

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์



อุตสาหกรรมสิ่งทอมีบทบาทสำคัญยิ่งต่อเศรษฐกิจไทย เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดการจ้างงานและสร้างรายได้จากการส่งออกให้กับประเทศไทย ปัจจุบันอุตสาหกรรมดังกล่าวได้ขยายตัวมากขึ้นตามความต้องการของตลาด อุตสาหกรรมสิ่งทอในประเทศไทยมีกระบวนการผลิตที่ครบวงจรตั้งแต่การผลิตเส้นด้ายไปจนถึงการผลิตเสื้อผ้าสำเร็จรูป ก่อนที่จะผลิตเป็นเสื้อผ้าสำเร็จได้นั้นจะต้องมีการนำเส้นด้ายมาผลิตเป็นผ้าผืนเสียก่อน ในการทำผ้าผืนมีหลายกระบวนการด้วยกัน กระบวนการที่นิยมใช้คือกระบวนการทอผ้า เทคโนโลยีในปัจจุบันนั้นทำให้การทอผ้ามีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นแต่ก็ทำให้เกิดของเสียมากเช่นกัน เช่น น้ำเสีย จึงต้องมีการบำบัดก่อนปล่อยสู่ธรรมชาติ

2.1 กระบวนการทอผ้า

2.1.1 การทอ⁽⁴⁾

ลักษณะของผ้าทอจะประกอบไปด้วยด้าย 2 หมู่ หมู่หนึ่งซึ่งไปตามยาวของผ้า เรียกว่าด้ายยืน (Warp) อีกหมู่หนึ่งขัดเส้นด้ายยืนเป็นมุมฉาก ทำให้เป็นผืนได้ เรียกว่า ด้ายพุ่ง (Filling หรือ Weft) เวลาทอเมื่อสอดด้ายพุ่งแต่ละเส้น ต้องสอดให้ออกมาจนถึงเส้นริมสุดของด้ายยืนแล้วจึงกลับสอดเข้าไปใหม่ ทำให้มีริมผ้าเป็นเส้นตรงทั้งด้านยืนและด้านพุ่ง แนวเส้นตรงที่ด้ายทั้งสองหมู่ขัดกัน เรียกว่า เกรน (Grain)

ขนาดกว้างของผ้าที่นิยมผลิตกันมากในเวลานี้ คือ

ผ้าฝ้าย กว้าง 90-100 เซนติเมตร

ผ้าขนสัตว์ กว้าง 120-150 เซนติเมตร (ผ้าใยสังเคราะห์)

ผ้าไหม กว้าง 72-105 เซนติเมตร (ผ้าใยสังเคราะห์)

และผ้าขนาดกว้างพิเศษเพื่อประโยชน์เฉพาะอย่าง เช่น ผ้าปูที่นอน พรหม ผ้าหมอนนอน ม่าน หน้าต่าง

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องทอมี 3 อย่างได้แก่ ฟันหวี ตะกอล และกระสวย และมีเครื่องประกอบอื่นๆ ได้แก่ เครื่องประกอบด็อบบี้ (Dobby) เครื่องประกอบสวิฟเวล (Swivel) และเครื่องประกอบคู๊ป (Doup) ที่ทำให้ทอได้รวดเร็วและสวยงามยิ่งขึ้น

1. พันหวี (Weed) ภาษาไทยแท้เรียกว่า ฟืม ใช้โลหะเป็นซี่เล็กๆ ให้อยู่ห่างกันตามความต้องการ สมัยโบราณทำด้วยไม้ไผ่ผูกด้วยเชือก แล้วขนาบด้วยกรอบไม้จริงแต่ละช่องจะให้เส้นด้าย ยืนสอดเข้าไปหนึ่งเส้น เป็นการจัดเส้นด้ายยืนให้อยู่ห่างกันตามความละเอียดของผ้า

2. ตะกอล (Harness) คือส่วนที่ใช้สอดด้ายเป็นด้ายยืน และแบ่งด้ายยืนออกเป็นหมู่ๆ ตามต้องการ เพื่อที่จะพุ่งกระสวยเข้าหากันได้สะดวก ตะกอลมีอยู่ 2 อัน แต่ละอันเวลา สอดด้ายต้องสอดสลับกันไปเส้นหนึ่งเส้นหนึ่ง ที่ตะกอลจะมีเชือกผูกแขวนไว้กับด้านบน โดยผูก เชือก เส้นเดียวสามารถจะเลื่อนไปมาได้ ส่วนล่างผูกเชือกติดกับคานเหยียบหรือตีนเหยียบไว้ เพื่อ เวลาต้องการดึงด้ายให้เป็นช่องก็ใช้เท้าเหยียบคานเหยียบนี้ คานเหยียบจะเป็นตัวดึงตะกอลให้เลื่อน ขึ้นลง ถ้าหากต้องการทอเป็นลายๆ ก็ต้องใช้คานเหยียบหลายอัน เช่น ลายสองใช้คานเหยียบ 4 อัน เรียก ทอ 4 ตะกอล ลายสามใช้คานเหยียบ 6 อัน เรียก ทอ 6 ตะกอล จำนวนตะกอลที่ช่างทอผ้า เกาะยอใช้ มีตั้งแต่ 2-12 ตะกอล ผ้าผืนใดที่ทอหลายตะกอลถือว่ามีคุณภาพดีมีลวดลายที่ละเอียด สวยงาม และมีราคาแพง

3. กระสวย คือไม้ที่เป็นรูปเรียวยาวตรงปลายทั้งสองข้าง ตรงกลางใหญ่ และมีร่องสำหรับ ใส่หลอดด้ายพุ่ง ใช้สำหรับพุ่งสอดไปในช่องด้ายยืนระหว่างการทอผ้า หลังจากที่ช่างทอเหยียบ คาน เหยียบให้ตะกอลแยกเส้นด้ายยืนแล้ว

ส่วนประกอบอื่นๆ มีหลอดม้วนด้ายยืน หลอดม้วนผ้า และเครื่องยกตะกอลเหล่านี้เป็นส่วนประกอบของเครื่องทอผ้าธรรมดา จะใช้ทอได้แต่ผ้าลายเบื้องต้น 3 ลายเท่านั้น คือ ทอลายขัด (Plain weave) ทอลายสอง (Twill weave) และทอตัวน (Satin weave)

เมื่อต้องการให้มีลวดลายในเนื้อผ้าจะต้องมีเครื่องประกอบพิเศษช่วย หรือมีฉะนั้นก็ใช้ เครื่องทอยกคดอก (Jacquard)

เครื่องประกอบพิเศษ (Attachment) เครื่องนี้จัดทำขึ้นเป็นพิเศษสำหรับติดเข้ากับเครื่อง ทอธรรมดาช่วยยกตะกอลแยกด้ายยืนออกเป็นหมวดหมู่ แต่ละเครื่องจะยกตะกอลได้ตามที่กำหนดไว้ เท่านั้น ที่ใช้กันมากมี 3 ชนิด

- เครื่องประกอบด็อบบี้ ใช้ยกตะกอลได้ 25 ตะกอล เวลาทอผ้าที่มีลวดลายเล็กๆ เช่น ลาย ตัวนในผ้าทอธรรมดา
- เครื่องประกอบสวิฟเวล ใช้สำหรับทอผ้าที่มีจุดในเส้นด้ายในผ้าทอธรรมดา เช่น ผ้าปานจุด
- เครื่องประกอบด็ูป ใช้สำหรับยกเส้นด้ายยืนให้ข้ามไขว้กันได้เอง ใช้สำหรับทอผ้าก๊อช แบบเลนหรือผ้าโปรง

เครื่องทอยกคดอกเป็นเครื่องทอแบบพิเศษ ด้ายยืนแต่ละเส้นมีตะกอลของตัวเองจะแยกยก ครั้งละกี่เส้นก็ได้ ลวดลายที่ใช้ทอจะเป็นลวดลายที่สวยงามขนาดใหญ่และต่อเนื่อง มีอุปกรณ์

สำหรับแยกยกเส้นด้ายยืนเป็นเชือกผูกต่อกับลวดตะกอกและตุ้มน้ำหนัก ลวดลายเจาะเป็นรูปบนกระดาษแข็ง กระดาษแต่ละแผ่นควบคุมการแยกเส้นด้ายยืนเพื่อสอดด้ายพุ่งเพียงเส้นเดียว กระดาษแข็งเจาะนี้จะผูกตอเนื่องกันเป็นวงกลมหลายสิบแผ่นจนกว่าจะครบรอบวงจรของลาย ปัจจุบันเครื่องทอบางแบบใช้เป็นแผ่นกระดาษยาวแผ่นเดียวเจาะรูจนครบวงจรของลายแล้วจึงผูกติดกันเป็นวงกลม การสับด้ายยืนต้องทำด้วยมือทั้งหมด เสียเวลามาก บางลายใช้เวลาหลายเดือนแต่เวลาทอจะทอได้เร็วเหมือนเครื่องทอธรรมดา

เนื่องจากเครื่องทอมีกระสวยทอได้ช้า แม้จะปรับปรุงให้กลวิธีสอดกระสวยทำได้เร็วขึ้น แต่ยังคงมีขั้นตอนมากตามเคย การวิจัยเพื่อพัฒนาการทอผ้าให้เร็วขึ้น จึงมุ่งไปในทางเครื่องทอไม่มีกระสวย ปัจจุบันมี 3 แบบ

1. เครื่องทอผ้าแบบด้ายพุ่ง (Water-jet loom) ใช้น้ำที่มีความดันสูงเป็นตัวขับเคลื่อนให้ด้ายพุ่งสอดเข้าไปในด้ายยืนแบบต่อเนื่อง ด้ายพุ่งและด้ายยืนต้องไม่ดึงให้ตึงจนเกินไป ด้ายพุ่งใช้ทั้งที่เป็นม้วนใหญ่จัดวางไว้ข้างๆเครื่องทอ ส่งผ่านเข้าอุโมงค์รูปกรวยรูปกลองสำหรับควบคุมความยาวของด้ายพุ่งส่งผ่านเข้าไปในช่องของอุปกรณ์รูปแตร (Nozzle) น้ำจะขับเคลื่อนด้ายพุ่งให้สอดเข้าไปในระหว่างด้ายยืน เมื่อกระทบพื้นผิวให้ด้ายพุ่งแน่นแล้วด้ายพุ่งจะถูกตัดออก ถ้าเป็นด้ายใยสังเคราะห์จะถูกตัดโดยใช้โลหะร้อน ใช้เป็นริมผ้าได้

น้ำที่ใช้ส่งด้ายพุ่งนี้จะทำให้ผ้าเปียก จะถูกดูดออกโดยเครื่องซักชั้นทำให้ผ้าแห้ง กระบวนการเช่นนี้จะเพิ่มต้นทุนการผลิตขึ้นอีก ยิ่งไปกว่านั้นน้ำนี้จะทำให้แป่งที่ลงเส้นด้ายยืนไว้อ่อนตัว บางครั้งจะละลายหลุดออก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกสารลงแป่งที่ทนน้ำได้พอสมควร แต่ต้อง ซักออกได้ง่าย ผ้าที่ทอจากเครื่องทอนี้จะมีเนื้อเรียบแน่นและสม่ำเสมอ นอกจากนี้เครื่องทอ ยังมีขนาดกระทัดรัด ไม่เกะกะและไม่เปลืองเนื้อที่ ทำงานเงียบ ทอเร็วมากประมาณนาที่ละ 400-600 เส้น การซ่อมแซมและบำรุงรักษาเครื่องทำได้ง่าย

2. เครื่องทอแบบ Air-jet ประดิษฐ์โดยวิศวกรสิ่งทอชาวสวีเดน กระบวนการเชิงกลแรกๆ เหมือนกับเครื่องทอผ้าแบบด้ายพุ่ง เมื่อเส้นด้ายผ่านช่องออกมาแล้วจะถูกลมผลัดส่งเข้าไปสอดระหว่างด้ายยืน เครื่องทอผ้าแบบนี้ทอได้เร็วนาทีละ 320 เส้น และได้ผ้าหน้าไม่กว้างจนเกินไปนัก เพราะแรงลมจะสูญหายไปในการส่งด้ายจากริมถึงริม

3. เครื่องทอผ้าไม่มีกระสวยแบบ Repair เหมาะสำหรับการทอด้ายใยสั้น ทอได้นาทีละ 300 เส้น มีอุปกรณ์สำหรับจับด้ายพุ่ง ทำด้วยเหล็กไม่เป็นสนิมอยู่ที่ริมผ้าทั้งสองด้าน พร้อมกับอุปกรณ์สำหรับตัดด้ายพุ่งตามขนาดกว้างของผ้า อุปกรณ์สำหรับจับด้ายพุ่งจะพบกันที่กึ่งกลางของเครื่องทอ อุปกรณ์จับด้ายพุ่งด้านซ้ายจะส่งเส้นด้ายให้อุปกรณ์ด้านขวาแล้วดึงให้ด้ายพุ่งสอดตลอดหน้ากว้างของผ้า ตัดด้ายพุ่งที่ริมผ้าอีกด้านหนึ่งพันปลายด้ายสอดกลับเข้ากับเส้นยืนเส้นริมเพื่อให้ริมผ้าแข็งแรง เครื่องทอผ้าชนิดนี้นิยมใช้ทอผ้าฝ้ายและผ้าขนสัตว์

2.1.2 การเตรียมการทอ

เพื่อให้สามารถทำงานได้สะดวก รวดเร็วและได้ผ้าที่มีคุณภาพดี ก่อนกระบวนการทอผ้า ต้องเตรียมเส้นด้ายดังนี้

2.1.2.1 การกรอผ้า ด้ายที่ส่งมาจากโรงงานปั่นด้ายหรือซื้อมา โดยมากทำเป็นขดหรือบางที่ม้วนเป็นม้วนใหญ่ โรงงานทอผ้าต้องนำมาม้วนใหม่ ใช้หลอดเฉพาะงาน เช่น แกนด้ายพุ่งหรือแกนสำหรับสาวด้ายยืน ระหว่างการกรอนี้ต้องหมั่นตรวจดูด้วยว่า เส้นด้ายสม่ำเสมอดี ไม่มีรอยคอดที่จะทำให้ขาดเร็ว ไม่มีปมปมซึ่งจะเป็นอุปสรรคในการทอ ถ้ามีต้องเอาออกและต่อให้เรียบร้อยก่อน

2.1.2.2 การสาวด้ายยืน^[5] การจะทอผ้าหน้ากว้างเท่าไร ใช้จำนวนด้ายกี่เส้นต้องคำนวณก่อนแล้วใช้ด้ายยืนที่กรอใส่หลอดไว้จำนวนเท่ากับเส้นด้ายยืนสาวชอกมาพร้อม ๆ กัน พันใส่ม้วนด้ายยืนหรือจะแบ่งสาวออกเป็นสวน ๆ แล้วเอามารวมกันภายหลัง

2.1.2.3 การลงแบ่งด้ายยืน (Sizing) สามารถทำได้โดยการใช้แบ่งสวน ๆ หรือผสมกับสารสังเคราะห์ชนิดอื่น เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ นำมาละลายน้ำแล้วเคลือบเส้นด้ายยืนที่สับแล้วให้ทั่ว ทำให้เส้นด้ายแข็ง อยู่ตัวและทนต่อการเสียดสีของฟันหวีได้ การเลือกแบ่งหรือสารสังเคราะห์ให้ลงเส้นด้ายนี้ ต้องคำนึงถึงการตกแต่งภายหลังการทอด้วย สำคัญที่สุดคือ ต้องเป็นสารที่ล้างออกได้ง่าย

ในขณะที่เครื่องทอผ้ากำลังทำงานจะสังเกตเห็นได้ว่า เส้นด้ายยืนถูกแรงกระทำจากเครื่องทอผ้าจะทำให้เส้นด้ายขาดในขณะทอผ้า ดังนั้นจุดประสงค์ของการลงแบ่งเส้นด้ายยืน (Warp sizing) คือเพื่อลดอัตราการขาดของเส้นด้าย ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของการทอและคุณภาพของผ้าสูงขึ้น

สารที่ใช้ในการลงแบ่งด้ายยืนแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

- แบ่ง ได้แก่ สารประเภทกาวที่ได้จากแบงัธรรมชาติ เช่น แบงัมันสำปะหลัง แบงัข้าวโพด แบงัมันฝรั่งและแบงัสังเคราะห์จากสารเคมี เช่น พีวีเอ หรือพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และอะคริลิก เป็นต้น
- สารช่วยอื่นๆ ได้แก่ สารหล่อลื่นประเภทน้ำมันและไข สารป้องกันไฟฟ้าสถิตย์ สารกำจัดฟองและสารป้องกันเชื้อรา เป็นต้น

- แป้งธรรมชาติ

แป้งธรรมชาติใช้ในการลงแป้งกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีราคาถูกและมีคุณสมบัติการก่อรูปเป็นแผ่นฟิล์ม เคลือบเส้นด้ายกับเส้นด้ายได้ดีโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับโครงสร้างผ้าที่ไม่แน่นมากนัก แต่ถ้าเป็นโครงสร้างที่มีเนื้อแน่น แป้งธรรมชาติจะไม่เหมาะเนื่องจากการผสมน้ำแป้งที่มีความเข้มข้นสูงจะเหนียวมากและซึมผ่านเส้นด้ายไม่สะดวก นอกจากนี้ในขั้นตอนการไล่แป้งออกจะต้องใช้เอนไซม์เป็นตัวกำจัดแป้งออกจากเส้นด้าย ในขณะที่แป้งสังเคราะห์จากสารเคมีไม่ต้องใช้

แป้งธรรมชาติโดยทั่วไปประกอบด้วยโครงสร้าง 2 ส่วนคือ อะไมโลส (Amylose) และ อะไมโลเพกทิน (Amylopectin) สัดส่วนประมาณ 20:80 ตามลำดับ อะไมโลเพกทิน ซึ่งอยู่ส่วนรอบนอกมีสมบัติไม่ละลายในน้ำร้อน ความหนืดสูง ส่วนอะไมโลสละลายได้ดีในน้ำร้อนและมีความหนืดต่ำ

ดังนั้นเมื่อเริ่มต้นการผสมควรใช้น้ำอุณหภูมิต่ำ เพื่อให้อะไมโลเพกทินดูดซึมน้ำและค่อยๆ พองตัวด้วยการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นทีละน้อย เมื่ออุณหภูมิประมาณ 60-70 องศาเซลเซียส อะไมโลสจะเริ่มละลายในน้ำจนกระทั่งถึง 90 องศาเซลเซียส แป้งจะแตกตัวเต็มที่ในช่วงน้ำแป้งที่มีความหนืดสูงและเมื่อต้มต่อไปด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้น ความหนืดจะค่อยๆ ต่ำลงจนถึงจุดคงที่ ดังนั้นก่อนบ่มน้ำแป้งจากถังต้มส่งไปยังเครื่องลงแป้งจะต้องตรวจสอบความหนืดให้คงที่หรือที่เรียกว่า แป้งสุกเต็มที่ แป้งที่ยังไม่หนืดคงที่จะไปเคลือบเฉพาะผิวรอบนอกเส้นด้าย ไม่สามารถซึมผ่านไปในเส้นด้ายได้สะดวก

ถ้าต้มแบบฝาเปิดโดยทั่วไปเมื่อน้ำแป้งเดือดหรือมีอุณหภูมิประมาณ 97 องศาเซลเซียส ให้ต้มต่อไปอีก 40-45 นาที ถ้าเป็นถังระบบความดันสูงเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 120 องศาเซลเซียส ให้ต้มต่อไปอีก 20-25 นาที

- แป้งสังเคราะห์จากสารเคมี

แป้งสังเคราะห์จากสารเคมีที่ใช้กันแพร่หลายในการลงแป้งเส้นด้ายยืนมีอยู่ 2 ชนิด คือ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และอะคริลิก (Acrylic)

ก. พอลิไวนิลแอลกอฮอล์

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เป็นแป้งสังเคราะห์ที่ผลิตโดยกระบวนการไฮโดรไลซิสของสารพอลิไวนิลอะซิเตต ซึ่งหมู่อะซิเตตจะถูกแทนที่ด้วยไฮดรอกซิล พอลิเมอร์ที่ได้จะมีสมบัติการดูดซึมน้ำดีขึ้น

องค์ประกอบสำคัญอีกประการหนึ่งที่กำหนดสมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์คือระดับขั้นการพอลิเมอไรเซชัน (Degree of polymerization หรือ DP) โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วงระหว่าง 500-2500

ข้อดีของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีหลายประการเมื่อเทียบกับแป้งธรรมชาติหรือแป้งธรรมชาติดัดแปลงดังนี้

- ความแข็งแรงและการยึดตัวของแผ่นฟิล์มดี ช่วยลดอัตราการขาด
- ความหนืดเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ถึงแม้จะต้มและกวนไว้เป็นเวลานาน
- การไล่แป้งออกทำได้ง่าย ในขั้นตอนการฟอกขาวไม่ต้องใช้เอนไซม์

ข้อเสียของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ มีหลายประการเช่นกัน คือ

- ราคาแพงสูงกว่าแป้งธรรมชาติ 8-10 เท่า
- อาจเกิดฟองอากาศในอ่างลงแป้งและจับตัวเป็นแผ่นที่ผิวหน้าแป้ง
- แผ่นฟิล์มยึดเกาะเส้นใยแข็งแรง ก่อปัญหาการแยกเส้นด้ายภายหลังอบแห้ง
- เมื่อกำกับกับแป้งธรรมชาติและสารหล่อลื่นประเภทน้ำมัน จะไม่สามารถละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี

ข. อะคริลิก

เส้นด้ายใยสังเคราะห์ เช่น พอลิเอสเตอร์ เมื่อลงแป้งด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะพบว่าเส้นด้ายค่อนข้างกระด้าง สารอาจจะเคลือบอยู่เฉพาะรอบนอก ในขณะที่ทอผ้าจะร่วงหลุดเป็นผง เนื่องจากการยึดติดไม่ดีพอ สารอะคริลิกได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จึงได้รับความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งเส้นด้ายฟิลาเมนต์และสปีน อะคริลิกมีอยู่หลายประเภทและมีสมบัติแตกต่างกันตามชนิดเส้นด้ายที่จะลงแป้งตลอดจนภาวะความชื้นภายในห้องทอ แต่โดยทั่วไป อะคริลิกจะมีขี้ขี้ และขี้ขี้ที่เคลือบติดกันดังนี้คือ

ข้อดี

- อะคริลิกยึดเกาะกับเส้นใยได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสารลงแป้งชนิดอื่น
- แผ่นฟิล์มของสารอะคริลิกจะมีความนุ่ม เรียบ โค้งงอตัวดี
- มีการยึดตัวได้ดี
- อะคริลิกซึ่งผ่านเข้าไปภายในเส้นด้ายได้ง่ายและยึดเกาะเส้นใยระหว่างกันได้ดี
- อะคริลิกละลายน้ำได้ง่าย ใช้ร่วมกับแป้งธรรมชาติได้ดี

ข้อเสีย

- อะคริลิกเป็นสารที่ไวต่อความชื้น
- ความหนืดค่อนข้างสูง
- แผ่นฟิล์มไม่ทนต่อการเสียดสี
- ราคาแพง

● สารหล่อลื่น

ก. น้ำมัน

การใช้เบี่ยงธรรมชาติหรือเบี่ยงสังเคราะห์ เช่น พอลิไวเนลแอลกอฮอล์ และอะคริลิกยังไม่เพียงพอสำหรับการลงเบี่ยงเส้นด้าย จำเป็นต้องใช้สารช่วยตัวอื่นๆ เพื่อให้เส้นด้ายที่ผ่านการลงเบี่ยงมีสมบัติเหมาะแก่การทอผ้ายิ่งขึ้น สารตัวช่วยที่ช่วยมีบทบาทสำคัญมากตัวหนึ่ง คือ สารหล่อลื่นจำพวกน้ำมัน (Oiling agent) ผลสมลงไปในน้ำเบี่ยงโดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้คือ

- ช่วยให้แผ่นฟิล์มนุ่มและโค้งงอตัวได้ดี
- ช่วยป้องกันขนเส้นด้ายโผล่พื้นถ้าตัวเส้นด้ายเนื่องจากไฟฟ้าสถิตย์
- ลดการเสียดสีระหว่างเส้นด้ายและส่วนต่างๆ ของเครื่องทอ
- ช่วยให้เส้นด้ายยึดตัวได้ดีขึ้น

ข. ไข

ไขจะใช้เป็นสารเคลือบเส้นด้าย (Waxing agent) ที่ผ่านการลงเบี่ยงและอบแห้งแล้วจึงเรียกการเคลือบไขในขั้นตอนนี้ว่า After waxing จุดประสงค์การเคลือบจะคล้ายคลึงการใช้น้ำมันผลสมลงในน้ำเบี่ยง แต่ถ้าผลสมมากไปจะมีข้อเสีย คือ ไม่สามารถละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกับเบี่ยงหรือพอลิไวเนลแอลกอฮอล์ จึงควรใช้ในอัตราส่วนที่น้อย ดังตัวอย่างสูตรเบี่ยงประมาณ 0.2-0.8 กก. ต่อน้ำเบี่ยง 100 ลิตร ส่วนปริมาณไขเคลือบเส้นด้ายที่เหมาะสมคือ ประมาณร้อยละ 0.2-0.3 ของน้ำหนักเส้นด้าย

การควบคุมปริมาณไขติดไปกับเส้นด้าย ทำได้ดังนี้

- ปรับความเร็วลูกกลิ้งในรางใส่ไข หรือที่เรียกว่า รางเทียน ถ้าลูกกลิ้งหมุนเร็วไขจะติดไปมาก ถ้าหมุนช้าไปไขจะติดน้อย
- อุณหภูมิในรางเทียนที่เหมาะสมคือ 85 + 2 องศาเซลเซียส เป็นระดับที่ความหนืดไขคงที่ ถ้าอุณหภูมิต่ำความหนืดจะสูง ไขจะติดเส้นด้ายมาก
- มุมเส้นด้ายที่สัมผัสกับลูกกลิ้งในรางเทียน มุมสัมผัสมากไขจะติดไปมาก มุมสัมผัสน้อยไขจะติดไปน้อย
- ระดับไขในราง ถ้าระดับไขสูงจะติดเส้นด้ายไปมาก ระดับไขต่ำจะติดไปน้อย

ไขมีประโยชน์ต่อเส้นด้ายยืนและช่วยให้การทอผ้าดีขึ้น แต่ถ้าปริมาณมากเกินไปจะทำให้ล้างออกไม่หมดในขั้นตอนการไล่เบี่ยงและฟอกขาว เมื่อนำผ้าไปย้อมสีจะเกิดรอยต่างได้

2.1.2.4.การสอดฟันหวี ทางภาคตะวันออกเรียกวิธีปฏิบัติขั้นนี้ว่า การสับด้ายยืน เป็นการเอาด้ายยืนแต่ละเส้นสอดเข้าไปในช่องระหว่างฟันหวีหรือฟิมที่จะใช้ทอ เพื่อบังคับให้ด้ายยืน

อยู่ห่างกันตามระยะที่ต้อง การเลือกขนาดของฟิมก็สำคัญเหมือนกัน ต้องทราบด้วยว่าฟิมขนาดใด จะเหมาะกับด้ายขนาดไหน ทอแล้วจะได้ผ้าเนื้อห่าง-ถี่อย่างไร

2.1.2.5. การร้อยตะกอล หรือ การสับตะกอล คือการนำด้ายยืนร้อยเข้าไปในห่วงของตะกอล แบ่งด้ายยืนออกเป็นหมู่ จะเป็นกี่หมู่ขึ้นอยู่กับลวดลายที่ต้องการทอ

ในขั้นตอนการทอ ควรจะสอดด้ายพุ่งแต่ละเส้นนั้น ต้องปฏิบัติอย่างน้อย 3 ชั้นคือ

ชั้นที่ 1 สับตะกอลให้ด้ายยืนแยกออกจากกันเปิดเป็นช่องว่างสำหรับให้ด้ายพุ่งผ่านเข้าไปได้

ชั้นที่ 2 พุ่งกระสวยด้ายพุ่งให้สอดเข้าไปตามหว่างด้ายยืน

ชั้นที่ 3 ปล่อยตะกอลให้ด้ายยืนรวมเป็นหมู่เดียวกันตามเดิม กระทบพันหวีโดยแรง พันหวี

จะพาด้ายพุ่งให้เข้ามาชิดกันเป็นเส้นตรง

ทั้ง 3 ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ต้องปฏิบัติโดยแท้จริง แต่เพื่อให้ผ้ามีเนื้อผ้าเรียบสม่ำเสมอ กันมากขึ้นเวลาทอด้วยมือจะต้องทำอีก 2 ชั้น คือ สับตะกอลใหม่อีกครั้งหนึ่งให้ตรงกันข้ามกับชั้นที่ 1 กระทบโดยแรงอีกครั้งหนึ่ง จึงพุ่งด้ายพุ่งเส้นที่ 2 จะทำให้ได้เนื้อแน่นขึ้น

2.2 วิธีการจัดการน้ำเสีย

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอประกอบด้วยสิ่งเจือปนหรือความสกปรกหลายชนิดขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา น้ำเสียจากบ้านเรือนอาจมีเศษวัสดุขนาดใหญ่ กรวดทราย ไขมันตลอดจน สารอินทรีย์ในรูปของ สารแขวนลอยและสารปะปนอยู่ ขณะที่น้ำเสียอุตสาหกรรมจะมีสิ่งปนเปื้อน หลากหลายขึ้นอยู่กับประเภทของโรงงาน วัตถุประสงค์ตลอดจนกระบวนการผลิตที่ใช้ การจัดการ น้ำเสียเหล่านี้ส่วนใหญ่จะต้องการกระบวนการบำบัดมากกว่าหนึ่งแบบ เช่น

2.2.1 กระบวนการบำบัดทางกายภาพ (Physical Treatment Process) ^[6]

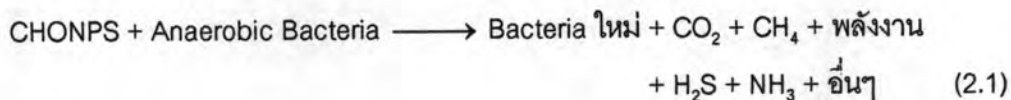
เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยแรงต่างๆ เพื่อนำไปใช้ในการแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ ออกจากน้ำเสีย โดยมากจะใช้เป็นขั้นตอนแรกของระบบบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ การดักด้วยตะแกรง (Screening) การตกตะกอน (Sedimentation) การทำให้ลอย (Flotation) การกรอง (Filtration) เป็นต้น และมีการบำบัดโดยวิธีทางกายภาพอีกขั้นตอนหนึ่ง เพื่อทำการแยกตะกอนออกจากน้ำที่ ผ่านขั้นตอนการบำบัดทางชีวภาพ อย่างไรก็ตามการบำบัดทางกายภาพเป็นเพียงขั้นเริ่มต้นในการ บำบัดน้ำเสีย ซึ่งสามารถลดความเข้มข้นของสารมลพิษได้ในระดับหนึ่ง และน้ำที่ผ่านกระบวนการ บำบัดนี้จะต้องมีการบำบัดขั้นตอนต่อไปอีกจนกระทั่งได้น้ำทิ้งที่มีสมบัติผ่านมาตรฐาน

2.2.2 กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ (Biological Process)^[7-9]

มีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดสารอินทรีย์เป็นหลัก นอกจากนี้ยังสามารถกำจัดสารอนินทรีย์บางชนิด เช่น ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสีย โดยอาศัยจุลินทรีย์ซึ่งมีอยู่ในธรรมชาติ เปลี่ยนสารอินทรีย์หรือสิ่งสกปรกให้อยู่ในรูปของแก๊สและของแข็ง (เซลล์ใหม่ของจุลินทรีย์) เพื่อแยกแ่การแยกออกจากน้ำเสียโดยกระบวนการทางกายภาพในขั้นต่อไป ทำให้ปริมาณสารอินทรีย์หรือความสกปรกในน้ำลดลงหรือหมดไป ในกระบวนการบำบัดทางชีวภาพจะเป็นการควบคุมปริมาณน้ำเสียให้สัมพันธ์กับปริมาณจุลินทรีย์และเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายให้เหมาะสม การบำบัดน้ำเสียถูกแบ่งตามลักษณะการใช้ออกซิเจนได้เป็น 2 ประเภทหลัก

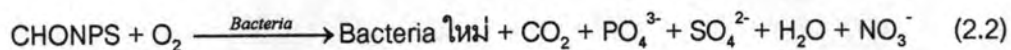
2.2.2.1 การบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Treatment Process)

เป็นการอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดที่ดำรงชีพโดยไม่ใช้แก๊สออกซิเจน ทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ ให้เปลี่ยนเป็นเซลล์ใหม่และแก๊สบางชนิด ส่วนใหญ่เป็น CO_2 และ CH_4 โดยมี H_2S และอื่นๆ ประปนมาด้วย โดยมีสารประกอบอินทรีย์บางชนิดเกิดขึ้นมาด้วย เช่น แอมโมเนีย เป็นต้น ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



2.2.2.2 การบำบัดแบบใช้อากาศ (Aerobic Treatment Process)

เป็นการอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดที่ดำรงชีพโดยใช้แก๊สออกซิเจน โดยจุลินทรีย์จะย่อยสลายสารอินทรีย์ให้กลายเป็นเซลล์ใหม่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และสารประกอบบางชนิด เช่น แอมโมเนีย หรือไนเตรต ฟอสเฟต ซัลเฟต เป็นต้น ดังปฏิกิริยา



การบำบัดทางชีวภาพจะไม่สามารถลดปริมาณของอนุมูลอิสระของไนโตรเจนได้แก่ แอมโมเนียและเกลือแอมโมเนีย และสารอนินทรีย์ต่างๆ เช่น ซัลไฟด์ และโครเมียม ให้ได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้ง

2.2.3 กระบวนการบำบัดทางเคมี (Chemical Treatment Process) ^[10,11]

กระบวนการนี้ต้องพึ่งพาสารเคมีเพื่อให้เกิดผลตามที่ต้องการ โดยจะใช้กระบวนการนี้กำจัดสารเคมีหรือสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียที่ใหม่สามารถใช้กระบวนการอื่นได้หรือได้ผลแต่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูง เช่น โลหะหนัก สารพิษ สภาพความเป็นกรด-เบสสูง ๆ การฆ่าเชื้อโรค เป็นต้น กระบวนการทางเคมีที่นำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้แก่ การสร้างและการรวมตะกอน (Coagulation and Flocculation) การตกผลึก (Precipitation) การออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction) และการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) ซึ่งกระบวนการบำบัดทางเคมีสามารถลดปริมาณของสารมลพิษได้ในระดับหนึ่ง แต่ระบบจะมีหลายชั้นและมีการใช้สารเคมีเป็นจำนวนมาก และต้องอาศัยพื้นที่เป็นบริเวณกว้างซึ่งจะทำให้เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้น น้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดนี้จะต้องมีการบำบัดขั้นต่อไปอีกหลายระบบ

2.3 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเคมีไฟฟ้า^[12]

เคมีไฟฟ้า (Electrochemistry) เป็นวิชาทางเคมี ซึ่งว่าด้วยความสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้ากับการเปลี่ยนแปลงทางเคมี โดยหลักการของเคมีไฟฟ้าได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ มากมาย เช่น การศึกษากลไกและจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาสังเคราะห์ทางสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า

2.3.1 องค์ประกอบของเซลล์เคมีไฟฟ้า (Electrochemical cell)

เซลล์เคมีไฟฟ้ามีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนคือ

1. ขั้วไฟฟ้า (Electrode) ขั้วไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นส่วนเชื่อมต่อระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และอุปกรณ์ไฟฟ้าภายนอก ขั้วไฟฟ้าแบ่งเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) หรือขั้วไฟฟ้าชี้บอก (Indicating electrode) ขั้วไฟฟ้าช่วย (Auxiliary electrode) หรือขั้วไฟฟ้าวร่วม (Counter electrode) และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) โดยขั้วไฟฟ้าใช้งานจะทำหน้าที่เป็นขั้วทดลองของเซลล์ ขั้วไฟฟ้าช่วยจะทำหน้าที่เป็นตัวช่วยส่งผ่านอิเล็กตรอนหรือกระแสไฟฟ้าไปยังขั้วไฟฟ้าใช้งาน ส่วนขั้วไฟฟ้าอ้างอิงทำหน้าที่ช่วยให้ครบวงจรของเซลล์เคมีไฟฟ้า สำหรับวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าใช้งานหรือขั้วไฟฟ้าช่วย และนิยมใช้ในระบบที่มีการวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้าเท่านั้น ลักษณะเฉพาะของขั้วไฟฟ้าอ้างอิงคือ ให้ค่าศักย์ไฟฟ้างคงที่ ไม่มีปฏิกิริยาตอบสนองต่อสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ ไม่แปรตามปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร และไม่แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ จัดเป็นขั้วไฟฟ้าแบบนอนโพลาไรซ์ในอุดมคติ (Ideal nonpolarization) โดยในการใช้งานทั่วไปจะประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าเพียง 2 ชนิดคือ

ขั้วไฟฟ้าใช้งาน และขั้วไฟฟ้าร่วม ขั้วไฟฟ้าใช้งานจะทำหน้าที่เป็นขั้วลบซึ่งเรียกว่าขั้วแคโทด และขั้วไฟฟ้าช่วยจะทำหน้าที่เป็นขั้วบวกซึ่งเรียกว่าขั้วแอโนด

2. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) คือสารละลายที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการส่งผ่านไอออนระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 โดยการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลาย

3. อุปกรณ์ไฟฟ้าภายนอก คือ อุปกรณ์ใดๆ ที่เชื่อมต่อกับขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 จากภายนอกของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยอุปกรณ์ไฟฟ้าภายนอกจะแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้า และตัวต้านทาน

2.3.2 ปฏิกิริยาในเซลล์ไฟฟ้าเคมี (Reaction in electrochemical cell)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะเกิดจากการเคลื่อนที่ของไอออนภายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะถูกเรียกว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน - รีดักชัน (ปฏิกิริยารีดอกซ์) โดยปฏิกิริยานี้จะแบ่งเป็นปฏิกิริยาย่อย คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) และปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) โดยจะเกิดที่ขั้วแอโนด และแคโทด ตามลำดับ ปฏิกิริยาจะเกิดเมื่อมีการป้อนกระแสไฟฟ้าให้ระบบโดยไอออนหรือโมเลกุลของสารที่มีค่าความสามารถในการรับอิเล็กตรอนสูงจะเข้ามารับอิเล็กตรอนที่ขั้วแคโทดเกิดเป็นปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) ซึ่งไอออนหรือโมเลกุลที่เข้ามารับอิเล็กตรอนจะถูกเรียกว่าตัวออกซิไดส์ (Oxidizing agent) ส่วนไอออนหรือโมเลกุลที่มีค่าความสามารถในการรับอิเล็กตรอนต่ำจะเสียอิเล็กตรอนที่ขั้วแอโนดเกิดเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) ซึ่งไอออนหรือโมเลกุลที่เสียอิเล็กตรอนนี้จะถูกเรียกว่าตัวรีดิวซ์ (Reducing agent)

ปฏิกิริยารีดักชัน



ปฏิกิริยาออกซิเดชัน



2.3.3 ชนิดของเซลล์เคมีไฟฟ้า (Electrochemical cell)

1. เซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic cell) เป็นเซลล์ที่ต้องให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่ต้องการในระบบ เช่น การชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า เป็นต้น

2. เซลล์กัลวานิก (Galvanic cell) เป็นเซลล์ที่ปฏิกิริยาเคมีสามารถเกิดขึ้นได้เองโดยมีการถ่ายเทอิเล็กตรอนทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า เช่น แบตเตอรี่ เซลล์เชื้อเพลิง เป็นต้น

2.3.4 ลักษณะของเซลล์เคมีไฟฟ้า (Electrochemical cell)

เซลล์ไฟฟ้าเคมีสามารถแบ่งตามลักษณะได้ 2 แบบคือ

1. เซลล์ที่ไม่แบ่งแยก (Cell without liquid junction) คือ เซลล์เคมีไฟฟ้าที่ขั้วแอโนด และแคโทดอยู่ร่วมกันในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เดียวกัน
2. เซลล์ที่แบ่งแยก (Cell with liquid junction) คือ เซลล์เคมีไฟฟ้าที่แอโนด และแคโทดไม่ได้อยู่ร่วมกันในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เดียวกัน ซึ่งจะต้องมีการเชื่อมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทั้งสองเข้าด้วยกัน โดยอาจจะเชื่อมกันด้วยเยื่อเลือกผ่าน (Membrane) หรือสะพานไอออน (Salt bridge)

2.3.5 ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้า (E°)

ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้าเป็นสมบัติทางกายภาพและเป็นสมบัติเฉพาะตัวของระบบออกซิเดชัน – รีดักชัน ค่า E° ได้จากการวัดค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วของเซลล์ซึ่งเกิดจากครึ่งเซลล์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้างดงกล่าวกับครึ่งเซลล์มาตรฐานของไฮโดรเจน และสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีแอกทิวิตี (Activity) เป็นหนึ่ง ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ถือเป็นศักย์ขั้วไฟฟ้า (เพราะศักย์ไฟฟ้าไฮโดรเจนเป็นศูนย์โวลต์) โดยศักย์ขั้วไฟฟ้านี้คือศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้า โดยลักษณะเฉพาะที่สำคัญของค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน มีดังนี้^[13]

- ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน ถือเป็นค่าศักย์มาตรฐานสัมพัทธ์ เพราะเป็นค่าที่ได้เมื่อขั้วไฟฟ้าขั้วหนึ่งของเซลล์ต้องเป็นขั้วไฮโดรเจนเสมอ
- ตามสัจนิยมของเคมีไฟฟ้า ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้าต้องได้จากการเขียนปฏิกิริยาครึ่งเซลล์เป็นแบบรีดักชันเท่านั้น ค่าศักย์ไฟฟ้าจึงจะเข้าใจได้ว่าเป็นค่าศักย์รีดักชันสัมพัทธ์ (Relative reduction potential)
- ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเป็นค่าที่ไม่แปรผันตามจำนวนโมลที่ใช้ในการปรับสมดุลของสมการครึ่งเซลล์
- ค่าศักย์ไฟฟ้าจะผันแปรไปตามอุณหภูมิ ดังนั้นค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานจะเป็นที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
- ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้า ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ จะเป็นค่าบ่งชี้ถึงความแรงของการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน คือเมื่อค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานมีค่าสูงกว่า จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ดีกว่า

ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานแสดงถึงแนวโน้มของขั้วไฟฟ้าที่จะรับอิเล็กตรอนว่ามีความสามารถมากน้อยเพียงใด หรือเรียกว่าเป็นการแสดงความสามารถในการเป็นตัวออกซิไดส์หรือตัวรีดิวซ์ เช่น MnO_4^- กับ Fe^{2+} ในสารละลายกรดพบว่า ค่า E° ของระบบ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+} = +0.77$ โวลต์ และค่า E° ของระบบ $\text{MnO}_4^-/\text{Mn}^{2+} = +1.52$ โวลต์ จะเห็นว่าระบบของ $\text{MnO}_4^-/\text{Mn}^{2+}$ มีค่า E° มากกว่าระบบ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ แนวโน้มที่จะรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่า ระบบ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ จึงเป็นตัวออกซิไดส์ที่ดีกว่า

2.3.6 ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (Electrode potential)

ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าหนึ่งๆ เป็นค่าศักย์สัมพันธ์ซึ่งนำมาหาศักย์ของขั้วไฟฟ้าได้ก็ต่อเมื่อรู้ค่าศักย์ขั้วไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้าทั้งสองของเซลล์ โดยจะสามารถคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่สภาวะมาตรฐานได้จาก

$$E^\circ_{\text{cell}} = E^\circ_{(\text{cathode})} - E^\circ_{(\text{anode})}$$

ถ้าค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้ถ้าเป็นบวกแสดงว่าวงจรเซลล์เคมีไฟฟ้างกล่าวเป็นการต่อเซลล์แบบกัลวานิก ในทางกลับกันถ้าค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้เป็นลบแสดงว่าเป็นการต่อเซลล์แบบอิเล็กโทรไลติก

2.3.7 หลักการอุณหพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้าที่ไหลระหว่างขั้วไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำ การผลักดันให้ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในวงจรจะทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าขึ้นงานที่เกิดขึ้นเป็นการลดค่าพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs free energy) ที่อยู่ในเซลล์ไฟฟ้า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เป็นแบบผันกลับได้ (Reversible reaction) ดังนั้นจึงมีค่าพลังงานอิสระของกิบส์คือ

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln \frac{[\text{Re}]^b}{[\text{Ox}]^a} \quad (2.5)$$

เมื่อ ΔG = ค่าพลังงานอิสระกับกิบส์หน่วย (จูลต่อโมล)

ΔG° = พลังงานอิสระของกิบส์ของสารที่ภาวะมาตรฐาน (จูลต่อโมล)

T = อุณหภูมิ (องศาเคลวิน)

R = ค่าคงที่ของแก๊สเท่ากับ 8.314 (จูลต่อโมลต่อองศาเคลวิน)

$$\frac{[\text{Red}]^b}{[\text{Ox}]^a} = \text{อัตราส่วนแอกทิวิตีของสารผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้น}$$

และจากความสัมพันธ์ของค่าพลังงานอิสระของกิเบกซ์ ค่าศักย์ไฟฟ้าซึ่งมีค่าเท่ากับงานที่ได้

$$\Delta G = -nF\Delta E \quad (2.6)$$

$$\Delta G^\circ = -nF\Delta E^\circ \quad (2.7)$$

เมื่อ $-nF\Delta E$ คือ งานไฟฟ้าที่เกิดที่เซลล์ไฟฟ้า (จูล)

n = จำนวนอิเล็กตรอนที่ใช้ในการปฏิกิริยา (กรัมสมมูลต่อโมล)

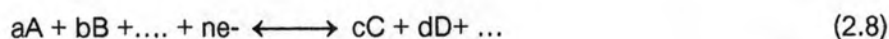
F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,500 คูลอมป์ต่อกรัมสมมูล)

ΔE = ค่าศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)

ΔE° = ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน (โวลต์)

2.3.8 สมการเนิร์นสต์ (Nernst equation)

จากสมการปฏิกิริยาของ Van't Hoff ในเทอมของการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระ เมื่อปฏิกิริยาอยู่ในภาวะสมดุล เช่น ปฏิกิริยา



ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานอิสระที่เปลี่ยนแปลง (ΔG) กับแอกทิวิตีเริ่มต้นของสารตั้งต้นและแอกทิวิตีสุดท้ายของผลิตภัณฑ์จะเป็น

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b} \quad (2.9)$$

เมื่อ $[C]^c [D]^d$ คือแอกทิวิตีของผลิตภัณฑ์

$[A]^a [B]^b$ คือแอกทิวิตีของสารตั้งต้น

จากค่าสมการ $\Delta G = -nF\Delta E$ แทนใน (7) จะได้

$$-nF\Delta E = -nF\Delta E^\circ + RT \ln \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b} \quad (2.10)$$

นั่นคือ

$$E = E^\circ - \frac{RT}{nF} \ln \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b} \quad (2.11)$$

สมการเนินสต์สามารถใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น ใช้หาแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์โดยที่ทราบแอกทิวิตีของสารต่าง ๆ ในปฏิกิริยาทราบอุณหภูมิและค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานจะสังเกตเห็นว่าถ้าแอกทิวิตีเป็นหนึ่งค่า E เท่ากับ E° ซึ่งหมายถึงเป็นศักย์ไฟฟ้าอิเลกโทรด

จากสมการ (2.11) ถ้าแทนค่าคงที่ต่าง ๆ และอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส จะได้สมการใหม่เป็น

$$E = E^\circ - \frac{0.0592}{n} \log \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b} \quad (2.12)$$

หากพิจารณาทั้งเซลล์ไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย 2 ครึ่งเซลล์ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์จะมีค่าเป็น

$$E_{\text{cell}} = E_1 - E_2 = E_{\text{cathode}} - E_{\text{anode}} \quad (2.13)$$

นอกจากนี้แล้วเซลล์เคมีไฟฟ้า ก็เหมือนอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ก็คือ มีความต้านทานอยู่ จะต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าจำนวนหนึ่งเพื่อเอาชนะความต้านทานภายใน จึงเกิดการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าซึ่งศักย์ไฟฟ้านี้เราเรียก ศักย์ของโอห์ม (Ohmic Potential, E_R) ดังนั้นหากจะคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ให้ถูกต้องจะต้องรวมค่าศักย์ของโอห์มนี้ไปด้วย จะได้สมการใหม่เป็น

$$E_{\text{cell}} = E_1 - E_2 + E_R = E_{\text{cathode}} - E_{\text{anode}} + E_R \quad (2.14)$$

2.3.9 กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law)

ไมเคิล ฟาราเดย์ ได้ศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับปริมาณสารที่เปลี่ยนแปลงที่ขั้วไฟฟ้า (เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับระยะเวลาที่ปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านซึ่งกฎของฟาราเดย์มี 2 ข้อ คือ

กฎข้อที่ 1 ปริมาณของสาร (m) ที่เกิดที่อิเล็กโทรดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณประจุของกระแสไฟฟ้า (Q) ที่ผ่านเข้าไปในสารละลาย

กฎข้อที่ 2 ถ้าผ่านปริมาณไฟฟ้าจำนวนเท่าๆ กันลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่างชนิดกัน ปริมาณของสารต่างๆ ที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักสมมูลของสารเหล่านั้น จากกฎข้อที่สองของฟาราเดย์สามารถเขียน สมการได้ดังนี้

$$m = \frac{sM_w it}{nF} \quad (2.15)$$

เมื่อ m = มวลของสารนั้น (กรัม)

s = สัมประสิทธิ์มวลสารสัมพันธ์ของชนิดสารเคมี

M_w = น้ำหนักอะตอมหรือน้ำหนักโมเลกุล (กรัมต่อโมล)

i = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

t = เวลาที่ใช้ (วินาที)

n = จำนวนอิเล็กตรอนที่ใช้ในการปฏิกิริยา(กรัมสมมูลต่อโมล)

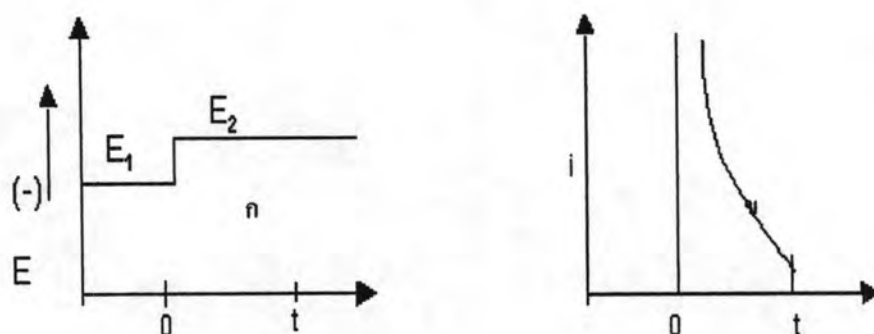
F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,500 คูลอมบ์ต่อกรัมสมมูล)

2.3.10 การควบคุมการทำงานของกระบวนการเคมีไฟฟ้า

สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ (Controlled – Potential Method or Potentionstatic Mode) และการทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ (Controlled – Current Method or Galvanostatic Mode) ซึ่งหลักการทำงานแต่ละแบบเป็นดังนี้

2.3.10.1 การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่

พื้นฐานของการทำงานเป็นการควบคุมค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงให้คงที่ ค่ากระแสไฟฟ้าในระบบจะเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา เมื่อปรับค่าความต่างศักย์ให้เพียงพอกับไอออนบวกในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ผิวของขั้วแคโทด ซึ่งจะทำให้ความเข้มข้นของไอออนที่บริเวณผิวหน้ามีค่าต่ำลง ผลที่เกิดจากการทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่แสดงในรูป 2.1 (ก) ตัวออกซิไดส์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้ปริมาณของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ลดลง ส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบลดลงดังแสดงในรูป 2.1 (ข) เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น



รูปที่ 2.1 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ (ข)

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ เมื่อ E_1 คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นก่อนการเกิดปฏิกิริยา และ E_2 คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าเมื่อเกิด

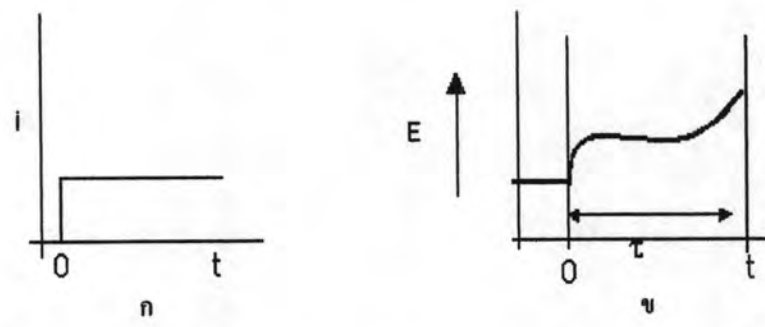
Diffusion limited rate หรือเป็น Mass transfer limited.

2.3.10.2 การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วแคโทดกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงในระบบจะเปลี่ยนไปกับเวลา วิธีการนี้เรียกว่า Chronopotentiometry หรือ Chronopotentiometric technique เมื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งสองให้คงที่ ทำให้สารออกซิไดส์ (M^{n+}) เกิดปฏิกิริยารีดักชันกลายเป็นสารรีดิวซ์ (M) ด้วยอัตราคงที่



ดังนั้นค่าความต่างศักย์จะแปลตามค่าความเข้มข้นของตัวรีดอกซ์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลง M^{n+} ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าลดลง ค่าความต่างศักย์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าก็จะลดลงด้วย ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์โดยที่กระแสไฟฟ้าคงที่เรียกว่า Transition time (τ) ซึ่งค่านี้สัมพันธ์กับความเข้มข้นและสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ดังรูปที่ (2.2)



รูปที่ 2.2 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่
 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่

2.4 การประยุกต์ใช้หลักการเคมีไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสีย

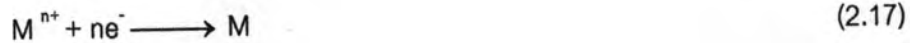
กระบวนการเคมีไฟฟ้าได้รับความสนใจมากในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมี หลักการของกระบวนการเคมีไฟฟ้าคือการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างสารละลายกับผิวของขั้วไฟฟ้าแล้วเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยอาศัยพลังงานจากแหล่งกำเนิด ไฟฟ้าภายนอก

2.4.1 กระบวนการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrodeposition) ^[17]

กระบวนการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้าจะเหมาะสมกับการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักผสมอยู่ การนำโลหะหนักกลับคืนโดยกระบวนการนี้มีความรวดเร็ว แม่นยำเพราะมีค่าในการเลือกเกิดปฏิกิริยาสูง และข้อได้เปรียบในกระบวนการนี้คือไอออนโลหะสามารถนำกลับคืนได้ในรูปของโลหะบริสุทธิ์ หลักการทำงานของกระบวนการมีดังนี้

เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดภายนอกสู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ประกอบด้วยไอออนบวกและไอออนลบ ก่อให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 แล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวของขั้วไฟฟ้ามีดังนี้

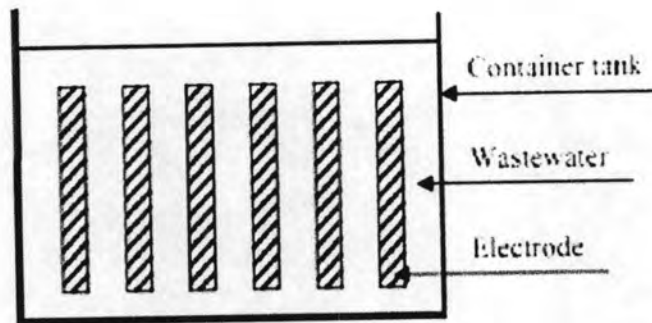
ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด



ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด



เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าสำหรับการนำโลหะหนักกลับคืนในน้ำเสียมีหลายรูปแบบ แต่ที่นิยมใช้ คือ เครื่องปฏิกรณ์แบบ Tank cell ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เนื่องมีรูปแบบที่ง่ายต่อการขยายหรือลดขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อนำไปใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย



รูปที่ 2.3 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบ Tank cell^[14]

อิเล็กโทรดที่ใช้ ขั้วแอโนดจะใช้วัสดุที่ไม่แตกตัวให้อิออนของโลหะ (M^+) ทนทานต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเมื่อมีการบ่อนกระแสไฟฟ้าให้กับระบบ เรียกขั้วไฟฟ้าชนิดนี้ว่า insoluble electrode ขั้วไฟฟ้าที่นิยมนำมาใช้จะทำมาจากโลหะออกไซด์เคลือบบนผิวของไทเทเนียม เช่น Ti/RuO_2 ขั้วแคโทด ที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ แกรไฟต์ (Graphite) หรือคาร์บอนที่มีลักษณะเป็นเส้น (Carbon fiber) เนื่องจากมีราคาถูก

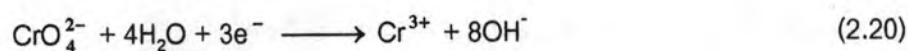
2.4.2 กระบวนการตกตะกอนด้วยเคมีไฟฟ้า (Electroprecipitation)^[15]

กระบวนการตกตะกอนด้วยเคมีไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าชนิดมีเยื่อเลือกผ่าน ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว คือ ขั้วแคโทดและขั้วแอโนดวางคร่อมแผ่นเยื่อเลือกผ่าน โดยเยื่อเลือก

ผ่านใช้ในการบำบัดน้ำเสียมี 2 ชนิด คือ เยื่อเลือกผ่านไอออนลบ (Anion-exchange membrane) และเยื่อเลือกผ่านไอออนบวก (Cation-exchange membrane) แสดงดังรูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.5 ตามลำดับ

เยื่อเลือกผ่านไอออนลบ จะยอมให้ไอออนลบในสารอิเล็กโทรไลต์เคลื่อนที่ผ่านได้ แต่ไอออนบวกจะผ่านไม่ได้ สำหรับเยื่อเลือกผ่านไอออนบวกจะมีลักษณะตรงกันข้ามคือไอออนบวกในสารอิเล็กโทรไลต์เคลื่อนที่ผ่านได้ แต่ไอออนลบจะผ่านไม่ได้

สำหรับน้ำเสียประกอบด้วยโครเมียมหรือโลหะอื่นๆ โลหะหนักจะถูกกำจัดออกมาในรูปของไฮดรอกไซด์ ซึ่งปฏิกิริยาแสดงตามสมการที่ (2.20) - (2.26) โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ฝั่งแคโทด



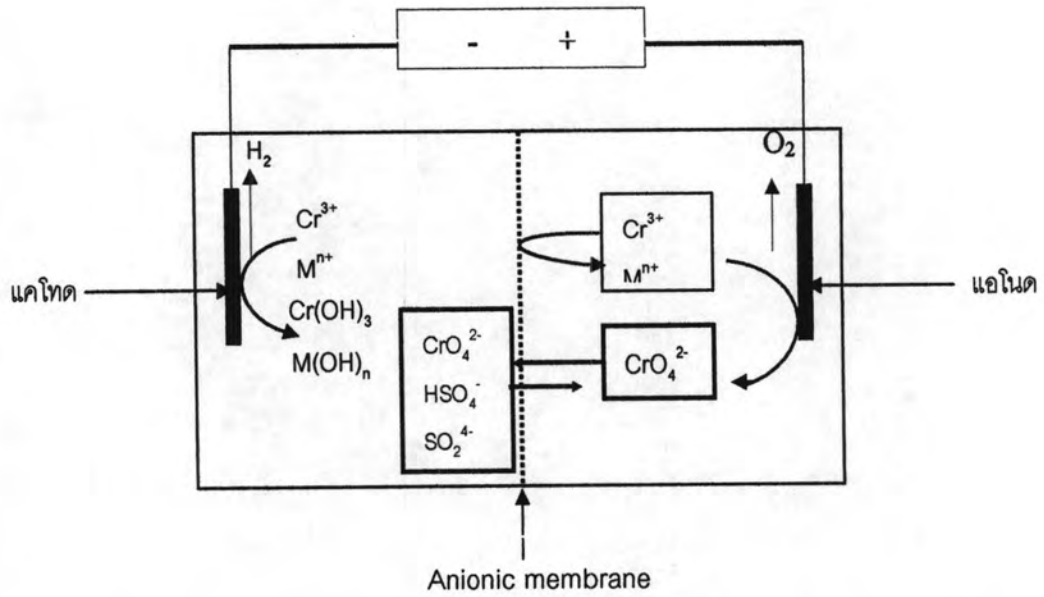
และจะเกิดการตกตะกอนของไฮดรอกไซด์ของโลหะตามมา



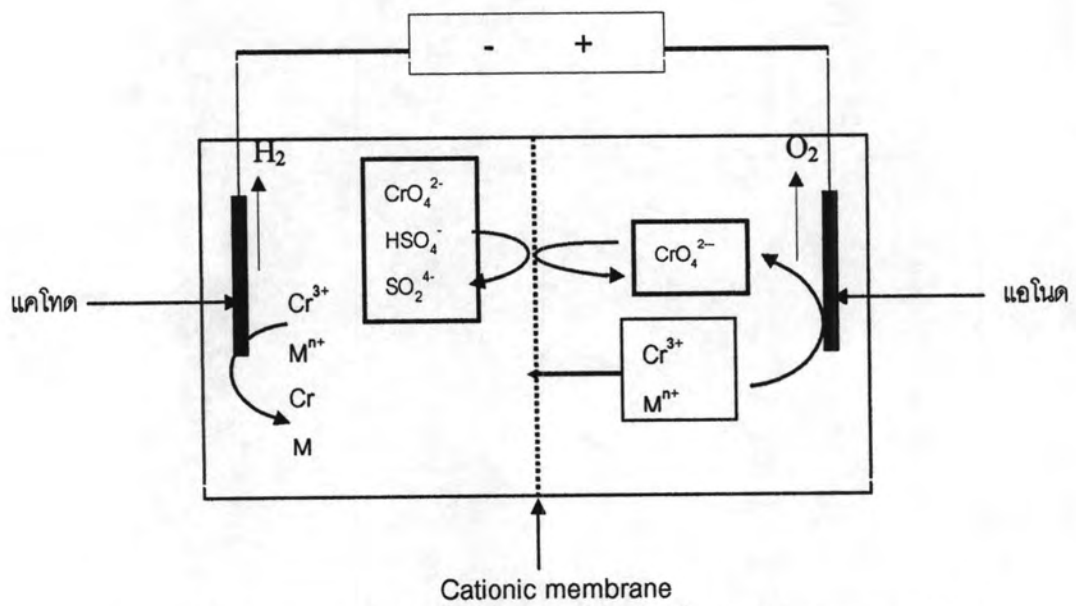
ส่วนที่ฝั่งแอโนดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ H_2O



จากปฏิกิริยาข้างต้นพบว่าที่ฝั่งแคโทดจะมีความเป็นกรด-เบสเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีไฮดรอกไซด์ (OH^-) ไอออนเกิดขึ้นตลอดเวลาและไฮดรอกไซด์ไอออนก็เกิดปฏิกิริยากับโลหะและตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ ซึ่งทำให้ความเข้มข้นของโลหะที่ฝั่งแคโทดลดลง



รูปที่ 2.4 กระบวนการตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าชนิดที่มีเยื่อเลือกผ่านไอออนลบ^[15]

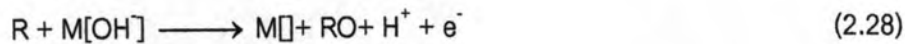
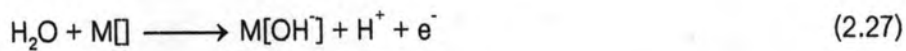


รูปที่ 2.5 กระบวนการตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าชนิดที่มีเยื่อเลือกผ่านไอออนบวก^[15]

2.4.3 กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า (Electro-oxidation: EO) ^[16]

กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าสามารถลดปริมาณของสารอินทรีย์ และสามารถพิษในน้ำเสียได้ โดยสารอินทรีย์และสารมลพิษจะถูกทำลายด้วยอนุมูลอิสระของ OH[•]

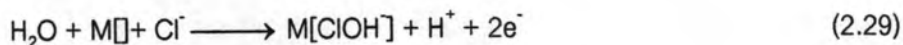
(Hydroxyl radicals) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดส์ที่รุนแรง (Strong oxidizing agent) เรียกกระบวนการนี้ว่า Direct anodic process โดยสารอินทรีย์จะถูกออกซิไดส์โดยอนุมูลอิสระของ OH^\bullet (Hydroxyl radicals) ทำให้โมเลกุลมีขนาดเล็กลงจนกระทั่งกลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดังปฏิกิริยา (2.27 – 2.28) และศักยภาพของตัวออกซิไดส์



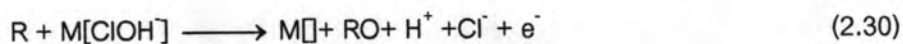
เมื่อ $\text{M}[]$ คือ พื้นผิวของขั้วแอโนดที่เกิดปฏิกิริยา
 $\text{M}[\text{OH}^\bullet]$ คือ OH^\bullet ที่ดูดซับบนผิวของขั้วแอโนด
 R คือ สารอินทรีย์

RO คือ ผลิตภัณฑ์ของสารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดส์

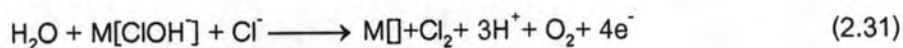
ถ้าในสารละลายมีคลอไรด์ไอออน (Cl^-) ผสมอยู่ คลอไรด์ไอออนจะทำปฏิกิริยากับโลหะของขั้วไฟฟ้าเกิด ClOH^\bullet (Chlorohydroxyl radicals) ซึ่งมีสมบัติเป็น Indirect oxidation ดังปฏิกิริยา (2.29)



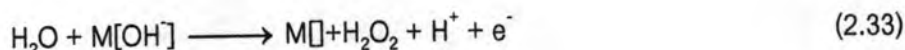
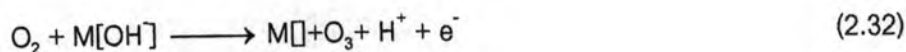
เมื่อ $\text{M}[\text{ClOH}^\bullet]$ คือ ClOH^\bullet ที่ดูดซับบนผิวของขั้วแอโนด ซึ่งสามารถออกซิไดส์สารอินทรีย์ได้ ตามปฏิกิริยา (2.30)



และ ClOH^\bullet สามารถทำปฏิกิริยากับ Cl^- เกิดแก๊สคลอรีน (Cl_2) ตามปฏิกิริยา (2.31) ซึ่งจะช่วยลดปริมาณของเชื้อโรคในน้ำเสียได้



นอกจากนี้อนุมูลอิสระของ OH^\bullet จะสลายตัวเป็นโอโซน (O_3) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดส์ได้เช่นกัน ตามปฏิกิริยา (2.32) และ (2.33) ประสิทธิภาพในการออกซิไดส์สารอินทรีย์จะขึ้นอยู่กับชนิดของขั้วแอโนดและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง



2.4.4 กระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrocoagulation: EC)

กระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้าเป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าที่เหมาะสมกับการบำบัดน้ำเสียที่มีสารมลพิษจำพวก ไขมัน น้ำมัน สีย้อม สารแขวนลอย สารอินทรีย์และโลหะหนัก โดยกระบวนการนี้จะอาศัยสารก่อการจับก้อนซึ่งเกิดจากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีไปทำให้อนุภาคของคอลลอยด์หรือสารมลพิษในน้ำเสียที่มีอนุภาคเล็กๆ มารวมตัวกันเป็นอนุภาคใหญ่ขึ้นจนหนักพอที่จะตกตะกอนลงมาโดยอาศัยสารสร้างตะกอน ซึ่งสารก่อการจับก้อนนี้เกิดจากขั้วไฟฟ้าชนิดที่กัดกร่อนได้ (Sacrificial electrode) เช่น เหล็กหรืออะลูมิเนียม ในการสร้างสารก่อการจับก้อนโดยการผ่านกระแสไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานภายนอกไปยังขั้วไฟฟ้า โลหะที่เป็นขั้วแอโนดจะมีการสูญเสียอิเล็กตรอนกลายเป็นโลหะไอออนละลายอยู่ในน้ำเสียดังปฏิกิริยา (2.34) และ (2.35) โลหะไอออนเหล่านี้จะรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เรียกว่า Polynuclear metal hydroxyl complexes ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารก่อการจับก้อน

กรณีของอะลูมิเนียมเมื่อใช้เป็นขั้วแอโนดอะลูมิเนียมจะแตกตัวให้ Al^{3+} ไอออนในสารละลาย (2.34) และ Al^{3+} ไอออนรวมตัวกับ OH^- หรือ H_2O ขึ้นอยู่กับความเป็นกรด - เบสของระบบ และตกตะกอนออกมาในรูปของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ดังปฏิกิริยา (2.35) และ (2.36) ^[17]



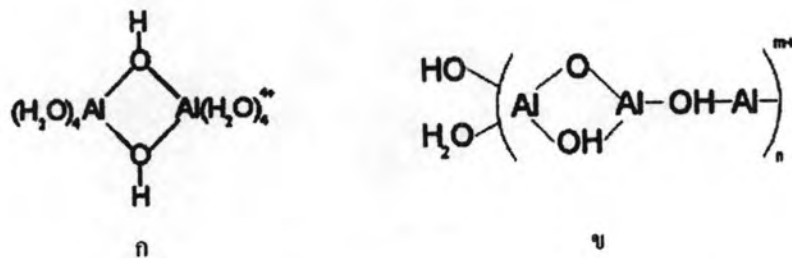
ภาวะสารละลายที่เป็นเบส



ภาวะสารละลายที่เป็นกรด



นอกจากนี้ Al^{3+} ไฮดรอกไซด์ในสารละลายรวมตัวกับ Polyhydroxides กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เรียกว่า Poly-nuclear hydroxyl aluminum (III) complexes ซึ่งอาจจะเป็น Monomeric และ Polymeric แต่สุดท้ายสารประกอบเชิงซ้อนของ Al^{3+} ไฮดรอกไซด์จะตกตะกอนในรูปของ Al(OH)_3 สำหรับตัวอย่างของ Monomeric ได้แก่ Al(OH)^{2+} , Al(OH)_2^+ , Al(OH)_4^- เป็นต้น ส่วนตัวอย่างของ polymeric ได้แก่ $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$, $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$ และ $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$ ซึ่งโครงสร้างของ Dimeric และ Polymeric aluminum (III) hydroxo complexes แสดงดังรูป 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของ Poly-nuclear hydroxyl aluminum (III) complexes ^[18]

(ก) Dimeric Al^{3+} hydroxo complexes

(ข) Polymeric Al^{3+} hydroxo complexes

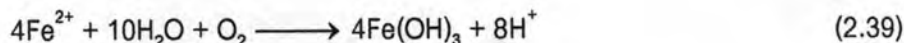
สำหรับกรณีของเหล็กเมื่อใช้เป็นขั้วแอโนดจะแตกตัวให้ Fe^{2+} ในสารละลาย ดังสมการ (2.37) และตกตะกอนออกมาในรูปของ (Fe(OH)_n) เมื่อ $n = 2$ หรือ 3 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-เบสของสารละลาย ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงสมการที่ (2.38) และ (2.39) ^[19]



ภาวะสารละลายที่เป็นเบส



ภาวะสารละลายที่เป็นกรด



Fe^{3+} ในสารละลายสามารถรวมตัวกับ Polyhydroxides กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เรียกว่า Poly-nuclear hydroxyl iron (III) complexes ซึ่งอาจจะเป็น Monomeric และ Ferric hydroxo complexes ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-เบส แต่สุดท้ายสารประกอบเชิงซ้อนของ Fe^{3+} จะตกตะกอนในรูปของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ สำหรับตัวอย่างของ Monomeric และ Ferric hydroxo complexes ได้แก่ $\text{Fe}(\text{OH})_2^{2+}$, $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$, $\text{Fe}(\text{OH})_4$, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5\text{OH}^{2+}$, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_4(\text{OH})_2^+$ เป็นต้น^[20]

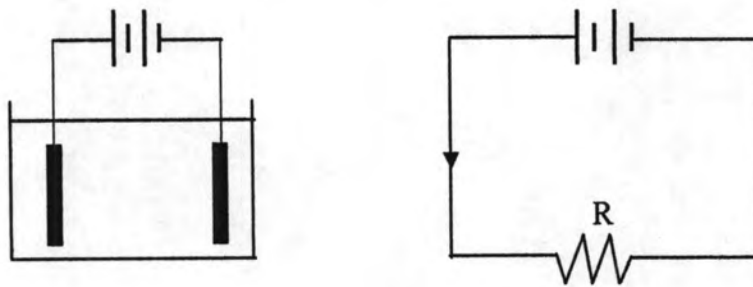
สำหรับการวางขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์นั้นมี 2 แบบ ขึ้นอยู่กับความต้องการของวิธีที่ใช้ในการบำบัด ถ้าระบบบำบัดต้องการกำจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีทำให้ลอย ควรวางขั้วไฟฟ้าในแนวตั้ง เพื่อให้ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเป็นตัวพาสารแขวนลอยดังกล่าวขึ้นมาพร้อมกับตะกอนเบาที่เกิดขึ้น แต่ถ้าระบบต้องการกำจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีการตกตะกอนควรวางขั้วไฟฟ้าในแนวนอนโดยให้ขั้วแอโนดอยู่ด้านล่าง^[21]

การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าที่ง่ายที่สุด คือ มีขั้วไฟฟ้าเพียง 1 คู่ โดยขั้วหนึ่งเป็นแอโนดและอีกขั้วเป็นแคโทดดังรูปที่ 7 ซึ่งการวางแบบนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้เนื่องจากการนำไปประยุกต์ใช้นั้นต้องการขนาดใหญ่ พื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยามาก ทำให้ต้องมีการจัดเรียงตัวของแผ่นขั้วไฟฟ้าแบบต่างๆ ขึ้น ในกรณีที่ต้องใช้ขั้วไฟฟ้ามากกว่า 1 คู่ สามารถเลือกวิธีต่อทางไฟฟ้าได้ 2 แบบ คือ

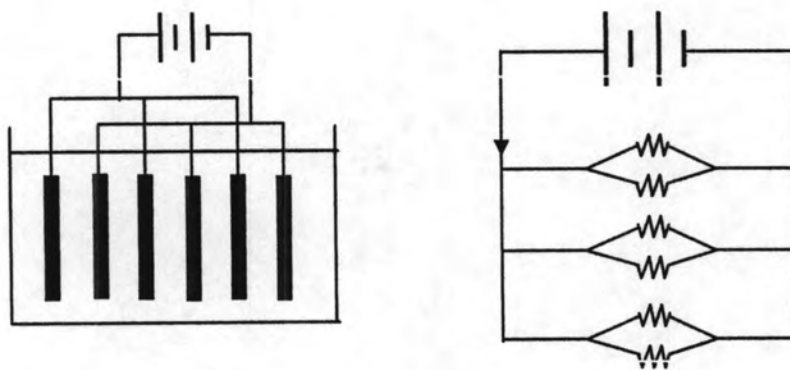
- มอนอโพลาร์ (Monopolar electrode) มีจุดเชื่อมของขั้วไฟฟ้าแต่ละแผ่นทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนด ซึ่งวางสลับกันขั้วละแผ่นโดยที่ผิวหน้าทั้งของด้านของขั้วไฟฟ้าแผ่นเดียวกันจะมีขั้วเดียวกัน ในทางไฟฟ้านั้นขั้วไฟฟ้าจะมีการจัดเรียงเซลล์ได้ 2 แบบคือ

- แบบขนาน (Parallel connections) กระแสไฟฟ้าจะถูกแบ่งให้แต่ละเซลล์ขึ้นอยู่กับความต้านทานภายในของเซลล์นั้นๆ โดยที่ค่าความต่างศักย์ของระบบจะเท่ากันดังรูปที่ 2.8

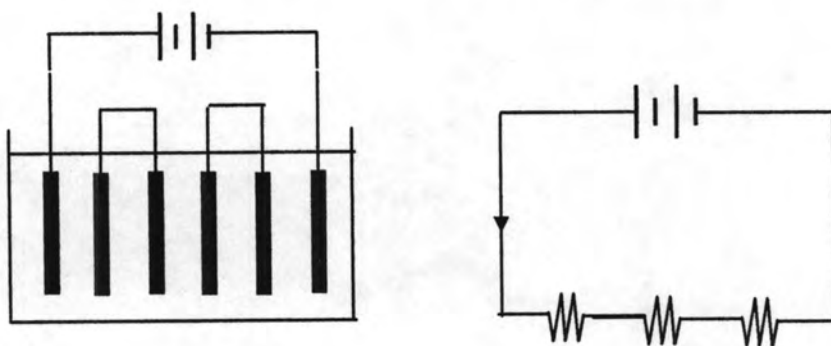
- แบบอนุกรม (Series connections) มีการจัดเรียงของขั้วไฟฟ้าคล้ายเซลล์เดี่ยวหลาย ๆ เซลล์มาต่อกัน โดยมีจุดเชื่อมของขั้วไฟฟ้างดรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.7 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบมอนอโพลาร์แบบเซลล์เดี่ยว



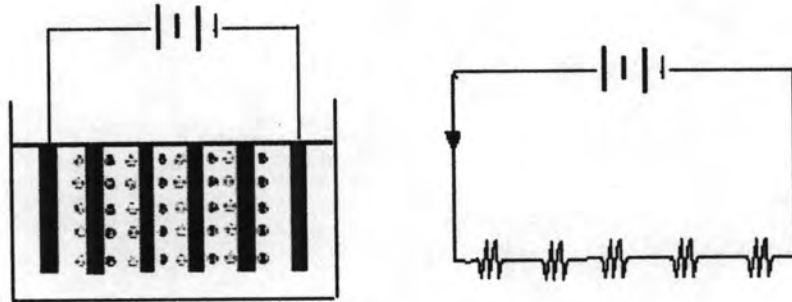
รูปที่ 2.8 การจัดเรียงของขั้วไฟฟ้ามอนอโพลาร์แบบขนาน



รูปที่ 2.9 การจัดเรียงของขั้วไฟฟ้ามอนอโพลาร์แบบอนุกรม

- ไบโพลาร์ (Bipolar electrodes) มีจุดเชื่อมของขั้วไฟฟ้าเพียง 2 จุดเท่านั้นเฉพาะขั้วไฟฟ้าที่อยู่ปลายนอกสุดดังรูปที่ 2.10 โดยแต่ละแผ่นของขั้วไฟฟ้ามีด้านหนึ่งเป็นขั้วลบซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดและอีกด้านหนึ่งเป็นขั้วบวกซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทด ในทางไฟฟ้านั้นขั้วไฟฟ้า

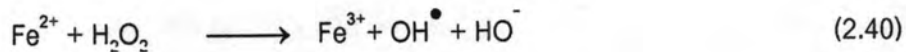
จะมีการจัดเรียงเซลล์แบบอนุกรม โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านต้องการความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูง เนื่องจากความต้านทานที่สูงกว่าของเซลล์ซึ่งต่อแบบอนุกรม แต่จะมีกระแสไฟฟ้าของระบบเท่ากัน นั่นคือจะมีกระแสไฟฟ้าเดียวกันไหลผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งหมด ซึ่งการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบนี้ทำให้ง่ายต่อการติดตั้งและบำรุงรักษาในขณะที่ทำการใช้งาน



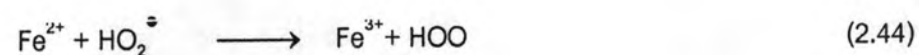
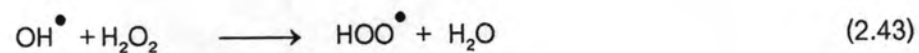
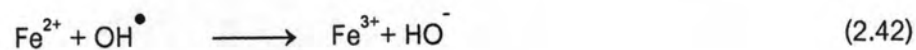
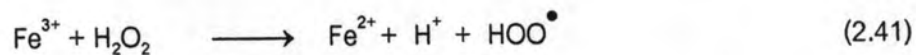
รูปที่ 2.10 การจัดเรียงของขั้วไฟฟ้าไบโพลาร์

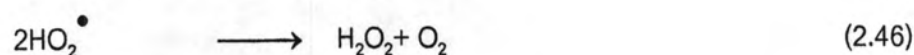
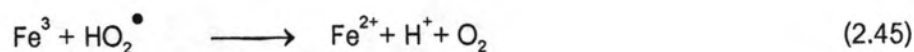
2.4.5 ปฏิกิริยาเฟนตอนและกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์เฟนตอน

ปฏิกิริยาเฟนตอน คือ ปฏิกิริยาระหว่างเฟนตอนรีเอเจนต์ ซึ่งได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเพอร์ซัลเฟต ได้เป็น อนุมูลอิสระของ OH^\bullet (Hydroxy radicals) ดังปฏิกิริยาที่ 2.40

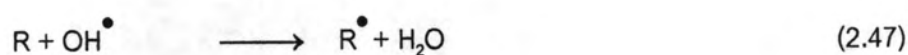


นอกจากปฏิกิริยาดังกล่าวยังมีปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้นอีก แสดงดังปฏิกิริยาข้างล่าง





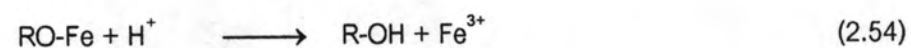
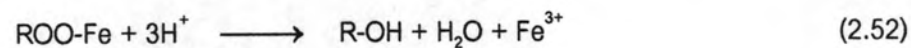
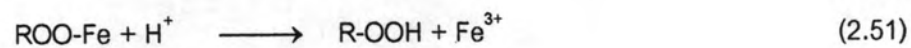
อนุมูลอิสระของ OH^\bullet จะมีสมบัติเป็นตัวออกซิไดส์สารอินทรีย์ที่รุนแรง โดยในน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ (R) อนุมูลอิสระของ OH^\bullet จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับอะตอมของคาร์บอน ในโมเลกุลของสารอินทรีย์ ดังปฏิกิริยาที่ 2.47



อนุมูลอิสระของสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจะเกิดทำปฏิกิริยากับออกซิเจนอย่างรวดเร็วดังปฏิกิริยา



R-OO^\bullet และ R-O^\bullet ไม่เสถียรจึงเกิดปฏิกิริยากับไอออนของเหล็กและโปรตอนดังปฏิกิริยา



ซึ่ง R-OH และ R-OOH จะทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของ OH^\bullet ต่อไปจนได้เป็นแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในที่สุด

กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตอนเป็นกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการรวมตัวด้วย กระแสไฟฟ้าและกระบวนการเฟนตอน

กระบวนการอิเล็กโทรเฟนตอนแบ่งตามลักษณะของการเติมเฟนตอนรีเอเจนต์ได้ดังนี้

- การเติมเฟอร์รัสไอออนจากภายนอก และผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่ขั้วแคโทด โดยใช้อิเล็กโทรดที่ไม่ละลาย เช่น แสตนเลส แก้วไฟต์ เป็นต้น
- การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากภายนอก และผลิตเฟอร์รัสไอออนจากปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่ขั้วแอโนด โดยใช้อิเล็กโทรดละลายได้ เช่น เหล็ก เป็นต้น
- การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากภายนอก และผลิตเฟอร์รัสไอออนจากปฏิกิริยารีดักชันของเพอร์ริกไอออน หรือตะกอนของเพอร์ริกไฮดรอกไซด์
- การผลิตเฟอร์รัสไอออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากปฏิกิริยาเคมี

2.5 หลักการในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้า

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการเคมีไฟฟ้ามีหลายแบบขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่จะประยุกต์ใช้ โดยมีหลักการสำคัญในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการเคมีไฟฟ้า คือ

1. เครื่องปฏิกรณ์ควรเป็นแบบที่ง่ายที่สุด และค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด ถ้าเป็นไปได้ควรหลีกเลี่ยงการออกแบบระบบที่มีการกวนผสม
2. เครื่องปฏิกรณ์ต้องสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีอย่างสมบูรณ์ก่อนจะผ่านสู่ขั้นตอนอื่น ในกรณีที่มีกระบวนการอื่นนอกจากกระบวนการเคมีไฟฟ้ามาเกี่ยวข้อง ควรจะแยกออกจากกระบวนการเคมีไฟฟ้า
3. เมื่อจำเป็นต้องมีการกวนผสมหรือการไหลของสารละลายต้องพิจารณาการถ่ายเทมวลสารเป็นอันดับแรก เช่น การกวนผสมอาจจะต้องใช้แผ่นกั้น หรือใบพัด
4. ควรออกแบบให้มีการกระจายความต่างศักย์ไฟฟ้าให้สม่ำเสมอทั่วพื้นผิวของขั้วไฟฟ้า
5. ควรออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าน้อยเพราะระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ายิ่งมากจะต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าสูงซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายสูงขึ้น
6. การเลือกวัสดุที่ใช้ทำเครื่องปฏิกรณ์นั้นต้องคำนึงถึงสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่จะผ่านกระบวนการเคมีไฟฟ้า และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเคมีไฟฟ้า โดยสามารถคงทน ไม่สึกกร่อนภายใต้สภาพการใช้งาน
7. การเลือกวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้านั้นต้องคำนึงถึงปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นให้สอดคล้องกับความต้องการของระบบบำบัด และปฏิกิริยาข้างเคียงที่อาจขึ้นได้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คังกรม คังแจอะ (2005)^[22] ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าโดยใช้ขั้วเหล็กเป็นอิเล็กโทรด พบว่าค่าความต่างศักย์ของการจัดวางขั้วไฟฟ้าด้วยมอนอโพลาร์แบบขนานมีค่าต่ำกว่าการจัดวางขั้วไฟฟ้ามอนอโพลาร์แบบอนุกรมและไบโพลาร์แบบขนานตามลำดับ เนื่องจากการจัดวางขั้วไฟฟ้ามอนอโพลาร์แบบอนุกรมและไบโพลาร์แบบขนานทำให้ขั้วไฟฟ้าเรียงตัวเป็นแบบอนุกรมจึงส่งผลให้ความต้านทานของระบบมีค่าสูงกว่าระบบที่ต่อแบบขนาน ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านต้องใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าการจัดวางขั้วมอนอโพลาร์แบบขนานจะให้ค่าร้อยละการกำจัดค่าบีโอดีและซีโอดีสูงกว่าการจัดวางขั้วไฟฟ้ามอนอโพลาร์แบบอนุกรม และการจัดวางขั้วไฟฟ้าไบโพลาร์แบบขนานตามลำดับ โดยร้อยละของการกำจัดของค่าบีโอดีและค่าซีโอดีสูงสุดในช่วงเวลา 15-20 นาที เนื่องจากการจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบดังกล่าว มีระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทดน้อยกว่าจึงทำให้การถ่ายเทมวลสารของสารเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออนในระบบเกิดการรวมตัวเป็นสารสร้างตะกอนได้เร็วกว่า

Inan และคณะ (2004)^[23] ศึกษาการลดค่าซีโอดี สี และของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียจากโรงโม่แป้งซึ่งมีปริมาณน้ำมันมะกอกอยู่มาก บำบัดโดยวิธีการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า พบว่าที่ภาวะความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าอยู่ระหว่าง 10-40 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 6 7 และ 9 เป็นเวลาน้อยกว่า 30 นาที เมื่อใช้ขั้วอะลูมิเนียมสามารถลดค่าซีโอดีได้ 52 เปอร์เซ็นต์และเมื่อใช้ขั้วเหล็กสามารถลดค่าซีโอดีได้ 42 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังทำการทดลองที่ภาวะ ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 6.2 ± 0.2 เป็นเวลา 10 นาที พบว่าเมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ค่าซีโอดีก็จะลดลงมากขึ้นเช่นกันนอกจากจะสามารถลดค่าซีโอดีได้แล้วยังสามารถลดสีและของแข็งแขวนลอยได้ปริมาณมากอีกด้วย

Xu และ Zhu (2004)^[24] ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงอาหารโดยวิธีการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า พบว่าค่าการนำไฟฟ้ามีผลต่อการลดลงของมลพิษในน้ำน้อยมาก แต่มีผลต่อการประหยัดพลังงานที่ใช้ ที่ภาวะความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าระหว่าง 10-14 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ความเป็นกรด-เบสระหว่าง 3-10 และระยะห่างระหว่างขั้ว 10 mm เวลาที่ใช้บำบัด 30 นาที สามารถลดน้ำมันได้ 95 เปอร์เซ็นต์ และลดค่าซีโอดี 75 เปอร์เซ็นต์

Muruganathan และคณะ (2004)^[25] ศึกษาการลดสารมลพิษในน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกหนังโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า โดยใช้ขั้วแอโนดคือเหล็กและอะลูมิเนียม พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการลดสารแขวนลอยและน้ำมันได้มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์

Jiantuan และคณะ (2004) ^[26] ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากการซักผ้าด้วยกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้าควบคู่กับกระบวนการลอยตัวด้วยกระแสไฟฟ้า (Electroflotation) พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียคือความเป็นกรด-เบสประมาณ 5-9 ในเวลา 5-10 นาที โดยสามารถลดความขุ่น ค่าซีโอดี สารฟอสเฟตและสารลดแรงตึงผิวมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์

Zhang และคณะ (2005) ^[27] ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากกองขยะด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเฟนทอนโดยใช้ Ti/RuO_2-IrO_2 เป็นขั้วไฟฟ้า พบว่าที่ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า 2.1 เซนติเมตร อัตราส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.34 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อเฟอรัสไอออน 0.038 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 33.61 แอมแปร์ต่อตารางเมตร สามารถลดค่าซีโอดีได้มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์