

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบันน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะน้ำเสียที่มีปริมาณสารมลพิษมาก เช่น น้ำเสียจากโรงงานผลิตสุรา, โรงงานฟอกย้อม, โรงงานชุบโลหะ และโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ เป็นต้น เนื่องจากมีปริมาณไอออนของโลหะหนักสูงกว่าค่ามาตรฐาน, มีสีเข้ม หรือมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง ทำให้ต้องใช้ระบบบำบัดน้ำเสียที่ยุ่งยากซับซ้อนหลายขั้นตอน เช่น การบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะต้องปรับ pH ให้เหมาะสมและตกตะกอนด้วยสารเคมีซึ่งสอดคล้องกับไอออนของโลหะนั้นๆ ทำให้ได้กากตะกอนปริมาณมาก ถ้ามีไอออนของโลหะหนักหลายชนิดในน้ำเสียจะทำให้ระบบบำบัดยุ่งยากมากขึ้น

วิธีไฟฟ้าเคมีเป็นวิธีที่ใช้อิเล็กทรอนิกส์ในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันแทนการใช้สารเคมีในการเกิดปฏิกิริยา ส่วนลักษณะสมบัติสำคัญของน้ำเสียที่มีผลต่อการบำบัดด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี ได้แก่ ค่าการนำไฟฟ้า ประโยชน์จากการนำวิธีไฟฟ้าเคมีมาใช้ในทางอุตสาหกรรมได้แก่ การเตรียมธาตุและทำให้บริสุทธิ์, การชุบฉาบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า, การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และการบำบัดน้ำเสีย เช่น การกำจัดไอออนของโลหะหนัก, การกำจัดเชื้อโรค, การกำจัดสี, การแยกสารโดยการทำให้ลอยหรือตกตะกอน เป็นต้น

2.2 การบำบัดน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสียคือ การแยกหรือการทำลายมลสารต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสียให้มีปริมาณลดลงอยู่ในระดับที่ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำที่รองรับน้ำเสียนั้น ระบบบำบัดน้ำเสียจะประกอบด้วยหลายขั้นตอนรวมกันเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดให้ต่ำสุด การบำบัดน้ำเสียอาจแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

2.2.1 ขั้นที่หนึ่ง เป็นขั้นตอนการกำจัดของแข็งส่วนใหญ่ที่ลอยและแขวนลอยอยู่ในน้ำด้วยวิธีการตักออก และด้วยวิธีให้ตกตะกอนโดยแรงดึงดูดของโลก ซึ่งเป็นวิธีการทางกายภาพ ในขั้นตอนนี้ค่า BOD ของน้ำจะลดลงไปเพียงเล็กน้อย กระบวนการนี้แบ่งเป็น 3 ขั้น คือ

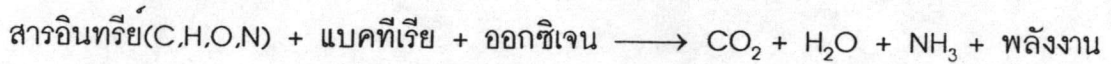
2.2.1.1 การดักจับวัตถุชิ้นใหญ่ๆ โดยใช้ตะแกรงแยกของแข็งออก

2.2.1.2 การกำจัดกรวดทรายโดยใช้รางตกตะกอน เศษหิน, กรวด, ทราย หรือวัตถุชิ้นเล็ก ๆ จะตกลงไปอยู่ด้านล่างของรางตกตะกอน

2.2.1.3 การกำจัดสิ่งแขวนลอยโดยใช้ถังตกตะกอน น้ำเสียที่ผ่านตะแกรงและรางตกตะกอนมาแล้ว ยังคงมีโคลนตมหรือตะกอนแขวนลอยอื่นๆ ปะปนอยู่ในน้ำ เมื่อปล่อยให้ผ่านเข้าไปในถังพักเพื่อตกตะกอนโดยลดความเร็วของการไหลของน้ำเสีย จะได้ตะกอนของสารแขวนลอยตกลงไปอยู่ด้านล่างของถังเรียกว่า กากตะกอน (Sludge) ในบางครั้งน้ำที่ผ่านออกมาจากถังตกตะกอนอาจจะมีการฆ่าเชื้อโรคโดยการผ่านคลอรีนลงไปก่อนที่จะปล่อยน้ำลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ แต่โดยทั่วไปยังต้องนำไปบำบัดขั้นตอนต่อไป

2.2.2 ขั้นที่สอง เป็นขั้นตอนที่มีการลดค่า BOD ของน้ำโดยวิธีทางชีววิทยารวมทั้งการกำจัดสารแขวนลอยที่ยังเหลืออยู่ กระบวนการทางชีววิทยาที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยอาศัยการย่อยสลายตามธรรมชาตินิยมใช้ระบบตะกอนเร่งมากที่สุด ระบบตะกอนเร่งสามารถกำจัดสารแขวนลอยและ BOD ได้สูงกว่า 90% การบำบัดน้ำเสียโดยระบบโปรยกรองเป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยม ซึ่งมีหลักการคือ ผ่านน้ำเสียอย่างช้าๆ ลงบนภาตกรองที่ประกอบด้วยก้อนกรวดหรือก้อนหินขนาดเล็กที่เคลือบด้วยเมือกแบคทีเรีย ภาตกรองนี้ลึก 3-10 ฟุต แบคทีเรียที่อยู่บนก้อนกรวดหรือหินจะทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสีย น้ำที่ได้จะมี BOD ต่ำและไหลลงสู่ด้านใต้ของภาตกรอง โดยภายนอกเมือกและผิวนอกเมือกจะเกิดสภาวะการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน สำหรับด้านในเมือกเกิดสภาวะการย่อยสลายแบบไม่

ไข่ออกซิเจน ในปัจจุบันการบำบัดน้ำเสียโดยระบบตะกอนเร่งนิยมใช้กันมากทั้งแหล่งน้ำเสียจากชุมชนและจากโรงงานอุตสาหกรรม อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยแบคทีเรียจะเพิ่มขึ้นโดยการสูบอากาศเข้าไปในน้ำเสีย และให้กากตะกอนแบคทีเรียได้สัมผัสกับน้ำเสียหรือน้ำที่ผ่านออกมาจากชั้นที่หนึ่งมากที่สุด เพื่อเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ตามสมการต่อไปนี้ (ทบทวมหาวิทยาลัย, 2528)



น้ำที่ผ่านการบำบัดในชั้นที่สองแล้วสามารถปล่อยสู่แหล่งน้ำสาธารณะได้

ตารางที่ 2.1 แสดงมาตรฐานน้ำเสียที่กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรมในการบำบัดน้ำเสียขั้นตอนที่สองโดยทั่วไป

2.2.3 ขั้นที่สาม มีวัตถุประสงค์ที่จะกำจัดมลสารที่เหลืออยู่ทั้งหมด ทั้งชนิดที่ละลายน้ำหรือที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ และลดค่า BOD ให้ต่ำกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร อีกทั้งกำจัดเกลือแอมโมเนียมไนโตรเจนโดยเฉพาะสารไนเตรตและฟอสเฟตที่ไม่สามารถกำจัดได้ในขั้นที่หนึ่งและขั้นที่สอง เพื่อให้น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วมีความสะอาดยิ่งขึ้นก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ หรือนำน้ำกลับมาใช้อุปโภคบริโภคนั่นเอง ในขั้นตอนนี้มีการนำเทคนิคต่างๆ ที่ทันสมัยมาใช้ในการบำบัด เช่น กระบวนการออสโมซิสผันกลับ, การแลกเปลี่ยนไอออน และกระบวนการไฟฟ้าเคมี นอกเหนือไปจากการตกตะกอน, การกรอง และการดูดซับกลิ่นและสีด้วยถ่านกัมมันต์ ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียขั้นที่สามจึงมีค่าใช้จ่ายสูงมาก และไม่นิยมใช้กันในประเทศกำลังพัฒนา

2.3 มลสารในน้ำ

มลสาร หมายถึง สารที่ก่อให้เกิดมลภาวะอันได้แก่ พิษที่เกิดจากความมัวหมองหรือความสกปรก ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อมหรือเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต เช่น อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อการดำรงชีวิต หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพชีวิตของมนุษย์และสัตว์ การเกิดมลภาวะมีได้หลายทางคือ มลภาวะทางอากาศเกิดจากการที่มีก๊าซพิษในอากาศ เช่น ก๊าซไฮโดรคาร์บอน, ซัลเฟอร์ไดออกไซด์, ไนโตรเจนไดออกไซด์ เป็นต้น มลภาวะทางน้ำเกิดจากกากของเสียอินทรีย์และอนินทรีย์ที่เป็นพิษ เช่น ปุ๋ย, ตะกั่ว, แคดเมียม เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานคุณภาพน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม พ.ศ.2513
(ทบวงมหาวิทยาลัย, 2528)

BOD (5 วัน ที่ 20 องศาเซลเซียส)	ไม่มากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร
ของแข็งที่แขวนลอย	ไม่มากกว่า 30 มิลลิกรัมต่อลิตร
ของแข็งที่ละลายได้	ไม่มากกว่า 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร
ค่าความเป็นกรดต่าง	5 ถึง 9
ค่าเปอร์แมงกาเนต	ไม่มากกว่า 60 มิลลิกรัมต่อลิตร
ซัลไฟด์ (คิดเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์)	ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
ไซยาไนด์ (คิดเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์)	ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
น้ำมัน และ ไขมัน	ไม่มีเลย
น้ำมันทาร์	ไม่มีเลย
ฟลูออไรด์ไฮดรอกไซด์	ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
ฟีนอล และ/หรือ ครีซอล	ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
คลอรีนอิสระ	ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
สังกะสี	ไม่มากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร
ทองแดง	ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
แมงกานีส	ไม่มากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร
โครเมียม	ไม่มากกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร
สารหนู	ไม่มากกว่า 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
ปรอท	ไม่มากกว่า 0.0005 มิลลิกรัมต่อลิตร
แคดเมียม	ไม่มากกว่า 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร
ซีลีเนียม	ไม่มากกว่า 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร
ตะกั่ว	ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
นิกเกิล	ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
ยาฆ่าแมลง	ไม่มีเลย
สารกัมมันตรังสี	ไม่มีเลย
อุณหภูมิของน้ำ	ไม่มากกว่า 40 องศาเซลเซียส

มลภาวะทางเกษตรเกิดจากสารพิษที่ใช้อยู่ในทางเกษตรกรรม เช่น ดีดีที, พาราไทออน และยากำจัดแมลงและศัตรูพืชอื่นๆ เป็นต้น

มลภาวะทางน้ำเป็นผลจากการกระทำของมนุษย์ ได้แก่ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม, น้ำใช้ในชีวิตประจำวันตามบ้านเรือนหรือน้ำเสียจากแหล่งชุมชน และน้ำเสียจากเกษตรกรรม สิ่ง que แสดงถึงการเกิดมลภาวะทางน้ำหรือเกิดสภาวะน้ำเป็นพิษได้แก่ การมีสีหรือมีกลิ่นรุนแรง, การลดลงของปริมาณออกซิเจนในน้ำ, การมีคราบน้ำมันปนอยู่, การเกิดฟอง, การมีสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ที่เป็นพิษ, การที่น้ำมีอุณหภูมิสูง และมีการตายของสัตว์ที่อาศัยอยู่ในน้ำ เช่น กุ้ง, ปลา เป็นต้น มลสารในน้ำอาจแบ่งได้ 3 ประเภทตามลักษณะคือ ทางกายภาพ, ทางชีวภาพ และทางเคมี โดยมีรายละเอียดแสดงอยู่ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การแยกประเภทของมลสารในน้ำ (ทบวงมหาวิทยาลัย, 2538)

ชนิด	ตัวอย่าง
ทางกายภาพ - สารที่ลอยน้ำ - สารที่แขวนลอยในน้ำ - ความร้อน	เศษไม้ ใบไม้ ฟอง โคลนตม ดิน ซึ้นโลหะ เศษไม้ ยาง เข็มกระดาด น้ำร้อนจากหม้อต้มน้ำโรงงานอุตสาหกรรม
ทางชีวภาพ - สิ่ง que ก่อให้เกิดโรคภัยไข้เจ็บ - Algae bloom	แบคทีเรีย โปรโตซัว ไวรัส พาราไซต์ เชื้อรา สาหร่าย และพืชน้ำต่างๆ
ทางเคมี - สารอินทรีย์ - สารอนินทรีย์	น้ำมัน สีทา สีย้อม ผงซักฟอกสังเคราะห์ ฟีนอล กรดคาร์บอกซิลิก คาร์โบไฮเดรต น้ำตาล กรด เบส คลอรีน เกลือของโลหะ ไนเตรต ฟอสเฟต ซัลเฟต ไบคาร์บอเนต ไฮโดรเจนซัลไฟด์

2.4 หลักการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี

ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีนั้นเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (ปฏิกิริยารีดอกซ์) ซึ่งเกิดขึ้นทั้งๆ ที่สารซึ่งทำปฏิกิริยากันมิได้สัมผัสกัน ทั้งนี้เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากสารที่เกิดออกซิเดชันไปยังสารที่เกิดรีดักชันโดยผ่านตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม เช่น ลวดตัวนำไฟฟ้า เป็นต้น การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำคือ การไหลของกระแสไฟฟ้านั้นเอง (ทบทวมหาวิทยาลัย, 2528) ไฟฟ้าเคมีจึงเป็นสาขาหนึ่งของเคมีที่ปฏิกิริยาเกิดขึ้นพร้อมกับมีการไหลของกระแสไฟฟ้า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นคือปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันซึ่งมีความซับซ้อนและเกี่ยวข้องกับเรื่องต่างๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 ปฏิกิริยารีดอกซ์ หรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการถ่ายเทอิเล็กตรอน เมื่อปฏิกิริยามีการสูญเสียอิเล็กตรอนจะเรียกปฏิกิริยานั้นว่า ออกซิเดชัน ส่วนปฏิกิริยาที่เกิดการเพิ่มของอิเล็กตรอนหรือการรับอิเล็กตรอนเรียกว่า รีดักชัน ตัวอย่างของปฏิกิริยารีดอกซ์แสดงในสมการที่ (2.1)



ซึ่งเป็นสมการรวมระหว่างปฏิกิริยาออกซิเดชันของ Fe^{2+} ตามสมการที่ (2.2) และปฏิกิริยารีดักชันของ Ti^{3+} ตามสมการที่ (2.3)



จะเห็นว่าตัวอย่างปฏิกิริยารีดอกซ์นี้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนจาก Fe^{2+} ไปให้แก่ Ti^{3+} ผลที่เกิดขึ้นคือ มีการเปลี่ยนแปลงจำนวนประจุของธาตุหรือหมู่ของธาตุ ตัวเลขประจุนี้เรียกว่า เลขออกซิเดชัน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเลขจำนวนเต็มรวมทั้งศูนย์ และอาจมีเครื่องหมายบวกหรือลบก็ได้ (ทบทวมหาวิทยาลัย, 2528)

2.4.2 แรงเคลื่อนไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้า ในเซลล์ไฟฟ้ามีการไหลของกระแสไฟฟ้า เพราะมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำ ในการผลักดันให้ประจุ 1 คูลอมบ์เคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในวงจรนั้นจะต้องมีการรับหรือปลดปล่อยพลังงานไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วยเสมอ เซลล์ไฟฟ้าหนึ่งต้องการพลังงาน 1 จูลในการที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุ 1 คูลอมบ์จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในเซลล์จะหมายความว่า จุดสองจุดนั้นมีความต่างศักย์เท่ากับ 1 โวลต์ ฉะนั้น 1 โวลต์จึงมีค่าเท่ากับ 1 จูลต่อคูลอมบ์ และทางไฟฟ้าเคมีมักจะ

แทนโวลเตจด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้า (emf) จากความหมายของพลังงานไฟฟ้าดังกล่าวข้างต้นทำให้เห็นได้ว่า

$$\text{งานทางไฟฟ้าสุทธิ } (W_{\text{elec.}}) = (\text{คูลอมบ์}) \times (\text{โวลต์}) \quad (2.4)$$

แต่งงานที่ได้จากเซลล์ไฟฟ้านั้นเพราะมีการถ่ายเทอิเล็กตรอน ดังนั้นจำนวนประจุในหน่วยคูลอมบ์จึงขึ้นกับจำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยาซึ่งทุก 1 โมลของอิเล็กตรอนจะมีปริมาณประจุเท่ากับ 96,487 คูลอมบ์ สมมติว่าในปฏิกิริยาของเซลล์ไฟฟ้ามีการถ่ายเทอิเล็กตรอน n โมล จะมีปริมาณประจุเท่ากับ $n \times 96,487$ หรือ nF คูลอมบ์ ในเมื่อ F คือค่าคงที่ฟาราเดย์เท่ากับ 96,487 คูลอมบ์ต่อโมล เมื่อเป็นเช่นนี้สมการที่ (2.4) จะเปลี่ยนเป็น

$$W_{\text{(elec.)}} = (nF)(E) = nFE \quad (2.5)$$

แต่งงานนี้จะเกิดขึ้นได้ต้องมี การลดพลังงานอิสระที่มีอยู่ในเซลล์ด้วย และในกรณีที่ปฏิกิริยาในเซลล์เกิดขึ้นอย่างผันกลับได้ การลดพลังงานอิสระ ($-\Delta G$) จะเท่ากับงานที่กระทำ ดังนั้น

$$\Delta G = -nEF \quad (2.6)$$

สมการนี้เป็นสมการที่มีความสำคัญมาก เพราะเป็นสมการที่เชื่อมระหว่างความรู้ทางอุณหพลศาสตร์เข้ากับไฟฟ้าเคมี ถ้าวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ได้แล้วจะสามารถหาสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ต่างๆ เช่น ΔG , ΔH , ΔS ได้ ในปฏิกิริยาหนึ่งๆ เครื่องหมายของ ΔG มีความสำคัญมากคือ ถ้าที่อุณหภูมิและความดันหนึ่งๆ ΔG มีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่าปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้เอง แต่ถ้าเป็นปฏิกิริยาที่เกิดไม่ได้เอง ΔG จะมีเครื่องหมายเป็นบวก ถ้าปฏิกิริยาอยู่ในภาวะสมดุล ΔG จะเท่ากับศูนย์ แต่ ΔG และแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ (2.6) ดังนั้นเครื่องหมายของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย่อมจะระบุให้ทราบว่าปฏิกิริยาในเซลล์นั้นเป็นแบบเกิดได้เองหรือเกิดไม่ได้เอง หรืออยู่ในภาวะสมดุล

2.4.3 ศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโตรดเดี่ยวและศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโตรดมาตรฐาน เนื่องมาจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์คือผลรวมทางพีชคณิตของศักย์ไฟฟ้าของแต่ละขั้วอิเล็กโตรด ในทางปฏิบัตินั้นไม่มีวิธีวัดศักย์ไฟฟ้าเฉพาะแต่ละขั้วเดี่ยวได้โดยตรง แต่ต้องวัดเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ ดังนั้นจึงต้องกำหนดศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโตรดมาตรฐานขึ้น คือกำหนดให้อิเล็กโตรดไฮโดรเจนเมื่ออยู่ที่สภาวะมาตรฐาน (คือผ่านก๊าซไฮโดรเจนที่มีความดัน 1 บรรยากาศ ลงไปในสารละลายที่มีลวดแพลทินัมจุ่มอยู่ และสารละลายนั้นมีไฮโดรเจนไอออนที่มีแอกติวิตีเท่ากับ 1 หรือมีความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตรโดยประมาณ) มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ

ตารางที่ 2.3 ความหมายของเครื่องหมายของ ΔG และ ΔE

(จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, คณะวิทยาศาสตร์, ภาควิชาเคมี, 2522)

ประเภทของปฏิกิริยา	เครื่องหมายของ ΔG	เครื่องหมายของ E
เกิดได้เอง	ลบ (-)	บวก (+)
เกิดไม่ได้เอง	บวก (+)	ลบ (-)
ที่ภาวะสมดุล	ศูนย์ (0)	ศูนย์ (0)

ศูนย์ที่ทุกอุณหภูมิ ศักย์ไฟฟ้านี้เรียกว่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดไฮโดรเจน เมื่อต้องการทราบศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดอื่น เช่น Cu/Cu^{2+} หรือ Zn/Zn^{2+} เป็นต้น ต้องนำอิเล็กโทรดเหล่านั้นมาจับคู่กับอิเล็กโทรดไฮโดรเจน และวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้จะเป็นศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดที่ต้องการทราบ ทั้งนี้เพราะศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดไฮโดรเจนมีค่าเท่ากับศูนย์นั่นเอง แต่ถ้าอิเล็กโทรดนั้นอยู่ในสภาวะมาตรฐานด้วย แรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์จะเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้ามาตรฐาน (E°_{cell}) และเป็นค่าเดียวกับศักย์มาตรฐานของอิเล็กโทรดเดี่ยว (E°) ที่มาจับคู่กับอิเล็กโทรดไฮโดรเจนมาตรฐาน โดยการทำเช่นนี้กับอิเล็กโทรดอื่นๆ ทำให้ได้ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ศักย์ไฟฟ้าที่แสดงในตารางที่ 2.4 แสดงให้เห็นแนวโน้มของขั้วอิเล็กโทรดที่จะรับอิเล็กตรอนว่ามีความสามารถมากน้อยเพียงใด หรือเรียกว่าเป็นการแสดงความสามารถในการเป็นตัวออกซิไดส์ (หรือตัวรีดิวซ์) เช่น ครึ่งปฏิกิริยา Li^+/Li มีค่า E° เป็นลบมาก แสดงว่า Li^+ มีความสามารถน้อยในการรับอิเล็กตรอนจึงเป็นตัวออกซิไดส์ที่อ่อนมาก แต่ครึ่งปฏิกิริยา F_2/F^- มีค่า E° เป็นบวกมาก แสดงว่า F_2 มีความสามารถสูงในการรับอิเล็กตรอนจึงเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรงมาก ในทางกลับกันโลหะ Li มีแนวโน้มที่จะให้อิเล็กตรอนได้ดีดังนั้นโลหะ Li จึงเป็นตัวรีดิวซ์ที่ดีมาก และ F^- มีแนวโน้มที่จะให้อิเล็กตรอนได้ยากจึงเป็นตัวรีดิวซ์ที่อ่อนมาก ส่วนอีกตัวอย่างคือ MnO_4^- กับ Fe^{2+} ในสารละลายกรดพบว่าจากตารางที่ 2.4 E° ของระบบ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+} = +0.77$ โวลต์ และ E° ของ $\text{MnO}_4^-/\text{Mn}^{2+} = +1.52$ โวลต์ แสดงว่าระบบ $\text{MnO}_4^-/\text{Mn}^{2+}$ มีแนวโน้มที่จะรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่าระบบ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ จึงเป็นตัวออกซิไดส์ที่ดีกว่า จากสูตรการหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ที่สภาวะมาตรฐานคือ

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดที่ 25 องศาเซลเซียส
(ทบวงมหาวิทยาลัย, 2528)

ครึ่งปฏิกิริยา	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน ของอิเล็กโทรด (โวลต์)
$F_2(g) + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons 2HF(aq)$	3.06
$O_3(g) + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons O_2(g) + H_2O$	2.07
$S_2O_8^{2-} + 2e \rightleftharpoons 2SO_4^{2-}$	2.01
$Co^{3+} + e \rightleftharpoons Co^{2+}$	1.842
$H_2O_2 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons 2H_2O$	1.776
$MnO_4^- + 4H^+ + 3e \rightleftharpoons MnO_2(s) + 2H_2O$	1.695
$Ce^{4+} + e \rightleftharpoons Ce^{3+}$	
$HClO + H^+ + e \rightleftharpoons \frac{1}{2}Cl_2(g) + H_2O$	1.63
$H_5IO_6 + H^+ + 2e \rightleftharpoons IO_3^- + 3H_2O$	1.60
$BrO_3^- + 6H^+ + 5e \rightleftharpoons \frac{3}{2}Br_2(l) + 3H_2O$	1.52
$MnO_4^- + 8H^+ + 5e \rightleftharpoons Mn^{2+} + 4H_2O$	1.51
$Mn^{3+} + e \rightleftharpoons Mn^{2+}$	
$ClO_3^- + 6H^+ + 5e \rightleftharpoons \frac{3}{2}Cl_2(g) + 3H_2O$	1.47
$PbO_2(s) + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons Pb^{2+} + 2H_2O$	1.455
$Cl_2(g) + 2e \rightleftharpoons 2Cl^-$	1.359
$Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ + 6e \rightleftharpoons 2Cr^{3+} + 7H_2O$	1.33
$Tl^{3+} + 2e \rightleftharpoons Tl^+$	1.25
$IO_3^- + 2Cl^- + 6H^+ + 4e \rightleftharpoons$ $ICl_2^- + 3H_2O$	1.24
$MnO_2(s) + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons Mn^{2+} + 2H_2O$	1.23
$O_2(g) + 4H^+ + 4e \rightleftharpoons 2H_2O$	1.229
$IO_3^- + 6H^+ + 5e \rightleftharpoons \frac{1}{2}I_2(s) + 3H_2O$	1.195
$IO_3^- + 6H^+ + 5e \rightleftharpoons \frac{1}{2}I_2(aq) + 3H_2O$	1.178 ^b
$SeO_4^{2-} + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2SeO_3 + H_2O$	1.15
$Br_2(l) + 2e \rightleftharpoons 2Br^-$	1.065
$Br_2(aq) + 2e \rightleftharpoons 2Br^-$	1.087 ^b
$ICl_2^- + e \rightleftharpoons \frac{1}{2}I_2(s) + 2Cl^-$	1.06
$V(OH)_4^+ + 2H^+ + e \rightleftharpoons VO^{2+} + 3H_2O$	1.00
$HNO_2 + H^+ + e \rightleftharpoons NO(g) + H_2O$	1.00
$Pd^{2+} + 2e \rightleftharpoons Pd(s)$	0.987
$NO_3^- + 3H^+ + 2e \rightleftharpoons HNO_2 + H_2O$	0.94
$2Hg^{2+} + 2e \rightleftharpoons Hg_2^{2+}$	0.920
$HO_2^- + H_2O + 2e \rightleftharpoons 3OH^-$	0.88
$Cu^{2+} + I^- + e \rightleftharpoons CuI(s)$	0.86
$Hg^{2+} + 2e \rightleftharpoons Hg(l)$	0.854
$Ag^+ + e \rightleftharpoons Ag(s)$	0.799
$Hg_2^{2+} + 2e \rightleftharpoons 2Hg(l)$	0.789
$Fe^{3+} + e \rightleftharpoons Fe^{2+}$	0.771
$H_2SeO_3 + 4H^+ + 4e \rightleftharpoons Se(s) + 3H_2O$	0.740
$PtCl_6^{2-} + 2e \rightleftharpoons Pt(s) + 4Cl^-$	0.73
$C_6H_4O_2(quinone) + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons$ $C_6H_4(OH)_2$	0.699
$O_2(g) + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2O_2$	0.682
$PtCl_6^{2-} + 2e \rightleftharpoons PtCl_4^{2-} + 2Cl^-$	0.68
$Hg_2SO_4(s) + 2e \rightleftharpoons 2Hg(l) + SO_4^{2-}$	0.615
$Sb_2O_5(s) + 6H^+ + 4e \rightleftharpoons 2SbO^+ + 3H_2O$	0.581
$MnO_4^- + e \rightleftharpoons MnO_4^{2-}$	0.564
$H_3AsO_4 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_3AsO_3 + H_2O$	0.559

ตารางที่ 2.4 -ต่อ-

ครึ่งปฏิกิริยา	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน ของอิเล็กโทรด (โวลต์)
$I_3^- + 2e \rightleftharpoons 3I^-$	0.536
$I_2(s) + 2e \rightleftharpoons 2I^-$	0.5355
$I_2(aq) + 2e \rightleftharpoons 2I^-$	0.620*
$Cu^+ + e \rightleftharpoons Cu(s)$	0.521
$H_2SO_3 + 4H^+ + 4e \rightleftharpoons S(s) + 3H_2O$	0.45
$Ag_2CrO_4(s) + 2e \rightleftharpoons 2Ag(s) + CrO_4^{2-}$	0.446
$VO^{2+} + 2H^+ + e \rightleftharpoons V^{3+} + H_2O$	0.361
$Fe(CN)_6^{3-} + e \rightleftharpoons Fe(CN)_6^{4-}$	0.36
$Cu^{2+} + 2e \rightleftharpoons Cu(s)$	0.337
$UO_2^{2+} + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons U^{4+} + 2H_2O$	0.334
$BiO^+ + 2H^+ + 3e \rightleftharpoons Bi(s) + H_2O$	0.32
$Hg_2Cl_2(s) + 2e \rightleftharpoons 2Hg(l) + 2Cl^-$	0.268
$AgCl(s) + e \rightleftharpoons Ag(s) + Cl^-$	0.222
$SO_4^{2-} + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2SO_3 + H_2O$	0.17
$BiCl_4^- + 3e \rightleftharpoons Bi(s) + 4Cl^-$	0.16
$Sn^{4+} + 2e \rightleftharpoons Sn^{2+}$	0.154
$Cu^{2+} + e \rightleftharpoons Cu^+$	0.153
$S(s) + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2S(g)$	0.141
$TiO^{2+} + 2H^+ + e \rightleftharpoons Ti^{3+} + H_2O$	0.1
$AgBr(s) + e \rightleftharpoons Ag(s) + Br^-$	0.095
$S_4O_6^{2-} + 2e \rightleftharpoons 2S_2O_3^{2-}$	0.08
$Ag(S_2O_3)_2^{3-} + e \rightleftharpoons Ag(s) + 2S_2O_3^{2-}$	0.01
$2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2(g)$	0.000
$Pb^{2+} + 2e \rightleftharpoons Pb(s)$	-0.126
$Sn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Sn(s)$	-0.136
$AgI(s) + e \rightleftharpoons Ag(s) + I^-$	-0.151
$CuI(s) + e \rightleftharpoons Cu(s) + I^-$	-0.185
$N_2(g) + 5H^+ + 4e \rightleftharpoons N_2H_5^+$	-0.23
$Ni^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ni(s)$	-0.250
$V^{3+} + e \rightleftharpoons V^{2+}$	-0.255
$Co^{2+} + 2e \rightleftharpoons Co(s)$	-0.277
$Ag(CN)_2^- + e \rightleftharpoons Ag(s) + 2CN^-$	-0.31
$Tl^+ + e \rightleftharpoons Tl(s)$	-0.336
$PbSO_4(s) + 2e \rightleftharpoons Pb(s) + SO_4^{2-}$	-0.356
$Ti^{3+} + e \rightleftharpoons Ti^{2+}$	-0.37
$Cd^{2+} + 2e \rightleftharpoons Cd(s)$	-0.403
$Cr^{3+} + e \rightleftharpoons Cr^{2+}$	-0.41
$Fe^{2+} + 2e \rightleftharpoons Fe(s)$	-0.440
$2CO_2(g) + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2C_2O_4$	-0.49
$Cr^{3+} + 3e \rightleftharpoons Cr(s)$	-0.74
$Zn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Zn(s)$	-0.763
$Mn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Mn(s)$	-1.18
$Al^{3+} + 3e \rightleftharpoons Al(s)$	-1.66
$Mg^{2+} + 2e \rightleftharpoons Mg(s)$	-2.37
$Na^+ + e \rightleftharpoons Na(s)$	-2.714
$Ca^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ca(s)$	-2.87
$Ba^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ba(s)$	-2.90
$K^+ + e \rightleftharpoons K(s)$	-2.925
$Li^+ + e \rightleftharpoons Li(s)$	-3.045

$$E_{\text{cell}}^{\circ} = E^{\circ} (\text{ขั้วบวก}) - E^{\circ} (\text{ขั้วลบ}) \quad (2.7)$$

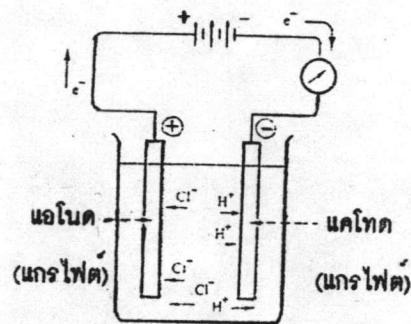
ในทำนองเดียวกันถ้าวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ที่สภาวะใด ๆ จะได้ความสัมพันธ์คล้ายกับสมการที่ (2.7) คือ

$$E_{\text{cell}} = E (\text{ขั้วบวก}) - E (\text{ขั้วลบ}) \quad (2.8)$$

2.4.4 อิเล็กโทรลิซิส จากแรงเคลื่อนไฟฟ้าสามารถบอกได้ว่าปฏิกิริยานั้น ๆ เกิดขึ้นได้เองหรือไม่ ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีค่าบวก ปฏิกิริยานั้นจะเกิดขึ้นเองได้ แต่ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของปฏิกิริยามีค่าเป็นลบ ปฏิกิริยานั้นจะเกิดขึ้นเองไม่ได้ เมื่อปฏิกิริยาดังกล่าวได้รับพลังงานจากแหล่งไฟฟ้าภายนอกจะสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นได้ กระบวนการเกิดปฏิกิริยาหรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งภายนอกเรียกว่า อิเล็กโทรลิซิส ส่วนประกอบสำคัญของกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสคือ แหล่งให้พลังงานไฟฟ้า, อิเล็กโทรดสองขั้ว (Electrode) และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ในส่วนของอิเล็กโทรดสองขั้วและสารละลายอิเล็กโทรไลต์เมื่อประกอบเข้าด้วยกันแล้วเรียกว่า เซลล์อิเล็กโทรลิติก สำหรับอิเล็กโทรดสองขั้วนั้น ขั้วหนึ่งจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงเรียกขั้วอิเล็กโทรดที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันว่า แอโนด (Anode) ส่วนขั้วอิเล็กโทรดที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันเรียกว่า แคโทด (Cathode) ตัวอย่างของเซลล์อิเล็กโทรลิติกคือ กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นพอประมาณในน้ำโดยใช้แกรไฟต์เป็นอิเล็กโทรด สารละลายกรดไฮโดรคลอริกจะแตกตัวออกเป็น H^+ และ Cl^- ไอออน ดังรูปที่ 2.1 จากรูปใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้า แล้วมีเส้นลวดต่อไปยังอิเล็กโทรดที่ทำด้วยแกรไฟต์พบว่าการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ในขณะที่เดียวกันอิเล็กโทรดที่ต่อกับขั้วลบของแบตเตอรี่เกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนขึ้นรอบ ๆ และฟุดขึ้นมาจากสารละลาย ส่วนอิเล็กโทรดที่ต่อกับขั้วบวกของแบตเตอรี่เกิดฟองก๊าซคลอรีนเช่นกัน การเกิดฟองก๊าซที่อิเล็กโทรดทั้งสองนี้แสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากได้รับพลังงานจากแบตเตอรี่ เมื่อปิดวงจรอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ออกจากขั้วลบของแบตเตอรี่ไปตามเส้นลวดจนถึงอิเล็กโทรดซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทด ไอออนบวก H^+ จะเคลื่อนที่มารับอิเล็กตรอนที่อิเล็กโทรดนี้ และถูกรีดิวซ์เป็นก๊าซไฮโดรเจนดังสมการที่ (2.9)



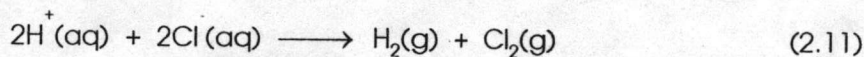
ส่วนไอออนลบ Cl^- จะให้อิเล็กตรอนที่อิเล็กโทรดที่ต่อกับขั้วบวกของแบตเตอรี่ซึ่งทำหน้าที่เป็นแอโนดดังสมการที่ (2.10)



รูปที่ 2.1 การทำงานของเซลล์อิเล็กโทรลิติก (ทบวงมหาวิทยาลัย, 2528)



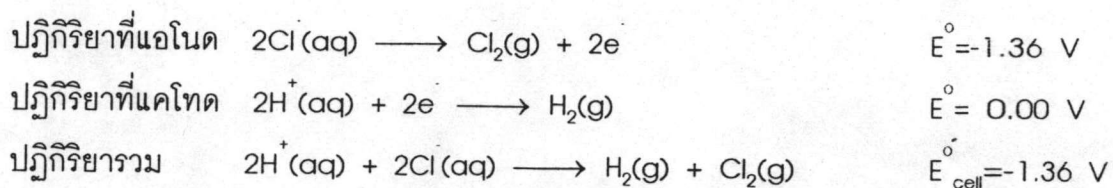
อิเล็กตรอนที่ได้จะเคลื่อนที่ไปสู่ขั้วบวกของแบตเตอรี่ทำให้ครบวงจร ปฏิริยาของเซลล์จึงได้จากผลบวกของสมการที่ (2.9) และ (2.10) ดังนี้



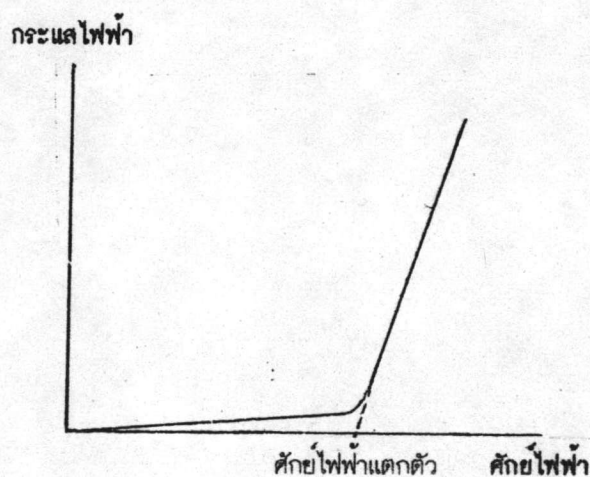
นอกจากตัวอย่างเซลล์อิเล็กโทรลิติกเบื้องต้นดังกล่าวแล้ว กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสยังมีความซับซ้อนอีกมากดังจะกล่าวต่อไป

2.4.5 ปรากฏการณ์และกฎที่สำคัญในกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส

2.4.5.1 ศักย์ไฟฟ้าแตกตัวและศักย์ไฟฟ้าเกินตัว (Overvoltage) ในการใช้ศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดทำนายการเกิดอิเล็กโทรลิซิสอาจจะไม่ถูกต้องเสมอไป โดยเฉพาะกรณีที่ปฏิริยาให้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซออกซิเจนหรือไฮโดรเจน เพราะมีศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ซึ่งศักย์ไฟฟ้าเกินตัวนี้เป็นปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนและขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างที่สำคัญคือ การถ่ายเทอิเล็กตรอนเกิดขึ้นช้าเพราะมีพลังงานกระตุ้นสูง, สารละลายบางชนิดมีความต้านทานมากและไม่เท่ากันในบริเวณต่างๆ และความเข้มข้นรอบอิเล็กโทรดมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาทำให้การนำไฟฟ้าลดลงได้ ดังนั้นจึงต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าที่ควรเพื่อทำให้เกิดการอิเล็กโทรลิซิส ปรากฏการณ์เกี่ยวกับศักย์ไฟฟ้าเกินตัวยังมีความเข้าใจกันน้อยซึ่งค่าที่ได้ไม่มีความแน่นอนและแตกต่างจากค่าศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรด ตัวอย่างเช่น เซลล์อิเล็กโทรลิติกของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตรและใช้แพลทินัมเป็นอิเล็กโทรด เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในเซลล์จำนวนหนึ่งจะได้ก๊าซไฮโดรเจนและคลอรีนที่อิเล็กโทรดตามสมการ



ศักย์ไฟฟ้ามีเครื่องหมายเป็นลบแสดงว่า ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นเองไม่ได้จึงต้องให้พลังงานไฟฟ้าจากภายนอกเพื่อทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้น เมื่อค่อยๆ เพิ่มศักย์ไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายจากศูนย์ไปเรื่อยๆ ในระยะแรกกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่น้อยมากจนกระทั่งศักย์ไฟฟ้ามากกว่า 1.36 โวลต์ หรืออาจมากถึง 1.60 โวลต์จึงจะเห็นฟองก๊าซเกิดขึ้นที่อิเล็กโทรดทั้งสอง และจากนี้กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นด้วยความรวดเร็วเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าให้สูงขึ้น และเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกัน ทำให้ลักษณะการเพิ่มขึ้นของทั้งกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าเป็นแบบเส้นตรงดังรูปที่ 2.2 ถ้าลากเส้นตรงตามแนวที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมาตัดกับแกนของศักย์ไฟฟ้า (ที่กระแสไฟฟ้าเท่ากับศูนย์) จะได้ศักย์ไฟฟ้าแตกตัวซึ่งเป็นศักย์ไฟฟ้าที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดอิเล็กโทรลิซิสขึ้นได้ ศักย์ไฟฟ้าแตกตัวเป็นค่าที่ไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับลักษณะของอิเล็กโทรดและสภาวะอื่นๆ ด้วย ค่านี้ควรจะเป็นค่าเดียวกับศักย์ไฟฟ้าที่สภาวะสมดุลระหว่างไฮดรอกไซด์และอิเล็กโทรดในสารละลายซึ่งเรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าผกกลับ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าศักย์ไฟฟ้าแตกตัวจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศักย์ไฟฟ้าผกกลับ ศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าเกินศักย์ไฟฟ้าผกกลับเรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวนั่นเอง



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าในเซลล์อิเล็กโทรลิติก (ทบทวมหาวิทยาลัย, 2528)

2.4.5.2 กฎของฟาราเดย์เกี่ยวกับอิเล็กโทรลิซิส ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) เป็นคนแรกที่ได้ค้นพบความสัมพันธ์แบบปริมาณวิเคราะห์ระหว่างปริมาณไฟฟ้าและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรดในกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส ความมากมายของการเปลี่ยนแปลงทางเคมีดังกล่าว มีความสัมพันธ์กับจำนวนอิเล็กตรอนที่มีการถ่ายเทในปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน เช่น การรีดิวซ์ไอออนของเงินและทองแดงให้เป็นโลหะตามสมการที่ (2.12) และ (2.13)



จะเห็นว่าจากสมการที่ (2.12) เงินหนึ่งโมลไอออนรับอิเล็กตรอนหนึ่งโมลได้โลหะเงินหนึ่งโมล ซึ่งหนัก 107.87 กรัม ซึ่งจะไปเคลือบอิเล็กโทรดที่เป็นแคโทด ส่วนสมการที่ (2.13) หนึ่งโมลไอออนของทองแดงทำปฏิกิริยากับสองโมลของอิเล็กตรอน เนื่องจากจำนวนอิเล็กตรอนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณไฟฟ้า เพราะฉะนั้นจะเห็นว่าในการรีดิวซ์ไอออนของทองแดงเพื่อให้ได้โลหะหนึ่งโมลจะต้องใช้ปริมาณไฟฟ้าถึงสองเท่าของปริมาณไฟฟ้าที่ใช่กับเงิน ปริมาณไฟฟ้าที่จะต้องผ่านเข้าไปในเซลล์อิเล็กโทรลิติกเพื่อให้อิเล็กตรอนหนึ่งโมลทำปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันเรียกว่า หนึ่งฟาราเดย์ ดังนั้นต้องใช้ปริมาณไฟฟ้าหนึ่งฟาราเดย์เพื่อทำให้ไอออนของโลหะเป็นโลหะเงินหนัก 107.87 กรัม และต้องใช้ปริมาณไฟฟ้าถึง 2 ฟาราเดย์เพื่อให้ได้ทองแดงหนัก 63.54 กรัม ปริมาณไฟฟ้ามีหน่วยเป็นคูลอมบ์หาได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$Q = It \quad (2.14)$$

เมื่อ Q เป็นปริมาณไฟฟ้าในหน่วยคูลอมบ์ (C)

I เป็นกระแสไฟฟ้าในหน่วยแอมแปร์ (A)

t เป็นเวลาในหน่วยวินาที (s)

$$\text{ดังนั้น } 1\text{C} = 1\text{As} \quad (2.15)$$

ปริมาณไฟฟ้าหนึ่งฟาราเดย์เป็นผลคูณของประจุไฟฟ้ากับจำนวนอิเล็กตรอนหนึ่งโมล เนื่องจากประจุของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.60210×10^{-19} คูลอมบ์ ดังนั้น

$$\begin{aligned} F &= eN_A = (1.60210 \times 10^{-19} \text{ C})(6.02252 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}) \\ &= 96,487 \text{ C mol}^{-1} \end{aligned}$$

เมื่อ F เป็นปริมาณไฟฟ้าในหน่วยฟาราเดย์

e เป็นประจุของอิเล็กตรอนในหน่วยคูลอมบ์

N_A เป็นเลขอาโวกาโดร

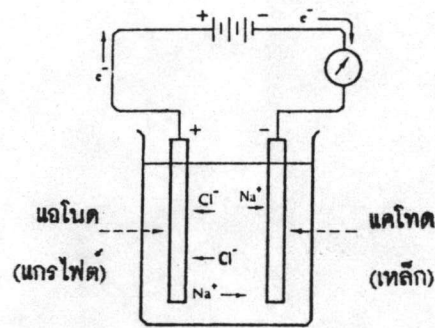
นั่นคือ 1 ฟาราเดย์เท่ากับ 96,487 คูลอมบ์ น้ำหนักของสารที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรดโดยการผ่านปริมาณไฟฟ้า 96,487 คูลอมบ์เข้าไปในเซลล์อิเล็กโทรลิติกเป็นน้ำหนักสมมูลของสารนั้น ซึ่งเป็นน้ำหนักที่เกิดขึ้นจากไอออนของโลหะรับอิเล็กตรอนหนึ่งโมล ดังนั้นสรุปได้ว่าปริมาณไฟฟ้าหนึ่งฟาราเดย์จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันในกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสหนักเท่ากับหนึ่งกรัมสมมูลเสมอ ในกรณีที่เซลล์อิเล็กโทรลิติกมีไอออนของเงินและทองแดง เมื่อผ่านปริมาณไฟฟ้าเข้าไปหนึ่งฟาราเดย์แล้ว เงินและทองแดงที่ได้จากปฏิกิริยารีดักชันที่แคโทดจะมีน้ำหนักเป็น 107.87 กรัม และ $63.54 \div 2 = 31.77$ กรัม ซึ่งเป็นน้ำหนักกรัมสมมูลของเงินและทองแดงตามลำดับ จากที่ได้กล่าวมาแล้วปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันมีความสัมพันธ์กับปริมาณไฟฟ้าหรือจำนวนฟาราเดย์ ความสัมพันธ์อาจสรุปเป็นกฎได้เรียกว่า กฎอิเล็กโทรลิซิสของฟาราเดย์ ดังนี้

- ก) มวลของสารที่เกิดขึ้นที่แอโนดหรือแคโทดในขณะที่เกิดอิเล็กโทรลิซิสเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในเซลล์
- ข) มวลของสารต่างกันที่เกิดขึ้นในระหว่างการอิเล็กโทรลิซิสที่ใส่ปริมาณไฟฟ้าเท่ากัน จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักสมมูลของสารนั้น ๆ

ในทางปฏิบัติเนื่องจากกระแสไฟฟ้าในวงจรไม่คงที่ ทำให้ค่าปริมาณไฟฟ้านั้นไม่ถูกต้องตามความเป็นจริง การวัดปริมาณไฟฟ้าจึงนิยมใช้เครื่องคูลอมมิเตอร์ชนิดที่มีอิเล็กโทรดทำด้วยโลหะเงินและใช้สารละลายที่มีไอออนของเงิน เมื่อต่อคูลอมมิเตอร์แบบอนุกรมเข้ากับเซลล์อิเล็กโทรลิติกแล้วอาศัยน้ำหนักของเงินที่เพิ่มขึ้นที่แคโทด จะสามารถคำนวณหาปริมาณไฟฟ้าที่ใส่ในการอิเล็กโทรลิซิสได้ ทั้งนี้เพราะว่าปริมาณไฟฟ้าหนึ่งฟาราเดย์ (96,487 คูลอมบ์) สามารถทำให้เงินแยกตัวออกได้หนัก 107.87 กรัม เพราะเมื่อผ่านปริมาณไฟฟ้าหนึ่งคูลอมบ์เข้าไป จะทำให้น้ำหนักของเงินเพิ่มขึ้นที่แคโทดเท่ากับ $107.87 \text{ กรัม} / 96,487 \text{ คูลอมบ์}$ หรือ 1.12×10^{-13} กรัมต่อคูลอมบ์

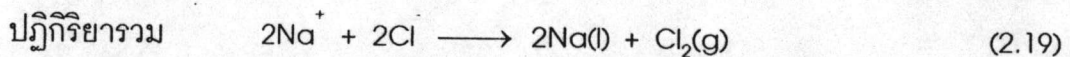
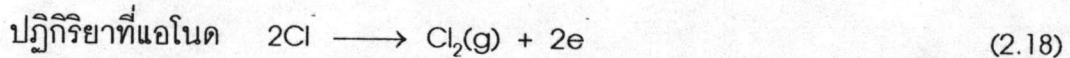
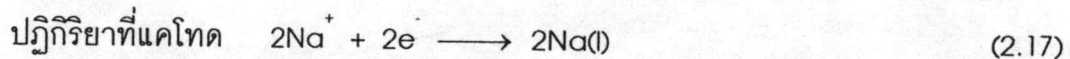
2.4.6 อิเล็กโทรลิซิสของสารประกอบไอออนิกที่หลอมเหลว สารประกอบ

ไอออนิกเมื่อหลอมเหลวจะมีไอออนบวกและไอออนลบที่เป็นองค์ประกอบของสารนั้นเท่านั้น เมื่อทำอิเล็กโทรลิซิสจึงสามารถทราบถึงการเปลี่ยนแปลงทางเคมีได้โดยตรง เช่น การอิเล็กโทรลิซิสของโซเดียมคลอไรด์ที่อยู่ในสภาพที่หลอมเหลวตามรูปที่ 2.3 นั้นใช้เหล็กเป็นอิเล็กโทรดที่



รูปที่ 2.3 การอิเล็กโทรลิซิสของโซเดียมคลอไรด์ที่หลอมเหลว
(ทบทวมหาวิทยาลัย, 2528)

ต่อกับขั้วลบ และแกรไฟต์ต่อกับขั้วบวกของแบตเตอรี่ เมื่อปิดวงจรโซเดียมไอออนจะถูกรีดิวซ์ที่แคโทดซึ่งทำด้วยเหล็ก แต่ละโซเดียมไอออนถูกรีดิวซ์ที่แคโทด คลอไรด์ไอออนจะถูกออกซิไดส์ที่แอโนดด้วยจำนวนเท่ากัน เนื่องจากอะตอมของคลอรีนที่เกิดขึ้นไม่สามารถอยู่โดยลำพังได้แต่จะอยู่ได้ในแบบโมเลกุล ดังนั้นการรับและการให้อิเล็กตรอนในปฏิกิริยานี้จึงต้องเป็นอย่างละ 2 อิเล็กตรอน



2.4.7 อิเล็กโทรลิซิสของสารละลายที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย เนื่องจาก

อิเล็กโทรลิซิสเป็นกระบวนการที่ใส่พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งภายนอก ความยากง่ายในการทำให้เกิดปฏิกิริยาจึงขึ้นอยู่กับความยากง่ายของการให้หรือการรับอิเล็กตรอนของไอออนที่อยู่ในสารละลายนั้นๆ ซึ่งความยากง่ายดังกล่าวจะดูได้จากแรงเคลื่อนไฟฟ้า ถ้าหากอยู่ในสภาวะมาตรฐานสามารถดูได้จากค่า E° ตามที่ปรากฏในตารางที่ 2.3 ในกรณีของสารละลายที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย จะเกิดการแข่งขันในการให้หรือการรับอิเล็กตรอนของไอออนต่างๆ ในสารละลาย และโมเลกุลของน้ำด้วย ในการพิจารณาจะแยกการอธิบายการแข่งขันในการเกิดปฏิกิริยาที่แคโทดและแอโนดออกจากกันดังต่อไปนี้

2.4.7.1 ปฏิกิริยาที่แคโทด เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรลิติกแล้ว ปฏิกิริยารีดักชันอาจเกิดขึ้นจากโมเลกุลของน้ำ หรือจากไอออนที่เป็นโลหะ

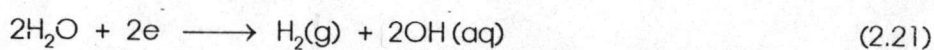
(หรือไอออนบวก) อย่างใดอย่างหนึ่ง คือ

ก) ไอออนบวกอาจถูกรีดิวซ์ให้เป็นโลหะ

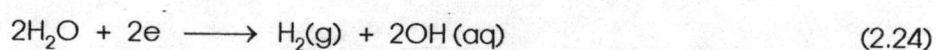


เมื่อ n เป็นประจุของไอออน ถ้าหากไอออนบวกอยู่ในลักษณะที่หลอมเหลวไอออนจะถูก รีดิวซ์เป็นโลหะเมื่อมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเพียงพอ

ข) โมเลกุลของน้ำอาจถูกรีดิวซ์ทำให้เกิดเป็นโมเลกุลของ ไฮโดรเจน



ก่อนที่จะพิจารณาเรื่องนี้ต่อไป จากสมการ $2H^+ + 2e \longrightarrow H_2(g)$ ในสารละลายที่เป็น กลางมีจำนวนโมลของ H_2O มากกว่าของ H^+ สมการที่สมมูลกับสมการดังกล่าว คือ $2H_2O + 2e \longrightarrow H_2(g) + 2OH(aq)$ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าสมการทั้งสองแตกต่างกันตรง ที่สมการหลังรวมการแตกตัวของน้ำเข้าด้วยเท่านั้น ดังจะเห็นได้จาก



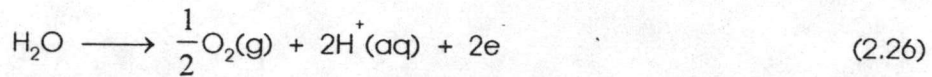
สมการที่ (2.22) ไม่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทอิเล็กตรอน แต่สมการที่ (2.23) และ (2.24) มี การถ่ายเทอิเล็กตรอน และมีความหมายอย่างเดียวกันและศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน สมการที่ (2.24) จึงใช้ในสารละลายที่เป็นกลาง จากค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สภาวะสมดุล ถ้า $(OH)=1$ โมลต่อ ลิตร ค่า $E^\circ = -0.83$ โวลต์ และถ้าหาก $(H^+)=10^{-7}$ โมลต่อลิตร มีค่า $E^\circ = -0.41$ โวลต์ ซึ่งหมายความว่าสำหรับสารละลายที่เป็นกลางต้องใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าไม่น้อยกว่า $-(-0.41)$ โวลต์เข้าไปจึงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาตามสมการที่ (2.21) ขึ้นได้ ส่วนถ้าสารละลาย เป็นเบสและมี $(OH) = 1$ โมลต่อลิตรจะต้องใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าไม่น้อยกว่า $-(-0.83)$ โวลต์จึง จะรีดิวซ์โมเลกุลของน้ำได้ เพราะฉะนั้นการแข่งขันระหว่างปฏิกิริยา (2.20) และ (2.21) นั้น ปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้นได้ก่อนจึงได้แก่ปฏิกิริยาที่ใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าน้อยกว่า (มีค่าศักย์ไฟฟ้า ของอิเล็กโตรดเป็นบวกมาก)

2.4.7.2 ปฏิกิริยาที่แอโนด ในทำนองเดียวกันกับปฏิกิริยาที่แคโทด ปฏิกิริยาออกซิเดชันอาจเกิดขึ้นในสารละลายจากโมเลกุลของน้ำ หรือจากไอออนลบ คือ

ก) ไอออนลบอาจถูกออกซิไดส์ให้เป็นโลหะ



ข) โมเลกุลของน้ำอาจถูกออกซิไดส์ให้เป็นโมเลกุลของออกซิเจน



จากค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สภาวะสมดุล และ $(H^+)=1$ โมลต่อลิตร มีค่า $E^\circ = +1.23$ โวลต์ หรือในแบบออกซิเดชันจะมี $E^\circ = -1.23$ โวลต์ ถ้าหากเป็นน้ำบริสุทธิ์ $(H^+)=10^{-7}$ โมลต่อลิตร มีค่า $E^\circ = +0.82$ โวลต์ หรือในแบบออกซิเดชันจะมี $E^\circ = -0.82$ โวลต์ ซึ่งจะต้องใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายไม่น้อยกว่าค่าเหล่านี้จึงจะทำให้ปฏิกิริยา (2.26) เกิดขึ้นได้ ส่วนปฏิกิริยา (2.25) และ (2.26) นั้น ปฏิกิริยาใดจะเกิดขึ้นก่อนขึ้นอยู่กับว่าปฏิกิริยาใดใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าน้อยกว่า (มีค่าศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเป็นบวกน้อย)

ในการทำนายการเกิดอิเล็กโทรลิซิสนั้นอาจแยกการแข่งขันออกได้เป็นปฏิกิริยาที่แอโนด และปฏิกิริยาที่แคโทด หรือพิจารณาปฏิกิริยารวมของทั้งสองครึ่งปฏิกิริยานั้นว่า คู่ใดที่ใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าน้อยที่สุด คู่หนึ่งจะเกิดอิเล็กโทรลิซิสขึ้นก่อน ซึ่งการพิจารณาทั้งสองแบบนี้มีความจำเป็นต้องใช้ตารางศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรด และถ้าทราบค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวด้วยแล้วจะทำให้การทำนายมีความแม่นยำยิ่งขึ้น

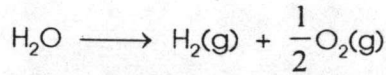
2.4.8 ตัวอย่างของอิเล็กโทรลิซิสในน้ำ โดยให้แพลทินัมสีดำเป็นอิเล็กโทรด

2.4.8.1 อิเล็กโทรลิซิสของสารละลายโซเดียมคลอไรด์

2.4.8.2 อิเล็กโทรลิซิสของสารละลายกรดซัลฟูริก

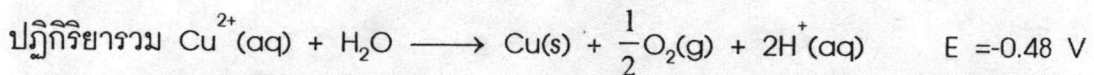
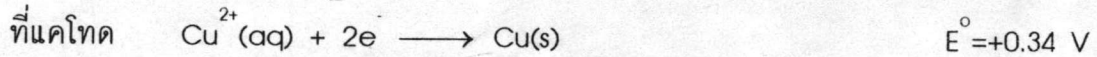
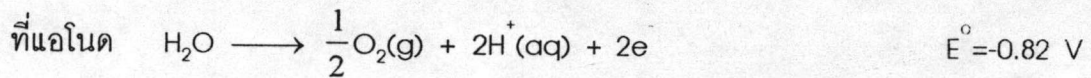
2.4.8.3 อิเล็กโทรลิซิสของสารละลายโซเดียมซัลเฟต

การแตกตัวของน้ำโดยไฟฟ้าไม่ได้จำกัดอยู่ในสารละลายในน้ำของโซเดียมซัลเฟต หรือกรดซัลฟูริก หรือโซเดียมคลอไรด์เท่านั้น แต่ครอบคลุมไปถึงกรณีของสารประกอบไอออนิกอื่นๆ ด้วย โดยทั่วไปไอออนของโลหะอัลคาไลน์ (Li^+ , Na^+ , K^+ , Rb^+ , Cs^+) และไอออนของโลหะอัลคาไลน์เอิร์ท (Ca^{2+} , Sr^{2+} , Ba^{2+}) จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ยากกว่าโมเลกุลของน้ำ ดังนั้นน้ำจึงถูกรีดิวซ์ก่อน ในทำนองเดียวกันไอออนลบที่มีออกซิเจนอยู่ด้วย เช่น SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^- และ ClO_4^- เมื่ออยู่ในสารละลายของน้ำจะไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน แต่โมเลกุลของน้ำจะเกิดออกซิเดชันขึ้นก่อน ดังนั้นการเกิดอิเล็กโทรลิซิสในน้ำของเกลือประเภทดังกล่าว เป็นต้นว่า $Ca(NO_3)_2$, $NaNO_3$, $KClO_4$, Na_3PO_4 , $CsNO_3$, $Ba(NO_3)_2$, K_2SO_4 จะมีสมการของอิเล็กโทรลิซิสเป็นแบบเดียวกันทั้งสิ้น คือ

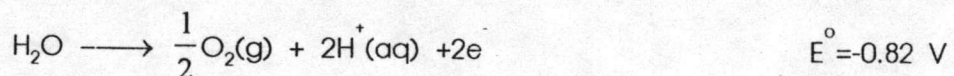
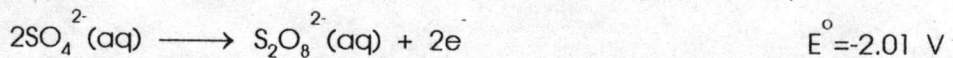


2.4.9 อิเล็กโทรลิตที่ใช้อิเล็กโทรดที่มีส่วนในการทำปฏิกิริยา จากที่ได้กล่าวมาแล้วถึงตอนนี้ ได้พิจารณาเฉพาะเซลล์อิเล็กโทรลิตที่ใช้อิเล็กโทรดแบบเฉื่อยซึ่งไม่มีส่วนในการทำปฏิกิริยา แต่ทำหน้าที่เพียงเป็นสะพานให้อิเล็กตรอนผ่านเท่านั้น เช่น ในกรณีของอิเล็กโทรลิตของสารละลายโซเดียมคลอไรด์หรือกรดซัลฟูริกโดยใช้แพลทินัมเป็นอิเล็กโทรด อิเล็กโทรดนี้ทำหน้าที่เพียงให้อิเล็กตรอนผ่านจากแหล่งไฟฟ้าภายนอกไปยังไอออนในสารละลาย และอีกนัยหนึ่งรับอิเล็กตรอนจากสารละลายให้ผ่านไปยังแหล่งไฟฟ้าภายนอกเท่านั้น แต่ยังมีเซลล์อิเล็กโทรลิตแบบอื่นที่อิเล็กโทรดมีส่วนในการทำปฏิกิริยาด้วย

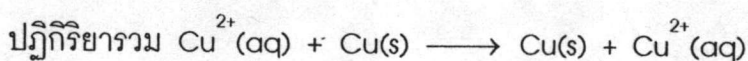
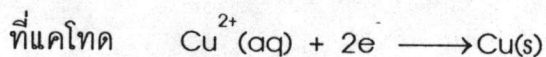
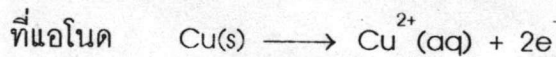
พิจารณาการเกิดอิเล็กโทรลิตของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตในน้ำ และใช้แพลทินัมสีดำเป็นอิเล็กโทรด สารละลายนี้มีลักษณะเป็นกลาง ปฏิกิริยาของเซลล์นี้เป็นดังนี้



ถ้าการทำอิเล็กโทรลิตดังกล่าวแทนที่จะใช้แพลทินัมเป็นอิเล็กโทรด แต่ใช้ทองแดงเป็นอิเล็กโทรดแทน ปฏิกิริยาที่แคโทดยังมีลักษณะเหมือนเดิมคือ ทองแดงจะไปเคลือบอิเล็กโทรดที่เป็นแคโทด แต่ที่แอโนดจะมีการแข่งขันของปฏิกิริยาต่างๆ ดังนี้

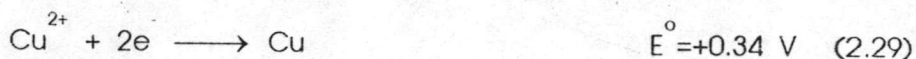


จากค่าศักย์ไฟฟ้าจะเห็นว่าทองแดงมีแนวโน้มถูกออกซิไดส์เป็น Cu^{2+} ได้ง่ายกว่าครึ่งปฏิกิริยาอื่นๆ ดังนั้นในการอิเล็กโทรลิตสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตในน้ำโดยใช้ทองแดงเป็นอิเล็กโทรดทั้งสองขั้วจึงเกิดปฏิกิริยาดังนี้



ซึ่งจะเห็นได้ว่าปฏิกิริยานี้จะไม่มีปฏิกิริยาสุทธิ แต่ทองแดงที่ทำหน้าที่เป็นแอโนดจะละลายเป็นไอออนไปในสารละลาย และขณะเดียวกันไอออนที่อยู่ในสารละลายจะไปเคลือบอิเล็กโทรดที่ทำหน้าที่เป็นแคโทด ความเข้มข้นของสารละลายจะไม่มีเปลี่ยนแปลง

โดยทั่วไปสำหรับอิเล็กโทรลิตของไอออนของโลหะในสารละลายที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย ไอออนที่มีค่าศักย์รีดักชันเป็นบวกมากที่สุดจะถูกรีดิวซ์ก่อน เช่น



ปฏิกิริยาตามสมการที่ (2.30) มีศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเป็นค่าบวกมากที่สุด ดังนั้นจะถูกรีดิวซ์ก่อนที่แคโทด

ส่วนในกรณีที่มีไอออนลบในสารละลาย (ที่เป็นกรด) เช่น



ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดขึ้นที่แอโนดของเซลล์อิเล็กโทรลิตที่มีค่า E° น้อยที่สุด ดังนั้นปฏิกิริยาตามสมการที่ (2.31) จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ก่อน คือ Br จะถูกออกซิไดส์ให้เป็น Br_2 ได้ก่อนตัวอื่นๆ

2.5 การประยุกต์ใช้ระบบไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำเสีย

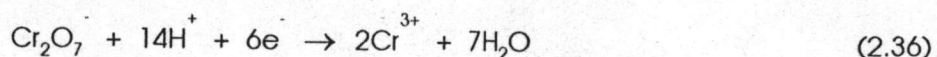
กระบวนการไฟฟ้าเคมีได้รับความสนใจมากในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมี และหลักการของกระบวนการไฟฟ้าเคมีคือ การใช้อิเล็กตรอนในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันแทนการใช้สารเคมีในการเกิดปฏิกิริยา

2.5.1 การแยกสารโดยทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า ในการบำบัดน้ำเสียที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบ ซึ่งเดิมจะอาศัยหลักการแรงโน้มถ่วงของโลกในการแยกน้ำมันในน้ำเสียซึ่งพบปัญหาคือ ถ้าในน้ำเสียมีปริมาณน้ำสูงมาก โมเลกุลของสบู่จะปรากฏเป็นอนุภาคเล็กๆ กระจายไปทั่วระหว่างโมเลกุลของน้ำเสีย ทำให้น้ำมันแตกเป็นเซลล์เล็กเซลล์น้อย ผลที่ตามมาคือทำให้แยกน้ำมันออกจากน้ำเสียได้ยากมาก ดังนั้นจึงได้มีการนำกระบวนการไฟฟ้าเคมีมาใช้ในการบำบัดโดยจะใช้อิเล็กโทรดที่มีส่วนในการทำปฏิกิริยา เช่น อะลูมิเนียม เป็นต้น เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าลงไปในเซลล์อิเล็กโทรลิติกแล้ว อิเล็กโทรดที่ทำหน้าที่เป็นแอโนดจะละลายเป็นไอออนไปในน้ำเสีย ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดตะกอนเบา ขณะที่แคโทดจะเกิดฟองก๊าซที่ช่วยในการลอยตัวของน้ำมัน ซึ่งเป็นการแยกสารโดยทำให้ลอยด้วยไฟฟ้านั่นเอง จากนั้นจึงได้มีการพัฒนาให้ระบบการบำบัดมี 2 ขั้นตอนคือ ขั้นที่หนึ่งเป็นการทำให้เกิดตะกอนเบาด้วยไฟฟ้าเพื่อให้เกิดการรวมตัวของน้ำมัน ขั้นที่สองเป็นการทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าเพื่อแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย การสลายตัวของอิเล็กโทรดไม่ได้ขึ้นกับปริมาณและขนาดของอิเล็กโทรด แต่ขึ้นกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัด ข้อดีของระบบนี้คือ ควบคุมง่าย, ประสิทธิภาพสูง และระบบบำบัดมีขนาดเล็ก (Ohsasa, Nakakura และ Sambuichi, 1991)

2.5.2 การกำจัดฟีนอลในน้ำเสียโดยวิธีไฟฟ้าเคมี การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีนี้จะเกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด และต้องดำเนินการที่ประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้าสูง ซึ่งขึ้นกับความว่องไวของสารอินทรีย์กับตัวทำปฏิกิริยา และความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ส่วนกำลังในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่แอโนดนั้นขึ้นกับธรรมชาติของวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรด เช่น ค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวของออกซิเจน เป็นต้น ตัวอย่างการเปรียบเทียบอิเล็กโทรดที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์ได้แก่ โทเทเนียมเคลือบ SnO_2 กับแพลทินัม โดยใช้ฟีนอลเป็นสารอินทรีย์ในการทดลองที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 50 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร จากนั้นจะทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของฟีนอลในแต่ละช่วงเวลาของการอิเล็กโทรลisisด้วยอิเล็กโตรด

ชนิดนั้นๆ พบว่า อัตราการกำจัดฟีนอลของอิเล็กโทรดทั้งสองชนิดคล้ายกันคือ กำจัดฟีนอลได้ทั้งหมดที่ 25-30 แอมแปร์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เดซิเมตร แต่อัตราการกำจัด TOC ด้วยไทเทเนียมเคลือบ SnO_2 จะมากกว่าคือ 90% ที่ 50 แอมแปร์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เดซิเมตร ขณะที่อัตราการกำจัด TOC ด้วยแพลทินัมเพียง 38% ทั้งนี้เนื่องจาก SnO_2 มีค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวของออกซิเจนสูงมาก และกำลังในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์ได้ดี (Comninellis, 1991) ดังนั้นในการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีไฟฟ้าเคมีให้มีประสิทธิภาพควรเลือกชนิดของอิเล็กโทรดให้เหมาะสมกับน้ำเสียด้วย

2.5.3 การกำจัดไอออนต่างๆ ในน้ำเสียโดยวิธีไฟฟ้าเคมี ได้ทำการทดลองการกำจัด Cr^{6+} จากน้ำหล่อเย็น และ CN ด้วยวิธีนี้จะเกิดตะกอนเบาของเหล็กที่ไม่ละลายน้ำหรือเกิดสารเชิงซ้อนโดยใช้เซลล์อิเล็กโทรลิติกที่มีเหล็กเป็นอิเล็กโทรด Cr^{6+} ถูกเปลี่ยนให้เป็น Cr^{3+} ซึ่งอยู่ในรูปที่มีความเป็นพิษน้อยกว่า ในระบบบำบัดน้ำเสียที่มีไอออนปนเปื้อนต่างๆ ต้องอาศัยวิธีการบำบัดหลายขั้นตอน เช่น การปรับ pH ให้เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ต้องการ, การเติมสารเคมีเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมี, การทำให้เป็นกลางเพื่อแยกตะกอนออกจากสารละลาย และการแยกตะกอนออกจากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว ในขณะที่การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีใช้เซลล์อิเล็กโทรลิติกที่มีเหล็กหรืออะลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรดเพื่อทำให้เกิดตะกอนเบาของเหล็กหรืออะลูมิเนียมในรูปออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ ซึ่งตะกอนเบานี้จะทำหน้าที่ดูดซับสารปนเปื้อนหรือของเสียไว้ ทำให้สามารถกำจัดของเสียออกจากระบบบำบัดน้ำเสียได้ อย่างไรก็ตามอิเล็กโทรดดังกล่าวมีข้อจำกัดคือ ไม่เหมาะที่จะใช้กับสารปนเปื้อนที่ทำให้เกิดเกลือของโลหะหนักอิเล็กโทรด จะเห็นได้ว่าการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีนี้ไม่ต้องการปรับ pH และไม่ต้องการเติมสารเคมีในการกำจัดไอออนต่างๆ หลักการของวิธีไฟฟ้าเคมีในการกำจัดไอออนเหล่านี้คือ เปลี่ยนเลขออกซิเดชันของไอออนให้อยู่ในรูปที่มีความเป็นพิษน้อยกว่า จากนั้นไอออนที่มีความเป็นพิษน้อยกว่าจะรวมตัวกับตะกอนเบาของเหล็กในทางกายภาพหรือทางเคมีเพื่อให้ได้สารประกอบเชิงซ้อน และถูกกำจัดออกจากระบบโดยการตกตะกอน ส่วนระบบการบำบัดแบบเดิมนั้นต้องทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในสารละลายที่มีความเป็นกรดสูงจึงสามารถเปลี่ยน Cr^{6+} เป็น Cr^{3+} ได้ดังสมการที่ (2.35) หรือเปลี่ยน CN เป็นเฟอร์โรไซยาไนด์และเฟอร์โรไซยาเนต (Abdo และ Sedahmed, 1991)



2.5.4 การกำจัดเชื้อโรคหรือแบคทีเรียในน้ำเสียจากชุมชน (Krause, 1979)

ในการนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับมาใช้ใหม่นั้น ปริมาณของแบคทีเรียในน้ำเป็นส่วนสำคัญหนึ่งในการพิจารณาถึงความเหมาะสมในการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งการเติมสารเคมีเป็นวิธีหนึ่งที่ยอมรับใช้ในการกำจัดเชื้อโรคหรือแบคทีเรียในน้ำ แต่ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นคือมีการใช้ปริมาณสารเคมีมากเกินไป ทำให้มีฤทธิ์ของสารเคมีตกค้างอยู่ในน้ำ ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีจึงเป็นวิธีหนึ่งที่เหมาะสมในการนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับมาใช้ใหม่ในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีเพื่อกำจัดแบคทีเรียนี้ต้องมีการปรับสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำเสียก่อนเข้าเซลล์อิเล็กโทรลิติกด้วยโซเดียมคลอไรด์หรือน้ำทะเลให้มีค่าการนำไฟฟ้าประมาณ 4-15 มิลลิซีเมน โซลิตีเอ็กโทรดแบบเสถียร เพื่อทำให้เกิดก๊าซคลอรีน, ไฮโดรเจน และออกซิเจน ก๊าซคลอรีนนี้ใช้กำจัดแบคทีเรียในน้ำเสียแต่ต้องมีปริมาณที่เหมาะสมไม่มากเกินไป เพราะอาจทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีปริมาณคลอรีนสูง ดังนั้นระบบจะเติมปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์หรือน้ำทะเลที่เหมาะสมเท่านั้น และจะใช้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วบางส่วนกลับมาเข้าเซลล์อิเล็กโทรลิติกอีก เพื่อรักษาค่าการนำไฟฟ้าของระบบไว้โดยปราศจากการเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์หรือน้ำทะเล ส่วนก๊าซที่ไม่ทำปฏิกิริยาใดๆ มีหน้าที่ในการพาสารแขวนลอยต่างๆ ขึ้นสู่ผิวหน้าในรูปของโฟม ทำให้ลดปริมาณสารแขวนลอยในน้ำเสียได้อีกด้วย

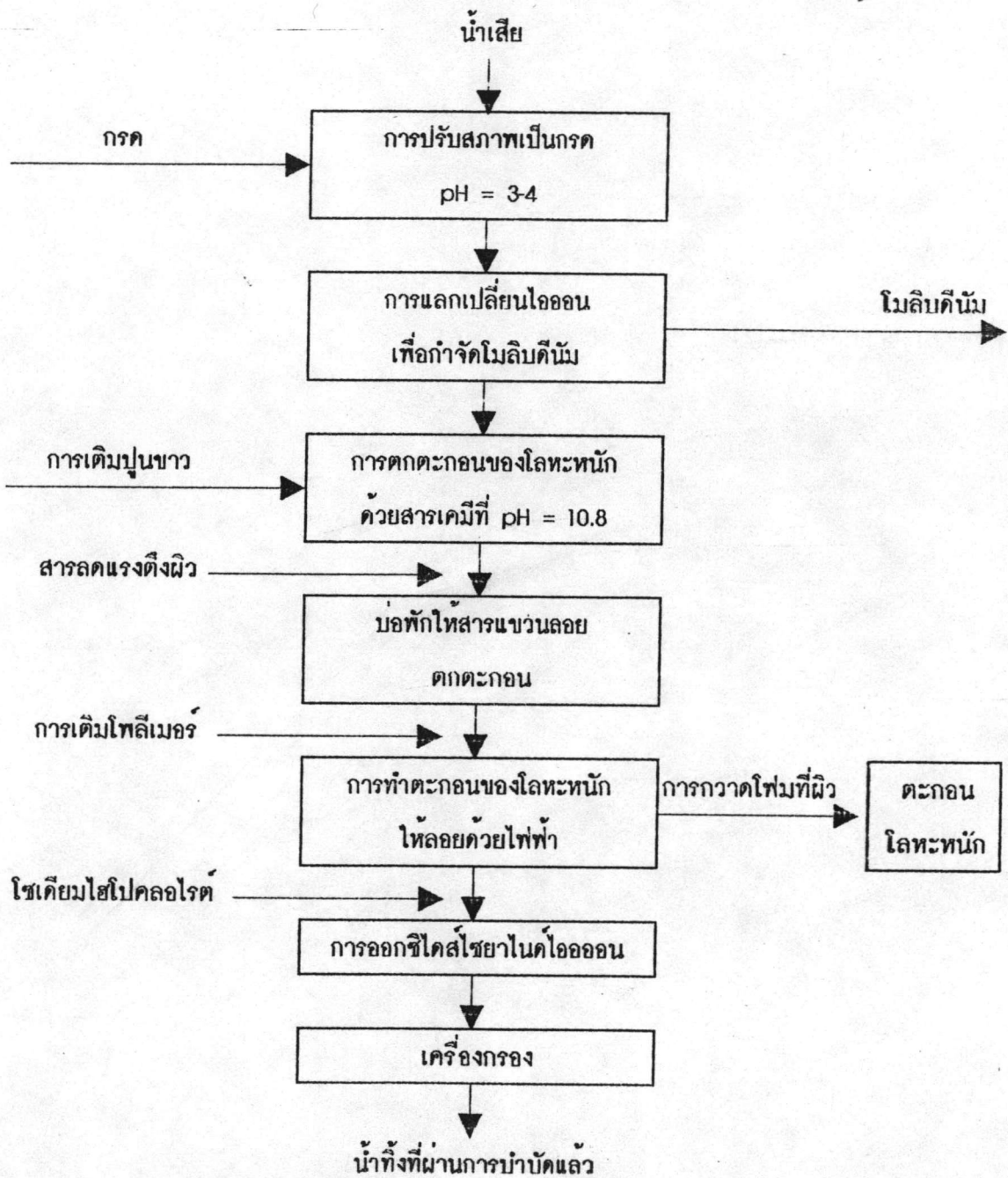
2.5.5 การกำจัดสีของน้ำเสีย เนื่องจากโรงงานอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น โรงงานผลิตสุรา, โรงงานผลิตเยื่อกระดาษ, โรงงานผลิตสี และโรงงานฟอกย้อม เป็นต้น มีปัญหาในการกำจัดสีของน้ำเสียซึ่งยังไม่มีวิธีบำบัดที่แน่นอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่ก่อให้เกิดสี วิธีที่ใช้ในการกำจัดสีมีหลายวิธี ตัวอย่างคือการเติมสารเคมีเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในการกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานฟอกเยื่อกระดาษ เช่น O_3 , Cl_2 และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ที่รุนแรง สิ่งที่เกิดขึ้นคือความไม่ปลอดภัยในการบำบัดน้ำเสียนั้นเอง, การเติมแคลเซียมออกไซด์เพื่อให้เกิดการตกตะกอนในการกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ และการใช้ถ่านกัมมันต์ในการกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีจะใช้น้ำกำจัดสีของน้ำเสียในแต่ละประเภทแตกต่างกันไป ดังนั้นจึงมีความพยายามในการหาวิธีที่สามารถกำจัดสีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมได้หลายประเภทและมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง วิธีไฟฟ้าเคมีซึ่งเปลี่ยนรูปไอออนของโลหะที่ก่อให้เกิดสีโดยอาศัยการถ่ายเทของอิเล็กตรอนในระบบ เรียกว่าเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งทำให้เลขออกซิเดชันของ

ไอออนของโลหะเปลี่ยนไปนั่นเอง และสามารถดูดซับสารแขวนลอยต่างๆ ที่อาจก่อให้เกิดสีด้วยตะกอนเบาในรูปของออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการแตกตัวของอิเล็กโทรด ทำให้เกิดการตกตะกอนขึ้น (Molina, Rigal และ Lacoste, 1991)

2.5.6 ตัวอย่างระบบการบำบัดน้ำเสียที่ประกอบด้วยไอออนของโลหะหนักและไซยาไนด์ไอออน รูปที่ 2.4 แสดงระบบบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักและไซยาไนด์ โดยใช้สารเคมีในการตกตะกอนไอออนของโมลิบดีนัม แล้วใช้ระบบไฟฟ้าเคมีในการแยกสารโดยทำให้ลอย ซึ่งใช้อิเล็กโทรดแบบเสถียรในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจน เกิดเป็นฟองก๊าซที่ช่วยในการแยกสาร จากนั้นไซยาไนด์ไอออนในน้ำเสียจะถูกออกซิไดส์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์คลอไรต์ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจะมีปริมาณโมลิบดีนัมไอออนลดลงมากดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ผลการบำบัดน้ำทิ้งโดยระบบกำจัดโลหะหนักและไซยาไนด์
(Laferty, Riper และ Zuundel, 1980)

ตัวแปรที่วิเคราะห์ (ppm)	น้ำเสียก่อนการบำบัด	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว
Fe	3-7	2
Mn	5-7	1
Cu	0.025-0.16	0.05
Zn	0.2-0.4	0.2
Pb	>0.01	<0.01
Mo	2-24	2
Cd	0.015	0.015
CN	0.2-0.5	0.025



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนในการบำบัดน้ำเสียที่ประกอบด้วยไอออนของโลหะหนัก และ ไซยาไนด์ไอออน (Laferty , Riper และ Zuundel, 1980)

2.6 ธรรมชาติที่มีผลต่อกระบวนการไฟฟ้าเคมี

ลักษณะสมบัติน้ำเสียมีผลต่อการทำงานของระบบไฟฟ้าเคมี ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องทำความเข้าใจธรรมชาติต่างๆ ที่มีผลต่อการทำงานของระบบไฟฟ้าเคมี

2.6.1 ค่าการนำไฟฟ้า มีผลโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ในกระบวนการไฟฟ้าเคมีจะใช้ไฟฟ้ากระแสตรง นั่นคือไฟฟ้าที่มีทิศทางการเคลื่อนที่หรือการไหลของอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดไปสู่เครื่องใช้ไฟฟ้าได้เพียงทิศทางเดียวเท่านั้น ส่วนความต่างศักย์ไฟฟ้าทำให้เกิดกระแสไหลในวงจรไฟฟ้า โดยจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากจุดที่เป็นประจุลบไปสู่จุดที่เป็นประจุบวก ในวงจรไฟฟ้าใดๆ ก็ตามจะมีสิ่งที่ต้านทานการไหลของอิเล็กตรอนหรือกระแสไฟฟ้าตลอดเวลาเรียกว่า ความต้านทานกระแสไฟฟ้า สิ่งที่ยังคับให้กระแสไฟฟ้าหรืออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปในวงจรเรียกว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้า ทั้งความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความต้านทานกระแสไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กันตามกฎหมายของโอห์ม ซึ่งกล่าวว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลไปในวงจรได้ จะมีค่าเท่ากับผลคูณของกระแสไฟฟ้าและความต้านทานกระแสไฟฟ้า สามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการดังสมการที่ (2.36)

$$V = I \times R \quad (2.36)$$

ดังนั้นความต้านทานกระแสไฟฟ้าในกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีคือ ความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์นั่นเอง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าการนำไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ตามสมการที่ (2.37)

$$R = \frac{l}{C \times A} \quad (2.37)$$

- เมื่อ
- R เป็นความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในหน่วยโอห์ม
 - l เป็นระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดในหน่วยเซนติเมตร
 - C เป็นค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในหน่วยโมห์ หรือซีเมน
 - A เป็นพื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโทรดที่สัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในหน่วยตารางเซนติเมตร

ซึ่งสามารถหาค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้จากเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า

2.6.2 สี (Clesceri, Greenbery และ Trussell, 1987) สีในน้ำอาจจะเป็นผลมาจากไอออนของโลหะ เช่น เหล็ก แมงกานีส เป็นต้น ซากพืชซากสัตว์ และของเสียในโรงงานอุตสาหกรรม ในการนำน้ำไปใช้ทั้งในระดับอุตสาหกรรมและการผลิตน้ำประปานั้นต้องเป็นน้ำที่มีสีไม่เป็นที่พึงรังเกียจ ส่วนน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ต้องกำจัดสีให้ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ ซึ่งเป็นปัญหาใหญ่ของระบบบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมด้วย ตามมาตรฐานของการบำบัดน้ำเสีย ความหมายของ 'สี' จะมีความหมายเดียวกับ 'Colour' หรือ 'True Colour' ซึ่งหมายถึงสีของน้ำที่กำจัดความขุ่นออกไปแล้ว ขณะที่ 'Apparent Colour' หมายถึงสีของน้ำที่มีสารแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ ในกรณีของน้ำเสียในอุตสาหกรรมที่มีสีพบว่า สีจะกระจายอยู่ทั่วไปในรูปของคอลลอยด์ หรือสารแขวนลอยซึ่งกรณีนี้จะทำให้ 'True Colour' ต่างจาก 'Apparent Colour' ชัดเจน ในการวิเคราะห์สีมีหลายวิธีให้เลือกแล้วแต่ความเหมาะสมซึ่งขึ้นกับคุณลักษณะของน้ำเสีย

2.6.2.1 Visual Comparison Method วิธีนี้เป็นการวิเคราะห์สีโดยการเปรียบเทียบสีของน้ำตัวอย่างกับสีของสารละลายมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้น สารละลายมาตรฐานที่ใช่คือ โพแทสเซียมคลอโรแพลททินेट วิธีนี้ควรใช้กับน้ำที่มีสีตามธรรมชาติ หรือน้ำดื่มไม่ควรใช้กับน้ำที่มีสีเข้ม เช่น น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

2.6.2.2 Spectrophotometric Method วิธีนี้เป็นการวิเคราะห์สีของน้ำตัวอย่างที่ผ่านการกรองแล้วเพื่อหา 'True Colour' โดยใช้ Spectrophotometer ในการวิเคราะห์สีที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับน้ำตัวอย่างนั้นๆ อยู่ในรูปของ %Transmittance ซึ่งใช้น้ำกลั่นเป็น blank วิธีนี้สามารถใช้กับน้ำดื่ม น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และน้ำเสียจากชุมชน

2.6.2.3 Tristimulus Filter Method วิธีนี้เป็นการวิเคราะห์สีของน้ำตัวอย่างที่ผ่านการกรองแล้วเพื่อหา 'True Colour' โดยใช้ Filter Photometer ในการวิเคราะห์สีซึ่งใช้น้ำกลั่นเป็น blank วิธีนี้สามารถใช้กับน้ำดื่ม, น้ำเสียจากชุมชน และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

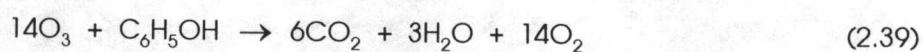
2.6.2.4 ADMI Tristimulus Filter Method (PROPOSED) วิธีนี้เป็นการวิเคราะห์สีของน้ำตัวอย่างที่ผ่านการกรองแล้วเพื่อหา 'True Colour' โดยการวิเคราะห์สีเพื่อ

เปรียบเทียบสีของน้ำตัวอย่างกับสีของสารละลายมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นด้วย Filter Photometer วิธีนี้สามารถใช้กับน้ำที่มีสีไม่แตกต่างจากสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมคลอโรแพลททินेट และน้ำเสียที่มีสีคล้ายกับสารละลายมาตรฐาน

2.6.3 สารอินทรีย์ ถ้าออกซิเจนและอากาศไม่สามารถทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารอินทรีย์ได้ที่อุณหภูมิห้อง แต่สามารถออกซิไดส์สารอินทรีย์ได้ที่อุณหภูมิสูง (มากกว่า 150 องศาเซลเซียส) และความดันสูง นอกจากนี้สารอินทรีย์ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้โดยอาศัยกระบวนการทางชีววิทยา เช่น ระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) เป็นต้น ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมมากในการบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม ส่วนการกำจัดสารอินทรีย์ด้วยสารเคมีนั้นเป็นอีกวิธีหนึ่งซึ่งสามารถทำได้ เช่น การใช้ก๊าซคลอรีนในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับกำมะถัน พบว่า ก๊าซคลอรีนจะไปทำปฏิกิริยาแทนที่ในโมเลกุลของกำมะถันได้ เมทิลคลอไรด์ตามสมการที่ (2.38)



ถ้าใช้ก๊าซคลอรีนทำปฏิกิริยาออกซิเดชันการสารอินทรีย์ในน้ำเสียพบว่า ปฏิกิริยานี้จะให้คลอโรฟอร์ม และสารไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ ซึ่งเป็นพิษ จึงใช้โอโซนแทนก๊าซคลอรีนเนื่องจากโอโซนสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้อย่างสมบูรณ์กับฟีนอลและสารอินทรีย์อื่น ๆ ดังสมการที่ (2.39)



นอกจากนี้ยังมีประโยชน์ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำเสียด้วย โดยปฏิกิริยานี้ใช้โอโซน 7.2 มิลลิกรัมต่อลิตรในการทำปฏิกิริยากับฟีนอล 1 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ในการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมพบว่าไม่สะดวกในการใช้สารเคมีเหล่านี้และยากในการเก็บรักษา เนื่องจากมีความเป็นพิษสูงและใช้ปริมาณมาก ดังนั้นจึงมีวิธีใหม่ในการกำจัดสารอินทรีย์ได้แก่ วิธีไฟฟ้าเคมี ซึ่งปฏิกิริยาการกำจัดสารอินทรีย์จะเกิดขึ้นที่แอโนด เช่น ไอออนลบถูกทำให้เป็นกลางหรืออาจจะให้อิเล็กตรอน ซึ่งในปฏิกิริยาที่มีศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยาต่ำจะเกิดปฏิกิริยาก่อน (Berger, 1987) เช่น



ในทางทฤษฎีจลนพลศาสตร์และอุณหพลศาสตร์แสดงว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรดจะให้อนุพันธ์อิสระซึ่งว่องไวในการทำปฏิกิริยา เช่น OH^- ซึ่งสูญเสียอิเล็กตรอนแต่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาใดๆ สามารถทำปฏิกิริยากันเอง หรือกับไอออน หรือสารประกอบ หรืออนุพันธ์อิสระ

อื่นๆ บริเวณใกล้อิเล็กโทรด รวมทั้งสามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารอินทรีย์ในน้ำเสียด้วย หรืออาจจะรวมตัวกับอนุพันธ์อิสระอื่นได้สารที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ และถ้าในน้ำเสียมีคลอไรด์ไอออนพบว่าวิธีไฟฟ้าเคมีจะทำให้เกิดก๊าซคลอรีนและอนุพันธ์ของคลอรีนที่แอนโอด ซึ่งเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์ได้อีกด้วย แต่การกำจัดสารอินทรีย์แบบสมบูรณด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีนี้ไม่เป็นที่นิยม เพราะการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบสมบูรณ์ของสารอินทรีย์เพื่อเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไม่ใช่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ง่าย จะเกิดขึ้นกับสารอินทรีย์บางตัวในอัตราการทำจัดต่ำและบางสภาวะเท่านั้น เช่น ในสภาวะที่โซลโทไนส์แพลทินัมเป็นอิเล็กโทรดในสารละลายกรดเข้มข้นหรือต่างเข้มข้นที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นต้น สภาวะเช่นนี้ไม่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากต้องใช้ปริมาณสารเคมีมาก, วัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรดมีราคาแพง และต้องใช้พลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยา ยิ่งไปกว่านั้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบสมบูรณ์ของสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ต้องการการถ่ายเทอิเล็กตรอนจำนวนมาก จึงไม่สามารถหลีกเลี่ยงการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงไปได้ ในบางครั้งเพียงการเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของสารอินทรีย์ให้เล็กลงจะสามารถลดความเป็นพิษได้แล้ว ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบสมบูรณ์ของสารอินทรีย์ต้องใช้อิเล็กโทรดที่มีพื้นที่ผิวมาก เช่น คาร์บอน เป็นต้น

2.6.4 ความเป็นกรดต่าง (pH) สารละลายในน้ำไม่ว่าจะเป็นกรด เป็นเบส หรือเป็นกลางย่อมประกอบด้วย H_3O^+ และ OH^- เสมอ โดยมีผลคูณของไอออนทั้งสองเท่ากับ 10^{-14} ดังนั้นถ้าทราบ (H_3O^+) เพียงอย่างเดียว สามารถบอกได้ว่าสารละลายเป็นกรด เป็นเบส หรือเป็นกลาง เนื่องจาก (H_3O^+) ในสารละลายมีค่าน้อยและเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้างจาก 1 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร ถึง 10^{-14} โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร การเขียนความเข้มข้นด้วยเลขยกกำลังที่ติดลบย่อมไม่สะดวกและผิดพลาดได้ง่าย ซอเรนเสนจึงเสนอแนะให้ใช้มาตราส่วนใหม่ที่สะดวกกว่าซึ่งเรียกว่า มาตราส่วน pH โดยมีนิยามว่า

$$pH = -\log(H^+) \quad (2.40)$$

$$(H^+) = 10^{-pH} \quad (2.41)$$

โดยที่สารละลายกรดจะมี pH น้อยกว่า 7 และสารละลายเบสจะมี pH มากกว่า 7 ส่วนสารละลายที่เป็นกลางจะมี pH เท่ากับ 7 มาตราส่วนนี้นอกจากจะใช้ออกความเข้มข้นของ H_3O^+ แล้ว ยังใช้ออกความเข้มข้นของ OH^- ในรูปของ pOH ได้อีกด้วยคือ

$$pOH = -\log(OH) \quad (2.42)$$

2.6.5 การตกตะกอน เราเคยทราบมาว่า AgCl , BaSO_4 และ Ag_2SO_4 ไม่ละลายในน้ำ แต่ที่จริงแล้วเกลือทั้ง 3 ชนิดนี้ละลายในน้ำได้เล็กน้อย การที่เกลือเหล่านี้หรือเกลืออื่นๆ ละลายในน้ำได้เล็กน้อยเพียงได้นั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของน้ำและอุณหภูมิ ทั้งนี้เพราะการละลายของของแข็งนั้นต้องให้พลังงานเพื่อแยกอนุภาคที่เป็นไอออนหรือโมเลกุลออกจากกัน โดยทั่วๆ ไปแล้วของแข็งจะละลายในน้ำที่ร้อนได้ดีขึ้น เพราะความร้อนจากน้ำจะให้พลังงานเพื่อใช้ในการแยกอนุภาคของแข็งออกจากกัน เช่น เมื่อเติม AgCl ลงในน้ำจะเกิดการละลายได้เล็กน้อย และแตกตัวให้ Ag^+ และ Cl^- เมื่อ AgCl ละลายจนได้สารละลายอิ่มตัวจะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับเป็น Ag^+ และ Cl^- จนเมื่ออัตราการละลายและอัตราการรวมตัวเท่ากัน ระบบจะเข้าสู่สภาวะสมดุลแต่ที่ต่างจากปฏิกิริยาของกรด-เบสคือ สมดุลกรด-เบสเกิดได้เร็วแต่การดำเนินเข้าสู่สภาวะสมดุลของการละลายเกิดได้ช้ามาก เมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลพบว่า

$$K_{sp} = (\text{Ag}^+)(\text{Cl}^-) \quad (2.43)$$

เมื่อ K_{sp} เป็นค่าคงที่ผลคูณการละลาย (เมื่ออุณหภูมิคงที่)

การใช้ K_{sp} เปรียบเทียบว่าสารประกอบชนิดใดจะมีการละลายได้ดีกว่ากันโดยถือว่าสารประกอบที่มีค่า K_{sp} สูงกว่าจะละลายได้มากกว่า

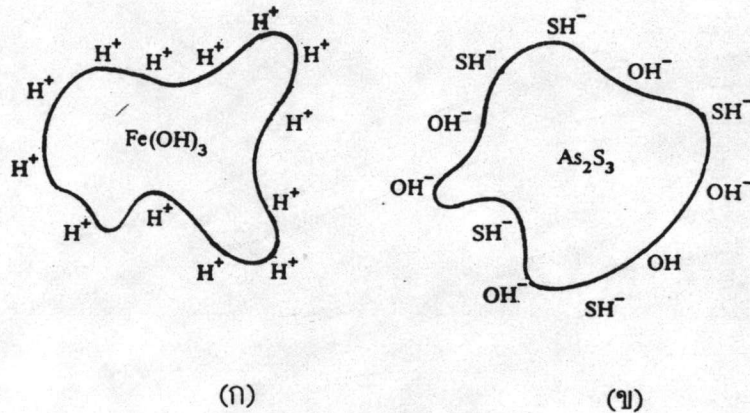
2.6.6 คอลลอยด์ เป็นสถานะที่สารใดสารหนึ่งอยู่ในรูปของอนุภาคเล็กๆ ขาวนวลลอยอยู่ในตัวกลางหรือตัวทำละลาย สถานะนี้เป็นประเภทเนื้อผสม อนุภาคเหล่านี้อาจจะละลายในตัวทำละลายได้บ้างแต่ไม่สามารถละลายได้หมด จึงปรากฏในรูปขาวนวลลอยอยู่ ซึ่งจะคงสถานะและไม่ยอมรวมตัวกันเกิดเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น อนุภาคคอลลอยด์มีขนาด 1-1,000 นาโนเมตร ถ้าพิจารณาจากเสถียรภาพอาจจำแนกคอลลอยด์ออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

2.6.6.1 คอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพในตัวเอง ตัวอย่างระบบคอลลอยด์ประเภทนี้ได้แก่ กาว แป้ง และสบู่ ซึ่งเกิดระบบคอลลอยด์ที่เสถียรในน้ำได้

2.6.6.2 คอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพเนื่องจากสารอื่น แบ่งเป็น

ก) คอลลอยด์ที่มีสารอื่นป้องกัน เช่น หยदन้ำมันไม่อาจเกิดระบบคอลลอยด์ในน้ำได้ แต่ถ้าเติมสบู่ลงไปบ้างแล้วคนให้ทั่ว ส่วนที่ขอบน้ำของสบู่จะละลายหยदन้ำมัน ซึ่งทำให้น้ำมันกระจายไปในน้ำในรูปของอนุภาคคอลลอยด์ด้วย กรณีเรียกสบู่ว่าเป็นอิมัลซิไฟ

ข) คอลลอยด์ที่ดูดซับไฮดรอกไซด์ เช่น Fe(OH)_3 อนุภาคคอลลอยด์ของ Fe(OH)_3 ดูดซับ H^+ ไว้ที่ผิวของอนุภาคดังแสดงในรูปที่ 2.5(ก) ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ Fe(OH)_3 จึงมีประจุบวก การดูดซับ H^+ ที่ผิวของอนุภาค Fe(OH)_3 จึงทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อนุภาคต่างๆ ของ Fe(OH)_3 มีโอกาสรวมตัวกันเป็นอนุภาคใหญ่ขึ้น อนุภาคคอลลอยด์ของ Fe(OH)_3 จึงอยู่ได้อย่างเสถียร อีกตัวอย่างหนึ่งได้แก่ ระบบคอลลอยด์ของ As_2S_3 ซึ่งถูกทำให้เสถียรโดย OH^- และ SH^- ดังรูปที่ 2.5(ข) ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ของ As_2S_3 จึงมีประจุลบ



รูปที่ 2.5 ระบบคอลลอยด์ที่ถูกทำให้เสถียรโดยการดูดซับไฮดรอกไซด์บวก และไฮดรอกไซด์ลบ (ทบทวนมหาวิทยาลัย, 2528)

- (ก) อนุภาคคอลลอยด์ที่เสถียรโดยดูดซับไฮดรอกไซด์บวก
(ข) อนุภาคคอลลอยด์ที่เสถียรโดยดูดซับไฮดรอกไซด์ลบ

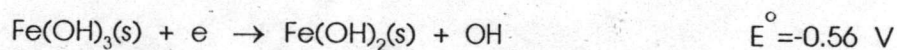
2.7 วัสดุที่ใช้ทำอิเล็กทรอนิกส์

2.7.1 อะลูมิเนียม เป็นโลหะหมู่เดียวกับแกลเลียม , อินเดียม และเทลลูเรียม อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีมากที่สุดในโลก อะลูมิเนียมจัดว่าว่องไวสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะอื่นๆ ได้ อะลูมิเนียมมีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +3 เมื่อโลหะให้อิเล็กตรอนออกไป 3 อิเล็กตรอน Al^{3+} มีขนาดเล็กมาก สารประกอบของโลหะที่มีเลขออกซิเดชัน +3 มักจะเป็นสารประกอบโคเวเลนต์ อย่างไรก็ตามเมื่ออยู่ในน้ำ Al^{3+} จะเกิดไฮดรอกไซด์และไฮโดรไลซิส เกิด

ซิลเฟต, ไนเตรต และไฮโดรเจนซัลไฟด์ของอะลูมิเนียมละลายน้ำได้ดี แต่ไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมไม่ละลายในน้ำออกไซด์และไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมมีสมบัติเป็นแอมโฟเทอริก

2.7.2 ไทเทเนียม เป็นธาตุหมู่เดียวกับเซอร์โคเนียม และแฮฟเนียม ไทเทเนียม มีเลขออกซิเดชันได้ทั้ง +2 , +3 และ +4 ไทเทเนียมเป็นโลหะทรานซิชันคือ มีลักษณะขาวคล้ายเงิน จุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูง แข็งเหนียว ดึงให้เป็นเส้นได้ เป็นโลหะทรานซิชันที่มีความหนาแน่นต่ำที่สุด ที่สภาวะปกติไทเทเนียมค่อนข้างเฉื่อยมาก ทนได้แม้แต่ก๊าซคลอรีนแห้ง แต่ถ้าอุณหภูมิสูงมากๆ (สูงกว่า 500 องศาเซลเซียส) จะสามารถทำปฏิกิริยาอย่างรุนแรงกับออกไซด์สารประกอบโคเวเลนต์ เช่น TiO_2 , $TiCl_4$ เป็นต้น สารประกอบของไทเทเนียมที่มีเลขออกซิเดชัน +2 และ +3 ถึงแม้ไทเทเนียมจะมีข้อดีหลายประการ แต่ไม่นิยมใช้เป็นวัสดุโครงสร้างแทนเหล็ก ทั้งนี้เพราะความว่องไวต่อปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงดังกล่าวมาแล้ว

2.7.3 เหล็ก เป็นโลหะแข็ง มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูง มีความว่องไวปานกลางต่อปฏิกิริยา สารประกอบของธาตุเหล็กมีเลขออกซิเดชัน +2 และ +3 เลขออกซิเดชันสูงๆ มีบ้างแต่ไม่เสถียรและเป็นตัวออกซิไดส์อย่างแรง ถ้าทิ้งไว้ในอากาศที่มีความชื้นมักจะกลายเป็นสนิมที่เรียกว่า สนิมเหล็ก เนื่องจากเกิดออกไซด์ที่มีน้ำผลึก $Fe_2O_3 \cdot xH_2O$ เครื่องมือเครื่องใช้ที่ทำด้วยเหล็กจึงต้องหาวิธีป้องกัน เช่น ทาสีกันสนิม เคลือบด้วยโลหะที่เหมาะสม (ดีบุก, สังกะสี, โครเมียม) หรือผสมโลหะบางชนิดลงไปเพื่อให้ได้เหล็กปลอดสนิม เมื่อเผาไหม้ในอากาศจะได้ออกไซด์ผสม $FeO \cdot Fe_2O_3$ หรือ Fe_3O_4 ซึ่งมีประโยชน์ใช้ฉาบผิวเหล็กเพื่อป้องกันสนิมได้ เหล็กสามารถเกิดสารประกอบกับออกไซด์หลายชนิดเมื่อให้ความร้อน แต่ไม่ทำปฏิกิริยากับไนโตรเจน เมื่ออยู่ในสารละลายเหล็กมักอยู่ในรูปของ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ปนกัน เนื่องจาก $Fe(II)$ ถูกออกซิไดส์โดยอากาศได้ง่ายโดยเฉพาะในสภาวะเป็นกลางหรือเป็นเบส ดังจะเห็นจากค่า E°



สารประกอบที่ปราศจากน้ำของ $Fe(II)$ ไม่มีสี แต่ถ้ามีน้ำหรืออยู่ในสารละลายจะมีสีเขียวอ่อนของไฮดรอกไซด์ $(Fe(H_2O)_6)^{2+}$ สารประกอบ $Fe(III)$ มักมีสมบัติเป็นกรดมากกว่าของ $Fe(II)$ ทั้งนี้ปรากฏว่า $Fe(III)$ ในสารละลายจะอยู่ในรูปของ $(Fe(H_2O)_6)^{3+}$ ซึ่งมีสีม่วงจางเมื่อ pH ต่ำมากๆ เท่านั้น มิฉะนั้นจะถูกไฮโดรไลส์กลายเป็น $(Fe(H_2O)_5(OH))^2+$ หรือไฮดรอกไซด์เชิงซ้อนคล้ายๆ กันนี้ ทำให้ได้สารละลายสีเหลือง

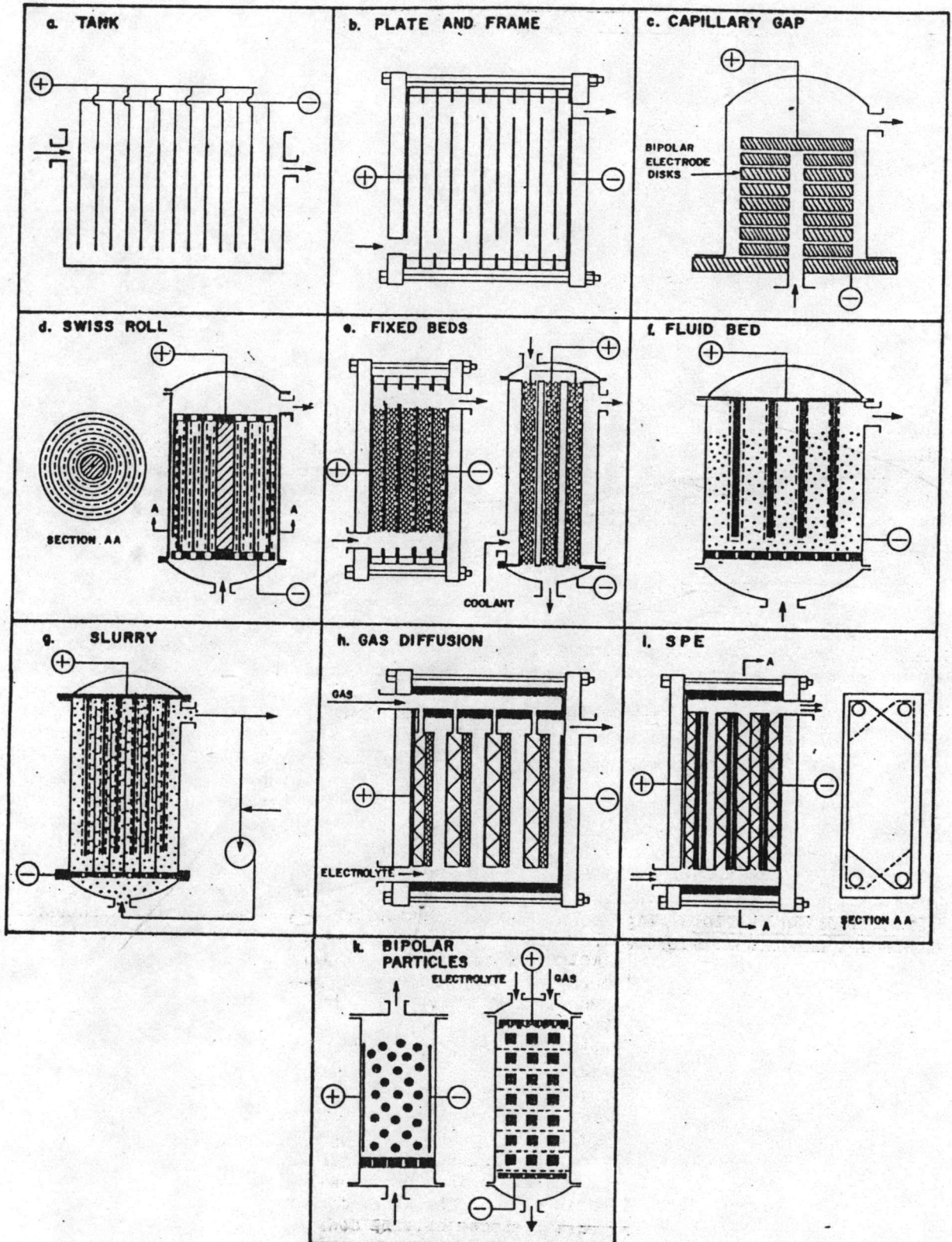
2.7.4 แพลทินัม มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูงมาก คือมีจุดเดือด 3,827 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 1,770 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงถึงความแข็งแรงของพันธะโลหะ และยังเป็นเหตุให้ไม่ไวต่อปฏิกิริยา นอกจากนี้สารประกอบของแพลทินัมมักไม่ค่อยเสถียร เมื่อให้ความร้อนสูงขึ้นจะสลายตัวเป็นโลหะ ดังนั้นจึงพบโลหะพวกนี้ในรูปของธาตุอิสระในธรรมชาติอยู่บ้าง นอกจากจะเกิดเป็นสินแร่กับธาตุอื่นๆ และมักจะพบอยู่ร่วมกันหลายธาตุ เป็นโลหะเจือแล้วและยังปรากฏรวมอยู่กับพวกธาตุ ทองแดง , เงิน และทองคำอีกด้วย แพลทินัมนี้มีน้อยมากจึงมีราคาแพงมาก แพลทินัมมีสีขาวและอ่อน มีเลขออกซิเดชันได้หลายค่าตั้งแต่ +2 ถึง +8 แต่ที่สำคัญคือ +2 ถึง +4 เท่านั้น เนื่องจากมีสมบัติในการนำความร้อนและไฟฟ้าดีมาก เจือยต่อปฏิกิริยาจึงมีประโยชน์ในการทำอิเล็กทรอนิกส์, เบ้าทนไฟ และภาชนะสำหรับงานที่อุณหภูมิสูงและต้องการความต้านทานการกัดกร่อนสูง

2.8 หลักการในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมี

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการไฟฟ้าเคมีมีหลายแบบดังรูปที่ 2.6 ขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่จะประยุกต์ใช้ โดยมีหลักการสำคัญในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการไฟฟ้าเคมีคือ

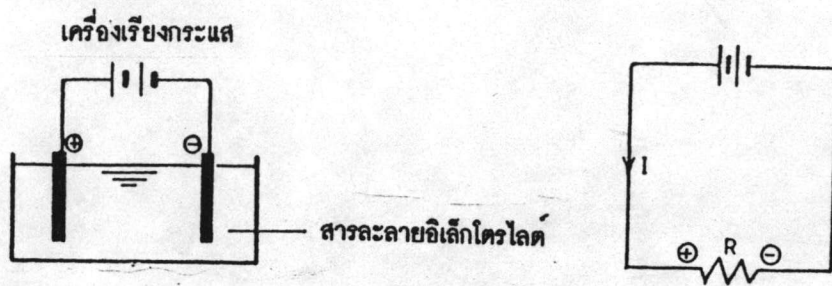
1. เครื่องปฏิกรณ์ควรเป็นแบบที่ง่ายที่สุด และค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด ถ้าเป็นไปได้ ควรจะหลีกเลี่ยงการออกแบบระบบที่มีการกวนผสม หรือการไหลของสารละลาย
2. เครื่องปฏิกรณ์ต้องสามารถเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีได้อย่างสมบูรณ์ก่อนจะผ่านสู่ขั้นตอนอื่น ในกรณีที่มีการกวนอื่นนอกจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีมาเกี่ยวข้องควรจะทำแยกจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี
3. เมื่อจำเป็นต้องมีการกวนผสมหรือการไหลของสารละลายต้องพิจารณาการถ่ายเทมวลสารเป็นอันดับแรก เช่น การกวนผสมอาจจะต้องใช้แผ่นกั้น หรือใบพัด
4. ควรออกแบบให้มีการกระจายความต่างศักย์ไฟฟ้าสม่ำเสมอทั่วพื้นผิวของอิเล็กโทรด
5. ควรออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดน้อย เพราะระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดยิ่งมากจะต้องใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง ซึ่งจะทำให้ค่าไฟฟ้าสูงขึ้น
6. การเลือกวัสดุที่ใช้ทำเครื่องปฏิกรณ์นั้นต้องคำนึงถึงสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่จะผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยสามารถคงทนไม่สึกกร่อนภายใต้สภาพการใช้งาน
7. การเลือกวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรดนั้นต้องคำนึงถึงปฏิกิริยาเคมีที่จะเกิดขึ้นให้สอดคล้องกับความต้องการของระบบบำบัด และปฏิกิริยาข้างเคียงที่อาจเกิดขึ้นได้ เช่น แกรไฟต์ไม่นิยมใช้ทำอิเล็กโทรดเนื่องจากจะถูกออกซิไดส์ด้วย CO_2 และมีราคาแพง เป็นต้น
8. การวางอิเล็กโทรดในเครื่องปฏิกรณ์นั้นมี 2 แบบขึ้นกับความต้องการของวิธีที่ใช้ในการบำบัด ถ้าระบบบำบัดต้องการกำจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีทำให้ลอยควรวางอิเล็กโทรดในแนวตั้ง เพื่อให้ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเป็นตัวพาสารแขวนลอยดังกล่าวขึ้นมาพร้อมกับตะกอนเบาที่เกิดขึ้น แต่ถ้ระบบบำบัดต้องการกำจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีตกตะกอนควรวางอิเล็กโทรดในแนวนอนโดยให้ขั้วแอโนดอยู่ด้านล่าง

(Mendia,



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างของเครื่องปฏิกรณ์แบบต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการไฟฟ้าเคมี (Oloman, 1985)

9. การจัดเรียงอิเล็กโทรดที่ง่ายที่สุดคือ มีแผ่นอิเล็กโทรดเพียง 1 คู่โดยขั้วหนึ่งเป็นแอโนดและอีกขั้วเป็นแคโทดดังรูปที่ 2.7 ซึ่งแบบนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้เนื่องจากการนำไปประยุกต์ใช้นั้นต้องการขนาดใหญ่ พื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยามาก ทำให้ต้องมีการจัดเรียงตัวของแผ่นอิเล็กโทรดแบบต่างๆขึ้น ในกรณีที่ต้องใช้อิเล็กโทรดมากกว่า 1 คู่ สามารถเลือกวิธีต่อทางไฟฟ้าได้ 2 แบบคือ



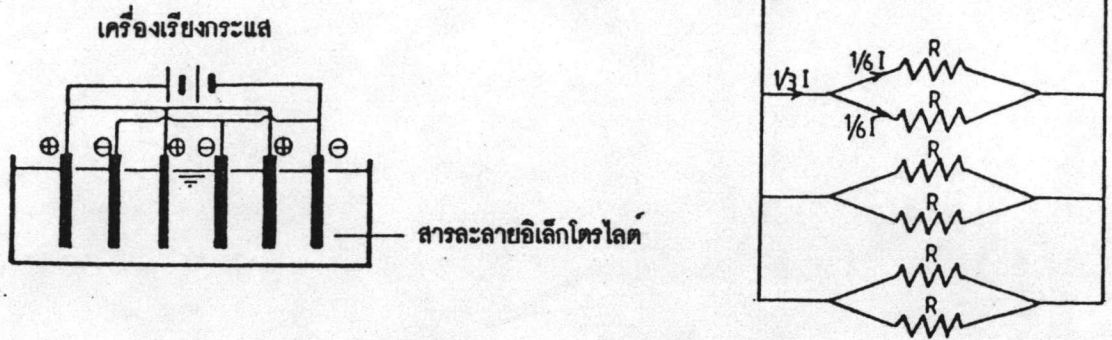
รูปที่ 2.7 การจัดเรียงอิเล็กโทรดโมโนโพลาร์-เซลล์เดี่ยว

(Pretorius, Johannes และ Lempert, 1991)

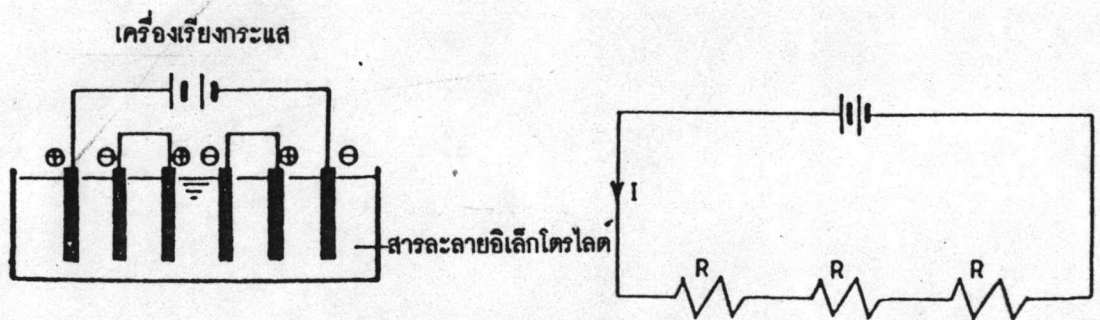
9.1 โมโนโพลาร์ มีจุดเชื่อมอิเล็กโทรดในแต่ละแผ่นทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด ซึ่งสลับกันขั้วละแผ่นโดยที่ผิวหน้าทั้งสองด้านของอิเล็กโทรดแผ่นเดียวกันจะมีขั้วเดียวกัน ในทางไฟฟ้านั้นแผ่นอิเล็กโทรดจะมีการจัดเรียงเซลล์ได้ 2 แบบ คือ

9.1.1 แบบขนาน กระแสไฟฟ้าจะถูกแบ่งไปในแต่ละเซลล์ขึ้นอยู่กับความต้านทานภายในของเซลล์นั้นๆ โดยที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าของระบบจะเท่ากัน ดังรูปที่ 2.8

9.1.2 แบบอนุกรม มีการจัดเรียงอิเล็กโทรดคล้ายเซลล์เดี่ยวหลายๆ เซลล์มาต่อกันโดยมีจุดเชื่อมอิเล็กโทรดดังรูปที่ 2.9

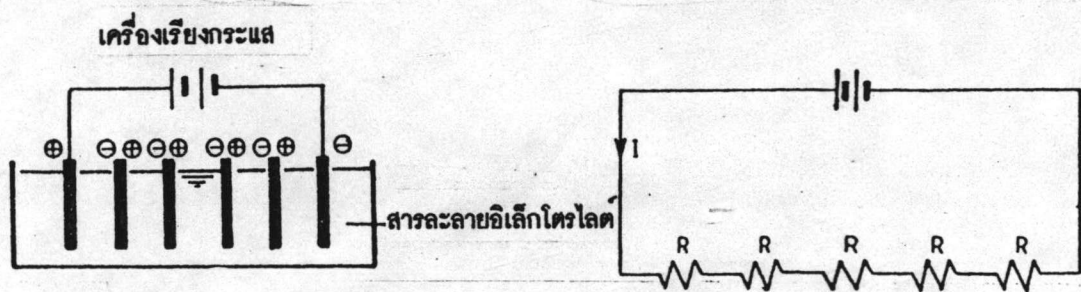


รูปที่ 2.8 การจัดเรียงอิเล็กโทรดโมโนโพลาร์แบบขนาน
(Pretorius และคณะ, 1991)



รูปที่ 2.9 การจัดเรียงอิเล็กโทรดโมโนโพลาร์แบบอนุกรม
(Pretorius และคณะ, 1991)

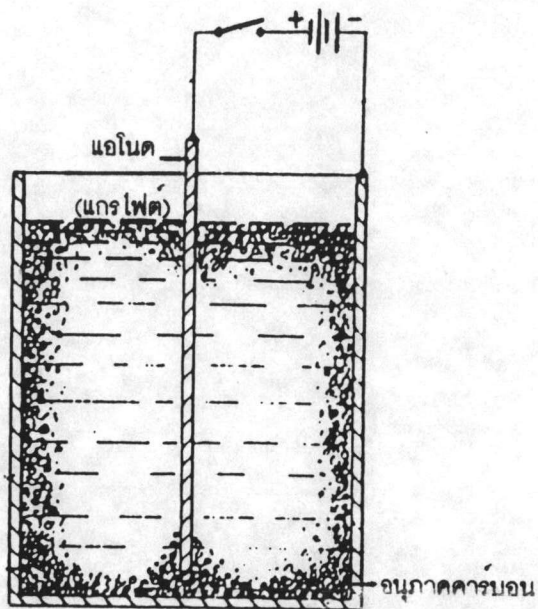
9.2 ไบโพลาร์ มีจุดเชื่อมอิเล็กทรอนิกส์เพียง 2 จุดเท่านั้น เฉพาะแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ปลายนอกสุดดังรูปที่ 2.10 แต่ละแผ่นของอิเล็กทรอนิกส์มีด้านหนึ่งเป็นขั้วลบซึ่งทำหน้าที่เป็นแอโนดและอีกด้านหนึ่งเป็นขั้วบวกซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทด ในทางไฟฟ้านั้นแผ่นอิเล็กทรอนิกส์จะมีการจัดเรียงเซลล์แบบอนุกรม โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านต้องการความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงกว่า เนื่องจากความต้านทานที่สูงกว่าของเซลล์ซึ่งต่อกันแบบอนุกรม แต่จะมีกระแสไฟฟ้าของระบบเท่ากัน นั่นคือมีกระแสไฟฟ้าเดียวกันไหลผ่านอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด ซึ่งการจัดเรียงอิเล็กทรอนิกส์แบบนี้ทำให้ง่ายต่อการติดตั้งและบำรุงรักษาในขณะที่ทำการใช้งาน



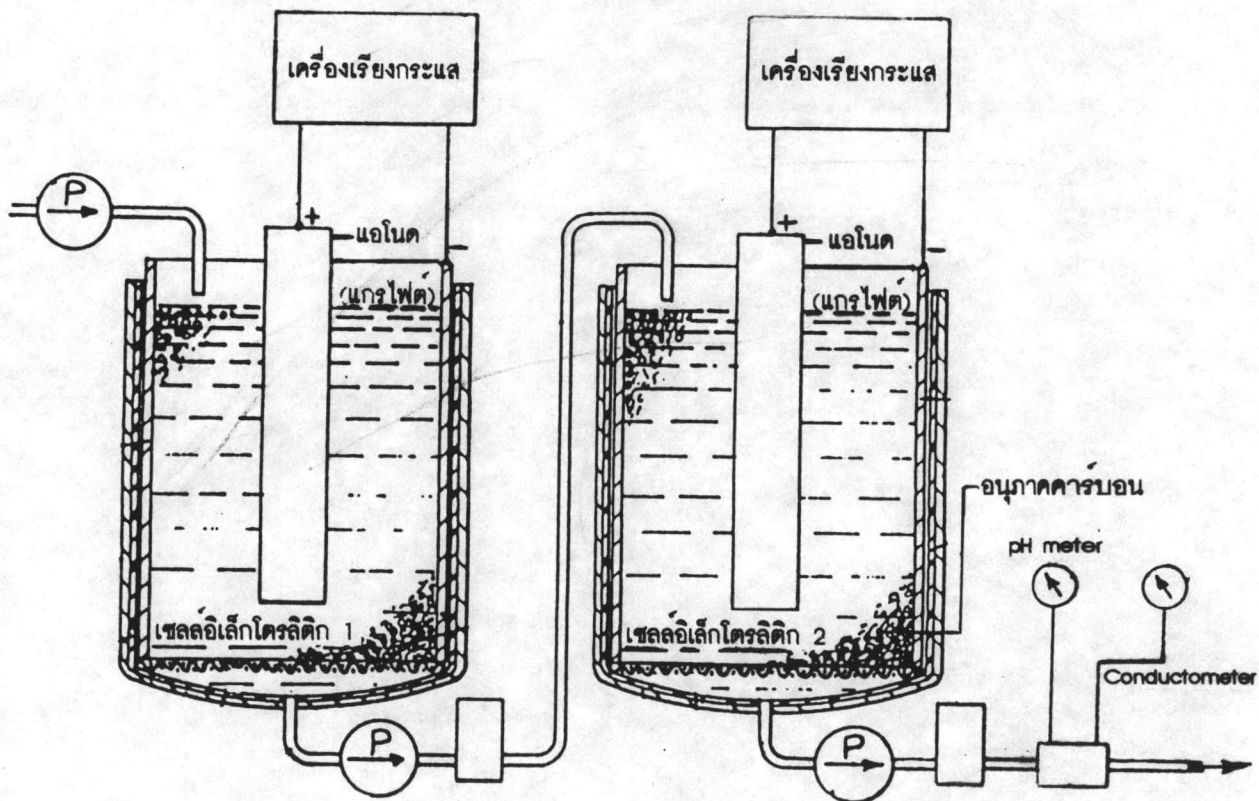
รูปที่ 2.10 การจัดเรียงอิเล็กทรอนิกส์ไบโพลาร์ (Pretorius และคณะ, 1991)

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Clarence (1971) ทดลองในเซลล์อิเล็กโทรลิติกที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก แนวตั้ง ทำด้วยเหล็ก ปริมาตรใช้งาน 1 ลิตร ภายในบรรจุคาร์บอนขนาด 46 mesh ปริมาตร 400 มิลลิลิตร ใช้แกรไฟต์เป็นแอโนดมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.25 นิ้วตั้งอยู่กลางเซลล์อิเล็กโทรลิติกดังรูปที่ 2.11 ใช้สารละลายซิงค์ไซยาไนด์ ปริมาตร 200 มิลลิลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ให้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้าระบบจากเครื่องเรียงกระแสเป็นระยะเวลา 45 นาที ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 โวลต์ จากนั้นทำการกรองสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อกำจัดซิงค์ไฮดรอกไซด์ จากการทดลองพบว่ากระแสไฟฟ้าไม่คงที่คือ เริ่มต้น 2 แอมแปร์และลดลงเหลือ 0.5 แอมแปร์ในตอนสุดท้ายของการทดลอง pH ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ลดลงจาก 12.4 เป็น 8.7 เมื่อนำสารละลายที่ผ่านการกรองมาทดสอบหาไซยาไนด์ด้วย Prussian blue test แล้วไม่พบ แสดงว่าระบบบำบัดนี้สามารถกำจัดไซยาไนด์ไอออนได้ 100% จากการทดลองนี้ใช้เซลล์อิเล็กโทรลิติกทำด้วยเหล็กเป็นแคโทด แกรไฟต์ที่ลอยอยู่ตรงกลางเซลล์อิเล็กโทรลิติกเป็นแอโนด โดยที่อนุภาคของคาร์บอนทำหน้าที่เป็นตัวต้านทานระหว่างอิเล็กโทรด แต่ละอนุภาคเสมือนเซลล์อิเล็กโทรลิติกเล็กๆหลายเซลล์คือ มีทั้งแคโทดและแอโนดในแต่ละเซลล์นั่นเอง อนุภาคของคาร์บอนต้องมีขนาดไม่เล็กมากหรือเป็นผง มิฉะนั้นจะเกิดปัญหาในการแยกตะกอนเบาจากการทดลองกับอนุภาคของคาร์บอน นอกจากนี้ Clarence ได้ทำการทดลองแบบต่อเนื่องในเซลล์อิเล็กโทรลิติกจำนวน 2 เซลล์ที่ต่อแบบอนุกรม ในแต่ละเซลล์ทำด้วยเหล็กกล้าปลอดสนิมปริมาตรใช้งาน 30 แกลลอน มีแผ่นพลาสติกสำหรับรับอนุภาคของคาร์บอนที่ด้านล่างของเซลล์อิเล็กโทรลิติก ใช้แกรไฟต์เป็นแอโนดตั้งอยู่ตรงกลางของเซลล์อิเล็กโทรลิติกดังรูปที่ 2.12 ให้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้าระบบจากเครื่องเรียงกระแส ใช้สารละลายจากโรงงานชุบโลหะ ที่มี Cr^{6+} ปริมาณ 1,000 ppm มีสีเหลืองปนน้ำตาล pH 1.5 ความต่างศักย์ไฟฟ้า 12 โวลต์ ในแต่ละเซลล์ กระแสไฟฟ้า 46-48 แอมแปร์ โดยเริ่มทำการทดลองแบบกะเป็นระยะเวลา 15 นาที จากนั้นป้อนสารละลายอิเล็กโทรไลต์เข้าไปในเซลล์แรกที่อยู่ติดการไหล 1 แกลลอนต่อ นาทีด้วยเครื่องสูบน้ำ สารละลายที่ผ่านการบำบัดในเซลล์แรกจะไหลออกทางด้านล่างผ่านเครื่องสูบน้ำเข้าเครื่องกรอง เพื่อทำการแยกตะกอนของโครเมียมไฮดรอกไซด์ สารละลายใส



รูปที่ 2.11 เซลล์อิเล็กโทรลิติกเดี่ยว (Clarence, 1971)

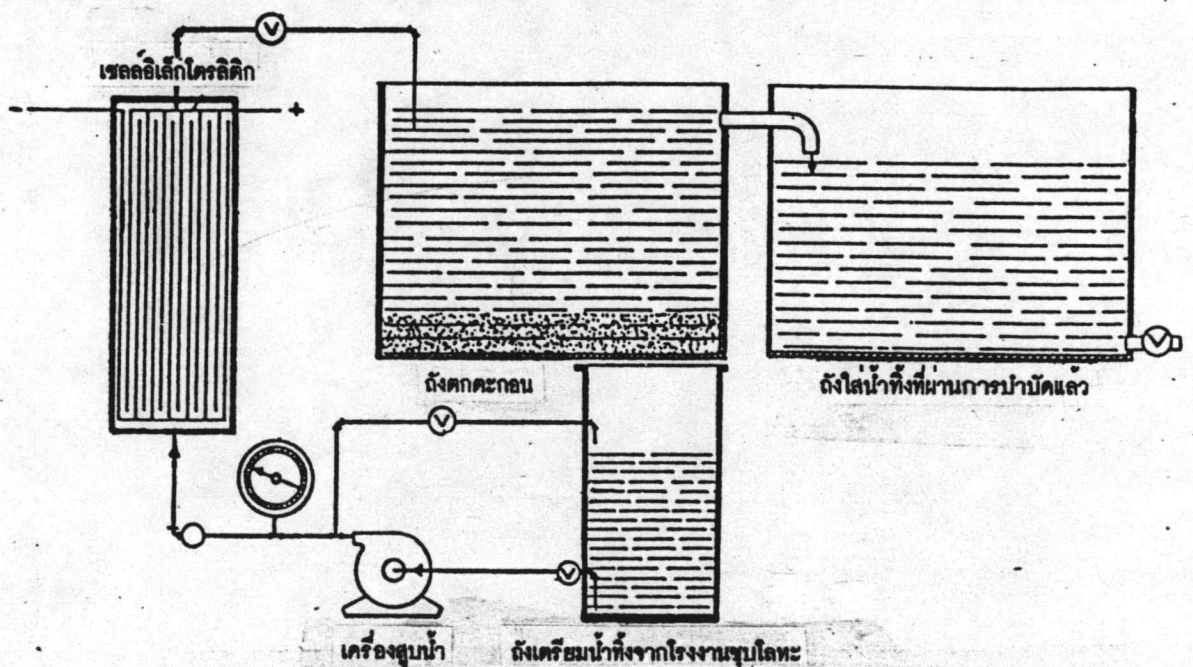


รูปที่ 2.12 เครื่องมือการทดลองแบบต่อเนื่องในเซลล์อิเล็กโทรลิติกจำนวน 2 เซลล์ที่ต่อแบบอนุกรม (Clarence, 1971)

ที่ผ่านเครื่องกรองจะถูกบำบัดอีกครั้งด้วยวิธีเดียวกันในเซลล์ที่สอง
สารละลายที่ผ่านการบำบัดใสไม่มีสี pH 7.7-8.4

ผลการทดลองพบว่า

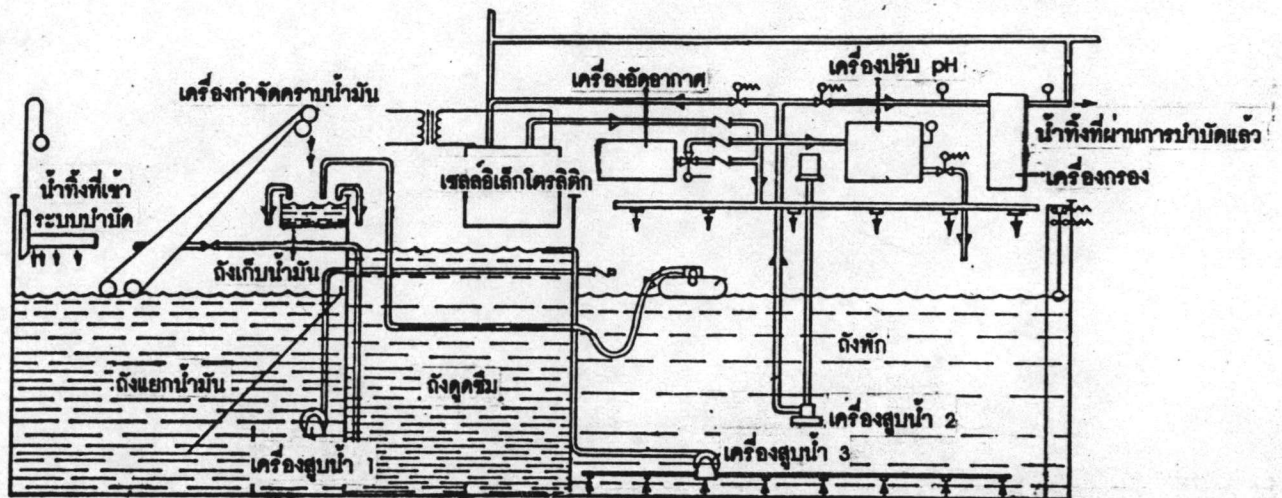
Lee (1975) ทดลองในเซลล์อิเล็กโทรลิติกทำด้วยวัสดุ PVC ปริมาตรใช้งาน 20 แกลลอน ใช้เหล็กเป็นอิเล็กโทรดที่มีการจัดเรียงแบบโมโนโพลาร์ ใช้น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ บ่อนสารละลายอิเล็กโทรไลต์เข้าไปในเซลล์อิเล็กโทรลิติก ที่อัตราการไหล 5 แกลลอนต่อนาทีด้วยเครื่องสูบน้ำ ให้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้าระบบจากเครื่องเรียงกระแส ใช้กระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 โวลท์ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจะถูกส่งมาที่ถังตกตะกอนโดยใช้โพลีอิเล็กโทรไลต์เป็นสารเคมีช่วยในการตกตะกอน ระยะเวลาในการตกตะกอน 2 นาที จากการทดลองพบว่า สามารถลดปริมาณ Cr^{6+} ในน้ำเสียเริ่มต้น 200 ppm เหลือเพียง 0.001 ppm โดยที่ pH ของน้ำเสียเพิ่มขึ้นจาก 6.5 เป็น 9.0 นอกจากนี้ในรายงานอ้างอิงถึงการกำจัดไอออนต่างๆ เช่น เฟอร์โรไซยาไนด์, โบเรต, ทังสเตต, ฟอสเฟต, เปอร์โบเรต, โบซิลเฟต เป็นต้น โดยไอออนต่างๆ เหล่านี้จะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของเหล็กออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ซึ่งละลายน้ำได้น้อยมาก หรือแม้ว่าไอออนต่างๆ ที่จะกำจัดนี้สามารถละลายน้ำได้ บางส่วนจะถูกดูดซับด้วยตะกอนเบาของเหล็กออกไซด์หรือเหล็กไฮดรอกไซด์ที่ได้จากเซลล์อิเล็กโทรลิติกนั่นเอง



รูปที่ 2.13 ระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ (Lee, 1975).

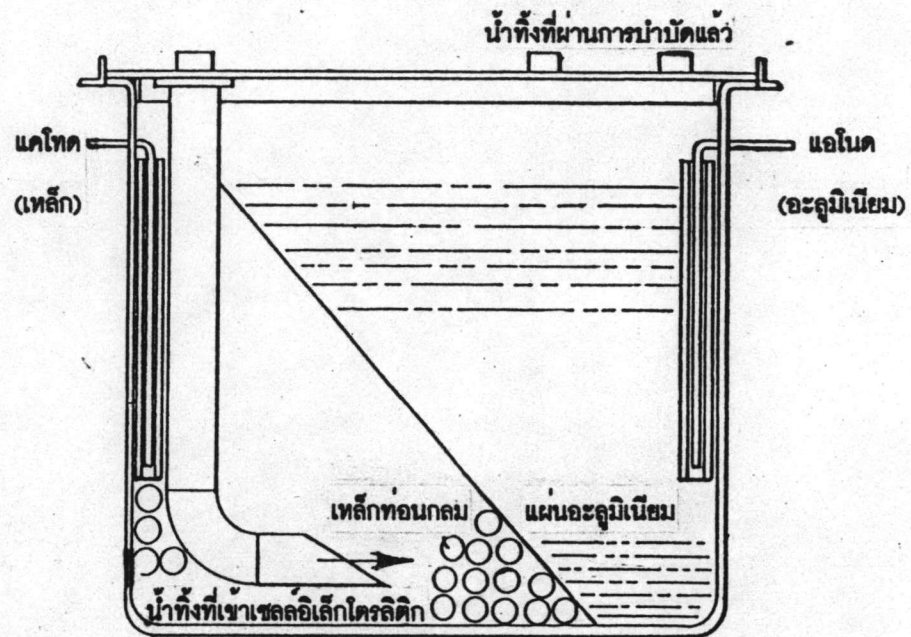
Rajo (1979) ทำการศึกษาปรับปรุงเซลล์อิเล็กโทรลิติกในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทปิโตรเลียม เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของอิเล็กโทรดให้สัมพันธ์กับปริมาณน้ำเสียที่จะทำการบำบัดโดยใช้อุณหภูมิของเหล็กและอะลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรด ระบบบำบัดน้ำเสียของ Rajo ดังรูปที่ 2.14 ประกอบด้วย

1. ดังแยกน้ำมัน น้ำเสียจะเข้าสู่ดังแยกน้ำมันเพื่อแยกน้ำมันออกจากน้ำตามความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างน้ำมันกับน้ำ จากนั้นน้ำมันบนผิวของดังแยกน้ำมันจะถูกดูดซับด้วยเครื่องกำจัดคราบน้ำมันไปเก็บไว้ในถังเก็บน้ำมัน น้ำถูกส่งเข้าไปในถังพักด้วยเครื่องสูบน้ำ 1
2. ดังเก็บน้ำมัน ในส่วนนี้เกิดการแยกชั้นระหว่างน้ำมันกับน้ำด้วยเช่นกัน น้ำจะถูกส่งกลับไปยังดังแยกน้ำมัน ขณะที่น้ำมันเข้าสู่ดังดูดซึม
3. ดังดูดซึม น้ำมันในดังดูดซึมจะถูกดูดซึมด้วยตะกอนเบาที่ส่งมาจากดังพักซึ่งเกิดจากการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีในเซลล์อิเล็กโทรลิติกนั่นเองและถูกกำจัดออกจากระบบพร้อมกันทั้งน้ำมันและตะกอนเบา ส่วนน้ำจะนำกลับไปที่ยังดังแยกน้ำมัน
4. ดังพัก เมื่อสามารถแยกน้ำมันกับน้ำในดังแยกน้ำมันได้แล้ว น้ำเสียในดังแยกน้ำมันถูกส่งเข้าไปในถังพักด้วยเครื่องสูบน้ำ จากนั้นน้ำเสียในดังพักจะถูกส่งเข้าไปบำบัดในเซลล์อิเล็กโทรลิติกด้วยเครื่องสูบน้ำ 2 น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วในเซลล์อิเล็กโทรลิติกจะกลับมาลงดังพักเช่นกัน เป็นเช่นนี้ไปจนกระทั่งครบระยะเวลาในการบำบัดน้ำเสียเพื่อให้ตะกอนเบาที่เกิดจากเซลล์อิเล็กโทรลิติกมีเวลาเพียงพอในการรวมตัวหรือดูดซึมสิ่งสกปรกต่างๆในน้ำเสีย จากนั้นจะเกิดการตกตะกอนในดังพัก ตะกอนที่ด้านล่างของดังพักจะถูกป้อนเข้าไปทำหน้าที่ดูดซึมน้ำมันในดังดูดซึมด้วยเครื่องสูบน้ำ 3 ตะกอนเบาบางส่วนลอยอยู่ที่ผิวหน้าของดังพักเนื่องมาจากการลอยตัวของฟองก๊าซไฮโดรเจนในเซลล์อิเล็กโทรลิติกที่มาพร้อมกับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว ทำให้ต้องมีเครื่องกวาดตะกอนนำตะกอนไปยังดังดูดซึมหรือดังเก็บน้ำมัน เมื่อครบระยะเวลาในการตกตะกอน น้ำเสียจะถูกสูบออกจากระบบด้วยเครื่องสูบน้ำ 2 หรือบางครั้งจะสูบทั้งน้ำเสียและตะกอนในดังพักเข้าเครื่องกรองก่อนที่จะนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วออกจากระบบบำบัดน้ำเสีย จากการทดลองพบว่าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วใส, ไม่มีสี, ไม่มีกลิ่นและสามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติได้ นอกจากนี้ในดังพักยังมีระบบเติมอากาศด้วยเครื่องอัดอากาศเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอน และมีเครื่องปรับ pH เพื่อปรับ pH ให้กับระบบบำบัดน้ำเสีย



รูปที่ 2.14 ระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทปิโตรเคมี
(Rojo, 1979)

5. เซลล์อิเล็กโทรลิติก ใช้อะลูมิเนียมเป็นแอโนดและเหล็กเป็นแคโทด ที่ขั้วแอโนดและแคโทดเป็นแท่งอะลูมิเนียมและเหล็ก ภายในเซลล์บรรจุด้วยแผ่นอะลูมิเนียมเล็กๆ และเหล็กท่อนกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5-1.0 เซนติเมตรด้วยปริมาตร 32 ลูกบาศก์ฟุต ในอัตราส่วนของอะลูมิเนียมต่อเหล็กเท่ากับ 70:30 โดยปริมาตร แผ่นอะลูมิเนียมจะอยู่ใกล้แท่งอะลูมิเนียมที่แอโนด และอนุภาคเหล็กจะอยู่ใกล้แท่งเหล็กที่แคโทด และถูกแบ่งออกจากกันในเซลล์ด้วยแผ่น PVC หนาประมาณ 0.05 มิลลิเมตรดังรูปที่ 2.15 น้ำเสียในถังพักจะป้อนเข้าเซลล์อิเล็กโทรลิติกทางด้านล่างด้วยเครื่องสูบน้ำและออกจากเซลล์ทางด้านบน ให้กระแสไฟฟ้าไหลจากขั้วแอโนดไปยังแคโทดที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 120 โวลต์ ปริมาตรของน้ำเสียที่ต้องบำบัด 7,000 แกลลอน ระยะเวลาในการบำบัดด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี 10 ชั่วโมง จากการทดลองนี้ทำให้เกิดตะกอนเบาของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ที่สามารถดูดซับน้ำมัน, ไอออนของโลหะ และสารมลพิษต่างๆ ในน้ำเสีย หรือในกรณีของคาร์บอนเนตหรือไบคาร์บอนเนตในน้ำเสียจะเกิดเป็นตะกอนเบาของเฟอร์รัสคาร์บอนเนตหรือเฟอร์ริคคาร์บอนเนต เป็นต้น ก๊าซไฮโดรเจนที่แคโทดนั้นบางส่วนจะปล่อยสู่บรรยากาศ และบางส่วนได้ติดไปกับน้ำเสียที่ออกจากเซลล์อิเล็กโทรลิติกลงสู่ถังพัก จากการทดลองนี้ Rojo



รูปที่ 2.15 เซลล์เล็กโทรลิติกของระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมี (Rojo, 1979)

กล่าวว่าการทำให้เกิดตะกอนเบาของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์และเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์มีส่วนช่วยในการบำบัดน้ำเสียได้ดีกว่าระบบที่เกิดตะกอนเบาของตัวใดตัวหนึ่ง ผลการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมีด้วยระบบของ Rojo คือ สามารถลดสีของน้ำเสีย, กำจัด COD และ BOD ดังตารางที่ 2.6

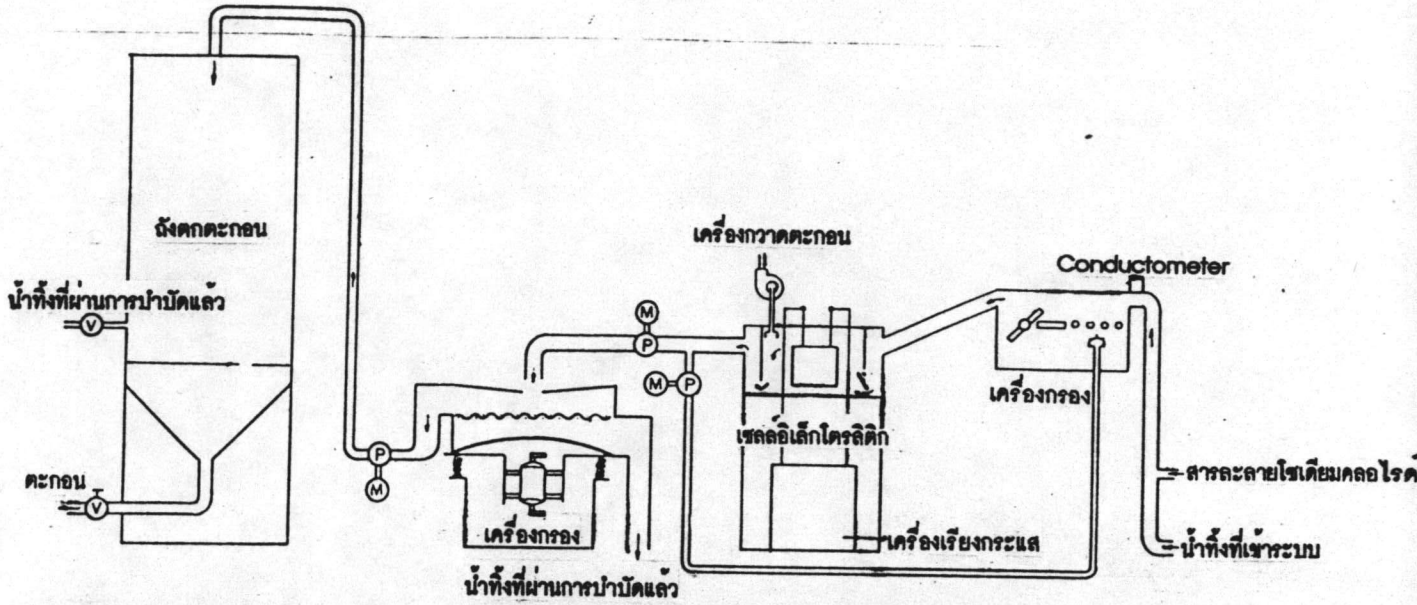
Krause และ Shea (1979) ทำการปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียจากชุมชนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อโรคและสารแขวนลอย ระบบดังกล่าวใช้ระยะเวลาในการบำบัดน้อยขั้นตอนสำคัญที่ใช้ในการบำบัดคือเซลล์เล็กโทรลิติก ระบบบำบัดน้ำเสียของ Krause และ Shea แสดงดังรูปที่ 2.16 ซึ่งประกอบด้วย

1. เครื่องกรองเพื่อกำจัดอนุภาคขนาดใหญ่ น้ำเสียจะถูกปรับค่าการนำไฟฟ้าด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์หรือน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วให้ได้ค่าการนำไฟฟ้าประมาณ 4-15 ms จากนั้นจึงผ่านเข้าเครื่องกรองเพื่อกำจัดอนุภาคขนาดใหญ่ออกจากน้ำเสียที่จะทำการบำบัด

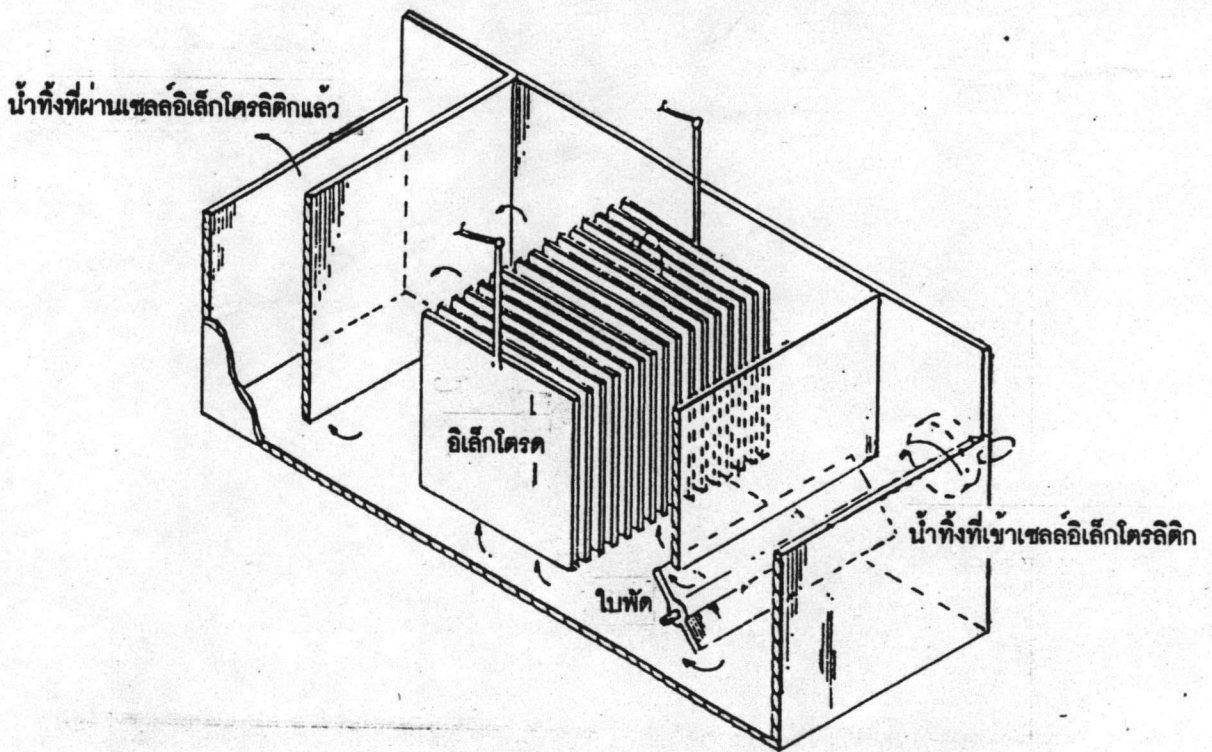
ตารางที่ 2.6 ผลการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมี
(Rojo, 1979)

ตัวแปรที่วิเคราะห์ (ppm)	น้ำเสียก่อน การบำบัด	น้ำเสียที่ผ่าน การบำบัดแล้ว
pH	10.9	7.9
Color	800	10
COD	4,800	224
BOD5	240	58
Oil and Grease	8,760	0.4
Total Solids	8,644	508
Suspended Solids	2,594	12
Volatile Solids	7,244	354
Inorganic Solids	1,220	154
Alkalinity	750	192

2. เซลล์อิเล็กโทรลิติก น้ำเสียที่ผ่านการกำจัดอนุภาคขนาดใหญ่แล้วจะเข้าสู่เซลล์ที่มีขนาดความกว้าง 1.5 ฟุต ยาว 3 ฟุต สูง 1.5 ฟุต ซึ่งเป็นระบบเปิดดังรูปที่ 2.17 น้ำเสียจะถูกเติมอากาศด้วยใบพัดและไหลลงด้านล่างของแผ่นกั้นผ่านแผ่นอิเล็กโทรดได้อย่างทั่วถึง ในระบบของ Krause และ Shea ใช้อิเล็กโทรดแบบเสถียรขนาดความกว้าง 12 นิ้ว ยาว 12 นิ้ว จำนวน 50 แผ่น การจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบใบโพธิ์ซึ่งมีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 0.25 นิ้วโดยจัดให้อิเล็กโทรดเรียงตามความกว้างของเซลล์อิเล็กโทรลิติก ไฟฟ้ากระแสตรงเข้าระบบจากเครื่องเรียงกระแสที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 300 โวลต์ ระยะเวลาของการบำบัดน้ำเสียในเซลล์เท่ากับ 6 วินาทีพบว่า เกิดก๊าซคลอรีน, ไฮโดรเจน และออกซิเจน ซึ่งควบคุมให้มีปริมาณก๊าซคลอรีนที่พอดีในการเกิดปฏิกิริยากับน้ำเสียเท่านั้น สารอินทรีย์ในน้ำเสียถูกออกซิไดส์เป็นน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยก๊าซออกซิเจน, โซเดียมไฮโปคลอไรต์ และก๊าซคลอรีน



รูปที่ 2.16 ระบบบำบัดน้ำเสียจากชุมชน (Krause และ Shea, 1979)



รูปที่ 2.17 เซลล์อิเล็กโทรลิติกของระบบบำบัดน้ำเสียจากชุมชน (Krause และ Shea, 1979)

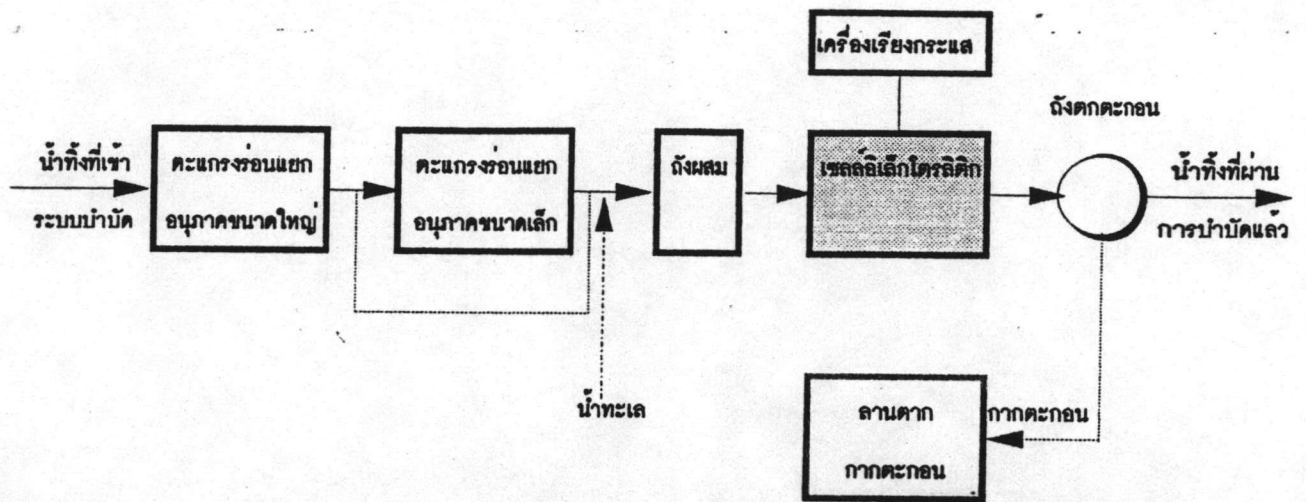
ในการควบคุมปริมาณก๊าซคลอรีนนั้นต้องจำกัดปริมาณสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ไขปรับค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเสีย โดยใช้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วเป็นตัวปรับค่าการนำไฟฟ้าแทน เมื่อในระบบมีฟองก๊าซทำให้สามารถกำจัดสารแขวนลอยบางส่วนในรูปของโฟมลอยอยู่ผิวน้ำของเซลล์ ดังนั้นจึงมีเครื่องกวาดตะกอนเพื่อกำจัดโฟมเหล่านี้ สำหรับอิเล็กโทรดเมื่อไขไประยะหนึ่งจะเกิดตะกอนเกาะที่ผิวของอิเล็กโทรด จึงจำเป็นต้องทำความสะอาดผิวของอิเล็กโทรด ในระบบนี้ใช้วิธีสลับขั้วไฟฟ้าให้กระแสไฟฟ้าไหลไปในทิศทางตรงกันข้ามนั่นเอง

3. เครื่องกรอง น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดในเซลล์อิเล็กโทรลิติกแล้วจะไหลผ่านเครื่องกรองเพื่อกำจัดตะกอน จากนั้นนำมาวิเคราะห์หาค่า BOD, COD, SS และ pH พบว่าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีค่าดังกล่าวดีกว่ามาตรฐาน

4. ถังตกตะกอน ในบางครั้งอาจจะใช้การตกตะกอนเพื่อกำจัดตะกอนในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วแทนวิธีการกรอง

McDonald (1980) ได้ศึกษาการกำจัดปริมาณ Cr^{6+} และทองแดงโดยวิธีไฟฟ้าเคมี เซลล์อิเล็กโทรลิติกที่ไขทดลองมีขนาดความกว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร ปริมาตรใช้งาน 20 ลิตร ไขถ่านแกรไฟต์จำนวน 4 แผ่นเป็นอิเล็กโทรดให้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้าระบบ 42 แอมแปร์จากเครื่องเรียงกระแสเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 2.15 แอมแปร์ต่อลูกบาศก์เดซิเมตร ความต่างศักย์ไฟฟ้า 4-6 โวลต์ ทำการทดลองแบบต่อเนื่องโดยป้อนสารละลายอิเล็กโทรไลต์เข้าไปในเซลล์อิเล็กโทรลิติกด้วยเครื่องสูบน้ำที่อัตราการไหล 14 มิลลิลิตรต่อนาทีจนครบ 96 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าสามารถกำจัด Cr^{6+} ให้อยู่ในรูป Cr^{3+} ได้ 86% เนื่องจากปริมาณทองแดงในสารละลายที่ลดลงจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปคอปเปอร์ไอออน และ Cr^{6+} ถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูป Cr^{3+} จากนั้นสามารถกำจัด Cr^{3+} และ Cu^{2+} ได้ง่ายโดยใช้สารเคมีในการตกตะกอน ซึ่งวิธีนี้จะช่วยลดปริมาณการใช้สารเคมีและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด

Mendia (1982) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี เพื่อลดขนาดของระบบบำบัดน้ำเสียเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเดิมที่ไข โดยมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดใกล้เคียงกัน ขั้นตอนสำคัญในการบำบัดคือเซลล์อิเล็กโทรลิติก ระบบบำบัดน้ำเสียของ Mendia แสดงดังรูปที่ 2.18 ประกอบด้วย



รูปที่ 2.18 ระบบบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี
(Mendia, 1982)

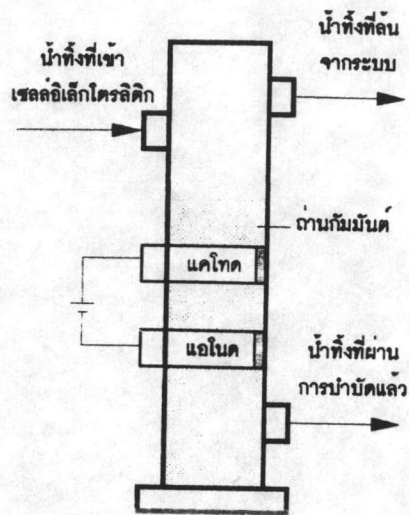
1. ตะแกรงร่อนแยกอนุภาคขนาดใหญ่ น้ำเสียเมื่อเข้าสู่ระบบจะถูกแยกตะกอนที่มีขนาดใหญ่ออก
2. ตะแกรงร่อนแยกอนุภาคขนาดเล็ก
3. ถังผสม เมื่อน้ำเสียถูกแยกตะกอนออกจะถูกปรับค่าการนำไฟฟ้าด้วยน้ำทะเลในอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ น้ำทะเลต่อน้ำเสียเท่ากับ 1:3
4. เซลล์อิเล็กโทรลิติก น้ำเสียที่มีค่าการนำไฟฟ้าเหมาะสมจะเข้าสู่เซลล์อิเล็กโทรลิติก มีขนาดความกว้าง 0.54 เมตร ยาว 4 เมตร สูง 0.2 เมตร ปริมาตรการใช้งาน 15 ลิตร ไขเหล็กเป็นแคโทดและเหล็กผสมซิลิกาเป็นแอโนด ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 0.92 เซนติเมตร พื้นที่ผิวของอิเล็กโทรด 1.50 ตารางเมตร ไฟฟ้ากระแสตรง 200 แอมแปร์ เข้าระบบจากเครื่องเรียงกระแสที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 4 โวลต์ ระยะเวลาในการบำบัด 38 วินาที
5. ถังตกตะกอน น้ำเสียที่ผ่านเซลล์อิเล็กโทรลิติกแล้วจะมาตกตะกอนเพื่อกำจัดตะกอนเป็นระยะเวลา 60 นาที ตะกอนถูกนำไปทิ้งที่ลานตากกากตะกอน

น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีปริมาณสารแขวนลอย, BOD และปริมาณฟอสเฟตลดลง ดังแสดงในตารางที่ 2.7 และมีอัตราการใช้พลังงานในการบำบัดประมาณ 0.5 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 2.7 ผลการบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี
(Mencia, 1982)

ตัวแปรที่วิเคราะห์	น้ำเสียก่อนการบำบัด	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว	% การกำจัด
สารแขวนลอย (ppm)	410	12	97
BOD5 (mg/l)	330	140	57
ฟอสเฟต (ppm)	9	1.3	86

Ding, Min และ Hui (1987) ได้ทดลองบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมเพื่อลดสีของน้ำเสียในเซลล์อิเล็กโทรลิติกที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร สูง 500 มิลลิเมตร ภายในบรรจุถ่านกัมมันต์ปริมาณ 64 กรัม ใช้อิเล็กโทรดจำนวน 2 แผ่นอยู่ตรงกลางของเซลล์อิเล็กโทรลิติกตั้งรูปที่ 2.19 ป้อนน้ำเสียเข้าเซลล์อิเล็กโทรลิติกที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาทีด้วยเครื่องสูบน้ำ ให้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้าระบบจากเครื่องเรียงกระแส ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 12 โวลต์ จากการทดลองพบว่าสามารถลดสีของน้ำเสียได้สูงมาก สารละลายสีไม่มีสี นอกจากนี้สามารถลด COD และ BOD ได้ดังแสดงในตารางที่ 2.8 นอกจากนี้ Ding และคณะสรุปว่า ระบบบำบัดน้ำเสียในการทดลองนี้สามารถใช้ได้กับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง, ค่าการนำไฟฟ้าต่ำ, ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูงกว่า, ใช้พลังงานในการบำบัดน้อยกว่า และอายุการใช้งานนานกว่าระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ถ่านกัมมันต์กำจัดสี



รูปที่ 2.19 เซลล์อิเล็กโทรลิติกที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม
(Ding, Min และ Hui, 1987)

ตารางที่ 2.8 ผลการบำบัดน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม
(Ding, Min และ Hui, 1987)

ตัวแปรที่วิเคราะห์	น้ำเสียก่อน การบำบัด	น้ำเสียที่ผ่าน การบำบัดแล้ว
COD (mg/l)	1,281	37.6
BOD5 (mg/l)	721	37.3
Optical Density	>2	ไม่มีสี

Ohmomo และคณะ (1987) ศึกษาการกำจัดสีน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการหมักที่ใช้โมลาสเป็นวัตถุดิบด้วยจุลินทรีย์ในวงศ์ *Aspergillus fumigatus* G-2-6 ประเภทเทอร์โมฟิลิก ใสสารละลายของกลีเซอรอล-เปปโตินที่ประกอบด้วยจุลินทรีย์ดังกล่าวปริมาณ 100 มิลลิลิตรใน flask ขนาด 500 มิลลิลิตร ปรับค่าการดูดกลืนแสงเป็น 3.5 ที่ความยาวคลื่น 475 นาโนเมตรด้วยน้ำเสียเจือจางจากอุตสาหกรรมการหมักที่ใช้โมลาสเป็นวัตถุดิบ เขย่าและควบคุมอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 วันพบว่า สามารถกำจัดสี

ได้ 75% กลไกในการกำจัดสีสามารถอธิบายได้ว่า จุลินทรีย์ดังกล่าวจะไปทำให้มวลโมเลกุลของเม็ดสีเมลานอยดินที่ทำให้เกิดสีน้ำตาลเข้มต่ำลง ในการทดลองนี้ใช้วิธีวิเคราะห์สีด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 475 นาโนเมตรของน้ำตัวอย่างที่เจือจาง 10 เท่าด้วยสารละลายบัฟเฟอร์อะซีเตตเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร (pH เท่ากับ 5) นอกจากนี้ Ohmomo และคณะได้ทำการทดลองกำจัดสีแบบต่อเนื่องในถังหมักปริมาตรใช้งาน 1.5 ลิตร อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส อัตราการกวน 350 รอบต่อนาที ที่อัตราเจือจาง 0.014 เท่าต่อชั่วโมง พบว่ากำจัดสีได้ 70% , กำจัด COD ได้ 51% และกำจัด TOC ได้ 56%

Ohmomo และคณะ (1988) ศึกษาการกำจัดสีน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการหมักที่ใช้โมลาสเป็นวัตถุดิบด้วยจุลินทรีย์ในวงศ์ *Aspergillus oryzae* Y-2-32 ใส่สารละลายของกลีเซอรอล-เปปโตนที่ประกอบด้วยจุลินทรีย์ดังกล่าวปริมาตร 100 มิลลิลิตรใน flask ขนาด 500 มิลลิลิตร ปรับค่าการดูดกลืนแสงให้ได้ 3.5 ที่ความยาวคลื่น 475 นาโนเมตรด้วยน้ำเสียที่เจือจางจากอุตสาหกรรมการหมักที่ใช้โมลาสเป็นวัตถุดิบ เขย่าและควบคุมอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 วันพบว่า สามารถกำจัดสีได้ 75% กลไกในการกำจัดสีคือจุลินทรีย์ดังกล่าวจะดูดซับสารเมลานอยดินโดยเฉพาะที่มีมวลโมเลกุลต่ำ ในการทดลองนี้ใช้วิธีวิเคราะห์สีด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 475 นาโนเมตรของน้ำตัวอย่างที่เจือจาง 10 เท่าด้วยสารละลายบัฟเฟอร์อะซีเตตเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร (pH = 5)

Suntud Sirianuntapiboon และคณะ (1988) ศึกษาจุลินทรีย์ที่เหมาะสมในการกำจัดสีน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการหมักที่ใช้โมลาสเป็นวัตถุดิบ โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นแรกทำการทดลองกับจุลินทรีย์ 228 ชนิดในงานทดลองของสารละลาย MP เจือจางด้วยน้ำกลั่น เพื่อปรับค่าการดูดกลืนแสงให้ได้ 3.5 ที่ความยาวคลื่น 475 นาโนเมตร ควบคุม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (สารละลาย MP คือ การเตรียมน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการหมักที่ใช้โมลาสเป็นวัตถุดิบ ด้วยวิธีการ centrifuge 6,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำส่วนที่ใสมากระเหยให้เข้มข้นกว่าความเข้มข้นเดิม 5 เท่าด้วยเครื่องระเหยสุญญากาศ ที่อุณหภูมิต่ำ 50 องศาเซลเซียส นำสารละลายเข้มข้นมาแช่ในน้ำประปาเป็นเวลา 2 วัน และนำมาแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 2 วัน) จากนั้นสังเกตผลการทดลองจากด้านล่างของงานทดลองพบว่า มีจุลินทรีย์ที่เหมาะสมในการทดลองนี้ 25 ชนิด ขั้นที่สอง ใส่สารละลาย

ผสมกลูโคสที่ประกอบด้วยจุลินทรีย์ที่เหมาะสมจากผลการทดลองขั้นแรกปริมาตร 100 มิลลิลิตรใน flask ขนาด 500 มิลลิลิตร ปรับค่าการดูดกลืนแสงให้ได้ 3.5 ที่ความยาวคลื่น 475 นาโนเมตรด้วยสารละลาย MP เขย่าและควบคุมอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 วันพบว่า จุลินทรีย์ที่เหมาะสมสำหรับกำจัดสีในสารละลาย MP คือ *Mycelia sterilia* D90 สามารถกำจัดสีได้สูงสุดถึง 93% ที่ความเข้มข้นของกลูโคส 2.5% ในเวลา 8 วัน ซึ่งมีความเป็นไปได้ในการใช้จุลินทรีย์ดังกล่าวกำจัดสีน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการหมักที่ใช้โมลาสเป็นวัตถุดิบหรือใช้เป็นแหล่งผลิตเอนไซม์เพื่อกำจัดสี ในการทดลองนี้ใช้วิธีวิเคราะห์สีด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 475 นาโนเมตรของน้ำตัวอย่างเจือจาง 10 เท่าด้วยสารละลายบัฟเฟอร์อะซีเตตเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร (pH=5)

Suntud Sirianuntapiboon และคณะ (1988) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการหมักสุราที่ใช้โมลาสเป็นวัตถุดิบ ด้วยจุลินทรีย์ในวงศ์ *Mycelia sterilia* D90 น้ำเสียจากอุตสาหกรรมการหมักสุราที่ใช้ในการทดลองแบ่งเป็น 3 ประเภทคือ น้ำเสียที่ไม่ได้ผ่านการบำบัด, น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดทางชีววิทยาด้วยจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจน และน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดทางชีววิทยาด้วยจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจน คุณสมบัติของน้ำเสียประเภทต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.9 ใส่จุลินทรีย์ *Mycelia sterilia* D90 จากการเพาะเชื้อปริมาตร 15 มิลลิลิตรและสารละลายผสมกลูโคสเข้มข้น 2.5% ปริมาตร 100 มิลลิลิตรใน flask ขนาด 500 มิลลิลิตร ปรับค่าการดูดกลืนแสงให้ได้ 3.5 ที่ความยาวคลื่น 475 นาโนเมตรด้วยสารละลาย MP เขย่าและควบคุมอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 วันพบว่า จุลินทรีย์ดังกล่าวสามารถกำจัดสีได้ 91% สำหรับน้ำเสียที่ไม่ได้ผ่านการบำบัด ขณะที่กำจัดสีในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดทางชีววิทยาด้วยจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจน และน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดทางชีววิทยาด้วยจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนได้เพียง 65% และ 60% ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากอาจเกิดสารพิษหรือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดทางชีววิทยาซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของจุลินทรีย์ดังกล่าวลดลง ดังนั้น *Mycelia sterilia* D90 จึงเหมาะสมในการกำจัดสีน้ำเสียที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดจากอุตสาหกรรมการหมักสุราที่ใช้โมลาสเป็นวัตถุดิบ ส่วนการกำจัด BOD นั้นพบว่า จุลินทรีย์ดังกล่าวสามารถกำจัด BOD ได้ 70% ในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดทางชีววิทยาด้วยจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจน และกำจัด BOD ได้ 80% ในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดทางชีววิทยาด้วย

จุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจน โดยที่จุลินทรีย์ดังกล่าวสามารถกำจัด BOD ได้เพียง 50% ในน้ำเสียที่ไม่ได้ผ่านการบำบัด ในขณะที่เดียวกันพบว่า COD ของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็วในน้ำเสียทั้ง 3 ประเภท ข้อเสียของวิธีนี้คือถ้าไม่เพาะจุลินทรีย์ดังกล่าวขึ้นเองจะเกิดจุลินทรีย์หลายชนิดในระบบ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดลดลงเหลือเพียง 7.5-20% เท่านั้น (สารละลาย MP คือ การเตรียมน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการหมักที่ไซโมลาสเป็นวัตถุดิบ ด้วยวิธีการ centrifuge 6,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำส่วนที่ใสมาระเหยให้เข้มข้นกว่าความเข้มข้นเดิม 5 เท่าด้วยเครื่องระเหยสูญญากาศ ที่อุณหภูมิต่ำ 50 องศาเซลเซียส นำสารละลายเข้มข้นมาแช่ในน้ำประปาเป็นเวลา 2 วัน และนำมาแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 2 วัน) ในการทดลองนี้ใช้วิธีวิเคราะห์ด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 475 นาโนเมตรของน้ำตัวอย่างเจือจาง 10 เท่าด้วยสารละลายบัฟเฟอร์อะซีเตตเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร (pH=5)

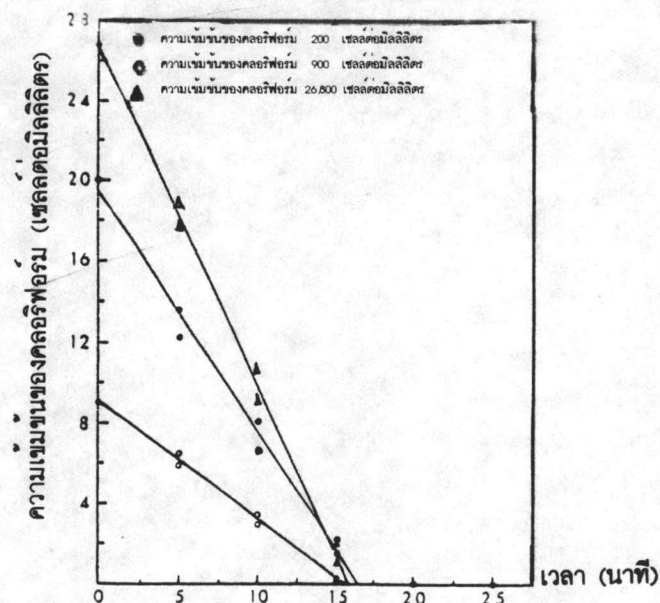
ตารางที่ 2.9 คุณสมบัติของน้ำเสียประเภทต่างๆ จากอุตสาหกรรมการหมักสุราที่ไซโมลาสเป็นวัตถุดิบ (Suntud Sirianuntapiboon และคณะ, 1988)

ตัวแปรที่วิเคราะห์ (ppm)	น้ำเสียที่ไม่ได้ผ่านการบำบัด	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดทางชีววิทยาด้วยจุลินทรีย์ไม่ใช้ O ₂	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดทางชีววิทยาด้วยจุลินทรีย์ไม่ใช้ O ₂
pH	4.68	8.39	8.72
Reducing Sugar	16,000	2,500	1,000
COD	112,830	21,270	15,060
BOD	57,000	2,000	600
Organic Nitrogen	2,340	750	440
Ammonia Nitrogen	120	280	140
Total Nitrogen	2,460	1,030	570
Nitrate	900	130	130
Phosphate	0.20	0.30	0.20
Colour Intensity (475 nm)	47	30	27

Biwyk (1988) ทดลองบำบัดน้ำเสียจากชุมชนที่ผ่านการบำบัดทางชีววิทยาแล้ว ด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีในเซลล์อิเล็กโทรลิติก ปริมาตรจุ 0.017 ลูกบาศก์เมตร ใช้เหล็กหรืออะลูมิเนียม จำนวน 8 แผ่นเป็นอิเล็กโทรด พื้นที่ผิวของอิเล็กโทรดเท่ากับ 0.106 ตารางเมตร น้ำเสียจากชุมชนที่ผ่านการบำบัดทางชีววิทยาแล้วมีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0.96 มิลลิซีเมนต่อเซนติเมตร บ่อน้ำเสียเข้าสู่เซลล์อิเล็กโทรลิติกที่อัตราการไหลคงที่ 0.02×10^{-3} ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที จากการทดลองพบว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับความต่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ในกรณีที่ใช้อะลูมิเนียมหรือเหล็กเป็นอิเล็กโทรดนั้นให้ผลการทดลองดังกล่าวใกล้เคียงกัน และการใช้ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดน้อยกว่า 0.015 เมตร ทำให้ใช้พลังงานในการบำบัดลดลง นอกจากนี้ Biwyk ได้ทำการทดลองบำบัดน้ำเสียจากชุมชนที่ผ่านการบำบัดทางชีววิทยาแล้วเปรียบเทียบกับระหว่างวิธีไฟฟ้าเคมีกับการตกตะกอนด้วยสารเคมี โดยแปรค่าความเข้มข้นของเหล็กหรืออะลูมิเนียมที่เป็นอิเล็กโทรดในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ตกตะกอนในหน่วยเดียวกัน สารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนคือ เฟอร์ริกซัลเฟต, เฟอร์รัสซัลเฟต และสารส้ม จากการทดลองพบว่าที่ประสิทธิภาพในการกำจัด TOC เดียวกันเท่ากับ 56% น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยการตกตะกอนของเฟอร์รัสซัลเฟตมีค่า COD สูงกว่าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี นอกจากนี้วิธีไฟฟ้าเคมียังสามารถลดปริมาณซิลิกาได้มากกว่าการตกตะกอนด้วยเฟอร์ริกซัลเฟตและเฟอร์รัสซัลเฟต ส่วนน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยการตกตะกอนของสารส้มหรือด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีที่ COD ใกล้เคียงกันพบว่า วิธีไฟฟ้าเคมีสามารถกำจัดซิลิกาได้ดีกว่าการตกตะกอนด้วยสารส้ม และถ้าต้องการกำจัดซิลิกาทั้งหมดในน้ำเสียด้วยวิธีการตกตะกอนของอะลุ่มนั้นต้องใช้อัตราของอะลูมิเนียมมากกว่าวิธีไฟฟ้าเคมีถึง 3 เท่า

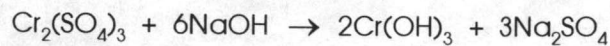
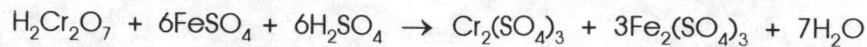
Patermarakis และ Fountoukidis (1990) ทดลองบำบัดน้ำจากแหล่งน้ำตามธรรมชาติ เพื่อกำจัดเชื้อโรคในเซลล์อิเล็กโทรลิติกแบบกะที่มีการกวนผสมด้วยแท่งแม่เหล็ก ปริมาตรจุ 350 มิลลิลิตร ใช้ไทเทเนียมขนาดกว้าง 5 เซนติเมตร ยาว 5 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น เป็นอิเล็กโทรด ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 4 เซนติเมตร ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย 250 ไมครอนซีเมนต่อเซนติเมตร ให้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้าระบบจากเครื่องเรียงกระแสที่สามารถให้กระแสไฟฟ้า 125-250 มิลลิแอมป์ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 45-100 โวลต์ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 2.5-5.0 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และมีการสลับขั้วของ

อิเล็กทรอนิกส์แบบอัตโนมัติภายใน 30 วินาที ผลการทดลองพบว่าที่จำนวนคลอรีฟอร์ม 335 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 2.5 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ระยะเวลาในการบำบัด 30 นาที ตรวจไม่พบคลอรีฟอร์ม นอกจากนี้ Patermarakis และ Fountoukidis ได้ทำการทดลองเปลี่ยนจำนวนคลอรีฟอร์มเป็น 200, 900 และ 26,800 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 2.5 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่าจำนวนคลอรีฟอร์มในหน่วยเซลล์ต่อมิลลิลิตร (n) มีความสัมพันธ์กับเวลาในหน่วยนาที (t) เป็นเส้นตรงดังรูปที่ 2.20 ซึ่งสามารถแสดงอยู่ในรูปสมการคือ $n = n_0 - k't$ โดยที่ n_0 คือจำนวนเริ่มต้นของคลอรีฟอร์มในหน่วยเซลล์ต่อมิลลิลิตร และ k' คือค่าคงที่ที่ขึ้นกับจำนวนเริ่มต้นของคลอรีฟอร์มและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ปริมาตรในการบำบัดคงที่ และพื้นที่ผิวของอิเล็กทรอนิกส์คงที่ จากกราฟสามารถหาเวลาที่น้อยที่สุดในการกำจัดเชื้อโรคได้อย่างสมบูรณ์ นั่นคือเมื่อจำนวนคลอรีฟอร์มเท่ากับ 200 เซลล์ต่อมิลลิลิตรต้องใช้เวลาในการบำบัด 16.2 นาที, จำนวนคลอรีฟอร์มเท่ากับ 900 เซลล์ต่อมิลลิลิตรต้องใช้เวลาในการบำบัด 15.3 นาที และจำนวนคลอรีฟอร์มเท่ากับ 26,800 เซลล์ต่อมิลลิลิตรต้องใช้เวลาในการบำบัด 15.7 นาที

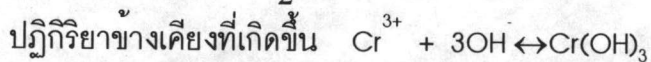
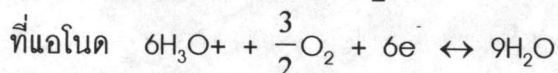
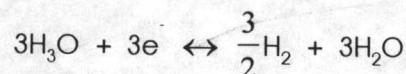
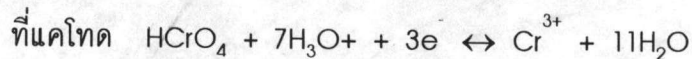


รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนคลอรีฟอร์มกับเวลา
(Patermarakis และ Fountoukidis, 1990)

Reussard, Benezech และ Lacoste (1990) ศึกษาการกำจัด Cr^{6+} ในน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี ซึ่งระบบเดิมที่ใช้กำจัด Cr^{6+} นั้นมีความยุ่งยาก คือต้องปรับ pH ของน้ำเสียเป็น 3 เพื่อเปลี่ยน Cr^{6+} เป็น Cr^{3+} โดยใช้ SO_2 , NaHSO_3 หรือเฟอร์รัสซัลเฟต จากนั้นเติมเบสเช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อเพิ่ม pH ของน้ำเสียให้เป็น 8.5 ในการตกตะกอนโครเมียมและไอออนของโลหะอื่นๆ ในรูปของไฮดรอกไซด์ตามสมการ

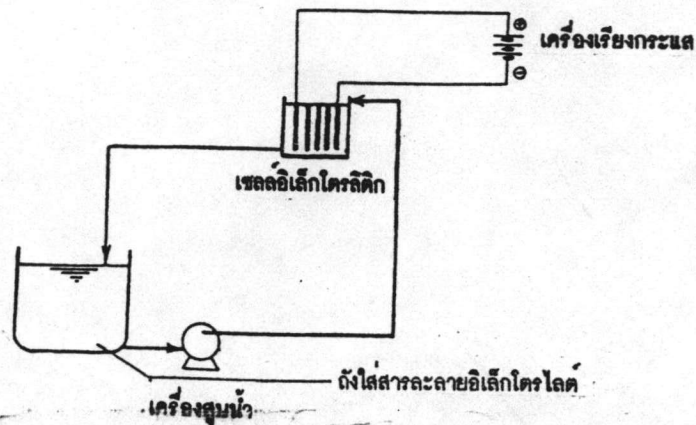


ซึ่งวิธีนี้จะเกิดการตกตะกอนในการบำบัดปริมาณมาก ดังนั้น Reussard และคณะจึงทดลองกำจัด Cr^{6+} ในเซลล์อิเล็กโทรลิติกที่มีอนุภาคแกรไฟต์เป็นอิเล็กโทรดบรรจุระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เป็นส่วนของแคโทดและแผ่นตะกั่วเคลือบ MnO ที่เป็นส่วนของแอโนด ในส่วนของแคโทดและแอโนดแยกกันด้วยแผ่นไดอะแฟรมของโพลีเอทิลีน ใช้น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้น 39.51 มิลลิซีเมนต่อเซนติเมตร $\text{pH}=2.47$ ผลการทดลองพบว่าในส่วนของแอโนดนั้นมีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่า pH เท่านั้น คือ ลดลงเหลือ 0.5 ในขณะที่ส่วนของแคโทดน้ำเสียมีค่า pH เพิ่มขึ้น, ปริมาณ Cr^{6+} และ Cr^{3+} ลดลง เนื่องจากในส่วนของแคโทดจะเปลี่ยน Cr^{6+} เป็น Cr^{3+} ขณะเดียวกันการอิเล็กโทรลิซิสของน้ำจะทำให้เกิด OH^- ซึ่งเป็นสาเหตุให้ pH ของน้ำเสียเพิ่มขึ้น จากนั้นจึงทำให้เกิดตะกอนของ $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ตามสมการ



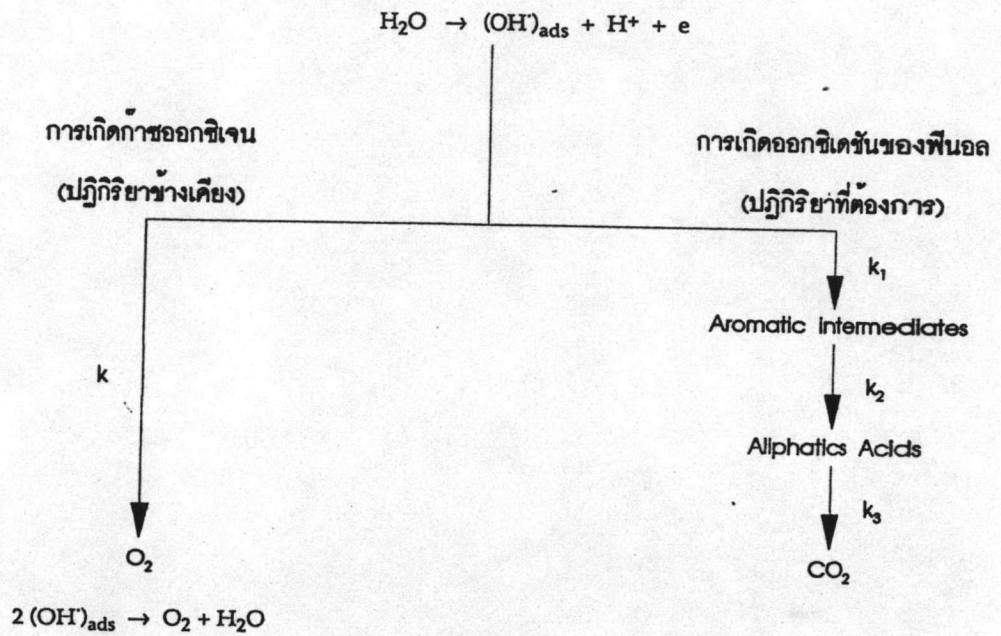
$\text{Cr}(\text{OH})_3$ มีคุณสมบัติเป็นประจุบวกที่ pH ต่ำกว่า 7.6 ถ้า pH สูงกว่านี้จะมีคุณสมบัติเป็นประจุลบ ในระบบบำบัดของ Reussard และคณะนี้ไม่ต้องเติมสารเคมี ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียจะเป็นเพียงค่าไฟฟ้าเท่านั้น สำหรับการพัฒนาระบบนี้ให้เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียขึ้นกับ รูปร่างของเซลล์อิเล็กโทรลิติก, วัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรด, ระบบการแยกตะกอน, กระแสไฟฟ้า, ความต่างศักย์ไฟฟ้า และการปรับ pH

Pretorius, Johannes และ Lempert (1991) ทดลองในเซลล์อิเล็กโทรลิติกมี
 เหล็กขนาดความกว้าง 200 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร หนา 3 มิลลิเมตร จำนวน 4
 แผ่น เป็นอิเล็กโทรดที่มีการจัดเรียงแบบไบโพลาร์ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 9 มิลลิเมตร
 ใช้น้ำประปาผสมโซเดียมคลอไรด์เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าของสาร
 ละลายเป็น 110 มิลลิซีเมนต่อเซนติเมตร ป้อนสารละลายอิเล็กโทรไลต์เข้าเซลล์ด้วยเครื่องสูบ
 น้ำ ให้ไฟฟ้ากระแสตรงเข้าระบบจากเครื่องเรียงกระแสที่สามารถให้กระแสไฟฟ้าสูงสุด 150
 แอมแปร์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 72 โวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.21 เพื่อเปรียบเทียบผลการ
 คำนวณปริมาณเหล็กที่หายไปและพลังงานที่ใช้ด้วยกฎของฟาราเดย์กับผลที่ได้จากการทดลอง
 พบว่า ผลการคำนวณจากกฎของฟาราเดย์ใกล้เคียงกับผลการทดลองของปริมาณเหล็กที่หายไป
 และพลังงานที่ใช้ นอกจากนี้ Pretorius และคณะได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าใช้จ่าย
 ในการผลิตตะกอนเบาของเหล็กด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีกับค่าสารเคมีที่ใช้แยกสารด้วยวิธีการทำให้
 ลอยในรูปเกล็ดของเหล็กที่มีขายอยู่ทั่วไป พบว่าด้วยการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์นี้จะ
 ให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตตะกอนเบาของเหล็กสูงกว่าราคาของเฟอร์ริคัลเฟต แต่ต่ำกว่าราคา
 ของเฟอร์ริคคลอไรด์ ค่าใช้จ่ายในการผลิตตะกอนเบาของเหล็กด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีนี้แบ่งเป็น 2
 ส่วนคือ ค่าวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรดและค่าพลังงานไฟฟ้า โดยที่ค่าวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรดนั้นคงที่
 ส่วนค่าพลังงานไฟฟ้าขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เช่น ในกรณีที่ใช้แผ่นเหล็กคุณภาพดีเป็น
 อิเล็กโทรดพบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำกว่า 100 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ค่าใช้จ่าย
 ในการผลิตตะกอนเบาของเหล็กด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีจะต่ำกว่าราคาของเฟอร์ริคัลเฟต ขณะเดียว
 กันที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำกว่า 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ค่าใช้จ่ายในการผลิต
 ตะกอนเบาของเหล็กด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีต่ำกว่าราคาของเฟอร์ริคคลอไรด์ สรุปคือในการผลิต
 ตะกอนเบาของเหล็กด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำคุ้มกว่าการซื้อสารเคมีที่
 ใช้แยกสารด้วยการทำให้ลอยในรูปเกล็ดของเหล็กที่มีขายอยู่ทั่วไป อย่างไรก็ตามในการทดลอง
 นี้ได้แนะนำวิธีการลดค่าใช้จ่ายในการผลิตตะกอนเบาของเหล็กด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีว่า สามารถ
 ลดค่าใช้จ่ายได้จากค่าวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรด คือใช้แผ่นเหล็กคุณภาพต่ำกว่าหรือแผ่นเหล็ก
 ขนาดเล็กแทนแผ่นเหล็กคุณภาพดี



รูปที่ 2.21 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองของ Pretorius และคณะ
(Pretorius และคณะ, 1991)

Comninellis (1992) ทดลองบำบัดน้ำเสียที่มีฟีนอลด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีในเซลล์อิเล็กโทรลิติกที่มีการกวนผสมด้วยแท่งแม่เหล็ก ปริมาตรใช้งาน 150 มิลลิลิตร ใช้แพลทินัมหรือไทเทเนียมเคลือบดีบุกออกไซด์เป็นแอโนด แพลทินัมเป็นแคโทด จากการทดลองพบว่า ทั้งแพลทินัมและไทเทเนียมเคลือบดีบุกออกไซด์สามารถกำจัดฟีนอลได้ในอัตราที่เท่ากัน และกำจัดฟีนอลทั้งหมดที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากกว่า 25-30 แอมแปร์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เดซิเมตร แต่อัตราการกำจัด TOC ไม่เท่ากัน ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เดซิเมตร ไทเทเนียมเคลือบดีบุกออกไซด์สามารถกำจัด TOC ได้ 90% ขณะที่แพลทินัมกำจัด TOC ได้ 38% นอกจากนี้ Comninellis ได้ทำการเปรียบเทียบวิธีการกำจัดฟีนอลระหว่างวิธีไฟฟ้าเคมีกับการเติมสารเคมี สรุปว่าในการกำจัดฟีนอลด้วยสารเคมีนั้นมี 2 วิธี โดยวิธีแรกนี้จะให้ประสิทธิภาพต่ำในการกำจัดฟีนอล คือการทำปฏิกิริยาระหว่างฟีนอลกับ H_2O_2 ที่มีปริมาณมากเกินพอในอุณหภูมิห้องประมาณ 20-30 องศาเซลเซียส วิธีที่สองคือการทำปฏิกิริยาระหว่างฟีนอลกับ H_2O_2 ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 140 องศาเซลเซียส ความดัน 5 บาร์ ซึ่งวิธีนี้ให้ประสิทธิภาพสูงในการกำจัดฟีนอลเท่ากับการใช้ไทเทเนียมเคลือบดีบุกออกไซด์เป็นแอโนดในวิธีไฟฟ้าเคมีสำหรับกลไกในการเกิดปฏิกิริยาเคมีด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีแสดงดังรูปที่ 2.22 และตารางที่ 2.10



รูปที่ 2.22 กลไกในการเกิดปฏิกิริยาเคมีด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี (Comninellis, 1992)

ตารางที่ 2.10 อิทธิพลของวัสดุที่ใช้ทำแอโนดต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา (Comninellis, 1992)

โดยที่ k = ค่าคงที่ในการเกิดก๊าซออกซิเจน

k_1 = ค่าคงที่ในการดึงหมู่ไฮดรอกซิลออก

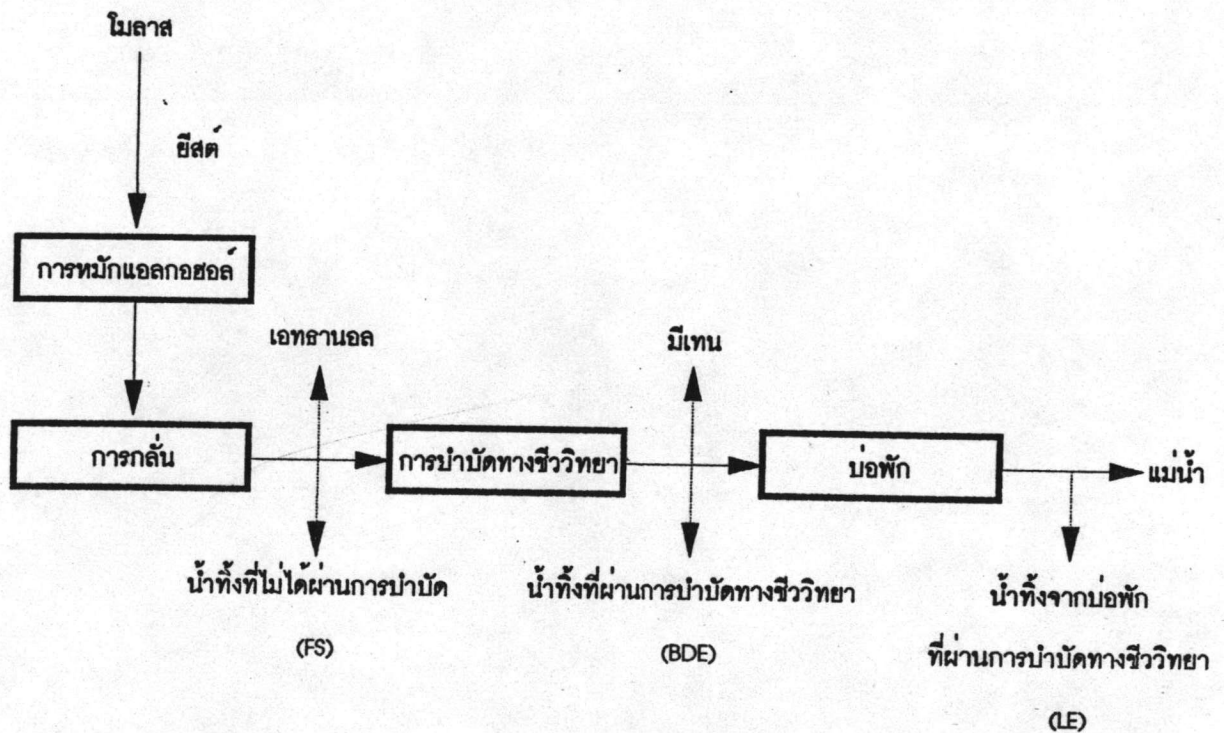
k_2 = ค่าคงที่ในการเปิดวงแหวน

k_3 = ค่าคงที่ในการเกิดการเผาไหม้

วัสดุที่ใช้ทำแอโนด	k	k_1	k_2	k_3
แพลทินัม	ปานกลาง	สูง	ปานกลาง	ต่ำมาก
ไทเทเนียมเคลือบ SnO_2	ต่ำ	สูง	สูง	สูง

Migo และคณะ (1993) ศึกษาการกำจัดสีน้ำเสียจากอุตสาหกรรมกระดาษที่ใส่มอลาสเป็นวัตถุค้ำด้วยสารช่วยในการตกตะกอนชื่อ เพอร์ริคไฮดรอกซีซัลเฟต (PFS, $(\text{Fe}_2(\text{OH})_n(\text{SO}_4)_{3-n/2})_m$) น้ำเสียจากอุตสาหกรรมกระดาษที่ใสในการทดลองแบ่งเป็น 3 ประเภทดังรูปที่ 2.23 คือ น้ำเสียที่ไม่ได้ผ่านการบำบัด (FS) มีคุณสมบัติเป็นกรด pH ประมาณ 4-5, น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดทางชีววิทยา (BDE) และน้ำเสียจากบ่อกักที่ผ่านการบำบัดทางชีววิทยา (LE) pH ประมาณ 8 มีปริมาณฟลูออไรด์, ซัลเฟต, เหล็ก, น้ำตาล, TOC น้อยกว่าน้ำเสียที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดดังตารางที่ 2.11 ในการทดลองนำน้ำเสียตัวอย่าง ปริมาตร 5 มิลลิลิตรลงในสารช่วยตกตะกอนปริมาณหนึ่ง กวนเร็ว 5 นาที กวนช้า 10 นาที นำน้ำเสียดังกล่าวไป centrifuge ที่ 3,400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ควบคุม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จากนั้นนำส่วนที่ใสมาวิเคราะห์หา pH, ค่าการดูดกลืนแสงที่ ความยาวคลื่น 475 นาโนเมตร, TOC, ไอออนบวก และไอออนลบ ผลการทดลองพบว่า สามารถกำจัดสีได้ 32, 87 และ 94% ในน้ำเสียตัวอย่างของ FS, BDE และ LE ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.24 TOC ลดลง 21% ในน้ำเสียตัวอย่างของ FS และ 73% ในน้ำเสียตัวอย่างของ BDE และ LE ปริมาณที่เหมาะสมของสารช่วยตกตะกอนที่ใช้ในการกำจัดสีคือ 4% โดย ปริมาตร ค่า pH ลดลงเนื่องจากปริมาณสารช่วยตกตะกอนเพิ่มขึ้น (pH ของสารช่วยตก ตะกอนเท่ากับ 0.02) นอกจากนี้ถ้าเปลี่ยนสารช่วยตกตะกอนเป็นโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($\text{Al}_2(\text{OH})_n\text{Cl}_{4-n}(\text{SO}_4)_x$) จะได้ผลการทดลองในทิศทางเดียวกันคือ สามารถกำจัดสีได้ 31, 94 และ 95% ในน้ำเสียตัวอย่างของ FS, BDE และ LE ตามลำดับดังรูปที่ 2.25 การใช้ปริมาณ สารช่วยตกตะกอนมากเกินไปทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขุ่นขึ้นและปริมาณ TOC เพิ่มขึ้น เมื่อใช้ FeCl_3 และ AlCl_3 ในการกำจัดสีน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดทางชีววิทยา (BDE) พบว่า ความเข้มข้นที่เหมาะสมในการกำจัดสีประมาณ 35 mM สามารถกำจัดสีได้ 93% และ TOC ลดลง 76% ในกรณีที่มีปริมาณสารช่วยตกตะกอนมากเกินไปจะทำให้อัตราการกำจัดสีลดลง เนื่องจากเมลานอยดินที่เป็นสารทำให้เกิดสีน้ำตาลเข้มในน้ำเสียมีประจุเป็นลบ เมื่อใส่สาร ช่วยตกตะกอนลงไปทำให้เกิดอนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุเป็นกลางและเสถียร ถ้ามีปริมาณ สารช่วยตกตะกอนมากเกินไปจะทำให้อนุภาคคอลลอยด์ดังกล่าวเกิดประจุซึ่งอยู่ในสภาวะที่ไม่ เสถียร จึงทำให้น้ำเสียมีความขุ่นมากขึ้น นอกจากนี้ Migo และคณะได้สรุปว่าน้ำเสียที่ผ่าน การบำบัดทางชีววิทยาแล้วสามารถกำจัดสีได้มากกว่า และ TOC ลดลงกว่าน้ำเสียที่ไม่ได้ผ่าน การบำบัด เนื่องจากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดทางชีววิทยามีปริมาณสารอินทรีย์น้อยกว่าเพราะ

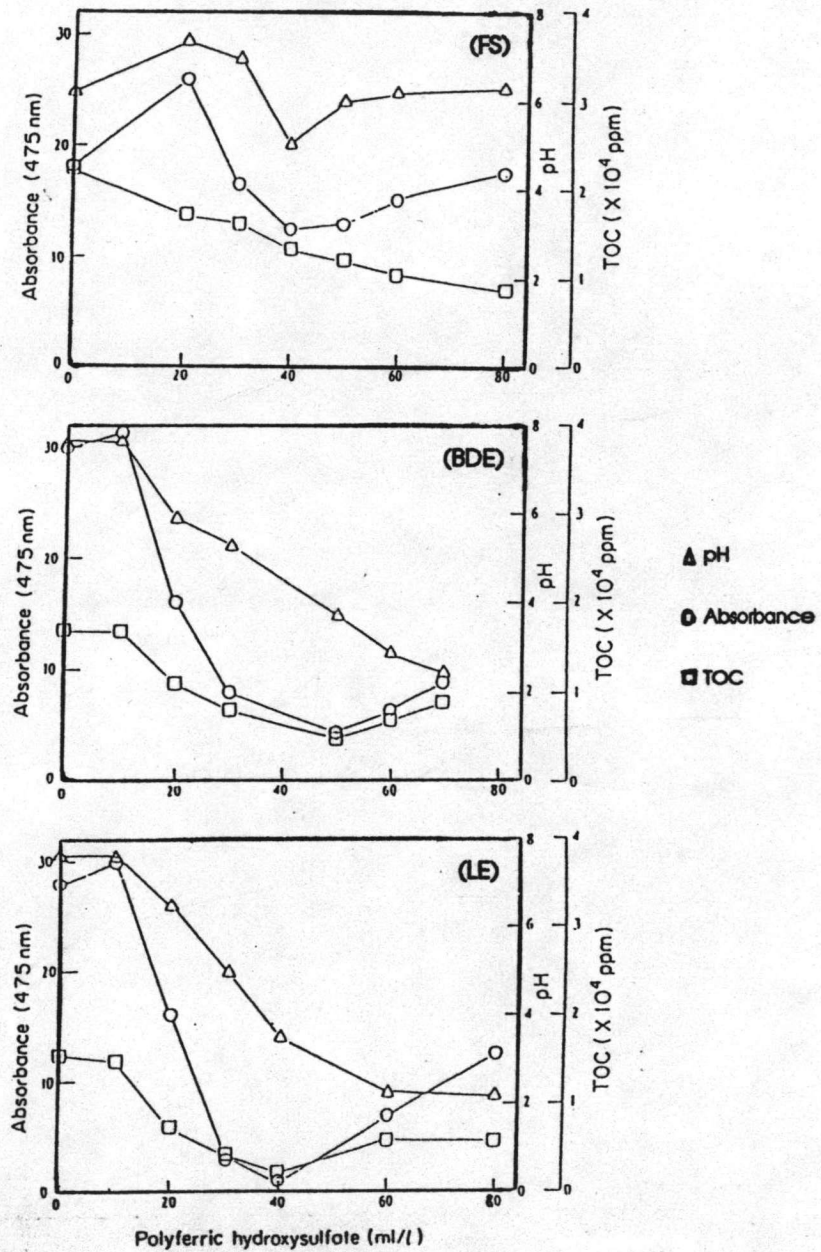
บางส่วนได้ถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ อีกทั้งน้ำเสียที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดมีปริมาณฟลูออไรด์ไอออนมากกว่าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดทางชีววิทยา ซึ่งฟลูออไรด์ไอออนเป็นตัวยับยั้งในการกำจัดสี วิธีการลดปริมาณฟลูออไรด์ไอออนคือ เติมแคลเซียมออกไซด์ลงไปเพื่อให้เกิดตะกอนของแคลเซียมฟลูออไรด์ (CaF₂) ซึ่งมีความสามารถในการละลายต่ำที่ pH สูง วิธีดังกล่าวจะเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำเสียที่ไม่ได้ผ่านการบำบัด ส่วนคลอไรด์ไอออนและซัลเฟตไอออนนี้ไม่มีผลต่อการกำจัดสีและ pH ในรายงานนี้ยังกล่าวว่าถ้าต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสียิ่งขึ้นและ pH เป็นกลางมากขึ้น ต้องนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมาผ่านระบบ Packed-bed ของถ่านกัมมันต์



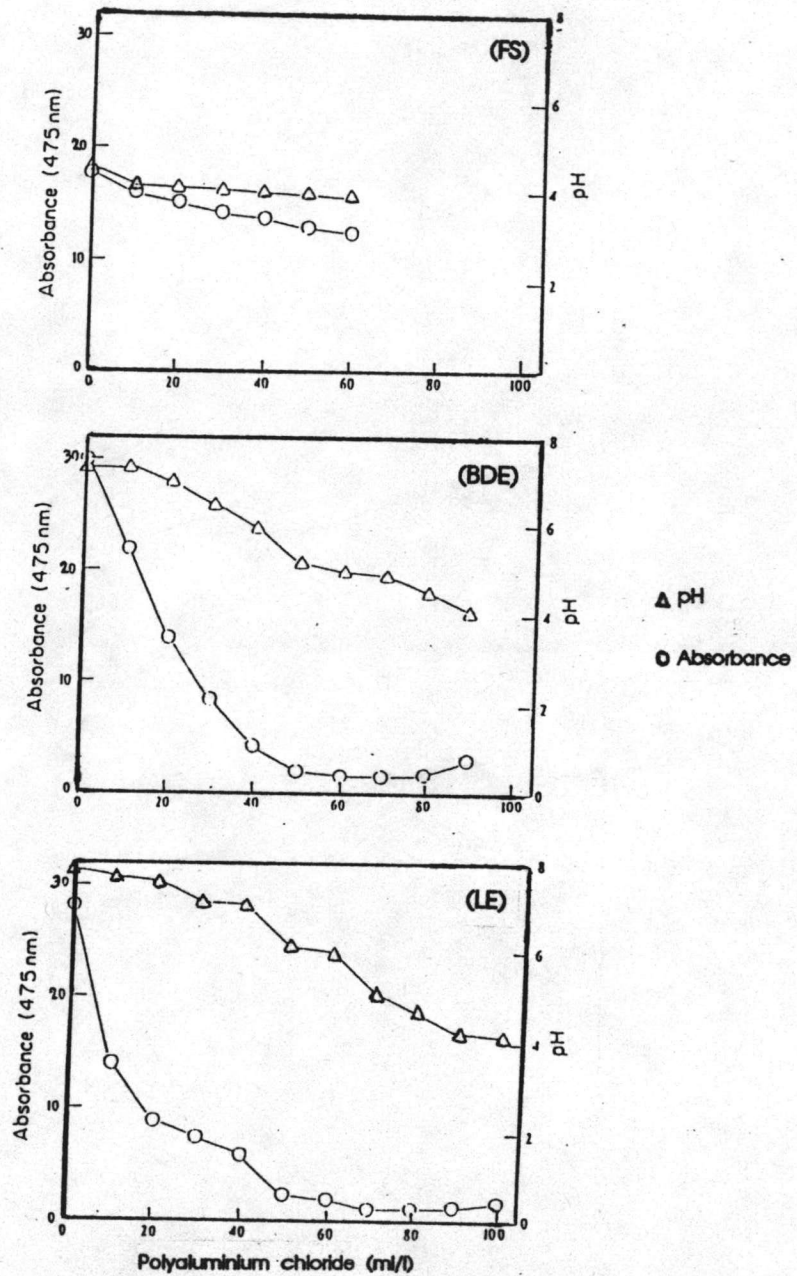
รูปที่ 2.23 ประเภทต่างๆ ของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการหมักสุราที่ใช้ในการทดลอง (Migo และคณะ, 1993)

ตารางที่ 2.11 คุณสมบัติของน้ำเสียประเภทต่างๆ จากอุตสาหกรรมหมักสุรา
ที่ใช้ในการทดลอง (Migo และคณะ, 1993)

ตัวแปรที่วิเคราะห์ (ppm)	FS น้ำเสียที่ไม่ได้ผ่านการบำบัด	BDE น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด ทางชีววิทยา	LE น้ำเสียจากบ่อตกที่ผ่าน การบำบัดทางชีววิทยา
pH	4.55	7.71	7.85
Absorbance (475 nm)	18.02	29.92	27.86
TOC ($\times 10^{-4}$ ppm)	3.18	1.68	1.55
F ⁻	710	116	52
Cl ⁻	1,786	3,308	4,646
SO ₄ ²⁻	2,741	100	60
Na ⁺	133	140	182
K ⁺	7,614	7,884	10,720
Ca ²⁺	2,746	1,666	370
Mg ²⁺	384	370	389
Fe ³⁺	74	12	17
Al ³⁺	112	108	112
Total Nitrogen	1,644	1,690	1,476
Total Potassium	131	141	60
Red. sugars (g/l)	10.02	2	2.60
Tot. sugars (g/l)	16	1.8	3.10

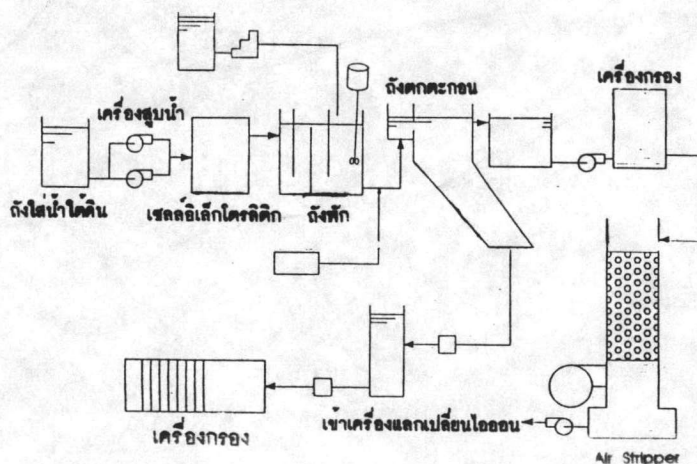


รูปที่ 2.24 ผลการทดลองในการกำจัดสีน้ำเสียประเภทต่างๆ จากอุตสาหกรรม การหมักสุราด้วยสารช่วยตกตะกอนชื่อ เฟอริกไฮดรอกซีซัลเฟต (Migo และคณะ, 1993)



รูปที่ 2.25 ผลการทดลองในการกำจัดสีน้ำเสียประเภทต่างๆ จากอุตสาหกรรม
การหมักสุราด้วยสารช่วยตกตะกอนชื่อ โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์
(Migo และคณะ, 1993)

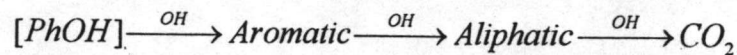
Zuranski (1994) ได้พัฒนาระบบบำบัดน้ำใต้ดินซึ่งเดิมใช้วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน เพื่อกำจัด Cr^{6+} และ Cr^{3+} ระบบนี้มีปัญหายุ่งยากในวิธีการและความถี่ของการ regenerate เรซินเมื่อใช้ไปได้ระยะเวลาหนึ่ง อีกทั้งมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูง ดังนั้นจึงได้ใช้วิธีไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำใต้ดินที่มีไอออนของโลหะหนักโดยเฉพาะ Cr^{6+} โดยใช้อิเล็กโทรดที่ไม่เสถียรในการผลิตสารประกอบเฟอร์รัสที่ไม่สามารถละลายน้ำได้เพื่อใช้ตกตะกอนและดูดซับไอออนของโลหะหนักในน้ำ เฟอร์รัสไอออนถูกออกซิไดส์เป็นเฟอร์ริกไอออนในขณะที่ Cr^{6+} ถูกรีดิวซ์เป็น Cr^{3+} และถูกดูดซับด้วยตะกอนของ Amorphous iron oxyhydroxide จากนั้นแยกตะกอนด้วยการกรอง น้ำส่วนที่ใสถูกส่งไปที่ Air Stripper และจึงเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนไอออนดังรูปที่ 2.26 ซึ่งระบบบำบัดนี้จะช่วยยืดอายุในการ regenerate เรซิน และเพิ่มอัตราการบำบัด สรุปคือระบบการบำบัดนี้ใช้วิธีไฟฟ้าเคมีในการลดปริมาณโครเมียมทั้งหมดและปริมาณสารแขวนลอยทั้งหมด ในขณะที่วิธีการแลกเปลี่ยนไอออนจะลดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ ระบบบำบัดน้ำใต้ดินนี้เรียกว่า ANDCO เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูง ค่าใช้จ่ายในการบำบัดต่ำกว่าระบบเดิมที่ใช้วิธีการแลกเปลี่ยนไอออนเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ Zuranski ได้พัฒนาระบบบำบัดด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีในโรงงานทดลองพบว่า สามารถลดโครเมียมไอออนทั้งหมดจาก 15-25 ppm เหลือเพียง 0.01 ppm ในขณะที่ปริมาณเหล็กในน้ำไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการทดลอง



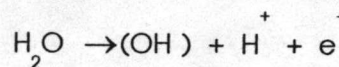
รูปที่ 2.26 ระบบบำบัดน้ำใต้ดิน ANDCO (Zuranski, 1994)

2.10 ปฏิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมโดยวิธีไฟฟ้าเคมี

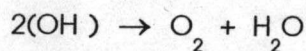
Comninellis (1992) ใช้อิเล็กโตรดแบบเสถียรคือแพลทินัมหรือไทเทเนียมเคลือบ ดินบุกออกไซด์ในการกำจัดฟีนอลที่มีคุณสมบัติเป็นสารอินทรีย์



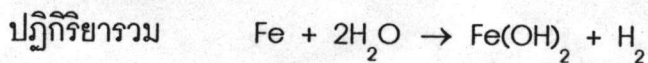
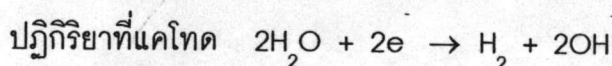
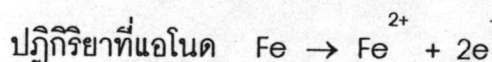
โดย OH หรืออนุพันธ์ไฮดรอกซิลได้จากการเกิดปฏิริยาออกซิเดชันของน้ำด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี ซึ่งจะเกิดบริเวณพื้นผิวของอิเล็กโตรด



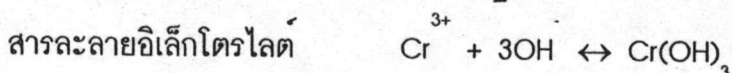
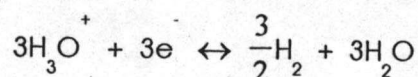
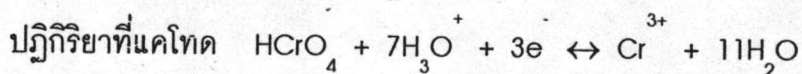
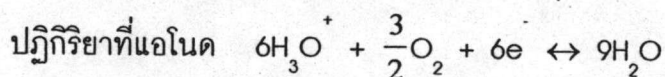
ปฏิริยาข้างเคียงที่จะเกิดขึ้นได้แก่ การเกิดก๊าซออกซิเจน



Pretorius และคณะ (1991) ใช้อิเล็กโตรดแบบสลายตัวได้คือเหล็ก เพื่อผลิตสารช่วยในการตกตะกอนในรูปตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์

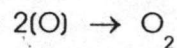
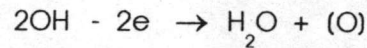


Reussard และคณะ (1990) ใช้อนุภาคแกรไฟต์เป็นอิเล็กโตรดบรรจุระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เป็นส่วนของแคโทดและแผ่นตะกั่วเคลือบแมงกานีสออกไซด์ที่เป็นส่วนของแอโนดเพื่อกำจัด Cr^{6+} ในน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะ

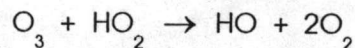
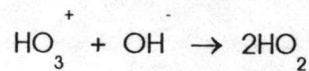
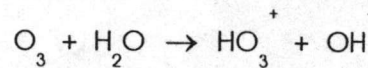


Patemarakis และ Fountoukidis (1990) ใช้อิเล็กโทรดแบบเสถียรคือไทเทเนียม เพื่อกำจัดเชื้อโรคจากแหล่งน้ำธรรมชาติ

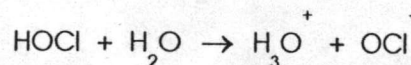
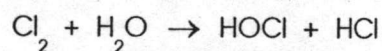
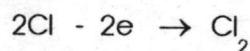
1. ที่ขั้วแอโนดจะเกิดออกซิเจนอะตอม ซึ่งมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา ทำให้สามารถกำจัดเชื้อโรคได้ แต่ (O) นี้จะเกิดบริเวณพื้นผิวของอิเล็กโทรดและไม่เสถียร



2. ที่ขั้วแอโนดจะเกิดโอโซนขึ้นระหว่างการอิเล็กโทรลิซิสของน้ำที่ประกอบด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์บางชนิด เช่น กรดซัลฟูริกเจือจาง ทำให้ได้อนุพันธ์อิสระ HO_2 และ OH ซึ่งมีความสามารถมากในการกำจัดเชื้อโรคในระยะเวลาสั้น เนื่องจากเป็นอนุพันธ์อิสระจึงไม่มีความเสถียร

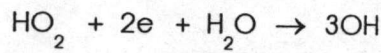
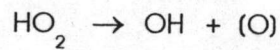
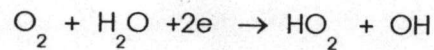


3. ที่ขั้วแอโนด Cl^- ที่มีอยู่ในน้ำตามธรรมชาติ (ประมาณ 3.5 ppm) ถูกออกซิไดส์ได้ก๊าซคลอรีน สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้ HOCl และ OCl^- ทั้ง Cl_2 , HOCl และ OCl^- ใช้กำจัดเชื้อโรค ถ้าสารเหล่านี้มีปริมาณมากเกินไปในน้ำทำให้เกิดสารเคมีปนเปื้อนในน้ำได้



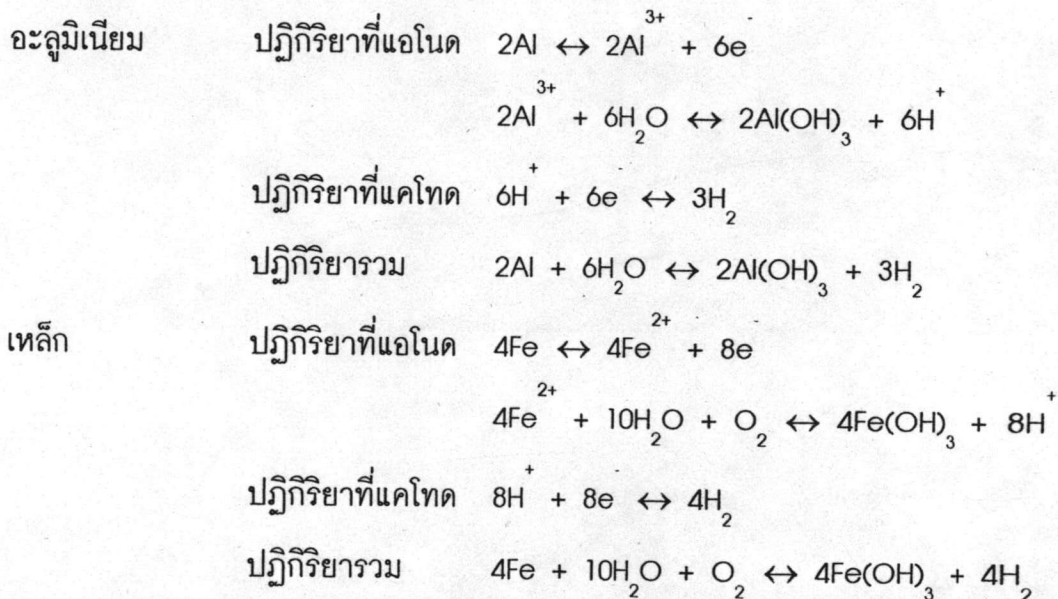
4. ที่ขั้วแอโนด คาร์บอนเนตและซัลเฟตไอออนจะถูกออกซิไดส์ให้อยู่ในรูปของเปอร์คาร์บอนเนตหรือเปอร์ซัลเฟต ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์เชื้อโรคที่ดี

5. ที่แคโทด ก๊าซออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับน้ำได้ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ไอออน ซึ่งไม่เสถียรเปลี่ยนรูปได้อย่างรวดเร็ว แต่สามารถกำจัดเชื้อโรคได้

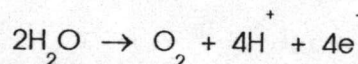
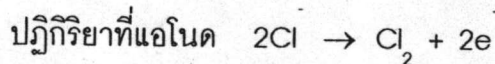


6. สนามไฟฟ้าอาจจะไปทำลายโครงสร้างภายในของเชื้อโรคโดยตรง

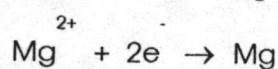
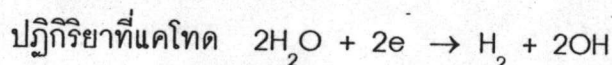
Biwyk (1988) ใช้อิเล็กโทรดที่สลายตัวได้คือเหล็กหรืออะลูมิเนียมบำบัดน้ำเสีย จากชุมชนที่ผ่านการบำบัดทางชีววิทยาแล้ว

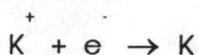
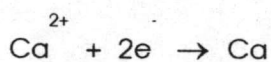
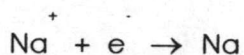


Mendia (1982) ใช้เหล็กเป็นแคโทดและเหล็กผสมซิลิกาเป็นแอโนด

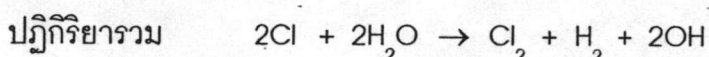


ที่แอโนดสามารถเกิดปฏิกิริยาใดก็ได้ขึ้นอยู่กับทางเลือกชนิดของอิเล็กโทรด ถ้าต้องการก๊าซคลอรีนต้องเลือกอิเล็กโทรดที่มีศักย์ไฟฟ้าเกินตัวสูงในการผลิตก๊าซออกซิเจนและศักย์ไฟฟ้าเกินตัวต่ำในการผลิตก๊าซคลอรีน เช่น แกรไฟต์, เหล็กผสมซิลิกา, แมกนีไตต์, ตะกั่วออกไซด์ เป็นต้น

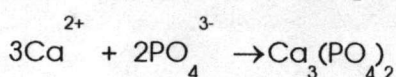
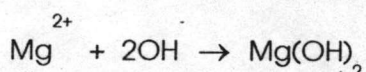
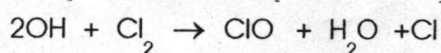




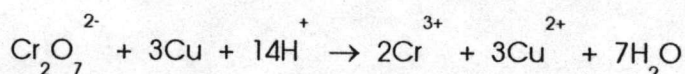
ที่แคโทดไม่สามารถทำให้ไอออนบวกถูกรีดิวซ์เป็นโลหะได้เนื่องจากปฏิกิริยาดังกล่าวมี ศักย์ไฟฟ้าเกินตัวสูงมาก



ในกรณีที่ไม่มีเมมเบรนมากั้นระหว่างแคโทดและแอโนด ทำให้ไอออนสามารถเคลื่อนที่ได้อิสระ พบว่าก๊าซคลอรีนสามารถทำปฏิกิริยาได้ไฮโปคลอไรต์ที่กำจัดเชื้อโรคได้ หรือถ้าในน้ำมี Mg^{2+} , Ca^{2+} จะทำให้ได้สารช่วยตกตะกอนที่ใช้กำจัดสารแขวนลอยและฟอสเฟตอีกด้วย

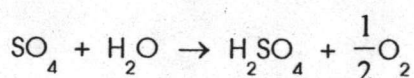
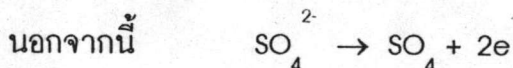
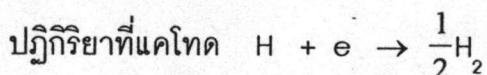
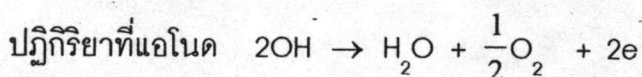


McDonald (1980) ใช้ทองแดงในการกำจัด Cr^{6+} โดยเปลี่ยนให้อยู่ในรูป Cr^{3+}



Allmand (1931) กล่าวถึงปฏิกิริยาในการเกิดก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจน

อีกทั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลเฟตไอออน



ทบวงมหาวิทยาลัย (2528) สรุปว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากอิเล็กโทรดที่เสถียร เช่น แพลทินัม เป็นต้น ในสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายคือ น้ำจะถูกออกซิไดส์ได้ก๊าซ ออกซิเจนและก๊าซไฮโดรเจน

