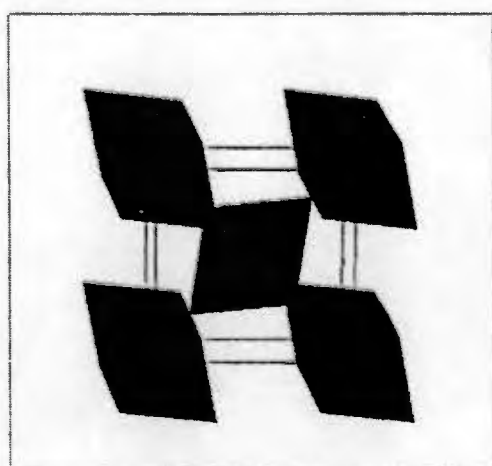


บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โททานเนียมไดออกไซด์และปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการบำบัดทางสิ่งแวดล้อมมักอยู่ในรูปออกไซด์และซัลไฟด์ซึ่งมีหลายชนิด เช่น जिंकออกไซด์(ZnO) ทังสเตนออกไซด์(WO₃) แคดเมียมซัลไฟด์(CdS) जिंकซัลไฟด์(ZnS) เป็นต้น และรวมไปถึงโททานเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ซึ่งมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่ละลายในน้ำและได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเหมาะสมสำหรับนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดทางสิ่งแวดล้อม โดยมีข้อดีในการนำมาใช้ประโยชน์ในแง่การบำบัดน้ำเสีย คือ มีความคงตัวไม่เปลี่ยนรูปเมื่อเกิดปฏิกิริยาและไม่เกิดการกัดกร่อน ไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อมและสามารถนำกลับมาใช้ได้อีก ในการทดลองใช้โททานเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมโดยการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต พบว่าสามารถใช้ซ้ำได้ถึง 9 ครั้งโดยที่ประสิทธิภาพไม่ลดลง และจะลดลงเล็กน้อยในครั้งที่ 10 และ 11 (langphasuk, 1997) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีสำหรับการนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โททานเนียมไดออกไซด์เมื่อแบ่งตามลักษณะโครงสร้างจะแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบ คือ อนาเทส (anatase) บรูคไคท์ (brookite) และรูไทล์ (rutile) แต่ในงานด้านสิ่งแวดล้อมที่นำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย จะนิยมใช้รูปแบบบรูคไคท์และอนาเทส ซึ่งโครงสร้างแบบอนาเทสจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าแบบบรูคไคท์ (Tanaka, Hisanaga และRivera, 1993) โดยมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.1 ชื่อที่ใช้ในทางการค้า ได้แก่ โททานเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide) หรือโททานิกแอนไฮไดรด์ (Titanic anhydride)



Rutile Crystal Form

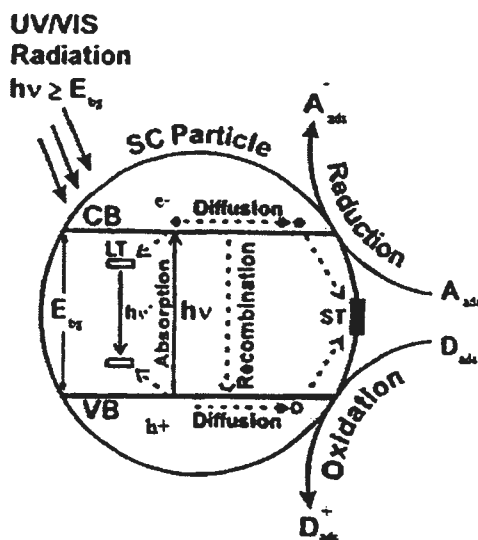


Anatase Crystal Form

รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างของรูไทล์ (rutile) และอนาเทส (anatase)

(ที่มา <http://www.titanium.co.kr/english/tio2/tio2.asp>, 2005)

ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำซึ่งมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าอยู่ระหว่างตัวนำไฟฟ้าและฉนวนไฟฟ้า และแสดงลักษณะพิเศษทางระดับพลังงานที่แตกต่างกัน 2 ช่วง คือ ด้านพลังงานต่ำเรียกว่าวาเลนซ์แบนด์(valence band) ด้านพลังงานสูงเรียกว่าคอนดักชันแบนด์ (conduction band) ช่องว่างระหว่างระดับพลังงานนี้จะเรียกว่าแบนด์แกป(band gap)

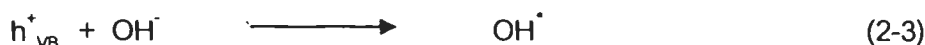


รูปที่ 2.2 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นบนผิวไททาเนียมไดออกไซด์เมื่อได้รับรังสีอัลตราไวโอเล็ต

(Thomas, 2003)

จากรูปที่ 2.2 แสงอัลตราไวโอเล็ตซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานจะกระตุ้นอิเล็กตรอนจากฝั่งวาเลนซ์แบนด์ให้เคลื่อนที่ไปอยู่ในคอนดักชันแบนด์ เมื่ออิเล็กตรอนในวาเลนซ์แบนด์ดูดซับโฟตอนจะทำให้มีพลังงานเพิ่มขึ้นจนมากพอที่จะเคลื่อนที่ไปอยู่ในคอนดักชันแบนด์ อย่างไรก็ตามเนื่องจากระดับพลังงานในวาเลนซ์แบนด์ต่ำกว่าในคอนดักชันแบนด์ อาจทำให้อิเล็กตรอนบางส่วนเคลื่อนที่กลับมาอยู่ในวาเลนซ์แบนด์ได้อีก ซึ่งในกรณีนี้จะมีการปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสงหรือความร้อน สำหรับไททาเนียมไดออกไซด์ในการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากวาเลนซ์แบนด์มาอยู่ในคอนดักชันแบนด์นั้น ต้องใช้แสงที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 387.5 นาโนเมตร เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากวาเลนซ์แบนด์ไปอยู่ในคอนดักชันแบนด์จะมีโฮล(hole)เกิดขึ้นในวาเลนซ์แบนด์ดังนั้นโฮล(hole)นี้จึงมีประจุเป็นบวก การรวมตัวกันของอิเล็กตรอนในคอนดักชันแบนด์ (e^-_{CB}) และโฮลในวาเลนซ์แบนด์(h^+_{VB})จะเรียกว่า คู่อิเล็กตรอน-โฮล(electron-hole pair) อย่างไรก็ตาม band gap ยังคงมีระยะห่างมากพอที่จะยับยั้งการกลับมารวมตัวกันของคู่อิเล็กตรอน-โฮลนี้ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเมื่อไททาเนียมไดออกไซด์ได้รับการกระตุ้นแสงได้ดังสมการ (2-1) ที่ผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ h^+_{VB} จะทำปฏิกริยากับ H_2O หรือ OH^- เกิดเป็น OH^\cdot ดังสมการ (2-2) และ (2-3) นอกจากนี้ยังอาจเกิดปฏิกริยาอื่น เช่น ถ้า e^-_{CB} ทำปฏิกริยากับ O จะทำให้เกิด O_2^- ดังใน

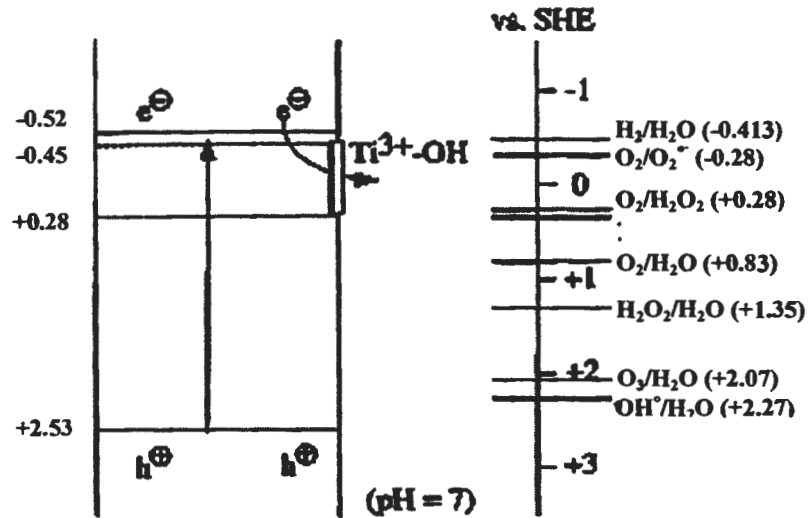
สมการ (2-4) ซึ่ง $O_2^{\cdot -}$ จะทำปฏิกิริยากับ H_2O เกิดเป็น OH^{\cdot} OH^{\cdot} และ O ตามสมการ (2-5) และ (2-6)



ปัญหาที่พบในการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาคือการกลับมารวมตัวกันของคู่อิเล็กตรอน-โฮลซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง วิธีแก้ปัญหานี้สามารถทำได้ด้วยการเติมตัวรับอิเล็กตรอน (irreversible electron acceptors) ได้แก่ H_2O_2 และ O_2 (U.S.EPA (1998) และ Chiang, Amal และ Tran (2003))

ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ผลิตโดยบริษัท AEROSIL มีชื่อทางการค้าคือ Degussa P-25 ประกอบด้วย อนุภาค 80 % และรูทูล์ 20 % และมีค่าศักย์ไฟฟ้าของคอนดักชันแบนด์เท่ากับ -0.3 โวลต์ และวาเลนซ์แบนด์เท่ากับ $+2.9$ โวลต์ (ที่พีเอช 0) ส่วนที่พีเอช 7 จะมีระดับพลังงานดังรูปที่ 2.3 ซึ่งจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าของคอนดักชันแบนด์เท่ากับ -0.52 โวลต์ และวาเลนซ์แบนด์เท่ากับ $+2.53$ โวลต์ (Fujishima, Rao และ Tryk, 2000)

ในกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตนั้น เมื่อไททาเนียมไดออกไซด์ได้รับรังสีอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 387.5 นาโนเมตรซึ่งจะเท่ากับกับพลังงาน band gap ของไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างอนุภาคที่เท่ากับ 3.2 eV (Chiang, Amal และ Tran, 2003) ก็จะสร้างอนุมูลไฮดรอกซิล(OH^{\cdot}) ขึ้นที่ผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ซึ่งเป็นสารออกซิแดนซ์ที่รุนแรงมาก ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าลดลงเล็กน้อย ($+2.27$ โวลต์) แต่ยังมีค่าสูงกว่าไอโซน ลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไททาเนียมไดออกไซด์เมื่อเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างแบบรูทูล์และอนุภาคแสดงในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.3 ระดับพลังงานในกระบวนการรีดอกซ์ที่เกิดบนผิว TiO_2 ที่พีเอช 7 เทียบกับ

Standard Hydrogen Electrode(SHE) (Fujishima, Rao และ Tryk, 2000)

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของ TiO_2 เปรียบเทียบระหว่างรูไทล์และอนาเทส

Properties	Rutile	Anatase
Crystal System	Tetragonal System	Tetragonal System
Mean particle size (nm)	21	21
Density (g/cm^3)	4.27	3.90
Moh's Hardness	2.72	5.5 -6
Boiling Point ($\text{cal}^\circ\text{Cg}$ at 25°C)	0.169	0.169
Thermal Conductivity ($\text{cal/cm/sec}^\circ\text{C}$)	0.148	0.430
Electrical Conductivity (mho/cm)	$10^{-14} - 10^{-13}$	$10^{-14} - 10^{-13}$
Permittivity	114	48
Melting point ($^\circ\text{C}$)	1,858 $^\circ\text{C}$	Change to rutile at high Temperature $\sim 800^\circ\text{C}$

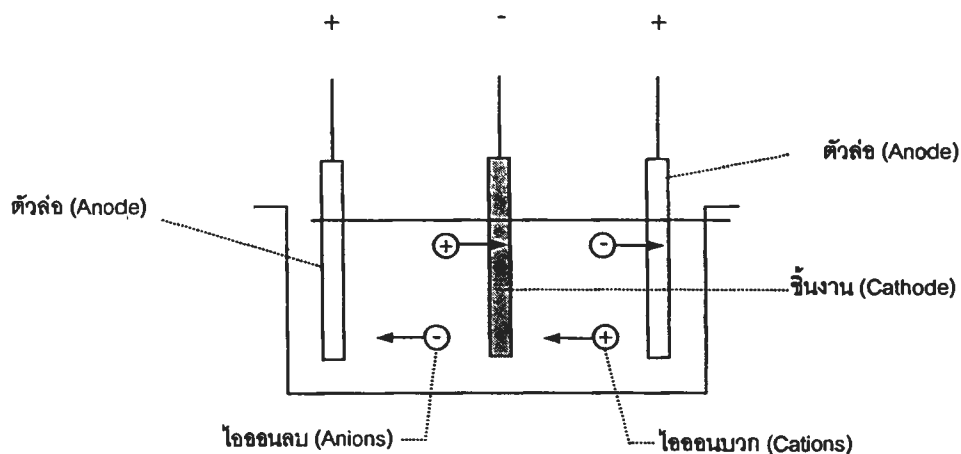
(ที่มา <http://www.titanium.co.kr/english/tio2/tio2.asp>, 2005)

2.2 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

การชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้านั้นจะทำเพื่อวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันไป เช่น ชุบเพื่อป้องกันการเสียดสีบนวงจรไฟฟ้าในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ชุบเคลือบผิวเครื่องประดับเพื่อความสวยงาม การชุบรองพื้นเพื่อเป็นการเพิ่มความหนาของโลหะ เป็นต้น โลหะที่นิยมและใช้กันทั่วไปในวงการอุตสาหกรรม ได้แก่ ทองแดง นิกเกิล โครเมียม และโครเมียมชนิดแข็ง ส่วนการชุบผิวตกแต่ง ได้แก่ ทอง เงิน โรเดียม และนิกเกิลดำ เป็นต้น

2.2.1 หลักการเบื้องต้นของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า หมายถึง การนำเอาชิ้นงานหรือวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าได้ มาเคลือบผิวด้วยโลหะที่ต้องการโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา โดยนำเอาชิ้นงานที่ทำการชุบต่อเข้ากับขั้วลบ (Cathode) ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนโลหะที่จะนำไปเคลือบผิวชิ้นงานจะต้องต่อเข้ากับขั้วบวก (Anode) ซึ่งเรียกว่าตัวล่อ ไม่จำเป็นต้องเป็นโลหะชนิดเดียวกับโลหะที่จะไปเคลือบผิวเสมอไป แล้วนำชิ้นงานและตัวล่อจุ่มในน้ำยาชุบซึ่งมีไอออนของโลหะที่ใช้เคลือบผสมอยู่ ปรับกระแสไฟฟ้าให้เกิดแรงเคลื่อนกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม จะทำให้ไอออนของโลหะที่อยู่ในน้ำยาชุบโลหะเกิดปฏิกิริยา (สุชาติา ไชยสวัสดิ์และคณะ, 2542) ดังรูปที่ 2.4

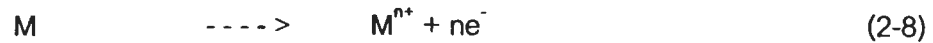


รูปที่ 2.4 หลักการชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า (สุชาติา ไชยสวัสดิ์และคณะ, 2542)

ที่ขั้วลบ ไอออนของโลหะซึ่งเป็นไอออนบวกในสารละลายจะวิ่งไปรับอิเล็กตรอนที่ขั้วลบ แล้วเกิดเป็นโลหะเคลือบที่ผิวชิ้นงาน ดังสมการ

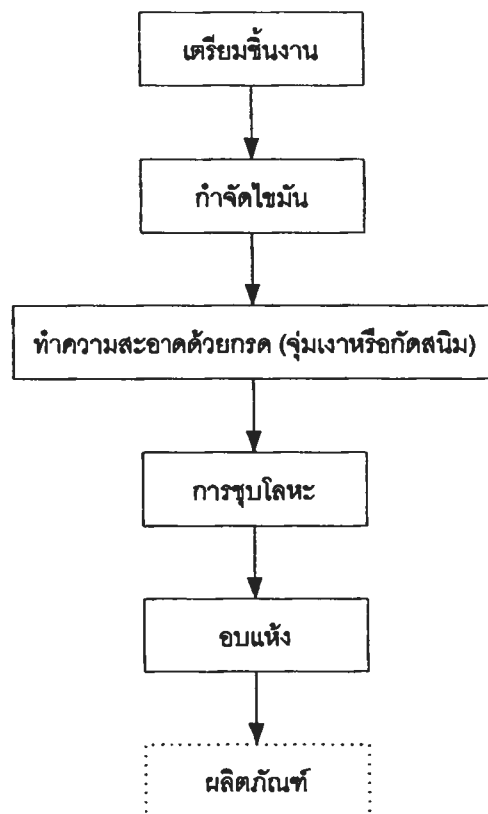


ที่ขั้วบวก ถ้าเป็นโลหะชนิดเดียวกันกับโลหะที่จะไปเคลือบบนชิ้นงาน โลหะนั้นก็จะเกิดการออกซิไดซ์ให้อิเล็กตรอนกับวงจรภายนอก และไอออนบวกจะสลายลงสู่สารละลาย ดังสมการ



2.2.2 ขั้นตอนในการชุบโลหะ

รูปแบบขั้นตอนการชุบโลหะประกอบไปด้วย การเตรียมชิ้นงาน ซึ่งเป็นการขัดผิวชิ้นงานจนได้ขนาดและความเรียบตามต้องการ จากนั้นจึงทำความสะอาดเพื่อกำจัดไขมัน จากนั้นนำไปจุ่มกรดเพื่อนำเอาสนิมออก แล้วนำชิ้นงานไปชุบในน้ำยา ซึ่งควบคุมสภาวะการชุบตามกำหนด หลังจากเสร็จแล้วนำไปอบแห้ง สุดท้ายจะได้ชิ้นงานตามต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

2.2.3 แหล่งที่มาและลักษณะน้ำเสีย

น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะมาจากสาเหตุต่างๆ ดังต่อไปนี้

- น้ำล้างจากขั้นตอนการกำจัดไขมัน
- น้ำล้างจากขั้นตอนการจุ่มเงาและกำจัดสนิม

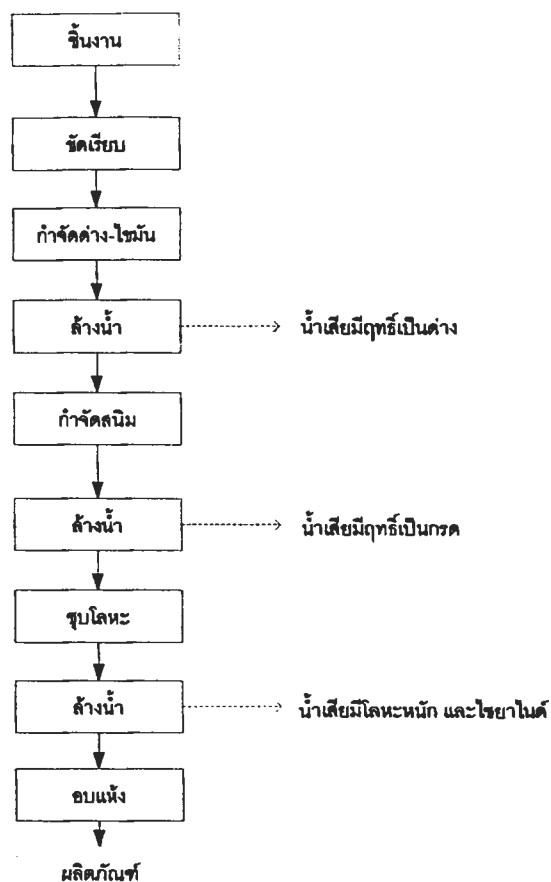
- น้ำล้างชิ้นงานภายหลังจากการชุบน้ำยา
- น้ำยาที่เสื่อมคุณภาพหรือไหลออกมาโดยอุบัติเหตุ
- น้ำล้างทำความสะอาดเครื่องมือและบริเวณสถานที่

มลพิษที่ปล่อยออกมาจากโรงงานในปริมาณสูง ได้แก่ น้ำล้างจากขั้นตอนการกำจัดน้ำมันและไขมัน น้ำเสียจากขั้นตอนการจุ่มเงาและกำจัดสนิม และน้ำล้างชิ้นงานภายหลังจากการชุบน้ำยา น้ำเสียทั้งสามส่วนนี้จะเกิดอย่างต่อเนื่องในการผลิต ส่วนน้ำเสียเนื่องจากน้ำยาที่เสื่อมคุณภาพหรือไหลมาเนื่องจากอุบัติเหตุจะมีมลพิษสูง แต่นานๆ ครั้งจึงจะเกิดขึ้นสักครั้ง และน้ำล้างทำความสะอาดเครื่องมือและบริเวณสถานที่ จะมีความเข้มข้นของสารมลพิษต่ำและปริมาณไม่มากนัก ผลการวิเคราะห์น้ำเสียโรงงานชุบโลหะจากบริษัทกำจัดกากอุตสาหกรรม(บัณฑิต ชูเชิดวัฒน์ศักดิ์, 2547) แสดงในตารางที่ 2.2 สำหรับแหล่งกำเนิดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะโดยทั่วไปแสดงในรูปที่ 2.6 และตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 ผลการวิเคราะห์น้ำเสียโรงงานชุบโลหะจากบริษัทกำจัดกากอุตสาหกรรม

(บัณฑิต ชูเชิดวัฒน์ศักดิ์, 2547)

พารามิเตอร์	หน่วย	11/12/46	16/12/46	23/12/46	30/12/46
การนำไฟฟ้า (conductivity)	มิลลิซีเมนส์/ซม.	12.47	11.39	16.74	13.58
ของแข็งละลายทั้งหมด (TDS)	กรัม/ลิตร	6.22	5.70	8.37	6.79
คาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (TIC)	มก .C / ลิตร	30.27	48.70	31.80	33.15
คาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (TOC)	มก .C / ลิตร	111.57	244.43	284.07	672.33
อีดีทีเอ (EDTA)	กรัม/ลิตร	11.75	13.48	15.17	18.87
ไซยาไนด์ไอออน	มก .CN ⁻ / ลิตร	95.28	264.72	74.38	99.44
ทองแดง (Cu)	มก. / ลิตร	12.69	28.68	3.87	12.47
สังกะสี (Zn)	มก. / ลิตร	0.51	1.33	8.17	1.25
โครเมียม (Cr)	มก. / ลิตร	30.21	26.58	8.89	26.82
นิกเกิล (Ni)	มก. / ลิตร	30.06	9.37	17.92	31.16
เงิน (Ag)	มก. / ลิตร	0.71	0.01	0.02	0.11



รูปที่ 2.6 ขั้นตอนการชุบสังกะสี

ตารางที่ 2.3 แหล่งกำเนิดสารที่เป็นพิษจากกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (วัลย์รัตน์ จันทรวงศ์, 2542)

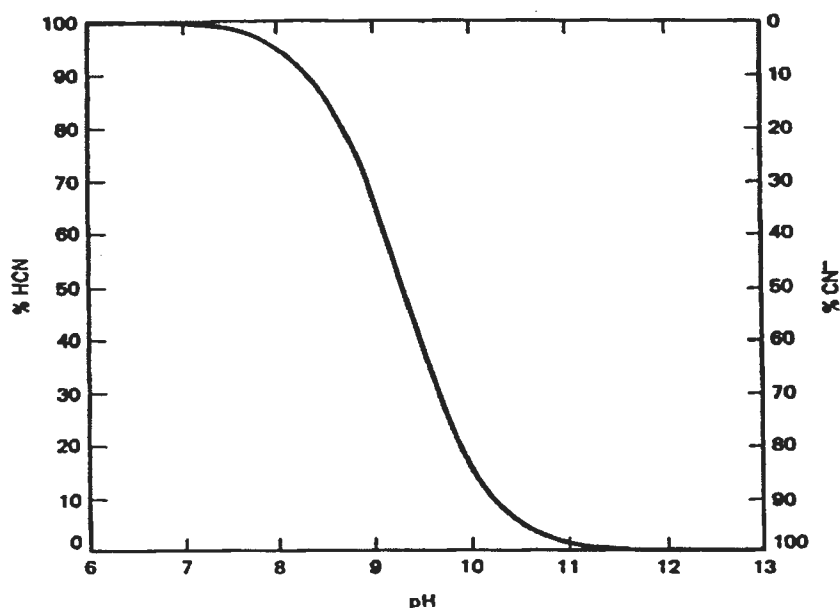
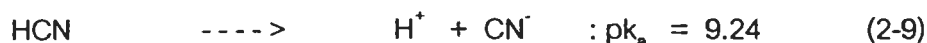
สารที่เป็นพิษ		แหล่งกำเนิด	วิธีบำบัด
น้ำมัน ของแข็ง กรด ต่าง ไซยาไนด์	สารประเภทไขมัน ยาขัด ทราาย กรดกำมะถัน กรดเกลือ กรดไนตริก กรดกัด แก้ว กรดฟอสฟอริก กรดน้ำส้ม โซดาไฟ โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมซิลิเกต โซเดียมฟอสเฟต สารประกอบไซยาไนด์ต่าง ๆ	การเตรียมชิ้นงานก่อนชุบ การขัด การจุ่มกรดกระตุ้นผิว การขัดเงา ด้วยสารเคมี ต้มล้างไขมัน ทำให้เป็นกลาง กัด ผิวอลูมิเนียม ล้างด้วยไฟฟ้า หรือจากถังชุบ	การแยกไขมัน ตกตะกอน ทำให้เป็นกลาง ทำให้เป็นกลาง ทำการออกซิเดชันโดยใช้สาร ประเภทคลอรีน
โลหะหนักในรูป ของไอออน กรดโครมิก ไอออนเชิงซ้อน	โลหะที่มีค่า เช่น ทองแดง นิกเกิล เหล็ก แคดเมียม สังกะสี อลูมิเนียม แมงกานีส กรดโครมิก ไอออนเชิงซ้อนของทองแดงและนิกเกิล	อยู่ในน้ำยาชุบและจากการ เตรียมก่อนชุบ น้ำยาชุบ การทำโครเมต น้ำยาชุบ	ใช้ต่าง ทำการรีดักชันและตกตะกอน ทำให้สารประกอบเชิงซ้อนเกิด การแยกตัว ทำให้เป็นกลาง แล้วจึงตกตะกอน

2.3 ไชยาไนด์

2.3.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไชยาไนด์

ไชยาไนด์ (Cyanide) หมายถึง ไอออนของไชยาไนด์ทั้งหมดในสารประกอบไชยาไนด์ ซึ่งสามารถตรวจวัดได้ในรูปของไชยาไนด์ไอออน (CN⁻) โดยในแหล่งน้ำผิวดินทั่วไปและในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะจะพบไชยาไนด์ทั้งในรูปของไชยาไนด์ไอออน และสารประกอบเชิงซ้อนของไชยาไนด์ ประเภทของไชยาไนด์ที่สำคัญด้านการจัดการน้ำเสีย ได้แก่

2.3.1.1 ไชยาไนด์อิสระ (Simple cyanide) หมายถึง ไชยาไนด์ในรูปของก๊าซไฮโดรเจนไชยาไนด์ (HCN) หรือกรดไฮโดรไชยานิก (Hydrocyanic Acid) และไชยาไนด์ไอออน (CN⁻) ไฮโดรเจนไชยาไนด์เป็นกรดอ่อนที่ระเหยได้ง่าย สัดส่วนของไชยาไนด์ไอออนต่อไฮโดรเจนไชยาไนด์ (CN⁻ : HCN) จะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชและค่าคงตัวของการแตกตัวเป็นไอออน (K_a) ของไฮโดรเจนไชยาไนด์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.6×10^{-10} ที่ 25 องศาเซลเซียส ตามสมการ (2-9) หรือสามารถดูได้จากรูปที่ 2.7 ดังนั้นในแหล่งน้ำผิวดินทั่วไปซึ่งมีพีเอชประมาณ 7 จะพบไชยาไนด์ในรูปของไฮโดรเจนไชยาไนด์มากกว่าที่จะอยู่ในรูปของไชยาไนด์ไอออน



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไชยาไนด์ไอออนกับกรดไฮโดรไชยานิกที่พีเอชต่างๆ
(Benefield, Judkins และ Weand, 1982)

2.3.1.2 สารประกอบของไซยาไนด์กับโลหะอัลคาไลด์ เช่น โพแทสเซียมไซยาไนด์ (KCN) และโซเดียมไซยาไนด์ (NaCN) มีสูตรทั่วไปเป็น $A(CN)_x$

เมื่อ	A	หมายถึง	โลหะอัลคาไลด์ หรือแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+)
	X	หมายถึง	วาเลนซ์ของโลหะอัลคาไลด์ หรือจำนวนของไซยาไนด์ไอออน

โพแทสเซียมไซยาไนด์ และโซเดียมไซยาไนด์เป็นสารที่เสถียร ระเบิดได้ง่าย มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว มีกลิ่นเหม็น ละลายน้ำได้ดี ถ้าอยู่ในสภาวะที่เป็นกรดหรือเป็นกลางความเข้มข้นจะลดลงร้อยละ 80 ในระยะเวลา 3 วัน มีความเป็นพิษสูงมาก เมื่อสูดดมเข้าไปจะระคายเคืองต่อเยื่อทางเดินหายใจ เกิดการวิงเวียนศีรษะ และระคายเคืองต่อผิวหนัง

2.3.1.3 สารประกอบไซยาไนด์กับโลหะหนัก เช่น คอปเปอร์ไซยาไนด์ ($Cu(CN)_2$) ซิลเวอร์ไซยาไนด์ ($AgCN$) และซิงค์ไซยาไนด์ ($Zn(CN)_2$) เป็นต้น เป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้น้อยมาก แต่จะละลายได้ดีขึ้นเมื่ออยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะ ซึ่งมีสารประกอบของไซยาไนด์กับโลหะอัลคาไลด์ประกอบอยู่ด้วย

2.3.1.4 สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับโลหะหนัก เช่น โพแทสเซียมเฟอร์ไซยาไนด์ ($K_4Fe(CN)_6$) และโพแทสเซียมโคบอลต์ไซยาไนด์ ($K_3Co(CN)_6$) เป็นต้น แทนสูตรทั่วไปคือ $A_nM(CN)_x$

โดยที่	A	หมายถึง	โลหะอัลคาไลด์
	Y	หมายถึง	จำนวนอะตอมโลหะอัลคาไลด์ที่มีในสารประกอบ
	M	หมายถึง	โลหะหนัก (ได้แก่ Fe , Cd , Cu , Ni , Ag และ Zn)
	X	หมายถึง	จำนวนของไซยาไนด์ไอออน

สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับสังกะสีหรือแคดเมียมสามารถแตกตัวได้เกือบสมบูรณ์ในสารละลายเจือจาง และเป็นพิษต่อสัตว์น้ำที่ที่เอชเป็นกลาง สารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับนิกเกิล ทองแดงหรือเงินจะมีเสถียรภาพสูง แต่มีความเป็นพิษน้อยกว่าไฮโดรไซยานิค ส่วนสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์กับเฟอร์ริกหรือโคบอลต์ จะมีเสถียรภาพสูงมาก มีความเป็นพิษสูง และสามารถถูกสลายด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้เป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์

2.3.1.5 ไซยาโนเจนคลอไรด์ (Cyanogen chloride , CNCl) เป็นสารประกอบที่ระเบิดได้ง่าย ละลายน้ำได้เล็กน้อย มีความเป็นพิษสูงมาก เกิดขึ้นจากกระบวนการบำบัดไซยาไนด์ในน้ำเสียโดยใช้วิธีออกซิเดชันด้วยคลอรีน ตามสมการ (2-10)



นอกจากไซยาไนด์ทั้ง 5 ประเภทนี้แล้ว ยังสามารถพบสารประกอบของไซยาไนด์ประเภทอื่นที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ ไธโอไซยาเนต (Thiocyanate) และไซยาเนต (Cyanate) โดยสารประกอบของไธโอไซยาเนตสามารถสลายตัวให้ไฮโดรเจนไซยาไนด์ได้ตามสมการ (2-11)



สารประกอบไซยาเนต เป็นผลมาจากปฏิกิริยาขั้นที่สองของการบำบัดไซยาไนด์ในน้ำเสีย โดยการออกซิเดชันด้วยคลอรีน ซึ่งไซยาเนตจะสลายตัวในน้ำที่มีพีเอชต่ำหรือมีสภาพเป็นกลางตามสมการ (2-12)



2.3.2 ความเป็นพิษต่อมนุษย์

ไซยาไนด์เป็นสารที่มีพิษร้ายแรงต่อมนุษย์และสัตว์ เมื่อเข้าสู่ร่างกายจะทำปฏิกิริยารวมตัวกับฮีโมโกลบินและเอนไซม์ไซโตโครมออกซิเดส (Cytochrome oxidase) ซึ่งจำเป็นต่อกระบวนการหายใจภายในเซลล์ ทำให้เซลล์ไม่สามารถนำออกซิเจนไปใช้งานได้ และก่อให้เกิดอาการพิษคือ ปวดศีรษะ หายใจช้า อาเจียน ภาวะวุ่นวาย หัวใจเต้นเร็ว แรงดันเลือดต่ำ ชักหมดสติและถึงแก่ความตายได้

มีรายงานว่าความเข้มข้นของไซยาไนด์เพียง 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร ก็จะมีความเป็นพิษอย่างแรงต่อปลาสายพันธุ์ต่างๆ (Benefield, Judkins และ Weand, 1982) สำหรับในประเทศไทยได้มีการกำหนดมาตรฐานของไซยาไนด์ไว้ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ความเข้มข้นของไซยาไนด์สูงสุดตามมาตรฐานต่าง ๆ ในประเทศไทย
(กรมควบคุมมลพิษ, 2547)

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 แต่ได้กำหนดเกณฑ์อนุโลม สูงสุดไว้ให้มีได้ไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร
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 กำหนดให้มีค่า ไม่เกินกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร
มาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน (ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20 (พ.ศ. 2543))	ต้องไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.3.3 การกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสีย

การบำบัดที่ใช้กันทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีสารประกอบไซยาไนด์ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย ได้แก่

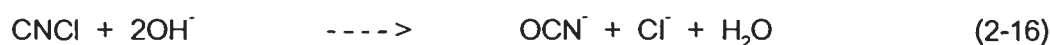
2.3.3.1 การออกซิไดซ์ด้วยคลอรีนหรืออัลคาไลน์คลอรีเนชัน (Alkaline chlorination) โดยการเติมโซเดียมไฮโปคลอไรท์ (NaOCl) หรือก๊าซคลอรีนร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งสามารถออกซิไดซ์ไซยาไนด์ให้เป็นไซยาเนตได้อย่างรวดเร็วภายใน 30 นาทีถึง 2

ชั่วโมง ที่พีเอช 10 โดยไซยาเนตที่เกิดขึ้นจะมีความเป็นพิษน้อยกว่าไซยาไนด์ประมาณ 1,000 เท่า จากนั้นด้วยปริมาณคลอรีนที่มากเกินไป ไซยาเนตจะถูกออกซิไดซ์ต่อไปจนกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจน ที่พีเอช 8 – 8.5 และอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส พบว่าปฏิกิริยาจะเกิดอย่างรวดเร็วใช้เวลาเพียง 1 ชั่วโมง แต่ที่พีเอชตั้งแต่ 10 ขึ้นไปจะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาหลายชั่วโมง ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะเป็น 2 ขั้นตอน ดังสมการ (2-13) ถึง (2-14)

ขั้นตอนที่ 1 การออกซิไดซ์ไซยาไนด์ไปเป็นไซยาเนต

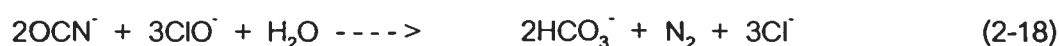


แต่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจริงซึ่ง Chamberlain และ Synder (1965) ได้เสนอไว้ว่าการออกซิไดซ์ไซยาไนด์ไปเป็นไซยาเนตนั้นจะเกิดไซยาโนเจนคลอไรด์ขึ้นก่อน ดังสมการต่อไปนี้



การออกซิไดซ์ไซยาไนด์ไปเป็นไซยาโนเจนคลอไรด์จะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วที่ทุกๆพีเอช แต่การออกซิไดซ์ไซยาโนเจนคลอไรด์ไปเป็นไซยาเนตจะเกิดได้ดีที่พีเอชสูง ดังนั้นจึงควรปรับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมเพื่อให้ปฏิกิริยาในการเกิดไซยาเนตเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการเปลี่ยนไซยาเนตให้เป็นแอมโมเนียและไบคาร์บอเนต กรณีใช้ก๊าซคลอรีน ไซยาเนตจะถูกเปลี่ยนเป็นไบคาร์บอเนตและแอมโมเนีย โดยมีคลอรีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Botz, 2001) ดังสมการ (2-17) และเมื่อใช้โซเดียมไฮโปคลอไรด์ ไซยาเนตจะถูกเปลี่ยนเป็นไบคาร์บอเนตและก๊าซไนโตรเจนดังสมการ(2-18) (Parga, Shukla และ Carrillo-Pedroza, 2003)



2.3.3.2 การออกซิไดซ์ด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Permanganate oxidation) เป็นการเติมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต(KMnO_4) เพื่อกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสีย โดยไซยาไนด์จะถูกเปลี่ยนเป็นไซยาเนต ดังสมการ (2-19)



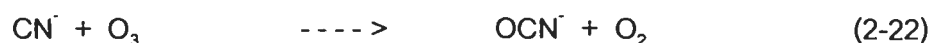
2.3.3.3 การออกซิไดซ์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide oxidation) เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยการออกซิไดซ์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะไปออกซิไดซ์ไซยาไนด์ให้เป็นไซยาเนต และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะ

ถูกรีดิวซ์เป็นน้ำ โดยช่วงพีเอชที่เหมาะสมอยู่ที่ 10-11 จึงไม่มีก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ซึ่งเป็นพิษเกิดขึ้น ดังสมการ (2-20) ถึง (2-21)



อัตราการทำปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไซยาไนด์ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ส่วนเกินและอุณหภูมิโดยอาจใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ทองแดงจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น

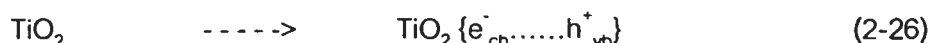
2.3.3.4 การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน(Ozonation) ไซยาไนด์จะทำปฏิกิริยากับโอโซนและเปลี่ยนเป็นไซยาเนต ดังสมการ (2-22) และ (2-23)



ปฏิกิริยาตามสมการ (2-23) จะเกิดขึ้นได้ช้าเมื่อเทียบกับสมการ (2-22) นอกจากนี้อัตราการเกิดปฏิกิริยายังไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของไซยาไนด์ แต่จะขึ้นอยู่กับอัตราการเติมโอโซน (Parga, Shukla และ Carrillo-Pedroza, 2003) ในสารละลายที่มีพีเอชสูงจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไซยาเนต เกิดเป็นคาร์บอนเนตและแอมโมเนีย ดังสมการ (2-24) จากนั้นแอมโมเนียจะถูกออกซิไดซ์เป็นไนเตรตดังสมการ (2-25)



2.3.3.5 การออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet Oxidation) เป็นการกำจัดไซยาไนด์โดยใช้รังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) สังกะสีซัลไฟด์ (ZnS) ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซึ่งงานในด้านสิ่งแวดล้อม ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากมีความเสถียร ไม่มีพิษ เตรียมง่าย และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก แต่วิธีนี้มีข้อจำกัด คือ ใช้ได้กับสารละลายที่ค่อนข้างใส เนื่องจากน้ำเสียต้องได้รับรังสีอัลตราไวโอเลตอย่างต่อเนื่อง เมื่อไททาเนียมไดออกไซด์ได้รับรังสีอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 387.5 นาโนเมตร ก็จะสร้างอนุมูลไฮดรอกซิล (OH^\cdot radical) ซึ่งเป็นออกซิแดนซ์ที่รุนแรงมากและจะเกิดเรดิเคิลขึ้นที่ผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ ($\equiv\text{TiO}^\cdot$) (Chiang, Amal และ Tran, 2003) ดังสมการ (2-26) ถึง (2-29)

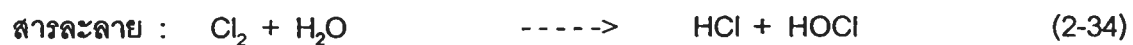
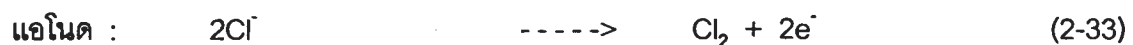
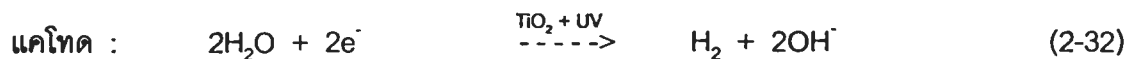




ผลผลิตของปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ได้จะเป็นไฮยาเนต ซึ่งสามารถที่จะถูกออกซิไดซ์ได้อย่างรวดเร็วบนผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ ได้เป็นคาร์บอนเนตและไนเตรต และอาจเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไฮยาเนต ทำให้แอมโมเนียและคาร์บอนเนตมีค่าสูงขึ้น ดังสมการ (2-30) และ (2-31)



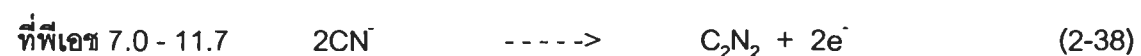
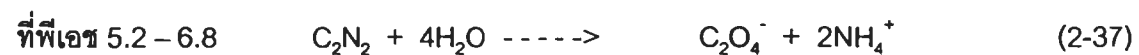
2.3.3.6 การออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า แบ่งเป็น 2 วิธี ดังนี้ วิธีที่ 1 การสลายตัวด้วยไฟฟ้าเคมีโดยอ้อม เป็นการผลิตไฮโปคลอไรต์จากโซเดียมคลอไรด์ที่เติมลงไป ซึ่งไฮโปคลอไรต์จะไปกำจัดไซยาไนด์ต่อไป ดังสมการ (2-35) และ (2-36)

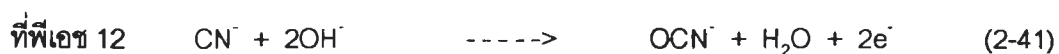


ปฏิกิริยารวม :



วิธีที่ 2 การสลายตัวด้วยไฟฟ้าเคมีโดยตรง ไฮยาไนด์จะถูกออกซิไดซ์เป็นไฮยาเนตที่ขั้วแอโนดโดยตรงและจะถูกสลายต่อไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์หรือออกซาลेटไอออน ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลาย ดังสมการ (2-37) ถึง (2-42)





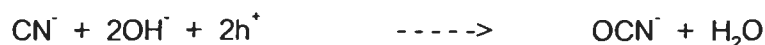
2.3.4 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดไซยาไนด์โดยวิธีออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต

ชุตินพงษ์ วิวัฒน์ภูวพงศ์และปริญนันท์ เพชรสุวรรณ (2542) ศึกษาการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตสลายพันธะของสารประกอบไซยาไนด์เชิงซ้อนออกมาเป็นไซยาไนด์ไอออนอิสระ โดยศึกษาชนิดและกำลังวัตต์ของหลอดอัลตราไวโอเล็ตที่ใช้ ความเข้มข้นของสารละลายไอออนโลหะทั้ง 5 ชนิดที่สามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไซยาไนด์ ได้แก่ Fe(III) Ni(II) Cu(II) Cd(II) และ Ag(I) รวมทั้งระยะเวลาในการฉายแสงที่ให้เปอร์เซ็นต์การสลายตัวมากที่สุด ซึ่งผลการทดลองพบว่า หลอดอัลตราไวโอเล็ตชนิดฆ่าเชื้อกำลัง 20 วัตต์สามารถทำให้สารละลายไซยาไนด์เชิงซ้อนของเหล็กที่ความเข้มข้น 0.05 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สลายตัวได้มากที่สุด 28.96% ที่เวลา 10 นาที และทำให้สารละลายไซยาไนด์เชิงซ้อนของนิกเกิลที่ความเข้มข้น 0.1 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรสลายตัวได้มากที่สุด 26.83% ที่เวลา 20 นาที สำหรับสารละลายไซยาไนด์เชิงซ้อนของคอปเปอร์ แคดเมียม และซิลเวอร์ หลอดอัลตราไวโอเล็ตชนิดฟลูออเรสเซนต์กำลัง 15 และ 40 วัตต์ไม่มีผลต่อการสลายพันธะ แต่หลอดอัลตราไวโอเล็ตชนิดฆ่าเชื้อกำลัง 20 วัตต์ทำให้ไซยาไนด์ไอออนอิสระเกิดการรวมตัวกับไอออนโลหะเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้มากขึ้น

บัณฑิต ชูเชิดวัฒนศักดิ์ (2547) ศึกษาผลของอัตราที่เอทีที่มีต่อการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำเสียโดยใช้กระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าและรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่าในกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า การเพิ่มกระแสไฟฟ้าจะทำให้อัตราการกำจัดเพิ่มขึ้น อัตราที่เอทีที่มีในน้ำเสียทำให้อัตราการออกซิเดชันดีขึ้นเล็กน้อย สำหรับการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ ที่ความเข้มข้นไซยาไนด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร การใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ 0.1 กรัมต่อลิตร และอัตราการเติมอากาศเท่ากับ 1.1 ลิตรต่อนาที สามารถกำจัดไซยาไนด์ได้ 99% ในเวลา 380 นาที ซึ่งอัตราที่เอทีที่มีผลทำให้อัตราการกำจัดไซยาไนด์ลดลงอย่างมาก

Frank และ Bard (1977) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันของไซยาไนด์โดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ทั้งในรูปของอนุภาคและรูโพล์ ทำการทดลองที่หลายความเข้มข้น โดยใช้หลอดXenonขนาด 450 วัตต์ และหลอด Mercury-Xenonขนาด 2.5 กิโลวัตต์ และใช้แสงอาทิตย์

โดยตรง พบว่าในทุกสภาวะเกิดไซยาเนตเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายจากการออกซิเดชัน โดยปฏิกิริยาเป็นดังสมการ



Rader และคณะ (1995) ศึกษาถึงการกำจัดไซยาไนด์และสารประกอบเชิงซ้อนของไซยาไนด์ จากน้ำทิ้งเหมืองซุดแร่ (precious-metal mills tailings) โดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้หลอด UVA จำนวน 8 หลอด ติดตั้งไว้ในกล่องไม้ฉัดที่คลุมด้วยผ้าดำและควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิน 40 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่าระหว่างที่มีการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ความเข้มข้นของไซยาไนด์ลดลงมาจาก 1.85 มิลลิโมลาร์ เหลือเพียง 7.7×10^{-5} มิลลิโมลาร์ แสดงให้เห็นว่าการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพมาก จากการออกซิไดซ์ไซยาไนด์เมื่อฉายแสงเป็นเวลานาน 2 วัน พบว่าไซยาเนตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 0.2 มิลลิโมลาร์ เป็น 1.73 มิลลิโมลาร์ ภายหลังจากทดลองความเข้มข้นของไซยาเนตลดลงเหลือ 0.275 มิลลิโมลาร์ ในขณะที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไนไตรท์จาก 0.037 มิลลิโมลาร์ เพิ่มขึ้นสูงสุดที่ 0.14 มิลลิโมลาร์ หลังผ่านการฉายแสง 1 วัน และไม่พบอีกเลยหลังจากวันที่ 6 สำหรับไนเตรทซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายพบว่าความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจาก 0.24 มิลลิโมลาร์ เป็น 2.18 มิลลิโมลาร์ ซึ่งความเข้มข้นของสารทุก ๆ ตัวเป็นไปตามสมดุลมวล (Mass Balance)

เมื่อฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตโดยไม่มีไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่าไซยาไนด์ลดลงจาก 1.85 มิลลิโมลาร์ เหลือ 1.22 มิลลิโมลาร์ หลัง 17 วันของการฉายแสง ในขณะที่ไซยาเนตเพิ่มขึ้น 50% ซึ่งผู้วิจัยเองก็ไม่ทราบสาเหตุ เมื่อทดลองเก็บสารละลายไว้ในที่มืดพบว่าการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นประมาณ 5% เท่านั้น ในขณะที่การกำจัดโลหะออกจากสารละลายด้วยการฉายแสงร่วมกับการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่าเหล็ก ทองแดง และสังกะสีสามารถตกตะกอนได้อย่างสมบูรณ์ภายใน 3 วัน ในขณะที่ปรอทลดลงเหลือ 10^{-4} มิลลิโมลาร์ ภายใน 4 วันและประมาณ 92% ของสารหนูตกตะกอน ซึ่งอาจกลายเป็น iron(III)arsenate รวมทั้ง thiocyanate และปริมาณแอมโมเนียที่เหลืออยู่ก็ต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้ง

Augugliaro และคณะ (1997) ศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฟโตออกซิเดชันของไซยาไนด์โดยการแปรเปลี่ยนค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์ ความเข้มข้นของไททาเนียมไดออกไซด์ พีเอช กำลังของแสงอัลตราไวโอเล็ต และความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนในสารละลาย พบว่าการออกซิเดชันของไซยาไนด์จะขึ้นกับความเข้มข้นของไททาเนียมไดออกไซด์ ความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออน และกำลังของการฉายแสง ในขณะที่ความเข้มข้นของไซยาไนด์และพีเอชไม่มีผล ถ้าไม่มีแสงหรือไททาเนียมไดออกไซด์ หรือก๊าซออกซิเจน จะไม่เกิดการออกซิเดชันของ

ไชยาไนต์หรือไม่มีไชยาเนตเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์หรืออากาศ ให้ผลไม่แตกต่างกัน เมื่อทดลองกำจัดไชยาไนต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.35 มิลลิโมลาร์ ใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ 0.15 กรัมต่อลิตร ที่พีเอช 12 และใช้หลอด UV ขนาด 500 วัตต์ พบว่าสามารถกำจัดไชยาไนต์ได้หมดภายในเวลาประมาณ 80 นาที โดยปริมาณไชยาเนตจะมีค่าสูงสุดเมื่อไชยาไนต์ถูกออกซิไดซ์จนเกือบหมด สำหรับอัตราการออกซิเดชันของไชยาไนต์จะสูงกว่าไชยาเนตเสมอ นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการออกซิไดซ์ไชยาเนตขึ้นกับพีเอชเริ่มต้น ในขณะที่อัตราการออกซิไดซ์ไชยาไนต์ไม่ขึ้นกับพีเอช

Augugliaro และคณะ (1999) ศึกษาการกำจัดไชยาไนต์โดยการออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ร่วมกับการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ โดยศึกษาถึงอิทธิพลของพินอลที่มีต่อการออกซิเดชัน โดยอัตราการออกซิเดชันจะขึ้นกับความเข้มข้นของไชยาไนต์ ปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ และความเข้มข้นของพินอล ซึ่งในการทดลองพบว่าจลนศาสตร์ของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันไชยาไนต์ไม่ได้ขึ้นกับความเข้มข้นของไชยาไนต์และปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ แต่จะขึ้นกับความเข้มข้นของพินอลและ H_2O_2 ที่เติมลงไป โดยพบว่าไชยาเนต ไนไตรด์ ไนเตรตและคาร์บอนเนต เป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากการออกซิเดชันไชยาไนต์

Dabrowski และคณะ (2002) ศึกษาถึงการออกซิเดชันของไชยาไนต์อิสระโดยการใช้ออกซิเดชันไททาเนียมไดออกไซด์และรังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยทำการวัดอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน โดยแปรเปลี่ยนค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของไชยาไนต์ พีเอช โครงสร้างของไททาเนียมไดออกไซด์ และอุณหภูมิ โดยในส่วนของความเข้มข้นของไชยาไนต์คิดเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง สำหรับผลการทดลองในการใช้ ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับแสงอัลตราไวโอเล็ตและก๊าซออกซิเจน พบว่าทำให้อัตราการออกซิเดชันเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าสำหรับไชยาไนต์อิสระ และการเพิ่มอุณหภูมิจาก 20 องศาเซลเซียสไปจนถึง 35 องศาเซลเซียสไม่มีผลต่อการออกซิเดชันของไชยาไนต์เช่นกัน สำหรับรูปแบบของไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่าโครงสร้างแบบอนาเทสสามารถกำจัดไชยาไนต์ได้ดีกว่าแบบรูไทล์

Chiang, Amal และ Tran (2003) ทำการศึกษาจลนศาสตร์และกลไกของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันไชยาไนต์ จากการทดลองพบว่าอัตราการเติมอากาศมีผลต่อการกำจัดไชยาไนต์ เนื่องจากการเติมอากาศไม่เพียงแต่ช่วยชะลอการกลับมารวมตัวกันของ e^- - h^+ บนผิวไททาเนียมไดออกไซด์ แต่ยังทำให้ไททาเนียมไดออกไซด์กระจายตัวได้อย่างทั่วถึงในถังปฏิกรณ์ เมื่อมีฟลูออไรด์ไอออนในระบบพบว่า โฟโตแคตลิวิตีของไททาเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดไชยาไนต์ลดลง เนื่องจากมีการดูดซับฟลูออไรด์ไอออนเกิดขึ้นบนผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ ทำให้ความสามารถในการจับ h^+ ให้เกิดเป็น $\equiv TiO^+$ ลดลง ซึ่งจากการทดลองพบว่าไม่มีการออกซิไดซ์

ไฮยาไนด์ด้วย OH^- ที่เกิดขึ้น แต่ไฮยาไนด์จะถูกออกซิไดซ์ด้วย $\equiv\text{TiO}^+$ ซึ่งมีค่า oxidation potential ต่ำกว่า แต่มีช่วงชีวิตที่ยาวกว่าทำให้เกิดการออกซิไดซ์ไฮยาไนด์ได้มากกว่า

2.4 กระบวนการตกตะกอนทางเคมีหรือโคแอกกูเลชัน (Chemical Coagulation)

กระบวนการโคแอกกูเลชัน หมายถึง กระบวนการทั้งหมดในการทำให้อนุภาคคอลลอยด์มารวมกันเป็นกลุ่มก้อน (floc) ซึ่งมี 2 ขั้นตอน คือ

1. การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ซึ่งอาศัยกลไก 4 แบบ (มันลีน ดัณฑุลเวศน์, 2538) คือ

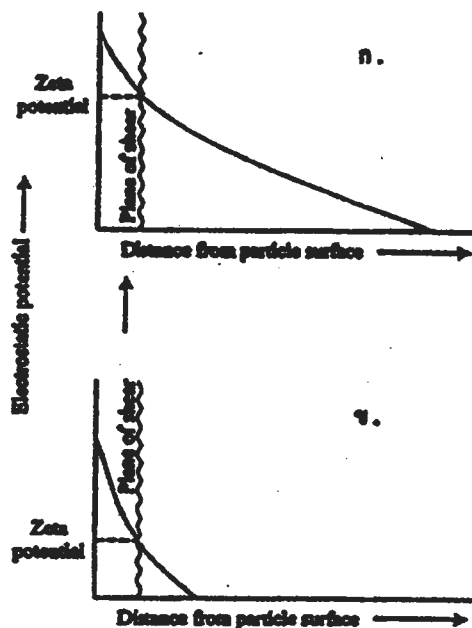
1.1 การลดความหนาของชั้นกระจาย

ทำได้โดยการเพิ่มจำนวนประจุตรงข้าม (Counter Ion) ในชั้นกระจาย ประจุตรงข้ามจะไปออกันอยู่ใกล้ผิวของอนุภาคคอลลอยด์มากขึ้น ทำให้อำนาจประจุของอนุภาคไม่สามารถส่งออกไปได้ไกลเท่าเดิม ทำให้ชั้นกระจายมีความหนาลดลงและทำให้ศักย์ไฟฟ้าหรือซีตาโพเทนเชียลลดลงตามไปด้วย (ตามรูปที่ 2.8) อนุภาคสามารถเข้าใกล้กันได้มากขึ้นจนแรงดึงดูดมีค่ามากกว่าแรงผลักรั้วทำให้อนุภาคเกาะกันได้

ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์โดยลดความหนาของชั้นกระจายด้วยการเติมสารละลายของเกลือต่างๆ มีข้อที่น่าสนใจ คือ

ก) ปริมาณสารตัวนำไฟฟ้า (ที่มีไอออนประจุบวก) ที่เติมเพื่อทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคอลลอยด์

ข) อนุภาคคอลลอยด์ไม่สามารถเปลี่ยนสภาพจากประจุลบไปเป็นประจุบวกได้ไม่ว่าจะเติมไอออนบวกมากเพียงใดก็ตาม



รูปที่ 2.8 ผลของการเติมไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามให้กับคอลลอยด์ (มันซิน ตัณฑุลเวศน์, 2538)

ก. ก่อนเติม

ข. หลังเติม

1.2 การดูดติดและทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ (Adsorption and charge neutralization)

เป็นการเติมสารเคมีบางหมู่ที่มีความสามารถให้ประจุตรงข้ามกับคอลลอยด์ และสามารถดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์ จะมีผลในการลดอำนาจศักย์ไฟฟ้าและทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ กลไกแบบนี้จะต่างจากการลดความหนาของชั้นกระจาย คือ

- ต้องการสารเคมีที่ให้ประจุตรงข้ามน้อยกว่าแบบแรก
- ปริมาณสารเคมีที่ใช้เพิ่มหรือลดตามการเพิ่มหรือลดของปริมาณอนุภาคคอลลอยด์
- ถ้าใช้สารเคมีมากเกินไป จะสามารถเปลี่ยนประจุของอนุภาคคอลลอยด์ให้เป็นตรงข้ามกับของเดิมได้ และเสถียรภาพของคอลลอยด์จะฟื้นขึ้นมาใหม่

1.3 ห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ไว้ในผลึกสารประกอบที่สร้างขึ้น (Sweep Coagulation)

เป็นการเติมสารประกอบของเกลือโลหะบางชนิดลงไปในน้ำ ในปริมาณที่มากเพียงพอให้มีการตกผลึกเกิดขึ้น โดยอนุภาคคอลลอยด์อาจเป็นแกนของผลึกหรือจับตัวรวมกับผลึกก็ได้ เป็นการเพิ่มขนาดหรือน้ำหนักให้กับอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้คอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและสามารถตกตะกอนได้ ปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่ใช้จะแปรผกผันกับความเข้มข้นของคอลลอยด์เนื่องจากถ้าคอลลอยด์มีความเข้มข้นต่ำทำให้มีโอกาสสัมผัสระหว่างอนุภาคน้อย แม้ว่าจะทำลายเสถียรภาพแล้ว แต่การตกตะกอนอาจเกิดได้ไม่ดีเท่าที่ควร จึงต้องใช้สารในปริมาณสูงเพื่อสร้างผลึกจำนวนมากสำหรับเป็นเป้าสัมผัสให้กับอนุภาคคอลลอยด์

1.4 การใช้สารโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ (Polymer Bridging)

โดยใช้สารโพลีเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่มาก โมเลกุลของโพลีเมอร์สามารถเกาะติดบนอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่ง เป็นผลมาจากประจุที่ต่างกันของโพลีเมอร์และคอลลอยด์ อนุภาคที่มีโพลีเมอร์เกาะติดอยู่โดยมีปลายอิสระสำหรับเกาะบนอนุภาคอื่น ถือเป็นอนุภาคที่สูญเสียเสถียรภาพแล้วปลายอิสระของโพลีเมอร์จะเกาะกับอนุภาคอื่นทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและตกตะกอน

2. การทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆเคลื่อนที่มาสัมผัสกันและรวมตัวกัน

จะมีการเติมสารเคมีประเภทโคแอกกูแลนต์เพื่อทำลายความหนาของชั้นกระจายโดยการทำลายประจุไฟฟ้าบนอนุภาคคอลลอยด์ หรือการเพิ่มเป้าสัมผัสในกระบวนการแบบฟล็อกกวาด (Sweepfloc Coagulation) หรือการใช้โพลีเมอร์พร้อมกับการกวนน้ำอย่างรวดเร็วเพื่อให้โคแอกกูแลนต์กระจายไปยังส่วนต่างๆ เกิดเป็นฟล็อกซึ่งจะสมบูรณ์เพียงใดขึ้นอยู่กับขั้นตอนการทำให้เกิดการสัมผัสซึ่งมีหลายวิธี (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2538)

2.1 การทำให้อนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่ไปมาในน้ำ จนกว่าจะมีการสัมผัสเกิดขึ้น วิธีที่นิยมปฏิบัติกันมากคือการกวนน้ำให้มีอัตราเร็วในการไหลแตกต่างกัน ทำให้อนุภาคมีการเคลื่อนที่ไม่เท่ากันจึงเกิดการสัมผัสขึ้น แต่การเคลื่อนที่ที่ต้องไม่เร็วเกินไปจนทำให้ฟล็อกแตกออก ซึ่งมีชื่อเรียกทางเทคนิคว่า ออร์โธโคเนติก ฟล็อกกูเลชัน ใช้น้ำถึงกวนช้า

2.2 การสร้างสัมผัสของอนุภาคคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นเองได้ โดยอาศัยการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน ซึ่งเกิดจากการชนกันระหว่างอนุภาคคอลลอยด์กับโมเลกุลของน้ำขึ้นกับอุณหภูมิ มีชื่อเรียกว่า เพอร์โคเนติก ฟล็อกกูเลชัน มีข้อเสียคือต้องใช้เวลามากและเป็นการ

เคลื่อนที่ในระดับโมเลกุล ทำให้สามารถสร้างสัมผัสให้กับคอลลอยด์ขนาดเล็กกว่า 0.1 – 1 ไมครอนเท่านั้น ข้อดีของวิธีนี้คือไม่ต้องการพลังงานจากภายนอก

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความเป็นกรด – ด่าง คุณสมบัติของความชุ่มชื้นของสารช่วยตกตะกอน

ทั้งสองขั้นตอนมีความสำคัญเท่าเทียมกันและต้องมีทั้งสองขั้นตอน จึงจะเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันที่สมบูรณ์ ปฏิกิริยาโคแอกกูเลชันจะเกิดเกือบสมบูรณ์เมื่อสารเคมีละลายในน้ำได้หมด โดยในขั้นตอนแรกจะเกิดตะกอนขนาดเล็กและรวมตัวกันใหญ่ขึ้น เนื่องจากเกิดการลดประจุไฟฟ้าของอนุภาคและการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian Movement) จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการฟล็อกกูเลชันเพื่อกวาน้ำเข้าให้อนุภาคมาชนกันและมีขนาดใหญ่ขึ้นจนสามารถแยกออกจากของเหลวได้ง่าย

การที่จะแยกอนุภาคออกจากของเหลวได้นั้น สามารถทำได้หลายวิธี แต่ถ้าจะใช้การแยกโดยการตกตะกอนและอาศัยแรงดึงดูดของโลกแล้ว ขนาดของอนุภาคที่จะแยกจะต้องมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากพอที่จะตกตะกอนได้ง่าย ทำให้ต้องอาศัยกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกกูเลชันร่วมกัน

แรงที่กระทำต่ออนุภาค นอกจากมีแรงดึงดูดแล้วยังมีแรง electrostatic และ interionic ซึ่งสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวของอนุภาค ในกรณีที่อนุภาคมีขนาดเล็กมาก แรงทั้งสองจะมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดของโลก ทำให้เกิดแรงยึดระหว่างอนุภาคจนไม่สามารถตกตะกอนได้ ดังนั้นจึงต้องใส่สารเคมี (coagulants) ลงไปเพื่อลดแรงที่กระทำที่ผิวโดยประจุไฟฟ้า ทำให้อนุภาคสามารถมาสัมผัสและรวมตัวกันให้ใหญ่ขึ้นได้

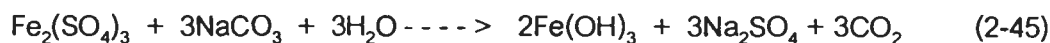
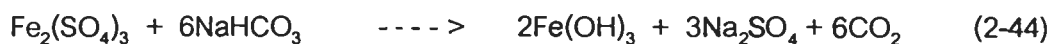
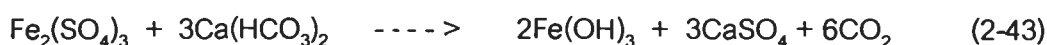
2.4.1 สารสร้างตะกอน (Coagulants)

โดยทั่วไปสารสร้างตะกอนที่นิยมใช้กันจะแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่มีอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ อลูมิเนียมซัลเฟต (Al_2SO_4) อลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) และโซเดียมอลูมิเนต ($NaAlO_2$) และประเภทที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ เฟอริกซัลเฟต ($Fe_2(SO_4)_3$) เฟอริคซัลเฟต ($FeSO_4$) และเฟอริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) การใช้สารช่วยตกตะกอนที่มีเหล็กหรืออลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ เนื่องจากเป็นสารที่มีประสิทธิภาพและราคาไม่แพง ประสิทธิภาพของสารสร้างตะกอนเหล่านี้เกิดจากความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก ซึ่งมีสารต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

2.4.1.1 เฟอร์ริกซัลเฟต $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$

โดยทั่วไปแล้วสารโคแอกกูแลนต์ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ จะใช้ในช่วงพีเอชที่กว้าง เช่น 4 - 11 เฟอร์ริกซัลเฟตมักใช้ในการกำจัดสีที่ช่วงพีเอชต่ำ และที่ช่วงพีเอชสูงจะใช้ในการกำจัดเหล็ก แมงกานีสและกำจัดความกระด้าง

สมการปฏิกิริยาเคมีของเฟอร์ริกซัลเฟตมี ดังสมการ (2-43) ถึง (2-47)



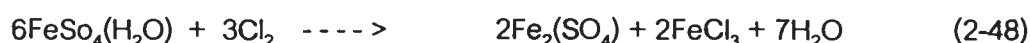
2.4.1.2 เฟอร์รัสซัลเฟต $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

อยู่ในรูปของผลึกหรือเม็ด มีเหล็กเป็นส่วนประกอบ 20 % สามารถละลายในน้ำได้ เฟอร์รัสซัลเฟตและปูนขาวมักนิยมใช้ที่ช่วงพีเอชสูง เช่น ในกระบวนการกำจัดความกระด้างด้วย ปูน-โซดา และในการกำจัดเหล็กและแมงกานีส

2.4.1.3 Chlorinated Ferrous Sulphate

เนื่องจากการออกซิเดชันของเฟอร์รัสซัลเฟตโดยออกซิเจนที่ละลายในน้ำ จะเกิดขึ้นในช่วง พีเอชสูงกว่า 8.5 ดังนั้นจึงเติมคลอรีนลงไปในเฟอร์รัสซัลเฟตเพื่อให้ทำปฏิกิริยากันเกิดเป็น $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ และ FeCl_3 ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นโคแอกกูแลนต์

ปฏิกิริยาสามารถแสดงได้ดังสมการ (2-48)



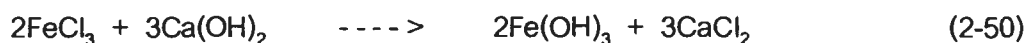
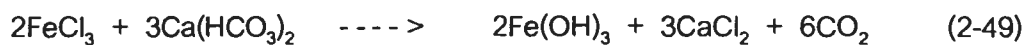
โคแอกกูแลนต์ด้วย Chlorinated Ferrous Sulphate มักใช้ในการเติมคลอรีนขั้นแรก (pre-chlorination) และมีข้อดีกว่าเฟอร์ริกซัลเฟต ซึ่งสามารถใช้ในกระบวนการโคแอกกูแลนต์ได้ ในช่วงพีเอช 4-11

2.4.1.4 เฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3)

เฟอร์ริกคลอไรด์ที่ใช้กันโดยทั่วไปมักอยู่ในรูปของเหลวและผลึก ซึ่งในรูปของเหลวและผลึกมีการกัดกร่อนสูงและต้องขนส่งแบบเดียวกับกรดไฮโดรคลอริก เช่น ใช้ถังเหล็กเคลือบไฟเบอร์กลาสเสริมด้วยโพลีเอสเตอร์ ฟิวซี เป็นต้น ในรูปของเหลวจะมีเฟอร์ริกคลอไรด์ละลายอยู่

43% (m/m) และต้องเก็บในที่ปราศจากความชื้นเพราะเฟอร์ริกคลอไรด์เป็นสารที่ดูดความชื้นได้เร็วมาก

ปฏิกิริยาของเฟอร์ริกคลอไรด์กับความเป็นด่างตามธรรมชาติและที่เพิ่มเข้าไปจะเป็นดังสมการ (2-49) และ (2-50)



สารสร้างตะกอนที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบสามารถทำงานได้ในช่วงพีเอชที่กว้างกว่า คือ 4-11 และฟล็อกของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ยังหนักกว่าฟล็อกของ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ทำให้ตกตะกอนได้เร็วกว่า นอกจากนี้ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ยังไม่กลับมาละลายที่ค่าความเป็นด่างสูงๆ (สวีณา เกตุสุวรรณ, 2543)

2.4.1.5 อลูมิเนียมซัลเฟต $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$

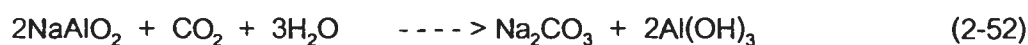
เป็นสารที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน ผลิตมาจากการย่อยแร่บอกไซต์ด้วยกรดซัลฟิวริก ปริมาณแร่บอกไซต์ที่ใช้หาได้จากสมการสโตยชิโอเมตริกพร้อมกับกรดแล้วทำการระเหยเอาน้ำออก ได้สูตรอย่างง่ายเป็น $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$ และมีอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นส่วนประกอบในช่วง 14 – 18 %

2.4.1.6 อลูมิเนียมคลอไรด์ $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

อลูมิเนียมคลอไรด์ประกอบด้วย AlO_3 20 % ความหนาแน่น 1300 กก./ม.³ ค่าพีเอช 2.5 ใช้ในการปรับสภาพของสลัดจ์ (sludge conditioning)

2.4.1.7 โซเดียมอลูมิเนต NaAlO_2

โซเดียมอลูมิเนตแตกต่างจากสารส้ม ตรงที่มีความเป็นด่างมากกว่าความเป็นกรดในปฏิกิริยาของมัน โดยปกติจะไม่ใช้ตามลำพัง ยกตัวอย่างเช่น การตกตะกอนน้ำที่มีสีมากและมีค่าพีเอชต่ำซึ่งไม่เหมาะสมต่อการละลายของสารประกอบอลูมิเนียมจึงมีการเติมโซเดียมอลูมิเนตลงไปเพื่อเพิ่มพีเอชให้ได้เท่ากับ 6 จึงจะทำให้สารละลายอลูมิเนียมสามารถตกผลึกได้ในบ่อตะกอนชั้นที่สอง ปฏิกิริยาของโซเดียมอลูมิเนตกับสารส้มและคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งจะให้สารประกอบอลูมิเนียมที่ไม่ละลายน้ำ ดังสมการ (2-51) ถึง (2-52)

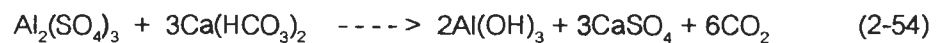


2.4.1.8 โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminium chloride หรือ PACI)

เป็นสารสร้างตะกอนที่ได้รับความนิยมใช้กันทั่วไปในยุโรปและญี่ปุ่น เนื่องจากการใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์มักเกิดปัญหาสภาพเป็นกรดมาก ค่าพีเอชลดต่ำลง(ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2527) ดังสมการ (2-53)



จากสมการเกิดอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ตกตะกอน และเกิดกรดซัลฟิวริกทำให้พีเอชลดลงจึงต้องเติมสารเคมีเพื่อปรับสภาพน้ำไม่ให้พีเอชลดลงมากเกินไป ดังสมการ (2-54)



ซึ่งทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความกระด้างถาวรขึ้น จากปัญหาที่เกิดขึ้นเหล่านี้ จึงมีการพัฒนาโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ขึ้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โดยที่โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารเคมีที่มีสูตรโมเลกุลเรียงต่อกันเป็นเส้นยาว มีสูตรโมเลกุลดังนี้



คุณสมบัติของ PACI เมื่อเป็นโคแอกกูแลนต์

1. มีอำนาจในการสร้างตะกอน การรวมตัวของตะกอนสูงและการตกตะกอนจะเป็นไปอย่างรวดเร็วกว่าสารส้ม
2. สะดวกในการใช้งาน เนื่องจากมีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดี
3. ในการทำงาน PACI จะมีช่วงพีเอชในการทำปฏิกิริยาที่กว้างกว่าโคแอกกูแลนต์ตัวอื่นๆ ปกติจะมีพีเอชอยู่ในช่วง 6-9 แต่บางกรณีสามารถตกตะกอนในช่วงพีเอช 5-10
4. โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์สามารถสร้างตะกอนได้เร็วกว่าสารส้ม โดยที่ใช้ระยะเวลาในการกวนเร็วน้อยกว่า

กลไกการตกตะกอนด้วย PACI

ลักษณะทั่วไปของ PACI อาจอยู่ในรูปของสารละลายใส หรือขุ่นเล็กน้อยและอาจอยู่ในรูปของผงละเอียดสีขาว เมื่อ PACI แตกตัวจะได้อลูมิเนียมที่มีความสามารถในการให้ไฮโดรเจนไฮออกไซด์เกิดการไฮโดรไลซิสของอลูมิเนียมได้สารต่างๆ เช่น $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{+5}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{+4}$, $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{+3}$ เป็นต้น ซึ่งมีอลูมิเนียมหลายอะตอมที่เรียกว่า polymeric hydroxo complex มีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับคอลลอยด์ ทำให้คอลลอยด์ไม่เสถียร แล้วทำให้เกิดการรวมกลุ่มกันเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นแล้วจึงตกตะกอน สำหรับการสร้างตะกอน พีเอชของน้ำจะมีความสำคัญต่อประจุที่เกิดขึ้นจากการไฮโดรไลซิส เนื่องจากถ้าพีเอชต่ำสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุบวกจะเกิดขึ้นมาก ให้ผลในการเพิ่มทั้งปริมาณและอัตราเร็วในการตกตะกอน นอกจากนี้

อลูมิเนียมจะจับกับอนุภาคคอลลอยด์แล้ว อลูมิเนียมยังทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลไอออนในน้ำ กลายเป็น $Al(OH)_3$ เป็นตะกอนเล็กๆ และเนื่องจากอลูมิเนียมมีประสิทธิภาพสูงในการทำละลายประจุของอนุภาคคอลลอยด์ ดังนั้นเมื่อเติม PACI ลงไปในน้ำจะต้องผสมอย่างรวดเร็วทันที แล้วลดอัตราการกวนให้ช้าลง เพื่อให้ตะกอนที่เกิดขึ้นมีโอกาสสัมผัสกันและจับตัวกันเป็นก้อนใหญ่ขึ้น แล้วแยกตะกอนที่เกิดขึ้นออกมาโดยการปล่อยให้ตกตะกอนตามธรรมชาติ

2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโคแอกกูเลชัน

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโคแอกกูเลชัน มีหลายประการ ดังนี้

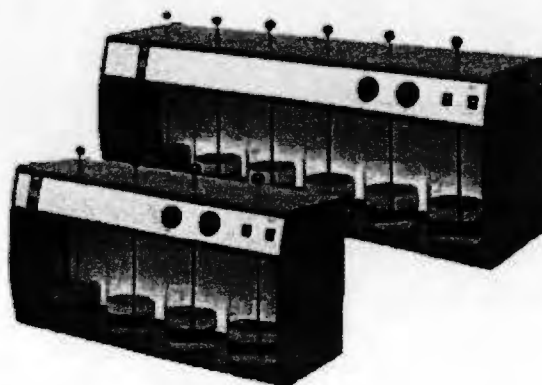
1. ชนิดของคอลลอยด์ในน้ำ เนื่องจากคอลลอยด์ในน้ำเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ที่มีสภาพเป็นประจุบวกหรือลบ ดังนั้น หากทราบชนิดของคอลลอยด์จะได้เลือกใช้สารสร้างตะกอนได้อย่างเหมาะสม
2. ชนิดของสารสร้างตะกอน สารสร้างตะกอนแต่ละชนิดมีความเหมาะสมกับคอลลอยด์แต่ละชนิดไม่เหมือนกัน ตลอดจนคุณสมบัติในการตกตะกอนและปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในน้ำนั้นจะต้องมีการเลือกใช้งานให้เหมาะสมระหว่างชนิดของคอลลอยด์และสารสร้างตะกอน
3. พีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอน ประสิทธิภาพของสารสร้างตะกอนแต่ละชนิดจะดีที่สุดที่ช่วงพีเอชหนึ่งเท่านั้น จึงต้องมีการปรับให้เหมาะสม
4. เวลาและความแรงของการผสมเพื่อให้สารเคมีกระจายตัว การทำให้สารเคมีสามารถละลายน้ำได้อย่างทั่วถึง เพื่อให้เกิดการสร้างตะกอนจึงจำเป็นต้องกวนน้ำอย่างรุนแรงด้วยระยะเวลาอันสั้นเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอย่างทั่วถึง และหลังจากนั้นเพื่อต้องการให้เกิดการรวมตัวของตะกอน จึงต้องให้การกวนอย่างช้าๆ เพื่อให้ตะกอนที่เกิดขึ้นมีโอกาสสัมผัสกันมากที่สุด

2.4.3 การควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชัน

มีจุดมุ่งหมายเพื่อควบคุมปริมาณของโคแอกกูแลนต์และระดับความเป็นกรด-ด่างของน้ำให้เหมาะสม เพื่อให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันได้ดีที่สุด การควบคุมสภาวะดังกล่าวสามารถทำได้โดยวิธีจาร์เทสต์

เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชันหรือจาร์เทสต์ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ประกอบด้วยเครื่องสำหรับกวนน้ำที่มีใบพัดสำหรับกวนจำนวน 6 ใบ ที่หมุนรอบในแนวนอนซึ่งใช้ในการทดสอบตัวอย่างน้ำและสารโคแอกกูแลนต์ที่ใสในบีกเกอร์ การทำจาร์เทสต์จะมีช่วงในการกวนเร็วซึ่งใช้ความเร็วรอบสูง และใช้เวลาในการกวนน้อย ช่วงการกวนเร็วนี้จะเป็นช่วงที่มีการเติมสารโคแอกกูแลนต์ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้สารโคแอกกูแลนต์กระจายตัว และผสมเข้ากันกับน้ำ

อย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ หลังจากการกวาดเร็วแล้วจะเป็นช่วงกวาดช้า เพื่อให้ตะกอนที่เกิดขึ้นได้มีโอกาสสัมผัสกันและรวมตัวกันเป็นก้อนใหญ่ขึ้น หลังจากนั้นจึงปล่อยให้ตะกอนตกตะกอน แล้วจึงนำน้ำใสส่วนบนมาทำการวิเคราะห์ค่าความขุ่นที่ถูกกำจัดออกไปหรือความขุ่นที่เหลือในน้ำ



รูปที่ 2.9 อุปกรณ์จาร์เทสต์

2.4.4 ทบทวนเอกสารการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตกตะกอนโททาเนียมไดออกไซด์

Watts, Kong และ Lee (1995) ได้ทดลองตกตะกอนสารแขวนลอยโททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้เกลือของโลหะและโพลีเมอร์เป็นโคแอกกูแลนต์ โดยเน้นความสำคัญไปที่การนำโททาเนียมไดออกไซด์กลับมาใช้ใหม่ (reuse) จากการวิเคราะห์ค่าซีตาโพเทนเชียลพบว่า ZPC อยู่ที่พีเอช 2.5 และอัตราการตกตะกอนของโททาเนียมไดออกไซด์จะดีที่สุดในช่วง ± 0.5 ของพีเอชที่ ZPC พบว่าสารส้ม FeCl_3 และ FeSO_4 มีประสิทธิภาพดีในการตกตะกอนที่พีเอชธรรมชาติ เมื่อใช้สารส้ม และ FeCl_3 ในช่วง 15 - 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าตกตะกอนโททาเนียมไดออกไซด์ได้มากกว่า 95% และเมื่อใช้ FeSO_4 สามารถตกตะกอนโททาเนียมไดออกไซด์ได้ 83% ส่วนช่วงพีเอชที่เหมาะสมพบว่าสารส้ม FeCl_3 และ FeSO_4 ใช้ได้ดีที่สุดที่พีเอช 7.6 และ 8 ตามลำดับ ส่วนโพลีเมอร์ ประจุบวกอีก 2 ชนิดและโพลีเมอร์ประจุลบอีก 1 ชนิด ใช้ได้ดีที่พีเอช 3 และเมื่อทดลองทำลายประจุด้วยการปรับพีเอชให้เท่ากับ 2.5 พบว่าโททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตรตกตะกอนจนเหลือประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรภายใน 120 นาที เมื่อใช้โททาเนียมไดออกไซด์บำบัด 1,2-bis (2-chloroethoxy)ethane พบว่าโททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ FeSO_4 ตกตะกอนและที่ตกตะกอนด้วยการปรับพีเอชให้อยู่ในภาวะกรดจะให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสสูงขึ้น

Kagaya และคณะ (1999) ได้ทำการทดลองแยกโททาเนียมไดออกไซด์ออกจากสารแขวนลอยด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้โพลีลูมิเนียมคลอไรด์ ใช้โททาเนียมไดออกไซด์ P25 ที่มีโครงสร้างแบบอนุภาค 70% ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค 15 - 40 นาโนเมตร ปรับ

ค่าความเป็นกรด – ด่างด้วยไฮโดรเจนไอออน วัดความสูงของชั้นของแข็ง – ของเหลวที่เกิดขึ้นหลังจาก 3 ชั่วโมง จึงนำน้ำใสส่วนบนมาวัด % Transmittance ด้วย Spectrophotometer พบว่าไททาเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยสามารถรวมตัวและตกตะกอนได้อย่างรวดเร็ว และตกตะกอนได้ในช่วงความเป็นกรด-ด่างที่ค่อนข้างกว้าง เมื่อใช้โพลีลูมิเนียมคลอไรด์ 2 มิลลิลิตรตกตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์ 100 มิลลิกรัมในน้ำ 100 มิลลิลิตร ภายในช่วงพีเอช 8 – 9 ในเวลา 60 นาที พบว่าได้ % Transmittance มากกว่า 93% ในขณะที่เมื่อใช้โพลีลูมิเนียมคลอไรด์ 4 มิลลิลิตร กลับทำให้การตกตะกอนเกิดขึ้นช้าลง เมื่อทดลองใช้ โคแอกกูแลนต์ชนิดอื่น เช่น เพอร์ริซัลเฟตพบว่าสามารถตกตะกอนได้รวดเร็วเช่นกัน แต่จะให้ % Transmittance น้อยกว่าเมื่อใช้โพลีลูมิเนียมคลอไรด์ และเมื่อใช้แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) เป็นโคแอกกูแลนต์พบว่าใช้เวลาในการตกตะกอนนานกว่าและตกตะกอนได้ดีในช่วงพีเอชสูงเท่านั้น เมื่อนำไททาเนียมไดออกไซด์กลับมาใช้ในการย่อยสลาย EDTA ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสอีกครั้ง พบว่าเมื่อทดลองนำกลับมาใช้ใหม่สองครั้ง แต่แต่ละครั้งจะให้ผลที่แตกต่างกันและไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งผู้วิจัยแนะนำว่าควรจะศึกษากระบวนการฟื้นฟูไททาเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมเพิ่มเติมก่อนการนำกลับมาใช้

Fernandez และคณะ (2003) ได้ทดลองนำกลับมาใช้ใหม่ไททาเนียมไดออกไซด์มาใช้ใหม่ด้วยการทำลายประจุและใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยอิเล็กโตรไลต์ ในห้องทดลองและทดสอบในระดับโรงงานนำร่อง (pilot plant scale) เพื่อหาประสิทธิภาพในการแยกไททาเนียมไดออกไซด์ออกจากน้ำภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส จากการวิเคราะห์ค่าซีตาโพเทนเชียล พบว่า isoelectric point (IEP) ของสารแขวนลอยไททาเนียมไดออกไซด์อยู่ที่ประมาณ พีเอช 7

เมื่อนำไททาเนียมไดออกไซด์กลับมาใช้ใหม่ในโรงงานนำร่องโฟโตคะตะไลซิสพลังแสงอาทิตย์ (solar photocatalysis pilot plant) สำหรับบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อน tetrachloroethylene (C_2Cl_4) โดยทำการเปรียบเทียบ 2 ชุดทดลอง คือ ชุดที่ 1 นำสารแขวนลอยไททาเนียมไดออกไซด์ทั้งหมดที่ผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสแล้วมาใช้ใหม่โดยไม่ผ่านการตกตะกอน ชุดที่ 2 นำกลับเฉพาะไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสแล้วมาใช้ใหม่ โดยตกตะกอนแยกออกจากสารแขวนลอยก่อน จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดต่ำลงเมื่อใช้สารแขวนลอยที่ได้จากชุดทดลองที่ 1 เนื่องจากน้ำที่ผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสมาแล้วยังคงมีสารปนเปื้อนหลงเหลืออยู่ เมื่อนำกลับมาใช้ทั้งหมดจึงเพิ่มความเข้มข้นของสารปนเปื้อนให้แก่ระบบมากขึ้นไปอีก ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดลดลง ในขณะที่เมื่อใช้แต่ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการตกตะกอนหลังผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสมา

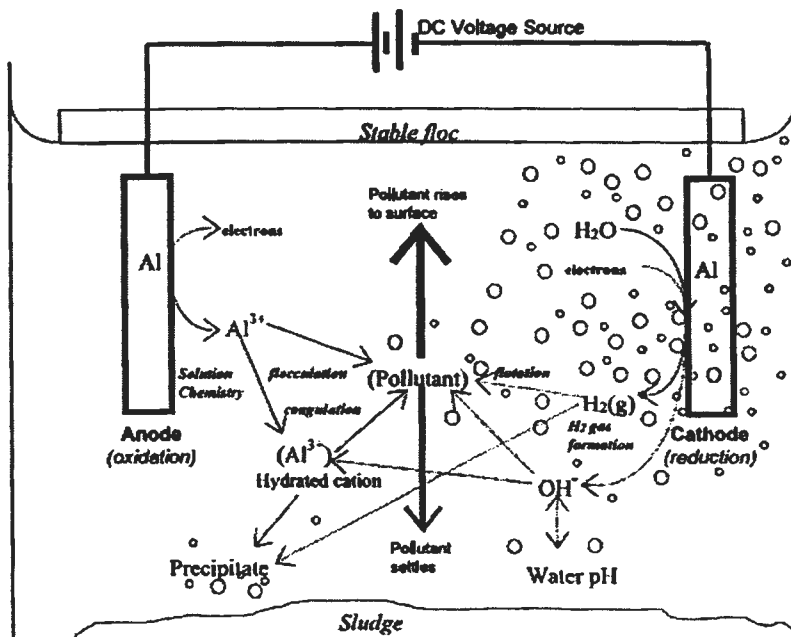
ครั้งหนึ่งแล้วจากชุดทดลองที่ 2 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดเมื่อนำกลับมาใช้ใหม่ไม่ได้ลดน้อยลง สำหรับการทดลองการตกตะกอนในถังตกตะกอนระดับโรงงานนำร่อง (sedimentation pilot plant) พบว่าไททาเนียมไดออกไซด์ตกตะกอนลงสู่ก้นถังเกือบทั้งหมดภายใน 5 ชั่วโมง และภายในเวลา 24 ชม. ความเข้มข้นของไททาเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยลดลงจาก 300 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือเพียง 8 มิลลิกรัมต่อลิตร

Baran, Makowski และ Wardas (2005) ทำการทดลองแยกไททาเนียมไดออกไซด์ออกจากน้ำเสียหลังผ่านกระบวนการฟิโตะตะไลซิสในการย่อยสลาย acid orange 7 โดยใช้ FeCl_3 เป็นโคแอกกูแลนต์โดยแปรเปลี่ยนค่าพีเอชและความเข้มข้นของ FeCl_3 พบว่าพีเอชมีผลโดยตรงต่อการตกตะกอนของไททาเนียมไดออกไซด์ เมื่อใช้สารละลาย acid orange 7 ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 0.1 มิลลิโมลาร์ร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ 1 กรัมต่อลิตรและ FeCl_3 1 มิลลิโมลาร์ หลังการฉายแสงอัลตราไวโอเลตนาน 30 นาที ที่ pH 3.1 พบว่าเกิดการรวมตัวกันของอนุภาค แต่มองไม่เห็นกลุ่มฟล็อกชัดเจน เมื่อทิ้งไว้ 180 นาทีพบว่ากำจัดความขุ่นไปได้ประมาณร้อยละ 70 แต่เมื่อปรับพีเอชเป็น 6.5 ด้วย NaOH พบว่าเกิดการรวมตัวกันและตกตะกอนอย่างรวดเร็ว ความขุ่นลดลงเร็วมาก สามารถกำจัดความขุ่นได้มากกว่าร้อยละ 90 ภายในเวลา 20 นาที

2.5 กระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electrocoagulation)

2.5.1 หลักการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี

ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (ปฏิกิริยารีดอกซ์) ซึ่งเซลล์ไฟฟ้าแบบอิเล็กโทรไลติกเซลล์นั้น จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้วและสารละลายนำไฟฟ้าหรือสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2539) ดังรูปที่ 2.10 เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ที่ใช้โลหะเป็นขั้วไฟฟ้า เช่น เหล็กจะเกิดปฏิกิริยาที่มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน โดยจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วบวกหรือแอโนด ทำให้โลหะเกิดการสึกกร่อนและละลายออกมาอยู่ในสารละลายนำไฟฟ้า ดังสมการที่ (2-55) และ (2-56) ในขณะเดียวกันที่ขั้วลบหรือแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ ซึ่งจะเกิดการแตกตัวให้ก๊าซไฮโดรเจน (H^+) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ดังสมการที่ (2-57) ซึ่งจะทำให้สารละลายนำไฟฟ้านั้นมีสภาพเป็นด่าง และทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ (Fe^{2+}) และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ (Fe^{3+}) ในรูปของเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_{2(s)}$) และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_{3(s)}$) ดังสมการที่ (2-58) (ปริเมษ เจริญนพคุณ, 2545)

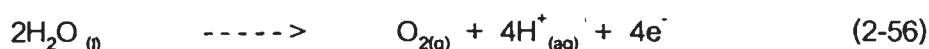
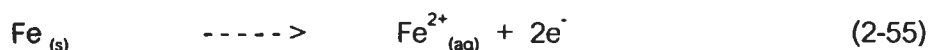


รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเซลล์ไฟฟ้าเคมี (Holt, Barton และ Mitchell, 1999)

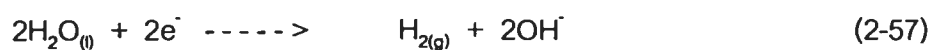
ข้อหลัก การออกซิเดชันของข้อหลักในเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะเกิดไฮดรอกไซด์ของเหล็ก $Fe(OH)_n$ โดย $n = 2$ หรือ 3 ซึ่งเกิดขึ้นได้ 2 กลไกด้วยกัน (Mollah และคณะ, 2001)

กลไกที่ 1

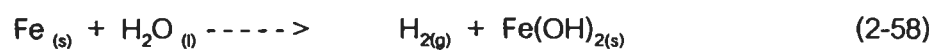
การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่แอโนด



การเกิดปฏิกิริยาที่แคโทด

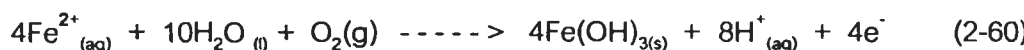
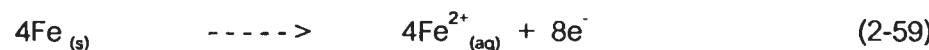


ปฏิกิริยารีดอกซ์



กลไกที่ 2

การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่แอโนด



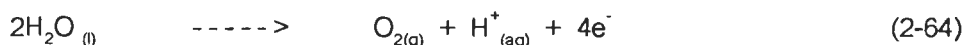
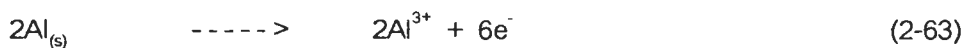
การเกิดปฏิกิริยาที่แคโทด



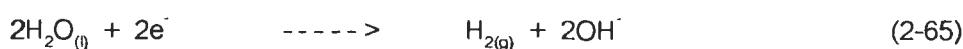
ปฏิกิริยารีดอกซ์



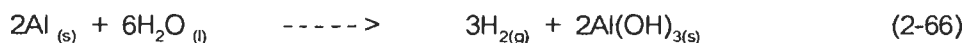
ข้อลุมิเนียม การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่แอโนด



การเกิดปฏิกิริยาที่แคโทด



ปฏิกิริยารีดอกซ์



Mollah และคณะ (2001) และ Kobya, Can และ Bayramoglu (2003) สรุปไว้ว่า ในระหว่างขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีโดยทั่วไปจะมีกระบวนการหลักเกิดขึ้น 3 กระบวนการด้วยกัน คือ

1. เกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสที่ผิวของขั้วไฟฟ้า
2. เกิดการฟอรัมตัวของโคแอกกูแลนต์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์
3. เกิดการดูดติดของคอลลอยด์หรือสารปนเปื้อนต่าง ๆ บนโคแอกกูแลนต์ และจะแยกตัวออกจากของเหลวด้วยการตกตะกอนหรือการลอยตัว

ซึ่งปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกิดขึ้นจะเป็นดังที่แสดงไว้ในสมการที่ (2-55) ถึง (2-66) โดยในกรณีที่ใช้ขั้วเหล็กจะเกิดการฟอรัมตัวของสารประกอบเชิงซ้อนของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ไฮดรอกไซด์หลายชนิด ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอช โดยสารประกอบเชิงซ้อนเหล่านั้น ได้แก่ $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$, FeOH^{2+} , $\text{Fe}_2(\text{OH})_2^{4+}$, $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$, $\text{Fe}(\text{OH})_6^{3-}$, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_2^{3+}$, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5\text{OH}^{2+}$, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_4(\text{OH})_2^+$, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_8(\text{OH})_2^+$, $\text{Fe}_2(\text{H}_2\text{O})_6(\text{OH})_4^{2+}$ ซึ่งจะเปลี่ยนเป็น $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ในที่สุด (Mollah และคณะ, 2001 และ Kobya, Can และ Bayramoglu, 2003)

สำหรับในกรณีที่ใช้ขั้วอลูมิเนียมจะเกิด $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$, $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$, $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอช และจะเปลี่ยนเป็น $\text{Al}(\text{OH})_3$ ในที่สุด (Kobya, Can และ Bayramoglu, 2003)

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไฟฟ้าเคมี

2.5.2.1 พีเอช

ค่าพีเอชเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยปกติพีเอชของสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเปลี่ยนแปลงระหว่างการดำเนินการ โดยความเปลี่ยนแปลงนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้และพีเอชเริ่มต้น

2.5.2.2 ค่าความนำไฟฟ้า

ค่าความนำไฟฟ้าในน้ำเสียสามารถปรับแต่งได้โดยการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เช่น โซเดียมคลอไรด์และโซเดียมซัลเฟตลงในน้ำเสีย ค่าความนำไฟฟ้ามีผลโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย และมีผลต่อปริมาณประจุที่ปล่อยออกมา ตามทฤษฎีของฟาราเดย์ที่ว่า 1 ฟาราเดย์ของประจุที่ผ่านเข้าวงจรจะระดมเนียมออกจากขั้วไฟฟ้า 9 กรัม ซึ่งถ้าจำนวนประจุมากขึ้นก็จะทำให้มีออกซิเจนหรือเหล็กหลุดออกมาจากขั้วไฟฟ้ามากเพียงพอที่จะทำให้โลหะไฮดรอกไซด์ตกตะกอนได้มากขึ้น ในกระบวนการไฟฟ้าเคมีจะใช้ไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งมีการเคลื่อนที่หรือการไหลของอิเล็กตรอนในทิศทางเดียว โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากจุดที่เป็นประจุลบไปสู่จุดที่เป็นประจุบวก โดยความต่างศักย์ไฟฟ้าจะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า และในวงจรไฟฟ้าจะมีสิ่งต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า เรียกว่า ความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งในเซลล์ไฟฟ้าเคมีก็คือความต้านทานกระแสไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์นั่นเอง โดยความต่างศักย์ กระแสไฟฟ้าและความต้านทานไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กันตามกฎของโอห์ม สามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$V = IR \quad (2-67)$$

เมื่อ V แทนความต่างศักย์ไฟฟ้าในหน่วยโวลต์
 I แทนกระแสไฟฟ้าในหน่วยแอมแปร์
 R แทนความต้านทานไฟฟ้าในหน่วยโอห์ม

ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับความนำไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ตามสมการ (2-68)

$$R = \frac{l}{CA} \quad (2-68)$$

เมื่อ R แทนค่าความต้านทานไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ในหน่วยโอห์ม
 l แทนระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ในหน่วยเซนติเมตร
 C แทนค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ในหน่วยโมห์หรือซีเมน
 A แทนพื้นที่หน้าตัดของขั้วอิเล็กโทรดที่สัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ในหน่วยตารางเซนติเมตร

ซึ่งค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะของสารละลายอิเล็กโทรไลต์สามารถหาได้จากการวัดด้วย เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity meter)

2.5.2.3 ขั้วไฟฟ้า (electrodes)

ขั้วไฟฟ้าที่นิยมใช้ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีมีอยู่ 3 ชนิด คือ

1) อลูมิเนียม (Aluminium)

เป็นโลหะหมู่เดียวกับแกลเลียม, อินเดียม และเทลลูเรียม อลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีมากที่สุดบนผิวโลก อลูมิเนียมจัดว่าว่องไวสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะอื่นๆได้ อลูมิเนียมมีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +3 เมื่อโลหะให้อิเล็กตรอนออกไป 3 อิเล็กตรอน Al^{+3} มีขนาดเล็กมาก ไฮดรอกไซด์ของอลูมิเนียมไม่ละลายน้ำ ออกไซด์และไฮดรอกไซด์ของอลูมิเนียมมีสมบัติเป็นแอมโฟเทอริก

2) เหล็กกล้า (Steels)

เป็นโลหะแข็งมีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูง มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาปานกลาง เหล็กกล้าจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ เหล็กกล้าคาร์บอน และเหล็กกล้าผสม สารประกอบของเหล็กจะมีเลขออกซิเดชัน +2 และ +3 เลขออกซิเดชันสูงๆมีบ้างแต่ไม่เสถียรและเป็นออกซิไดเซอร์อย่างแรง ถ้าทิ้งไว้ในอากาศที่มีความชื้นมักจะกลายเป็นสนิมที่ผิว เรียกว่าสนิมเหล็ก ดังนั้นเครื่องมือเครื่องใช้ที่ทำด้วยเหล็กจะต้องป้องกันด้วยการทาสีเคลือบกันสนิมหรือผสมโลหะบางอย่างลงไป เมื่ออยู่ในสารละลายเหล็กมักอยู่ในรูปของ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ปนกันเนื่องจาก Fe^{2+} ถูกออกซิไดซ์โดยอากาศได้ง่าย โดยเฉพาะในสภาวะเป็นกลางหรือเป็นเบส สารประกอบที่ปราศจากน้ำของ $Fe(II)$ ไม่มีสี แต่ถ้ามีน้ำหรืออยู่ในสารละลายจะมีสีเขียวอ่อนของไอออน $Fe(H_2O)_6^{2+}$ สารประกอบ $Fe(III)$ มักมีสมบัติเป็นกรดมากกว่าของ $Fe(II)$ และพบว่าไอออนเชิงซ้อนของ $Fe(III)$ จะทำให้ได้สารละลายสีเหลือง (กัณฑมาศ สุทธิเรืองวงศ์, 2539)

3) เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel)

จัดอยู่ในประเภทของเหล็กกล้าผสม ธาตุผสมที่สำคัญคือ โครเมียมซึ่งจะมีตั้งแต่ 11 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป โครเมียมที่อยู่ในเนื้อเหล็กกล้าจะทำให้เกิดฟิล์มโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ซึ่งมีเสถียรภาพสูงอยู่ที่ผิวของเหล็กกล้า ป้องกันไม่ให้เกิดออกซิเดชันกับเหล็กซึ่งอยู่ภายในเหล็กกล้าไร้สนิม ให้คุณสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อนและผิวมีความมันเงาแวววาว

โดยเหล็กกล้าไร้สนิมที่นำมาใช้ในงานนี้เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทเฟอร์ริติก เพราะเป็นเหล็กกล้าที่มีความเหนียวหยุ่น ทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมีได้

2.5.3 ปัจจัยที่ต้องควบคุมของเซลล์ไฟฟ้าเคมี

ทิศทางของไอออนและกระแสไฟฟ้าที่ไหลในเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะขึ้นอยู่กับ การควบคุม ดังนี้ (ปริเมษ เจริญนพคุณ, 2545)

1. ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะมีสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบ
2. การเคลื่อนที่ของประจุไอออน ความสามารถของไอออนที่นำกระแสไฟฟ้าจะขึ้นกับ ประจุบนไอออนและขนาดของไอออน
3. การเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิของสารละลาย โดย ความสามารถในการเคลื่อนที่จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 2 ต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส
4. พื้นที่สัมผัสของขั้วอิเล็กโทรด ผิวสัมผัสของขั้วอิเล็กโทรดที่ใหญ่จะดีสำหรับการถ่าย และรับอิเล็กตรอน โดยที่กระแสไฟฟ้าจะมีสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วอิเล็กโทรด
5. ระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรด จำนวนกระแสไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับระยะทางที่ไอออน เคลื่อนที่จากขั้วอิเล็กโทรด ระยะห่างน้อยกระแสไฟฟ้าก็จะเพิ่มขึ้น
6. จำนวนประจุของไอออนจะมีมากขึ้น เมื่อมีการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้ามากขึ้น
7. ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เนื่องจากค่าความนำไฟฟ้าจะมีสัดส่วน โดยตรงกับ ความเข้มข้นของสารนั้น

2.5.4 หลักการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมี

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการไฟฟ้าเคมีมีหลายแบบ ขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่จะ ประยุกต์ใช้ โดยมีหลักในการออกแบบดังนี้

1. ควรออกแบบให้ง่ายที่สุด ค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด ถ้าเป็นไปได้ควรหลีกเลี่ยงการออกแบบ ที่มีการกวนผสมหรือการไหลของสารละลาย
2. ต้องสามารถเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีได้อย่างสมบูรณ์ก่อนที่จะผ่านสู่ขั้นตอนอื่นๆ ใน กรณีที่มีกระบวนการอื่นนอกจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีเข้ามาเกี่ยวข้อง ควรทำแยกจาก กระบวนการไฟฟ้าเคมี
3. เมื่อจำเป็นต้องมีการกวนผสมหรือการไหลของสารละลาย ต้องพิจารณาการถ่ายเท มวลสารเป็นอันดับแรก เช่น การกวนผสมอาจจะต้องใช้แผ่นกั้นหรือใบพัด
4. ควรออกแบบให้มีการกระจายความต่างศักย์ไฟฟ้าสม่ำเสมอทั่วพื้นผิวของขั้ว อิเล็กโทรด

5. ควรออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดน้อย เพราะระยะห่างยิ่งมากจะต้องใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงซึ่งจะทำให้ค่าไฟฟ้าสูงขึ้นด้วย

6. ในการเลือกวัสดุที่จะนำมาทำถังปฏิกรณ์นั้น ต้องคำนึงถึงสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่จะผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น โดยวัสดุที่จะนำมาใช้ต้องสามารถคงทนไม่สึกกร่อนภายใต้สภาพการใช้งาน

7. การเลือกวัสดุที่ใช้ทำขั้วอิเล็กโทรดนั้นต้องคำนึงถึงปฏิกิริยาเคมีที่จะเกิดขึ้น โดยให้สอดคล้องกับความต้องการของระบบและปฏิกิริยาข้างเคียงที่อาจเกิดขึ้นได้ เช่น แกร์ไฟต์ไม่นิยมนำมาทำขั้วอิเล็กโทรดเนื่องจากถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายด้วย CO_2 และราคาแพง เป็นต้น

Mollah และคณะ (2001) ได้สรุปข้อดีและข้อเสียของกระบวนการไฟฟ้าเคมีไว้ดังนี้

ข้อดี :

1. จัดหาอุปกรณ์ได้ง่าย, ดำเนินการง่าย

1. น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจะรสชาติดี ใส ไม่มีสี และไม่มีกลิ่น

2. สลัดจ์ที่ได้จะตกตะกอนง่ายและดึงน้ำออกได้ง่าย เพราะเป็นไฮดรอกไซด์และออกไซด์ของโลหะ และยังให้ปริมาณสลัดจ์น้อย

3. ฟล็อกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะคล้ายกับฟล็อกที่เกิดจากการตกตะกอนทางเคมี แต่จะมีขนาดใหญ่กว่า มีน้ำล้อมรอบน้อยกว่า ทนต่อการรบกวนและมีเสถียรภาพมากกว่า สามารถแยกออกโดยการกรองได้ง่าย

4. น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีนี้จะมี TDS เหลือน้อยกว่าการตกตะกอนทางเคมี ถ้านำน้ำกลับไปใช้ใหม่ (reuse) จะเสียค่าใช้จ่ายในการนำกลับ (recovery) น้อยกว่า

5. กระบวนการนี้ใช้ได้กับอนุภาคขนาดเล็ก เพราะสามารถปรับแต่งสนามไฟฟ้าเพื่อช่วยให้อนุภาคเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น ซึ่งจะเป็นผลดีต่อการรวมตะกอน

6. ไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมี ไม่เกิดปัญหาจากการปรับสภาพ (neutralization) สารเคมีส่วนเกินและไม่เกิดสารปนเปื้อนที่ไม่ต้องการอื่นๆ เนื่องจากการเติมสารเคมีส่วนเกินเหมือนที่ใช้ในกระบวนการตกตะกอนทางเคมี

7. ฟองอากาศที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสสามารถพาเอาสารปนเปื้อนให้ลอยขึ้นสู่ผิวสารละลายทำให้ง่ายต่อการรวบรวมและกำจัดออก

8. กระบวนการอิเล็กโทรไลซิสที่เกิดในเซลล์ไฟฟ้าเคมีถูกควบคุมด้วยไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว จึงไม่ต้องการการบำรุงรักษามากนัก

9. สามารถใช้กระบวนการนี้ได้ในพื้นที่ห่างไกลไม่มีไฟฟ้าเนื่องจากสามารถประยุกต์ใช้กับพลังงานแสงอาทิตย์ได้ง่าย

- ข้อเสีย :**
1. เนื่องจากมีการละลายของขั้วอิเล็กโทรดลงสู่สารละลายจึงต้องมีการเปลี่ยนขั้วใหม่
 2. การใช้กระแสไฟฟ้าในบางสถานที่อาจมีค่าใช้จ่ายสูง
 3. ฟิล์มที่เกิดขึ้นบนผิวของขั้วแคโทดจะทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการไฟฟ้าเคมีลดลง
 4. น้ำเสียที่จะนำมาใช้ต้องมีค่าความนำไฟฟ้าสูง
 5. ไฮดรอกไซด์ลักษณะคล้ายฟุ้งที่เกิดขึ้นบนขั้วอาจละลายน้ำได้ในบางกรณี

2.5.5 ทบทวนเอกสารการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไฟฟ้าเคมี

วรรณวรรณ เทียงวรรณกานต์ (2546) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียสีย้อมรีแอกทีฟโดยใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการตกตะกอนทางเคมี โดยแปรเปลี่ยนชนิดของขั้วไฟฟ้าเป็นเหล็ก อลูมิเนียมและสแตนเลส ค่าความต่างศักย์ 10 20 และ 30 โวลต์ เวลาเก็บกัก 0.5 – 3 ชั่วโมง ขนาดพื้นที่หน้าตัด 0.5 x 6.5 ถึง 11 x 6.5 ตร.ซม. ค่าพีเอช 3 6 7 และ 10 และค่าความนำไฟฟ้าเท่ากับ 7.2 และ 72 mS/cm. ซึ่งเท่ากับค่าความนำไฟฟ้าของน้ำเสียรวมและน้ำเสียจากหม้อย้อม พบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ การใช้ขั้วไฟฟ้าขนาด 3 x 6.5 ซม.ขึ้นไป ใช้ความต่างศักย์ 30 โวลต์ เวลาเก็บกัก 1.5 ชั่วโมง ถ้าไม่ปรับความนำไฟฟ้า แต่ถ้าปรับความนำไฟฟ้าเป็น 7.2 mS/cm. จะใช้ความต่างศักย์ 6.4 โวลต์และเหลือเวลาเก็บกักเพียง 30 นาที และพบว่าเมื่อใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวก็สามารถกำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงไม่จำเป็นต้องใช้การตกตะกอนทางเคมีร่วมด้วย เมื่อนำไปทดลองบำบัดกับน้ำเสียจริงซึ่งเป็นน้ำเสียรวมและน้ำเสียจากหม้อย้อม พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากับ 85 และ 98% ขึ้นไป

Koby, Can และ Bayramoglu (2003) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยใช้ขั้วเหล็กและอลูมิเนียมจากผลการทดลองพบว่าในกรณีที่ใช้ขั้วอลูมิเนียม พีเอชสุดท้ายที่ได้จะสูงขึ้นถ้าพีเอชเริ่มต้นต่ำกว่า 8 และจะให้ผลตรงข้ามถ้าพีเอชเริ่มต้นสูงกว่า 8 ส่วนกรณีที่ใช้ขั้วเหล็กพีเอชสุดท้ายจะสูงกว่าพีเอชเริ่มต้นเสมอ สำหรับอิทธิพลของพีเอชเริ่มต้นที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและความขุ่น พบว่าในกรณีที่ใช้ขั้วอลูมิเนียม ที่พีเอชเริ่มต้นน้อยกว่า 6 ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นจะมากกว่า 98% และประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีจะอยู่ระหว่าง 61-65% ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดจะลดลงเมื่อพีเอชเริ่มต้นมากกว่า 6 ในกรณีที่ใช้ขั้วเหล็ก ถ้าพีเอช

เริ่มต้นอยู่ระหว่าง 3-7 จะกำจัดความขุ่นและซีโอดีได้ 75-98 % และ 47-77 % ตามลำดับ และจะลดลงเหลือ 87 % และ 26 % เมื่อพีเอช มากกว่า 10 สำหรับอิทธิพลของพีเอชที่มีต่อการใช้พลังงานไฟฟ้า พบว่าเมื่อใช้ขั้วเหล็กจะใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าขั้วอลูมิเนียมมากกว่า 90 % ส่วนการสูญเสียของขั้วอิเล็กโทรดที่พีเอชต่างๆ พบว่าในช่วงพีเอชเดียวกันขั้วที่ทำจากเหล็กจะมีการสูญเสียน้อยกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเหล็กมีประสิทธิภาพดีกว่าอลูมิเนียมในการกำจัดซีโอดี เนื่องจากกลไกในการกำจัดซีโอดีที่แตกต่างกัน และยังพบว่าเมื่อค่าความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะทำให้การสูญเสียในขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองชนิดลดลง

Larue และคณะ (2003) ศึกษาการตกตะกอนอนุภาคลาเท็กซ์ในสารแขวนลอยด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีและการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีจะใช้ FeCl_3 และ FeSO_4 เป็นโคแอกกูแลนต์ ส่วนกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าจะใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด จากผลการทดลองพบว่าค่าความนำไฟฟ้ามีผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้า ถ้าค่าความนำไฟฟ้าของสารแขวนลอยสูงขึ้นก็จะใช้พลังงานไฟฟ้าลดลง สำหรับอิทธิพลจากความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้า พบว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าต่ำก็ไม่ได้ทำให้ความสามารถในการตกตะกอนลดลง แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าให้มากขึ้นจะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการตกตะกอนทางเคมีและการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า พบว่าการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าจะทำให้ค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้น ฟล็อกของ $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ที่เกิดขึ้นจะมีสีเขียวและเป็น species หลักเนื่องจากทำการทดลองในช่วงพีเอช 6.6 – 9.8 ส่วนฟล็อกที่ได้จากการตกตะกอนทางเคมีด้วย FeCl_3 จะมีสีส้มของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ และเริ่มตกตะกอนที่พีเอช 3 ส่วนฟล็อกที่ได้จากการใช้ FeSO_4 จะเริ่มตกตะกอนที่พีเอช 6.5-7 พบว่าฟล็อกที่ได้จากการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าจะมีความหนาแน่นมากกว่า มีขนาดใหญ่กว่าและมีปริมาณตะกอนน้อยกว่าฟล็อกที่ได้จากการตกตะกอนทางเคมี ซึ่งทั้งสองวิธีจะตกตะกอนได้ฟล็อกขนาดใหญ่ที่พีเอชเป็นกลางหรือต่าง เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองจึงสรุปได้ว่ากระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าสามารถประยุกต์ใช้กับสารแขวนลอยของอนุภาคลาเท็กซ์ได้ดีและมีประสิทธิภาพสูงกว่าการตกตะกอนทางเคมีแบบเดิม เนื่องจากตกตะกอนได้ดีกว่าและนำไปกรองได้ง่ายกว่า นอกจากนี้ปริมาณตะกอนที่ได้ยังน้อยกว่า

Walter และ Chihpin (2005) ศึกษาการกำจัดอนุภาคซิลิกาจากน้ำเสีย chemical-mechanical-planalization (CMP) ซึ่งประกอบไปด้วยอนุภาคซิลิกาขนาด 45 นาโนเมตร ซีตาโพเทนเชียลที่พีเอช 9.5 เท่ากับ -55 mv พบว่าค่าความขุ่นคงเหลือจะลดลงเมื่อเพิ่มเวลากักเก็บน้ำ (HRT) หรือปรับค่าความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้า ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นที่ได้มากกว่า 95% จากการทดลองพบว่าเมื่อพีเอชของสารแขวนลอยเพิ่มขึ้นค่าซีตาโพเทนเชียลจะ

ลดลง ในขณะที่เดียวกันขนาดของอนุภาคจะลดลงด้วย ส่วนความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารแขวนลอย ความขุ่นและค่าความนำไฟฟ้าจะแปรผันตามกัน และยังพบว่าเมื่อปริมาณประจุ (charge loading) ต่ำ Fe^{2+} ที่ออกมาจากขั้วจะไม่มากพอที่จะทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ ทำให้การกำจัดมีประสิทธิภาพต่ำ และเมื่อใช้ความเข้มกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นหรือใช้เวลาในการเก็บกักนานขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงขึ้น