซีที่น้อยกว่าเมื่อใช้เพอร์ออกซาลेटเพียงเล็กน้อย อีกทั้งยังพบว่าความเข้มข้นของแสงอาทิตย์เป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างมากในการปรับปรุงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

Kunz et al. (2002) ทำการศึกษาวิธีการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต และใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวช่วยในการย่อยสลายอีดีทีเอ ซึ่งได้ทำการประเมินผลกระทบของพีเอช และอัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่ออีดีทีเอ ต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายอีดีทีเอ การทำงานที่สภาวะการทดลองที่เหมาะสม (พีเอช 2 และอัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่ออีดีทีเอ เท่ากับ 10) และใช้ Microwave-activated photochemical reactor และตรวจวัดการย่อยสลายอีดีทีเอ โดยทำการวัดค่าที่ไอซี พบว่าอัตราการย่อยสลายจะมีค่าสูงกว่า 90% เมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้น 6 นาที

2.4 การทำงานกับสารเคมีที่มีความเป็นพิษเฉียบพลันสูง (APHA,1998)

ตัวอย่างของสารเคมีในกลุ่มนี้ ได้แก่ ไดไอโซโพรพิลฟลูออโรฟอสเฟต (Diisopropylfluorophosphate) กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid) และ ไฮโดรเจนไซยาไนด์ (Hydrogen cyanide) ซึ่งนอกเหนือจากกฎทั่วไปที่ต้องปฏิบัติในห้องปฏิบัติการแล้ว จะต้องต้องมีข้อควรระวังเพิ่มเติม ซึ่งวัตถุประสงค์ก็คือ ลดการสัมผัสกับสารพิษไม่ว่าจะสัมผัสจากทางใดก็ตามให้น้อยที่สุด โดยข้อควรระวังมีดังนี้

1. สถานที่ : ใช้ และเก็บสารเหล่านี้ในพื้นที่ที่ควบคุมเท่านั้น และต้องมีการติดป้ายเตือนไว้ อีกทั้งเมื่อต้องทำการทดลองใดๆที่จะทำให้เกิดละอองลอย (Aerosol) หรือไอของสารนั้นๆ จะต้องทำในตู้ดูดควัน (Hood) เสมอ

2. การป้องกันส่วนบุคคล : หลีกเลี่ยงการสัมผัสกับสาร โดยการสวมถุงมือ เสื้อแขนยาว และอุปกรณ์ป้องกันอื่นๆที่เหมาะสม ล้างมือ และแขนทันทีหลังจากที่มีการทำงานกับสารเหล่านั้นเสมอ

3. บันทึก : ต้องทำ การบันทึกปริมาณของสารที่มีอยู่ ปริมาณสารที่ใช้ไป และชื่อของบุคคลที่ใช้สารนั้น

4. การป้องกันการหก และอุบัติเหตุ : ต้องมีการเตรียมตัวเมื่อเกิดการหก หรือเกิดอุบัติเหตุขึ้น ต้องแน่ใจว่ามีคนอยู่ในบริเวณนั้น อย่างน้อย 2 คน เมื่อสารที่ใช้ นั้น มีความเป็นพิษสูง หรือไม่ทราบความเป็นพิษ

เก็บขวดสารเคมีที่สามารถแตกได้ในสถานที่ที่ทนสารเคมี ถ้ามีสารเคมีเกิดหกภายนอกตู้ดูดควันให้ทำการอพยพคนออกจากบริเวณนั้น และต้องให้แน่ใจว่าบุคคลที่เข้าไปทำความสะอาดสวมชุดป้องกัน และใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสม

5. ของเสีย : ต้องทำการกำจัดสาร หรือเผาเสื้อผ้า และรองเท้าที่สัมผัสกับสารอย่างทันที ถ้าเป็นไปได้ควรกำจัดสารโดยการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยาให้อยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษ ทำการเก็บของเสียที่ปนเปื้อนในภาชนะที่ปิด มีป้ายที่เหมาะสม และน้ำไม่สามารถซึมผ่านได้ (เช่น แก้ว หรือ ขวดพลาสติก สำหรับของเหลว)