

# บทที่ 1

## บทนำ

### ความเป็นมาและความสำคัญ

อุตสาหกรรมน้ำตาลเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญของประเทศไทย เนื่องจากน้ำตาลเป็นหนึ่งในสินค้าออกที่สำคัญของประเทศ นอกจากนี้อุตสาหกรรมน้ำตาลยังเป็นอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมอื่น ๆ และภาคเกษตรกรรมอีกด้วย กล่าวคือนอกจากน้ำตาลจะต้องอาศัยอ้อยซึ่งเป็นผลผลิตทางการเกษตรเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบแล้ว น้ำตาลยังสามารถใช้เป็นส่วนประกอบในอุตสาหกรรมผลิตอาหาร ผลิตภัณฑ์นม น้ำหวาน น้ำอัดลม และผลิตภัณฑ์ยา ฯลฯ อีกด้วย

โรงงานน้ำตาลมีการใช้สารเลดสับอะซีเตท (Lead Subacetate [ $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$ ]) ซึ่งมีคุณสมบัติในการทำให้น้ำอ้อยใส เป็นการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำอ้อย โดยการทำปฏิกิริยากับสิ่งเจือปนชนิดต่าง ๆ ให้ตกตะกอน ก่อนที่จะกรองออกมาโดยง่าย เหลือแต่เพียงน้ำใสเพื่อใช้วัดค่าความหวาน หรือค่า Pol หรือ Polarization สารดังกล่าวมีสารตะกั่วเป็นองค์ประกอบอยู่ในโมเลกุลประมาณ 73% โดยน้ำหนัก ซึ่งตะกั่วมีความเป็นพิษต่อร่างกายสูงมาก หากน้ำทิ้งที่มีสารตะกั่วปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำ จะก่อให้เกิดปัญหาด้านสุขภาพแก่ประชาชนที่นำน้ำที่ปนเปื้อนตะกั่วมาอุปโภคบริโภค (กลุ่มบริษัทหลานสิน, 2557) และนอกจากนี้อาจส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศวิทยาของแหล่งน้ำอีกด้วย

จากการศึกษาปริมาณตะกั่วในน้ำเสียของโรงงานน้ำตาล พบว่ามีความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำเสียสูงมาก กล่าวคือประมาณ 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งปริมาณดังกล่าวยากต่อการกำจัดด้วยวิธีทั่วไป เช่น การดูดซับ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วโดยวิธีอิเล็กโทรไลซิส ซึ่งเป็นวิธีที่นอกจากจะสามารถแยกตะกั่วออกจากน้ำเสียได้แล้ว ยังสามารถนำตะกั่วกลับมาใช้ใหม่ได้อีกด้วย นับได้ว่าเป็นการจัดการสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน และยังส่งผลทางอ้อมต่อการพัฒนาคนและสังคมให้มีคุณภาพ อันจะส่งผลต่อความมั่นคงของประเทศในภาพรวมอีกด้วย โดยที่เครื่องอิเล็กโทรไลซิสที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นเครื่องที่สร้างขึ้นเอง ซึ่งจะใช้วัสดุที่หาได้ในประเทศไทย ทำให้ค่าใช้จ่ายถูกกว่าเครื่องที่นำเข้าจากต่างประเทศ และยังสามารถใช้ในการซ่อมแซมบำรุงรักษาอีกด้วย

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วของเครื่องอิเล็กโทรไลซิสที่พัฒนาขึ้น
2. เพื่อศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพของเครื่องอิเล็กโทรไลซิสในการกำจัดตะกั่ว เช่น อัตราการไหล ความต่างศักย์ และจำนวนแผ่นอิเล็กโทรดต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว
3. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงจากโรงงานน้ำตาล

## ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจริงจากห้องปฏิบัติการของโรงงานผลิตน้ำตาล บริษัท ไทยรุ่งเรืองอุตสาหกรรม จำกัด จังหวัดกาญจนบุรีโดยวิธีอิเล็กโทรไลซิส
2. อิเล็กโทรดที่ใช้ในการศึกษาทำจาก อะลูมิเนียม

## คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย

- อิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) หมายถึง กระบวนการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าไปเป็นเคมีโดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งภายนอก เกิดขึ้นเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าภายนอกเข้าไปในสารละลาย แล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน – รีดักชัน
- ตะกั่ว (Lead) หมายถึง โลหะหนักที่มีน้ำหนักอะตอม 207.17 และมีความเป็นพิษต่อมนุษย์
- น้ำเสีย (Waste Water) หมายถึง ของเหลือทิ้งจากบ้านเรือน หรือภาคอุตสาหกรรม ที่มีสถานะเป็นของเหลว โดยส่วนใหญ่มีสารพิษเจือปนอยู่
- โรงงานน้ำตาล (Sugar Cane Factory) หมายถึง โรงงานอุตสาหกรรมที่ผลิตน้ำตาลทราย

## ประโยชน์ที่ได้รับ

1. เป็นข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานน้ำตาลด้วยเครื่องอิเล็กโทรไลซิสที่พัฒนาขึ้น
2. เป็นข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับสมบัติทางเคมี และทางกายภาพของน้ำเสียจากโรงงานน้ำตาล รวมถึงข้อมูลเกี่ยวกับประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยวิธีอิเล็กโทรไลซิสอันเนื่องมาจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น อัตราการไหล ความต่างศักย์ และจำนวนแผ่นอิเล็กโทรด ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการกำจัดโลหะหนักประเภทอื่น ๆ หรือ สำหรับการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมประเภทอื่น ๆ ต่อไป
3. เป็นการลดผลกระทบของตะกั่วในแหล่งน้ำ และ ลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกั่ว
4. เป็นข้อมูลเพื่อประกอบการเรียนการสอน เรื่องการกำจัดตะกั่วด้วยวิธีอิเล็กโทรไลซิส
5. เป็นการพัฒนาความสามารถของบุคลากรผู้ร่วมวิจัยให้มีประสบการณ์และความชำนาญมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้เกิดงานวิจัยที่เป็นประโยชน์ต่อประเทศต่อไป รวมถึงเป็นการเพิ่มศักยภาพในการประยุกต์งานวิจัยสู่การเรียนการสอนในห้องเรียนอีกด้วย

## บทที่ 2

### แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเรื่องการจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจริงจากโรงงานน้ำตาล โดยวิธีอิเล็กโทรไลซิสครั้งนี้ มีแนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

#### เลดสับอะซีเตท (Lead Subacetate) ในน้ำเสียของโรงงานน้ำตาล

การวิเคราะห์คุณภาพอ้อยและน้ำตาลทราย ย่อมต้องการผลการทดลองที่ถูกต้องและแม่นยำเสมอ ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเมื่อบันทึกและวิเคราะห์ผล ตลอดจนการนำเสนอในรูปแบบที่วางไว้ จะได้รับการศึกษาพิจารณาและประยุกต์ใช้โดยหน่วยงานที่เกี่ยวข้องอยู่ตลอดเวลา จึงมีการพัฒนาให้เป็นมาตรฐานอย่างสม่ำเสมอและจริงจัง (กลุ่มบริษัทหลานสิน, 2557)

สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย (สอน.) กระทรวงอุตสาหกรรม มีการจัดทำโครงการซื้อขายอ้อยตามความหวานแบบ ซี.ซี.เอส มีสาระสำคัญคือ มีการส่งเสริมให้ความรู้แก่ชาวไร่ อ้อยและเจ้าของโรงงานน้ำตาล แล้วควบคุมในการดำเนินงานให้เป็นไปตามนโยบายที่วางไว้ และสร้างความเป็นธรรมในการซื้อขายอ้อยระหว่างโรงงานและชาวไร่อ้อยมากเพิ่มขึ้น

วิธีการวิเคราะห์ความหวานจะต้องวิเคราะห์ค่าต่างๆ ดังนี้

- บริกซ์ (Brix) หมายถึง จำนวนร้อยละของของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในน้ำอ้อย
- โพล (Polarity; Pol) หมายถึง จำนวนร้อยละของน้ำตาลซูโครสในน้ำอ้อย
- เส้นใย (Fiber) หมายถึง ส่วนประกอบของอ้อยที่เข้าหีบที่ไม่ละลายน้ำ
- C.C.S. (Commercial Cane Sugar) หมายถึง ค่าของคุณภาพอ้อยที่มาจากจำนวนร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำตาลบริสุทธิ์ที่จะผลิตได้จากอ้อยในสภาวะการผลิตมาตรฐานของโรงงานน้ำตาล

การวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์โพล (Polarity) มีการใช้สารเคมี เลดสับอะซีเตท (Lead Subacetate) เพื่อทำให้ใส เป็นสารที่นำมาใช้เติมลงในตัวอย่างสารละลายของน้ำตาล เพื่อให้สิ่งไม่บริสุทธิ์ตกตะกอนกรองออกได้ง่าย สารละลายน้ำตาลที่กรองได้จะใส สะดวกต่อการสังเกตค่าที่ถูกต้องของโพล จากการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพแล้ว พบว่า เลดสับอะซีเตท (Lead Subacetate) มีประสิทธิภาพในการทำใสได้ดีที่สุด และวัดค่าโพลได้ถูกต้อง ในวิธีการวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์โพล ตามคณะกรรมการบริหารฉบับที่ 4 พ.ศ. 2537 ได้กำหนดปริมาณการใช้ คือ ใช้เลดสับอะซีเตท (Lead Subacetate) 1.5 กรัมต่อน้ำอ้อย 1 ตัวอย่าง (100 มิลลิลิตร) (มะลิและคณะ)

สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย ได้พยายามทดลองหาสารเคมีทำใสชนิดอื่นเพื่อนำมาใช้แทน เลดสับอะซีเตท (Lead Subacetate) ซึ่งจะไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม แต่ยังคงได้ผลไม่เป็นที่พอใจ เช่น สารผสมระหว่างอะลูมิเนียมคลอไรด์ (Aluminium Chloride) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide) (กลุ่มบริษัทหลานสิน, 2557)

## แนวทางการจัดการสารเคมีเลดสับอะซีเตท

สำนักงานพัฒนาคุณภาพสิ่งแวดล้อมโรงงานและมีการออกประกาศเพื่อควบคุมกากอุตสาหกรรมไว้ เช่น กำหนดวิธีการเก็บ ทำลายฤทธิ์ กำจัด ฝัง ทิ้ง เคลื่อนย้ายและการขนส่งสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว

เลดสับอะซีเตท (Lead Subacetate) ที่ใช้ประโยชน์แล้วในอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทราย จัดอยู่ในกลุ่มสารพิษจำพวกโลหะหนักและกากของเสียที่มีสารเคมีบางชนิดเจือปนอยู่ ซึ่งจะต้องแยกกำจัดต่างหาก การใช้ เลดสับอะซีเตท (Lead Subacetate) ในการวิเคราะห์จะใช้แต่ละครั้งในปริมาณน้อย (1-1.5 กรัม/ตัวอย่าง) กากตะกอกจากการวิเคราะห์เกิดขึ้นปริมาณน้อยในแต่ละครั้งของการวิเคราะห์ หน่วยงานของรัฐอาจควบคุม ดูแลไม่ทั่วถึง ณ จุดนี้ เนื่องจากคำนึงถึงความเสี่ยงในการวิเคราะห์ และปริมาณกากตะกอกรวมที่เกิดขึ้นแล้ว นับว่ามีปริมาณมากที่นำจะมีการควบคุม เนื่องจากมีสารพิษตะกั่วที่เป็นโลหะหนักเป็นองค์ประกอบอยู่มาก

## การกำจัดสารพิษที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ

วิธีการกำจัดขั้นพื้นฐาน ดังนี้

### 1) การกำจัดตะกั่วในน้ำทิ้ง

ในการกำจัดตะกั่วที่ละลายอยู่ในน้ำ จะใช้การตกตะกอนโดยให้เกิดเป็นตะกอนเลดคาร์บอเนต (lead carbonate :  $PbCO_3$ ) หรือ เลดไฮดรอกไซด์ (lead hydroxide :  $[Pb(OH)_2]$ ) ในการทำให้เกิดเลดไฮดรอกไซด์จะใช้ปูนขาว (lime  $[Ca(OH)_2]$ ) แล้วทิ้งให้ตกตะกอน 1 ชั่วโมง อาจใช้ ฟอรัสซัลเฟต (ferrous sulfate) ช่วยในการตกตะกอน ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารรวมตะกอน (flocculating agent) ส่วนการทำให้เกิดเลดคาร์บอเนต จะใช้ โดโลไมท์ (dolomite  $(CaCO_3.MgCO_3)$ ) โดยการให้น้ำทิ้งผ่านโดโลไมท์สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยผ่านการล้างโดยใช้น้ำ ซึ่งเลดคาร์บอเนตจะถูกชะออกมา ค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วงที่เป็นด่าง

การกำจัดกากตะกอนของตะกั่ว

กากตะกอนของตะกั่ว จะไม่ละลายน้ำจึงอาจกำจัดด้วยวิธีฝังกลบ ได้ ส่วนสารประกอบของตะกั่วบางชนิดที่ละลายน้ำ หรือละลายน้ำได้บ้าง ไม่ควรใช้วิธีฝังกลบ สำหรับกากบางชนิดที่มีตะกั่วอยู่ อาจใช้วิธีนำกลับมาใช้ใหม่ (Recovery) ได้ เช่น แบตเตอรี่ที่ใช้แล้ว ซึ่งมีตะกั่วอยู่ (กลุ่มบริษัทหลานสิน, 2557)

## มาตรฐานการปนเปื้อนของตะกั่วในน้ำทิ้ง

โลหะหนักและสารประกอบของโลหะหนักเกือบทุกชนิดเป็นพิษ ที่เป็นอันตรายต่อร่างกาย โดยอาจทำให้เจ็บป่วย พิการ หรือตายได้ ถ้าได้รับเข้าสู่ร่างกายในปริมาณที่มากเกินไป ดังนั้นจึงมีการ กำหนดมาตรฐานการปนเปื้อนของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมมีให้เกินกว่าที่กำหนดไว้ สำหรับโลหะหนัก ที่ศึกษา คือ ตะกั่ว มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม ตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) ได้กำหนดให้มีปริมาณ ตะกั่วไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร และมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำ ผิวดิน ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537) ได้กำหนดให้มีปริมาณ ตะกั่วไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (สุธีลาและคณะ, 2544)

### ตะกั่ว (Lead, Pb)

#### 1. สมบัติและการปนเปื้อนของตะกั่วในสิ่งแวดล้อม

ตะกั่วเป็นโลหะหนักที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต อยู่ในหมู่ 6 ของตารางธาตุมีน้ำหนักอะตอม 207.19 เอเอ็มยู ความหนาแน่น 11.34 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรที่ 20 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลวที่ 327.4 องศาเซลเซียส จุดเดือดที่ 1,620 องศาเซลเซียส ลักษณะโดยทั่วไปเป็นโลหะสี เงินปนเทา ตะกั่วจัดเป็นโลหะหนักที่ไม่มีประโยชน์แก่ร่างกายทั้งพืชและสัตว์ แต่ยังมีโทษอย่างมาก ธาตุนี้มีกระจายอยู่ทั่วไปในสิ่งแวดล้อมโดยเฉลี่ยมีตะกั่วอยู่ประมาณ 10-15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตะกั่วที่อยู่ในรูปธาตุอิสระมีน้อยมาก ที่พบในเปลือกโลกส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารประกอบ ตัวอย่างแร่ที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบได้แก่ แร่ยิลไนท์ (gelenite) หรือยิลเลนา (galena) ซึ่งเป็น ซัลไฟด์ของตะกั่ว (Pb) แร่เซอร์ไซต์ (cerussite ( $PbCO_3$ )) แองเลไซต์ (anglesite ( $PbSO_4$ )) ไพโรมอไฟท์ (pyromophite ( $PbCl_2 \cdot 3Pb_3(PO_4)_2$ )) มินิเยม (minium ( $Pb_3O_4$ )) (พิมลและชัยวัฒน์, 2525) ในธรรมชาติเมื่อสลายจะถูกออกซิไดส์อย่างช้า ๆ ให้อยู่ในรูปคาร์บอเนตหรือถูกตรึงโดยแร่ดินเหนียว (Clay) ออกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียมและอินทรีย์วัตถุ คุณสมบัติคล้ายกลุ่มโลหะแอล-คาไลน์เอิร์ธ ดังนั้น จึงสามารถเข้าแทนที่โปแตสเซียม (K) แบเรียม (Ba) สตรอนเทียม (Sr) และ แคลเซียม (Ca) ในแร่และตำแหน่งที่ไอออนของธาตุเหล่านี้ถูกดูดซับ ตะกั่วเป็นธาตุโลหะหนักที่มีสภาพเคลื่อนที่ได้น้อย ที่สุด (สิทธิชัย, 2528) ฉะนั้นตะกั่วที่มีในสิ่งแวดล้อมจึงมีปริมาณไม่มากพอที่จะก่อเกิดอันตรายจากคน และสัตว์ การนำมาใช้ประโยชน์ (พิมลและชัยวัฒน์, 2525) เช่น ใช้ในการสังเคราะห์เตตระเอทิลเลต (TEL) ซึ่งเป็นสารที่ใช้เติมลงไปนน้ำมันเชื้อเพลิงเพื่อเพิ่มปริมาณเลของอกเทน ใช้ในแบตเตอรี่ สารเคมีปราบศัตรูพืช ทำปุ๋ยและสารเคมีที่ใช้เพิ่มผลผลิต ได้แก่ ปุ๋ยฟอสเฟต เลตอะซีเนต ซึ่งจะมี ตะกั่วปนอยู่เมื่อถูกนำมาใช้จะทำให้มีตะกั่วตกค้างในพื้นที่เกษตรกรรมเป็นปริมาณ (สิทธิชัย, 2528) ตะกั่วยังนำมาใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไป เช่น ทำโลหะผสมทองเหลืองบรอนซ์ พิวส์ ลูกปืน หมึกพิมพ์ พลาสติก เครื่องเคลือบ สีทาบ้านและของเด็กเล่น จึงเป็นเหตุให้มีตะกั่วตกค้างอยู่ในสิ่งแวดล้อม (Tsuchiya K., 1986) และได้นำตะกั่วมาใช้กันมากขึ้น จึงทำให้ตะกั่วเจือปนอยู่ในสิ่งแวดล้อม ทั้งใน ดิน น้ำ อากาศ และสะสมในตัวสิ่งมีชีวิตเป็นปริมาณมาก

## 2. การนำมาใช้ประโยชน์

ปัจจุบันตะกั่วถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง สามารถแบ่งตามลักษณะการนำมาใช้งานได้ 3 ประเภท (สมพูล, 2532) ดังนี้

1) โลหะตะกั่ว ผลิตจากสินแร่ตะกั่วได้แก่  
 2) แร่ปฐมภูมิ ได้แก่ แร่กาลีน่า (PbS) เป็นตะกั่วที่รวมตัวกับกำมะถันเกิดเป็นตะกั่วซัลไฟด์

3) แร่ทุติยภูมิ ได้แก่ แอังกไลต์ ( $PbSO_4$ ) เป็นตะกั่วที่เกิดในสภาวะที่เป็นกรด (pH ต่ำกว่า 6.4) ตะกั่วซัลไฟด์จะถูกออกซิไดซ์กลายเป็นตะกั่วซัลเฟต และ เซรัสไซต์ (Cerussite ( $PbCO_3$ )) เป็นตะกั่วที่เกิดขึ้นในสภาวะที่ pH สูงกว่า 6.4 จะเกิดเป็นตะกั่วคาร์บอเนต

ในการที่โลหะตะกั่วมีคุณสมบัติมีคุณสมบัติที่คงทนต่อการกัดกร่อน (Resist to Corrosion) และอ่อนตัวหลอมเหลวได้ง่าย รวมทั้งสามารถป้องกันการแผ่รังสี ตะกั่วจึงถูกนำมาใช้ในด้านอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ทำแผ่นตะกั่วในหม้อแบตเตอรี่ หัวขั้วสะพานไฟของหม้อแบตเตอรี่ หล่อตัวพิมพ์ ทำหัวกระสุนปืน หุ้มสายเคเบิล สายไฟฟ้า สายโทรศัพท์ รวมทั้งนำมาทำอุปกรณ์ป้องกันรังสีจากเครื่องเอกซเรย์ (x-ray) เครื่องปฏิกรณ์พลังงานปรมาณู เป็นต้น

## 3. สารประกอบอนินทรีย์ของตะกั่ว (Inorganic Lead Compound)

1) ตะกั่วออกไซด์ (Lead Oxide) เช่น ตะกั่วโมโนออกไซด์ ( $PbO$ ) ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสี อุตสาหกรรมผลิตหม้อแบตเตอรี่ และอุตสาหกรรมผลิตยาง เป็นต้น ตะกั่วแดง ( $Pb_3O_4$ ) ใช้เป็นสีทาโลหะเพื่อป้องกันสนิมหรือเคลือบรถยนต์ และตะกั่วไดออกไซด์ ( $PbO_2$ ) ใช้ทำเป็นขั้วอิเล็กโทรดของแบตเตอรี่รถยนต์และเครื่องจักร

2) ตะกั่วคาร์บอเนต (Lead Carbonate :  $PbCO_3$ ) ตะกั่วซัลเฟต ( $PbSO_4$ ) และตะกั่วโครเมต ( $PbCrO_4$ ) ใช้ในวงการอุตสาหกรรมผลิตสีผสมในผงฝุ่นสีขาว สีน้ำมัน หมึกพิมพ์และสีพลาสติก เป็นต้น

3) ตะกั่วอะซิเตต ( $Pb(CH_3COO)_2$ ) เป็นเกลือของตะกั่วที่ละลายในน้ำได้ดี ใช้ในทางอุตสาหกรรมผลิตเครื่องสำอาง ครีมใส่ผม เป็นต้น

4) ตะกั่วไนเตรต ( $Pb(NO_3)_2$ ) ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตยางและพลาสติก

5) ตะกั่วอะซิเนต ( $PbO \cdot As_2O_5$ ) ใช้ในทางอุตสาหกรรมผลิตยาฆ่าแมลงและยาปราบศัตรูพืช

6) ตะกั่วซิลิเกต ( $PbSiO_3$ ) ใช้ในผสมในกระเบื้อง เครื่องเคลือบเซรามิกเพื่อให้เกิดความเงางามและมีผิวเรียบ

## 4. สารประกอบอินทรีย์ของตะกั่ว (Organic Lead Compound)

1) ตะกั่วสเตียเรต ( $Pb(C_{10}H_{15}O_2)$ ) ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตแลคเกอร์น้ำมันหล่อลื่นและจารบี เป็นต้น

2) ตะกั่วเตตราเอทิล ( $Pb(C_2H_5)_4$ ) ใช้ผสมในน้ำมันเบนซิน เพื่อเพิ่มค่าออกเทนของน้ำมันให้สูงขึ้น ป้องกันการกระตุกของเครื่องยนต์ (ปัจจุบันยกเลิกใช้แล้ว)

3) ตะกั่วเตตราเมทิล ( $Pb(CH_3)_4$ ) ใช้เติมร่วมกับตะกั่วเตตราเอทิลในน้ำมันเบนซิน เพื่อเพิ่มค่าออกเทนของน้ำมันให้สูงขึ้น ป้องกันการกระตุกของเครื่องยนต์ (ปัจจุบันยกเลิกใช้แล้ว)

## 5. ตะกั่วในสิ่งแวดล้อม

การใช้ประโยชน์จากตะกั่วเป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดของเสีย โดยเฉพาะการใช้ตะกั่วในอุตสาหกรรมต่างๆ ทำให้มีการปล่อยตะกั่วสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งการแพร่กระจายของตะกั่วทั้งจากแหล่งกำเนิดที่เคลื่อนที่ได้และเคลื่อนที่ไม่ได้ ส่วนใหญ่จะปล่อยออกสู่บรรยากาศ ดินและแหล่งน้ำตามธรรมชาติ (อำพัน , 2534) ความเข้มข้นของตะกั่วในสิ่งแวดล้อม คือ

### 1) ตะกั่วในอากาศ

ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในบรรยากาศจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณแหล่งกำเนิดของตะกั่ว ระยะห่างของแหล่งกำเนิดและผู้ได้รับผลกระทบ ทิศทางและความเร็วลม

ตะกั่วที่ถูกปล่อยจากรถยนต์ส่วนใหญ่มีขนาด 0.2-0.4 ไมครอน เป็นขนาดของฝุ่นละอองที่ผ่านเข้าสู่ถุงลมในปอดและผ่านสู่กระแสเลือดได้ ฝุ่นละออง 25% จะแพร่กระจายในอากาศและถูกพัดพาไปตามกระแสลม และอีก 75% จะเปลี่ยนแปลงไปเป็นออกไซด์หรือคาร์บอนेट และรวมตัวเป็นฝุ่นขนาดใหญ่ ซึ่งจะตกลงยังบนพื้นดิน เป็นเหตุให้ดินและน้ำเกิดการปนเปื้อนของตะกั่วได้มาก

### 2) ตะกั่วในแหล่งน้ำ

ปริมาณตะกั่วส่วนใหญ่จะพบในปริมาณเพียงเล็กน้อยในบริเวณต้นน้ำและเมื่อผ่านแหล่งเกษตรกรรม ชุมชน และโรงงานอุตสาหกรรม จะพบในปริมาณที่สูงมากขึ้น ปริมาณสารตะกั่วที่ละลายในน้ำไม่ควรเกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตรเพราะถือเป็นขีดกำหนดสูงสุดที่ปลอดภัยไม่ทำให้เกิดการสะสมจนกลายเป็นโรคพิษของตะกั่ว โดยจะไปทำลายบั้นทอนสมองและระบบประสาทได้ (พัฒนา , 2541)

### 3) ตะกั่วในดิน แหล่งน้ำโดยทั่วไปจะมีปริมาณตะกั่วปนเปื้อนอยู่ในตะกอนดินเสมอ

### 4) ตะกั่วในอาหารและเครื่องอุปโภค

อาหารที่มีการปนเปื้อนด้วยตะกั่วเป็นปัจจัยสำคัญในการที่จะนำตะกั่วเข้าสู่ร่างกายรวมทั้งการมีสารตะกั่วในเครื่องสำอาง เครื่องประทีนผิว ที่มีโอกาสสัมผัสอยู่เป็นประจำ ทางคณะกรรมการร่วมองค์การอาหารและยาแห่งสหประชาชาติกับองค์การอนามัยโลก ได้ร่วมกันกำหนดค่าสูงสุดที่ผู้ใหญ่จะได้รับสารตะกั่วเข้าสู่ร่างกายจากอาหารและเครื่องดื่ม คิดเป็นวันละไม่เกิน 500 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมของอาหารและเครื่องดื่ม

ในประเทศอังกฤษ มีกฎข้อบังคับเกี่ยวกับปริมาณตะกั่วในอาหารกำหนดว่ามีได้ไม่เกิน 2 ppm. สำหรับอาหารสำเร็จรูปกำหนดไม่เกิน 5 ppm. และอาหารสำเร็จรูปของเด็กไม่เกิน 0.5 ppm. (อารี , 2536)

## 6. การแพร่กระจายของตะกั่วในสิ่งแวดล้อม

การแพร่กระจายของตะกั่วในสิ่งแวดล้อม กิจกรรมที่มีการนำตะกั่วมาใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวันนับว่าเป็นสาเหตุสำคัญยิ่งที่ทำให้การแพร่กระจายของตะกั่วสู่สิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ไม่ว่าจะเป็นการแพร่กระจายไปตามอากาศ แหล่งน้ำ พื้นดิน หรือในเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิตก็ตาม จึงได้มีการศึกษาสำรวจกันอยู่เสมอถึงปริมาณของตะกั่วที่สะสมอยู่ตามสิ่งแวดล้อมต่างๆ ศึกษาพบว่า

ในแหล่งน้ำจากป่าดิบแล้งธรรมชาติบริเวณสถานีวิจัยสิ่งแวดล้อมสะแกราช จ.นครราชสีมา มีปริมาณตะกั่ว 2.75 มิลลิกรัมต่อลิตร การปนเปื้อนของตะกั่วสู่สิ่งแวดล้อมนั้นเกิดได้ทั้งสาเหตุจากธรรมชาติ เช่น ภูเขาไฟระเบิด และเกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่น จากการถลุงแร่ จากควัน จากน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม และจากไอเสียรถยนต์ ควันเป็นแหล่งแพร่กระจายตะกั่วที่สำคัญ ตะกั่วที่เป็นสารมลพิษจากควัน โรงงานส่วนใหญ่อยู่ในรูปแร่ตะกั่ว เช่น  $PbS$   $PbO$   $PbSO_4$  (ชูจิตต์และเกียรติ, 2523)

ปริมาณตะกั่วในผิวดินที่อยู่ติดถนนใหญ่จะสูงกว่าในผิวดินที่อยู่ห่างจากเขตจราจรหลายเท่า นอกจากนี้ยังพบว่าพืชที่ขึ้นอยู่ใกล้ถนนมีปริมาณตะกั่วจับอยู่ตามผิวใบ สูงกว่าพืชที่ขึ้นอยู่ห่างไกลจากเขตการจราจรหลายเท่า ซึ่งเป็นหลักฐานชี้ชัดว่าตะกั่วในน้ำมันรถยนต์เป็นแหล่งสำคัญที่ทำให้ตะกั่วในบรรยากาศเพิ่มมากขึ้นโดยต่อมากจะเกาะกับอนุภาคในบรรยากาศตกลงมาเป็นน้ำฝนสะสมอยู่ตามพื้นดินและแหล่งน้ำ เข้าสู่ห่วงโซ่อาหารต่อไปเป็นลำดับ (สุคนธ์, 2523)

#### 7. อันตรายของตะกั่วต่อสุขภาพ

การเข้าสู่ร่างกาย ตะกั่วสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง คือ

1) ระบบทางเดินหายใจ ตะกั่วจะถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายโดยการหายใจเอาอากาศที่มีฝุ่น ไอหรือสารประกอบตะกั่วเข้าไป ความอันตรายที่เกิดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดและปริมาณที่หายใจเข้าไป โดยตะกั่วที่มีขนาดเล็กกว่า 0.75 ไมครอนจะสามารถเข้าสู่หลอดลมฝอยและถุงลม แล้วถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือด (สมชาย, 2540)

2) ระบบทางเดินอาหาร ตะกั่วจะถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายโดยการกินอาหารหรือดื่มน้ำที่มีตะกั่วปนเปื้อนเข้าไป ซึ่งร่างกายจะดูดซึมเอาไว้ประมาณ 5-10% ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซึมตะกั่วเข้าสู่ร่างกายที่สำคัญ ได้แก่ แคลเซียมและฟอสเฟต ที่มีในอาหาร ซึ่งถ้ามีในปริมาณมากจะมีผลต่อการดูดซึมของตะกั่วในร่างกาย โดยแคลเซียมจะไปแย่งตะกั่วในการเกาะกับผนังมิวโคลเซลล์ของทางเดินอาหาร สำหรับฟอสเฟตจะรวมตัวกับสารประกอบของตะกั่วฟอสเฟตที่ไม่ละลายน้ำทำให้การดูดซึมของตะกั่วในร่างกายลดลง

3) ระบบทางผิวหนัง ตะกั่วจะถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายผ่านทางผิวหนังได้โดยเฉพาะสารประกอบอินทรีย์ของตะกั่วบางชนิด ซึ่งตะกั่วที่ดูดซึมเข้าทางผิวหนังได้ดี คือ เตตระเมทิลเลดสามารถละลายได้ดีในไขมัน จึงชอบไปสะสมอยู่ในอวัยวะที่มีไขมัน เช่น ระบบประสาท

#### 5.8 การสะสมของตะกั่วและการขับถ่ายออกจากร่างกาย

ตะกั่วเมื่อเข้าสู่กระแสเลือดแล้วจะสามารถพบได้ในทุกส่วนของร่างกาย และส่วนใหญ่จะสะสมอยู่ในกระดูก 95% ในลิ้น หัวใจและในสมองมีสารตะกั่วอยู่ประมาณ 0.05-0.09 ไมโครกรัมต่อกรัม ในกระดูกมีสารตะกั่วอยู่ประมาณ 6.60-7.82 ไมโครกรัมต่อกรัม และในเส้นผมมีสารตะกั่วอยู่ประมาณ 2-8 ไมโครกรัมต่อกรัม (สมพูล, 2532)

## การกำจัดตะกั่วในน้ำเสีย

การกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียมักมีด้วยกันหลายวิธี การตัดสินใจพิจารณาถึงวิธีการที่จะนำมาใช้ของแต่ละวิธีนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ข้อจำกัดของแต่ละวิธี ความเป็นไปได้ทางเทคนิค วิธีการ ค่าใช้จ่าย และบุคลากร รวมถึงความเหมาะสม ซึ่งอาจใช้วิธีการทางเคมี ได้แก่ การตกตะกอนผลึกทางเคมี (Chemical Precipitation process) การเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันทางเคมี (Chemical Oxidation-Reduction process) วิธีการทางกายภาพเคมี ได้แก่ การดูดซับด้วยถ่าน (Carbon Adsorption process) การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion-exchange process) ออสโมซิสผกกลับ (Reverse Osmosis process) การแยกด้วยไฟฟ้าและเยื่อกรอง (Electrodialysis process) และการใช้วิธีธรรมชาติ (Natural treatment process) ทั้งทางกายภาพ เคมีและชีววิทยา (พิมลและชัยวัฒน์, 2550, เกรียงศักดิ์, 2550) มีหลักการโดยสังเขป ดังนี้

### 1. กระบวนการตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation process)

วิธีนี้นิยมใช้กันมานานแล้ว โดยเป็นการเติมสารเคมีลงไปในน้ำเสียนิยม เพื่อไปทำปฏิกิริยากับสารละลายตะกั่วที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย เป็นการทำให้เกิดตะกอนแยกตัวออกจากน้ำได้ทั่วไปนิยมตกตะกอนสารตะกั่วให้เกิดเป็นตะกอนไฮดรอกไซด์ ด้วยการเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีราคาถูกกว่าจึงนิยมใช้กันมาก และสารเคมีชนิดอื่นๆ ที่นิยมใช้ถัดมาคือ โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium Carbonate) สารส้ม (Alum) เพอริกคลอไรด์ (Ferric Chloride) เพอริกซัลเฟต (Ferric Sulfate) โลหะแต่ละชนิดจะตกตะกอนได้ดีที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่างกัน สารตะกั่วตกตะกอนไฮดรอกไซด์ได้ดีที่ pH ระหว่าง 9.2-9.5 และพบว่าถ้าปรับระดับพีเอชให้สูงมากเกินไปจะเกิดเป็น พลัมเบท (plumbate) ซึ่งตะกั่วไฮดรอกไซด์สามารถกลับไปละลายน้ำได้อีก ส่วนตะกอนหรือสลัดจ์ (Sludge) ที่ได้จะมีส่วนประกอบของโลหะหนักที่เป็นพิษต้องนำไปกำจัดต่อ (มัลลิกา, 2544)

### 2. กระบวนการออสโมซิสผกกลับ (Reverse Osmosis process)

เป็นการอาศัยแรงดันสูงผ่านเยื่อกรองหรือผ่านเมมเบรน (Semi-permeable Membrane) เพื่อแยกสารละลายอินทรีย์ขนาดใหญ่ และสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำ มักใช้แรงดันที่ 300-1,000 ปอนด์/ตารางนิ้วหรือสูงกว่า ระบบนี้สามารถกำจัดสารละลายต่างๆ ได้เนื่องจากเมมเบรนยอมให้เฉพาะโมเลกุลของน้ำไหลผ่าน ส่วนไอออนต่างๆ จะถูกเมมเบรนผลักดันออกไป จึงไม่สามารถผ่านเมมเบรนได้ แผ่นเมมเบรนที่นิยมใช้กันมากทำมาจากเซลลูโลสอะซิเตต (Cellulose Acetate) มีความหนาประมาณ 100 ไมครอน ประกอบด้วยชั้น 2 ชั้น ได้แก่ ชั้นที่ใช้งานหนาประมาณ 0.2 ไมครอน ทำหน้าที่ขัดขวางไม่ให้สารต่าง ๆ ซึมผ่านไปพร้อมกับน้ำ อีกชั้นทำหน้าที่เป็นพื้นรองรับและมีรูพรุนสำหรับให้น้ำไหลผ่านได้

### 3. กระบวนการระเหย (Evaporation process)

วิธีที่ง่ายในการทำให้น้ำระเหยไป ให้คงเหลือไว้แต่เพียงสารตะกั่วที่ปนอยู่ในน้ำเสีย วิธีนี้ใช้ได้ผลดีในกรณีที่มีปริมาณสารตะกั่วในน้ำเสียอยู่ในปริมาณมาก แต่ไม่นิยมใช้วิธีนี้ เนื่องจากต้องสูญเสียค่าใช้จ่ายที่สูงและต้องใช้ผู้ที่มีความสามารถ มีความชำนาญในการดำเนินการด้วย

### 4. กระบวนการอิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis process)

วิธีการที่อาศัยเมมเบรนเช่นเดียวกันกับกระบวนการออสโมซิสผกกลับ แต่ต่างกันตรงที่วิธีการอิเล็กโทรไดอะไลซิส จะใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นแรงขับเคลื่อนให้เกิดการแยกสารประกอบซึ่งแตกตัวเป็นไอออนได้ออกจากน้ำ แผ่นเมมเบรนที่ซึ่มีด้วยกัน 2 ชนิด คือ แผ่นบวกและแผ่นลบ ซึ่งจะยอมให้เฉพาะไอออนที่มีประจุเหมือนกันไหลผ่าน แต่โมเลกุลของน้ำจะไหลผ่านได้ยาก ทำให้ไอออนของสารตะกั่วแยกออกจากน้ำได้

### 5. กระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชัน (Chemical Oxidation-Reduction process)

วิธีนี้นิยมใช้กันมากในโรงงานประเภทโรงชุบโลหะที่มีสารประกอบของโลหะต่างๆ เจือปนอยู่ ในการกำจัดต้องเติมสารเคมีลงไปเพื่อทำปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับโลหะที่ต้องการกำจัด โดยทำให้โลหะเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่เป็นพิษหรือตกตะกอนได้ และสารเคมีที่เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ได้แก่ ออกซิเจน (Oxygen) โอโซน (Ozone) คลอรีน (Chlorine) ไฮโปคลอไรต์ (Hyperchloride) เปอร์แมงกาเนต (Permanganate) ส่วนสารเคมีที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน ได้แก่ เฟอร์รัสซัลเฟต (Ferrous sulfate) โซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ (Sodium metabisulfide) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfer dioxide) เป็นต้น

### 6. กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchang processe)

วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน เป็นการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างตัวกลางที่เป็นของเหลวกับตัวกลางที่เป็นของแข็งที่สามารถเกิดพันธะเคมีกับไอออนได้ โดยจะเกาะติดอยู่ที่ผิวของวัสดุของตัวกลางที่เป็นของแข็งไม่ละลายน้ำ ด้วยแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Force) ไอออนนี้จะถูกเปลี่ยนด้วยไอออนที่มีประจุแบบเดียวกันในสารละลายที่ไหลผ่าน สารของแข็งที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้นี้เรียกว่า เรซิน มี 2 แบบ คือ เรซินที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation Exchange resins) มีทั้งชนิดกรดแก่ เช่น ซัลฟอนิก (Sulfonic) เมทิลีนซัลฟอนิก (Methylene sulfonic) เป็นต้น และชนิดของกรดอ่อน เช่น คาร์บอกซิลิก (Carboxylic) ฟอสฟอนิก (Phosponic) เป็นต้น และเรซินที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนลบ (Anion Exchange resins) มีทั้งชนิดต่างแก่ เช่น ควอร์เตอนารีแอมโมเนียม (Quarternary ammonium) และชนิดต่างอ่อน เช่น ไพรมารีเอไมน์ (primary amine) เซคันดารีเอไมน์ (Secondary amine) เป็นต้น โลหะหนักที่สามารถกำจัดได้วิธีนี้ เช่น ทองแดง สังกะสีและนิเกิล เป็นต้น

## 7. การใช้วิธีธรรมชาติ (Natural treatment)

เป็นทั้งวิธีการทางกายภาพ เคมี และชีววิทยารวมกัน มาปรับสภาพน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ให้ลดน้อยลง โดยนำน้ำเสียมารั่วผ่านพื้นที่ชุ่มน้ำซึ่งประกอบด้วย น้ำ ดิน พืช จุลินทรีย์ และบรรยากาศ โลหะหนักจะถูกจับไว้โดยอาศัยการดูดซับ การตกผลึกและการแลกเปลี่ยนประจุ โดยทั่วไปจะต้องมีค่าพีเอชของน้ำเสียหรือบริเวณพื้นที่บำบัดน้ำเสียมากกว่า 7 จึงจะได้ประสิทธิภาพของการบำบัดอยู่ในระดับสูง แต่ถ้าค่าพีเอชต่ำกว่า 7 จะเกิดปัญหาโดยโลหะหนักจะละลายปนกับน้ำออกจากระบบได้ (เสริมพล และไชยยุทธ, 2524)

## กระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Process)

โครงการวิจัยนี้ได้อาศัยหลักการทางเคมีไฟฟ้า แบบการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานเคมี หรือเรียกว่า กระบวนการไฟฟ้าเคมีแบบอิเล็กโทรไลซิส

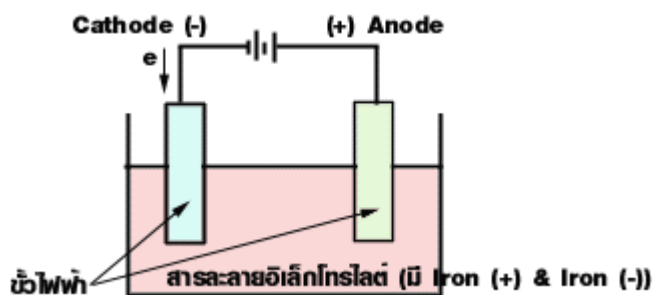
การแยกไอออนโลหะในสารละลายด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีสามารถทำได้ โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าภายนอกไปยังขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วที่จุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งไอออนในสารละลายสามารถแยกตัวออกจากสารละลาย โดยการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง กระบวนการไฟฟ้าเคมีมีข้อดี คือ เป็นกระบวนการที่มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำ ไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมีอื่นลงในระบบ ซึ่งทำให้ไม่เกิดตะกอน หรือเกิดในปริมาณต่ำ มีค่าความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาสูง

### 1. กระบวนการและองค์ประกอบไฟฟ้าเคมีแบบอิเล็กโทรไลซิส

กระบวนการไฟฟ้าเคมีหรือกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส คือ กระบวนการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าไปเป็นเคมีโดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งภายนอก

กระบวนการอิเล็กโทรไลซิส จะเกิดขึ้นเมื่อเราผ่านกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าภายนอกเข้าไปในสารละลาย แล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน - รีดักชัน หรือเรียกว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Oxidation - Reduction or Redox Reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างสารที่ใช้ทำปฏิกิริยากัน หรือเป็นปฏิกิริยาเคมีที่มีออกซิเดชันสเตต (Oxidation State) ของธาตุต่างๆ ในปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนแปลงไป ออกซิเดชันสเตต หมายถึง จำนวนประจุไฟฟ้าประจำตัวของอนุภาค (อะตอม โมเลกุล และไอออน) เช่น  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  และ  $\text{Cl}_2$  เป็นต้น (อินทริธา, 2538, พิซิต, 2553)

ในกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส สารละลายที่นำไฟฟ้าได้ เรียกว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เครื่องที่ใช้ในกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส เรียกว่า เซลล์อิเล็กโทรไลซิส (Electrolytic Cell) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ชัยกฤษณ์, 2543, กาญจนา, 2551)



ภาพที่ 2.1 เซลล์อิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis Cell)

ที่มา : <http://www.electron.rmutphysics.com>

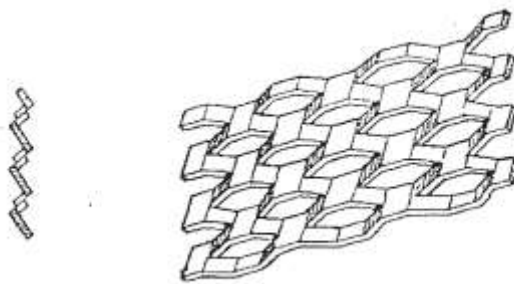
เซลล์อิเล็กโทรไลซิสประกอบด้วย 3 ส่วนใหญ่ ๆ คือ

1) แหล่งให้พลังงานไฟฟ้าจากภายนอกเป็นส่วนที่ใช้เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งควบคุมปริมาณของกระแสไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าที่ผ่านเข้าระบบตามที่กำหนด (วรรณรัตน์, 2547, ดลฤดี, 2552)

2) อิเล็กโทรด อิเล็กโทรดทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะสัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์ไฟฟ้าตลอดเวลา จึงจำเป็นต้องมีสมบัติต่างๆ ดังนี้คือ ความทนทานต่อสารเคมี ความสามารถทนการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (เนื่องจากกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสอาจก่อให้เกิดความร้อนหรือการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอันมีสาเหตุจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี และความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบ) ความต้านทานต่ำ และที่สำคัญที่สุดคือ ความเฉื่อยต่อปฏิกิริยา โดยเฉพาะอิเล็กโทรดที่ใช้เป็นขั้วแอโนด (เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่แอโนดคือ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน จึงเป็นการง่ายที่โลหะที่ใช้ทำอิเล็กโทรดจะถูกออกซิไดซ์แล้วเปลี่ยนสภาพเป็นไอออนละลายเข้าสู่สารละลาย) ในปัจจุบัน อิเล็กโทรดที่ใช้เป็นแอโนดมักทำจากโลหะแพลตินัมเคลือบด้วย  $\text{RuO}_2 - \text{TiO}_2$  หรือเรียกว่า DSA (Dimensionally Stable Anode) ซึ่งได้รับการยอมรับในด้านความทนทานต่อการกัดกร่อนสูง

โครงสร้างของแผ่นอิเล็กโทรดเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ต้องพิจารณา โดยเฉพาะในกรณีที่เกิดผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่อิเล็กโทรดนั้น ๆ อยู่ในรูปก๊าซ เนื่องจากฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะขัดขวางการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายและลดพื้นที่ผิวของอิเล็กโทรด ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายและอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่อิเล็กโทรดลดลง รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างลักษณะโครงสร้างของแผ่นอิเล็กโทรดที่ช่วยทำให้เกิดการถ่ายเทฟองก๊าซออกจากอิเล็กโทรดได้อย่างรวดเร็ว (วิทย์, 2543, นิมนภาและคณะ, 2551)

3) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ทำหน้าที่เป็นตัวกลางให้ไอออนที่สามารถเคลื่อนที่จากขั้วไฟฟ้าหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่งได้ ซึ่งจะต้องเป็นของเหลวที่นำไฟฟ้าได้ อาจเป็นเกลือที่หลอมเหลว หรือเป็นสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย



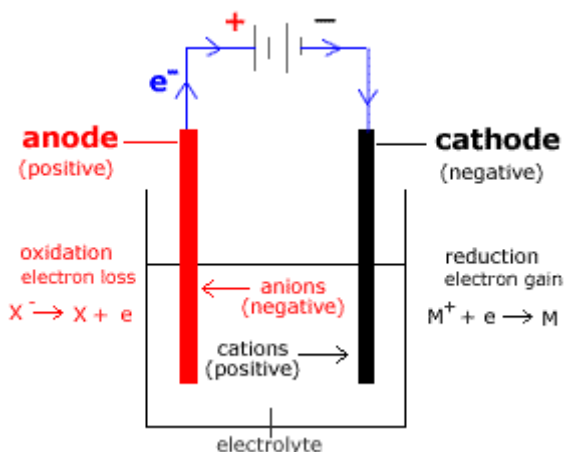
ภาพที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างของอิเล็กโทรดที่ช่วยในการถ่ายเทของก๊าซที่เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (วิทย์, 2543)

เนื่องจากการไหลของกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นผลจากการเคลื่อนที่ของไอออนบวกและไอออนลบ โดยการเคลื่อนที่ของไอออนเป็นผลมาจากศักย์ไฟฟ้าและความเข้มข้นที่แตกต่างกันของสารละลาย ในที่นี้จะพิจารณาเพียงการเคลื่อนที่อันเนื่องมาจากความต่างศักย์ไฟฟ้าซึ่งเป็นผลมาจากความต้านทานของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ หรือการนำไฟฟ้าของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะแตกต่างกันตามชนิดและปริมาณของไอออนในสารละลาย ถ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วยไอออนที่มีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงอยู่ในปริมาณมาก จะทำให้มีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงหรือมีค่าความต้านทานต่ำนั่นเอง (วรณี, 2544)

2. หลักการทำงานของไฟฟ้าเคมีแบบอิเล็กโทรไลซิส (ปริเมธ, 2545, ชัยวัฒน์, 2526, ธวัชชัยและสมบูรณ์, 2537, เบญจวรรณ, 2551)

หลักการของเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบอิเล็กโทรไลซิสนั้นประกอบด้วยไอออน (อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า) แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC Supply) โดยจะใช้ขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว (electrode) และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ดังรูปที่ 2.3 (ปริเมธ, 2545) อิเล็กโทรดที่ต่อกับขั้วบวกของแบตเตอรี่เรียกว่าขั้วแอโนด อิเล็กโทรดที่ต่อกับขั้วลบของแบตเตอรี่ เรียกว่าขั้วแคโทด (ชัยกฤษณ์, 2543) เมื่อปล่อยให้กระแสไฟฟ้าเข้าสู่ถึงปฏิกิริยาที่นำไฟฟ้าสู่อิเล็กโทรดพบว่าเกิดปฏิกิริยาที่มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนหรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (ปฏิกิริยารีดอกซ์) ของขั้วไฟฟ้า เช่น เหล็ก ซึ่งไอออนบวก (Cation) ในสารละลายจะวิ่งไปหาขั้วแคโทด และไอออนลบ (Anion) จะวิ่งไปหาขั้วแอโนด การนำไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของไอออน เมื่อไอออนบวกเคลื่อนที่ถึงขั้วแคโทด ปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้น โดยที่ขั้วแคโทดมีอิเล็กตรอนเหลือเพื่อ ไอออนบวกจะรับอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทด ดังนั้นที่ขั้วแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันเป็นปฏิกิริยาที่รับอิเล็กตรอน จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกตัวให้ก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) และไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) ดังสมการที่ 2.1 เมื่อเวลาผ่านไปน้ำจะมีสภาพเป็นด่างเนื่องจากไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในน้ำและทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) และเฟอร์ริกไอออน ( $Fe^{3+}$ ) ในรูปเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ( $Fe(OH)_{2(s)}$ ) และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ( $Fe(OH)_{3(s)}$ ) ขณะเดียวกันที่ขั้วแอโนดหรือขั้วที่ขาดแคลนอิเล็กตรอน ไอออนลบจะเคลื่อนที่ไปให้อิเล็กตรอนแก่ขั้วแอโนด เพราะฉะนั้นที่ขั้วแอโนด จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน คือ

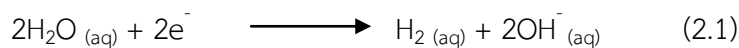
ปฏิกิริยาที่ให้อิเล็กตรอน ทำให้โลหะเกิดการสึกกร่อนและให้โลหะเกิดการสึกกร่อนและให้อิเล็กตรอนออกมาละลายอยู่ในน้ำ ดังสมการที่ 2.2 และ 2.3 (ปริเมธ, 2545) สารละลายจะนำไฟฟ้าไปเรื่อย ๆ ราบเท่าที่ยังเกิดปฏิกิริยาอยู่ (ชัยวัฒน์, 2550, รพีพัฒน์, 2554)



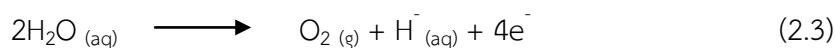
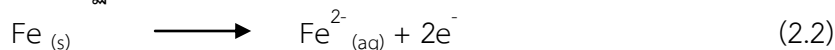
ภาพที่ 2.3 องค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี  
ที่มา : <http://electro-lysis.blogspot.com>

### ข้อหลัก

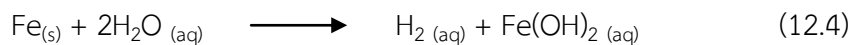
การเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่แคโทด



การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่แอโนด (ชัยวัฒน์, 2526)

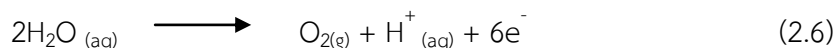
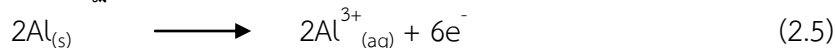


การเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์

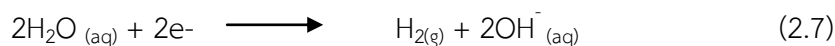


### ข้ออะลูมิเนียม

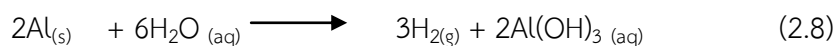
การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่แอโนด



การเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่แคโทด



การเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์



อิเล็กตรอนที่ไอออนลบให้กับขั้วบวก จะวิ่งออกจากขั้วบวกผ่านวงจรภายนอกเข้าสู่ขั้วลบ จะเห็นได้ว่าการนำไฟฟ้าจะมีอิเล็กตรอนไหลผ่านเส้นลวดที่อยู่ภายนอก แต่ภายในสารละลายการนำไฟฟ้าจะอาศัยการเคลื่อนที่ของไอออนบวก และไอออนลบ ตลอดเวลาที่ไอออนเคลื่อนที่หรือปฏิกิริยาที่อิเล็กโทรด ระบบจะต้องรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้าเสมอ ทุกครั้งที่ไอออนลบหนึ่งไอออนเคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวก ไอออนบวกหนึ่งไอออนจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วลบทันทีที่อิเล็กโทรดทั้งสองก็เช่นกัน ทุกครั้งที่ไอออนลบให้อิเล็กตรอนหนึ่งอิเล็กตรอนกับขั้วบวก จะต้องไอออนบวกที่ขั้วลบรับอิเล็กตรอนหนึ่งอิเล็กตรอนทันทีเช่นกัน

การทำอิเล็กโทรไลซิสสารละลายที่ประกอบไปด้วยไอออนของโลหะต่างๆ ถ้าศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่เซลล์เพียงพอที่จะทำให้ไอออนเหล่านั้นเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ได้ ไอออนเหล่านั้นจะเกิดการให้และรับอิเล็กตรอนแล้วเกิดเป็นโลหะอิสระเกิดขึ้น โลหะที่เกิดขึ้นนี้สามารถเกาะที่ขั้วแคโทด ถ้ามีการขั้วขั้วก่อนที่โลหะมาเกาะกับภายหลังที่มีโลหะมาเกาะ ก็จะสามารถหาน้ำหนักของโลหะที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสได้ (ธวัชชัย, 2537, พิมพ์พิสุทธิ์ และคณะ, 2554)

### 3. การควบคุมการทำงานในกระบวนการไฟฟ้าเคมีแบบอิเล็กโทรไลซิส (เก็จวลี และคณะ, 2545)

ในกระบวนการแยกด้วยไฟฟ้าแบบอิเล็กโทรไลซิสตัวแปรที่สำคัญคือ กระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า ดังนั้นการควบคุมการทำงานของกระบวนการจึงแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ การควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ (Controlled Potential Method or Potentiostatic Mode) และ การควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ (Controlled Current Methode or Galvanostatic Mode)

#### 1) การควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่

เป็นการควบคุมการทำงานของระบบโดยให้ค่าศักย์รีดักชันหรือค่าศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) มีค่าคงที่ ในการควบคุมแบบนี้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบจะเปลี่ยนแปลงลดลงไปกับเวลา เนื่องจากความเข้มข้นของสารในสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะลดลงตามอัตราการเกิดปฏิกิริยา ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลงหรือค่าความต้านทานมากขึ้น ดังนั้นค่ากระแสที่ให้แก่ระบบจึงลดลงเพื่อทำให้ค่าศักย์รีดักชันมีค่าคงที่ ในกระบวนการแยกสารหรือในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบอิเล็กโทรไลติก ค่าศักย์รีดักชันที่ต้องการให้แก่ระบบจะต้องสัมพันธ์กับค่าศักย์ต่าง ๆ ดังแสดงในสมการที่ 2.9

$$E_{\text{applied}} = E^0 + \eta_a + \eta_c + IR_s \quad (2.9)$$

โดย	$E^0$	=	ค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐาน (V)
	$\eta_a, \eta_c$	=	ค่าศักย์ส่วนเกิน (overpotential) หรือค่าศักย์ไฟฟ้าที่ต้องใช้ในการทำให้เกิดปฏิกิริยา เทียบกับค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐาน (V) ที่ขั้วแอโนดและแคโทดตามลำดับ
	$I$	=	ค่ากระแส (A)
	$R_s$	=	ความต้านทานของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (V)

## 2) การควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่

การควบคุมการทำงานของระบบโดยให้กระแสคงที่ ซึ่งอาจเรียกการควบคุมการทำงานแบบนี้ว่า Chronopotentiometry หรือ Chronopotentiometric Technique ในระหว่างที่เกิดปฏิกิริยาความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ลดลง เมื่อให้ค่ากระแสคงที่ศักย์รีดักชันที่ขั้วแคโทดเมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงจะมีค่าลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น การควบคุมแบบนี้เป็นการสะดวกในหารทำงานของอุตสาหกรรมมากกว่าวิธีควบคุมแบบแรก เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ควบคุมให้กระแสคงที่มีราคาสูงกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ควบคุมให้ค่าศักย์รีดักชันคงที่ อีกทั้งยังต้องใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงในหารทำงานอีกด้วย อย่างไรก็ตามวิธีการนี้จะมีข้อเสียคือ เมื่อค่าศักย์รีดักชันลดลงไปมาก ๆ อาจทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงที่ไม่ต้องการทำให้ประสิทธิภาพการแยกลดลงด้วย

ในการบำบัดน้ำเสียโดยอาศัยหลักการของอิเล็กโทรไลซิส ต้องมีการควบคุมสภาวะต่าง ๆ เนื่องจากมีผลต่อการเกาะของโลหะที่ขั้วเช่น คุณสมบัติของโลหะ ส่วนประกอบของน้ำเสีย ความเป็นกรด - ด่างของน้ำเสีย (pH) ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะในน้ำเสีย ศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่เซลล์ ปริมาณกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้า การกวนน้ำเสีย (เพิ่มการส่งผ่านมวล: Mass Transport) พื้นที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรด เหล่านี้จะทำให้การทำอิเล็กโทรไลซิสเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ (ธวัชชัย และสมบุญ, 2537, พชรินทร์, 2556)

## 4. ตัวแปรทางกายภาพที่มีอิทธิพลต่อการเกาะของโลหะที่ขั้ว (วรรณรัตน์, 2547)

(Physical variables that influence the properties of deposit)

1) การเกิดก๊าซ (Gas evolution) ถ้ามีก๊าซเกิดขึ้นที่ขั้วระหว่างการทำอิเล็กโทรไลซิสจะทำให้โลหะเกาะได้ไม่แน่นมีลักษณะเป็นโพรงคล้ายฟองน้ำ โดยปกติก๊าซที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดคือก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) การป้องกันการเกิดก๊าซไฮโดรเจนทำได้โดยควบคุมศักย์ไฟฟ้าของขั้วแคโทดไม่ให้มีค่าเป็นลบมาก หรือโดยการเติมสารป้องกันการเกิดก๊าซไฮโดรเจนซึ่งเรียกว่า แคโทดดีโพลไรเซอร์ (Cathode depolarizer)

2) ความหนาแน่นของกระแส (Current density) ในการเกาะของโลหะที่ขั้วพบว่า ถ้าอัตราเร็วของการเกาะมีค่ามากจะทำให้ขนาดของโลหะที่เกาะเป็นผงเล็ก ๆ เกาะไม่แน่นและเปราะซึ่งเป็นหลักการเดียวกับการตกตะกอน ถ้าอัตราเร็วของการเกิดตะกอนมีค่ามากจะทำให้ตะกอนที่ได้มีขนาดเล็กและไม่บริสุทธิ์ อัตราเร็วของการเกาะจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของกระแส ดังนั้นความหนาแน่นของกระแสควรมีค่าสูงพอประมาณ เพื่อให้โลหะเกาะที่ขั้วได้แน่นและเรียบ ถ้าความหนาแน่นของกระแสมีค่าสูงเกินไปจะทำให้เกิดก๊าซที่ขั้วได้ แต่ถ้าน้อยเกินไปจะทำให้ใช้เวลาในการวิเคราะห์นานเกินไปหรือบางทีไม่เกิดการเกาะของโลหะที่ขั้วเลย ปกติควรใช้ความหนาแน่นของกระแสประมาณ 0.001 – 0.1 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

3) การคน (Stirring) เนื่องจากความเข้มข้นเฉพาะจุด (Polarization) เป็นสิ่งที่ไม่ต้องการในการทำอิเล็กโทรไลซิส เมื่อมีการคนจะทำให้เกิดการโพลาริเซชันลดลง ดังนั้นต้องมีการคนสารละลายทุกครั้งที่ทำกรวิเคราะห์

4) อุณหภูมิ (Temperature) เมื่ออุณหภูมิสูงทำให้ไอออนในสารละลายเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทดได้เร็วขึ้นเป็นการลดการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น และทำให้ศักย์ไฟฟ้าเกิดตัวน้อยลงด้วย เมื่ออุณหภูมิสูงสารละลายมีความหนืดน้อยลง อุณหภูมิที่เหมาะสม

สามารถหาได้จากการทดลอง

5. ตัวแปรทางเคมีที่มีอิทธิพลต่อการเกาะของโลหะที่ขั้ว (วรรณรัตน์ , 2547)

(Chemical variables that influence the properties of deposit)

การที่อิเล็กโทรไลต์จะเกิดสมบูรณ์และได้ผลดีหรือไม่ ขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมทางเคมีของสารละลายด้วย ผลของสภาวะแวดล้อมทางเคมีต่อการเกาะของโลหะที่ขั้วมีต่อดังต่อไปนี้คือ

1) ผลของ pH (Effect of pH) ไอออนที่ถูกรีดิวซ์ได้ง่ายกว่าไฮโดรเจนไอออน เช่น สามารถเกิดอิเล็กโทรไลต์และเข้าเกาะที่ขั้วได้ในสารละลายที่เป็นการทำโดยที่ไม่มีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นที่רבกวน ส่วนพวกที่ถูกรีดิวซ์ได้ยากกว่าไฮโดรเจนควรทำการวิเคราะห์ในสารละลายที่เป็นกลางหรือเบส เพื่อป้องกันการเกิดก๊าซไฮโดรเจน

2) ผลของความเข้มข้น (Effect of concentration) จากสมการเนินส์ท์จะเห็นว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของครึ่งปฏิกิริยาจะมีค่าเท่าไรนั้นขึ้นกับความเข้มข้นของไอออนดังสมการ 2.10



$$E = E^0 - 0.0591 / n \times (\log (1 / [\text{Mn}^+])) \quad (2.10)$$

เมื่อ  $\text{Mn}^+$  มีค่าน้อย ค่า E จะมีค่าไปในทางลบมากกว่า ทำให้ต้องเพิ่มศักย์ไฟฟ้าเข้าไปอีก เพื่อยังคงทำให้ปฏิกิริยารีดักชันสามารถเกิดขึ้นได้ และมีการเกาะของโลหะที่ขั้วต่อไปจนกว่าสมบูรณ์ แต่ในการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าจะมีผลทำให้ไอออนตัวอื่นที่อยู่ในสารละลายสามารถเกิดปฏิกิริยาและเกาะที่ขั้วได้ด้วย นั่นคือการแยกอาจทำได้ไม่บริสุทธิ์ถ้าไอออนที่ต้องการวิเคราะห์มีความเข้มข้นน้อยเกินไปเมื่อเปรียบเทียบกับไอออนที่เป็นมลทิน

3) ผลของสารที่ทำให้เกิดคอมเพลกซ์ (Effect of complexing agent) ผลของสารที่ทำให้เกิดคอมเพลกซ์ที่มีต่อการเกาะของโลหะที่ขั้วถูกค้นพบ โลหะหลายตัวที่เกาะติดแน่นที่ขั้วอย่างสม่ำเสมอและเรียบเป็นเงานั้นเป็นไอออนที่มาจากสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนนั้นกับสารที่ทำให้เกิดคอมเพลกซ์ ส่วนใหญ่สารที่ทำให้เกิดคอมเพลกซ์ที่ใช้ได้ผลคือ โซยาไนต์ไอออน ( $\text{CN}^-$ ) และ แอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ )

การแยกโลหะจากสารประกอบเชิงซ้อนให้มาเกาะที่ขั้วต้องให้ศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าการแยกไอออนนั้นจากสารละลายเกลือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ต้องใช้สามารถคำนวณได้จากค่าคงที่ของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน ( $K_f$ ) ของไอออนนั้น จากการที่ต้องให้ศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นเมื่อเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนจึงทำให้สามารถใช้ผลของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนมาช่วยทำให้การแยกเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มัลลิกา ปุรณามระ (2551) พบว่าการแยกคืนโลหะเงินจากน้ำยาล้างฟิล์มที่ใช้แล้วโดยวิธีการอิเล็กโทรไลซิส อาศัยหลักการการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ใช้กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม 60 มิลลิแอมแปร์ของน้ำยาล้างฟิล์มสีและขาว-ดำ โดยให้เงินมาเกาะที่แคโทดเป็นสีครีม มีปริมาณมากควมบริสุทธิ์สูงและใช้เวลาน้อยที่สุด

กัญธมาศ สุทธิเรืองวงศ์ (2550) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีไฟฟ้าเคมีเพื่อกำจัดสารอินทรีย์และสี ระบบการทดลองใช้เซลล์อิเล็กโทรลิติกที่ทำด้วยพลาสติกอะคริลิก ปริมาตรจุ 3 ลิตร ใช้อิเล็กโทรด 3 ชนิดคือ ไทเทเนียมเคลือบแพลทินัมสีดำ, เหล็ก หรืออะลูมิเนียม จัดเรียงอิเล็กโทรดแบบโมโนโพลาร์ ทำการทดลองเป็น แบบกะและใช้ไฟฟ้ากระแสตรง โดยทำการทดลองที่อัตราเจือจางน้ำกากสำ 5,10,20 เท่า จากผลการทดลองพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีและ สารอินทรีย์ได้แก่ ความต่างศักย์ไฟฟ้า,พื้นที่ผิวอิเล็กโทรด และระยะห่างระหว่าง อิเล็กโทรด ระบบที่ใช้ไทเทเนียมเคลือบแพลทินัมสีดำเป็นแคโทดและเหล็กเป็นแอโนด มีความเหมาะสมที่สุดใน การบำบัดน้ำกากสำเจือจาง สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการ บำบัดน้ำกากสำเจือจาง 5 เท่า เพื่อกำจัดสีให้เหลือสีที่ 60% Transmittance คือใช้ไทเทเนียมเคลือบแพลทินัมสีดำ 2 แผ่นเป็นแคโทดเหล็ก 2 แผ่นเป็นแอโนด ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 0.8 เซนติเมตร ความต่างศักย์ไฟฟ้า 4 โวลท์ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พลังงานไฟฟ้า 100 kWh/m<sup>3</sup> และระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัด 5.21 ชั่วโมง ซึ่งให้ ประสิทธิภาพในการกำจัด COD 50.4% pH เท่ากับ 7.0 นอกจากนี้ระบบไฟฟ้า เคมียังสามารถลดปริมาณสารแคลเซียมและซัลเฟต แต่ไม่สามารถลดปริมาณ สาร โปแทสเซียมได้

เพิ่มพงษ์ พุ่มวิเศษ (2552) การกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี การศึกษาวิจัยครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสม และ ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียโดยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี โดยทำการทดลองที่สภาวะต่างๆ กันคือ ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้นในน้ำเสีย 10, 100 และ 150 มก./ล. ระดับกระแสไฟฟ้า 1, 2 และ 4 แอมแปร์ และระยะเวลา ทำปฏิกิริยา 10, 30, 45 และ 60 นาที แล้วทำการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้น โครเมียมในน้ำที่ผ่านการกำจัดโครเมียมโดยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ และนำผลการ ทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียและหาความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น ระดับกระแสไฟฟ้า และระยะเวลาทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม ผลการศึกษาการกำจัดโครเมียมโดยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี พบว่าเมื่อ ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสีย โดยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีลดลง ในขณะที่เมื่อระดับกระแสไฟฟ้าและระยะเวลา ทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสีย โดยวิธีการตกตะกอน ด้วยไฟฟ้าเคมีเพิ่มขึ้น จากการศึกษาครั้งนี้ น้ำที่ผ่านการกำจัดโครเมียมโดยวิธีการตกตะกอนด้วย ไฟฟ้าเคมีแล้ว จะมีค่าโครเมียมได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม (< 0.5 มก./ล.) พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียม เมื่อความเข้มข้น โครเมียมเริ่มต้น 10 มก./ล. ต้องใช้ระดับกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ ระยะเวลาทำ ปฏิกิริยา 15 นาที ขณะที่ความเข้มข้น

โครเมียมเริ่มต้น 100 มก./ล. ต้องใช้ระดับ กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 45 นาที และเมื่อความเข้มข้นโครเมียม เริ่มต้น 150 มก./ล. ต้องใช้ระดับกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 60 นาที

หทัยทัต ชื่อสุวรรณ (2553) การนำโลหะหนักกลับคืนจากตะกอนโดยวิธีไฟฟ้าเคมี กระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักที่นิยมใช้กันมากคือ การตะกอนด้วย สารเคมีดังนั้นจึง ก่อให้เกิดตะกอนโลหะจำนวนมากและจำเป็นต้องทำการบำบัดต่อไป การบำบัด ตะกอนนิยมใช้วิธีการ ฝักรบ่อนเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายสูง งานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้ วิธีไฟฟ้าเคมีเพื่อแยกโลหะหนักออกจาก ตะกอน กระบวนการแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ละลาย โลหะหนักออกจากตะกอนโรงบำบัดน้ำเสียและ การกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายโดยวิธี ไฟฟ้าเคมี พบว่าในขั้นตอนการละลายตะกอนค่าความ เป็นกรด - เบสที่เหมาะสมในการละลาย โลหะหนักออกจากตะกอนปริมาณตะกอนแห้งประมาณ 0.7% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรกรดซัลฟูริก คือ ประมาณ 1.0 โดยมีค่าความเข้มข้นของโลหะแต่ละ ชนิดโดยประมาณดังนี้ ทองแดง 70 ppm, นิกเกิล 95 ppm, สังกะสี 15 ppm และโครเมียม 7 ppm ขั้นตอนการกำจัดโลหะ พบว่า มากกว่า 90% ของทองแดงสามารถแยกออกมาได้ในสถานะโลหะที่ค่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ประมาณ 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ให้ได้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส (Current Efficiency) สูงสุด และโลหะชนิดอื่น ๆ ที่เหลือในสารละลายถูกกำจัดออกด้วยวิธีการ ตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electro precipitation) พบว่า สามารถกำจัดนิกเกิลและโครเมียมได้เกือบ 100% และ กำจัดสังกะสีได้มากกว่า 80% ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 110 - 130 แอมแปร์ต่อ ตารางเมตร โดยพลังงานที่ใช้ในช่วง 25-30 กิโลวัตต์ ชั่วโมง ต่อ ลูกบาศก์เมตร

บงกช บุญญานิชกุล (2550) การบำบัดน้ำเสียสีซัลเฟอร์จากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วย กระบวนการไฟฟ้าเคมี การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ ไฟฟ้าเคมี ในการบำบัดน้ำเสียสีซัลเฟอร์ รวมทั้งศึกษาอัตราการสึกกร่อนของแผ่นขั้วไฟฟ้า โดยทำการ ทดลองที่สภาวะต่างๆ กัน คือ ระดับพีเอชของน้ำเสียก่อนบำบัด 3, 4 และ 5 ระดับกระแส ไฟฟ้า 0.25, 0.50 และ 0.75 แอมแปร์ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 10, 20 และ 30 นาที ผลการ ทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่าพีเอชของน้ำเสีย ระดับกระแสไฟฟ้า และระยะเวลา ในการทำปฏิกิริยา เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยเมื่อ พีเอช ของน้ำเสีย มีค่าลดลงจะส่งผลให้ ประสิทธิภาพการบำบัด ซีโอดี สี และของแข็งแขวนลอย มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม ถ้าใช้ ระดับกระแสไฟฟ้าหรือระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น จึงจะส่งผล ให้ประสิทธิภาพในการบำบัด ซีโอดี สี และของแข็งแขวนลอยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดคือ เมื่อน้ำเสียมี ค่าพีเอช 5 ใช้ระดับกระแสไฟฟ้า 0.50 แอมแปร์ และระยะเวลาในการบำบัด 30 นาที โดยสามารถ บำบัด ซีโอดี สี และของแข็ง แขวนลอยได้สูงถึงร้อยละ 79.97 86.83 และ 98.79 ตามลำดับ เมื่อ ศึกษาการสึกกร่อนของแผ่นขั้วไฟฟ้า พบว่าที่แผ่นเหล็กที่เป็นขั้วไฟฟ้าบวกจะมี สนิมเหล็กเกาะติด สะสมอยู่ แต่อย่างไรก็ตามการสึกกร่อนของแผ่นขั้วไฟฟ้ามี่ความสอดคล้อง ไปในทิศทางเดียวกับผล จากการคำนวณด้วยสมการของฟาราเดย์

ชวินทร มัยยะภักดี (2554) การกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียฟอกโครมโดยการตกตะกอนด้วย ไฟฟ้าเคมี การทดลองครั้งนี้เป็นแบบองค์ประกอบ 3(3) โดยทำการทดลองที่สภาวะต่างๆ กัน คือ ระดับกระแสไฟฟ้า 2, 3 และ 4 แอมแปร์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 10, 20 และ 30 นาที และ

ระยะเวลาในการตกตะกอน 2, 3 และ 4 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ระดับกระแสไฟฟ้า ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และ ระยะเวลาในการตกตะกอน เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อ ประสิทธิภาพการบำบัดโครเมียม โดย เมื่อระดับกระแสไฟฟ้า ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และ ระยะเวลาในการตกตะกอนเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ยกเว้นสภาวะการทดลอง ที่ระดับกระแสไฟฟ้า 4 แอมแปร์ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที โดยสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัด คือ เมื่อใช้ระดับกระแสไฟฟ้า 4 แอมแปร์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที และระยะเวลาในการตกตะกอน 4 ชั่วโมง ทำให้ความเข้มข้นของโครเมียมใน น้ำเสียเริ่มต้นจาก 2360 มิลลิกรัม/ลิตร ลดลงเหลือ 8.63 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง ขั้นตอนการฟอกโครมของกระทรวงอุตสาหกรรม เมื่อศึกษาการสีกร่อนของแผ่นขั้วไฟฟ้า ภายใต้ สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัด พบว่า ร้อยละน้ำหนักของแผ่นขั้วไฟฟ้าที่สูญหายขณะทำการทดลอง ไม่สัมพันธ์กับจำนวนครั้งที่ ใช้แผ่นขั้วไฟฟ้าชุดเดียวกัน

วรรณวรงค์ ฤทธิวรรณ (2549) การกำจัดโครเมียมและปรอทในน้ำทิ้งจากการวิเคราะห์ซี โอดีโดยการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัด โครเมียม และปรอท ในน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีโอดีโดยใช้การตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี เพื่อหาสภาวะ ที่เหมาะสม ในการบำบัด รวมทั้งศึกษาการสีกร่อนของแผ่นขั้วไฟฟ้า ทั้งนี้เป็นการศึกษาวิจัยเชิง ทดลองแบบ Batch ซึ่งใช้การจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบโปโพลาร์ โดยทำการทดลองที่สภาวะ ต่าง ๆ กัน คือ ระดับความต่างศักย์ไฟฟ้า 55, 65 และ 75 โวลต์ และระยะเวลาในการทำ ปฏิกิริยา 2, 3 และ 4 ชั่วโมง การวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ตอน ดังนี้ ตอนที่ 1 : การหาระยะเวลาการตกตะกอนที่ เหมาะสมของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว ตอนที่ 2 : การหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียม และปรอทในน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีโอดีโดยการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี ตอนที่ 3 : การศึกษาการ สีกร่อนของแผ่นขั้วไฟฟ้า จากผลการทดลองในตอนที่ 1 พบว่าระยะเวลาการตกตะกอนที่เหมาะสม ของน้ำเสียที่ผ่าน การบำบัดแล้วที่ 24 ชั่วโมง จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมและปรอทสูงกว่า ระยะเวลาอื่น จากผลการทดลองในตอนที่ 2 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมและปรอทอยู่ ในช่วง 99.01%-99.38% และ 99.96%-100.00% ตามลำดับ โดยพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด โครเมียม และปรอทเพิ่มขึ้นเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะเวลาทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น โดยสภาวะที่ เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและปรอท คือ ที่ระดับความต่างศักย์ไฟฟ้า 75 โวลต์ และระยะเวลา ทำปฏิกิริยา 4 ชั่วโมงนั้น ทำให้ความเข้มข้นของโครเมียมและปรอท ในน้ำเสียเริ่มต้นจาก 67.17 และ 671 มิลลิกรัม/ลิตร ลดลงเหลือ 0.46 และ 0.003 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำ ทิ้งอุตสาหกรรม จากผลการทดลองในตอนที่ 3 พบว่าการใช้แผ่นเหล็กชุดเดียวกันในการบำบัดหลาย ครั้ง จะทำให้ประสิทธิภาพลดลง โดยแผ่นเหล็กที่เป็นขั้วไฟฟ้าบวก (#1) จะสามารถใช้ซ้ำได้ 2 ครั้ง ส่วนแผ่นเหล็กอื่น (#2, #3) ใช้ซ้ำได้ถึง 8 ครั้ง

เก็จวลี พุกษาทร (2549) ศึกษาการบำบัดของเสียที่เป็นส่วนเกินของพริตกลาสด้วยวิธีการ พอกพูนด้วยไฟฟ้า (electrodeposition) ขั้นตอนการบำบัดแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนการ ละลายตะกั่วจากการตะกอนและขั้นตอนการพอกพูนด้วยไฟฟ้า ในขั้นตอนการละลายตะกั่วได้ใช้สาร ตัวทำละลายหลายชนิดและพบว่า กรดไนตริก และกรดอะซิติกสามารถละลายตะกอนพริตกลาสได้ดี กว่าสารละลายไฮดรอกไซด์ กรดไฮโดรคลอริกและซัลฟูริกตามลำดับ สามารถละลายตะกั่วได้

มากกว่า 95 % เมื่อใช้กรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตรหรือใช้กรดอะซิติกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ที่ค่าความเข้มข้นของตะกอน 0.5 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และใช้เวลาการละลาย 3 ชั่วโมง จากนั้นตะกั่วจะถูกแยกออกจากการละลายด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า ซึ่งสามารถแยกตะกั่วได้มากกว่า 95 % ด้วยประสิทธิภาพสูงที่ค่ากระแสที่เหมาะสม สำหรับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการแยกตะกั่วในสารละลายอิเล็กโทรไลต์กรดอะซิติก 0.5 และ 1 โมลต่อลิตรจะอยู่ในช่วง  $8.75 - 10 \text{ mA/cm}^2$  และสำหรับสารละลายอิเล็กโทรไลต์กรดไนตริก 0.1 และ 0.5 โมลต่อลิตรคือ 15 และ  $27.5 \text{ mA/cm}^2$  ตามลำดับ ค่าประสิทธิภาพเชิงไฟฟ้าในการแยกตะกั่วจะลดลงเมื่อค่าการแยกตะกั่วเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกันทั้งหมดที่ทุก ๆ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ศึกษา

ทรงยศ สารภูษิต (2550) ศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการการตกตะกอนด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าในการรีดิวส์และกำจัดเฮกซะวาเลนซ์โครเมียม ( $\text{Cr}^{+6}$ ) โดยใช้ไฟฟ้าในการรีดิวส์และตกตะกอนโครเมียมในขั้นตอนเดียว การศึกษานี้เป็นการศึกษากระบวนการ การตกตะกอนทางเคมีด้วยไฟฟ้า (ECP) แบบโมโนโพลาร์ – เซลล์เดี่ยว (Monopolar – Single cell) ในการรีดิวส์และกำจัดโครเมียม โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่มี  $\text{Cr}^{+6}$  ใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า ที่ความต่างศักย์ 24 โวลต์ โดยศึกษาปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการกำจัด ได้แก่ กระแสไฟฟ้า เวลา pH และความเข้มข้นเริ่มต้น  $\text{Cr}^{+6}$  จากการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพในการรีดิวส์และกำจัดโครเมียม เพิ่มขึ้นตามกระแสไฟฟ้า เวลา ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียม และมีค่า pH เหมาะสมในช่วงความเป็นกรดที่ pH 4 โดยสภาวะเหมาะสมในการกำจัด  $\text{Cr}^{+6}$  และ  $\text{Cr}^{+3}$  ด้วยกระบวนการด้วยไฟฟ้าเคมีให้ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งกรมโรงงานอุตสาหกรรม ที่ 0.25 มก.  $\text{Cr}^{+6}$  / ล. และ 0.75 มก.  $\text{Cr}^{+3}$  / ล. คือ 1 แอมแปร์ 60 นาที (24 วัตต์ – ชั่วโมง) สำหรับความเข้มข้นเริ่มต้น 20 100 และ 200 มล. / ล.

วรรณรัตน์ วัฒนชัย (2551) ศึกษาเพื่อหาสภาวะเหมาะสมของกระบวนการตกตะกอนโลหะหนักด้วยไฟฟ้า น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียจากโรงงานประกอบรถยนต์ โลหะหนักที่ติดตาม คือ Ni, Zn, Hg และ CN ระบบตกตะกอนใช้ไฟฟ้ากระแสตรง ขั้วไฟฟ้าเป็นเหล็ก สภาวะของกระบวนการที่ศึกษาได้แก่ กระแสไฟฟ้า 1, 2 และ 3 แอมแปร์ pH 6.5, 7.5 และ 8.5 เวลาของการเกิดปฏิกิริยา (150, 180 และ 210 นาที) ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าขึ้นกับชนิดของโลหะหนักด้วยโดยที่ Hg และ CN จะตกตะกอนได้เร็วกว่า Ni และ Zn โดยประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักจะแปรผันตามปัจจัยในการศึกษา การเพิ่มกระแสไฟ pH และเวลา มีผลให้โลหะหนักถูกกำจัดได้มากขึ้น ทั้งนี้เมื่อให้เวลาในการทำปฏิกิริยามากพอประสิทธิภาพการกำจัดโลหะที่สภาวะต่าง ๆ จะไม่แตกต่างกันมากนัก น้ำที่ผ่านกระบวนการตกตะกอนจะมีปริมาณโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดไม่เกินมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม แต่ pH จะสูงขึ้นจากค่าเริ่มต้น สภาวะเหมาะสมที่ได้จากการศึกษานี้ คือ กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ pH 6.5 ใช้เวลา 210 นาที เมื่อเปรียบเทียบปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นพบว่าตะกอนจากการตกตะกอนด้วยไฟฟ้ามีปริมาณน้อยกว่าจากกระบวนการเคมีถึง 40%

พิชิต ลีกุล (2553) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียอุตสาหกรรมโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีด้วยวิธีควบคุมกระแสอย่างต่อเนื่อง โดยใช้ น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเส้นใยเรยอนเป็นน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนสังกะสีในปริมาณสูง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองปรับปรุงวิธีการกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตเส้น

ใยเรยอน ด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีแบบควบคุมกระแสอย่างต่อเนื่อง น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเส้นใยเรยอนมีปริมาณสังกะสีปนเปื้อน 155 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 1.7 และค่าความนำไฟฟ้า 33.2 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร การทดลองเริ่มต้นจากการศึกษารูปแบบถังปฏิกิริยาที่เหมาะสมกับงานทางด้านไฟฟ้าเคมี ผ่านปฏิกิริยารีดักชันของ  $\text{KMnO}_4$  และการทดสอบหาวัสดุที่ดีที่สุดที่สามารถใช้เป็นสะพานเกลือได้ทั้งถังปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อและไม่มีรอยต่อ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าถังปฏิกิริยาที่มีแผ่นแก้วพูนทำหน้าที่เป็นเหมือนสะพานเกลือให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดและได้นำไปใช้สำหรับการทดลองกำจัดสังกะสีในขั้นต่อไป เหล็ก อะลูมิเนียม แกรไฟต์ และเหล็กกล้าไร้สนิม ถูกนำมาทดสอบเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำมาใช้ทำขั้วไฟฟ้าแคโทดสำหรับการกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยตรวจวัดความเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช และความเข้มข้นของสังกะสีตลอดระยะเวลาการทดลอง จากผลการทดลองพบว่าขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าแบบควบคุมความหนาแน่นกระแส คือ เหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งสามารถกำจัดสังกะสีได้ถึง 98% ภายในเวลา 30 นาที ณ ค่าความหนาแน่นกระแส 37.5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร รูปแบบใหม่ของการควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าตามเวลาได้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้ โดยวิธีการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบใหม่สามารถลดระยะเวลาในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริงลงได้มาก พร้อมๆกับการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงกระแสของการกำจัด จากผลการทดลองพบว่าสามารถกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียจริงได้ถึง 98% ภายในเวลา 50 นาที โดยคิดเป็น 100% ประสิทธิภาพเชิงกระแส

กาญจนา ชาญวรวิทย์ (2551) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์แบบมีเยื่อเลือกผ่าน งานวิจัยนี้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษโดยใช้วิธีทางเคมีและเคมีไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบมีเยื่อเลือกผ่านชนิดไอออนลบในระดับห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิห้อง พบว่าการบำบัดน้ำเสียทางเคมีโดยใช้กรดซัลฟิวริกสามารถลดค่าบีโอดี ค่าซีโอดี และสี ได้ร้อยละ 80 42 และ 94 ตามลำดับ ที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 แต่สมบัติของน้ำเสียยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน สำหรับการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งตัวแปรที่ศึกษาคือ อัตราการเจือจางน้ำเสีย อัตราการไหลวนของน้ำเสีย ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และความเข้มข้นของสารเติมแต่ง พบว่าตัวแปรต่างๆที่ศึกษามีผลต่อการกำจัดสารมลพิษออกจากน้ำเสียอย่างมีนัยสำคัญ โดยภาวะที่เหมาะสมคือ อัตราการเจือจางน้ำเสียเท่ากับ 50 เท่า อัตราการไหลวนน้ำเสียเท่ากับ 3.46 ลิตรต่อนาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 2.53 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 0.0428 โมลต่อลิตร โดยสามารถลดค่าบีโอดี ค่าซีโอดี และสีได้ประมาณร้อยละ 90-100 สำหรับการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้าแบบต่อเนื่องพบว่าระบบจะเข้าสู่ภาวะสมดุลที่เวลา 7 ชั่วโมง โดยน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจะมีสีค่อนข้างใส ไม่นำรังเกียจ และสามารถลดค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ส่วนค่าบีโอดีและของแข็งแขวนลอยจะสูงกว่ามาตรฐาน 3.2 และ 3.1 เท่าตามลำดับ และจากการวิเคราะห์ต้นทุนในการดำเนินงานพบว่าวิธีการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีเคมีไฟฟ้ามีต้นทุนในการดำเนินงานต่อปริมาณสารมลพิษต่ำกว่าวิธีทางเคมี

ดลฤดี ยนต์สุวรรณ (2552) ศึกษาการหาตัวแปรสำคัญเพื่อแยกกลินินจากน้ำดำโดยกระบวนการเคมีไฟฟ้าและกายภาพ โดยน้ำดำเป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ ซึ่ง

มีลิกนินเป็นองค์ประกอบหลัก การศึกษาตัวแปรสำคัญในการแยกลิกนินจากน้ำดำ โดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีและกายภาพ จะสามารถนำมาวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการแยกลิกนินจากน้ำดำ และหาสมการที่สามารถทำนายร้อยละของลิกนินที่เหลืออยู่ในน้ำดำได้ โดยใช้ตัวอย่างน้ำดำจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษกึ่งเคมียูคาลิปตัส จากโรงเยื่อบ้านโป่ง จ.ราชบุรี ตัวแปรต่างๆ ที่ศึกษา ได้แก่ ปริมาณกระแสไฟฟ้า ( $X_1$ ) ระยะเวลาในการจ่ายกระแสไฟฟ้า ( $X_2$ ) อัตราการกวนช้า ( $X_3$ ) และระยะเวลาในการกวนช้า ( $X_4$ ) เมื่อดำเนินการทดลองที่สภาวะต่างๆ ตามที่กำหนดแล้ว จึงนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ผล โดยนำผลการทดลองคือร้อยละของลิกนินที่เหลือในน้ำดำที่ได้มาเรียงลำดับจากค่าน้อยไปมาก และวาดกราฟ จากกราฟทำให้สามารถจำแนกกลุ่มผลการทดลองออกได้เป็น 3 กลุ่ม จากนั้นนำผลที่ดีที่สุด กลุ่มที่ 1 และ 2 ไปวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) พบว่า ระยะเวลาในการกวนช้า ไม่มีความสัมพันธ์กับร้อยละของลิกนินที่เหลือในน้ำดำ ต่อจากนั้นจึงทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลองและหาค่าสมการการถดถอย (Regression analysis) พบว่า สมการ  $\hat{Y} = -0.14X_1 + 1.72X_2 + 0.24X_3$  เป็นสมการที่เหมาะสมในการทำนายร้อยละของลิกนินที่เหลือในน้ำดำจากโรงผลิตเยื่อกระดาษ กึ่งเคมียูคาลิปตัส โรงเยื่อบ้านโป่ง ดังแสดงจากค่าความแปรปรวนและสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ในการแยกลิกนินจากน้ำดำโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีและกายภาพคือ  $X_1$  ปริมาณกระแสไฟฟ้า เท่ากับ 3 mA/sq.cm  $X_2$  ระยะเวลาในการจ่ายกระแสไฟฟ้า เท่ากับ 10 นาที และ  $X_3$  อัตราการกวนช้า เท่ากับ 10 รอบต่อนาที และที่สภาวะดังกล่าว % lignin removal = 81.75%

นิมณฑา หลวงปิ่น และคณะ (2551) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียและการนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยไฟฟ้าเคมี งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย โดยการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและสร้างอุปกรณ์ต้นแบบใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ได้ทำการทดลองศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีจากน้ำตัวอย่าง 3 แหล่ง คือ น้ำทิ้งจากแม่น้ำเจ้าพระยาที่ได้จากตลาดสะพานดำ จ.นครสวรรค์ น้ำจากท่อระบายน้ำทิ้งในโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ และน้ำจากท่อระบายน้ำทิ้งตึก 7 มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ ตะแกรงที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้า คือ อะลูมิเนียมและเหล็ก ผลการศึกษาได้ข้อมูลเบื้องต้นดังนี้ เมื่อใช้ตะแกรงอะลูมิเนียมและเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าในการตกตะกอน พบว่า ขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด ทำให้น้ำใสและเกิดการตกตะกอนได้ใกล้เคียงกัน ปริมาณไฟฟ้าที่ตกตะกอนได้ดีในการทดลองนี้ คือ ความต่างศักย์ 24 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ จากผลดังกล่าวจึงได้เลือกตะแกรงอะลูมิเนียมมาใช้ในการทดลอง เนื่องจาก มีราคาถูกกว่าตะแกรงเหล็ก และใช้ความต่างศักย์ 24 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ ในการสร้างและ ทดลองตกตะกอนน้ำเสียโดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบบำบัดน้ำเสีย จากการทดลองพบว่า ปริมาณการ ตกตะกอนขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการตกตะกอน ชนิดของตัวอย่างน้ำ ความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า เมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ต้นแบบบำบัดน้ำเสีย โดยนำน้ำที่ได้ก่อนและ หลังจากการตกตะกอนด้วยอุปกรณ์บำบัดน้ำเสียนี้มาวิเคราะห์หาค่าซีโอดี บีโอดี และดีโอ เพื่อเปรียบเทียบกัน พบว่า น้ำทั้ง 3 แหล่ง ก่อนการตกตะกอนมีค่าดีโอเท่ากับ 3.4, 3.9 และ 4.5 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ และน้ำหลังการตกตะกอนมีค่าดีโอเท่ากับ 3.7, 4.2 และ 4.8 ตามลำดับ มีค่าซีโอดี ก่อนการตกตะกอนเท่ากับ 20, 47.2, 44.8 มิลลิกรัม/ลิตร และน้ำหลังตกตะกอนมีค่าซีโอดีเท่ากับ 16.0, 24.0, 40.0 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ และมีค่าบีโอดีก่อนการตกตะกอนเท่ากับ 5.25,

7.5 และ 3.9 มิลลิกรัม/ลิตร และน้ำหลังตกตะกอนมีค่าซีโอดีเท่ากับ 4.8, 5.20 และ 3.3 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ซึ่ง ไม่เกินมาตรฐานน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ สามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำได้โดยไม่มีอันตรายหรือถ้านำมาบำบัด ต่ออีกเพียงเล็กน้อยก็จะสามารถหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ได้

ภัทวิศ บูชาญาติ (2551) ศึกษาการบำบัดตะกอนดินในบ่อเลี้ยงกุ้งด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสม และผลของไฟฟ้าเคมีในการบำบัดตะกอนดินบ่อเลี้ยงกุ้ง จากการตรวจสอบ สภาพลักษณะตะกอนดิน จากบ่อเพาะเลี้ยงขนาด 2 ไร่ ซึ่งมีอัตราการปล่อยลูกกุ้งจำนวน 100,000 ตัว/ไร่ และมีค่าอัตรา การแลกเปลี่ยน (FCR) เท่ากับ 2 มีผลดังนี้ ค่าเจลดาทาร์ไนโตรเจน (TKN) มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1,180 - 1,357 ppm ค่าสารประกอบไนเตรท - ไนโตรเจน (NO<sub>3</sub> - N) มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 16 - 27 ppm ค่าสารประกอบไนไตรท์ - ไนโตรเจน (NO<sub>2</sub> - N) มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.15 - 0.27 ppm ค่าสารประกอบแอมโมเนีย - ไนโตรเจน (NH<sub>3</sub> - N) มีค่าเฉลี่ย อยู่ในช่วง 32 - 68 ppm โดยทำการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมกับของเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นสารประกอบไนเตรท - ไนโตรเจน เริ่มต้นต่าง ๆ กัน โดยใช้เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Rectifier) ที่ปรับค่าศักย์ไฟฟ้า 0 - 30 โวลต์ และกระแสไฟฟ้า 0 - 3 แอมแปร์ ซึ่งมีแผ่นขั้วไฟฟ้าที่เป็นไททาเนียมขนาด (กว้างxยาวxหนา) 20x100x2 มิลลิเมตร จำนวน 2 ขั้ว ระยะเวลาในการทดลอง 7 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมสามารถบำบัดสารประกอบไนเตรท - ไนโตรเจน ได้มากกว่า ร้อยละ 80 คือ ที่ pH เท่ากับ 9 และระดับกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 1.5 แอมแปร์ ในการศึกษา สมดุลมวลสารพบว่าปริมาณสารประกอบ ไนเตรท - ไนโตรเจน จะถูกบำบัดโดยเปลี่ยนรูปเป็น สารประกอบไนไตรท์ - ไนโตรเจน และแอมโมเนีย - ไนโตรเจน ร้อยละ 20 และ รูปของก๊าซอื่นๆที่ตรวจวัดไม่ได้ร้อยละ 40 จากนั้นนำสภาวะที่ได้ไปทดลองหาประสิทธิภาพในการบำบัดตะกอนดิน ทำการทดลอง โดยใช้บีกเกอร์ปริมาตรใช้งาน 1 ลิตร จากการศึกษาการบำบัดไนโตรเจนในรูป เจลดาทาร์ไนโตรเจนสารประกอบไนเตรท - ไนโตรเจน สารประกอบไนไตรท์ - ไนโตรเจน และสารประกอบแอมโมเนีย - ไนโตรเจน พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดเฉลี่ยร้อยละ 9.72 48.74 29.51 และ 39.15 ตามลำดับ

เบญจวรรณ ฉันทอุทิศ (2551) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม SME โดยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคทางไฟฟ้าเคมีมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมขนาดเล็ก โดยทำการศึกษาหาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัด สี และ COD ในน้ำเสียสีย้อมจากโรงงานฟอกย้อม ทำการทดลองโดยใช้วิธีไฟฟ้าเคมีในการกำจัดสี และ COD ในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยสร้างแบบจำลองของถังปฏิกริยา ซึ่งประกอบไปด้วยแผ่นขั้วอิเล็กโทรดจากเหล็กอยู่ในถังพลาสติกอะคริลิก ขนาด 2 ลิตร ศึกษาการทดลองแบบ Batch หาประสิทธิภาพในการกำจัดสีและ COD ที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ กัน คือ pH เริ่มต้น อัตราส่วนพื้นที่ผิวขั้วที่เกิดปฏิกริยาต่อปริมาตรน้ำเสีย ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสีย และระยะเวลาทำปฏิกริยา ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสี COD อยู่ระหว่าง 70-90 % โดยพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราส่วนพื้นที่ผิวขั้วที่เกิดปฏิกริยาต่อปริมาตรน้ำเสียระดับกระแสไฟฟ้า และระยะเวลาทำปฏิกริยา ซึ่งสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยไฟฟ้าเคมี คือ ค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 9 ระยะเวลาทำปฏิกริยา 45-60 นาที ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ค่า

## 59.52 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

รพีพัฒน์ เรื่องแวมถึ (2554) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากห้องเย็นสำหรับการใช้น้ำซ้ำด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยน้ำเสียจากห้องเย็นที่มีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิขาเข้าและขาออก 5 องศาเซลเซียส ถูกบำบัดเพื่อนำกลับมาใช้ซ้ำด้วยเทคนิคเซลล์ไฟฟ้าเคมี ทั้งในระบบแบบกะ และระบบแบบต่อเนื่อง ประสิทธิภาพในการบำบัดพิจารณาจากค่าดัชนีแลงเกลียร์ ผลการทดลองในระบบแบบกะที่ปริมาตร 1.8 ลิตร พบว่าการใช้ขั้วเหล็กพื้นที่ผิว 0.1 ตารางเมตร จำนวน 10 แผ่น ใช้กระแส 25 A/m<sup>2</sup> ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที สามารถลดค่าดัชนีแลงเกลียร์จาก 2.46 เหลือ 0.05 และปริมาณ เชื้อแบคทีเรีย Legionella ได้มากกว่าร้อยละ 80 เป็น แต่พบว่ามีตะกอนที่เกิดจากกระบวนการ ประมาณ 1.1 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ขั้วสแตนเลสสตีลและไทเทเนียม ที่มีปริมาณตะกอนที่น้อยกว่าแต่ประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำกว่า ผลการทดลองในระบบ แบบต่อเนื่อง โดยใช้ขั้วเหล็กพื้นที่ผิว 0.1 ตารางเมตร จำนวน 30 แผ่น ความหนาแน่นกระแส 25 A/m<sup>2</sup> ในปฏิกรณ์ปริมาตร 3.25 ลิตร เวลา 40 นาที สามารถลดค่าดัชนีแลงเกลียร์จากมากกว่า 2 เหลือเข้าใกล้ 0 และเมื่อพิจารณาค่าดำเนินการพื้นฐานทั้งในระบบต่อแบบกะ และแบบต่อเนื่อง เทียบกับวิธีทางเคมีพบว่า การบำบัดด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีด้วยขั้วไฟฟ้าเหล็กมีราคาแพงกว่าวิธีทางเคมี แต่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่า สำหรับใช้ขั้วสแตนเลสสตีล ค่าใช้ดำเนินการพื้นฐานต่ำกว่า วิธีเคมีและสามารถลดค่าดัชนีแลงเกลียร์ได้เข้าใกล้ 0 แต่ประสิทธิภาพ ในการลดโอโซนที่ละลายน้ำ นั้นยังต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ขั้วเหล็กหรือสารเคมี

พิมพ์พิสุทธิ์ จุฑิน และคณะ (2554) โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการสกัดทองแดงและสังกะสีจากสารละลายซีเตาทองเหลืองด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ที่ความหนาแน่นกระแสและความบริสุทธิ์ของสารละลายโอโซนทองแดงและสังกะสีที่ต่างกัน โดยการทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วนหลักคือ (1) การสกัดทองแดงจากสารละลาย 3 ชนิด ได้แก่ สารละลายทองแดงบริสุทธิ์ สารละลายซีเตาที่เหลืองและสารละลายตะกอนสีน้ำตาลแดง ที่ความเข้มข้นโอโซนทองแดงของสารละลายทั้ง 3 ชนิดเท่ากับ 1 M อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ช่วงความหนาแน่นกระแสระหว่าง 250-500 A/square m และ (2) การสกัดสังกะสีจากสารละลาย 2 ชนิด ได้แก่ สารละลายสังกะสีบริสุทธิ์และสารละลายสีใสที่ได้หลังจากกระบวนการซีเมนต์ชันด้วยสังกะสี ที่ความเข้มข้นโอโซนสังกะสีของสารละลายทั้ง 2 ชนิดเท่ากับ 1 M อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ช่วงความหนาแน่นกระแสระหว่าง 375-625 A/square m ผลการทดลองพบว่า (1) ความหนาแน่นกระแสที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความสามารถในการสกัดโลหะทั้งกรณีทองแดงและสังกะสีจากสารละลายได้เร็วยิ่งขึ้น เนื่องจากไปช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทด และ (2) ประสิทธิภาพในการใช้กระแสไฟฟ้า (Current efficiency) ลดลงเมื่อความหนาแน่นกระแสเพิ่มขึ้น โดยกรณีในสารละลายที่มีความบริสุทธิ์มากกว่า จะมีประสิทธิภาพในการใช้กระแสไฟฟ้าที่สูงกว่า โดยความบริสุทธิ์ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการสกัดทองแดงมาก โดยค่า current efficiency ที่ได้สูงเกิน 90 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการสกัดทองแดงจากสารละลายซีเตา ในทางตรงข้ามความบริสุทธิ์ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีผลกระทบต่อความสามารถในการสกัดสังกะสี โดยค่า current efficiency ของการสกัดสังกะสีจากสารละลายสีใสที่ได้จากซีเตาทองเหลืองมีค่าต่ำกว่า 50 เปอร์เซ็นต์

พัชรินทร์ สุดปฐม (2556) งานวิจัยนี้ศึกษาศักยภาพของเซลล์ไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำเสีย

สีย้อมจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม ขั้วเหล็กและขั้วอะลูมิเนียมถูกใช้เป็นอิเล็กโทรดที่สลายตัว ขณะที่ขั้วไทเทเนียมเคลือบด้วยรูทีเนียมออกไซด์ถูกใช้เป็นอิเล็กโทรดไม่สลายตัว ผลการทดลองที่ใช้ขั้วเหล็กและขั้วอะลูมิเนียม ที่ความหนาแน่นกระแส 30-50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ระยะเวลาสัมผัสขั้ว 10-15 นาที สามารถกำจัดสีประเภทไดเร็กซ์และดิสเพอร์สได้เกือบสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามค่าซีไอดีที่เกิดจากสารอนินทรีย์ยังคงมีค่าสูงอยู่ จึงต้องทำการศึกษาการลดค่าการนำไฟฟ้าและค่าความกระด้างต่อไป นอกจากนี้พบว่า เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ขั้วเหล็กเป็นอิเล็กโทรดให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการใช้ขั้วไทเทเนียม เหตุผลเนื่องมาจากความเป็นกรด-ด่างของกระบวนการที่ใช้ขั้วเหล็กอยู่ในช่วง 7-9 ซึ่งเหมาะสมสำหรับ การตกตะกอนในรูปสารประกอบเหล็กไฮดรอกไซด์ แคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ในทางตรงกันข้ามเทคนิคเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบออกซิเดชันทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างลดลง ในบางตัวอย่างที่มีความกระด้างน้อยกว่า 2000 ppm เมื่อผ่านกระบวนการเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ขั้วเหล็ก น้ำที่ผ่านการบำบัดสามารถป้อนเข้าสู่ระบบออสโมซิสผันกลับ โดยโปรแกรม ROSA ทำนายคุณภาพของน้ำหลังการบำบัดว่าอยู่ในระดับที่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำหรือนำกลับมาใช้ใหม่ได้

ณัฐพล อัจฉาญ (2556) ศึกษาการออกแบบเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบท่อนท่อและแบบเบตบรจุ สำหรับการกำจัดสีย้อม งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและจัดสร้างเครื่องต้นแบบเซลล์ไฟฟ้าเคมี 2 แบบ ได้แก่ แบบท่อนท่อและแบบเบตบรจุ โดยที่เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบท่อนท่อใช้ท่อเหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด ขณะที่แบบเบตบรจุใช้เศษกึ่งโลหะบรจุลงในท่อพีวีซี ซึ่งเป็นการออกแบบเพื่อลดต้นทุนของวัสดุที่ใช้เป็นขั้วแอโนด ในงานวิจัยนี้ใช้สีย้อมรีแอคทีฟบลู 21 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัด ซีไอดีและสีย้อมทั้งในระบบกะและระบบต่อเนื่อง ในการพัฒนาเครื่องต้นแบบเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบท่อนท่อพารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษา ได้แก่ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าและเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยเป็นค่าที่ได้จากการทดลองด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแผ่นโลหะในระบบกะ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าหลักการคงปริมาณโลหะที่ถูกปลดปล่อยต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าของระบบกะสามารถใช้เป็นหลักการคำนวณพื้นฐานเพื่อการออกแบบระบบต่อเนื่องในเครื่องต้นแบบเซลล์ไฟฟ้าเคมีได้ ประสิทธิภาพของการกำจัดซีไอดี สีย้อมและพลังงานที่ใช้ในระบบกะและระบบต่อเนื่องมีค่าแตกต่างกันไม่เกินร้อยละ 10 และจากผลการทดลองที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 30 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พบว่าเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแผ่นโลหะในระบบกะมีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีและสีย้อมมีค่าร้อยละ 93 และ 99 ตามลำดับ ขณะที่เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบท่อนท่อระบบต่อเนื่องประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีและสีย้อมมีค่าร้อยละ 89 และ 96 ตามลำดับ สำหรับเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเบตบรจุระบบต่อเนื่องที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 30 แอมแปร์ต่อตารางเมตรประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีและสีย้อมร้อยละ 91 และ 98 ตามลำดับ

จันทพร ผลากรกุล (2556) ศึกษาการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีสำหรับการบำบัดน้ำเสียสีย้อม งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและจัดสร้างเครื่องต้นแบบเซลล์ไฟฟ้าเคมี 2 แบบ ได้แก่ แบบท่อนท่อและแบบเบตบรจุ โดยที่เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบท่อนท่อใช้ท่อเหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด ขณะที่แบบเบตบรจุใช้เศษกึ่งโลหะบรจุลงในท่อพีวีซี ซึ่งเป็นการออกแบบเพื่อลดต้นทุนของวัสดุที่ใช้เป็นขั้วแอโนด ในงานวิจัยนี้ใช้สีย้อมรีแอคทีฟบลู 21 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัด ซีไอดีและสีย้อมทั้งในระบบกะและระบบต่อเนื่อง ในการพัฒนาเครื่องต้นแบบเซลล์ไฟฟ้าเคมี

แบบท่อในท่อพารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษาได้แก่ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าและเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยเป็นค่าที่ได้จากการทดลองด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแผ่นโลหะในระบบบะ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าหลักการคงปริมาณโลหะที่ถูกปลดปล่อยต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าของระบบบะสามารถใช้เป็นหลักการคำนวณพื้นฐานเพื่อการออกแบบระบบต่อเนื่องในเครื่องต้นแบบเซลล์ไฟฟ้าเคมีได้ ประสิทธิภาพของการกำจัดซีโอดี สีย้อมและพลังงานที่ใช้ในระบบบะและระบบต่อเนื่องมีค่าแตกต่างกันไม่เกินร้อยละ 10 และจากผลการทดลองที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 30 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พบว่าเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแผ่นโลหะในระบบบะมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและสีย้อมมีค่าร้อยละ 93 และ 99 ตามลำดับ ขณะที่เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบท่อในท่อระบบต่อเนื่องประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและสีย้อมมีค่าร้อยละ 89 และ 96 ตามลำดับ สำหรับเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเบตบรจระบบต่อเนื่องที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 30 แอมแปร์ต่อตารางเมตรประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและสีย้อมร้อยละ 91 และ 98 ตามลำดับ

Dussadee Tanjariyanon (2010) ศึกษาการบำบัดสีในน้ำสีรีแอกทีฟจากโรงงานฟอกย้อม โดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการไฟฟ้าเคมีในการบำบัด น้ำเสียสีรีแอกทีฟจากหม้อย้อม โทสน้ำเงินและสีแดงจากโรงงานฟอกย้อม โดยทำการทดลองที่สภาวะ ต่างๆกัน คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้า 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 แอมแปร์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 นาที ระยะห่างระหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้า 0.5, 1, 1.5 และ 2 เซนติเมตร ระดับ pH ของน้ำเสียก่อนการบำบัด 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 และระยะเวลาตกตะกอน 60, 90 และ 120 นาที สำหรับน้ำเสียฟอกย้อมโทสน้ำเงิน และ ปริมาณกระแสไฟฟ้า 6, 7, 8, 9, 10 และ 11 แอมแปร์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30, 60 และ 90 นาที ระยะห่างระหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้า 0.5, 1, 1.5 และ 2 เซนติเมตร ระดับ pH ของน้ำเสียก่อนการบำบัด 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 และระยะเวลาตกตะกอน 30, 60 และ 90 นาที สำหรับน้ำเสียฟอกย้อมโทสน้ำแดง (เจือจาง 1:5) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้า ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาและระยะเวลาตกตะกอน มีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดสี มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม ถ้าใช้ ระยะห่างระหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้า และระดับ pH ของน้ำเสียก่อนการบำบัด มีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ประสิทธิภาพ ในการบำบัดสีมีแนวโน้มลดลง โดยสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อมสีน้ำเงิน คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ระยะห่างระหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้า 0.5 เซนติเมตร ระดับ pH ของน้ำเสียก่อน การบำบัดมีค่า 4 และ ระยะเวลาตกตะกอน 90 นาที ซึ่งมีประสิทธิภาพ ในการบำบัดสี คือ 78.50% (จาก 265.46 เหลือ 57.08 หน่วยSU), 82.39% (จาก 2,982 เหลือ 525 หน่วยADMI) ในหน่วย SU และ ADMI ตามลำดับ และ COD 80.00% (จาก 4,920.0 เหลือ 984.0 มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยใช้ปริมาณไฟฟ้า  $13.64 \pm 5.08$  หน่วยต่อ น้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร และใช้ปริมาณกรดกำมะถันเข้มข้นในการปรับ pH 4.05 ลิตรต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อมสีแดง คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้า 9 แอมแปร์ ระยะเวลา ในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ระยะห่างระหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้า 0.5 เซนติเมตร ระดับ pH ของน้ำเสียก่อนการบำบัด มีค่า 4 และระยะเวลาตกตะกอน 60 นาที ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดสี คือ 87.60% (จาก 718.20 เหลือ 89.07 หน่วยSU), 92.36% (จาก 21,360 เหลือ 1,632 หน่วยADMI ) ในหน่วย SU, ADMI ตามลำดับ และ COD 55.56% (จาก 950.4 เหลือ 422.4

มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยใช้ปริมาณไฟฟ้า  $19.64 \pm 4.59$  หน่วยต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร และใช้ปริมาณกรดกำมะถันเข้มข้นในการปรับ pH 3.64 ลิตรต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร

Mollah et al. (2004) ได้ใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมีเพื่อกำจัดสีย้อม Orange II Azo Dye โดยใช้โซเดียมคลอไรด์เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ เป็นการทดลองในระบบต่อเนื่อง โดยปล่อยสารละลายสีย้อมให้ไหลผ่านเข้าไปในกระบวนการเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีขั้วอิเล็กโทรดบรรจุอยู่ ใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรดจำนวน 5 แผ่นวางขนานกัน ดังภาพที่ 2-9 ทดลองที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองสามารถหาพารามิเตอร์ปฏิบัติการที่เหมาะสมที่ช่วยให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโมเลกุลสีย้อมมากกว่า 98.5% คือ ค่า pH เริ่มต้น 7.3 ค่าการนำไฟฟ้า 3.81 mS/cm อัตราการไหลเท่ากับ 350 mL/min ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ 4 A (42 V) และความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 4 g/L

Koby et al. (2006) ได้ทำการกำจัดสีย้อม Reactive Orange 64 ด้วยกระบวนการเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วอิเล็กโทรด แล้วทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการกำจัดโมเลกุลสีย้อมและความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ปฏิบัติการ เช่น ขั้วอิเล็กโทรด ค่าพลังงานที่ใช้ ค่า pH เริ่มต้น ค่าการนำไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นของกระแส ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมและเวลาที่ใช้ในการบำบัด จากการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดโมเลกุลสีย้อมมีค่ามากกว่าร้อยละ 95 ภายใต้ภาวะที่เหมาะสม คือ ค่าความหนาแน่นของกระแส 100 A/m<sup>2</sup> และค่า pH เริ่มต้น 6.4 โดยใช้เวลาในการดำเนินการ 12 min ปริมาณของอะลูมิเนียมต่อน้ำหนักสีย้อมและค่าพลังงานที่ใช้ระหว่างกระบวนการมีค่าเท่ากับ 1.8 kg Al/kg dye และ 35 kWh/kg dye ตามลำดับ

Subaiah et al. (2002) ได้ทำการทดลองแยกนิกเกิลออกจากน้ำเสีย สังเคราะห์ ให้ผลการทดลองที่ตรงกันว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกระแสไฟฟ้าให้มากขึ้นจะทำให้ปริมาณนิกเกิล ที่เหลืออยู่ในน้ำลดลงมากขึ้นด้วย โดยนอกจากนี้ Subaiah ได้กล่าวไว้ด้วยว่าเมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้า เพิ่มขึ้นขนาดของนิเกิลไฮดรอกไซด์ (the particle of nickel hydroxide) ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

Pruksathorn et al. (2008) ศึกษาการกำจัดโลหะจากตะกอนที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียชุมชน และน้ำเสียโรงงาน โดยแบ่งงานวิจัยออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกน้ำเสียจะถูกบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพแบบ Activated sludge เพื่อกำจัดโลหะออกจากสารละลาย ขั้นตอนที่สองตะกอนที่ได้จากระบบ บำบัดแบบชีวภาพในขั้นตอนที่หนึ่งจะถูกนำมาละลายเอาโลหะหนักออกด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก ดังนั้นในสารละลายประกอบด้วยโลหะหลายชนิด คือ ทองแดง, นิกเกิล และโครเมียม ขั้นตอนสุดท้าย โลหะในสารละลายถูกกำจัดออกโดยกำจัดทองแดงด้วยวิธีอิเล็กโทรลิโซิส (Electrodeposition) ส่วน นิกเกิลและโครเมียมทำการกำจัดด้วยวิธีตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition) เนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้า มาตรฐานของนิกเกิล ( $E^0 = -0.23 \text{ V} / \text{SHE}$ ) และโครเมียม ( $E^0 = -0.74 / \text{SHE}$ ) มีค่าต่ำกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของ ปฏิกริยารีดักชันของไฮโดรเจนไอออน ( $E^0 = 0.00 \text{ V} / \text{SHE}$ ) จึงไม่สามารถกำจัดได้ด้วยวิธีอิเล็กโทรลิโซิส ภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงอยู่ที่ค่าความต่างศักย์  $-30 \text{ mV} / \text{SHE}$  ซึ่งสามารถกำจัด ทองแดงได้ถึง 100 % ในระยะเวลาเพียง 4 ชั่วโมง ส่วนภาวะเหมาะสมในการกำจัดนิกเกิลและโครเมียม คือ ค่าความหนาแน่นกระแส 24 mV / cm<sup>2</sup> และ 1.57 mV / cm<sup>2</sup> ตามลำดับ

Emamjomeh และ Savakumar (2008) ได้ทำการศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์ด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยทำการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ใช้กระแสไฟฟ้าตรงต่อ

ขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์หลายเซลล์ และใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า พบว่าจะมีประสิทธิภาพในการกำจัด ฟลูออไรด์ร้อยละ 99 เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแส 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พีเอชเท่ากับ 6 อัตราการไหล 150 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์ขาเข้าเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

Garcia-Gabaldon (2009) ได้ทำการศึกษาการนำกลับดีบุกและทองคำขาว โดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยกระบวนการควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ ถึงปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมีมีไดอะแพรมเซรามิกถูกใส่เข้าไป เมื่อไม่มีทองคำขาวอยู่ศักย์ขั้วไฟฟ้าจะเป็นลบมากกว่า การเปลี่ยนรูปของดีบุกมีมากขึ้น เพราะว่าที่ขั้วไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงโดยมีลักษณะไม่ราบเรียบและเกิดก๊าซไฮโดรเจนขึ้น ในขณะที่ความหนาแน่นประสิทธิภาพเชิงกระแสมีค่าลดลง และพลังงานจำเพาะที่ใช้สำหรับดีบุกก็มีค่าเพิ่มมากขึ้น เพราะว่าเกิดก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทด เงื่อนไขของการทดลอง คือ ศักย์ที่ขั้วแคโทดประมาณ -1.0 โวลต์ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง คือ ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ ที่อิมมัวด้วยโพแทสเซียมคลอไรด์ ไอออนดีบุกจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันและเกิดเป็นดีบุก ไอออนของทองคำขาวส่งผลต่อการเกิดการพอกพูนของดีบุก ที่ศักย์ไฟฟ้า -0.4 โวลต์ การนำกลับของโลหะทั้งสองมีความเป็นไปได้ที่จะถูกแยกออกจากกัน การมีไอออนทองคำขาวอยู่ จะเพิ่มให้เกิดการพอกพูนของดีบุกที่ศักย์เป็นลบมากกว่า -0.6 โวลต์ ที่ค่าศักย์ดังกล่าวถือเป็นค่าที่ต่ำที่สุดของพลังงานที่ใช้ และทำให้ประสิทธิภาพเชิงกระแสมีค่ามากกว่า 70% อีกทั้งเป็นค่าที่ดีของการเปลี่ยนสภาพในรูปไอออนของทั้งดีบุก 100% และทองคำขาวได้มากกว่า 90%

Fourcade และ Tzedakis (2010) ได้ทำการศึกษาถึงวิธีการทางไฟฟ้าเคมี ในการเกิดการพอกพูนของเงินจากสารละลายซิลเวอร์ไอโอไดน์บนขั้วอิเล็กโทรดเงิน การศึกษาถึงปริมาณประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้และค่าของกระแส ณ จุดศักย์ต่างๆ ที่ให้แก่วงจร ได้แสดงให้เห็นถึงการดูดติดของซิลเวอร์ไอโอไดน์ที่ขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้น กลไกของการเกิดการพอกพูนของเงินที่ขั้วแคโทดสามารถเกิดขึ้นได้ใน 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกซิลเวอร์ไอโอไดน์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วอิเล็กโทรดเงินที่ค่ากระแส 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ขั้นตอนที่สองซิลเวอร์ไอโอไดน์สามารถเกิดปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดในรูปแบบของการดูดติด จะเกิดที่ค่ากระแส 31 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ขั้นตอนที่สาม คือ การเกิดปฏิกิริยาของอนุภาคของแข็งของซิลเวอร์ไอโอไดน์ ซึ่งขั้นตอนนี้ถือเป็นขั้นตอนหลักเมื่อเทียบกับในสองขั้นตอนแรกเพราะใช้ค่ากระแสมากที่สุด คือ 72 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

Scott และคณะ (1997) ได้ศึกษาถึงการนำกลับของโลหะดีบุก ตะกั่ว และทองแดง จากสารละลายที่ได้จากการล้างแผงวงจรไฟฟ้า โดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้สารละลายกรดไนตริกในการล้างแผงวงจร ในการศึกษาครั้งนี้มีสองวิธีในการนำกลับโลหะ วิธีแรก คือ การใช้ไฟฟ้าเคมีในการนำกลับโลหะทั้งหมด วิธีที่สอง คือ การใช้ไฟฟ้าเคมีในการเกิดการพอกพูนของทองแดง และทำให้เกิดการตกตะกอนของดีบุกและตะกั่ว ซึ่งนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการเข้าเตาเผา การใช้สารละลายกรดไนตริกในการล้างแผงวงจร เพราะว่าสามารถใช้ในการนำกลับโลหะโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมีได้ และลดการเกิดหมอกระหว่างการล้างแผงวงจร ในวิธีการแรกแยกดีบุกออกจากสารละลายด้วยวิธีการกรอง เนื่องจากเกิดไฮเดรตทินด์ออกไซด์ ตะกอนที่เกิดขึ้นสามารถละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริก และนำกลับได้โดยการใช้ไฟฟ้าเคมี โดยให้เกิดการพอกพูนที่ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีไททานเนียมเป็นขั้วแอโนด หลังจากที่มีการแยกดีบุกแล้วสารละลายที่มีไอออนของทองแดงและตะกั่วจะสามารถ

นำกลับด้วยการพอกพูนของไอออนที่ขั้วไฟฟ้าเช่นเดียวกับดีบุกและจะได้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสที่สูง กระบวนการนี้เป็นเทคโนโลยีที่สะอาดสำหรับการนำกลับของโลหะ อย่างไรก็ตามก็ยังไม่เป็นการประหยัดถ้าหากเทียบกับการตกตะกอนด้วยต่าง อีกตัวเลือกหนึ่งของการนำกลับทองแดงโดยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี โดยรวมกันกับการตกตะกอนดีบุกและตะกั่ว ก่อนที่จะมีการพอกพูนของทองแดงเกิดขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้คือ  $PbSO_4$  และ  $SnO_2$  จะถูกส่งไปเผา เพื่อที่จะผลิตโลหะผสมขึ้นมา วิธีการนี้เป็นวิธีที่ง่ายและประหยัดแต่ไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเหมือนกับการนำกลับโลหะทั้งหมดโดยใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมี เพราะว่าการเผาไหม้จะเกิดก๊าซ และเกิดกากโลหะขึ้น

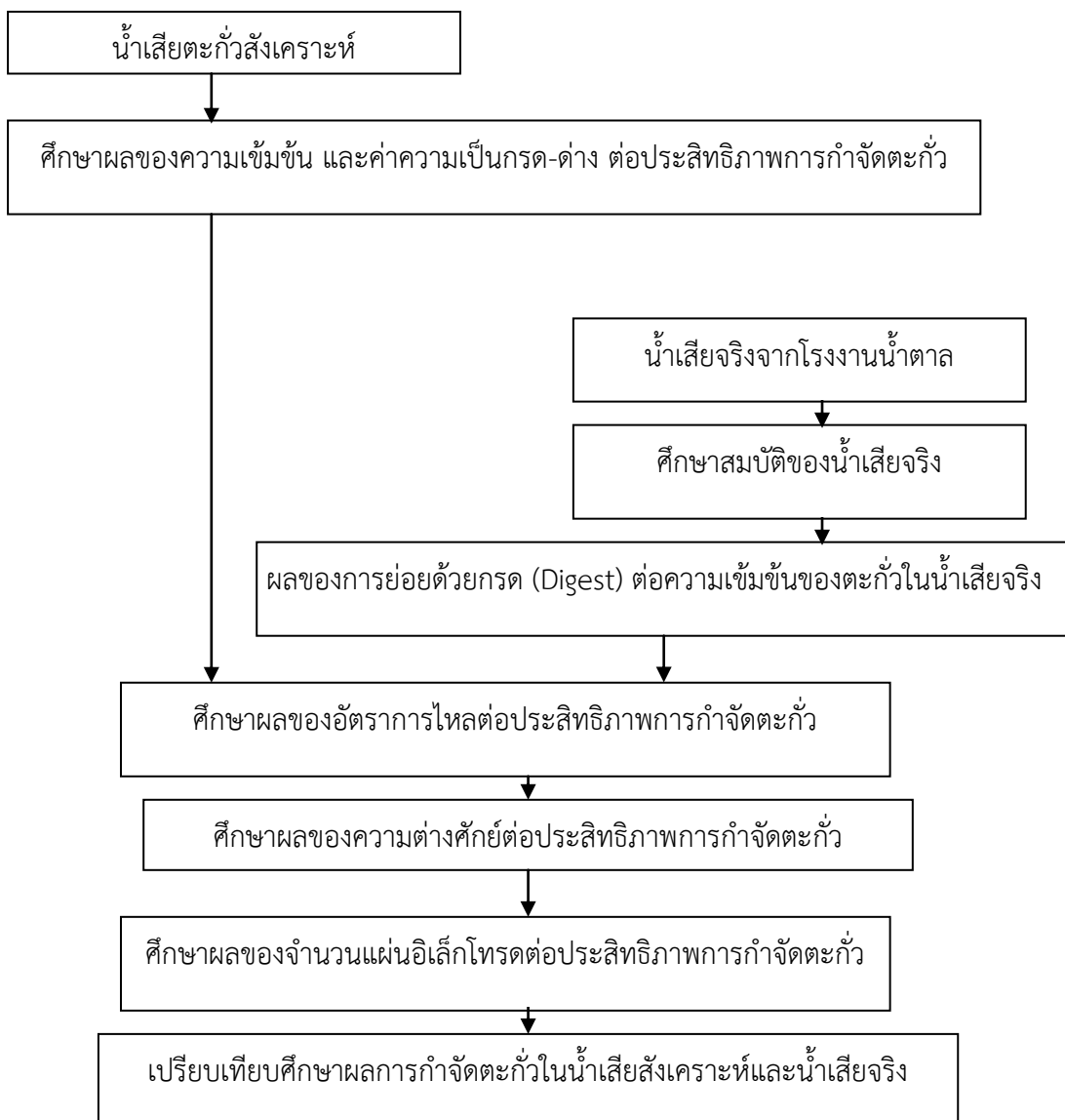
Chung และคณะ (2010) ศึกษาการกำจัดตะกั่วที่เจือปนในดินเหนียวจากน้ำทะเล โดยวิธีเคมีไฟฟ้าในการทดลองจะทำการศึกษาค่าตัวแปรต่างๆ เช่น เวลาในการทดลอง กระแสไฟฟ้า ความเข้มข้นของตะกั่วและสารเคมี ที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วออกจากดินเหนียวที่ได้มาจากทะเล จากการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพของการกำจัดตะกั่วซึ่งเจือปนในดินจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการทดลองและกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้นลดลง เนื่องจากปริมาณของไฮโดรเจนไอออนและน้ำที่เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดเพิ่มขึ้น

Yang และคณะ (1998) ศึกษาการแยกตะกั่วออกจากตะกอน โดยใช้วิธีเคมีไฟฟ้า ซึ่งใช้ความต่างศักย์ในอัตราคงที่  $1 \text{ V/cm}$  ในการศึกษาใช้ขั้วแคโทดมีสารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้น  $0.1 \text{ M}$  บรรจุอยู่และที่ขั้วแอโนดจะมีการเปลี่ยนสารที่บรรจุ ใช้สารละลายความเข้มข้น  $0.1 \text{ M}$  ของกรดอะซิติก กรดซิตริก ethylene diaminetetra acetic acid (EDTA) ตามลำดับ จากการทดลอง พบว่า ถ้าระบบมีความเป็นกรด - เบส (pH) ของทั้งสองขั้วอิเล็กโทรดน้อยกว่าจุดของ Zero charge (PZC) ของอนุภาคดินแล้ว แรง electro osmotic (EO) จะเคลื่อนไปในทิศทางของขั้วแคโทด ประสิทธิภาพในการแยกตะกั่วจะต่างกัน ถ้าใช้กรดอะซิติก, กรดซิตริกและ EDTA บรรจุอยู่ในขั้วแอโนด คือ 27.6, 53.3 และ 11.2% ของกรดอะซิติก กรดซิตริกและ EDTA ตามลำดับ

Carreno และคณะ (2009) ศึกษาการแยกตะกั่วออกจากสารละลายโดยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยใช้สารอิเล็กโทรไลต์ที่มีไอออนต่างๆ กัน เช่น ไนเตรต, คลอไรด์ หรือ ซัลเฟต ในปริมาณที่เท่ากันและใช้แท่งคาร์บอนเป็นขั้วไฟฟ้า ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพของกระบวนการขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของสารอิเล็กโทรไลต์ การใช้คลอไรด์เป็นสารอิเล็กโทรไลต์จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วสูงที่สุด ขณะที่การกำจัดตะกั่วโดยใช้ซัลเฟตเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ จะเกิดได้ยากเพราะต้องใช้พลังงานในการกำจัดที่สูงมาก สารละลายคลอไรด์สามารถแยกตะกั่วออกมาในปริมาณที่มากกว่าการใช้สารละลายซัลเฟตเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ เพราะเมื่อใช้คลอไรด์เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ ขณะที่ตะกั่วกระจายไปอยู่ที่ผิวของขั้วไฟฟ้านั้น คลอไรด์ไอออนจะช่วยจับตะกั่วไปเกาะรวมกันไว้ที่ผิวของขั้วมากขึ้น ส่วนการใช้ซัลเฟตจะแยกตะกั่วไปอยู่ที่ขั้วไฟฟ้าได้น้อย เนื่องจากตะกั่วจับตัวเป็นก้อนขนาดเล็กและถูกขัดขวางโดยเกลือที่เกิดจากปฏิกิริยาของสารละลายซัลเฟต

### กรอบแนวคิดของการวิจัย

กรอบแนวความคิดหลักของงานวิจัยนี้ คือการศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ที่พัฒนาขึ้น ในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจริงของโรงงานน้ำตาล รวมถึงศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย