

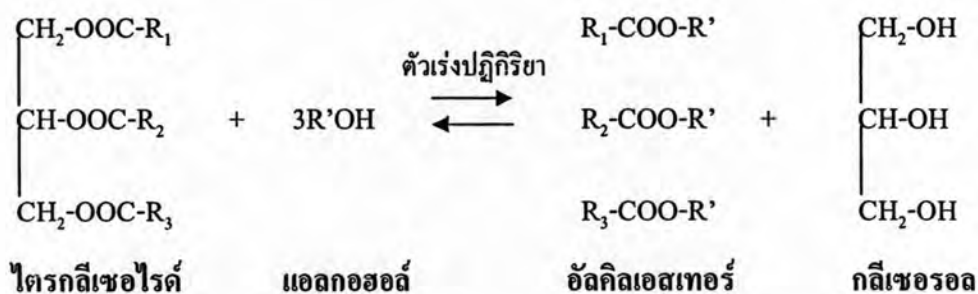


เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไบโอดีเซล

2.1.1 ความหมายของไบโอดีเซล (กระทรวงพลังงาน, 2550)

ไบโอดีเซล (Biodiesel) เป็นเชื้อเพลิงที่ได้จากการนำน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์มาผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า แอลกอฮอล์ไลซิส (Alcoholysis) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาของไขมันและน้ำมันกับแอลกอฮอล์ ที่ทำให้เกิดอัลคิลเอสเทอร์ (Biodiesel) กับกลีเซอรอล โดยปกติจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วยเพื่อลดเวลาที่ใช้ในปฏิกิริยา และเพิ่มปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้ เนื่องจากปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ ดังแสดงในสมการ



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์

กลีเซอรอลจะเป็นผลพลอยได้ที่มีคุณค่าทางอุตสาหกรรมและคอสเมติก เอสเทอร์ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะคล้ายน้ำมันดีเซล จะใช้แทนน้ำมันดีเซลหรือเติมเป็นส่วนผสมในน้ำมันดีเซลสำหรับใช้กับเครื่องยนต์

2.1.2 ประเภทของไบโอดีเซล ที่นำมาใช้งานแบ่งได้ 3 ประเภท ดังนี้ (พัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. กรม, 2549)

1. น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ ไบโอดีเซลชนิดนี้เป็นการนำเอาน้ำมันพืช เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันมะพร้าว หรือน้ำมันสัตว์มาใช้โดยตรงกับเครื่องยนต์ดีเซลแบบไม่ต้องผสมสารเคมีอื่น

ซึ่งไบโอดีเซลชนิดนี้ใช้ได้กับเฉพาะเครื่องยนต์รอบต่ำ มีคุณสมบัติแตกต่างจากดีเซลมาก ทำให้เครื่องยนต์สันดาปไม่สมบูรณ์ เครื่องสะดุด และเกิดตะกรันขาวติดอยู่ในถังน้ำมัน ทำให้เครื่องยนต์มีความหนืดเมื่ออุณหภูมิต่ำลง มีผลต่อการสตาร์ทเครื่องทำให้เครื่องติดยากหรืออาจไม่ติดเลย

2. ไบโอดีเซลแบบดัดผสม เป็นการผสมน้ำมันจากพืชหรือสัตว์ที่กล่าวมากับน้ำมันก๊าดหรือน้ำมันดีเซล เพื่อให้ได้ไบโอดีเซลที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด เช่น ปาล์มดีเซล (Palm-diesel) เป็นการผสมระหว่างน้ำมันปาล์มกับน้ำมันดีเซล ไบโอดีเซลชนิดนี้เหมาะสำหรับการใช้กับเครื่องยนต์รอบต่ำหรือเครื่องจักรกลทางการเกษตร การแปลงให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลทำให้ลดปัญหาเรื่องความหนืดของเครื่องยนต์และการสตาร์ทเครื่องลงไปได้ แต่ก็ยังมีปัญหาในเรื่องของการอุดตันของไส้กรองเครื่องยนต์ที่จะเกิดการอุดตันได้เร็วกว่าปกติ

3. ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ เป็นประเภทของไบโอดีเซลที่นานาชาติรู้จักและยอมรับกัน เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหมือนกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด โดยผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชัน เพื่อเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ให้อยู่ในรูปของเอสเทอร์ โดยจะเรียกตามชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาว่าเป็นเมทิลเอสเทอร์หรือเอทิลเอสเทอร์ ข้อดีของไบโอดีเซลแบบนี้ คือ มีค่าซีเทนสูงกว่าน้ำมันดีเซลทำให้จุดติดไฟได้ง่าย การสันดาปสมบูรณ์เกิดคาร์บอนไดออกไซด์น้อย ไม่มีควันดำและซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทำลายสิ่งแวดล้อม มีค่าความหนืดคงที่ ข้อเสีย คือ มีราคาแพง ต้นทุนสูงกว่าไบโอดีเซลแบบอื่นๆ เครื่องยนต์ให้กำลังต่ำกว่าน้ำมันดีเซล มีการสร้างก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) เพิ่มขึ้น

2.1.3 วัตถุประสงค์ที่นำมาผลิตเป็นไบโอดีเซล (บริษัทบางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน), 2550)

1. เมล็ดเรพ มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ เหมือนเมล็ดงา เป็นพืชล้มลุกประเภทวัชพืชที่พบอยู่ทั่วไปในทวีปยุโรป ปัจจุบันเมล็ดเรพเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซลมากที่สุดในยุโรป คือ มีส่วนแบ่งในการผลิตถึงร้อยละ 80 ของวัตถุดิบอื่นๆ ทั้งหมด

2. ถั่วเหลือง เป็นพืชน้ำมันที่นิยมใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตไบโอดีเซลมากที่สุดในสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีปริมาณการผลิตถั่วเหลืองสูงถึงกว่า 30 ล้านตันต่อปี นอกจากนี้ยังมีประเทศอิตาลีซึ่งนิยมใช้ถั่วเหลืองในการผลิตไบโอดีเซล

3. ปาล์มน้ำมัน เป็นพืชน้ำมันที่นิยมใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทยขณะนี้ เนื่องจากเป็นพืชที่มีศักยภาพในการนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงสูงกว่าพืชน้ำมันชนิดอื่น คือ มีต้นทุนการผลิตต่ำ ให้ผลตอบแทนกำไรต่อไร่ สูงถึงประมาณ 4,000 บาทต่อปี จึงมีการส่งเสริมให้เกษตรกรมีการปลูกปาล์มพันธุ์ดีทดแทนพืชอื่นๆ ที่มีรายได้ต่ำกว่า

4. **สบู่ดำ** มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Jatropha curcas* Linn. โดยสบู่ดำเป็นพืชน้ำมันที่เพาะปลูกง่ายไม่ต้องดูแลมาก ทนต่อสภาพแล้งและน้ำท่วมทำให้ปลูกได้ในพื้นที่ทั่วทุกภาค แม้แต่ในพื้นที่ที่ใช้ประโยชน์ทางการเกษตรได้น้อย น้ำมันที่บีบจากผลสบู่ดำสามารถนำมาใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลรอบต่ำสำหรับการเกษตรแทนน้ำมันดีเซลได้ทันที โดยไม่ต้องดัดแปลงเครื่องยนต์ แต่มีปัญหาด้านคุณภาพบางประการ อาทิค่าความหนืดที่สูงกว่าน้ำมันดีเซลถึง 10 เท่า ทำให้ไม่สามารถใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลรอบสูงทั่วไปได้ จำเป็นต้องนำไปผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน แปลงเป็นไบโอดีเซลก่อนนำไปผสมกับน้ำมันดีเซลปกติเพื่อใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิง

5. **น้ำมันพืชที่ใช้แล้ว** เป็นวัตถุดิบอีกประเภทหนึ่ง ที่ควรส่งเสริมให้นำไปผลิตไบโอดีเซล ซึ่งนอกจากจะเป็นประโยชน์ด้านพลังงานแล้ว ยังช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและสาธารณสุข โดยในช่วง 20 ปี ที่ผ่านมา ทั่วโลกมีอัตราเฉลี่ยในการบริโภคน้ำมันพืชเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 4 ต่อปี เพราะวิถีการบริโภคที่หันมานิยมอาหารประเภทจานด่วนที่ปรุงด้วยการทอดมากขึ้น ทำให้มีน้ำมันพืชใช้แล้วจำนวนมากที่ซึ่งจำเป็นต้องหาวิธีจัดการ โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและสาธารณสุข ซึ่งประเทศที่พัฒนาแล้วนิยมนำน้ำมันพืชที่ใช้แล้วมาผลิตเป็นน้ำมันไบโอดีเซลซึ่งมีการดำเนินการอย่างเป็นรูปธรรมในปัจจุบัน

2.1.4 ประโยชน์ของการใช้ไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ (สุจินันท์ ยัมคมขำ, 2549)

ด้านสิ่งแวดล้อม

1. การใช้ไบโอดีเซลสามารถลดมลพิษทางอากาศ ซึ่งเป็นผลจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ เนื่องจากองค์ประกอบของไบโอดีเซลไม่มีธาตุกำมะถัน แต่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จึงช่วยการเผาไหม้ได้ดีขึ้นและช่วยลดมลพิษซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไฮโดรคาร์บอน คาร์บอนมอนอกไซด์ และฝุ่นละออง เป็นต้น โดยจากการทดลองพบว่า เมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลกับเครื่องยนต์ดีเซลขนาด 145 แรงม้า สามารถลดควันดำได้มากกว่าร้อยละ 40

2. การใช้ไบโอดีเซลสามารถลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจกเพราะผลิตจากพืช

3. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ช่วยลดการนำน้ำมันที่ใช้แล้วไปประกอบอาหารซ้ำและยังช่วยป้องกันไม่ให้นำน้ำมันพืชใช้แล้วซึ่งมีสารไดออกซินปะปนไปผลิตเป็นอาหารสัตว์

ด้านสมรรถนะเครื่องยนต์

1. การผสมไบโอดีเซลในระดับร้อยละ 1-2 สามารถช่วยเพิ่มดัชนีการหล่อลื่นให้กับน้ำมันดีเซล จากผลการทดลองของสถาบันวิจัยและเทคโนโลยีของบริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน)

พบว่า การเติมไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วและน้ำมันมะพร้าวในอัตราร้อยละ 0.5 สามารถเพิ่มดัชนีการหล่อลื่นได้ถึง 2 เท่า

2. ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีขึ้นเนื่องจากไบโอดีเซลมีออกซิเจนผสมอยู่ประมาณ ร้อยละ 10 ทำให้การผสมระหว่างอากาศกับน้ำมันมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และเป็นการเพิ่มอัตราส่วนปริมาตรของอากาศต่อน้ำมันได้เป็นอย่างดี จึงทำให้การเผาไหม้ดีขึ้น

3. ถึงแม้ว่าค่าความร้อนของไบโอดีเซลจะต่ำกว่าน้ำมันดีเซลประมาณร้อยละ 10 แต่ไบโอดีเซลทำให้การเผาไหม้ดีขึ้น จึงทำให้กำลังเครื่องยนต์ไม่ลดลง

ด้านเศรษฐศาสตร์

1. การใช้ไบโอดีเซลช่วยสร้างงานในชนบท ด้วยการสร้างตลาดพลังงานไว้รองรับผลผลิตทางการเกษตรที่เหลือจากการบริโภค

2. การใช้ไบโอดีเซลช่วยลดการนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศได้บางส่วน ซึ่งในแต่ละปีประเทศไทยสูญเสียเงินตราต่างประเทศเพื่อนำเข้าน้ำมันดิบกว่า 300,000 ล้านบาท

ด้านการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงในประเทศ

1. ประเทศไทยมีสัดส่วนการใช้น้ำมันดีเซลสูงกว่าน้ำมันเบนซินมาก โดยตลาดน้ำมันดีเซลมีมูลค่ามากกว่าน้ำมันเบนซินกว่า 2 เท่า และในอนาคตมีแนวโน้มที่โรงกลั่นอาจจะผลิตน้ำมันดีเซลไม่เพียงพอต่อการใช้ในประเทศ ดังนั้นการใช้ไบโอดีเซลจึงช่วยลดความไม่สมดุลของการผลิตของโรงกลั่นได้

2. การผสมน้ำมันไบโอดีเซลในอัตราส่วนร้อยละ 1-2 สามารถเพิ่มความหล่อลื่นในน้ำมันดีเซลได้ โดยเฉพาะกรณีที่จะมีการลดปริมาณกำมะถันในน้ำมันดีเซล

ด้านความมั่นคง

1. การใช้น้ำมันไบโอดีเซลที่สามารถผลิตได้ภายในประเทศ ถือเป็น การเสริมสร้างความมั่นคงและเสถียรภาพทางด้านพลังงานของประเทศ

2.1.5 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลของบริษัทบางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) (บริษัทบางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน), 2550)

1. การเตรียมน้ำมันก่อนทำปฏิกิริยา วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการผลิตจะถูกเตรียมให้เหมาะสมก่อนเข้าทำปฏิกิริยา โดยหากเป็นน้ำมันปาล์มดิบจำเป็นต้องผ่านกระบวนการแยกยางเหนียว และลดกรดให้มีปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ส่วนวัตถุประสงค์จากน้ำมันที่ใช้ทอดแล้วจะถูกนำมากรองแล้วจึงนำไปขจัดน้ำออก

2. การเตรียมสารละลายแอลกอฮอล์สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยใช้เมทานอลที่มีโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเมทานอลต้องไม่มีน้ำเจือปนเกินกว่าร้อยละ 1 การเตรียมสารละลาย โดยการนำโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.5-5 ส่วน ละลายในเมทานอล 100 ส่วน โดยน้ำหนัก ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เตรียมเป็นไปตามปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในวัตถุดิบ หากกรดไขมันอิสระมีปริมาณสูงก็ต้องใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในสัดส่วนที่สูงขึ้น

3. การทำปฏิกิริยา น้ำมันที่ถูกขจัดน้ำแล้วจะถูกทำให้มีอุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงเติมสารละลายแอลกอฮอล์ลงไปอย่างช้าๆ (เติมให้หมดภายใน 10 นาที) สัดส่วนน้ำมันต่อสารละลายแอลกอฮอล์โดยน้ำหนักเท่ากับ 5 ต่อ 1 ทำการกวนเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอย่างทั่วถึงเป็นเวลาประมาณ 15 นาที ด้วยอัตราการกวนปานกลาง (500 รอบ/นาที) อุณหภูมิในช่วงนี้ลดลงเหลือประมาณ 65 องศาเซลเซียส การเกิดปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ได้เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอริน ซึ่งปฏิกิริยานี้ผันกลับได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหยุดกวนเพื่อแยกกลีเซอรินออก โดยจะแยกตัวออกจากชั้นเมทิลเอสเทอร์ตกลงมาที่ก้นถัง ทำให้ชั้นเมทิลเอสเทอร์จะเหลือกลีเซอรินอยู่น้อย ปฏิกิริยาการเกิดเมทิลเอสเทอร์จะสามารถดำเนินต่อไปอย่างช้าๆ เมื่อทิ้งให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 3-4 ชั่วโมง น้ำมันก็จะทำปฏิกิริยาไปมากกว่าร้อยละ 95

4. การแยกกลีเซอริน กลีเซอรินจะถูกถ่ายออกใส่ภาชนะโดยการถ่ายออกทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์ ในขณะที่ยังร้อนอยู่เพราะหากทิ้งไว้ให้เย็น ชั้นกลีเซอรินจะกลายเป็นของแข็ง

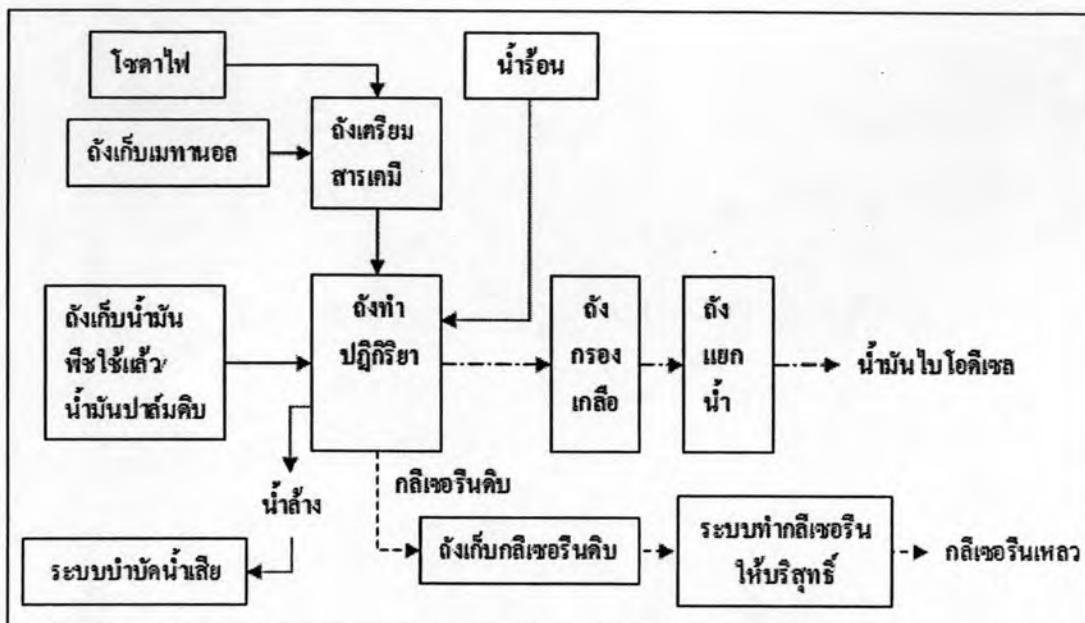
5. การล้างสิ่งปนเปื้อนออก เมทิลเอสเทอร์ที่ได้ยังปนเปื้อนด้วยสารอื่นๆ เช่น สบู่ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดไขมันอิสระหรือน้ำมัน กลีเซอรินที่ละลายอยู่ในชั้นเมทิลเอสเทอร์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เมทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาและน้ำมันที่ทำปฏิกิริยาไม่หมด ดังนั้นจึงต้องทำการขจัดออกด้วยการล้างด้วยน้ำอุ่นหลายๆ ครั้ง ปริมาณน้ำที่ใช้แต่ละครั้งประมาณ 1 ต่อ 4 ของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ เมื่อเติมน้ำเพียงพอแล้วรอให้น้ำแยกชั้นออกจากเมทิลเอสเทอร์เป็นเวลาพอสมควร (ประมาณ 5-10 นาที) จากนั้นจึงถ่ายน้ำออกทางด้านล่าง เติมน้ำอุ่นเพื่อล้างใหม่อีกครั้ง โดยการล้างจะล้าง 4-5 ครั้ง

6. การบำบัดกลีเซอริน กลีเซอรินที่ได้จากการทำปฏิกิริยาจะแข็งตัวที่อุณหภูมิห้อง จึงต้องทำการบำบัด โดยใช้สารละลายกรดเพื่อทำให้กลีเซอรินที่ผ่านการบำบัดอยู่ในรูปของเหลวที่อุณหภูมิห้อง

7. การขจัดน้ำออกขั้นสุดท้าย เมื่อล้างสิ่งปนเปื้อนออกหมดแล้ว ขั้นตอนสุดท้าย คือการขจัดน้ำที่หลงเหลือในชั้นเมทิลเอสเทอร์ออก ซึ่งกระทำโดยการกรองด้วยถังกรองเกลือและเมื่อทิ้งไว้ให้เย็นก็สามารถนำไปเก็บเพื่อใช้งานต่อไป

8. ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผลิต ได้แก่ น้ำมันไบโอดีเซล โดยองค์ประกอบจะเป็นสารจำพวกเมทิลเอสเทอร์ ซึ่งจะนำเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้มาผสมกับน้ำมันดีเซล ในอัตราส่วนที่กำหนด

นอกจากนี้ยังมีกลีเซอรินดิบซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการผลิตไบโอดีเซล โดยเป็นสารที่มีคุณค่าทางความร้อนและเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง เมื่อผ่านการบำบัดจะได้เป็นกลีเซอรินเหลวและจะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อป้อนเข้าหม้อไอน้ำ



รูปที่ 2.2 แผนภาพการผลิตไบโอดีเซลของบริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน)

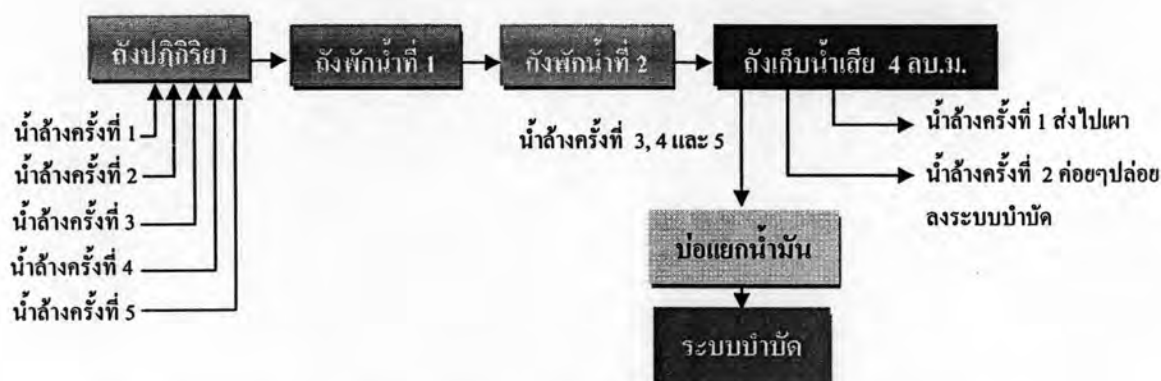
ที่มา : บริษัทบางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน), 2550

ตารางที่ 2.1 ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลของ บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน)

พารามิเตอร์	ปริมาณความเข้มข้น				
	น้ำล้างครั้งที่ 1	น้ำล้างครั้งที่ 2	น้ำล้างครั้งที่ 3	น้ำล้างครั้งที่ 4	น้ำล้างครั้งที่ 5
1.พีเอช	9.62	10.33	9.12	9.46	7.68
2.ของแข็งแขวนลอย (มก./ล)	20,450	675	60	40	30
3.ซีโอดี (มก./ล)	712,800	107,950	19,483	7,774	2,495
4.น้ำมันและไขมัน (มก./ล)	17,880	10,880	9,100	6,280	1,020
5.กลีเซอรอล (มก./ล)	42,237	3,126	952	933	764
6.เมทานอล (มก./ล)	257,917	56,016	14,406	2,574	421

2.1.6 การจัดการน้ำเสียไบโอดีเซลของบริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน)

1. น้ำล้างครั้งที่ 1 พบว่ามีค่าซีโอดีสูงมาก จึงไม่สามารถนำเข้าระบบบำบัดน้ำเสียได้ ดังนั้นจึงกำจัดโดยการนำไปเผา
2. น้ำล้างครั้งที่ 2 ยังคงมีค่าซีโอดีสูงอยู่ ดังนั้นจึงทำการปล่อยเข้าระบบบำบัดน้ำเสียในอัตราที่ต่ำ ซึ่งมีอัตราการปล่อยประมาณ 180-240 ลิตรต่อชั่วโมง
3. น้ำล้างครั้งที่ 3, 4, และ 5 นำมาผสมรวมกันและปล่อยเข้าระบบบำบัดน้ำเสียโดยตรง โดยมีอัตราการปล่อยประมาณ 720 ลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 2.3 แผนผังแนวทางการจัดการน้ำเสีย บริษัทบางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน)

ที่มา : บริษัทบางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน), 2550

2.1.7 ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลชุมชน (ปิณภัทร เจริญสาคร, 2549)

กรณีศึกษาโรงงานไบโอดีเซลต้นแบบจังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งเป็นระบบผลิตไบโอดีเซล โดยใช้กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันมีกำลังในการผลิต 2,000 ลิตรต่อวัน วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต คือ น้ำมันปาล์มร้อยละ 70 และน้ำมันพืชที่ใช้แล้วร้อยละ 30 โดยนำน้ำมันพืชที่ใช้แล้วมาปรับพีเอช 6 และให้ความร้อนที่ 80 องศาเซลเซียส เพื่อให้ไขมันขยายตัวและไม่จับตัวกันเป็นไข แล้วทำการลดอุณหภูมิเหลือ 57-62 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมเมทานอลที่มีโปรดัสเซียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณ 20 ลิตรต่อน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว 1,000 ลิตร หลังจากนั้นทำการกวนประมาณ 2 ชั่วโมง จะเกิดการแยกชั้นของเอสเทอร์และกลีเซอริน จากนั้นทำการแยกกลีเซอรินออกจากเอสเทอร์ แล้วทำการล้างเอสเทอร์ด้วยน้ำที่มีลักษณะเป็นกรดเล็กน้อย ล้างประมาณ 3-4 ครั้ง จึงนำเอสเทอร์ที่ล้างแล้วมาเก็บยังถังเก็บไบโอดีเซล ในกระบวนการนี้จะได้ไบโอดีเซลประมาณ 95 ลิตร และกลีเซอรินเป็นผลพลอยได้ 10 ลิตร โดยองค์ประกอบของน้ำเสียไบโอดีเซลประกอบด้วยกลีเซอรอล เมทานอล สบู่ไบโอดีเซล และน้ำมันที่ไม่ทำปฏิกิริยา เป็นต้น ซึ่งตัวอย่างลักษณะน้ำเสีย ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานไบโอดีเซลต้นแบบจังหวัดเชียงใหม่หลังผ่านการแยกน้ำมันและไขมันออกแล้ว (ปัทมพร เจริญสาคร, 2549)

พารามิเตอร์	ปริมาณความเข้มข้น		มาตรฐานน้ำทิ้ง
	ก่อนแยกไขมัน	หลังแยกไขมัน	
1.พีเอช	10.6	10.44	5-9
2.ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	2,890	584	50
3.ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (มก./ล.)	-	4,131	-
4.ซีโอดี (มก./ล.)	124,500	58,620	120
5.บีโอดี (มก./ล.)	-	37,500	20
6.น้ำมันและไขมัน (มก./ล.)	-	2,300	5
7.ทีเคอน (มก./ล.)	-	7	100
8.ฟอสฟอรัสทั้งหมด (มก./ล.)	-	N.D.	-
9.กลีเซอรอล (มก./ล.)	-	47,237	-
10.เมทานอล (มก./ล.)	-	12,750	-

หมายเหตุ : N.D. คือ ตรวจวัดไม่พบ

2.2 การบำบัดน้ำเสียที่มีน้ำมันและไขมันปนเปื้อน (เกรียงศักดิ์ อุคมสิน โรจน์, 2539)

น้ำมันและไขมันจะเป็นสารประกอบพวกแอลกอฮอล์หรือพวกกลีเซอรอล โดยเป็นสารอินทรีย์ที่มีเสถียรภาพและย่อยสลายโดยแบคทีเรียได้ยาก ซึ่งวิธีกำจัดมีอยู่หลายวิธี เช่น

1. การเติมคลอรีน โดยจะเติมสารละลายคลอรีนลงในถังตกตะกอนแรกหรือในถังเติมอากาศ ซึ่งทั่วไปจะใส่คลอรีนประมาณ 2-5 มิลลิกรัมต่อลิตร ก็อาจเพียงพอที่จะกำจัดไขมันออกจากน้ำเสียได้

2. การเติมคลอรีนร่วมกับการเป่าอากาศ เป็นวิธีการที่ดีกว่าการเติมคลอรีนอย่างเดียว เป็นระบบที่ใช้ก๊าซคลอรีนผสมกับอากาศเพื่อเป่าลงในถังเป่าอากาศ โดยทั่วไปใช้คลอรีนประมาณ 2-10 มิลลิกรัมต่อลิตร

3. การทำให้ลอย (Flotation) นิยมใช้กันมากสำหรับการกำจัดน้ำมันและไขมัน ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและมีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันและไขมันค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอื่นๆ กระบวนการนี้มีหลักการ คือ ทำให้พวกน้ำมันหรือไขมันซึ่งมีน้ำหนักเบาให้ลอยขึ้นโดยอาศัยแรงลอยตัวขึ้นของฟองอากาศพองพาวกน้ำมันหรือไขมันเหล่านี้ลอยสู่ผิวน้ำ จากนั้นใช้วิธีกวาดพวกน้ำมันหรือไขมันที่อยู่บริเวณผิวน้ำออกจากถัง

การทำให้ลอยยังสามารถใช้ในการแยกสิ่งสกปรกที่ตกตะกอนยาก หรือสิ่งสกปรกที่มีลักษณะครึ่งจมครึ่งลอย ซึ่งอาจเป็นของแข็งหรือของเหลว โดยการใช้ฟองอากาศพาสิ่งสกปรกลอยขึ้นสู่ผิวน้ำเพื่อกวาดตักออกไป กระบวนการตะกอนลอยที่ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสีย จะมีอยู่ 3 วิธี คือ

1. การทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (Dissolved Air Flotation: DAF) หลักการ คือ เป่าอากาศลงในน้ำเสียภายใต้ความดันสูงทำให้อากาศละลายน้ำจนเกินจุดอิ่มตัว จากนั้นจึงปล่อยความดันให้เข้าสู่สภาวะความดันบรรยากาศอย่างรวดเร็ว อากาศส่วนเกินก็จะหนีออกจากน้ำเป็นฟองเล็กๆ พาตะกอนขึ้นสู่ผิวน้ำ

2. การทำให้ลอยด้วยอากาศ (Air Flotation) หลักการ คือ การเติมอากาศหรือเป่าอากาศลงในน้ำเสียโดยตรง ณ ความดันบรรยากาศ ในการเป่าอากาศจะทำให้เกิดฟองอากาศที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศประมาณ 2-3 มิลลิเมตร นำพาตะกอนต่างๆ ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ จากนั้นจะถูกกวาดตักออกไป โดยระบบนี้จะมีประสิทธิภาพในการแยกของแข็งและไขมันต่ำกว่าระบบการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

3. การทำให้ลอยด้วยสุญญากาศ (Vacuum Flotation) หลักการ คือ พยายามเป่าอากาศลงในน้ำเสียจนถึงจุดอิ่มตัว ซึ่งมีอยู่ 2 วิธี คือ เป่าอากาศลงในน้ำเสียโดยตรง หรืออีกวิธีคือ ปล่อยให้อากาศเข้าไปในเครื่องสูบน้ำเอง ระบบนี้จะใช้ถังปิดซึ่งจะเก็บน้ำที่ถูกเป่าอากาศลงไปจนถึงจุดอิ่มตัว ขณะนี้ภายในถังจะมีสภาพเป็นสุญญากาศ เมื่อถังนี้ได้ถูกเปิดออกโดยใช้ตัวควบคุมวาล์วพวกอากาศที่ละลายอยู่ในน้ำจะแยกออกมาจากน้ำในลักษณะของฟองอากาศเล็กๆ แล้วพาตะกอนต่างๆ ในน้ำเสीलอยขึ้นมาบนผิวน้ำในลักษณะฝ้าตะกอน (Scum) ซึ่งสามารถแยกออกจากน้ำได้ โดยการกวาดหรือการสูบออก อย่างไรก็ตามระบบนี้มีความซับซ้อนมากทำให้ไม่เป็นที่นิยมนัก

4. การเพิ่มอุณหภูมิ อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดน้ำมัน คือ ถ้าอุณหภูมิของน้ำมันในน้ำเสียสูงขึ้น ค่าความตึงผิวเฉพาะของน้ำมันจะลดลง ทำให้น้ำมันต่างๆ ในน้ำเสीलอยขึ้นมาได้ง่ายขึ้น จึงเป็นประโยชน์ต่อการกำจัดน้ำมันในน้ำเสียได้อย่างมาก

5. การขจัดไขมัน ไขมันจะเกิดการสะสมและเกาะตามกำแพงบ่อ ซึ่งแก้ไขโดยใช้น้ำฉีดแรงๆ และ/หรือการขจัดบริเวณที่มีไขมันเกาะติดอยู่ และถ้าจำเป็นควรถ่ายน้ำเสียทิ้งออกจากบ่อเปียกอย่างช้าๆ จากนั้นจึงทำการขจัดบริเวณที่มีไขมันเกาะติดอยู่บริเวณพื้นบ่อเปียกออก วัตถุประสงค์ของการขจัดนี้เพื่อป้องกันไม่ให้ไขมันเหล่านี้ไปอุดตันในเครื่องสูบน้ำ

6. การเป่าอากาศ เป็นระบบที่ต้องใช้พลังงานมาก แต่จะทำให้การบำบัดน้ำเสียง่ายขึ้น เพราะไม่เพียงแต่จะสามารถกำจัดไขมันออกได้เท่านั้น ยังสามารถกำจัดพวกตะกอนหนักช่วยลดค่าบีโอดี ช่วยลดปริมาณของแข็งแขวนลอย ช่วยควบคุมกลิ่นในระบบบำบัด ช่วยลดปริมาณตะกอนที่เกาะสะสมอยู่บริเวณกำแพง และบริเวณก้นบ่อเปียก เป็นต้น ระบบเป่าอากาศนี้มีหลักการง่ายๆ คือ

เป่าอากาศลงในน้ำพวกฟองอากาศจะนำพาพวกไขมันต่างๆ ลอยขึ้นมา จากนั้นจึงทำการดักหรือกวาดพวกไขมันเหล่านี้ออกจากถังเป่าอากาศ

7. การรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation) เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าลงไปในอิเล็กโทรไลต์แล้ว อิเล็กโทรดที่ทำหน้าที่เป็นแอโนดจะละลายเป็นไอออนสู่น้ำเสีย ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดตะกอนเบา ขณะที่แคโทดจะเกิดฟองก๊าซที่ช่วยในการลอยตัวของน้ำมัน ซึ่งเป็นการแยกสารโดยทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า โดยได้มีการมีพัฒนาให้ระบบมีสองขั้นตอน คือ ขั้นที่หนึ่งเป็นการทำให้เกิดตะกอนเบาด้วยไฟฟ้าเพื่อให้เกิดการรวมตัวของน้ำมัน ขั้นที่สองเป็นการทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าเพื่อแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย การละลายตัวของอิเล็กโทรดไม่ได้ขึ้นกับปริมาณและขนาดของอิเล็กโทรด แต่ขึ้นกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัด ข้อดีของระบบนี้ คือ ควบคุมง่าย ประสิทธิภาพสูงและระบบบำบัดมีขนาดเล็ก

2.3 หลักการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี

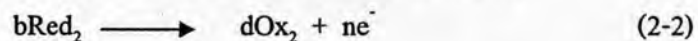
กระบวนการไฟฟ้าเคมี คือ กระบวนการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดภายนอก ส่วนประกอบที่สำคัญของกระบวนการนี้ ได้แก่ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากภายนอก สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และขั้วไฟฟ้าสองขั้ว (รัตนจิระรัตนานนท์, 2541)

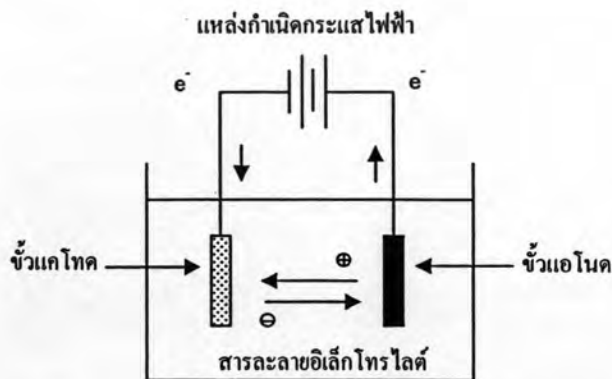
แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าภายนอกเป็นส่วนที่ใช้เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าซึ่งควบคุมปริมาณของกระแสไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าที่ผ่านเข้าระบบตามที่กำหนด ส่วนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทำหน้าที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้า โดยผ่านทางไอออนต่างๆ ที่อยู่ในสารละลาย ซึ่งไอออนเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการเดินทางของกระแสผ่านไปขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ขั้ว ซึ่งขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เรียกว่า แอโนด ส่วนขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน เรียกว่า แคโทด ดังรูปที่ 2.4

ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด



ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด

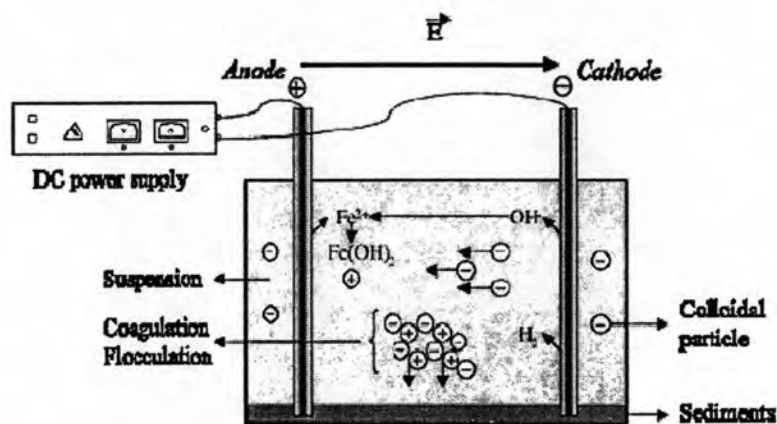




รูปที่ 2.4 องค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี
ที่มา : วรณรัตน์ วัฒนชัย, 2547

2.3.1 หลักการของเซลล์ไฟฟ้าเคมี

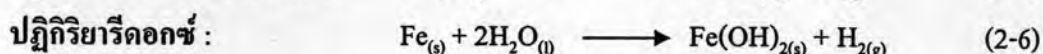
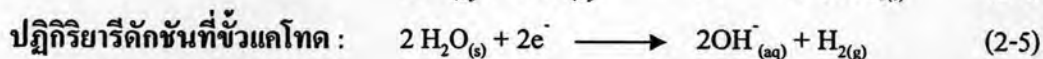
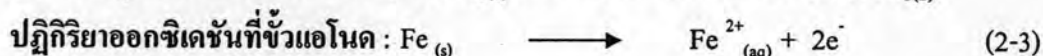
หลักการของเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบอิเล็กโทรลิติกเซลล์นั้น ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง โดยจะใช้ขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การเกิดปฏิกิริยาในเซลล์ไฟฟ้าเคมี
ที่มา : Larue และ Vorobiev, 2003

เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ถึงปฏิกิริยาที่ใช้โลหะเป็นขั้วไฟฟ้า จะเกิดปฏิกิริยาที่มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนหรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (ปฏิกิริยารีดอกซ์) ของขั้วไฟฟ้า เช่น เหล็ก โดยจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วบวก (ขั้วแอโนด) ทำให้โลหะเกิดการสึกกร่อนและละลายอยู่ในน้ำ ในขณะที่เดียวกันที่ขั้วลบ (แคโทด) จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ ซึ่งน้ำจะเกิดการแตกตัวให้ก๊าซไฮโดรเจน (H₂) และไฮดรอกไซด์ (OH⁻) เมื่อเวลาผ่านไปน้ำจะมีสภาพเป็นด่างเนื่องจาก

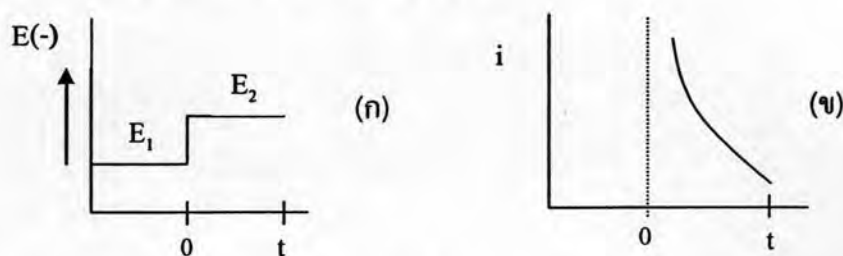
ไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในน้ำและทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟอร์ริไอออน (Fe^{2+}) และเฟอร์ริคไอออน (Fe^{3+}) ในรูปเฟอร์ริไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_{2(\text{s})}$) และเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_{3(\text{s})}$)



2.3.2 การควบคุมการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1. การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ (Controlled-Potential Method or Potentiostatic Mode) เป็นการควบคุมค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงให้มีค่าคงที่ ซึ่งจะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าในระบบเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา โดยเมื่อปรับค่าความต่างศักย์เพียงพอ ไอออนบวกของโลหะที่อยู่ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ผิวของขั้วแคโทด และเมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้ความเข้มข้นของไอออนที่บริเวณผิวหน้าของขั้วแคโทดมีค่าต่ำลง ทำให้ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณกระแสไฟฟ้าจึงต้องลดต่ำลง เพื่อควบคุมค่าความต่างศักย์ให้มีค่าคงที่ ผลที่เกิดจากการทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้ากับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์จาก E_1 เป็น E_2 ที่ขั้วแคโทด

E_1 คือ ค่าความต่างศักย์ที่เริ่มต้นก่อนการเกิดปฏิกิริยา และ E_2 คือ ค่าความต่างศักย์ที่เป็นอัตราจำกัดการกระจายตัว (Diffusion limited rate) หรือเป็นขีดจำกัดการถ่ายโอนมวลสาร (Mass transfer limited) ซึ่งตัวออกซิไดซ์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้ความเข้มข้นของไอออนบวกที่ผิวหน้าของขั้วแคโทดลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ การลดลงของความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะมีผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบลดลง ดังรูป (ข) เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น ($I = kC$)



รูปที่ 2.6 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่

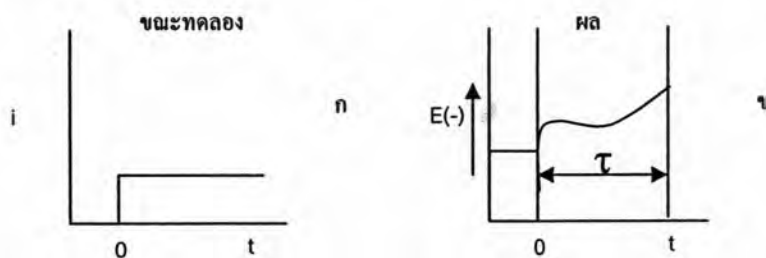
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่

ที่มา: Friedrich, 1962

2. การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ (Controlled-Current Method or Galvanostatic Mode) การควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ อาจเรียกว่า โครโนโพเทนชันเมทรี (Chronopotentiometry) หรือเทคนิคโครโนโพเทนชันเมทรีค (Chronopotentiometric technique) โดยเป็นการควบคุมให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วไฟฟ้าให้คงที่ ทำให้ค่าความต่างศักย์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เมื่อควบคุมให้กระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งสองคงที่ ทำให้สารออกซิไดซ์ (M^{n+}) เกิดปฏิกิริยารีดักชันกลายเป็นสารรีดิวซ์ (M) ด้วยอัตราที่คงที่



ดังนั้นค่าความต่างศักย์จะแปรตามค่าความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลง M^{n+}/M ที่ผิวขั้วไฟฟ้ากับเวลา เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของ M^{n+} ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะลดลง ค่าความต่างศักย์ที่ผิวของขั้วไฟฟ้าก็จะลดลงเช่นกันตามสมการของเนินสต์ ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์โดยกระแสไฟฟ้าคงที่เรียกว่า ช่วงของการเปลี่ยนสถานะ (Transition time: τ) ซึ่งค่านี้สัมพันธ์กับความเข้มข้นและสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่

ที่มา: Friedrich, 1962

ค่าความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงไปกับความเข้มข้นของตัวออกซิไดซ์สามารถแสดงได้ตามสมการของเนินสต์ (Nernst's equation)

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[Ox]}{[red]} \quad (2-8)$$

เมื่อ

- E = ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนด ณ สภาวะใดๆ (โวลต์)
- E^0 = ค่าความต่างศักย์มาตรฐานระหว่างขั้วแคโทดและสารละลาย (โวลต์)

- R = ค่าคงที่ของแก๊สเท่ากับ 8.314 (จูลต่อ โมลต่อเคลวิน)
 T = อุณหภูมิ (เคลวิน)
 n = จำนวนอิเล็กตรอนที่ใช้ไปในการเกิดปฏิกิริยา (ประจุต่อ โมล)
 F = ค่าคงที่ฟาราเดย์เท่ากับ 96,500 (แอมแปร์.วินาทีต่อประจุ)
 [Ox],[red] = ความเข้มข้นของตัวออกซิไดซ์และตัวรีดิวซ์ตามลำดับ (โมลต่อลิตร)

เพื่อให้ได้อัตราในการกำจัดสูงสุด การรีดักชันของไอออนโลหะควรเป็นการควบคุมแบบถ่ายโอนมวลสาร (mass transport control) สมการแสดงอัตราในการนำกลับโลหะออกจากสารละลาย เขียนได้ดังนี้

$$\frac{-V_{dc}}{dt} = \frac{-I_L}{nF} = k_m A_c \quad (2-9)$$

เมื่อ

- V = ปริมาตรของสารละลาย (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
 C = ความเข้มข้นของไอออนโลหะ (โมล/ลิตร)
 t = เวลา (วินาที)
 I_L = กระแสจำกัด (limiting current) (แอมแปร์)
 k_m = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสาร (mass transfer coefficient)
 A_c = พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า (ตารางเมตร)

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ 2-10 เทียบกับเวลาจะได้สมการดังนี้

$$\frac{C_{(t)}}{C_{(0)}} = \frac{\exp(-k_m A_c t)}{V} \quad (2-10)$$

เมื่อ

- C (0) = ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายเริ่มต้น (โมล/ลิตร)
 C (t) = ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เมื่อเวลาเปลี่ยนไป (โมล/ลิตร)

จากสมการกล่าวได้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนโลหะ ขึ้นกับตัวแปรที่สำคัญ คือ

1. การถ่ายโอนมวลสารจากสารละลายสู่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ขึ้นกับสมบัติของอิเล็กโทรไลต์และขั้วไฟฟ้าการกวนจะช่วยเพิ่มการถ่ายโอนมวลสาร
2. พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า

2.3.3 แรงเคลื่อนไฟฟ้าในเซลล์

ในเซลล์ไฟฟ้ามีการไหลของกระแสไฟฟ้า เพราะมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำ เซลล์ไฟฟ้าหนึ่งต้องการพลังงาน 1 จูล ในการที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุ 1 คูลอมบ์ จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในเซลล์จะหมายความว่า จุดสองจุดนั้นมีความต่างศักย์เท่ากับ 1 โวลต์ ฉะนั้น 1 โวลต์ จึงมีค่าเท่ากับ 1 จูลต่อคูลอมบ์ และทางไฟฟ้าเคมีมักจะแทน โวลต์ด้วยเทอมแรงเคลื่อนไฟฟ้า (electromotive force, emf) จากความหมายของพลังงานไฟฟ้าดังกล่าวข้างต้น ทำให้เห็นได้ว่า

$$\text{งานทางไฟฟ้าสุทธิ (} W_{\text{elec.}} \text{)} = \text{คูลอมบ์} \times \text{โวลต์} \quad (2-11)$$

แต่งงานที่ได้จากเซลล์ไฟฟ้านั้นเพราะมีการถ่ายอิเล็กตรอน ดังนั้นจำนวนประจุในหน่วยคูลอมบ์ จึงขึ้นกับจำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยา ซึ่งทุก 1 โมลของอิเล็กตรอนจะมีปริมาณประจุเท่ากับ 96,487 คูลอมบ์ สมมติว่าในปฏิกิริยาของเซลล์ไฟฟ้ามีการถ่ายอิเล็กตรอน n โมล จะมีปริมาณประจุเท่ากับ $n \times 96,487$ หรือ nF คูลอมบ์ ในเมื่อ F คือ ค่าคงที่ฟาราเดย์ เท่ากับ 96,487 คูลอมบ์ต่อโมล เมื่อเป็นเช่นนี้สมการที่ (2-11) จะเปลี่ยนเป็น

$$W_{\text{elec.}} = (nF)(E) = nE \times 96,487 \quad (2-12)$$

แต่งงานนี้จะเกิดขึ้นได้ ต้องมีการลดพลังงานอิสระที่มีอยู่ในเซลล์ด้วย และในกรณีที่ปฏิกิริยาในเซลล์เกิดขึ้นอย่างผันกลับได้ (Reversible) การลดพลังงานอิสระ ($-\Delta G$) จะเท่ากับงานที่กระทำ ดังนั้น

$$\Delta G = -nFE \quad (2-13)$$

เครื่องหมายของ ΔG มีความหมายสำคัญมาก คือ ถ้าที่อุณหภูมิและความดันหนึ่งๆ ΔG มีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่าปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้เอง แต่ถ้าเครื่องหมายเป็นบวกแสดงว่าปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นไม่ได้เอง ถ้าปฏิกิริยาอยู่ในภาวะสมดุล ΔG จะเท่ากับศูนย์ แต่ ΔG และแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ (2-13) ดังนั้นเครื่องหมายของแรงเคลื่อนไฟฟ้าทำให้สามารถระบุได้ว่าปฏิกิริยาในเซลล์นั้นเป็นแบบเกิดได้เอง หรือเกิดไม่ได้เอง หรืออยู่ในภาวะสมดุล ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ความหมายของเครื่องหมาย ΔG และ ΔE (กัณณมาศ สุทธิเรืองวงศ์, 2539)

ประเภทของปฏิกิริยา	เครื่องหมายของ ΔG	เครื่องหมายของ ΔE
เกิดได้เอง	ลบ (-)	บวก (+)
เกิดเองไม่ได้	บวก (+)	ลบ (-)
ที่ภาวะสมดุล	ศูนย์ (0)	ศูนย์ (0)

2.3.4 ศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเดี่ยวและศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดมาตรฐาน

เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ คือ ผลรวมทางพีชคณิตของศักย์ไฟฟ้าของแต่ละขั้วอิเล็กโทรด ในทางปฏิบัติไม่มีวิธีวัดศักย์ไฟฟ้าเฉพาะแต่ละขั้วเดี่ยวได้โดยตรง แต่ต้องวัดเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ ดังนั้นจึงต้องกำหนดศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดมาตรฐานขึ้น คือ กำหนดให้อิเล็กโทรดไฮโดรเจนเมื่ออยู่ที่สภาวะมาตรฐาน เมื่อต้องการทราบศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดอื่น เช่น $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ เป็นต้น ต้องนำอิเล็กโทรดเหล่านั้นมาจับคู่กับอิเล็กโทรดไฮโดรเจนที่มีศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเท่ากับศูนย์ และวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้จะเป็นศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดที่ต้องการทราบ แต่ถ้าอิเล็กโทรดนั้นอยู่ในสภาวะมาตรฐานด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์จะเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้ามาตรฐาน (E°_{cell}) และเป็นค่าเดียวกับศักย์มาตรฐานของอิเล็กโทรดเดี่ยว (E°_{cell}) ที่มาจับคู่กับอิเล็กโทรดไฮโดรเจนมาตรฐาน โดยการทำเช่นนี้กับอิเล็กโทรดอื่นๆ ทำให้ได้ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดต่างๆ

ศักย์ไฟฟ้าแสดงให้เห็นแนวโน้มของขั้วอิเล็กโทรดที่จะรับอิเล็กตรอนว่า มีความสามารถมากน้อยเพียงใด หรือเรียกว่า เป็นการแสดงความสามารถในการเป็นตัวออกซิไดส์ (หรือตัวรีดิวซ์) เช่น MnO_4^- กับ Fe^{2+} ในสารละลายกรดพบว่า ค่า E° ของระบบ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+} = +0.77$ โวลต์ และค่า 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 จากสูตรการหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ที่สภาวะมาตรฐาน คือ

$$E^\circ_{\text{cell}} = E^\circ(\text{ขั้วบวก}) - E^\circ(\text{ขั้วลบ}) \quad (2-14)$$

ในการทำงานเดียวกัน ถ้าวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ที่สภาวะใดๆ จะได้ความสัมพันธ์คล้ายกับสมการที่ (2-15) คือ

$$E_{\text{cell}} = E(\text{ขั้วบวก}) - E(\text{ขั้วลบ}) \quad (2-15)$$

2.3.5 ค่าการนำไฟฟ้า

ค่าการนำไฟฟ้ามีผลโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย และมีผลต่อปริมาณประจุที่ปล่อยออกมาในปฏิกิริยา ตามกฎของฟาราเดย์ที่ว่า 1 ฟาราเดย์ ของประจุที่ผ่านเข้าวงจร จะชะลอูมิเนียมออกมาจากขั้วไฟฟ้า 9 กรัม ซึ่งถ้าจำนวนประจุมากขึ้นก็จะทำให้มีอูมิเนียมหรือเหล็กหลุดออกมาจากอิเล็กโทรดเพียงพอที่จะทำให้โลหะไฮดรอกไซด์ตกตะกอนได้มากขึ้น จากกฎของโอห์ม ซึ่งกล่าวว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลไปในวงจรได้ จะมีค่าเท่ากับ ผลคูณของกระแสไฟฟ้า และความต้านทานกระแสไฟฟ้า ดังสมการที่ (2-16)

$$V = I \times R \quad (2-16)$$

โดยที่

V	=	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)
I	=	ค่ากระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
R	=	ค่าความต้านทาน (โอห์ม)

และมีความสัมพันธ์กับงานทางไฟฟ้า ดังสมการที่ (2-17)

$$\text{งานไฟฟ้าสุทธิ (W}_{\text{elect}}) = \text{คูลอมบ์} \times \text{โวลต์} = nE \times 96,487 \quad (2-17)$$

ดังนั้นความต้านทานกระแสไฟฟ้าในกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี คือ ความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ นั่นเอง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าการนำไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ตามสมการที่ (2-18)

$$R = I / (C \times A) \quad (2-18)$$

เมื่อ

R	=	เป็นความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในหน่วยโอห์ม
I	=	เป็นระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ในหน่วยเซนติเมตร
C	=	เป็นค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในหน่วยโอห์มหรือซีเมน
A	=	เป็นพื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโทรดที่สัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในหน่วยตารางเซนติเมตร

2.3.6 การแลกเปลี่ยนประจุและการเคลื่อนที่ของประจุ

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่งของการทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ซึ่งวัดได้ในหน่วยแอมแปร์ (Amp) จำนวนกระแสที่ผ่านไปหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดจะวัดในรูป ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current intensity, I) การวัดของกระแสซึ่งผ่านเข้าไปในวัสดุ เรียกว่า การนำไฟฟ้าของวัสดุ (Conductivity) ในโลหะส่วนใหญ่จะอยู่ภายใต้กฎโอห์ม ซึ่งสามารถ เขียนเป็นรูปความเข้มของสนามไฟฟ้า (E_r) มีหน่วยเป็น โวลต์ต่อเซนติเมตรได้ คือ

$$I = \sigma \cdot E_r \quad (2-19)$$

$$E_r = I / \sigma = V/R\sigma \quad (2-20)$$

โดย

σ	=	เป็นค่าการนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โหมห์/เซนติเมตร
V	=	เป็นความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุด มีหน่วยเป็น โวลต์
R	=	เป็นความต้านทานระหว่างจุดสองจุด มีหน่วยเป็น โอห์ม
I	=	เป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน มีหน่วยเป็นแอมแปร์

2.3.7 กฎฟาราเดย์เกี่ยวกับไฟฟ้าเคมี

ปริมาณไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ หมายถึง ปริมาณไฟฟ้าที่ต้องผ่านเข้าไปในสารละลายใน เซลล์อิเล็กโทรไลติก เพื่อให้อิเล็กตรอนหนึ่งโมลทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดออกซิเดชันและรีดักชัน หรือคือ ผลคูณของประจุไฟฟ้ากับจำนวนอิเล็กตรอน 1 โมล

$$\begin{aligned} 1 \text{ ฟาราเดย์} &= eN = (1.602 \times 10^{-19} \text{ คูลอมบ์})(6.02 \times 10^{23} \text{ โมล}^{-1}) \\ &= 96,487 \text{ คูลอมบ์/โมล} \end{aligned}$$

$$\text{จะได้ } X \text{ คูลอมบ์} = I (\text{แอมแปร์}) \times t (\text{วินาที})$$

หรือ 1 ฟาราเดย์ คือ ไฟฟ้าฟาราเดย์ทำให้เกิดสารแต่ละชนิดที่ขั้วอิเล็กโทรดจำนวน 1 โมลเท่ากัน เช่น

$$\begin{aligned} \text{-ผ่านกระแสไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ลงใน } Al^{+3} \text{ จะได้ } Al_0 \text{ 1 โมล} &= \text{น.น.กรัมโมล/ประจุ} \\ &= 26.98/3 = 9 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{-ผ่านกระแสไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ลงใน } Fe^{+3} \text{ จะได้ } Fe_{(s)} \text{ 1 โมล} &= \text{น.น.กรัม โมล/ประจุ} \\ &= 55.85/2 = 27.9 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและปริมาณของขั้วโลหะที่ละลายลงสู่สารละลายนำไฟฟ้าจะสามารถอธิบายด้วยกฎฟาราเดย์ ดังต่อไปนี้

$$W = I \cdot t \cdot M / Z \cdot F \quad (2-21)$$

โดยที่

W	=	เป็นปริมาณ โลหะที่ละลายน้ำ (กรัม)
I	=	เป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง
M	=	เป็นน้ำหนักโมเลกุลที่ขั้วแอโนด
t	=	เป็นเวลาที่ใช้ (นาท)
Z	=	เป็นจำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์
F	=	เป็นค่าคงที่ของฟาราเดย์เท่ากับ 96,487

มวลของสารที่คำนวณได้จากกฎฟาราเดย์ คือ มวลของสารที่ควรเกิดปฏิกิริยาตามทฤษฎีหมายความว่า กระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่ให้แก่ระบบถูกนำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของไอออนโลหะทั้งหมด ซึ่งในทางปฏิบัติปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ให้กับระบบ ไม่ได้ถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด เนื่องจากการสูญเสียไปในการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง เช่น การเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำเป็นแก๊สไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทด การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำเป็นแก๊สออกซิเจนที่ขั้วแอโนด หรืออาจเกิดจากความต้านทานต่างๆเนื่องจากมีตัวออกซิไดซ์หลายชนิดละลายอยู่รวมกันในสารละลาย ดังนั้นจึงต้องมีการวัดประสิทธิภาพเชิงกระแส

$$\text{ประสิทธิภาพเชิงกระแส} = \frac{\text{มวลที่ได้จริงจากกระบวนการ}}{\text{มวลที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี}} \quad (2-22)$$

2.3.8 ขั้วไฟฟ้า

ขั้วไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบของแต่ละครึ่งเซลล์ไฟฟ้า ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าต่อเชื่อมระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์และอุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้า โดยวัสดุที่ใช้ในการทำขั้วไฟฟ้ามีหลายชนิด เช่น

1.อลูมิเนียม (Aluminum) มีลักษณะสีขาวเหมือนเงิน น้ำหนักเบา นำความร้อนได้ดี ไม่สึกกร่อนง่าย ทำปฏิกิริยากับกรดและด่างบางชนิดเท่านั้น และแข็งมากไม่ค่อยมีรอยแตกร้าว โดยอลูมิเนียมจัดว่าว่องไวสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะอื่นๆ ได้ มีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +3 มักจะเป็นสารประกอบโควาเลนต์ การใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลต์เซลล์ เมื่อเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิสขึ้นทำให้อลูมิเนียมเกิดการกัดกร่อนและจะละลายในสารละลาย ซึ่งไฮดรอกไซด์ของอลูมิเนียมจะไม่ละลายน้ำ ดังนั้นในสารละลายอาจจะมีคอลลอยด์อยู่มาก

2.เหล็กกล้า (Steels) เป็นโลหะหนัก มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาปานกลาง สารประกอบของเหล็กมีเลขออกซิเดชัน +2 และ +3 เลขออกซิเดชันสูงๆ มีบ้าง แต่ไม่เสถียรและเป็นตัวออกซิไดส์อย่างแรง ถ้าทิ้งไว้ในอากาศที่มีความชื้นมักจะกลายเป็นสนิมที่เรียกว่าสนิมเหล็ก เหล็กทำปฏิกิริยารวมกับโลหะทั้งหลายได้เกือบทั้งหมด เมื่อทำให้ร้อนเล็กน้อยแต่ไม่ทำปฏิกิริยากับไนโตรเจน เมื่ออยู่ในสารละลาย เหล็กมักอยู่ในรูปของเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ปนกัน เหล็กที่มีเลขออกซิเดชัน +2 นั้นเสถียรมากและสามารถเกิดเกลือต่างๆ กับแอนไอออนที่เสถียรได้ สารประกอบที่ปราศจากน้ำของเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ไม่มีสี แต่ถ้ามีน้ำหรืออยู่ในสารละลายจะมีสีเขียวอ่อนของไฮดรอกไซด์ ($Fe(H_2O)_6^{2+}$) สารละลายเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) นี้ถูกออกซิไดส์ด้วยอากาศกลายเป็นเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ได้ เฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) อยู่ในสารละลายของน้ำเป็นไฮเดรชัน (hydrated ion) เนื่องจากเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) มีขนาดไอออนเล็กและมีประจุมากจึงแสดงสมบัติเป็นกรด ทั้งเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ทำปฏิกิริยากับสารที่ให้อิเล็กตรอนและเกิดสารเชิงซ้อนได้

การใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลต์เซลล์ เมื่อเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิสขึ้นที่ผิวของแผ่นขั้วไฟฟ้าแอโนด จะเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาพร้อมเหล็กในรูปเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ที่ขั้วแคโทดจะมีการให้ไฮดรอกไซด์ไอออนที่ทำให้ค่าพีเอชของน้ำสูงขึ้นได้ ทำให้เหล็กที่มาจากแผ่นขั้วไฟฟ้าแอโนดสามารถตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ เช่น เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_2$) ได้ ปริมาณการตกตะกอนของเหล็กจึงขึ้นกับปริมาณไฮดรอกไซด์ที่ได้จากขั้วแคโทดและค่าพีเอชของน้ำเสีย ดังนั้นต้องมีการเปลี่ยนแผ่นเหล็กในอิเล็กโทรไลต์เซลล์เมื่อใช้ไประยะหนึ่ง โดยมากแผ่นเหล็กจะหาซื้อง่ายและราคาถูกยิ่งไปกว่านั้นมันมีประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายไอออนโลหะหนักได้ดี จึงเป็นที่นิยม

3.เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) เป็นเหล็กกล้าที่นำมาผสมกับธาตุ โดยธาตุผสมที่สำคัญ คือ โครเมียมซึ่งจะมีตั้งแต่ร้อยละ 11 ขึ้นไป โครเมียมที่อยู่ในเนื้อเหล็กกล้าจะก่อให้เกิดฟิล์มโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ซึ่งมีเสถียรภาพสูงอยู่ที่ผิวของเหล็กกล้า ฟิล์มอันนี้มีความเงางามและป้องกันไม่ให้เกิดออกซิเดชันกับเหล็กซึ่งอยู่ภายในเหล็กกล้าไร้สนิม ให้คุณสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อนและผิวมีความเงาแวววาว

4. ไทเทเนียม (Titanium) มีลักษณะขาวเทาคล้ายเงิน จุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูง แข็ง และเหนียว สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้ไฮดรอกไซด์และไฮโดรเจน ไทเทเนียมมีเลขออกซิเดชัน 2+, +3 และจะเสถียรที่ +4 ไทเทเนียมขาวถูกนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลติกเซลล์และไม่ทำให้โลหะตัวอื่นกัดกร่อนในระหว่างเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรลิซิส ยิ่งไปกว่านั้นที่ขั้วลบพบว่าจะมีโลหะหนักเกิดขึ้นมาก สารละลายใสไม่มีตะกอน อีกทั้งยังเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีเพราะจุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูงในสภาวะปกติ ดังนั้นจึงเป็นที่ยอมรับ แต่ข้อเสีย คือ ไทเทเนียมมีราคาสูงและหาซื้อได้ยาก

5. แพลตินัม (Platinum) เป็นธาตุที่มีสีขาวและอ่อน มีเลขออกซิเดชันได้หลายค่า ตั้งแต่ +2 ถึง +8 แต่ที่สำคัญคือ +2 ถึง +4 มีความแข็งแรงของพันธะโลหะและไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยานอกจากนี้สารประกอบของแพลตินัมมักไม่ค่อยเสถียร โดยเมื่อให้ความร้อนสูงขึ้นจะสลายตัวเป็นโลหะ แพลตินัมหายากและมีราคาแพง สามารถนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดีมาก มีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาจึงมีประโยชน์ในการทำอิเล็กโทรด เบ้าทนไฟ และภาชนะสำหรับงานที่อุณหภูมิสูงและต้องการความต้านทานการกัดกร่อนสูง

6. แกรไฟต์ (Graphite) เป็นอีกรูปหนึ่งของธาตุคาร์บอนซึ่งเกิดตามธรรมชาติ มีชื่อสามัญเรียกว่า พลัมเบโก (Plumbago) หรือแร่ดินสอดำ มีลักษณะเป็นของแข็ง มีรูปผลึกเป็นแผ่นบางๆ ทึบแสงและเป็นเงามันเหมือนโลหะเล็กน้อย สีเทาเข้มถึงดำ เนื้ออ่อน เป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าได้มากในทิศทางที่ขนานกับระนาบของอะตอม แต่ในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบของอะตอมจะนำไฟฟ้าได้น้อย อะตอมของแกรไฟต์ยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ มีระยะห่างระหว่างอะตอมคาร์บอนในระนาบเดียวกันเท่ากับ 1.415 อังสตรอม ซึ่งสั้นพอที่จะทำให้เชื่อว่าอะตอมคาร์บอน น่าจะยึดกับอะตอมข้างเคียงด้วยพันธะโควาเลนต์ แกรไฟต์มักใช้ทำไส้ดินสอดำ เบ้าหลอมโลหะ น้ำมันหล่อลื่นบางชนิด ไส้ถ่านไฟฉาย ไส้ไฟอาร์ค ใช้เป็นตัวลดความเร็ว ช่วยควบคุมจำนวนอนุภาคนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

2.3.9 ปัจจัยที่ต้องควบคุมในเซลล์ไฟฟ้าเคมี (ปริเมษ เจริญพคุณ, 2545)

ทิศทางของอิออนและกระแสไฟฟ้าที่ไหลสู่ระบบนั้นจะขึ้นอยู่กับ การควบคุม ดังนี้

1. ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าโดยกระแสไฟฟ้าจะมีสัดส่วน โดยตรงกับกระแสภายนอกที่ให้แก่ระบบ

2. การเคลื่อนที่ของประจุอิออน ความสามารถของอิออนที่จะนำกระแสไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับประจุบนอิออนและขนาดอิออน

3. อุณหภูมิในการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิของสารละลาย โดยที่ความสามารถในการเคลื่อนที่ที่จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 2 ต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส

4. พื้นที่สัมผัสของขั้วกระแสไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดของผิวสัมผัสใหญ่จะดีสำหรับการถ่ายเท และรับอิเล็กตรอน โดยที่กระแสไฟฟ้าจะมีสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วอิเล็กโทรด

5. ระยะห่างของขั้วไฟฟ้าจำนวนกระแสไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับระยะทางที่ไอออนเคลื่อนที่จากขั้วอิเล็กโทรด ระยะห่างน้อยกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มมากขึ้น

6. จำนวนประจุของไอออนจะมีมากขึ้น เมื่อมีการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้ามากขึ้น

7. ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้าได้ ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายจะมีสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารนั้น

2.3.10 หลักการในการออกแบบเครื่องตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี (วรรณวรรณ เทียงวรรณกานต์, 2546)

เครื่องตกตะกอนด้วยไฟฟ้า มีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับลักษณะที่จะประยุกต์ใช้งาน โดยมีหลักการที่สำคัญในการออกแบบ คือ

1. ควรออกแบบให้ง่ายที่สุด ค่าใช้จ่ายต่ำสุด ถ้าเป็นไปได้ควรมีการหลีกเลี่ยงการออกแบบของงานที่มีการกววน หรือการไหลของสารละลาย

2. ต้องสามารถเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่สมบูรณ์ ก่อนที่จะผ่านเข้าสู่ขั้นตอนอื่นในกรณีที่มีกระบวนการอื่น นอกจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีเข้ามาเกี่ยวข้อง ควรทำการแยกจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี

3. เมื่อจำเป็นต้องมีการกววนผสมหรือการไหลของสารละลาย ต้องพิจารณาการถ่ายเทมวลสารเป็นอันดับแรก เช่น การกววนผสมอาจต้องใช้แผ่นกั้นหรือใบพัดที่ไม่นำไฟฟ้า

4. ออกแบบให้มีการกระจายความต่างศักย์ให้สม่ำเสมอทั่วพื้นที่ผิวของอิเล็กโทรด

5. ควรออกแบบให้มีระยะระหว่างอิเล็กโทรดน้อย เพราะระยะห่างยิ่งมากจะทำให้ต้องใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น

6. การเลือกวัสดุที่ใช้ทำถังปฏิกริยานั้น ต้องคำนึงถึงสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่จะผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยสามารถคงทนไม่สึกกร่อนภายใต้สภาพการใช้งาน

7. การเลือกวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรดนั้น ต้องคำนึงถึงปฏิกิริยาเคมีที่จะเกิดขึ้นให้สอดคล้องกับความต้องการของระบบบำบัดและปฏิกิริยาข้างเคียงที่อาจเกิดขึ้นได้

2.3.11 ข้อดีและข้อเสียของการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี (Yousef และ Robert, 2000)

ข้อดีของการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี

1. การตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีเป็นระบบที่ใช้งานง่าย
2. สามารถบำบัด สี กลิ่น รส สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ได้
3. ตะกอนที่ได้ มีลักษณะคล้ายตะกอนจากระบบเคมีแต่มีขนาดใหญ่กว่า และกรองง่ายกว่าตะกอนจากระบบเคมี ตกตะกอนและรีดน้ำออกง่ายเพราะส่วนใหญ่เป็นออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ของโลหะและอัตราการเกิดตะกอนต่ำ
4. น้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีจะให้ค่าของแข็งละลายน้ำ (TDS) น้อยกว่าจากระบบเคมี
5. สามารถกำจัดอนุภาค (คอลลอยด์) ขนาดเล็กได้เพราะการใส่กระแสไฟฟ้าเข้าไปทำให้อนุภาคเกิดการเคลื่อนที่เร็วขึ้น จึงง่ายต่อการตกตะกอน
6. ไม่มีการเติมสารเคมีใดๆ ลงไป จึงไม่มีปัญหามลพิษที่ตามมาจากการใส่สารเคมี
7. ก๊าซที่เกิดขึ้นจากการทำงานของระบบสามารถค้นตัวและขมกลสารให้ลอยขึ้นเหนือน้ำทำให้ง่ายต่อการกำจัดออก
8. เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ต้องการการบำรุงรักษาน้อย

ข้อเสียของการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี

1. ขั้วอิเล็กโทรดสามารถสึกกร่อนได้ อันเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและละลายลงไปในน้ำได้ทำให้ต้องมีการเปลี่ยนขั้วอิเล็กโทรดมาทดแทน
2. ไม่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ที่มีค่าไฟฟ้าราคาสูง
3. สารบางชนิดอาจมาเกาะที่อิเล็กโทรดได้ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลง
4. ต้องการค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสีย ระบบจึงสามารถทำงานได้ดี

2.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

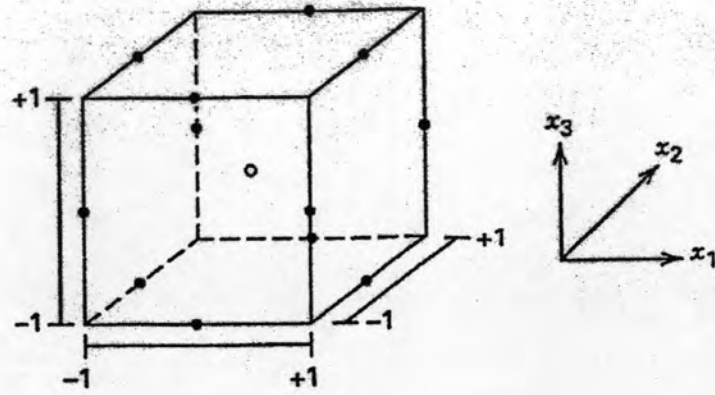
2.4.1 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design)

เป็นการออกแบบสามระดับสำหรับพิดพื้นที่การตอบสนอง การออกแบบแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบแฟกทอเรียล 2^k กับการออกแบบบล็อกไม่บริบูรณ์ ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพมากในด้านจำนวนของการทดลองที่ต้องการมีจำนวนน้อย

ตารางที่ 2.4 แสดงการออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนที่มีตัวแปร 3 ตัว โดยรูปทรงเรขาคณิตของการออกแบบแสดงดังภาพที่ 2.8 ซึ่งพบว่า การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนเป็นการออกแบบรูปทรงกลม ที่จุดวางอยู่บนวงกลมรัศมี $\sqrt{2}$ นอกจากนี้ การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนไม่ได้รวมเอาจุดใดๆ ที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากขีดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัวแปรเอาไว้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อจุดที่อยู่บนมุมของลูกบาศก์ เป็นการรวมของปัจจัยระดับ (Factor-Level Combination) ที่เป็นไปไม่ได้ที่จะทำการทดลองเนื่องจากข้อจำกัดในด้านสภาพของกระบวนการ

ตารางที่ 2.4 การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนแบบ 3 ตัวแปร

การทดลองที่	ตัวแปรที่ 1 (X_1)	ตัวแปรที่ 2 (X_2)	ตัวแปรที่ 3 (X_3)
1	-1	-1	0
2	-1	1	0
3	1	-1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	1
7	1	0	-1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	-1	1
11	0	1	-1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0



รูปที่ 2.8 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนสำหรับ 3 ตัวแปร
ที่มา: Myers และ Montgomery, 2002

2.4.1.1 พื้นที่การตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM)

เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหาโดยให้ผลที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบนี้ ยกตัวอย่างเช่น สมมติต้องการหาระดับของอุณหภูมิ (x_1) และความดัน (x_2) ที่จะทำให้ผลผลิตจากกระบวนการมีค่ามากที่สุด ผลของกระบวนการนี้เป็นฟังก์ชันของระดับของอุณหภูมิกับความดัน คือ

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (2-23)$$

โดยที่

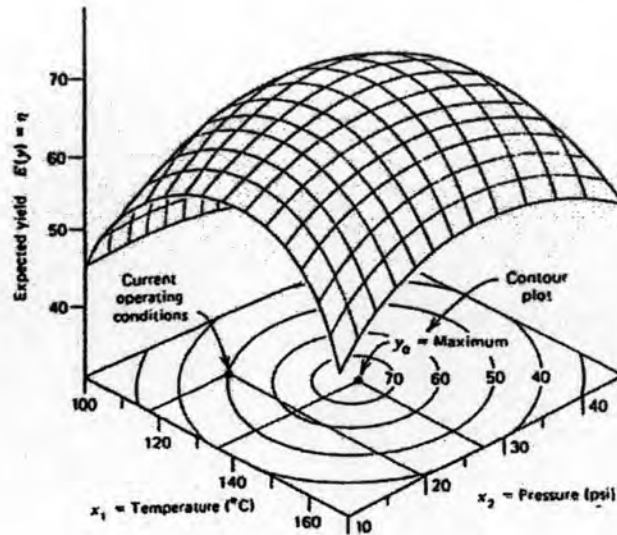
ε คือ ค่าความผิดพลาดของผลตอบ y ที่เป็นผลมาจากการทดลอง ถ้ากำหนดว่า

$$E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$$

$$\eta = f(x_1, x_2) \quad (2-24)$$

ซึ่งเรียกว่า “พื้นที่การตอบสนอง (Response Surface)”

การแสดงผลพื้นที่การตอบสนองในรูปแบบของกราฟจะแสดงตัวอย่างในภาพที่ 2.9 โดย η จะพล็อตกับระดับของ x_1 และ x_2 ซึ่งจะพล็อตในรูปแบบแผนภาพคอนทัวร์ (Contour Plot)



รูปที่ 2.9 พื้นที่การตอบสนองแบบ 3 มิติและกราฟเส้นโครงร่าง
ที่มา: Myers และ Montgomery, 2002

2.4.1.2 การวิเคราะห์การถดถอยแบบพื้นที่การตอบสนอง (Response Surface Regression Analysis)

การวิเคราะห์แบบถดถอยเป็นวิธีการหนึ่งที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ประเภทคือ ตัวแปรตาม (Dependent Variable: นิยมใช้สัญลักษณ์ Y) และตัวแปรอิสระ (Independent Variable: นิยมใช้สัญลักษณ์ X) โดยมุ่งเน้นที่จะพยากรณ์ตัวแปรตามด้วยค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระ ซึ่งเรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) การหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยจะทำได้หลังจากที่ได้สร้างหรือกำหนดรูปแบบของความสัมพันธ์ (Model) (ศิริชัย พงษ์วิชัย, 2548) ซึ่งในการออกแบบแบบพื้นที่การตอบสนองนั้นมีรูปแบบของแบบจำลองอยู่ 4 แบบจำลองคือ Linear model, Linear + Interaction model, Linear + Square model และ Full Quadratic model ดังสมการ

Linear model

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i x_i \quad (2-25)$$

Linear + Interaction model

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i+1}^4 \beta_{ij} x_{ij} \quad (2-26)$$

Linear + Square model

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^4 \beta_{ii} x_i^2 \quad (2-27)$$

Full Quadratic model

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^4 \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i+1}^4 \beta_{ij} x_{ij} \quad (2-28)$$

2.4.1.3 วิธีการพิจารณาความเหมาะสมของแบบจำลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้การออกแบบแบบพื้นที่การตอบสนอง ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระมีอยู่ 4 รูปแบบ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นการนำรูปแบบใดมาใช้อธิบายความสัมพันธ์ ควรจะต้องมีหลักการในการเลือกตัวแบบจำลองที่มีความเหมาะสม โดยพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error: SE) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination: R^2) ซึ่งมีหลักการดังนี้

1. พิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error: SE) ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานมีค่าน้อย แสดงว่าตัวแบบจำลองที่นำมาใช้มีความเหมาะสมค่อนข้างมาก แต่ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานมีค่ามาก แสดงว่าตัวแบบจำลองที่นำมาใช้มีความเหมาะสมน้อยมาก และถ้าในกรณีที่ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานมีค่าเท่าศูนย์ แสดงว่าตัวแบบจำลองมีความเหมาะสมดีมาก

2. พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination: R^2) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 แบบจำลองที่ดีควรจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเข้าใกล้ 1 หรือเท่ากับ 1 ซึ่งแสดงว่าตัวแปรอิสระที่อยู่ในแบบจำลองสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามได้ดี โดยค่า R^2 (adj) เป็นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว ใช้ประกอบการพิจารณาเมื่อข้อมูลมีจำนวนน้อยกว่า 30 ตัวอย่าง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-29

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{n-1}{n-k-1} \times (1 - R^2) \quad (2-29)$$

โดยที่

- n = จำนวนการทดลอง
 k = จำนวนสัมประสิทธิ์ในแบบจำลอง

2.4.1.4 วิธีการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i)

เป็นการตรวจสอบว่าตัวแปรอิสระแต่ละตัว ที่นำมาใช้ในตัวแบบจำลอง สามารถนำมาใช้พยากรณ์ตัวแปรตามได้หรือไม่ โดยการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i) มีการทดสอบ 2 ลักษณะดังนี้

1. การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i) ของตัวแปรอิสระทุกตัวพร้อมๆ กัน โดยกำหนดสมมติฐานทางสถิติ ดังนี้

$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \dots = \beta_k = 0$ หรือตัวแปรอิสระทุกตัวไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

$H_1 : \beta_i \neq 0$ อย่างน้อย 1 ตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

ค่าสถิติที่ใช้ทดสอบคือ F-test หรือ สามารถดูจากค่า p -value ได้ โดยผู้ทดสอบจะต้องกำหนดระดับนัยสำคัญ (α) มาก่อน ถ้า p -value มีค่าสูงกว่าระดับนัยสำคัญ (α) จะตัดสินใจยอมรับสมมติฐาน H_0 นั่นคือตัวแปรอิสระทุกตัวในแบบจำลองไม่สามารถใช้พยากรณ์ตัวแปรตามได้ แต่ถ้า p -value มีค่าต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ (α) จะตัดสินใจปฏิเสธสมมติฐาน H_0 (หรือยอมรับสมมติฐาน H_1) นั่นคือตัวแปรอิสระในแบบจำลองอย่างน้อย 1 ตัว สามารถใช้พยากรณ์ตัวแปรตามได้

2. การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i) ของตัวแปรอิสระแต่ละตัว โดยกำหนดสมมติฐานดังนี้

$H_0 : \beta_i = 0$ หรือตัวแปรอิสระที่ i ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

$H_1 : \beta_i \neq 0$ หรือตัวแปรอิสระที่ i มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

ค่าสถิติที่ใช้ทดสอบคือ F-test หรือสามารถพิจารณาค่า p -value ก็ได้ โดยผู้ทดสอบกำหนดระดับนัยสำคัญ (α) ถ้า p -value ของตัวแปรที่ i มีค่าสูงกว่าระดับนัยสำคัญ ดังนั้นตัดสินใจยอมรับสมมติฐาน H_0 แสดงว่าตัวแปรอิสระที่ i ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม แต่ถ้า p -value ของตัวแปรที่ i มีค่าต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ ดังนั้นตัดสินใจปฏิเสธสมมติฐาน H_0 นั่นแสดงว่าตัวแปรอิสระที่ i มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

2.4.1.5 การวิเคราะห์ความไม่สมรูปของแบบจำลอง (Test for Lack of Fit)

การวิเคราะห์ผลจากการออกแบบแบบพหุคูณที่การตอบสนองเป็นการวิเคราะห์ความไม่สมรูปของแบบจำลอง ซึ่งถือเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้สำหรับทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เนื่องจากมีการทดลองซ้ำที่จุดกึ่งกลาง ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาได้จากผลรวมกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนจากส่วนตกค้าง (Sum of Square of the Residual Error: SS_E) โดยค่าความคลาดเคลื่อนจากส่วนตกค้างสามารถแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ SS_{PE} และ SS_{LOF} ดังสมการที่ 2-30

$$SS_E = SS_{PE} + SS_{LOF} \quad (2-30)$$

โดยที่

SS_{PE} คือ ผลรวมของกำลังสองที่เกิดขึ้นเนื่องจากความผิดพลาดโดยตรง
 SS_{LOF} คือ ผลรวมของกำลังสองที่เกิดขึ้นเนื่องจากความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเนื่องจากความไม่สมรูปของแบบจำลอง

2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 การบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลและน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมัน

Saatci และคณะ (2001) ศึกษาความสามารถในการบำบัดน้ำมันของโรงงานน้ำมันพืชโดยใช้กระบวนการทางฟิสิกส์และเคมี โดยใช้ปูนขาว สารส้ม และเฟอร์ริกคลอไรด์ ในการตกตะกอนรวมทั้งการใช้กระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลาย ผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้ปูนขาวทำการตกตะกอนน้ำเสียจากโรงงานน้ำมันพืชจะสามารถลดซีโอดี น้ำมันและไขมันได้ร้อยละ 63.19-80.66 และ 76.95-83.38 ตามลำดับ สารส้มสามารถลดซีโอดี น้ำมันและไขมันได้ร้อยละ 88.14-92.99 และ 69.89-92.11 ตามลำดับ เฟอร์ริกคลอไรด์สามารถลดซีโอดี น้ำมันและไขมันได้ร้อยละ 94.66-96.25 และ 93.81-86.16 ตามลำดับ และการใช้กระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลายสามารถลดซีโอดี และน้ำมันและไขมันได้ร้อยละ 17.65-69.12 และ 93.8-86.16 ตามลำดับ

Al-Shamrania และคณะ (2002) ศึกษาการกำจัดน้ำมันในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สารออลูมิเนียมซัลเฟตและเฟอร์ริกซัลเฟตเป็นตัวทำลายเสถียรภาพอิมัลชันของน้ำมันในน้ำ โดยศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน พีเอช ระยะเวลาและความเร็วของการกวนเร็วและกวนช้าจากการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่าหยคน้ำมันมีค่าซีตาโพเทนเชียลเป็นลบและไม่ขึ้นกับค่าพีเอชของน้ำ และสารสร้างตะกอนทั้ง 2 ชนิดมีประสิทธิภาพในการลดลงของค่า

ซีตาโพเทนเชียลของหยดน้ำมัน โดยอลูมิเนียมซัลเฟตและเฟอริกซัลเฟตมีประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันสูงถึงร้อยละ 99.3 ที่พีเอช 8 และร้อยละ 99.94 ที่พีเอช 7 ตามลำดับ ซึ่งระยะเวลาที่ใช้ในการกวาดเร็วที่เหมาะสมสำหรับการแยกน้ำมันด้วยระบบลอยตัวด้วยอากาศละลาย คือ 120 วินาที และเวลาในการรวมตะกอนอยู่ระหว่าง 15 ถึง 20 นาที

Suehara และคณะ (2005) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพจากโรงงานผลิตไบโอดีเซลโดยใช้สารต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยน้ำเสียดิบมีค่าพีเอชและมีปริมาณน้ำมันสูง แต่มีปริมาณไนโตรเจนต่ำ ซึ่งการบำบัดทางชีวภาพของน้ำเสียไบโอดีเซลสามารถทำได้ยากเพราะน้ำเสียอยู่ในสถานะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ดังนั้นจึงมีการประยุกต์ใช้ยีสต์ *Rhodotorula mucilaginosa* เพื่อมาทำการย่อยสลายน้ำมัน โดยควบคุมพีเอชเริ่มต้นที่ 6.8 และเติมสารอาหาร ได้แก่ ไนโตรเจน ยีสต์สกัด (yeast extract) โพแทสเซียมฟอสเฟต (KH_2PO_4) และ แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) โดยความเข้มข้นของยีสต์สกัดที่เหมาะสมคือ 1 กรัมต่อลิตร และมีค่า C/N ratio ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 17-68 เมื่อใช้ยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจนสำหรับการเจริญของจุลินทรีย์ นอกจากนี้ยังพบว่าหากมีปริมาณของแข็งในชั้นน้ำที่ได้จากการสกัดแยกน้ำมันออกด้วยเฮกเซนเกิน 2.14 กรัมต่อลิตร จะทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญได้ ซึ่งเมื่อนำน้ำเสียดิบมาทำการเจือจางด้วยน้ำในปริมาณเท่ากันก่อนการทดลองภายใต้สภาวะที่เหมาะสมข้างต้นพบว่าจะทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายน้ำมันสูงขึ้น

ปัทมภัทร เจริญสาคร (2549) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยวิธีทางเคมีและทางชีวภาพ การบำบัดทางเคมีโดยปรับเปลี่ยนค่าพีเอชของน้ำเสีย ชนิดและปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ และสารโคแอกกูแลนต์เอ็ด จากผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมคือ การปรับ พีเอชของน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 4 ร่วมกับการใช้โพลีเมอร์ประจุบวก 20 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือร่วมกับการใช้โพลีลูมิเนียมคลอไรด์ 62.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และโพลีเมอร์ประจุบวก 1.25 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดน้ำมันและไขมัน กำจัดซีโอดี บีโอดี กลีเซอรอล และเมทานอลเท่ากับร้อยละ 98 38-41, 29-41, 16-23 และ 25-33 ตามลำดับ

การบำบัดทางชีวภาพของน้ำเสียจากระบบทางเคมี โดยแบ่งการทดลองออกเป็นแบบใช้ออกซิเจน และแบบไร้ออกซิเจน พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน คือ ที่ซีโอดีเริ่มต้น 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลาในการบำบัดซีโอดีได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้ง 4 วัน โดยประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ซีโอดีกรอง และเมทานอลร้อยละ 93, 96 และ 99 ตามลำดับ สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดทางชีวภาพแบบไร้ออกซิเจนมีค่าซีโอดีเริ่มต้นน้อยกว่า 5,200 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลาในการบำบัดซีโอดีได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งเท่ากับ 13 วัน โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ซีโอดีกรอง และเมทานอลสูงถึงร้อยละ 98, 99 และ 98 ตามลำดับ

2.5.2 การบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนน้ำมันและไขมันโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

Chen และคณะ (1999) วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้เพื่อหาระบบที่เหมาะสมกับการบำบัดน้ำเสียจากร้านอาหาร ใช้ขั้วไฟฟ้าจำนวน 5 ขั้ว วางห่างกัน 6 มิลลิเมตร โดยมีพื้นที่ทำปฏิกิริยา 56 ตารางเซนติเมตรต่อขั้ว จากการทดลองพบว่า พีเอชเริ่มต้นของน้ำที่เข้าระบบ และค่าการนำไฟฟ้ามีผลกับประสิทธิภาพในการบำบัด เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม คือ 15 นาที และใช้เวลาในการตกตะกอน 1.5 ชั่วโมง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 30-80 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ขั้วอลูมิเนียมที่ถูกใช้ 17.7-106.4 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งจะขึ้นกับลักษณะของน้ำเสียที่ทดลอง พลังงานที่ต้องการน้อยกว่า 1.5 กิโลวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร ประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันและไขมันมากกว่าร้อยละ 94 และสามารถปรับสภาพน้ำเสียให้เป็นกลางได้

Muruganathan และคณะ (2004) ศึกษาการลดสารมลพิษในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกหนังโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี โดยใช้ขั้วแอโนด คือ เหล็กและอลูมิเนียม พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการลดสารแขวนลอยและน้ำมันได้มากกว่าร้อยละ 95

Xinhua และ Xiangfeng (2004) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงอาหารซึ่งมีน้ำมันและไขมันในปริมาณสูงโดยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี จากการทดลองพบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วง 10-14 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ความเป็นกรด-เบส 3-10 และระยะห่างระหว่างขั้ว 10 มิลลิเมตร เวลาที่ใช้บำบัด 30 นาที สามารถลดน้ำมันได้ร้อยละ 95 ลดค่าซีโอดีได้ร้อยละ 75 และพบว่าค่าการนำไฟฟ้ามีผลต่อการลดลงของมลพิษในน้ำน้อยมากแต่มีผลต่อพลังงานที่ใช้

Ayhan และ Mahmut (2006) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตนมที่มีค่าซีโอดี น้ำมันและไขมันในปริมาณสูงโดยใช้วิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี พบว่าซีโอดีและน้ำมันในน้ำเสียจะถูกกำจัดได้ดีเมื่อใช้ขั้วเหล็ก โดยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับน้ำเสียที่มีค่าซีโอดีเท่ากับ 18,300 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณน้ำมันและไขมันเท่ากับ 4,570 มิลลิกรัมต่อลิตร คือ ที่สภาวะความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.6 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร พีเอชเท่ากับ 7 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมเท่ากับ 1 นาที โดยสามารถกำจัดซีโอดีได้ร้อยละ 98 และกำจัดน้ำมันและไขมันได้ร้อยละ 99 ซึ่งมีค่าการใช้พลังงานเท่ากับ 0.003 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมงต่อกิโลกรัมซีโอดี

2.5.3 การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอื่นๆ โดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

กัมพมาศ สุทธิเรืองวงศ์ (2539) ศึกษาการกำจัดสีและสารอินทรีย์ของน้ำกากส่าด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี ใช้อิเล็กโทรด 3 ชนิด คือ โทเทเนียมเคลือบแพลทินัมสีดำ เหล็ก และอลูมิเนียม โดยทำการทดลองที่อัตราน้ำกากส่า 5, 10 และ 20 เท่า จากผลการทดลองพบว่า ระบบที่ใช้โทเทเนียมเคลือบแพลทินัมสีดำเป็นแคโทดและเหล็กเป็นแอโนดมีความเหมาะสมที่สุด สภาพที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำกากส่าเจือจาง 5 เท่า เพื่อกำจัดสีให้เหลือสีที่ร้อยละ 60 ส่องผ่าน คือ ใช้โทเทเนียมเคลือบแพลทินัมสีดำ 2 แผ่นเป็นแคโทด เหล็ก 2 แผ่นเป็นแอโนด ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 0.8 เซนติเมตร ความต่างศักย์ไฟฟ้า 4 โวลต์ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ 110 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร และระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัด 5.21 ชั่วโมง ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีโอดีร้อยละ 50.4 พีเอชเท่ากับ 7.0 นอกจากนี้ระบบไฟฟ้าเคมียังสามารถลดปริมาณสารแคลเซียมและซัลเฟต แต่ไม่สามารถลดปริมาณสารโพแทสเซียมได้

วรรณวรรณ เทียงวรรณกานต์ (2546) การศึกษาสภาพที่เหมาะสมของการบำบัดสีในน้ำเสียที่มีสีซีย้อมรีแอคทีฟ โดยการใส่กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า การทดลองจะแบ่งน้ำเสียเป็น 2 ชนิด คือ การทดลองกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์สีแดง (CI Reactive Red 180) ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตรและนำผลที่ได้มาประยุกต์ใช้ทดลองบำบัดน้ำเสียจริงจากโรงงานฟอกย้อม โดยการปรับเปลี่ยนชนิดของขั้วไฟฟ้าเป็นเหล็ก อลูมิเนียม และเหล็กกล้า แล้วปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า พื้นที่หน้าตัดขั้วไฟฟ้า เวลาการเกิดปฏิกิริยา พีเอชน้ำเสียเริ่มต้น และค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเสีย จากการทดลองพบว่าสภาพที่เหมาะสมในการกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์คือ ใช้ขั้วเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าปรับค่าความต่างศักย์ที่ 6.4 โวลต์ ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 6 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเสียเท่ากับ 7.2 มิลลิซิเมนต่อเซนติเมตร เวลาเกิดปฏิกิริยา 30 นาที สามารถกำจัดสีได้สูงมากถึงร้อยละ 96 ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดสีโอดีเท่ากับร้อยละ 55 การกำจัดสีโดยการใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเกิดจากการเปลี่ยน โครงสร้างของสีซีย้อมซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน รีดักชันร่วมกับการตกตะกอนของสีซีย้อม และพีเอชของน้ำเสียหลังการทดลองมีค่าสูงขึ้นเท่ากับ 9 เมื่อนำสภาพที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อใช้ทดลองกำจัดสีในน้ำเสียจริงจากโรงงานฟอกย้อมพบว่า กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าสามารถบำบัดน้ำเสียรวมจากกระบวนการผลิตโรงงานฟอกย้อมดีกว่าการนำไปใช้บำบัดน้ำเสียจากหม้อต้มโดยตรง โดยพบว่าการใช้ขั้วเหล็กที่ความต่างศักย์ 6.7 โวลต์ เวลาการเกิดปฏิกิริยาเพียง 5 นาที สามารถบำบัดสีได้สูงถึงร้อยละ 97 (หน่วย ADMI) และเสียค่าใช้จ่ายด้วยไฟฟ้าเท่ากับ 2.7 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

Inan และคณะ (2003) ศึกษาการลดค่าซีไอดี ทีและของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำมันมะกอก ซึ่งการบำบัดจะใช้วิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี โดยใช้อลูมิเนียมและเหล็กเป็นอิเล็กโทรด ขั้วแอโนด-แคโทดเป็นแบบเหล็ก/อลูมิเนียม และอลูมิเนียม/เหล็ก ความต่างศักย์ 12 โวลต์ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าอยู่ระหว่าง 10 - 40 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าพีเอชเท่ากับ 4, 6, 7 และ 9 และใช้เวลาเก็บกัก 2-30 นาที ที่เวลา 30 นาที เมื่อใช้ขั้วอลูมิเนียมเป็นขั้วแอโนดสามารถลดค่าซีไอดีได้ร้อยละ 52 และเมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วแอโนดสามารถลดค่าซีไอดีได้ร้อยละ 42 นอกจากนี้เมื่อทำการทดลองที่ภาวะพีเอชเท่ากับ 6.2 ± 0.2 โดยใช้ขั้วอลูมิเนียมและเหล็กเป็นขั้วแอโนด ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 10 - 40 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ใช้เวลาเก็บกัก 10 นาที พบว่าสามารถลดซีไอดีร้อยละ 90 - 97

ปาริชาติ หมั่นสีทา (2547) ศึกษาการกำจัดซีไอดีของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดบางส่วนจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า ซึ่งแบ่งเป็น 3 การทดลอง คือ หาสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้น้ำเสียจากบ่อบ่มมาผ่านกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า พบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ ความต่างศักย์ 10 โวลต์ เวลาเก็บกัก 30 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีร้อยละ 91.77 และ 51.84 ในขณะที่ความต่างศักย์ 8 โวลต์ เวลาเก็บกัก 20 นาที มีค่าใช้จ่ายต่ำสุด คือ 65.21 บาทต่อลูกบาศก์เมตร และค่าใช้จ่ายเฉพาะค่าขั้วไฟฟ้า 29.59 บาทต่อลูกบาศก์เมตร จากนั้นศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้น้ำเสียจากบ่อบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนมาผ่านกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า สภาวะที่เหมาะสม คือ ความต่างศักย์ 12 โวลต์ เวลาเก็บกัก 30 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีร้อยละ 85.89 และ 56.88 ในขณะที่ความต่างศักย์ 8 โวลต์ เวลาเก็บกัก 20 นาที มีค่าใช้จ่ายต่ำสุด คือ 59.49 บาทต่อลูกบาศก์เมตร และค่าใช้จ่ายเฉพาะค่าขั้วไฟฟ้า 27.68 บาทต่อลูกบาศก์เมตร และศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดทางชีวภาพของน้ำเสียจากบ่อบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า พบว่าน้ำเสียที่ไม่ผ่านกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้ามีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีและบีไอดีร้อยละ 66.82 และ 83.33 น้ำเสียที่ผ่านกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีและบีไอดี เท่ากับร้อยละ 84.79 และ 93.83

Jiantuan และคณะ (2004) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากการชักผ้าด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีควบคู่กับกระบวนการลอยตัวด้วยกระแสไฟฟ้า (Electroflotation) พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสีย คือ ความเป็นกรด-เบสประมาณ 5-9 ในเวลา 5-10 นาที โดยสามารถลดความขุ่น ค่าซีไอดี สารฟอสเฟต และสารลดแรงตึงผิวได้มากกว่าร้อยละ 90