



การบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี  
Pre-treatment of Wastewater from Palm Oil Mill Industry Using Electro-  
Chemical Process

อมรภัค ชูทอง  
Amonpak Chutong

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

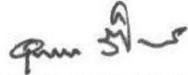
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Science in Environmental Management  
Prince of Songkla University

2551

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

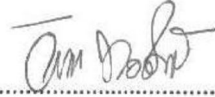
ชื่อวิทยานิพนธ์            การบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยใช้กระบวนการ  
ไฟฟ้าเคมี  
ผู้เขียน                    นางสาวอมรภัค ชูทอง  
สาขาวิชา                 การจัดการสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก



(รองศาสตราจารย์ ดร.อุดมพล พิชน์ไพบูลย์)

คณะกรรมการสอบ



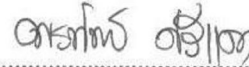
.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วีระศักดิ์ ทองลิ้มปี)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

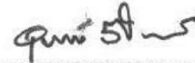


(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนาลี ชีวภิกษการ)

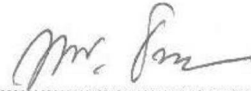
.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.จรัญ บุญกาญจน์)



.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พริทิพย์ ศรีแดง)



.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.อุดมพล พิชน์ไพบูลย์)



.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนาลี ชีวภิกษการ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการ  
สิ่งแวดล้อม

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี
ผู้เขียน	นางสาวอมรภัค ชูทอง
สาขาวิชา	การจัดการสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2550

### บทคัดย่อ

โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ถือได้ว่าเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษทางน้ำที่สำคัญมากอย่างหนึ่งจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มจะประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ สี และของแข็งแขวนลอยที่สูงมาก งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัด และสภาวะที่เหมาะสมของการใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี ในการบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยใช้อิเล็กโทรลิติกเซลล์ที่ทำด้วยอะคริลิก ปริมาตรใช้งาน 1.10 ลิตร ใช้แผ่นอลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรด ซึ่งมีพื้นที่ผิวของอิเล็กโทรด 29 และ 39  $\text{m}^2/\text{m}^3$  และมีการจัดเรียงอิเล็กโทรด 3 แบบ คือ แบบขนาน แบบอนุกรม และแบบไบโพลาร์ โดยเดินระบบแบบกะ ทำการศึกษา โดยปรับเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง 1.8 5.5 9.1 และ 14.5  $\text{kW}/\text{m}^3$  แต่ละค่าพลังงานไฟฟ้าศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยา คือ 10 20 30 และ 60 นาที ผลการทดลอง พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ สี และของแข็งแขวนลอย ได้แก่ พลังงานไฟฟ้า เวลาในการทำปฏิกิริยา พื้นที่ผิว และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด โดยพบว่า พื้นที่ผิวของอิเล็กโทรด 39  $\text{m}^2/\text{m}^3$  ระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด 2.5 cm พลังงานไฟฟ้า 14.5  $\text{kW}/\text{m}^3$  เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD ได้สูงสุด ได้แก่ การจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบขนาน แบบไบโพลาร์ และแบบอนุกรม คือ 43 37 และ 34% ตามลำดับ สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูงสุด พบว่า พื้นที่ผิวของอิเล็กโทรด 29  $\text{m}^2/\text{m}^3$  ระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด 3.0 cm พลังงานไฟฟ้า 14.5  $\text{kW}/\text{m}^3$  เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที การจัดเรียงแบบขนานมีประสิทธิภาพการกำจัดสีได้สูงสุด รองลงมา คือ แบบไบโพลาร์ และแบบอนุกรม คือ 72 61 และ 52% ตามลำดับ และสำหรับการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ มีประสิทธิภาพการกำจัดสารแขวนลอยได้สูงสุด คือ 90% พื้นที่ผิวของอิเล็กโทรด 39  $\text{m}^2/\text{m}^3$  พลังงานไฟฟ้า 14.5  $\text{kW}/\text{m}^3$  เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองจากการจัดเรียงอิเล็กโทรด 3 รูปแบบ โดยพิจารณาพร้อมกับความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ และการนำไปประยุกต์ใช้ ซึ่งพบว่า การจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบขนาน

พลังงานไฟฟ้า  $1.8 \text{ kW/m}^3$  เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที พื้นที่ผิวของอิเล็กโทรด  $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$  มีความเหมาะสมที่สุดในการบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

Thesis Title	Pre-treatment of Wastewater from Palm Oil Mill Industry Using Electro-Chemical Process
Author	Miss Amonpak Chutong
Major Program	Environmental Management
Academic	2007

### ABSTRACT

Palm Oil Mill is an important point source of industrial wastewater. The distinct characteristic of the palm oil mill (POME) is its high concentration in organic content, color and total suspended solids. This research aimed to study removal efficiencies and optimum conditions using electro-chemical process for pre-treatment of palm oil mill wastewater. The study employed electrolytic cell made from acrylic plastic with volume of 1.10 litres and aluminum was used as electrodes with surface area at 29 and 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> connection types as monopolar in parallel (MP-P) series (MP-S) and bipolar (BP-S) were conducted, respectively. Experiments were operated as a batch process using direct current power supply with varying power at 1.8 5.5 9.1 and 14.5 kW/m<sup>3</sup>, respectively. From each range of powers investigated, the reaction time of 10 20 30 and 60 minutes was performed. Experimental results showed that influencing factors in removal efficiencies of organic matter, color and total suspended solids (TSS) were the electric power reaction time, electrode surface area and electrode distance. Results showed that surface area of aluminum at 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, interelectrode distance of 2.5 cm, electrical power at 14.5 kW/m<sup>3</sup> and reaction time of 60 minutes provided maximum COD removal efficiency. The maximum COD removal efficiency for MP-P, BP-S and MP-S were 43, 37 and 34%, respectively. The maximum Color removal efficiency was achieved at surface area of aluminum at 29 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, interelectrode distance of 3.0 cm, electrical power at 14.5 kW/m<sup>3</sup> and reaction time of 60 minutes. The maximum Color removal for MP-P, BP-S and MP-S of 72, 61 and 52%, respectively. Bipolar showed the maximum removal efficiency of TSS of 90%, aluminum surface area at 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, electrical power at 14.5 kW/m<sup>3</sup> and reaction time of 60 minutes. A comparative economic study applicable in industry showed that MP-P at electrical power at 1.8 kW/m<sup>3</sup>, reaction time of 30

minutes, surface area aluminum at  $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$  showed the optimum condition for pre-treatment of palm oil mill wastewater.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องด้วยความกรุณาอย่างสูงในการให้คำปรึกษา คำแนะนำ การแก้ไขตรวจสอบข้อบกพร่อง และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ จากอาจารย์ภทรธร เอื้อกฤดาธิการ และคณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ คือ รองศาสตราจารย์ ดร. อุดมผล พิชนันไพบูลย์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พนาลี ชีวกิดาการ รวมถึงคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ คือ รองศาสตราจารย์ ดร. วีระศักดิ์ ทองลิ้มปี รองศาสตราจารย์ ดร. จรรย์ บุญกาญจน์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรทิพย์ ศรีแดง ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ โรงงานเอเซียชน้ำมันปาล์ม อำเภออ่าวลึก จังหวัดกระบี่ ที่กรุณาอนุเคราะห์ ข้อมูลและอำนวยความสะดวกในการเก็บตัวอย่างน้ำเสียเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย และทีมวิจัยการพัฒนาเทคโนโลยีที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมยางพารา และน้ำมันปาล์ม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณนักวิทยาศาสตร์คณะกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือด้านการใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการ ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณ ดร. ชัยศรี สุขสาโรจน์ และ ดร.จรงค์พันธ์ มุสิกะวงษ์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้คำแนะนำ และเอื้อเฟื้อข้อมูลในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณรัฐเขต บุญล้อม คุณวรินยุพา (น้องแอน) คุณสมฤดี (น้องนัท) คุณอิสรา (น้องอิศ) ที่ให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านด้วยดีมาตลอด

และสุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และพี่น้องครอบครัวของทุกคน ที่ให้การสนับสนุนด้านการเงิน และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

อมรภัค ชูทอง

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	(3)
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
สารบัญตารางประกอบ	(11)
สารบัญตารางภาคผนวก	(12)
สารบัญรูปประกอบ	(14)
สารบัญรูปภาคผนวก	(19)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวอักษร	(21)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 อุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันปาล์ม	4
2.2 เซลล์ไฟฟ้าเคมี	14
2.2.1 หลักการเซลล์ไฟฟ้าเคมี	14
2.2.2 กระบวนการออกซิเดชัน	15
2.2.3 กฎของฟาราเดย์	19
2.2.4 ค่าการนำไฟฟ้า	20
2.2.5 การแลกเปลี่ยนประจุและการเคลื่อนที่ของประจุ	21
2.2.6 รูปแบบการจัดเรียงของแผ่นอิเล็กโทรดแบบต่างๆ	22
2.2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการไฟฟ้าเคมี	24
2.2.8 หลักการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมี	25
2.2.9 ข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการไฟฟ้าเคมี	25



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.10 การประยุกต์ใช้ระบบไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำเสีย	26
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27
2.3.1 การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม	27
2.3.2 การบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี	31
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย	38
3.1 แผนการวิจัย	38
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง	38
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	42
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์	48
4.1 ลักษณะน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง	48
4.2 การทดลองที่ 1 ศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีจัดเรียงอิเล็กโตรดแบบขนาน	49
4.3 การทดลองที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีจัดเรียงอิเล็กโตรดแบบอนุกรม	64
4.4 การทดลองที่ 3 ศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีจัดเรียงอิเล็กโตรดแบบไบโพลาร์	77
4.5 ผลของการใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีต่อค่าพารามิเตอร์อื่นๆ	91
4.6 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของกระบวนการไฟฟ้าเคมี	93
4.7 การทดลองที่ 4 การเปรียบเทียบลักษณะของน้ำเสียก่อนเข้าสู่กระบวนการไฟฟ้าเคมีและไม่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี	101
4.8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี	103
4.9 พิจารณาประยุกต์ใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีสำหรับบำบัดน้ำเสียในโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม	104
4.10 ประเมินผลการเกิดก๊าซชีวภาพในระบบหมักแบบไร้อากาศโดยเปรียบเทียบระหว่างน้ำเสียที่ไม่ผ่านการบำบัดและน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี (pre-treatment)	105
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	107

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	110
ภาคผนวก	118
ภาคผนวก ก	119
ภาคผนวก ข	135
ประวัติผู้เขียน	141

## สารบัญตารางประกอบ

	หน้า
ตารางที่	
ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติของน้ำที่จกจากขั้นตอนการอบทะเลลายปาล์มด้วยไอน้ำ การแยกน้ำและกากสลัดจ์ออกจากน้ำมัน และน้ำในบ่อรวมน้ำทิ้งของโรงงานสกัดน้ำมันผลปาล์ม	9
ตารางที่ 2.2 ลักษณะน้ำเสียก่อนเข้าระบบและออกจากระบบบำบัดแบบแอนแอโรบิกของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ศึกษา	12
ตารางที่ 2.3 สภาพนำไฟฟ้าของวัสดุที่นิยมใช้เป็นขั้วไฟฟ้า	22
ตารางที่ 2.4 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้องในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม	29
ตารางที่ 2.5 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้องในการบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี	35
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์	42
ตารางที่ 3.2 ค่าตัวแปรที่ใช้วิเคราะห์	44
ตารางที่ 4.1 ลักษณะน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง	48
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองในการบำบัดน้ำเสีย โดยจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบขนาน	50
ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองในการบำบัดน้ำเสีย โดยจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบอนุกรม	65
ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองในการบำบัดน้ำเสีย โดยจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์	78
ตารางที่ 4.5 อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมัน	94
ตารางที่ 4.6 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีซึ่งจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบขนาน	96
ตารางที่ 4.7 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี ซึ่งจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบอนุกรม	98
ตารางที่ 4.8 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีซึ่งจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์	100
ตารางที่ 4.9 ลักษณะน้ำเสียที่ไม่ผ่านระบบไฟฟ้าเคมี	102
ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบสถานะและรูปแบบการจัดเรียงแบบต่างๆ โดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี	103

## สารบัญตารางประกอบ ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบความคุ้มทุน สำหรับสถานะที่ดีที่สุดของแต่ละรูปแบบการจัดเรียง	104
ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบความคุ้มทุน สำหรับสถานะที่ดีที่สุดของแต่ละรูปแบบการจัดเรียง	105
ก 1 ปริมาณอลูมิเนียมในน้ำและตะกอน มีการจัดเรียงอิเล็กโตรดแบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$	120
ก 2 ปริมาณอลูมิเนียมในน้ำและตะกอน มีการจัดเรียงอิเล็กโตรดแบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$	121
ก 3 ปริมาณอลูมิเนียมในน้ำและตะกอน มีการจัดเรียงอิเล็กโตรดแบบอนุกรม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$	122
ก 4 ปริมาณอลูมิเนียมในน้ำและตะกอน มีการจัดเรียงอิเล็กโตรดแบบอนุกรม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$	123
ก 5 ปริมาณอลูมิเนียมในน้ำและตะกอน มีการจัดเรียงอิเล็กโตรดแบบไบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$	124
ก 6 ปริมาณอลูมิเนียมในน้ำและตะกอน มีการจัดเรียงอิเล็กโตรดแบบไบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$	125
ก 7 ค่าไฟฟ้าและปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้ไปจากการทดลองจัดเรียงอิเล็กโตรด แบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$	126
ก 8 ค่าไฟฟ้าและปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้ไปจากการทดลองจัดเรียงอิเล็กโตรด แบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$	127
ก 9 ค่าไฟฟ้าและปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้ไปจากการทดลองจัดเรียงอิเล็กโตรด แบบอนุกรม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$	128
ก 10 ค่าไฟฟ้าและปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้ไปจากการทดลองจัดเรียงอิเล็กโตรด แบบอนุกรม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$	129
ก 11 ค่าไฟฟ้าและปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้ไปจากการทดลองจัดเรียงอิเล็กโตรด แบบไบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$	130
ก 12 ค่าไฟฟ้าและปริมาณอลูมิเนียมที่ใช้ไปจากการทดลองจัดเรียงอิเล็กโตรด แบบไบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$	131
ก 13 ค่าใช้จ่ายที่ลดลงจากการนำขั้วแคโทดกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง (แบบขนาน)	132
ก 14 ค่าใช้จ่ายที่ลดลงจากการนำขั้วแคโทดกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง (แบบอนุกรม)	133

## สารบัญตารางประกอบ ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก 15 ค่าใช้จ่ายที่ลดลงจากการนำขั้วแคโทดกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง (แบบไปโพลาร์)	134

## สารบัญรูปประกอบ

	หน้า
รูปที่	
รูปที่ 2.1 การผลิตน้ำมันปาล์มดิบผสม เป็นกระบวนการผลิตแบบไม่ใช้น้ำ	5
รูปที่ 2.2 การผลิตน้ำมันปาล์มดิบ เป็นกระบวนการผลิตแบบใช้น้ำ ที่มีกร ใช้เครื่องสกัดแยกน้ำมัน	7
รูปที่ 2.3 การผลิตน้ำมันปาล์มดิบ เป็นกระบวนการผลิตแบบใช้น้ำที่ไม่มีกร ใช้เครื่องสกัดแยกน้ำมัน	8
รูปที่ 2.4 ผังระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ใช้ศึกษา	13
รูปที่ 2.5 สีของน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ก่อนและหลังการบำบัด แบบ Anaerobic digester	12
รูปที่ 2.6 การเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการเซลล์ไฟฟ้าเคมี	14
รูปที่ 2.7 การลดลงของมลสาร โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันในกระบวนการเซลล์ไฟฟ้าเคมี	15
รูปที่ 2.8 สรุปกลไกการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ในน้ำเสียโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันใน กระบวนการไฟฟ้าเคมี	17
รูปที่ 2.9 ชนิดของอคูมิเนียมจากการแตกตัวที่พีเอชต่างๆ	18
รูปที่ 2.10 การจัดเรียงแผ่นอิเล็กโทรด โมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว	22
รูปที่ 2.11 การจัดเรียงแผ่นอิเล็กโทรด โมโนโพลาร์แบบอนุกรม	23
รูปที่ 2.12 การจัดเรียงแผ่นอิเล็กโทรด โมโนโพลาร์แบบขนาน	23
รูปที่ 2.13 การจัดเรียงแผ่นอิเล็กโทรด โมโนโพลาร์แบบไบโพลาร์	24
รูปที่ 2.14 ระบบการทดลองบำบัดน้ำเสียจากโรงงานน้ำมันมะกอก แบบ Cylindrical	31
รูปที่ 2.15 ระบบการทดลองบำบัดน้ำเสียจากโรงงานน้ำมันมะกอก แบบ Series	32
รูปที่ 2.16 ระบบการทดลองบำบัดน้ำเสียชุมชน	33
รูปที่ 2.17 ระบบการบำบัดน้ำเสียโดยการสร้างตะกอนและการเกิดตะกอนลอยตัวใน ถังปฏิกิริยา (External-loop airlift reactor)	34
รูปที่ 3.1 กรอบแนวคิดการทดลอง	39
รูปที่ 3.2 ลักษณะของขั้วอคูมิเนียมที่ใช้ในการทดลอง	40
รูปที่ 3.3 องค์ประกอบของระบบเซลล์ไฟฟ้าเคมี	40

## สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.4 ระบบไฟฟ้าเคมีที่ใช้ทดลอง (ก) ระบบไฟฟ้าเคมี (ข) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply)	41
รูปที่ 3.5 การเปรียบเทียบหารูปแบบการจัดเรียงอิเล็กโทรดที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี	46
รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงค่าของแรงแจวนลอยจากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$	52
รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงค่าของแรงแจวนลอยจากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$	52
รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงสีจากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนานพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$	53
รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงสีจากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนานพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$	53
รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลง $\text{UV}_{254}$ absorbance จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$	55
รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลง $\text{UV}_{254}$ absorbance จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$	55
รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงค่า COD จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนานพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$	56
รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงค่า COD จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนานพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$	56
รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงค่า $\text{BOD}_5$ จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนานพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$	58
รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงค่า $\text{BOD}_5:\text{COD}$ จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$	58
รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงค่า $\text{BOD}_5$ จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนานพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$	59

## สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงค่า BOD <sub>5</sub> :COD จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	59
รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงปริมาณอลูมิเนียมในน้ำจากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	61
รูปที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงปริมาณอลูมิเนียมในตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	61
รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงปริมาณอลูมิเนียมในน้ำจากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	62
รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงปริมาณอลูมิเนียมในตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	62
รูปที่ 4.17 ลักษณะของขั้วไฟฟ้าก่อนและหลังผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี (ก) ขั้วอลูมิเนียมก่อนการทดลอง (ข) การสึกกร่อนของขั้วแอโนดหลังทดลอง (ค) การสะสมของอลูมิเนียมบริเวณขั้วแคโทดเพิ่มขึ้นตามเวลาเก็บกัก	63
รูปที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งแขวนลอยจากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบอนุกรม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	67
รูปที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งแขวนลอยจากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบอนุกรม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	67
รูปที่ 4.20 การเปลี่ยนแปลงสีจากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้า แบบอนุกรม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	68
รูปที่ 4.21 การเปลี่ยนแปลงสีจากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้า แบบอนุกรม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	68
รูปที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลง UV <sub>254</sub> Absorption จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบอนุกรม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	70
รูปที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลง UV <sub>254</sub> Absorption จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบอนุกรม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	70





## สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.37 การเปลี่ยนแปลงสี จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้า แบบไบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$	81
รูปที่ 4.38 ลักษณะสีของน้ำเสีย (ก) น้ำเสียที่ไม่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี (ก่อนและหลังเข้าสู่ ระบบหมักแบบไร้อากาศ (ข) น้ำเสียที่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมีจากการจัดเรียง อิเล็กโทรด 3 รูปแบบ ที่พลังงานไฟฟ้า $14.5 \text{ kW}/\text{m}^3$ เวลาเก็บกัก 60 min	82
รูปที่ 4.39 การเปลี่ยนแปลง $\text{UV}_{254}$ absorption จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้า แบบไบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$	84
รูปที่ 4.40 การเปลี่ยนแปลง $\text{UV}_{254}$ absorption จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้า แบบไบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$	84
รูปที่ 4.41 การเปลี่ยนแปลงค่า COD จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้า แบบไบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$	85
รูปที่ 4.42 การเปลี่ยนแปลงค่า COD จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้า แบบไบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$	85
รูปที่ 4.43 การเปลี่ยนแปลงค่า BOD จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้า แบบ ไบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$	86
รูปที่ 4.44 การเปลี่ยนแปลงค่า $\text{BOD}_5:\text{COD}$ จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้า แบบไบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$	86
รูปที่ 4.45 การเปลี่ยนแปลงค่า BOD จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้า แบบ ไบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$	87
รูปที่ 4.46 การเปลี่ยนแปลงค่า $\text{BOD}_5:\text{COD}$ จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้า แบบไบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$	87
รูปที่ 4.47 การเปลี่ยนแปลงปริมาณอนุมิเนียมในน้ำจากการบำบัดน้ำเสีย โดยจัดเรียง ขั้วไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$	89
รูปที่ 4.48 การเปลี่ยนแปลงปริมาณอนุมิเนียมในตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย โดยจัดเรียง ขั้วไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$	89

## สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.49 การเปลี่ยนแปลงปริมาณอลูมิเนียมในน้ำจากการบำบัดน้ำเสีย โดยจัดเรียง ขั้วไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$	90
รูปที่ 4.50 การเปลี่ยนแปลงปริมาณอลูมิเนียมในตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย โดยจัดเรียง ขั้วไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$	90
รูปที่ 4.51 ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นหลังการทดลองน้ำเสียโดยใช้กระบวนการ ไฟฟ้าเคมีจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$	95
รูปที่ 4.52 ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นหลังการทดลองบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการ ไฟฟ้าเคมีจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$	95
รูปที่ 4.53 ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นหลังการทดลองบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการ ไฟฟ้าเคมีจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบอนุกรม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$	97
รูปที่ 4.54 ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นหลังการทดลองบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการ ไฟฟ้าเคมีจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบอนุกรม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$	97
รูปที่ 4.55 ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นหลังการทดลองบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการ ไฟฟ้าเคมีจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$	99
รูปที่ 4.56 ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นหลังการทดลองบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการ ไฟฟ้าเคมีจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$	99
รูปที่ 4.57 ลักษณะของน้ำก่อนเข้าระบบและน้ำที่ไม่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี	101
ข 1 การจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบขนาน	136
ข 2 การจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบอนุกรม	136
ข 3 การจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์	136
ข 4 ลักษณะของสีสำหรับการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ พื้นที่ ของขั้วไฟฟ้า $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$ พลังงานไฟฟ้า $14.5 \text{ kW}/\text{m}^3$	137
ข 5 ลักษณะของสีสำหรับการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$ พลังงานไฟฟ้า $14.5 \text{ kW}/\text{m}^3$	137
ข 6 ลักษณะของสีสำหรับการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบอนุกรม พื้นที่ ของขั้วไฟฟ้า $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$ พลังงานไฟฟ้า $14.5 \text{ kW}/\text{m}^3$	137

## สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข 7 ลักษณะของสีสำหรับการจัดเรียงอิเล็กทรอนิกส์แบบอนุกรม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> พลังงานไฟฟ้า 14.5 kW/m <sup>3</sup>	138
ข 8 ลักษณะของสีสำหรับการจัดเรียงอิเล็กทรอนิกส์แบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> พลังงานไฟฟ้า 14.5 kW/m <sup>3</sup>	138
ข 9 ลักษณะของสีสำหรับการจัดเรียงอิเล็กทรอนิกส์แบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> พลังงานไฟฟ้า 14.5 kW/m <sup>3</sup>	138
ข 10 น้ำเสียที่ออกจากระบวนการผลิต	139
ข 11 น้ำเสียในบ่อปรับสภาพ ก่อนเข้าสู่ถังหมักแบบไร้อากาศ	139
ข 12 ถังหมักแบบไร้อากาศ	139
ข 13 เครื่อง Spectrophotometer	140
ข 14 เครื่อง Centrifuge	140
ข 15 เครื่อง Atomic Absorption spectrometry	140

### สัญลักษณ์คำย่อและตัวอักษร

Inf	=	Influent คือ น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ
Eff	=	Effluent คือ น้ำเสียที่ออกจากระบบ
COD	=	Chemical Oxygen Demand คือ ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ด้วยวิธีการทางเคมีทั้งในรูปของแข็งและรูปที่ละลายอยู่ในน้ำ
BOD <sub>5</sub>	=	Biochemical Oxygen Demand คือ ปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ชนิดที่ย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ
TSS	=	Total Suspended Solids คือ ส่วนของแข็งที่ไม่ละลายน้ำและแขวนลอยอยู่ในน้ำได้
Range	=	ช่วงข้อมูลต่ำสุดและสูงสุด
$\bar{X}$	=	ค่าเฉลี่ย
SD	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
Cl <sup>-</sup>	=	Chloride ion
Fe <sup>2+</sup>	=	Ferrous ion
H <sup>+</sup>	=	Hydrogen ion
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	=	Hydrogen peroxide
HOCl	=	Hypochlorite
MO <sub>x</sub>	=	Oxide anode
MO <sub>x+1</sub>	=	Chemisorbed active oxygen
MO <sub>x</sub> [ <sup>o</sup> OH]	=	Adsorbed hydroxyl radical
<sup>o</sup> O	=	Active oxygen
<sup>o</sup> OH	=	Hydroxyl radical
OH <sup>-</sup>	=	Hydroxide ion
Al <sup>3+</sup>	=	Aluminum ion
P	=	Power electric (พลังงานไฟฟ้าหรือกำลังไฟฟ้า), หน่วย วัตต์ (Watt, W)

### สัญลักษณ์คำย่อและตัวอักษร (ต่อ)

I	=	Current (กระแสไฟฟ้า) หน่วย แอมแปร์ (A)
R	=	Resistance (ความต้านทานไฟฟ้า) หน่วย โอห์ม ( $\Omega$ )
V	=	Voltage (ความต่างศักย์ไฟฟ้า) หน่วย โวลต์ (V)
conductivity	=	ค่าการนำไฟฟ้า (มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร, ms/cm)
mg/l	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
mg/kg	=	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
SV <sub>60</sub>	=	Sludge Volume คือ ปริมาณตะกอนที่ตกลงในเวลา 60 นาที
cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> /min	=	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อตารางเซนติเมตรต่อนาที
mg/hr	=	มิลลิกรัมต่อชั่วโมง
ppm	=	part per million (1 ส่วนในล้านส่วน)
unit/ml	=	หน่วยต่อมิลลิลิตร
l/min	=	ลิตรต่อนาที
NTU	=	Nephelometric Turbidity Unit เป็นหน่วยวัดความขุ่นของน้ำ
SU	=	Space Unit หรือ หน่วยเอสยู
mA/cm <sup>2</sup>	=	มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร
mM	=	มิลลิโมลาร์
USS.m <sup>-3</sup>	=	เหรียญยูเอสต่อลูกบาศก์เมตร
kWhm <sup>-3</sup>	=	กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร
RBC	=	Rotating Biological Contactor
PAC	=	polialuminum chloride
USEPA	=	US Environmental Protection Agency
mS/cm	=	มิลลิซีเมนซ์ต่อเซนติเมตร
Pound/inch <sup>2</sup>	=	ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันปาล์มมีการขยายตัวขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งจากรายงานสถานการณ์ปาล์มน้ำมันของโลก พบว่า ความต้องการในการบริโภคน้ำมันพืชเพิ่มมากขึ้น โดยในปี 2547 มีความต้องการรวมประมาณ 130 ล้านตัน ในจำนวนนี้เป็นน้ำมันปาล์ม และน้ำมันเมล็ดในปาล์มมีส่วนแบ่งการตลาดประมาณร้อยละ 26 นอกจากนี้ความต้องการของการบริโภคน้ำมันปาล์ม ในช่วงเวลาระหว่างปี 2544-2548 มีอัตราเพิ่มขึ้นร้อยละ 27.5 ประกอบกับน้ำมันปาล์มสามารถนำไปใช้ทดแทนน้ำมันพืชอื่นๆ เช่น น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันมะพร้าว เป็นต้น ตลอดจนสามารถใช้ทดแทนไขมันสัตว์ได้เป็นอย่างดี และจากการประมาณการของธนาคารโลกได้รายงานว่า ในปี 2558 ประชากรของโลกจะมีประมาณ 7,430 ล้านคนและมีความต้องการบริโภคน้ำมันพืชในอัตรา 24.8 กิโลกรัมต่อคนต่อปี (พรรณนีย์ วิชชาชู, 2548) จากการขยายตัวของอุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันปาล์ม อาจก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมได้ หากมีการปล่อยมลพิษต่างๆ ออกสู่สิ่งแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็นวัสดุเหลือทิ้งในรูปของของแข็ง เช่น ทะลายเปล่า เส้นใย และกะลาปาล์ม รวมทั้งน้ำเสียจากกระบวนการผลิตที่มีมลสารในรูปสารอินทรีย์อยู่ในปริมาณมาก ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มส่วนใหญ่จะมีระบบบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม แต่น้ำภายหลังการบำบัดยังมีความเข้มข้นของมลสาร เช่น บีโอดี (BOD<sub>5</sub>) ซีโอดี (COD) และของแข็งแขวนลอย (TSS) มีค่าเท่ากับ 96 986 และ 450 mg/L ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงเกินค่ามาตรฐานการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม คือ BOD<sub>5</sub> COD TSS เท่ากับ 60 400 และ 150 mg/L ตามลำดับ (กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2539) รวมทั้งสีของน้ำทิ้งภายหลังการบำบัดยังมีสีน้ำตาลเข้มปนดำ ประกอบกับขั้นตอนในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มต้องใช้เวลาอันยาวนาน สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูง และการใช้สารเคมีประกอบกันหลายชนิด ซึ่งมีราคาแพงและต้องใช้จำนวนมากๆ อันอาจก่อให้เกิดปัญหาต่างๆ ต่อสิ่งแวดล้อมได้ เช่น การตกค้างของสารเคมี การเกิดตะกอนส่วนเกินจากการบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น

การบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี อาจเป็นทางเลือกหนึ่งในการใช้บำบัดน้ำเสียเบื้องต้น (Pre-treatment) จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเพื่อทำให้โครงสร้างโมเลกุลของ

สารอินทรีย์มีความซับซ้อนน้อยลงและง่ายต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยจุลินทรีย์ในระบบหมักแบบไร้อากาศ เนื่องจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีเป็นกระบวนการที่ไม่มีการใช้สารเคมีแต่อาศัยหลักการบำบัดน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ ซึ่งเกิดขึ้นทั้งที่สารซึ่งทำปฏิกิริยากันมิได้สัมผัสกัน เนื่องจากมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากสารที่เกิดออกซิเดชันไปยังสารที่เกิดรีดักชัน โดยผ่านตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี มีกลไกการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ด้วยกระบวนการสร้างตะกอน (coagulation) การดูดซึม (adsorption) การตกตะกอน (precipitation) และการลอยตัว (flotation) (Avsar *et al.*, 2007) รวมทั้งสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลซับซ้อน หรือยากต่อการย่อยสลายทางชีวภาพได้ถูกออกซิไดซ์เปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุล โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน เพื่อให้มีโครงสร้างที่ซับซ้อนน้อยลงหรือสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ หรือถูกทำลายกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียในลำดับถัดไป คือ การบำบัดน้ำเสียแบบแอนแอโรบิกซึ่งอาศัยจุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการออกซิเจนในการดำรงชีวิตทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้มากขึ้น ทำให้ลดระยะเวลาในการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตกระแสไฟฟ้า และใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนต่อไป นอกจากนี้ตะกอนที่เกิดจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีสามารถรีดน้ำออกได้ง่าย ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากการทำงานของระบบสามารถดันตัว และยกมลสารให้ลอยขึ้นเหนือผิวน้ำ ซึ่งตะกอนเบาที่เกิดขึ้นมักมีขนาดใหญ่ จึงสามารถแยกได้ด้วยการกรองหรือง่ายต่อการรวบรวมและกำจัดออก ดังนั้นนอกจากเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดแบบแอนแอโรบิก และระบบน้ำเสียโดยรวมแล้วยังช่วยลดการใช้สารเคมี และไม่ก่อให้เกิดปัญหาของสารเคมีเหลือตกค้างในสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

## 1.2. วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี
2. ศึกษาสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม



### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียจริงจากโรงงานเอเซีย น้ำมันปาล์ม อำเภอ อ่าวลึก จังหวัดกระบี่ ซึ่งเป็น โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่มีการผลิตน้ำมันปาล์มดิบเป็นกระบวนการผลิตแบบใช้น้ำ ทำให้มีน้ำเสียจำนวนมากเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งโรงงานเอเซีย น้ำมันปาล์มมีระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ (Anaerobic digester) ซึ่งการเก็บตัวอย่างน้ำในงานวิจัยนี้ เก็บน้ำเสียที่ผ่านบ่อดักไขมันแล้ว ก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงาน (แบบไร้อากาศ) โดยน้ำเสียที่เก็บได้ถูกเก็บรักษาในห้องแช่เย็น ( $4^{\circ}\text{C}$ ) ของคณะกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อม

2. งานวิจัยนี้ใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี ซึ่งเป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ โดยได้ดำเนินการทดลองแบบกะ น้ำเสียและอุณหภูมิของห้องปฏิบัติการ อยู่ในช่วงอุณหภูมิห้อง ( $25^{\circ}\text{C}$ )

3. ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองเป็นขั้วอลูมิเนียม มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยม และใช้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาดกระแสไฟฟ้า 0-30 A ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0-55 Volt

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้สภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดในลำดับถัดไป คือ การบำบัดน้ำเสียแบบแอนแอโรบิก เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ

2. ได้แนวทางเลือกหนึ่งในการบำบัดน้ำเสียที่มีสีและซีไอดีสูง

3. ได้ผลของการศึกษาที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อกำจัดสีและซีไอดีของน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มซึ่งมีสีน้ำตาลเข้ม และปริมาณสารอินทรีย์สูงให้ลดลงในระดับที่สามารถปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมได้

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 อุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันปาล์ม

การสกัดน้ำมันปาล์ม เป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญทางเศรษฐกิจอย่างหนึ่งของประเทศ ซึ่งพื้นที่เพาะปลูกปาล์มน้ำมันในประเทศไทยมีประมาณ 2.2 ล้านไร่ ในจำนวนนี้เป็นพื้นที่ในจังหวัดกระบี่มากที่สุด คือ 6.56 แสนไร่ รองลงมาคือ สุราษฎร์ธานี 5.96 แสนไร่ ชุมพร 4.45 แสนไร่ สตูล 1.01 แสนไร่ และในจังหวัดอื่นๆ รวม 3.85 แสนไร่ จะเห็นได้ว่ารวมพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมัน 3 จังหวัด คือ กระบี่ สุราษฎร์ธานี และชุมพร มีพื้นที่รวมประมาณ 83% ของพื้นที่เพาะปลูกทั้งประเทศ (พรรณนีย์ วิชชาชู, 2548) และจากการที่น้ำมันปาล์มสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ใช้น้ำมันปาล์มโอเลอินทำอาหารในครัวเรือนหรือใช้ในอุตสาหกรรมด้านอาหาร เช่น น้ำมันทอดอาหาร เนยเทียม ครีมเทียมประเภทต่างๆ ฯลฯ อุตสาหกรรมโพลิโอเคมีคอล โดยต้องผ่านกระบวนการทางเคมี เช่น กรดสเตียริก ใช้ในการผลิตเครื่องสำอาง สบู่เด็กผสมกับกรดปาล์มมิติกเพื่อทำเทียนไข แม้กระทั่งในด้านพลังงาน คือ ไบโอดีเซล จึงทำให้อุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันปาล์มได้มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว (ธีระ เอกสมทราเมษฐ์, 2548)

#### 2.1.1 ประเภทของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม สามารถแบ่งออกตามกระบวนการผลิตได้ 2 ประเภท คือ

##### 2.1.1.1 โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่มีกระบวนการผลิตแบบไม่ใช้น้ำ

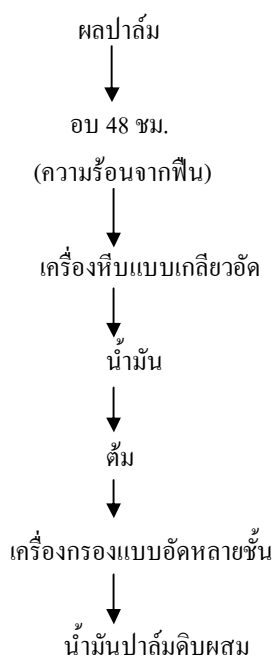
เป็นโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ใช้น้ำในปริมาณน้อย และในการสกัดน้ำมันปาล์มจะสกัดน้ำมันจากผลปาล์มและน้ำมันจากเมล็ดในรวมกันความร้อนที่ใช้ในการอบผลปาล์มนั้น ส่วนใหญ่มักได้จากฟืน ระยะเวลาในการอบ 48 hr จากนั้นผลปาล์มจะถูกส่งไปยังเครื่องหีบแบบเกียร์ยัด (screw press) น้ำมันที่ได้ถูกทำให้ร้อนและผ่านเข้าเครื่องกรองแบบอัดหลายชั้น (filter press) เพื่อขจัดสิ่งเจือปนออก ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งน้ำมันที่ได้จะมีราคาต่ำกว่าน้ำมันบริสุทธิ์ที่ผลิตได้จากเนื้อเยื่อผลปาล์มเพียงอย่างเดียว โรงงานประเภทนี้ส่วนใหญ่มีขนาดเล็ก และใช้เงินลงทุนต่ำในส่วนของเหลือจากกระบวนการผลิตจะอยู่ในรูปของกากปาล์ม ซึ่งสามารถใช้เป็นอาหารสัตว์ได้

### 2.1.1.2 โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่มีกระบวนการผลิตแบบใช้น้ำ

กระบวนการผลิตแบบใช้น้ำ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

1) แบบที่ใช้เครื่องสกัดแยกน้ำมัน (decanter) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จากการพ่นน้ำร้อนเข้าไปในขั้นตอนการหีบน้ำมัน ซึ่งทำหน้าที่สกัดน้ำมัน น้ำมันที่ร้อนจะถูกส่งต่อไปยังเครื่องสกัดแยกน้ำมันเพื่อแยกน้ำและสิ่งเจือปนหรือสลัดจ์ออกจากน้ำมัน สลัดจ์ที่ได้จากเครื่องนี้ใช้เป็นปุ๋ยได้

2) แบบที่ไม่ใช้เครื่องสกัดแยกน้ำมัน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งใช้วิธีการให้ความร้อนเพื่อให้ไขมันลอยตัวแล้วแยกออก จากนั้นใช้เครื่องเหวี่ยงเพื่อแยกน้ำออกจากสลัดจ์ โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มประเภทนี้จะมียุทธศาสตร์ขนาดใหญ่และมีกำลังการผลิตสูง จากการที่ในกระบวนการผลิตมีการใช้น้ำจึงทำให้โรงงานประเภทนี้มีน้ำเสียเกิดขึ้นในปริมาณมาก จำเป็นจะต้องอาศัยการจัดการทางด้านสิ่งแวดล้อมที่ดี นอกจากนี้ยังมีของเหลือจากกระบวนการผลิตในรูปของเส้นใย กะลา ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำได้ ส่วนทะลายเปล่าสามารถนำมาใช้เพาะเห็ดและกากตะกอนน้ำมันปาล์มสามารถใช้เป็นอาหารสัตว์ได้



รูปที่ 2.1 การผลิตน้ำมันปาล์มดิบผสม เป็นกระบวนการผลิตแบบไม่ใช้น้ำ (พูนสุข ประเสริฐสรรพ และคณะ, 2533)

## 2.1.2 น้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมัน

น้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเกือบทั้งหมด เกิดจากน้ำที่ใช้ในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม ซึ่งมาจาก 5 แหล่งใหญ่ (ปารีชาติ หมิ่นสีทา, 2547) คือ

### 2.1.2.1 น้ำจากการนึ่งปาล์ม

เป็นน้ำทิ้งจากการอบทะลายปาล์มด้วยไอน้ำ น้ำส่วนนี้แม้จะมีน้ำมันอยู่ แต่มีสารแขวนลอยต่ำและไม่มีสภาพเป็นอิมัลชัน โดยทั่วไปการอบทะลายปาล์ม 25 ตัน จะมีน้ำนึ่งปาล์มเกิดขึ้นประมาณ 2-3 m<sup>3</sup>

### 2.1.2.2 น้ำทิ้งจากการแยกน้ำและกากสลัดจ์ออกจากน้ำมัน

น้ำทิ้งส่วนนี้เกิดขึ้นมากที่สุด และเป็นน้ำทิ้งที่มีของแข็งแขวนลอยมาก กรณีที่ใช้ decanter (เครื่องแยก 3 เฟส ซึ่งจะได้น้ำมันปาล์มดิบ น้ำทิ้ง และกากตะกอนแยกจากกัน) ในการแยกน้ำทิ้งจากการแยกน้ำและกากสลัดจ์ออกจากน้ำมันจะมีน้ำสลัดจ์ที่ถูกแยกออกมาประมาณ 0.35 m<sup>3</sup> ต่อตันทะลายปาล์มสด และในกรณีที่ใช้ separator (เครื่องแยก 2 เฟส ซึ่งจะได้น้ำมันปาล์มดิบและน้ำทิ้งที่มีกากตะกอนปนอยู่) ซึ่งมีน้ำสลัดจ์ที่ถูกแยกออกมาประมาณ 0.65 m<sup>3</sup> ต่อตันทะลายปาล์มสด

### 2.1.2.3 น้ำทิ้งจากการล้างทำความสะอาดเครื่องมือ/อุปกรณ์

เครื่องมือ/อุปกรณ์ที่ต้องทำความสะอาดบ่อยครั้งได้แก่

1) เครื่องแยกกรวดทราย ต้องทำการล้างทุกครึ่งชั่วโมง ใช้น้ำในการล้างประมาณ 0.05-0.1 m<sup>3</sup>

2) เครื่องแยกน้ำและกากสลัดจ์ออกจากน้ำมัน เมื่อใช้งานไประยะหนึ่งต้องมีการล้างทำความสะอาด ซึ่งจะมีน้ำทิ้งเกิดครั้งละ 0.2-0.5 m<sup>3</sup>

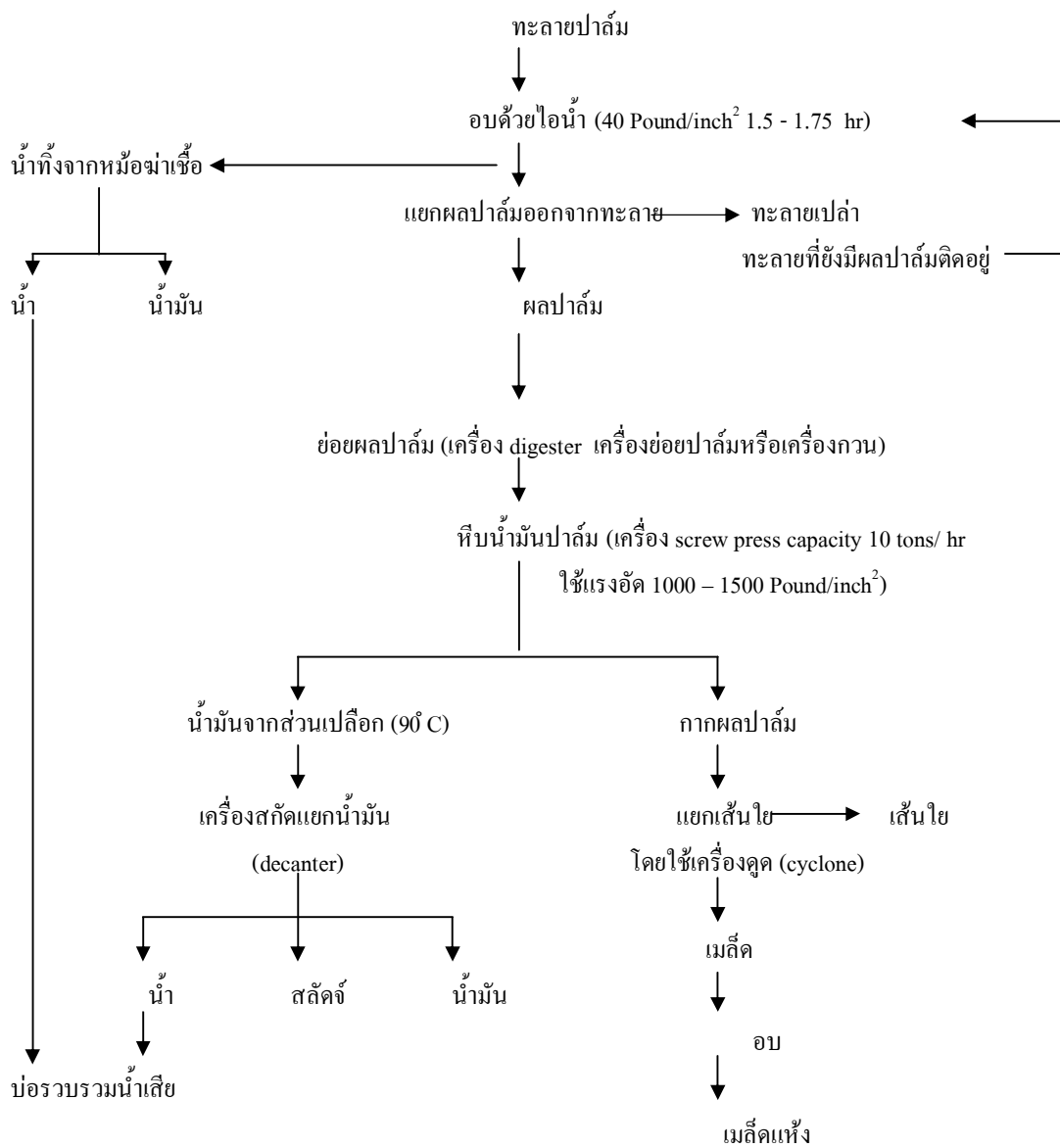
3) เครื่องแยกเหวี่ยงความเร็วสูง ต้องทำการล้างทุก 20-30 min ในการล้างจะใช้น้ำครั้งละ 0.05-0.06 m<sup>3</sup> นอกจากนี้ยังต้องล้างทำความสะอาดพื้น ถังพัก และภาชนะต่างๆ อีกด้วย

### 2.1.2.4 น้ำจากการหล่อเย็นหม้อกำเนิดไอน้ำและเครื่องระเหย

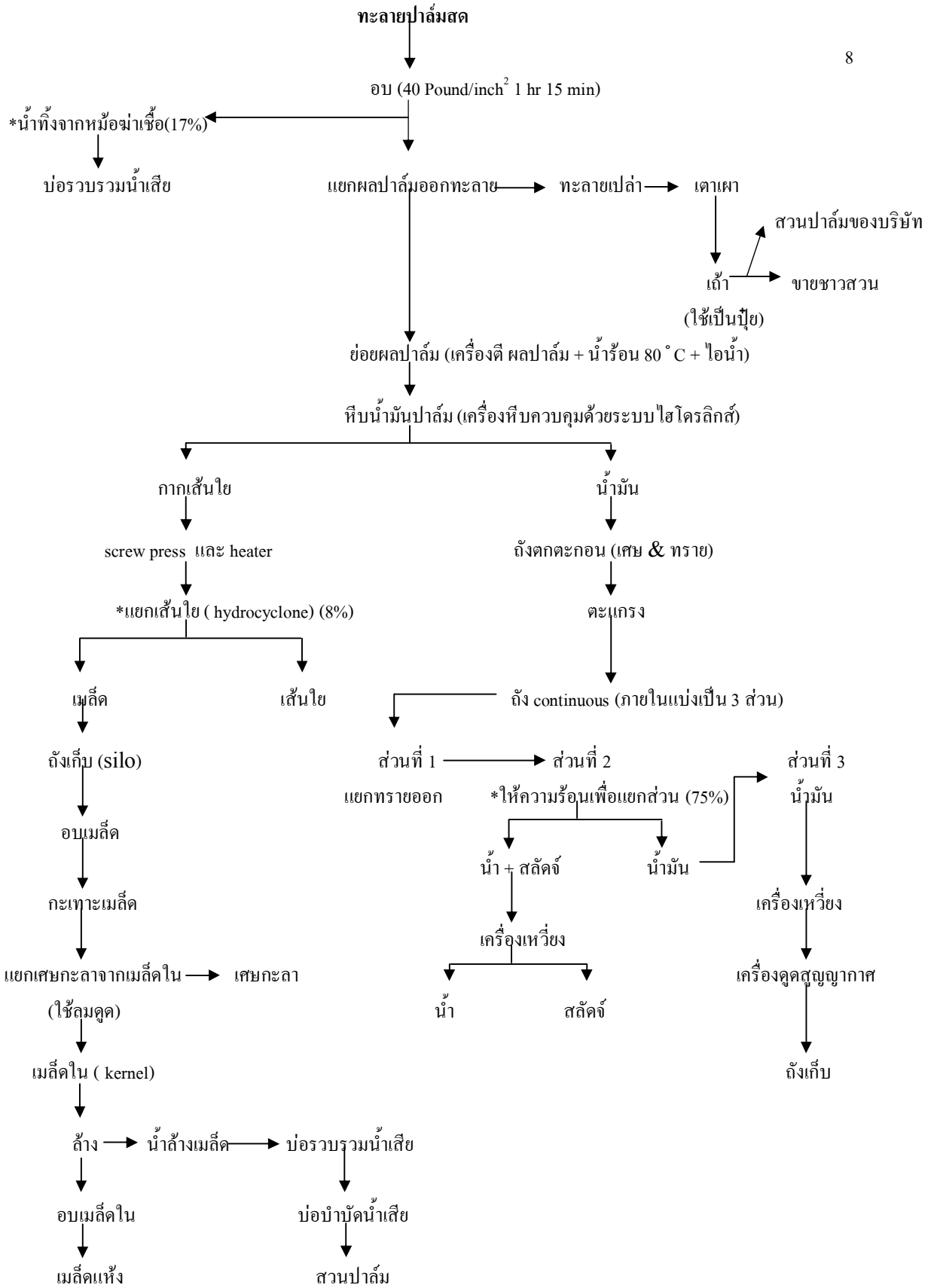
เป็นน้ำที่มีของแข็งแขวนลอยต่ำมาก และยังคงสะอาดอยู่ ส่วนใหญ่จะมีการหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่

### 2.1.2.5 น้ำสลัดจ์จากเครื่องแยกเหวี่ยงความเร็วสูง (centrifuge)

มีน้ำทิ้งเกิดขึ้นประมาณ 0.03-0.15 m<sup>3</sup> ต่อตันทะลายปาล์มสด



รูปที่ 2.2 การผลิตน้ำมันปาล์มดิบ เป็นกระบวนการผลิตแบบใช้น้ำ ที่มีการใช้เครื่องสกัดแยกน้ำมัน (พูนสุข ประเสริฐสรรพ และคณะ, 2533)



รูปที่ 2.3 การผลิตน้ำมันปาล์มดิบ เป็นกระบวนการผลิตแบบใช้น้ำ ที่ไม่มีการใช้เครื่องสกัดแยกน้ำมัน (พูนสุข ประเสริฐสรรพ และคณะ, 2533) \* % ปริมาณน้ำเสียทั้งหมด

ลักษณะของน้ำที่มาจากชั้นตอนต่างๆ ในการสกัดน้ำมันปาล์ม ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติของน้ำที่มาจากขั้นตอนการอบทะเลลายปาล์มด้วยไอน้ำ การแยกน้ำและกาก

สลัดจ์ออกจากน้ำมัน และน้ำในบ่อรวมน้ำที่ของโรงงานสกัดน้ำมันผลปาล์ม

พารามิเตอร์	น้ำที่จากบ่อรวม	น้ำที่จากหม้อฆ่าเชื้อ	น้ำที่จากเครื่องแยกน้ำและกากสลัดจ์ออกจากน้ำมัน
สี	น้ำตาลคล้ำ	น้ำตาล	น้ำตาลหรือน้ำตาลปนดำ
pH	4.05-4.62	4.84-5.35	4.61-4.89
BOD <sub>5</sub>	54,750-60,000	22,800-41,985	21,000-45,375
COD	80,523-115,934	45,360-80,146	38,246-67,567
Alkalinity	68-200	3.75-1,576	86.5-480
Oil and Grease	16-2,449	20.9-1,103	4.7
Total Solids	49,063-88,508	26,367-76,733	25,634-47,242
Total Suspended Solids	18,500-52,000	26,000-61,100	29,000-20,300
Nitrogen			
- Ammonia Nitrogen	27-61	7.7-66.3	22.8-23.0
- Organic Nitrogen	551-1,172	22.4-1,287	518.5

หมายเหตุ : ทุกหน่วยมีค่าเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร ยกเว้น สีและพีเอช (พุนสุช ประเสริฐสรรพ และคณะ, 2533)

### 2.1.3 ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

#### 2.1.3.1 การบำบัดน้ำเสียขั้นต้น

น้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีแหล่งกำเนิดจากหลายแหล่ง ได้แก่ หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ ห้องน้ำมัน น้ำหล่อเย็นจากเครื่องระเหยน้ำออกจากน้ำมัน เครื่องลดความร้อนของน้ำมัน ซึ่งน้ำเสียแต่ละแหล่งจะมีปริมาณมลสาร หรือความสกปรกแตกต่างกัน จากนั้นจะทำการแยกน้ำเสียที่มีความสกปรกมากและน้อยออกจากกัน โดยน้ำเสียที่มีความสกปรกน้อยจะมีการหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ตามความเหมาะสม ส่วนน้ำเสียที่มีปริมาณมลสารสูงก็จะส่งเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียของทางโรงงานต่อไป

น้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มจะมีอุณหภูมิสูงและมีน้ำมันปนอยู่ด้วย ในการบำบัดน้ำมันจะใช้บ่อดักไขมันซึ่งกักน้ำเสียเอาไว้ทำให้อุณหภูมิลดลง และทำให้ไขมัน

ลอยตัวขึ้นสู่ผิวบนของบ่อจากนั้นจะมีการกวาดชั้นไขมันออกเป็นระยะๆ ซึ่งไขมันส่วนนี้จะนำไปจำหน่ายเพื่อทำสบู่ และเทียนไข ในส่วนของของแข็งแขวนลอยก็จะตกตะกอนบริเวณก้นบ่อในช่วงบ่อต้นๆ ของระบบบำบัดซึ่งจะมีการขูดลอกก้นบ่อเพื่อนำไปทำปุ๋ย

### 2.1.3.2 การบำบัดน้ำเสียขั้นทุติยภูมิ

น้ำเสียจาก โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม จะบำบัดด้วยกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพเนื่องจากส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ และไม่มีสารที่เป็นอันตรายต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ ซึ่งจะเป็นระบบบ่อ (oxidation ponds) ประกอบด้วยบ่อดิน หรือบ่อกักเก็บน้ำทิ้งจำนวนหลายๆ บ่อ เรียงต่อกันแบบอนุกรม ซึ่งจะใช้พื้นที่ค่อนข้างมาก แต่มีการออกแบบไม่ซับซ้อนสามารถจำแนกตามระดับออกซิเจนที่มีในบ่อ ดังนี้

#### 1) บ่อแอนแอโรบิก (Anaerobic Ponds)

บ่อแอนแอโรบิกใช้กำจัดสารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นสูงและมีปริมาณของแข็งสูง บ่อนี้ถูกออกแบบให้มีการบรรทุกสารอินทรีย์สูงมากจนสาหร่ายและการเติมออกซิเจนที่ผิวหน้าไม่สามารถเติมออกซิเจนได้ สภาพภายในบ่อจึงไม่มีออกซิเจนเหลืออยู่ สารอินทรีย์และของแข็งในน้ำเสียจะถูกย่อยสลายแบบแอนแอโรบิกภายในบ่อน้ำใสที่ออกจากบ่อจะถูกปล่อยเข้าสู่บ่อแฟกคัลเททีฟเพื่อบำบัดต่อไป

#### 2) บ่อแฟกคัลเททีฟ (Facultative Ponds)

บ่อแฟกคัลเททีฟ หรือบ่อแอนแอโรบิก-แอนแอโรบิก หรือบ่อกึ่งแอนแอโรบิก เนื่องจากส่วนบนของบ่อจะอยู่ในสภาพแอโรบิกจากการเติมอากาศที่ผิวหน้า และจากปฏิกิริยาของสาหร่ายซึ่งให้ออกซิเจน ส่วนล่างของบ่อจะอยู่ในสภาพแอนแอโรบิก โดยสารอินทรีย์ที่ตกตะกอนแล้วจะถูกย่อยสลายแบบแอนแอโรบิก บ่อแฟกคัลเททีฟมีความลึกประมาณ 1-2 m น้ำทิ้งจะถูกกักเป็นเวลาหลายวันเพื่อให้คงตัวและไม่เป็นที่น่ารังเกียจเมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ

#### 3) บ่อแอโรบิก (Aerobic Ponds)

บ่อแอโรบิก เป็นบ่อที่มีแบคทีเรียและสาหร่ายแขวนลอยอยู่ มีออกซิเจนทั่วทั้งบ่อ และมีสภาพเป็นแอโรบิกตลอดความลึก บ่อแอโรบิกได้รับออกซิเจนจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายและการเติมอากาศที่ผิวหน้า บ่อแอโรบิกนี้แบ่งออกเป็น 2 แบบ ตามวัตถุประสงค์การทำงาน คือ

3.1) บ่อแอโรบิกแบบผลิตออกซิเจนให้มากที่สุด บ่อแบบนี้มีความลึกได้ถึงประมาณ 1-1.5 m อาจมีการกวนเป็นระยะๆ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพดีที่สุด โดยใช้เครื่องสูบน้ำหรือเครื่องเติมอากาศแบบผิวหน้า



### 3.2) บ่อแอโรบิกแบบผลิตสาหร่ายให้ได้มากที่สุด หรือบ่อที่มีอัตราการ ทำงานสูง (High Rate Ponds)

ใช้สาหร่ายเปลี่ยนน้ำทิ้งให้เป็นสาหร่ายให้ได้มากที่สุด บ่อแบบนี้มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ต่อปริมาตรสูง ความลึกประมาณ 0.2-0.6 m สิ่งที่อยู่ในบ่อต้องได้รับการกวนหนึ่งหรือสองครั้งต่อวัน เพื่อให้ตะกอนที่ตกอยู่ลอยขึ้นมาและจำเป็นต้องมีการแยกสาหร่ายออกจากน้ำเสียขั้นสุดท้าย

#### 4) บ่อบ่ม (Maturation Ponds)

มีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดเชื้อโรค ก่อนปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โดยสภาพภายในบ่อจะเป็นแอโรบิกทั้งหมด ปกติความลึกของบ่อเท่ากับบ่อแฟกัลลเทพิที่ที่ผ่านมาแล้ว (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545)

## 2.1.4 น้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ใช้ในการศึกษา

น้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันส่วนใหญ่ประกอบด้วย สารคอเลสเตอรอล 95-96% น้ำมัน 0.6-0.7% ของแข็งทั้งหมด 4-5% ปริมาณอลูมิเนียม 3.9 mg/l เหล็ก 46.5 mg/l สังกะสี 2.3 mg/l และอื่นๆ รวมทั้งค่าความขุ่น และสีสูงมาก (Ahmad *et al.*, 2006) สีนํ้าตาลในน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ประกอบด้วยสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น รงควัตถุพวกแอนโทไซยานิน และแคโรทีน ซึ่งถูกสกัดมาพร้อมกับน้ำมันและไอนํ้าเนื่องจากเซลล์ผลปาล์มถูกทำลาย สารประกอบพวกโพลีฟีนอล เพคตินแทนนิน และโพลีแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ยังพบสารพวกเมลานอยดิน ซึ่งเป็นผลผลิตของปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์ระหว่างนํ้าตาล และกรดอะมิโนภายใต้สภาวะที่มีอุณหภูมิสูง สารประกอบพวกกัม (Gum) เมื่อถูกความร้อนในขั้นตอนการสกัดน้ำมันปาล์มจะทำให้เกิดสีนํ้าตาลคล้ำสามารถรวมตัวกับเกลือของโลหะจึงเกิดความคงตัวของสีนํ้าเสีย (ปาริชาติ หมั่นสีทา, 2547)

น้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นน้ำเสียจากกระบวนการผลิตซึ่งนํ้าเสียที่มีอุณหภูมิสูงและยังมีน้ำมันหลงเหลืออยู่นั้น ได้ผ่านถังดักไขมัน และเก็บกักอยู่ในบ่อปรับเสถียร (Primary Pond) จากนั้นจึงเข้าสู่ถังปรับสภาพ (Equalization Tank, EQ Tank) เพื่อส่งต่อไปยังระบบหมักแบบไร้อากาศ (Anaerobic digester) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งนํ้าเสียที่ผ่านการบำบัดจากระบบหมักแบบไร้อากาศ ยังคงมีปริมาณมลสารสูงมาก ดังข้อมูลคุณภาพน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตก่อนและหลังผ่านระบบบำบัด ดังแสดงในตารางที่ 2.2 โดยเฉพาะสีที่ยังคงมีสีนํ้าตาลเข้มมาก ซึ่งเมื่อเก็บกักอยู่ในบ่อพักที่เรียงต่อกันแบบอนุกรม อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำใต้ดินได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.5

ตารางที่ 2.2 ลักษณะน้ำเสียก่อนเข้าระบบและออกจากระบบบำบัดแบบแอนแอโรบิกของ  
โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ศึกษา (Puetaipaboon and Chotwattanasak, 2004)

Parameter	Influent		Effluent		Removal Efficiency (%)
	Range	Average	Range	Average	
1. pH	4.69-4.85	4.75±0.05	7.29-7.47	7.36±0.06	-
2. Temperature(°C)	40-45	42±1	36-40	38±1	-
3. COD (mg/L)	21,560-39,200	31,687±6,371	5,880-17,640	11,270±4,100	64
4. BOD <sub>5</sub> (mg/L)	16,950-24,600	20,830±2,861	1,100-2,115	1,564±365	92
5. Alkalinity (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	1,150-1,598	1,308±165	2,578-3,050	2,845±1562	-
6. VFA (mg/L)	6,600-7,200	6,902±339	643-1,425	1,220±288	-



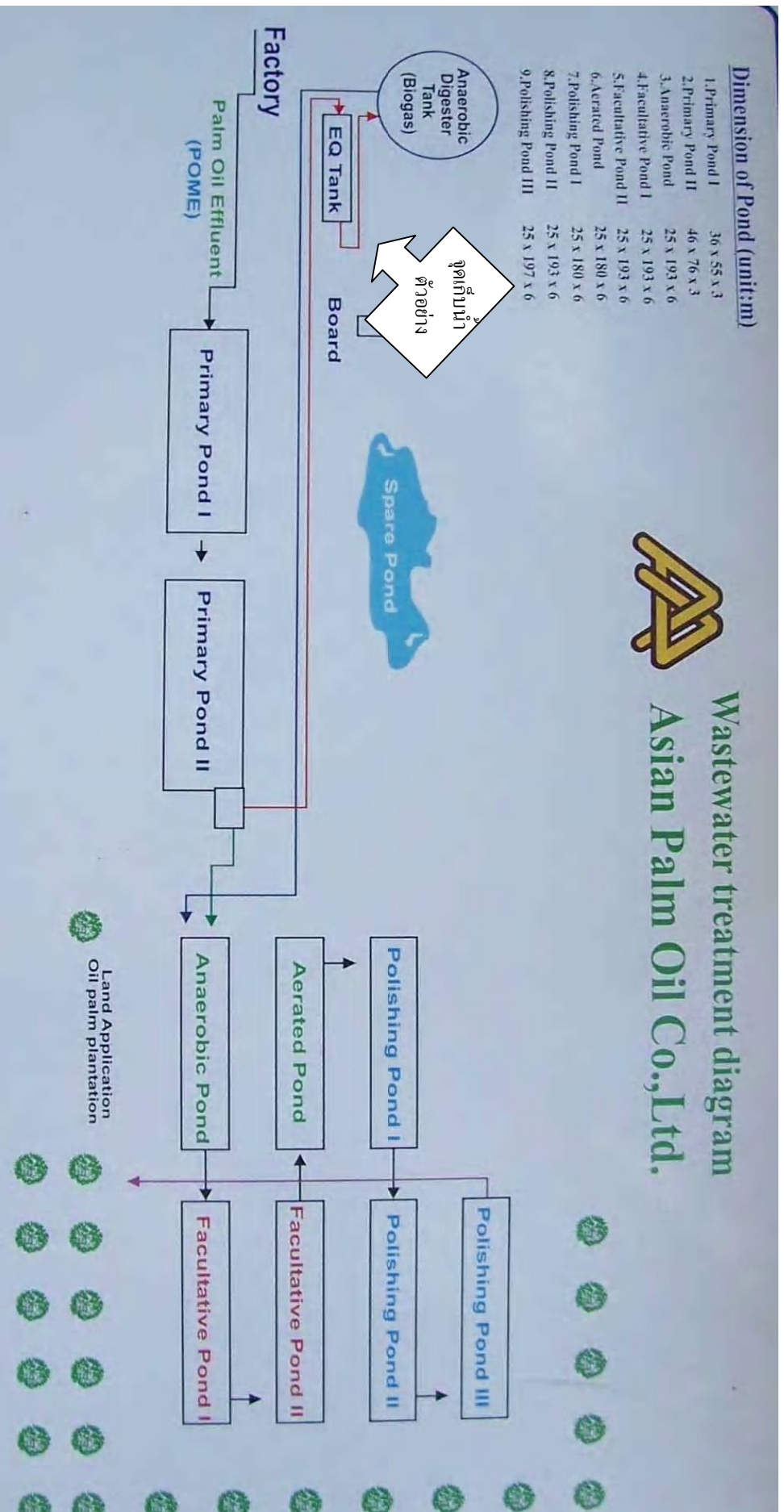
น้ำเสียที่ผ่านระบบหมัก  
แบบไร้อากาศ

น้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบหมัก  
แบบไร้อากาศ

รูปที่ 2.5 สีของน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ก่อนและหลังการบำบัดแบบ

Anaerobic digester

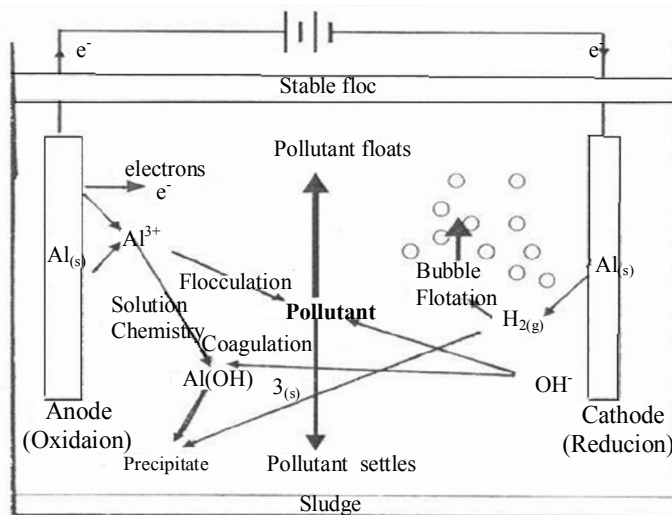
รูปที่ 2.4 ผังระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ภูเก็ต



## 2.2 เซลล์ไฟฟ้าเคมี

### 2.2.1 หลักการของเซลล์ไฟฟ้าเคมี

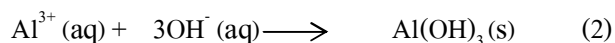
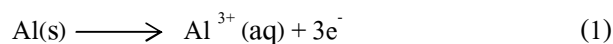
หลักการของเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบอิเล็กโทรไลติกเซลล์นั้นประกอบด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว และสารละลายนำไฟฟ้า เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ถึงปฏิกิริยาที่ใช้โลหะเป็นขั้วไฟฟ้า จะเกิดปฏิกิริยาที่มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนหรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ของขั้วไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เช่น อลูมิเนียม (Al) โดยเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นที่ขั้วบวกหรือขั้วแอโนด ทำให้โลหะเกิดการสึกกร่อน และละลายอยู่ในน้ำ ดังสมการที่ (1) และ (2) ในขณะที่เดียวกันที่ขั้วลบหรือขั้วแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ ซึ่งจะเกิดการแตกตัวให้ก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) และไฮดรอกไซด์ ( $OH^-$ ) ดังสมการที่ (3) เมื่อเวลาผ่านไปน้ำจะมีสภาพเป็นด่าง และทำให้เกิดการตกตะกอนของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ( $Al^{3+}$ ) ในรูปของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ( $Al(OH)_3(s)$ ) (Koby et al., 2003)



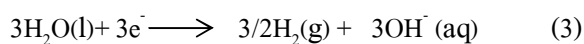
รูปที่ 2.6 การเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการเซลล์ไฟฟ้าเคมี (Emamjomeh and Sivakumar, 2005)

#### ขั้วอลูมิเนียม

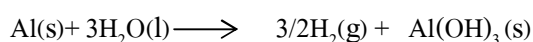
การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่แอโนด



การเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่แคโทด

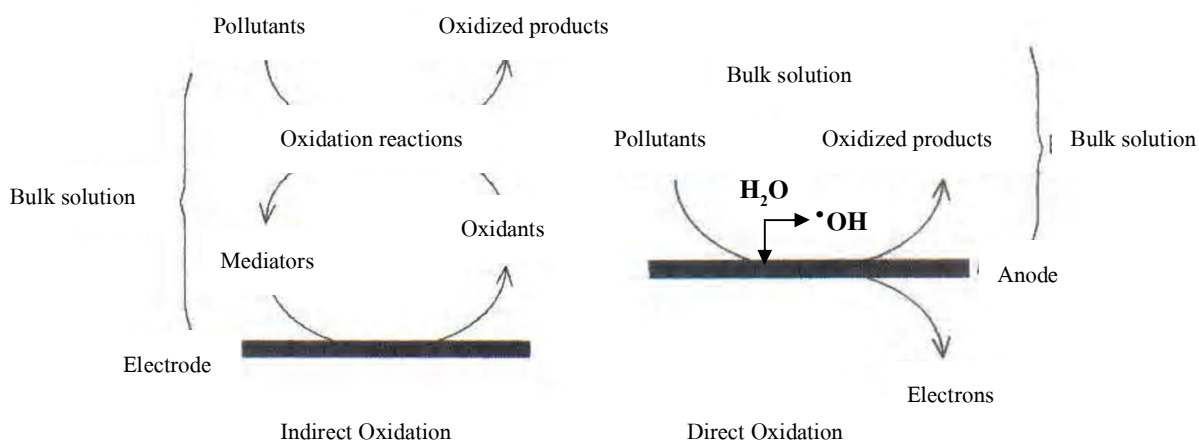


การเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์



## 2.2.2 กระบวนการออกซิเดชัน

การลดลงของมลสาร โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันในกระบวนการเซลล์ไฟฟ้าเคมี ประกอบด้วย 2 วิธีการ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 คือ



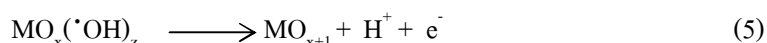
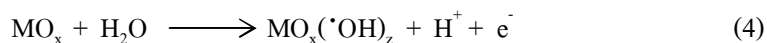
รูปที่ 2.7 การลดลงของมลสาร โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันในกระบวนการไฟฟ้าเคมี (indirect and direct oxidation) (Deng and Englehardt, 2006)

### 1) Indirect Oxidation

เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ ซึ่งทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้า และเกิด Oxidizing Agent หรือ Oxidants ขึ้น ( $\text{ClO}^-$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{ClO}_2$ ) จนกระทั่งเปลี่ยนรูปเป็น Intermediates ซึ่งทำหน้าที่ในการออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ในน้ำเสีย (Oxidation Reactions) ทำให้ได้สารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลซับซ้อนน้อยลง และสารประกอบอินทรีย์สามารถลดลงได้จากการดูดซับกับสารสร้างตะกอนหรือตะกอนลอยตัว

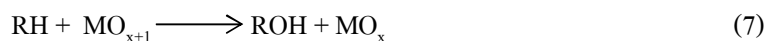
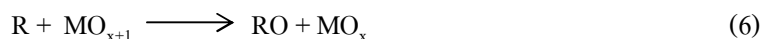
## 2) Direct Oxidation

สารประกอบอินทรีย์จะเกิดปฏิกิริยาขึ้นที่ผิวของขั้วแอโนด โดยการดูดซับกับไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\cdot\text{OH}$ ) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำ และทำให้บริเวณผิวของแอโนดมีปริมาณก๊าซออกซิเจนมากขึ้น ซึ่งเมื่อโลหะออกไซด์ ( $\text{MO}_x$ ) รวมตัวกับน้ำ (physisorbed) เกิด  $\text{MO}_x(\cdot\text{OH})_z$  ดังสมการที่ 4 และ  $\text{MO}_{x+1}$  ดังสมการที่ 5



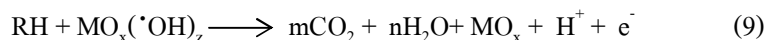
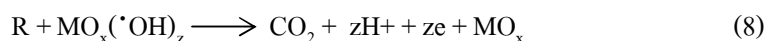
สำหรับวิธีการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ด้วยปฏิกิริยา Direct Oxidation สามารถสรุปได้ 2 วิธีการ คือ

- สารประกอบอินทรีย์ถูกเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุล หรือ Electrochemical Conversion ดังสมการที่ 6 และ 7



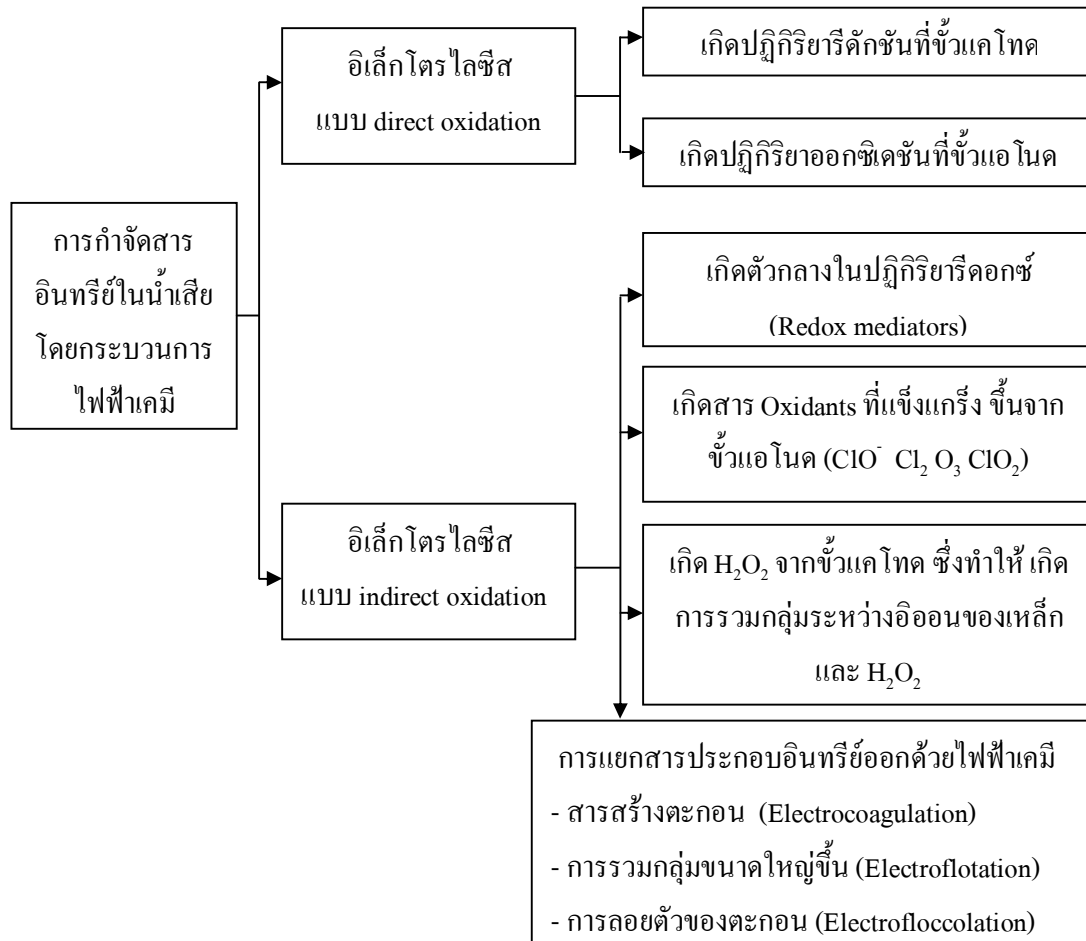
เมื่อ R, organic compounds; z, number of absorbed  $\cdot\text{OH}$  on anode

- สารประกอบอินทรีย์ถูกออกซิไดซ์หรือเผาไหม้ หรือ Electrochemical Combustion ดังสมการที่ 8 และ 9



จาก Electrochemical Conversion สารประกอบอินทรีย์ถูกออกซิไดซ์เพียงบางส่วนทำให้จำเป็นต้องมีการบำบัดต่อด้วยกระบวนการทางชีวภาพต่อไป แตกต่างกับ Electrochemical Combustion หากปฏิกิริยาเกิดขึ้นสมบูรณ์ จะทำให้ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเกิดขึ้น (Deng and Englehardt, 2006; Santos *et al.*, 2006)

ปฏิกิริยาออกซิเดชันจากขั้วแอโนด คือ direct oxidation และ indirect oxidation สามารถสรุปกลไกการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ในน้ำเสีย ดังแสดงในรูปที่ 2.8



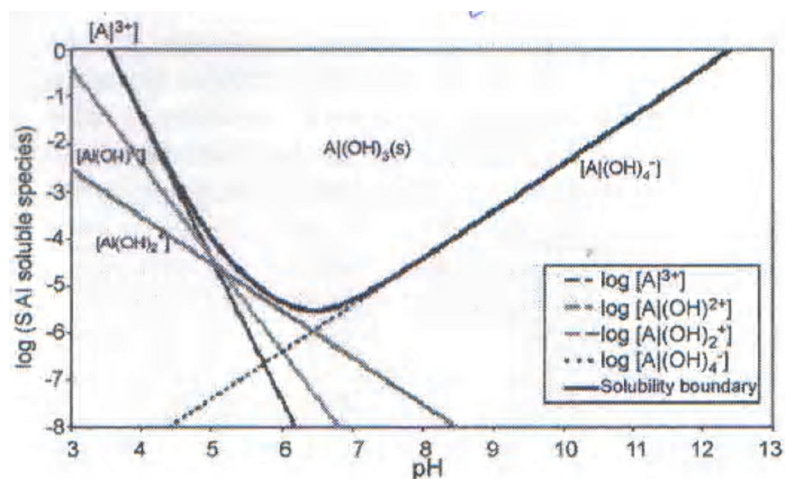
รูปที่ 2.8 สรุปกลไกการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ในน้ำเสียโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันในกระบวนการไฟฟ้าเคมี

ทฤษฎีหรือลำดับการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการไฟฟ้าเคมี ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

- 1) การสูญเสียอิเล็กตรอนที่ขั้วแอโนด เคลื่อนที่ออกสู่สารละลายซึ่งอยู่ในรูปสารสร้างตะกอน (coagulants)
- 2) เกิดความไม่เสถียรและเคลื่อนที่ของสารอินทรีย์ สารแขวนลอยและสารอิมัลชัน ด้วยแรงสนามไฟฟ้า และเกิดไอออนในเซชัน อิเล็กโทรไลซิส ไฮโดรไลซิส และ Free-radical

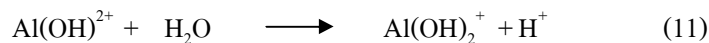
3) สารที่ไม่เสถียรถูกเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมี ทำให้รวมตัวกันหรือถูกดูดซับโดยพวกประจุบวก cationic monomeric ( $\text{Al}^{3+}$   $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ ) หรือ พวกไฮดรอกไซด์ไอออนกลายเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ แยกส่วนออกจากน้ำหรือเปลี่ยนเป็นรูปที่ละลายน้ำได้น้อยจึงถูกกำจัดออกได้ง่าย

จากการพิจารณาตรวจสอบไดอะแกรมชนิดของอลูมิเนียม จากการแตกตัวที่พีเอชต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นว่าอนุมูลอลูมิเนียมอิสระที่อยู่ในสารละลายจะแตกต่างกันออกไปตามค่าพีเอชของน้ำที่บำบัด โดยที่พีเอชต่ำ (pH 2-3) อลูมิเนียมจะอยู่ในรูปของ  $\text{Al}^{3+}$  และ  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$  ส่วนในสภาวะที่เป็นกลาง (pH 4-9) อลูมิเนียมจะอยู่ในรูปที่สามารถตกตะกอนได้ดี เช่น  $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$  ซึ่งสามารถรวมตัวกับอนุมูลต่างๆ และตกตะกอนในรูปของ  $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$  เป็นต้น



รูปที่ 2.9 ชนิดของอลูมิเนียมจากการแตกตัวที่พีเอชต่างๆ (Bensadok *et al.*, 2008)  
การเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอออนของ  $\text{Al}_{(\text{aq})}^{3+}$  กับน้ำหรือไฮดรอกไซด์ไอออน มักจะอยู่ในรูปของ hydroxydes หรือ polyhydroxydes

monomeric Al เช่น  $\text{Al}^{3+}$   $\text{Al}(\text{OH})_2^+$   $\text{Al}(\text{OH})_2^{2+}$  and  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  ดังสมการที่ 10 11 และ 13  
polymeric Al เช่น  $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$   $\text{Al}_2(\text{OH})_5^+$   $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$   $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$  และ  $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$   
amorphous and less soluble เช่น  $\text{Al}(\text{OH})_3$  และ  $\text{Al}_n(\text{OH})_{3n}$  ดังสมการที่ 12



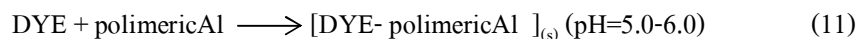
แต่หากที่พีเอชสูงกว่า 9  $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$  จะถูกเปลี่ยนรูปเป็น  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  (Bensadok *et al.*, 2008;

Yu *et al.*, 2008)

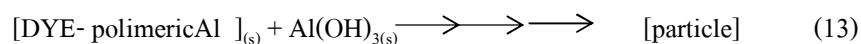
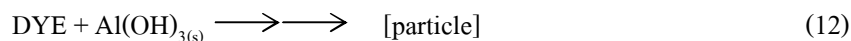


กระบวนการออกซิเดชันเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูง โดยสีจะทำปฏิกิริยาอย่างแรง กับสารออกซิไดซ์ทำให้พันธะเคมีของโมเลกุลสีแตกออกกลายเป็นโมเลกุลที่ไม่มีสี วิธีนี้สามารถใช้บำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณมากได้และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อย ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการกำจัดสีด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี เกิดจากกลไกการทำปฏิกิริยากันระหว่างโมเลกุลของสีและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในสารละลาย ซึ่งปริมาณและชนิดของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับค่า pH ซึ่งประกอบด้วย 2 กลไกหลัก คือ Precipitation ดังสมการที่ 10 และ 11 และ Adsorption ดังสมการที่ 12 และ 13

Precipitation:



Adsorption



$\text{Al(OH)}_3$  ซึ่งเป็นฟอร์มที่มีขนาดใหญ่และสามารถดูดซับกับสารประกอบอินทรีย์หรืออนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุลบ และกลายเป็นสารประกอบที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ (Koby et al., 2003; Mollah et al., 2001)

### 2.2.3 กฎของฟาราเดย์

ปริมาณไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ หมายถึง ปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านลงไปโดยสารละลายของเซลล์อิเล็กโทรไลต์เพื่อให้อิเล็กตรอน 1 โมล ทำปฏิกิริยารีดอกซ์ หรือผลคูณของประจุไฟฟ้ากับจำนวนอิเล็กตรอน 1 โมล

$$\begin{aligned} 1 \text{ Faraday} &= eN = (1.6022 \times 10^{-19} \text{ coulomb})(6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}) \\ &= 96,487 \text{ coulomb mol}^{-1} \end{aligned}$$

$$\text{เมื่อ } X \text{ coulomb} = I (\text{ampere}) \times t (\text{second})$$

กล่าวคือ ปริมาณไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ทำให้เกิดสารแต่ละชนิดที่ขั้วไฟฟ้าจำนวน 1 โมลเท่ากัน เช่น

- ผ่านกระแสไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ลงใน  $Al^{3+}$  จะได้  $Al_{(s)}$  1 โมล = น.น. กรัมโมล/ประจุ  

$$= 26.98/3 = 9 \text{ g}$$
- ผ่านกระแสไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ลงใน  $Fe^{2+}$  จะได้  $Fe_{(s)}$  1 โมล = น.น. กรัมโมล/ประจุ  

$$= 55.85/2 = 27.9 \text{ g}$$

กฎของฟาราเดย์อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ( $I$ , amp.  $cm^{-2}$ ) และขั้วโลหะที่ละลายลงสู่สารละลายนำไฟฟ้า ( $g \text{ metal. cm}^{-2}$ ) ดังสมการที่ 14

$$W = \frac{I \times t \times M}{Z \times F} \quad (14)$$

เมื่อ	W	ปริมาณโลหะของขั้วแอโนดที่แตกตัวออกสู่สารละลาย ( $g \text{ metal. cm}^{-2}$ )
	I	ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ( $I$ , amp. $cm^{-2}$ )
	M	น้ำหนักโมเลกุลของขั้วแอโนด
	t	เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา (Second)
	Z	จำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์
	F	ค่าคงที่ของฟาราเดย์ = 96,500

#### 2.2.4 ค่าการนำไฟฟ้า

ค่าการนำไฟฟ้ามีผลโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย และมีผลต่อปริมาณประจุที่ปล่อยออกมาในปฏิกิริยาการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ตามกฎของฟาราเดย์ที่ว่า 1 ฟาราเดย์ของประจุที่ผ่านเข้าวงจร จะทำให้อลูมิเนียมแตกตัวออกจากขั้วไฟฟ้า 9 g ซึ่งถ้าจำนวนประจุมากขึ้นก็จะทำให้อลูมิเนียม หรือเหล็กหลุดออกจากขั้วไฟฟ้าเพียงพอที่จะทำให้โลหะไฮดรอกไซด์ตกตะกอนได้มากขึ้น ซึ่งจากกฎของโอห์ม กล่าวว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลไปในวงจรได้ จะมีค่าเท่ากับ ผลคูณของกระแสไฟฟ้าและความต้านทาน ดังสมการที่ 15

$$V = I \times R \quad (15)$$

และมีความสัมพันธ์กับงานทางไฟฟ้า ดังสมการที่ 16

$$\text{งานทางไฟฟ้า } (W_{\text{elec}}) = \text{coulomb} \times \text{volt} = nE \times 96,487 \quad (16)$$

ดังนั้น ความต้านทานกระแสไฟฟ้าในกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี คือ ความต้านทานของกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าการนำไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ดังสมการที่ 17

$$R = \frac{I}{C \times A} \quad (17)$$

เมื่อ	R	ความต้านทานของกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ( $\Omega$ )
	I	ระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด (cm)
	C	ค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (mhos/cm)
	A	พื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโทรดที่สัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ( $\text{cm}^2$ )

### 2.2.5 การแลกเปลี่ยนประจุและการเคลื่อนที่ของประจุ

การเคลื่อนที่ของประจุอิเล็กตรอนจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าซึ่งวัดได้ในหน่วยแอมแปร์ (amp.) จำนวนกระแสที่ผ่านไปหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดจะวัดในรูปความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (current intensity, I) การวัดของกระแสซึ่งผ่านเข้าไปในวัสดุ เรียกว่า สภาพนำไฟฟ้าของวัสดุ (conductivity) สำหรับโลหะส่วนใหญ่ จะอยู่ภายใต้กฎของโอห์ม ดังตารางที่ 2.3 ซึ่งสามารถเขียนในรูปความเข้มของสนามไฟฟ้า  $E_f$  (volt/cm) ดังสมการที่ 18

$$E_f = \frac{I}{O} = \frac{V}{O \times R} \quad (18)$$

เมื่อ	I	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน (amp)
	O	สภาพนำไฟฟ้าของวัสดุ (mhos/cm)
	V	ความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุด (volt)
	R	ความต้านทานระหว่างจุดสองจุด ( $\Omega$ )

ตารางที่ 2.3 สภาพนำไฟฟ้าของวัสดุที่นิยมใช้เป็นขั้วไฟฟ้า (Kongsricharoern, 1994)

Material	Conductivity (mhos/cm)
Aluminum (Al)	$3.5 \times 10^5$
Copper (Cu)	$5.8 \times 10^5$
Iron (Fe)	$1.0 \times 10^5$
Silver (Ag)	$1.8 \times 10^5$
Glass, plate	$5.0 \times 10^{-17}$

### 2.2.6 รูปแบบการจัดเรียงของแผ่นอิเล็กโทรดแบบต่าง ๆ (Kongsricharoern, 1994)

สามารถจัดเรียงได้จำนวน 4 แบบ โดยลักษณะการจัดเรียงแผ่นอิเล็กโทรดเป็นดังนี้

- 1) การจัดเรียงอิเล็กโทรดโมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว (Monopolar electrode single cell)

เป็นการจัดเรียงอิเล็กโทรดที่ง่ายที่สุด คือ มีแผ่นอิเล็กโทรดเพียง 1 คู่ โดยขั้วหนึ่งเป็นแอโนดและอีกขั้วหนึ่งเป็นแคโทด ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบนี้ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากการนำไปประยุกต์ใช้นั้นต้องการขนาดใหญ่ ทำให้พื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยามาก

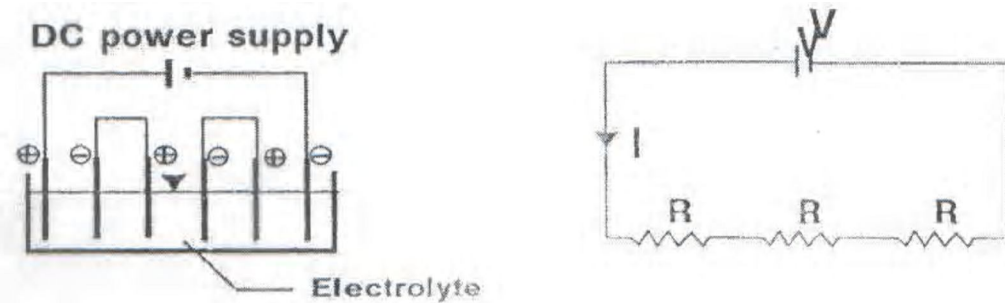


รูปที่ 2.10 การจัดเรียงแผ่นอิเล็กโทรดโมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว

- 2) การจัดเรียงอิเล็กโทรดโมโนโพลาร์แบบอนุกรม (Monopolar electrode in series connection)

มีการจัดเรียงอิเล็กโทรดคล้ายเซลล์เดี่ยวหลายๆ เซลล์มาต่อกัน โดยมีการเชื่อมจุดอิเล็กโทรด เพื่อให้กระแสไฟฟ้ากระจายในแต่ละอิเล็กโทรดดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งหมดหรือจากขั้วไฟฟ้าเดียวไปทุกขั้วไฟฟ้า จึงทำให้ความต้านทาน

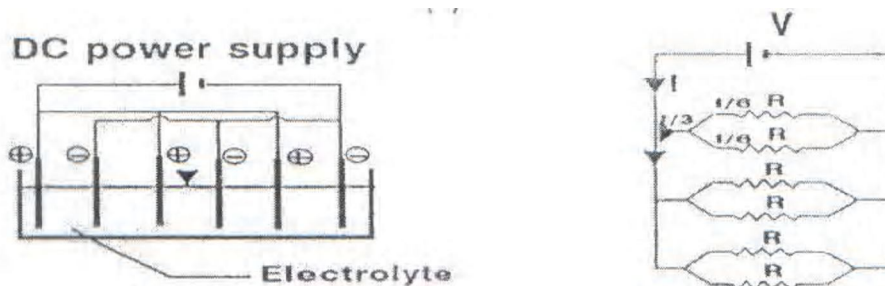
ของระบบสูงมาก เนื่องจากเป็นความต้านทานของทุกขั้วไฟฟ้ารวมกัน ดังนั้น เมื่อเพิ่มจำนวนขั้วไฟฟ้าความต้านทานจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้น้อย



รูปที่ 2.11 การจัดเรียงแผ่นอิเล็กโทรดโมโนโพลาร์แบบอนุกรม

3) การจัดเรียงอิเล็กโทรดโมโนโพลาร์แบบขนาน (Monopolar electrode in parallel connection)

กระแสไฟฟ้าถูกแบ่งไปในแต่ละเซลล์หรือขั้วไฟฟ้า ความต้านทานของระบบจึงเป็นความต้านทานของแต่ละขั้วไฟฟ้า หรือขึ้นอยู่กับความต้านทานภายในเซลล์นั้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดยที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าของระบบจะเท่ากัน ดังนั้น เมื่อเพิ่มจำนวนขั้วไฟฟ้า ความต้านทานจะลดลง ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้มากกว่าจำนวนขั้วไฟฟ้าน้อย

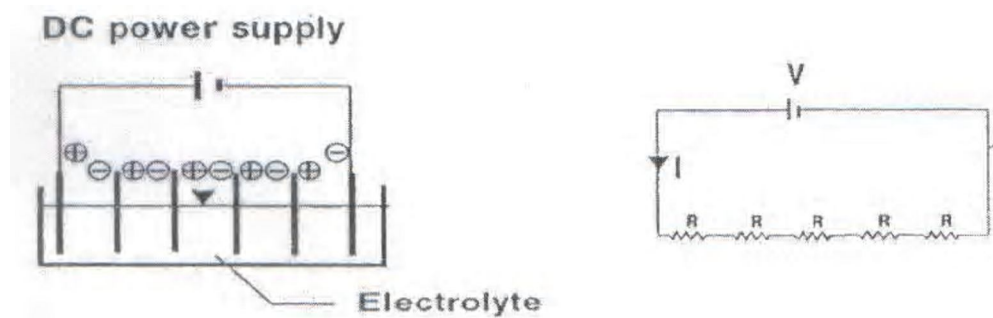


รูปที่ 2.12 การจัดเรียงแผ่นอิเล็กโทรดโมโนโพลาร์แบบขนาน

4) การจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ (Bipolar electrode with multiple series)

มีจุดเชื่อมอิเล็กโทรดเพียง 2 จุดเท่านั้น เฉพาะแผ่นอิเล็กโทรดที่อยู่ปลายนอกสุด แต่ละแผ่นของอิเล็กโทรดมีด้านหนึ่งเป็นขั้วบวกซึ่งทำหน้าที่เป็นแอโนด และอีกด้านหนึ่งเป็นขั้วลบทำหน้าที่เป็นแคโทด ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ในทางไฟฟ้านั้นแผ่นอิเล็กโทรดจะมีการจัดเรียงเซลล์แบบอนุกรม โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านต้องการความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูง เนื่องจากความ

ด้านทานที่สูงกว่าของเซลล์ซึ่งต่อกันแบบอนุกรม แต่จะมีค่ากระแสไฟฟ้าของระบบเท่ากัน นั่นคือ มีกระแสไฟฟ้าเดียวกันไหลผ่านอิเล็กโทรดทั้งหมด ซึ่งการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบนี้จะทำให้ง่ายต่อการติดตั้งและบำรุงรักษาใน ขณะทำการใช้งาน แต่มีข้อเสีย คือ กระแสไฟฟ้าระหว่างเซลล์จะรั่วง่ายกว่า



รูปที่ 2.13 การจัดเรียงแผ่นอิเล็กโทรดโมโนโพลาร์แบบไบโพลาร์

### 2.2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์ไฟฟ้าเคมี

ทิศทางของอ็อนและกระแสไฟฟ้าที่ไหลจะขึ้นอยู่กับ การควบคุม ดังนี้

- 1) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าจะมีสัดส่วนโดยตรงกับกระแสภายนอกที่ให้แก่ระบบ
- 2) การเคลื่อนที่ของประจุอ็อน ความสามารถของอ็อนที่จะนำกระแสไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับประจุของอ็อนและขนาดของอ็อน
- 3) อุณหภูมิในการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วน โดยตรงกับอุณหภูมิของสารละลาย โดยที่ความสามารถในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 2 ต่อการเพิ่มอุณหภูมิขึ้น  $1^{\circ}\text{C}$
- 4) พื้นที่สัมผัสของขั้วไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดของผิวสัมผัสใหญ่จะดี สำหรับการถ่ายและรับอิเล็กตรอน โดยที่กระแสไฟฟ้าจะมีสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วไฟฟ้า
- 5) ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า ซึ่งจำนวนกระแสไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับระยะทางที่อ็อนเคลื่อนที่จากขั้วไฟฟ้า ระยะห่างมากกระแสไฟฟ้าก็จะเพิ่มขึ้น
- 6) จำนวนประจุของอ็อนจะมากขึ้น เมื่อมีการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้ามากขึ้น
- 7) ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้าได้ ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายจะมีสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารนั้น ๆ (วรรณกรรม เทียงวรรณกานต์, 2533 อ้างถึงใน ปารีชาติ หมั่นสีทา, 2547)

## 2.2.8 หลักการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมี

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการไฟฟ้าเคมี ขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่ประยุกต์ใช้ โดยมีหลักการที่สำคัญในการออกแบบ คือ

- 1) ควรออกแบบเป็นแบบที่ง่ายที่สุด ค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด
- 2) ต้องสามารถเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีได้อย่างสมบูรณ์ ก่อนที่จะผ่านสู่ขั้นตอนอื่นในกรณีที่มีกระบวนการอื่นเข้ามาเกี่ยวข้อง ควรทำแยกจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี
- 3) เมื่อจำเป็นต้องมีการกวนผสมหรือการไหลของสารละลาย ต้องพิจารณาการถ่ายเทมวลสารเป็นอันดับแรก เช่น การกวนผสมควรใช้แผ่นกั้นหรือใบพัด
- 4) ควรออกแบบให้มีการกระจายความต่างศักย์ไฟฟ้าสม่ำเสมอทั่วพื้นผิวของอิเล็กโทรด
- 5) ควรออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดน้อย เพราะระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดยิ่งมาก จะต้องใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง ซึ่งจะทำให้ค่าไฟฟ้าสูงขึ้น
- 6) การเลือกวัสดุที่ใช้ทำเครื่องปฏิกรณ์นั้น ต้องคำนึงถึงสารอิเล็กโทรไลต์และสารผลิตภัณฑ์ที่จะเกิดขึ้นจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี สามารถคงทน ไม่สึกกร่อนภายใต้สภาพใช้งาน
- 7) การเลือกวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรด ต้องคำนึงถึงปฏิกิริยาเคมีที่จะเกิดขึ้นให้สอดคล้องกับความต้องการของระบบบำบัดและปฏิกิริยาข้างเคียงที่อาจเกิดขึ้นได้ เช่น แกร์ไฟต์ ไม่นิยมใช้ทำอิเล็กโทรด เนื่องจากจะถูกออกซิไดซ์ด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และมีราคาแพง เป็นต้น
- 8) การวางอิเล็กโทรดในเครื่องปฏิกรณ์นั้นมี 2 แบบ ขึ้นกับความต้องการของวิธีที่ใช้ในการบำบัด ถ้าต้องการกำจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีทำให้ลอยควรวางอิเล็กโทรดในแนวตั้ง เพื่อให้ฟองก๊าซที่เกิดขึ้น จากปฏิกิริยาเคมีเป็นตัวพาสารแขวนลอยดังกล่าวขึ้นมาพร้อมกับตะกอนเบาที่เกิดขึ้น ถ้าต้องการกำจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีตกตะกอนควรวางอิเล็กโทรดในแนวนอน โดยให้ขั้วแอโนดอยู่ล่าง (กัณหา มาศ สุทธิเรืองวงศ์, 2539)

## 2.2.9 ข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการไฟฟ้าเคมี (Avsar *et al.*, 2007)

### ข้อดี

- 1) ใช้อุปกรณ์ไม่ยุ่งยาก และง่ายต่อการเดินระบบ เพราะควบคุมด้วยกระแสไฟฟ้า จึงต้องการการดูแลรักษาน้อย
- 2) สามารถบำบัดน้ำได้สะอาดเป็นที่น่าพอใจ ปราศจากทั้งกลิ่นและสี

- 3) ตะกอนที่เกิดขึ้น มีความเสถียรและรีดน้ำออกได้ง่าย
  - 4) ตะกอนลอยตัวมีขนาดใหญ่และมีพันธะร่วมกับน้ำน้อยจึงสามารถแยกออกด้วยการกรองได้อย่างรวดเร็ว
  - 5) น้ำเสียที่ออกจากระบบจะมีของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total dissolved solids) น้อยมากเมื่อเทียบกับการบำบัดโดยใช้สารเคมี ซึ่งช่วยลดต้นทุนในการนำน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดแล้วกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง
  - 6) สามารถลดอนุภาคคอลลอยด์ขนาดเล็กได้ดี โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของไอออนที่ทำหน้าที่เป็นสารสร้างตะกอน
  - 7) ไม่มีการใช้สารเคมี และตะกอนที่เกิดขึ้นน้อยมาก
  - 8) สามารถใช้อย่างสะดวกในทุกพื้นที่ที่มีไฟฟ้า
- ข้อเสีย**
- 1) จำเป็นต้องเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าใหม่อยู่เสมอ
  - 2) บางพื้นที่ค่าไฟฟ้าค่อนข้างสูงมาก
  - 3) การรับอิเล็กตรอนจนกลายเป็นฟิล์มเกาะที่ขั้วแคโทด ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง
  - 4) ต้องการน้ำเสียที่มีค่าการนำไฟฟ้าค่อนข้างสูง

### 2.2.10 การประยุกต์ใช้ระบบไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำเสีย

- 1) การแยกสารโดยทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบซึ่งพบว่าในน้ำเสียมีปริมาณสารคอลลอยด์มาก ทำให้น้ำมันแตกเป็นอนุภาคขนาดเล็กๆ ยากต่อการกำจัดน้ำมันออกจากน้ำเสีย การนำกระบวนการไฟฟ้าเคมีมาใช้ในการบำบัด อิเล็กโตรดที่ทำหน้าที่เป็นแอโนดจะแตกตัวให้โลหะออกไซด์ ซึ่งทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ ทำให้เกิดตะกอนเบาขณะที่แคโทดจะเกิดฟองก๊าซที่ช่วยในการลอยตัวของน้ำมัน การสลายตัวของอิเล็กโตรดไม่ได้ขึ้นกับปริมาณและขนาดของอิเล็กโตรด แต่ขึ้นกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัด (Chen, 2004)
- 2) การกำจัดฟีนอลในน้ำเสียโดยวิธีไฟฟ้าเคมี การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนด ขึ้นอยู่กับความว่องไวของสารอินทรีย์กับตัวทำปฏิกิริยา ความเข้มข้นของสารอินทรีย์และวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโตรด (Adhoum and Monser, 2004)
- 3) การกำจัดไอออนต่างๆ ในน้ำเสียโดยไฟฟ้าเคมี มีหลักการดังนี้ คือ เปลี่ยนเลขออกซิเดชันของไอออนให้อยู่ในรูปที่มีความเป็นพิษน้อยกว่า จากนั้นจะรวมตัวกับตะกอนเบา



เพื่อให้ได้สารประกอบเชิงซ้อน และถูกกำจัดออกจากระบบโดยการตกตะกอน ทำให้สามารถกำจัดของเสียออกจากระบบบำบัดน้ำเสียได้ (ทรงยศ สารภูษิต, 2547; วรรณรัตน์ วัฒนชัย, 2547)

4) การกำจัดสีของน้ำเสียโดยวิธีไฟฟ้าเคมี จะเปลี่ยนรูปไอออนของโลหะที่ก่อให้เกิดสีโดยอาศัยการถ่ายเทของอิเล็กตรอนในระบบ เรียกว่า เกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งทำให้เลขออกซิเดชันของไอออนของโลหะเปลี่ยนไป และสามารถดูดซับกับสารแขวนลอยต่างๆ ที่อาจก่อให้เกิดสีด้วยตะกอนเบาในรูปของออกไซด์ หรือไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการแตกตัวของอิเล็กโทรดทำให้เกิดการตกตะกอนขึ้น (อานนท์ คุญฎีพรรณ, 2538)

## 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.3.1 การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

จากการศึกษาพบว่า มีการนำน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมาผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการลดมลสารและลดสีในน้ำเสีย เช่น

**จิราวรรณ ศรีโยม (2546)** ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีสารประกอบอินทรีย์ด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน ( $\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2$ ) ร่วมกับการตกตะกอน โดยวิเคราะห์การลดลงของค่า COD และสารเคมีตกค้างในน้ำและตะกอน ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ (สารละลายฟีนอล สารละลาย 2,4-ไดคลอโรฟีนอล) คือ 1,100 และ 500 ppm อัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำเสียสังเคราะห์ต่อไอออนของเหล็กเท่ากับ 1 : 0.65 และ 1 : 0.45 ตามลำดับ พบว่า การใช้ปฏิกิริยาเฟนตันร่วมกับการตกตะกอนด้วยแคลเซียมออกไซด์สามารถกำจัดค่า COD สารตกค้างในน้ำ และตะกอน (ปริมาณไอออนของซัลเฟต) ในกรณีของฟีนอลได้ดีกว่ากรณีของ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ทั้งสองอัตราส่วน (1 : 0.65 1 : 0.45) กรณีปริมาณไอออนของเหล็กตกค้างทั้งสองกรณี (สารละลายฟีนอล สารละลาย 2,4-ไดคลอโรฟีนอล) พบว่า ปริมาณไอออนของเหล็กอยู่ในตะกอนเกือบ 100% และในกรณีปริมาณไอออนของแคลเซียมตกค้างในน้ำและตะกอน พบว่า ฟีนอลมีปริมาณไอออนของแคลเซียมตกค้างในตะกอนมากกว่า 2,4-ไดคลอโรฟีนอลในทั้งสองอัตราส่วน และเมื่อนำอัตราส่วนที่ 2 (1 : 0.45) ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมมาประยุกต์ใช้กับการบำบัดน้ำทิ้งจากบริษัททักมิณปาล์ม (2521) จำกัด พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด COD และสีประมาณ 60% และ 90% ตามลำดับ เมื่อเติม CaO ปริมาณไอออนของเหล็กในตะกอนมีค่าประมาณ 100% และเมื่อคิดเปอร์เซ็นต์ของตะกอนที่ได้เทียบกับปริมาณของ CaO ที่เติมคือ 70.67%

**Najafpour et al., (2005)** ศึกษาผลของปริมาณสารอินทรีย์ที่มีต่อระบบ RBC (Rotating Biological Contactor) ในน้ำทิ้งโรงงานน้ำมันปาล์ม พบว่า ความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ขึ้นอยู่กับปริมาณของแบคทีเรียเริ่มต้นและยัดเกาะอยู่บริเวณจานชีวภาพ พบแบคทีเรียพวก *Saccharomyces cerevisiae* มีการเจริญเติบโตสูงสุดในช่วงระยะ 5 วันแรกโดยอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสูงสุด  $0.82 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{day}$  ส่งผลให้หลังจากวันที่ 5 ค่า COD BOD TKN และ SS ลดลง 88% 91% 80% และ 89% ตามลำดับ ที่อัตราการไหลต่ำสุด คือ  $1.1 \text{ l/hr}$  ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ลดลงเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น ส่วนอัตราการลดลงของแบคทีเรีย คือ  $0.30 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{day}$  ทำให้เกิดแบคทีเรียทดแทนขึ้นมาทำหน้าที่ต่อ ส่งผลให้ปริมาณตะกอนเพิ่มสูงขึ้นด้วย

**Yacob et al., (2005)** ศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับการปล่อยก๊าซมีเทนจากถังหมักแบบไร้อากาศ (open digesting tanks) ในน้ำเสียโรงงานน้ำมันปาล์ม พบว่า ก๊าซมีเทนถูกปล่อยออกมา  $518.9 \text{ kg/day/open digesting tanks}$  ซึ่งมีอัตราการไหล  $5.4 \text{ /min/m}^2$  และความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซมีเทนที่ถูกปล่อยออกมากับค่า COD คือ  $0.109 \text{ kg CH}_4/\text{kg COD Removal}$  นอกจากนี้ยัง พบว่า มีการปล่อยก๊าซมีเทนเฉลี่ยแล้ว  $3.5 \text{ kg/ton}$  ของน้ำเสียที่ออกจากโรงงานน้ำมันปาล์ม สำหรับการบำบัดน้ำเสียแบบแอนแอโรบิก ซึ่งองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพขึ้นอยู่กับ ฤดูกาลที่ให้ผลผลิตและการเก็บเกี่ยวผลปาล์ม ประการที่สอง คือ กิจกรรมของโรงงานมีผลต่อคุณภาพ และปริมาณของน้ำเสียที่ออกจากระบวนการผลิตของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

นอกจากนี้การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม สามารถสรุปสาระสำคัญจากเอกสารอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ซึ่งพบว่า น้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม มีปริมาณสารอินทรีย์ในปริมาณสูงและมีสีน้ำตาลเข้ม สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพและเคมี แต่น้ำทิ้งที่ได้จากการบำบัดส่วนมากก็ยังคงไม่ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้ง จำเป็นต้องนำหลายระบบมาบำบัดต่อเนื่องกันให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสีให้ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้ง เพื่อที่โรงงานสามารถปล่อยน้ำเสียที่ต้องเก็บกักไว้ลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้

ตารางที่ 2.4 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้องในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัด  
น้ำมันปาล์ม

วิธีการบำบัด	ประสิทธิภาพการบำบัด	อ้างอิง
ยีสต์ <i>Candida tropicalis</i> F-29 และ <i>C. palmeoliophila</i> Y-128 และเชื้อรา ST4 และ ST29	ST29 เติงที่อุณหภูมิ 45 °C สามารถกำจัดน้ำมันได้สูงสุดร้อยละ 99.65 และได้ปริมาณมวลชีวภาพ 44.56 g/l	ปรีชา มุณีศรี, 2539
ระบบบำบัดแบบไร้อากาศ (up-flow anaerobic sludge blanked reactor, UASB)	ค่า COD เริ่มต้น เท่ากับ 16.6 g/l ระยะเวลาเก็บกัก 0.9 day สามารถกำจัดค่า COD ได้ร้อยละ 90	Borja <i>et al.</i> , 1996
A Modified Anaerobic baffled Reactors	ลดมีเทนได้ร้อยละ 67.3-71.2 ในช่วงระยะเวลาเก็บกัก 3-10 day และมีประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD และน้ำมัน/ไขมัน ได้ร้อยละ 87.4-95.3 และ 44.1-91.3 ตามลำดับ	Faisal and Unno, 2001
เชื้อราทนความร้อนที่ผลิตพอลิเมอร์ <i>Rhizopus</i> sp. ST4	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น ค่า COD ลดลงร้อยละ 72.6 แต่การผลิตก๊าซชีวภาพ 0.97 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> /day ซึ่งต่ำกว่าน้ำเสียที่ไม่ผ่านการบำบัดขั้นต้น โดยค่า COD ลดลงร้อยละ 56.1 การผลิตก๊าซชีวภาพ 1.16 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> /day	Pechsuth <i>et al.</i> , 2001
การใช้บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน	อัตราการไหลของน้ำที่ป้อนเข้าระบบ 0.086 m <sup>3</sup> /day ระยะเวลาเก็บกัก 15 day มีประสิทธิภาพการกำจัดค่า TSS ร้อยละ 90.49 ค่า BOD <sub>5</sub> ร้อยละ 74.11 ค่า COD ร้อยละ 59.06 และสี ร้อยละ 61.65	จุฑารัตน์ หนูสุข, 2546
ระบบบำบัดแบบไร้อากาศที่สถานะมีโซฟิลิก	ค่า BOD <sub>5</sub> และ ค่า COD ลดลงร้อยละ 92 และ 64 ตามลำดับ ทำให้ได้ก๊าซมีเทน 0.51 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg COD.day สามารถนำก๊าซชีวภาพไปผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ในโรงงาน บ้านพัก ระบบบำบัด	Puetpaiboon and Chotwattanasak, 2004
ระบบเอเอสปีอาร์ ภายใต้สถานะเทอร์โมฟิลิก (55±1 °C), มีโซฟิลิก (35±1 °C)	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจะเพิ่มขึ้นตามภาระบรรทุก ซึ่งอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อปริมาตรถังเฉลี่ย เท่ากับ 0.06-0.08 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> /day ของถังปฏิกรณ์	ธนาวัฒน์ รักกมล, 2549

ตารางที่ 2.4 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้องในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัด  
น้ำมันปาล์ม (ต่อ)

วิธีการบำบัด	ประสิทธิภาพการบำบัด	อ้างอิง
	เทอร์โมฟิลิก และ 0.06-0.07 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> /day ของถัง ปฏิกิริยามีโซฟิลิก	
กระบวนการดูดซับด้วย ถ่านกัมมันต์ 2 ชนิด คือ กะลามะพร้าวและไม้โกงกาง	ถ่านกัมมันต์ที่ทำจากไม้โกงกางสามารถดูดซับค่า COD และสีได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่ทำจากกะลา มะพร้าว	จินตนา แก้วบริสุทธิ์ (2541)
กระบวนการเติมโอโซน	ประสิทธิภาพในการกำจัดสีและค่าCOD จะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเติมโอโซน ประสิทธิภาพ ในการกำจัดสีและค่า COD สูงสุดคือ 97% และ 43% ตามลำดับ ที่ระยะเวลาในการเติม โอโซน 6 hr	พนา เมฆตรง และ คณะ (2544)
กระบวนการรวมตะกอนด้วย ไฟฟ้าที่ใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า พื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้า 11.0×6.0 cm <sup>2</sup> ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้า 1.5 cm จัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบ เซลล์เดี่ยว	สภาวะที่เหมาะสมโดยใช้น้ำเสียจากบ่อบ่ม คือ ความต่างศักย์ 10 volt เวลาเก็บกัก 30 min ซึ่งมี ประสิทธิภาพในการกำจัดสี และค่า COD คือ 91.77 % และ 51.84 % ตามลำดับ ส่วนบ่อบำบัด แบบไม่ใช้ออกซิเจน คือ ความต่างศักย์ 12 volt เวลาเก็บกัก 30 min มีประสิทธิภาพในการกำจัด สี และค่า COD คือ 85.89 และ 56.88 % ตามลำดับ	ปาริชาติ หมั่นสีทา (2547)
การใช้เอนไซม์เปอร์ ออกซิเดสจากใบยางพารา	เอนไซม์เปอร์ออกซิเดส 0.04 unit/ml บำบัดน้ำทิ้ง 500 ml ที่มีความเข้มข้นของสารประ กอบฟีนอล 1.508 mg/l เป็นเวลา 15 min มีประสิทธิภาพการ กำจัดร้อยละ 95 เมื่อใช้เอนไซม์เปอร์ออกซิเดส 0.04 unit/ml 0.5 ml ร่วมกับการเติมโอโซนทำให้ กำจัดสารประกอบฟีนอลได้ร้อยละ 100 และ 74	ธรรมศักดิ์ ศรีสุขใส (2547)
เทคโนโลยีเมมเบรน คือ Ultrafiltration (UF) และ Reverse Osmosis (RO)	เมมเบรนมีประสิทธิภาพในการลดค่าต่างๆ เช่น สี กลิ่น ความขุ่น ของแข็งละลายน้ำ น้ำมันและไขมัน แร่ธาตุและโลหะต่างๆ ให้ต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำดื่ม (USEPA) กำหนดไว้ โดยค่า COD ลดลงจาก 15,000 mg/l เป็น 12,400 และ 88 mg/l เมื่อผ่าน UF	Ahmad <i>et al.</i> , (2006)

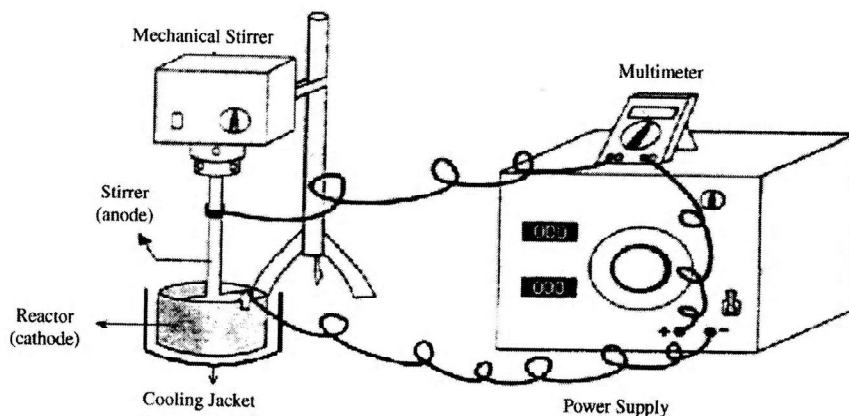
ตารางที่ 2.4 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้องในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัด  
น้ำมันปาล์ม (ต่อ)

วิธีการบำบัด	ประสิทธิภาพการบำบัด	อ้างอิง
	และ RO ตามลำดับ ค่าความขุ่น ลดลงจาก 34 NTU เป็น 0.65 และ 0.02 NTU เมื่อผ่าน UF และ RO ตามลำดับ สำหรับสีและกลิ่นไม่ปรากฏ	

### 2.3.2 การบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี

จากการศึกษาพบว่า มีการนำกระบวนการไฟฟ้าเคมีมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียเพื่อกำจัดค่ามลสาร อื่น ๆ อีก เช่น

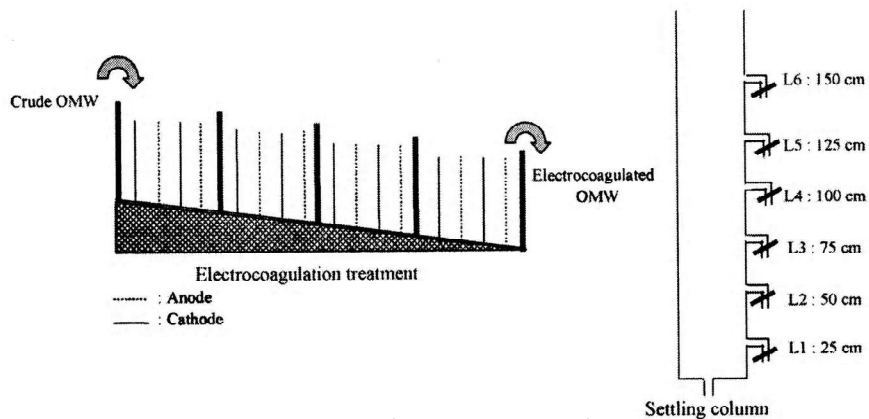
Un *et al.*, (2006) ศึกษาการใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าบำบัดน้ำเสียจากโรงงานน้ำมันมะกอก โดยใช้ระบบการทดลองเป็นแบบทรงกระบอกสูง 10 cm ภายในมีความกว้าง 10 cm ซึ่งใช้เหล็กเป็นถังปฏิกริยาหรือขั้วแคโทด และใช้ลูมิเนียมเป็นขั้วแอโนด ปริมาตรน้ำตัวอย่างในระบบ 300 ml ดำเนินการทดลองแบบ batch ดังรูปที่ 2.14 พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันไขมัน และค่า COD คือ 99% และ 70% ตามลำดับ ภายในเวลา 2 hr ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 20-75 mA/m<sup>2</sup> ปริมาณความเข้มข้นของ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> และ polialuminum chloride (PAC) ที่เหมาะสมสำหรับการทดลองนี้ คือ 2.3% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5 gL<sup>-1</sup> PAC ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ประสิทธิภาพการกำจัดค่า COD จะเพิ่มขึ้นจาก 56% 64% และ 72% ที่ 0.12% และ 2.3% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ตามลำดับ สำหรับต้นทุนของพลังงานในการเดินระบบ พบว่า ต้นทุนของพลังงานของระบบบำบัด



รูปที่ 2.14 ระบบการทดลองบำบัดน้ำเสียจากโรงงานน้ำมันมะกอก แบบ Cylindrical

แบบแอโรบิก และแบบแอนแอโรบิกรวมกันน้อยกว่าระบบบำบัดโดยการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า คือ  $€0.6-0.75 \text{ kg}^{-1}$  ของ COD ที่ถูกกำจัด ซึ่งสถานะที่ดีที่สุดของการทดลองนี้คือ จะต้องมีประสิทธิภาพการบำบัดที่เหมาะสม มีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง (Total investment) และค่าใช้จ่ายในการเดินระบบและบำรุงรักษา (Operational cost) ต่ำ

**Khoufi et al., (2006)** ศึกษาผลของการบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นจากโรงงานน้ำมันมะกอก โดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าที่มีต่อระบบบำบัดแบบแอนแอโรบิก โดยใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าขนาด  $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$  ระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด 2 cm จัดเรียงแบบอนุกรม (Series) ซึ่งภายในระบบแบ่งเป็นออกเป็น 4 ส่วน ดังรูปที่ 2.15 แต่ละส่วนประกอบด้วย 2 ขั้วแอโนด และ 2

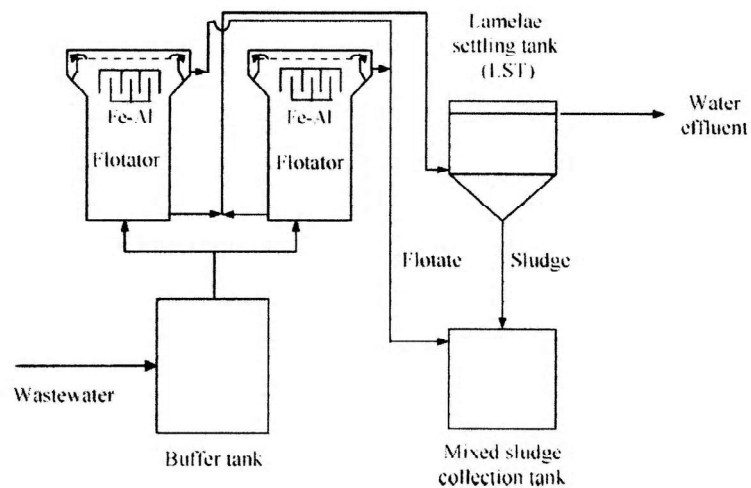


รูปที่ 2.15 ระบบการทดลองบำบัดน้ำเสียจากโรงงานน้ำมันมะกอก แบบ Series

ขั้วแคโทด ส่วนถังตกตะกอนมีลักษณะเป็นทรงกระบอกสูง 2 m กว้าง 20 cm เวลาเก็บกัก คือ 1 2 3 4 5 6 และ 7 day ซึ่งจะเก็บตัวอย่างตามจุดที่ความสูงต่างๆ คือ 25 50 75 100 125 และ 150 cm ซึ่งพบว่า ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) และค่าความขุ่นลดลงตามระยะเวลาในการตกตะกอน และจุดที่เก็บตัวอย่าง คือ ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาในการตกตะกอนนานและจุดเก็บตัวอย่างสูงจากกันถึงปฏิกริยามาก เช่น ค่า TSS ลดลง 6 5 และ 2  $\text{mg/l}$  ที่จุดเก็บตัวอย่าง L1 L2 และ L3 ตามลำดับ สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดค่า COD หลังผ่านระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า คือ 33.6% จากค่าเริ่มต้น ค่า  $\text{BOD}_5$  เพิ่มขึ้นจาก 12.5 เป็น 14.5  $\text{g/l}$  ทำให้ค่าการย่อยสลายทางชีวภาพ ( $\text{BOD}_5:\text{COD}$ ) เพิ่มขึ้นจาก 0.33 เป็น 0.58

**Hotnan et al., (2006)** ศึกษาการนำตะกอนที่มาจากการบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า มาใช้ในระบบบำบัดแบบไร้อากาศ (Anaerobic Digestion) ซึ่งน้ำเสียชุมชน

ชนที่นำมาทดลองได้ผ่านการแยกขยะ หรือของแข็งขนาดใหญ่ออกก่อนแล้ว จึงปล่อยเข้าสู่ถังปรับสภาพ (Buffer Tank) จากนั้นส่งต่อไปยังถังแยกตะกอนลอยตัว (Flotators Tank) ปริมาตรจุ 300 ml เวลาเก็บกัก 15 min สำหรับมลสารที่อยู่ในรูปของตะกอนลอยตัวซึ่งอยู่ด้านบนจะถูกปั๊มส่งไปยังถังเก็บรวบรวมตะกอนส่วนน้ำเสียที่เหลือจะถูกส่งไปพักในถังตกตะกอน และตะกอนที่เกิดขึ้นจะรวมกับตะกอนลอยในถังเก็บรวบรวมตะกอน ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งจากการทดลองแยกตะกอนและน้ำที่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี และบำบัดด้วยระบบหมักแบบไร้อากาศ พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดค่า COD สูงสุด คือ 80% ปริมาณฟอสฟอรัสและธาตุอาหารอื่นๆ ในตะกอนลดลงจนไม่สามารถตรวจพบได้ รวมทั้งปริมาณของเหล็กและอลูมิเนียมที่ค่อนข้างสูง คือ 40-70 g/kg dry sludge และ 30-50 g/kg



รูปที่ 2.16 ระบบการทดลองบำบัดน้ำเสียชุมชน

dry sludge ตามลำดับ ประกอบกับค่า pH ลดลงมาก ส่งผลให้ปริมาณก๊าซจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศเกิดขึ้นน้อยกว่า การใช้ตะกอนจากน้ำเสียชุมชนที่ไม่ผ่านระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ซึ่งมีสาเหตุมาจากการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบบำบัดแบบไร้อากาศอาศัยจุลินทรีย์ในการย่อยสลายมลสารต่างๆ ดังนั้น ปริมาณฟอสฟอรัสและไนโตรเจน ถือเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นมากสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งฟอสฟอรัสจากกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้านั้นได้ตกตะกอนร่วมกับเหล็กหรืออลูมิเนียมเกือบทั้งหมดทำให้จุลินทรีย์เข้าไปย่อยสลายหรือนำมาใช้ได้ยาก

**Essadki et al., (2007)** กรณีศึกษาการใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีในการสร้างตะกอนและการเกิดตะกอนลอยตัวในถังปฏิกรณ์ (External-loop airlift reactor) เพื่อประยุกต์ใช้ในการกำจัดสีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม ซึ่งถังปฏิกรณ์มีลักษณะเป็นทรงกระบอก ดังรูปที่ 2.17 โดย





ค่า COD จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียไปเป็นพลังงานความร้อนมากขึ้น อันจะทำให้อุณหภูมิของน้ำเสียหลังทดลองเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตามสามารถลดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้า โดยการลดระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด แต่ทำให้การแพร่กระจายหรือการเคลื่อนที่ของไอออนน้อยลงด้วย

นอกจากนี้การบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี สามารถสรุปสาระสำคัญจากเอกสารอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังแสดงในตารางที่ 2.5 ซึ่งพบว่า กระบวนการไฟฟ้าเคมีมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสี และค่า COD โดยค่าประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียแต่ละประเภทขึ้นอยู่กับหลายองค์ประกอบ เช่น ชนิดของขั้วไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะเวลาเก็บกัก เป็นต้น

ตารางที่ 2.5 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้องในการบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี

ชนิดของน้ำเสีย	ชนิดของขั้วไฟฟ้า	ประสิทธิภาพการบำบัด	อ้างอิง
อุตสาหกรรมสิ่งทอ	เหล็ก และ อลูมิเนียม ขนาด 46 x 55 x 3 mm ขั้วละ จำนวน 2 แผ่น วางห่างกัน 11 mm จัดเรียงแบบขนาน	สภาวะเป็นกรดความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 150 A/m <sup>2</sup> เวลาที่เกิดปฏิกิริยา 10 min ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมสามารถ ลดความขุ่นและซีโอดีได้ดี รวมทั้งใช้พลังงานไฟฟ้า (kWh)/kg COD น้อยกว่าขั้วไฟฟ้าชนิดเหล็ก	Koby et al., (2003)
โรงฆ่าสัตว์ปีก	เหล็ก และ อลูมิเนียม ขนาด 4.6 x 5.5 x 0.3 cm ขั้วละ จำนวน 2 แผ่น วางห่างกัน 1.1 cm จัดเรียงแบบขนาน	ค่ากระแสไฟฟ้า 150 A/m <sup>2</sup> เวลา 25 min ที่ค่า pH ประมาณ 2-3 อลูมิเนียมสามารถกำจัด COD ได้ดีกว่าเหล็ก โดยลดได้ถึง 93%	Koby et al., (2005)
กำจัดฟลูออไรด์ (F <sup>-</sup> )	อลูมิเนียม ขนาด 25 cm x 10 cm ขั้วแคโทดจำนวน 3 แผ่น ขั้วแอโนดจำนวน 2 แผ่น วางห่างกัน 0.5 cm	สภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือ เวลาในการทำปฏิกิริยา 55 min ความเข้มข้นของ F <sup>-</sup> เริ่มต้น 10 mg/l กระแสไฟฟ้า 1.5 A และระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด 0.5 cm มวลของ Al <sup>3+</sup> /F <sup>-</sup> พบว่าไม่มีความแตกต่างกันระหว่างการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบ monopolar และ bipolar	Emamjomeh et al., (2005)

ตารางที่ 2.5 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้องในการบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี (ต่อ)

ชนิดของน้ำเสีย	ชนิดของขั้วไฟฟ้า	ประสิทธิภาพการบำบัด	อ้างอิง
การลดลงของน้ำมันจากการลอยตัวแยกออกจากน้ำเสีย	อลูมิเนียม ขนาด 10 x 5 x 1.2 cm จำนวน 2 แผ่น วางห่างกัน 2 cm แบบขนาน	ประสิทธิภาพในการบำบัดของเหลวสองชนิดที่ไม่รวมกันลดลง เมื่อความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าและความเข้มข้นของของเสียลดลง ส่วนการบริโภคพลังงานไฟฟ้าลดลงเมื่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดลดลง	Carmona <i>et al.</i> , (2006)
การกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากได้ห้องเรือน้ำมัน	เหล็กและอลูมิเนียม ขนาด 10 x 11 cm จำนวน 8 แผ่น วางห่างกัน 1.5 cm แบบขนานและแบบไบโพลาร์	แบบขนานมีการบริโภคพลังงานไฟฟ้าและก่อให้เกิดปริมาณสลัดจ์น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการจัดเรียงแบบไบโพลาร์ เมื่อเติมสาร $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ลงไปในน้ำตัวอย่าง พบว่า หลังการทดลองค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และช่วยให้การสูญเสียของแผ่นอิเล็กโทรดในระหว่างทำปฏิกิริยามีการสูญเสียลดลง	Asselin <i>et al.</i> , (2007)
อุตสาหกรรมน้ำมันมะกอก	อลูมิเนียม ขนาด 5 x 6 cm จำนวน 4 แผ่น วางห่างกัน 1 และ 2 cm แบบอนุกรม	ค่ากระแสไฟฟ้า 75 $\text{mA/m}^2$ ประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบฟีนอล และค่า COD 79% เมื่อใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า และ 58% เมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า ส่วนที่ pH 4.49 อะลูมิเนียมมีประสิทธิภาพในการลดสีได้ 90%, เหล็ก 43%	Adhoum and Monser, (2004)
อุตสาหกรรมที่มาจากภาคเกษตร (agro-industry)	อลูมิเนียมและเหล็ก ขนาด 10 x 11 cm จำนวน 8 แผ่น วางห่างกัน 1.5 cm แบบขนาน และแบบไบโพลาร์	อลูมิเนียมมีประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD <sub>s</sub> 86.3 และ 33.5% สำหรับน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์และกระบวนการแปรรูปเนื้อสัตว์ รวมทั้งค่า pH ของน้ำเสียหลังการทดลอง เพิ่มขึ้นน้อยกว่าการใช้ขั้วเหล็ก ที่ค่ากระแสไฟฟ้า $5 \times 10^{-3} \text{ A/m}^2$ เวลา 90 min	Drogui <i>et al.</i> , (2007)

ตารางที่ 2.5 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้องในการบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี (ต่อ)

ชนิดของน้ำเสีย	ชนิดของขั้วไฟฟ้า	ประสิทธิภาพการบำบัด	อ้างอิง
การกำจัดโบรอน	อลูมิเนียม ขั้วละ 8 แผ่น วางห่างกัน 0.5 cm จัดเรียงแบบขนาน	ประสิทธิภาพการกำจัดโบรอนเพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH, ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ( $\text{mA/cm}^2$ ) และปริมาณสารนำไฟฟ้า ( $\text{CaCl}_2$ ) เพิ่มขึ้น ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมคือ $8.0\text{--}3.6\text{ mA/cm}^2$ และ $10\text{ mM}$ ตามลำดับ	Yilmaz <i>et al.</i> , (2005)
อุตสาหกรรมฟอกย้อม	อลูมิเนียม ขนาด $4.6 \times 5.5 \times 0.3\text{ cm}$ ขั้วละ จำนวน 2 แผ่น วางห่างกัน $1.1\text{ cm}$ จัดเรียงแบบขนาน	ประสิทธิภาพการกำจัด COD เพิ่มขึ้น คือ $13.6\text{ kg COD Removal/kg Al}$ ฉะนั้น PAC มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD ได้มากกว่า สารส้ม (Alum) ในกรณีที่ใช้ร่วมกับกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า	Can <i>et al.</i> , (2006)

ดังนั้นในการเลือกระบบไฟฟ้าเคมีมาใช้งานจึงต้องหาสภาวะที่เหมาะสมของน้ำเสียชนิดนั้นๆ ก่อนนำมาประยุกต์ใช้งานจริง

สำหรับการบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มในงานวิจัยนี้ ใช้อลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรด เนื่องจากสามารถกำจัดสารอินทรีย์และสีได้ดีที่ค่าพีเอชของน้ำเสียเริ่มต้น 4-6 ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่ใกล้เคียงกับน้ำเสียจริงจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม คือ 4.71 และมีการจัดเรียงอิเล็กโทรดทั้ง 3 รูปแบบ คือ แบบขนาน แบบอนุกรม และแบบไบโพลาร์ ทั้งนี้เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของการใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งทั้ง 3 รูปแบบ ต่างมีความสามารถในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ได้แตกต่างกัน เช่นเดียวกันกับพื้นที่ของอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต้องมีพื้นที่มากพอในการกำจัดสารอินทรีย์ และสีในน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่มีปริมาณสูงมากได้ สอดคล้องกับระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดที่ไม่มากเกินไป จนทำให้ความต้านทานของระบบสูง และส่งผลให้การเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้ากับอนุภาคในน้ำเสียเกิดขึ้นน้อย

## บทที่ 3

### แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 แผนการวิจัย

งานวิจัยในครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยมีแผนการทดลอง ดังนี้

1. การทดลองที่ 1 ศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีจากการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบขนาน
2. การทดลองที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีจากการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบอนุกรม
3. การทดลองที่ 3 ศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีจากการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบผสม (ไบโพลาร์)
4. การทดลองที่ 4 การเปรียบเทียบลักษณะของน้ำเสียก่อนเข้าสู่กระบวนการไฟฟ้าเคมีและไม่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี (ชุดควบคุม)

ดังแสดงกรอบแนวคิดการทดลองในรูปที่ 3.1

#### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้เป็นการทดลองแบบกะ ในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งใช้เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง ดังต่อไปนี้

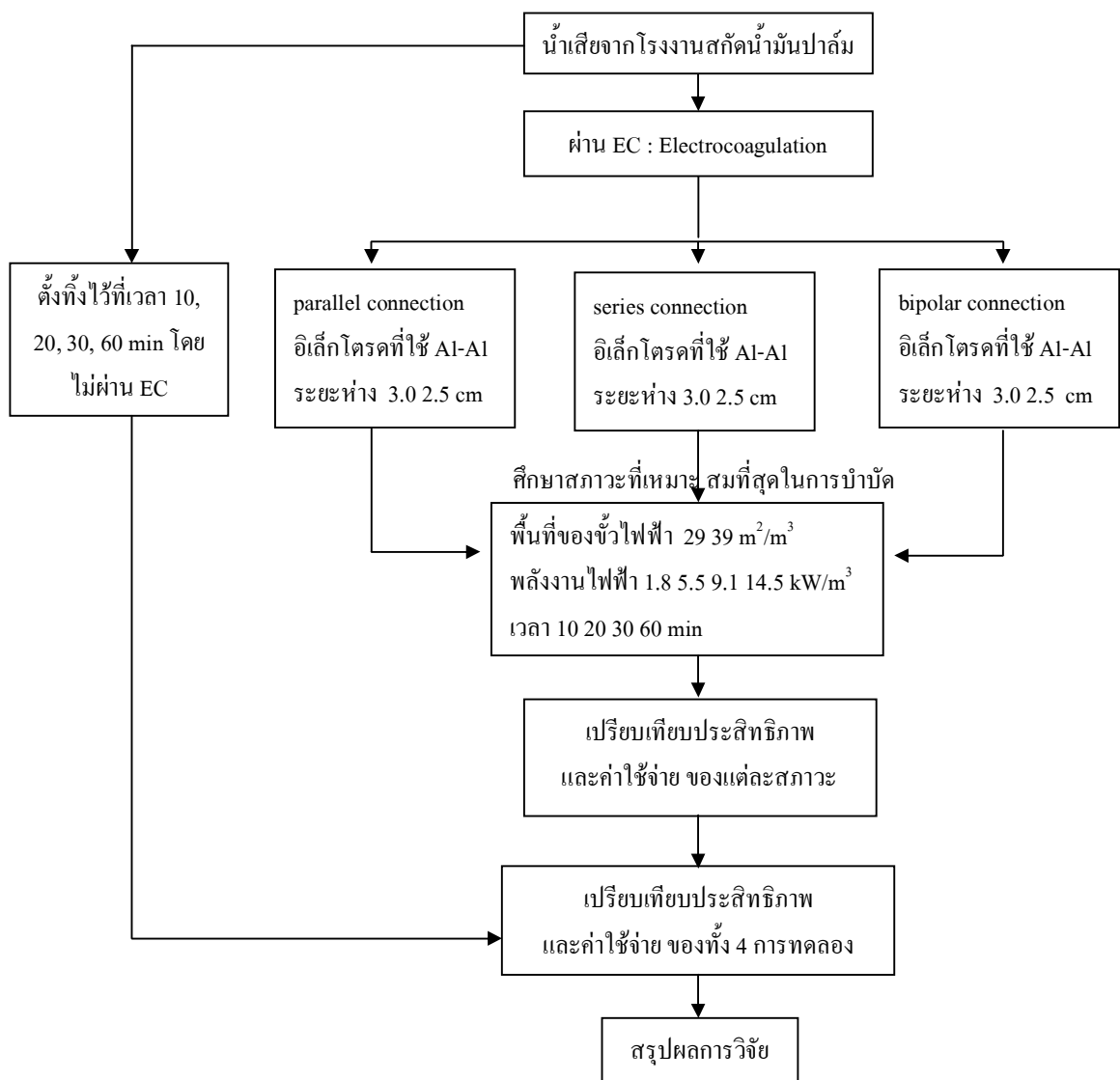
(1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply) ที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ได้ในช่วง 0-55 volt และค่ากระแสไฟฟ้าได้ในช่วง 0-30 A

(2) อิเล็กโทรดหรือขั้วไฟฟ้า (Electrode) มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าทำด้วยอลูมิเนียม มีความกว้าง 6 cm ยาว 9 cmหนา 1 mm พื้นที่ในการทำปฏิกิริยา  $54 \times 10^{-4} \text{ m}^2$  ดังแสดงในรูปที่ 3.2 การเตรียมแผ่นอลูมิเนียม โดยการนำแผ่นอลูมิเนียมแช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

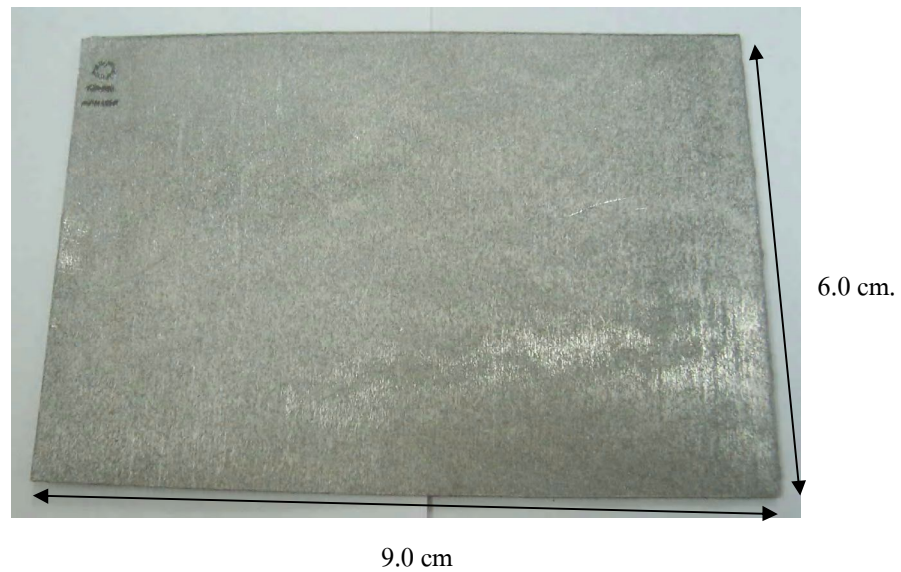
20% V/V นำมาขัดด้วยแปรงลวดและชะล้างด้วยน้ำสะอาด หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$  เวลา 1 hr และทำให้เย็นด้วยเครื่องดูดความชื้น (Desiccator) แล้วจึงนำมาชั่งน้ำหนัก

(3) เซลล์อิเล็กโทรลิติก (Electrolytic Cell) หรือถังปฏิกิริยา มีลักษณะเป็นรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า ทำด้วยพลาสติกอะครีลิก (Acrylic) มีความกว้าง 7 cm ยาว 20 cm สูง 13 cm ปริมาตรใช้งาน 1.10 l ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และระบบการทดลองที่ใช้งานจริง ดังแสดงในรูปที่ 3.4

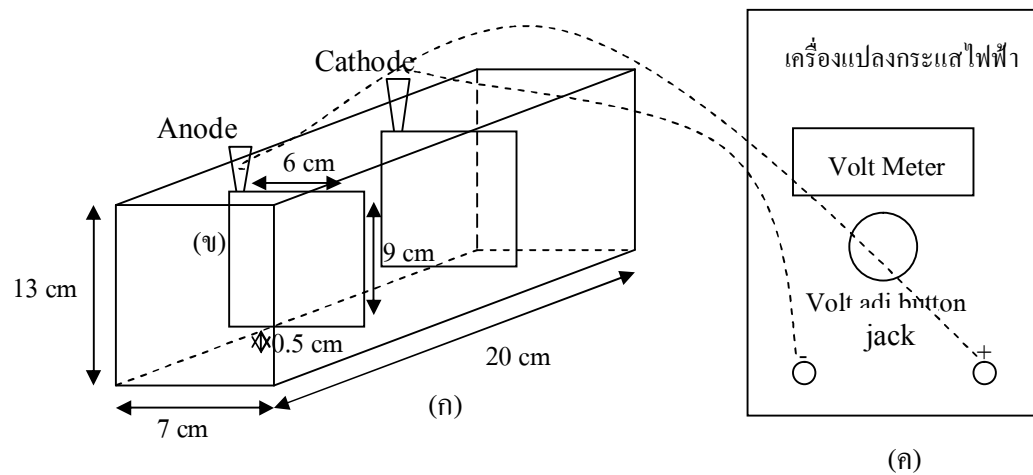
(4) สารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงตารางที่ 3.1



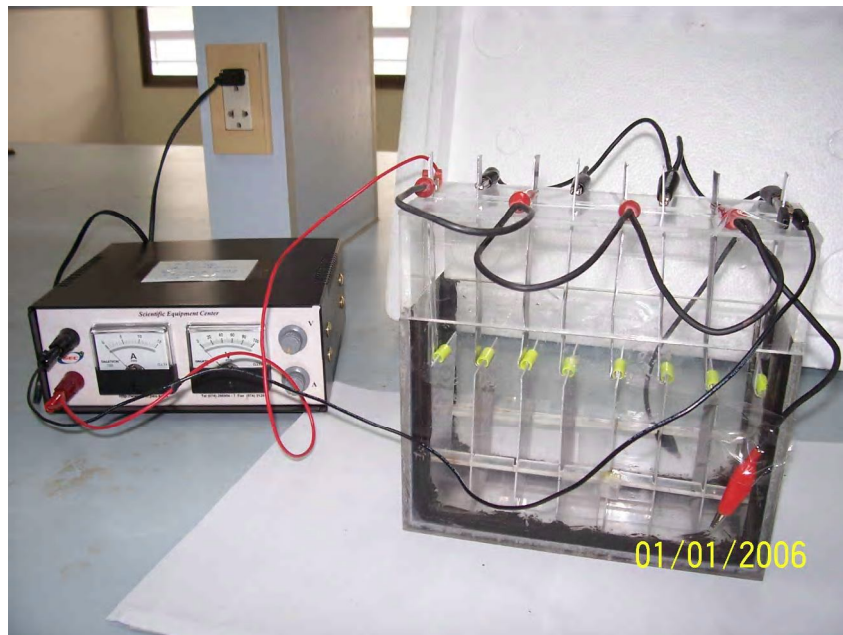
รูปที่ 3.1 กรอบแนวคิดการทดลอง



รูปที่ 3.2 ลักษณะของขั้วอลูมิเนียมที่ใช้ในการทดลองซึ่งผ่านการแช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 20% V/V



รูปที่ 3.3 องค์ประกอบของระบบไฟฟ้าเคมี (ก) ถังปฏิกิริยา (ข) ขั้วไฟฟ้า (ค) เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (DC Power Supply)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.4 ระบบไฟฟ้าเคมีที่ใช้ทดลอง (ก) ระบบไฟฟ้าเคมี (ข) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply)

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
<u>น้ำใส</u>	
1. สี	Spectrophotometric Method
2. อุณหภูมิ	Thermometer*
3. pH	pH Meter*
4. Total Suspended Solids	Total Suspended Solids Dried at 103-105 °C
5. ปริมาณตะกอน	SV <sub>60</sub>
6. Conductivity	Conductivity meter*
7. น้ำหนักข้าวอลูมิเนียมที่ใช้	Weight Balance*
10. UV <sub>254</sub> absorption	UV spectrometer
8. BOD <sub>5</sub>	Azide Modification
9. TCOD	Closed Reflux, Titrimetric method
10. ปริมาณอลูมิเนียม	Atomic Absorption Spectrophotometry
<u>ตะกอน</u>	
1. Total Solids	Total Solids Dried at 103-105 °C
2. ปริมาณอลูมิเนียม	Atomic Absorption Spectrophotometry

\* เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์

ที่มา : (APHA, AWWA and WEF 2005)

### 3.3 ขั้นตอนการทดลอง

ดำเนินการจัดสร้างและติดตั้งระบบการทดลอง โดยติดตั้งจำนวนของอิเล็กโทรดที่ต้องการ ให้มีการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบขนาน (monopolar electrode in parallel connection) แบบอนุกรม (monopolar electrode in series connection) และ แบบไบโพลาร์ (Bipolar electrode with multiple series) ระยะห่างจากกันถึง 0.5 cm จากนั้นใส่น้ำตัวอย่างปริมาตร 1.10 l ลงในถังปฏิกิริยา การทำงานของระบบมีลักษณะคือ ทำการปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าที่ต้องการให้คงที่ ตลอดช่วงการทดลอง (พลังงานไฟฟ้า = กระแสไฟฟ้า×ความต่างศักย์ไฟฟ้า) แล้วจึงเก็บตัวอย่างน้ำ



เสียในการทดลองที่เวลาต่างๆ เพื่อนำไปวิเคราะห์ ซึ่งแผนการทดลองสำหรับงานวิจัยมีขั้นตอนดังนี้

(1) การทดลองที่ 1 ศึกษาประสิทธิภาพ และสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีซึ่งมีการจัดเรียงอิเล็กโทรด แบบ monopolar electrode in parallel connection เป็นการทดลองแบบกะ (batch) โดยศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียเบื้องต้น และทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อหาค่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุด โดยปรับเปลี่ยนปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพ คือ

- พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า ปรับเปลี่ยน 2 ค่า คือ 29 และ 39  $\text{m}^2/\text{m}^3$
- ค่าพลังงานไฟฟ้า ปรับเปลี่ยน 4 ค่า คือ 1.8 5.5 9.1 และ 14.5  $\text{kW}/\text{m}^3$
- ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา ปรับเปลี่ยน 4 ค่า คือ 10 20 30 และ 60 min

วิธีการทดลองมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- (1.1) วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของน้ำเสียเริ่มต้น ทั้งส่วนของน้ำใส และส่วนของตะกอน
- (1.2) นำน้ำเสีย 1.10 l ใสลงในถังปฏิกิริยา
- (1.3) ต่อขั้วไฟฟ้าทั้งขั้วบวกและลบซึ่งทำจากอลูมิเนียม เข้ากับเครื่อง DC Power Supply โดยวางห่างกัน 3.0 และ 2.5 cm สำหรับพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 และ 39  $\text{m}^2/\text{m}^3$  ตามลำดับ
- (1.4) เปิดเครื่อง DC Power Supply แล้วปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้า เพื่อให้ได้ค่าพลังงานไฟฟ้าต่างๆ ตามที่กำหนด (1.8 5.5 9.1 และ 14.5  $\text{kW}/\text{m}^3$ )
- (1.5) จับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (10 20 30 และ 60 min)
- (1.6) เมื่อครบตามเวลา อ่านค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าอีกครั้ง แล้วจึงปิดเครื่อง DC Power Supply วัดอุณหภูมิ หลังการทดลอง จากนั้นนำไปหาค่า  $\text{SV}_{60}$  และนำน้ำใส่ที่ได้มาหาค่า บีโอดี ทีซีโอดี ที พีเอช ของแข็งแขวนลอย ค่าความนำไฟฟ้า และปริมาณอลูมิเนียม ซึ่งการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามวิธีดังตารางที่ 3.1
- (1.7) ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆ ดังตารางที่ 3.2
- (1.8) เปรียบเทียบหาสภาวะที่เหมาะสมทั้งในด้านประสิทธิภาพในการบำบัดและค่าใช้จ่ายระหว่างการบำบัดน้ำเสียของแต่ละสภาวะ ดังรูปที่ 3.5

(2) การทดลองที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพ และสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีซึ่งมีการจัดเรียงอิเล็กโทรด แบบ monopolar electrode in series connection ทำการทดลองดังเช่นการทดลองที่ 1 แต่เปลี่ยนการจัดเรียงอิเล็กโทรด แบบ monopolar electrode in parallel connection เป็นแบบ monopolar electrode in series connection

(3) การทดลองที่ 3 ศึกษาประสิทธิภาพ และสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีซึ่งมีการจัดเรียงอิเล็กโทรด แบบ Bipolar electrode with multiple series ทำการทดลอง ดังเช่น

การทดลองที่ 1 แต่เปลี่ยนการจัดเรียงอิเล็กโทรด แบบ monopolar electrode in parallel connection เป็น แบบ Bipolar electrode with multiple series

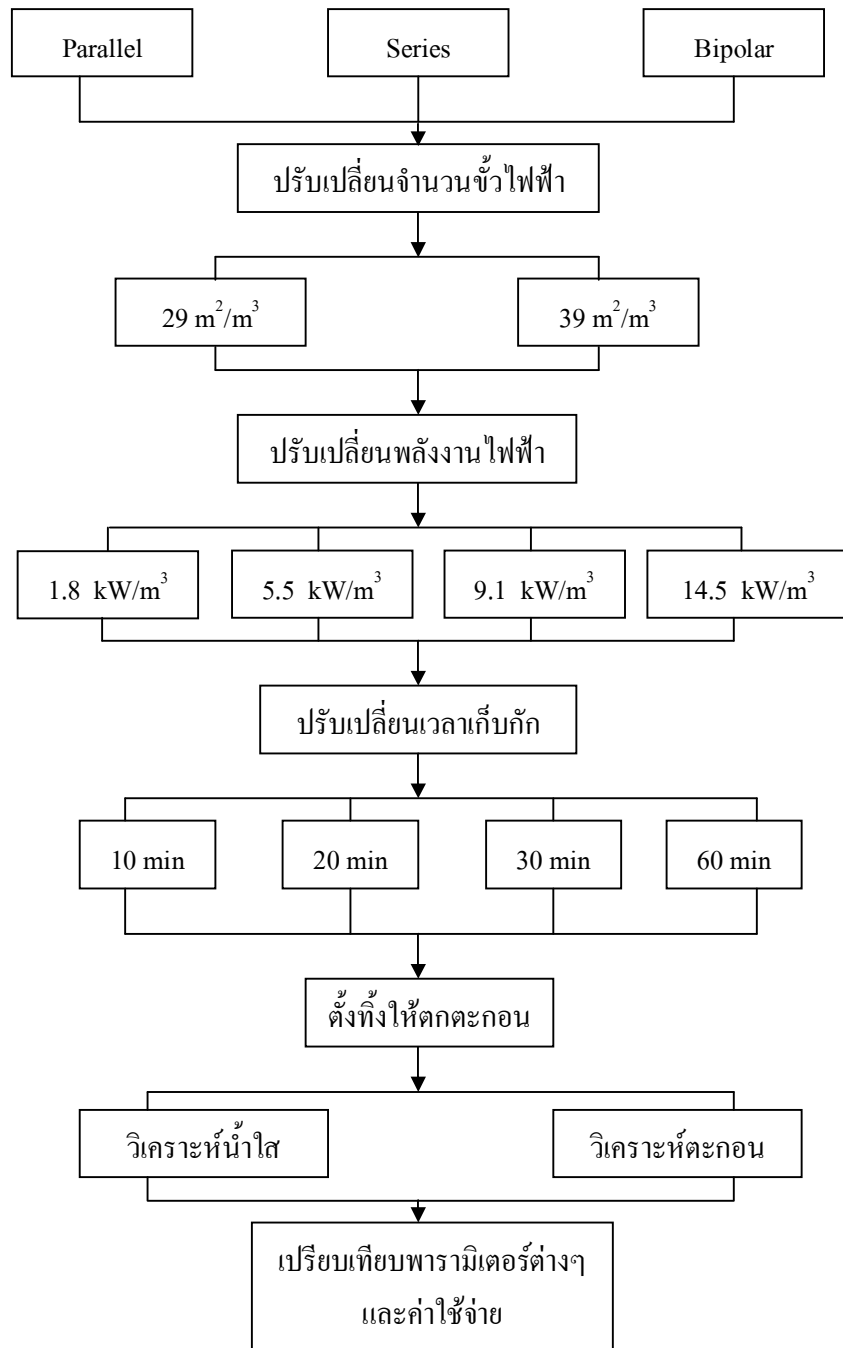
ตารางที่ 3.2 ค่าตัวแปรที่ใช้วิเคราะห์

การทดลองที่	ขั้นตอนที่	ตัวแปรอิสระ	ตัวแปรคงที่	ตัวแปรตาม
1	1.1	เวลาเก็บกัก <ul style="list-style-type: none"> <li>• 10 min</li> <li>• 20 min</li> <li>• 30 min</li> <li>• 60 min</li> </ul>	พลังงานไฟฟ้า 1.8 kW/m <sup>3</sup> ขั้วไฟฟ้าเป็นอลูมิเนียม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้า 3.0 cm	กระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้า พารามิเตอร์ในตารางที่ 3.1
	1.2	เวลาเก็บกัก <ul style="list-style-type: none"> <li>• 10 min</li> <li>• 20 min</li> <li>• 30 min</li> <li>• 60 min</li> </ul>	พลังงานไฟฟ้า 5.5 kW/m <sup>3</sup> ขั้วไฟฟ้าเป็นอลูมิเนียม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้า 3.0 cm	กระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้า พารามิเตอร์ในตารางที่ 3.1
	1.3	เวลาเก็บกัก <ul style="list-style-type: none"> <li>• 10 min</li> <li>• 20 min</li> <li>• 30 min</li> <li>• 60 min</li> </ul>	พลังงานไฟฟ้า 9.1 kW/m <sup>3</sup> ขั้วไฟฟ้าเป็นอลูมิเนียม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้า 3.0 cm	กระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้า พารามิเตอร์ในตารางที่ 3.1
	1.4	เวลาเก็บกัก <ul style="list-style-type: none"> <li>• 10 min</li> <li>• 20 min</li> <li>• 30 min</li> <li>• 60 min</li> </ul>	พลังงานไฟฟ้า 14.5 kW/m <sup>3</sup> ขั้วไฟฟ้าเป็นอลูมิเนียม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้า 3.0 cm	กระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้า พารามิเตอร์ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.2 ค่าตัวแปรที่ใช้วิเคราะห์(ต่อ)

การทดลองที่	ขั้นตอนที่	ตัวแปรอิสระ	ตัวแปรคงที่	ตัวแปรตาม
1	1.5	เวลาเก็บกัก •10 min •20 min •30 min •60 min	พลังงานไฟฟ้า 1.8 kW/m <sup>3</sup> ขั้วไฟฟ้าเป็นอลูมิเนียม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้า 2.5 cm	กระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้า พารามิเตอร์ในตาราง ที่ 3.1
	1.6	เวลาเก็บกัก •10 min •20 min •30 min •60 min	พลังงานไฟฟ้า 5.5 kW/m <sup>3</sup> ขั้วไฟฟ้าเป็นอลูมิเนียม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้า 2.5 cm	กระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้า พารามิเตอร์ในตาราง ที่ 3.1
	1.7	เวลาเก็บกัก •10 min •20 min •30 min •60 min	พลังงานไฟฟ้า 9.1 kW/m <sup>3</sup> ขั้วไฟฟ้าเป็นอลูมิเนียม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้า 2.5 cm	กระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้า พารามิเตอร์ในตาราง ที่ 3.1
	1.8	เวลาเก็บกัก •10 min •20 min •30 min •60 min	พลังงานไฟฟ้า 14.5 kW/m <sup>3</sup> ขั้วไฟฟ้าเป็นอลูมิเนียม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้า 2.5 cm	กระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้า พารามิเตอร์ในตาราง ที่ 3.1

(4) การทดลองที่ 4 ซึ่งเป็นชุดควบคุม มีการดำเนินการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 และ 3 ซึ่งตั้งไว้ตามเวลาเก็บกัก โดยไม่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี



รูปที่ 3.5 การเปรียบเทียบหารูปแบบการจัดเรียงอิเล็กโตรดที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี

(5) การศึกษาค่าใช้จ่ายในการบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี

การศึกษานี้มีการคำนวณค่าใช้จ่ายจากปริมาณอิเล็กโทรด (Electrode) ที่ใช้ไปและค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัด โดยการคิดค่าไฟฟ้าจะคิดจากการใช้พลังงานในการบำบัดคูณกับราคาไฟฟ้าต่อหน่วย ดังนี้

$$\text{ค่าไฟฟ้า (Baht)} = [\text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้} \times (\text{ค่าไฟฟ้าฐาน} + \text{FT})] + \text{VAT } 7\%$$

เมื่อ FT คือ ค่าไฟฟ้าแปรผันตามต้นทุนการผลิต

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิจารณ์

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยมีการทดลอง ดังนี้

1. การทดลองที่ 1 ศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีจากการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบขนาน

2. การทดลองที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีจากการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบอนุกรม

3. การทดลองที่ 3 ศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีจากการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบผสม (ไบโพลาร์)

4. การทดลองที่ 4 การเปรียบเทียบลักษณะของน้ำเสียก่อนเข้าสู่กระบวนการไฟฟ้าเคมีและไม่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี (ชุดควบคุม)

#### 4.1 ลักษณะน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียจริงที่ผ่านบ่อดักไขมันแล้วก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงาน ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า ค่า BOD<sub>5</sub> และ ค่า COD มีค่าสูง ทำให้

ตารางที่ 4.1 ลักษณะน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

Parameter	Range	Average	Parameter	Range	Average
pH	4.63-4.80	4.71±0.04	SV <sub>60</sub> (ml/l)	500-800	572.7±72.9
Temperature (°C)	23.80-27.00	24.7±0.87	UV <sub>254</sub> abs	38.00-60.80	47.62±6.07
Conductivity (mS/cm)	11.47-11.96	11.65±0.14	BOD <sub>5</sub> :COD	0.41-0.75	0.55±0.096
BOD <sub>5</sub> (mg/l)	12,126-20,000	15,119 ±2,553	TSS (mg/l)	2,450-4,383	3,366±496
COD (mg/l)	23,400-33,171	27,476±2,697	Color (SU)	1,555-2,435	1,968±258

หมายเหตุ ข้อมูลจากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำจำนวน 24 ตัวอย่าง ซึ่งรอให้ตกตะกอนเป็นเวลา 1 hr

แล้วจึงนำน้ำส่วนใสมาวิเคราะห์

ค่าการย่อยสลายทางชีวภาพหรือค่า  $BOD_5:COD$  เท่ากับ 0.55 ซึ่งงานวิจัยนี้นำกระบวนการไฟฟ้าเคมีมาใช้ในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ เพื่อให้จุลินทรีย์ทางชีวภาพสามารถย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ได้มากขึ้น อันจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบบำบัดแบบไร้อากาศในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ และการเกิดก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงใช้ค่า  $BOD_5:COD$  เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาสถานะที่เหมาะสม จากการใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

#### 4.2 การทดลองที่ 1 ศึกษาประสิทธิภาพและสถานะที่เหมาะสมโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีจากการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบขนาน

ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียจริงจาก โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม มาผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี ด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานไฟฟ้า 4 ค่า คือ 1.8 5.5 9.1 และ 14.5  $kW/m^3$  และปรับเปลี่ยนเวลาเก็บกัก 4 ค่า คือ 10 20 30 และ 60 min ผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.2

##### 4.2.1 ของแข็งแขวนลอย

จากการทดลอง พบว่า ที่พลังงานไฟฟ้า 1.8  $kW/m^3$  ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมีแล้ว มีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 3,050-5,650  $mg/l$  ดังรูปที่ 4.1-4.2 ทั้งนี้ อาจมีสาเหตุเนื่องมาจาก เมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้าต่ำ ทำให้ลูมินีเนียมอินทรีย์ที่แตกตัวจากขั้วแอโนดมีพลังงานน้อยและเมื่อรวมกับไฮดรอกไซด์อินทรีย์จึงไม่สามารถตกตะกอนได้ทั้งหมด รวมทั้งอนุภาคของแข็งบางส่วนที่สามารถตกตะกอนได้ แต่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าระหว่างทำปฏิกิริยาจึงทำให้อนุภาคเหล่านี้เกิดความไม่เสถียร และเคลื่อนที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ประกอบกับการเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนที่มีขนาด และปริมาณ ไม่มากพอที่จะทำหน้าที่พองอนุภาคของแข็งแขวนลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ จึงทำให้ค่าของแข็งแขวนลอยไม่ลดลงแต่กลับเพิ่มขึ้น ซึ่งพบว่าการทดลองที่ค่าพลังงานไฟฟ้าสูง (5.5-14.5  $kW/m^3$ ) เกิดก๊าซไฮโดรเจนมากจนกระทั่งมีลักษณะเป็นโฟม ส่งผลให้ขนาดและปริมาณของฟองก๊าซจึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพในการแยกมลสาร ซึ่งขึ้นอยู่กับค่ากระแสไฟฟ้า เวลาเก็บกัก และพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า กล่าวคือ เมื่อเพิ่มพลังงานไฟฟ้า และเวลาเก็บกัก ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยจะเพิ่มขึ้น เช่น ที่พลังงานไฟฟ้า 14.5  $kW/m^3$  เวลาเก็บกัก 60 min ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยสูงสุด 87.43% และ 86.22% สำหรับพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 และ 39  $m^2/m^3$  ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองในการบำบัดน้ำเสีย โดยขั้วติ่งอิเล็กโตรดแบบขนาน

พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (cm)	พลังงานไฟฟ้า (kW/m <sup>3</sup> )	เวลา (min.)	อุณหภูมิ (°C)	พีเอช	ความเร็วไฟฟ้า (mS/cm)	SV <sub>60</sub> (mL/l)	TSS		Color		COD		BOD <sub>5</sub> (mg/l)	BOD <sub>5</sub> :COD	ปริมาณออกซิเจนในน้ำ																	
								(mg/l)	(%)	(SU)	(%)	(mg/l)	(%)			(mg/l)	(mg/kg)																
29	3.0	1.8	10	25.0	4.66	11.80	170.0	2733	-69.02	4709	5.89	26291	1.31	15543	0.59	13.32	13719																
																		20	26.0	4.73	12.01	200.0	2750	-59.88	4673	6.61	23760	9.05	14530	0.61	15.83	15736	
																																	30
			60	28.0	4.82	11.99	1.5	2133	-24.01	3185	28.14	20550	12.18	12577	0.61	21.60	53475																
																		5.5	10	26.0	4.73	11.60	220.0	2933	20.73	1543	27.96	25024	17.72	15301	0.61	51.00	7665
		30	27.0	4.84	11.75	1.5	1867	49.54	1428	33.31	22749	25.32	13564	0.60	135.30	10226																	
																	60	28.9	4.88	11.59	1.5	1417	61.70	1288	39.83	21232	30.00	13606	0.64	312.60	13636		
		9.1	10	27.0	4.79	11.75	16.0	1667	49.74	909	49.03	24645	19.51	13136	0.53	81.70																10945	
																																	20
		30	32.0	4.84	11.52	7.0	817	75.37	885	52.86	22370	26.83	12278	0.55	287.70	20407																	
																	60	37.0	4.88	11.16	135.0	550	83.33	664	64.62	20853	31.70	10717	0.51	370.40	40276		
14.5	10	27.7	4.80	11.80	18.0	1583	52.03	974	51.60	23886	18.18	13386	0.56	74.30	9279																		
																20	30.7	4.84	11.71	4.0	917	72.21	917	55.34	20853	28.57	12277	0.59	189.60	14586			
30	34.0	4.86	11.47	4.5	650	80.30	735	61.53	19336	33.77	10761	0.56	331.00	23883																			
															60	42.0	4.89	11.07	292.0	417	87.43	543	71.61	18578	36.36	11129	0.60	414.60	55095				

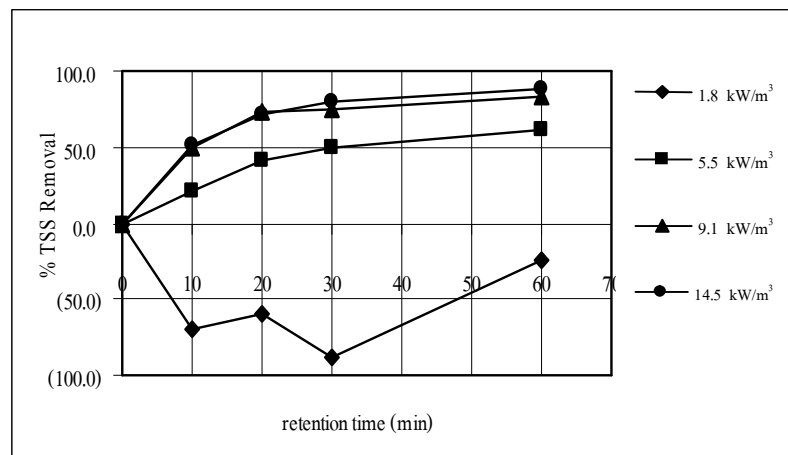


ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองในการบำบัดน้ำเสีย โดยจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบขนาน (ต่อ)

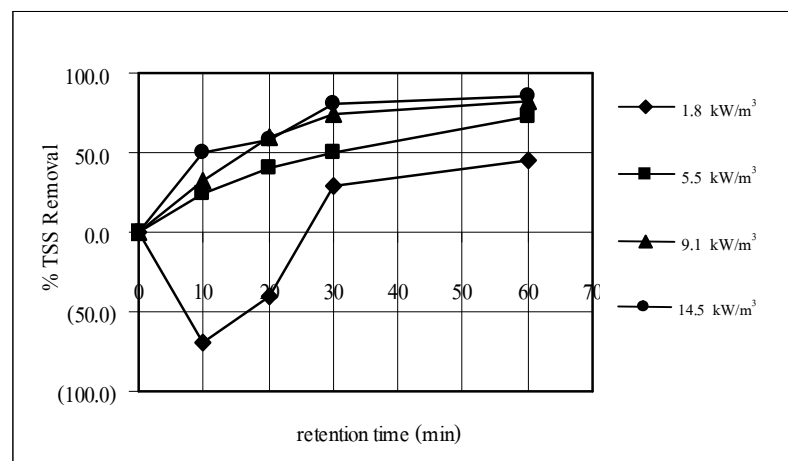
พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	ระยะห่างขั้วไฟฟ้า (cm)	พลังงานไฟฟ้า ((kW/m <sup>3</sup> )	เวลา (min.)	อุณหภูมิ (°C)	พีเอช	ความเร็วไฟฟ้า (mS/cm)	SV <sub>60</sub> (ml/l)	TSS		Color		COD		BOD <sub>5</sub> (mg/l)	BOD <sub>5</sub> :COD	ปริมาณออกซิเจนในน้ำ																
								(mg/l)	(%)	(SU)	(%)	(mg/l)	(%)			(mg/l)	(mg/l)	(mg/kg)														
39	2.5	1.8	10	25.9	4.78	11.51	350.0	5650	-68.66	2245	7.81	28708	2.60	22558	0.78	19.50	4550															
																		20	27.0	4.80	11.52	275.0	4717	-40.81	1706	29.93	27943	5.19	20029	0.72	70.56	6752
			60	28.7	4.85	11.58	6.5	1817	45.76	1366	48.33	24880	15.59	16490	0.66	141.19	21862															
																		10	26.0	4.80	11.54	105.0	2650	23.57	1619	28.90	26927	5.88	18761	0.69	53.40	7206
		30	28.2	4.85	11.48	7.5	1633	50.02	1391	41.92	23976	17.14	18203	0.76	156.27	19955																
																	60	29.0	4.88	11.44	1.5	950	72.60	1258	51.23	21176	20.59	15261	0.72	370.00	26323	
		10	27.0	4.80	11.54	45.0	2650	31.47	1550	31.97	25098	11.76	14464	0.58	76.70	7989																
																																20
		30	33.0	4.86	11.31	3.0	817	74.47	1214	42.89	22745	22.06	13787	0.61	290.00	17450																
																	60	37.6	4.92	10.92	138.0	633	82.40	1063	60.77	18400	32.35	17207	0.94	318.35	26840	
10	28.8	4.82	11.56	13.0	1800	50.00	1292	42.60	24000	13.75	13112	0.55	93.11	8198																		
															20	30.5																4.85
30	35.5	4.87	11.26	2.5	650	81.34	1093	48.07	21200	24.71	14929	0.70	390.00	75260																		
															60	43.8	4.94	10.73	333.0	533	86.22	777	63.62	17951	42.50	10359	0.58	540.00	77424			

#### 4.2.2 ที

น้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มซึ่งมีความเข้มข้นของสีเริ่มต้น 1,968 SU โดยน้ำเสียมีสีน้ำตาลเข้ม และกลิ่นเหม็นมาก จากผลการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสีย โดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี พบว่า เมื่อเพิ่มพลังงานไฟฟ้าและระยะเวลาในการเก็บกัก ประสิทธิภาพการกำจัดสีจะเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.3-4.4 โดยที่พลังงานไฟฟ้า  $14.5 \text{ kW/m}^3$  เวลาเก็บกัก 60 min มีประสิทธิภาพการกำจัดสีได้ดีที่สุด คือ 72% และ 64% สำหรับพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 และ  $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$  ตามลำดับ สีของน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มส่วนมากจะเกิดจากสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นประจุลบ

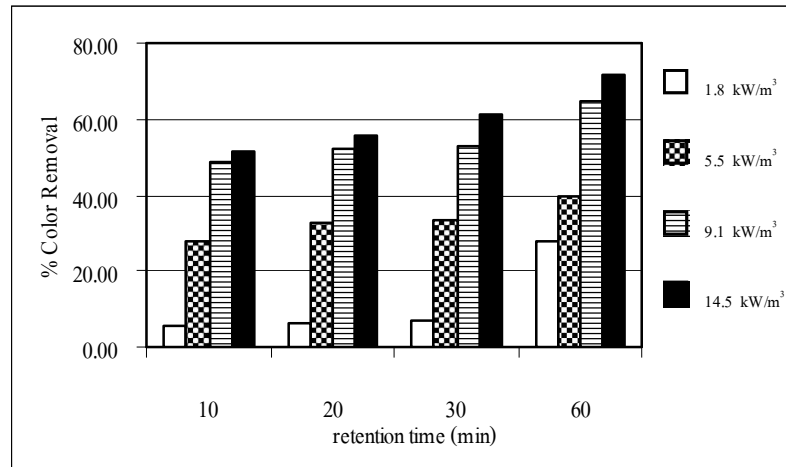


รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงค่าของแรงแจ้งวนลอยจากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$

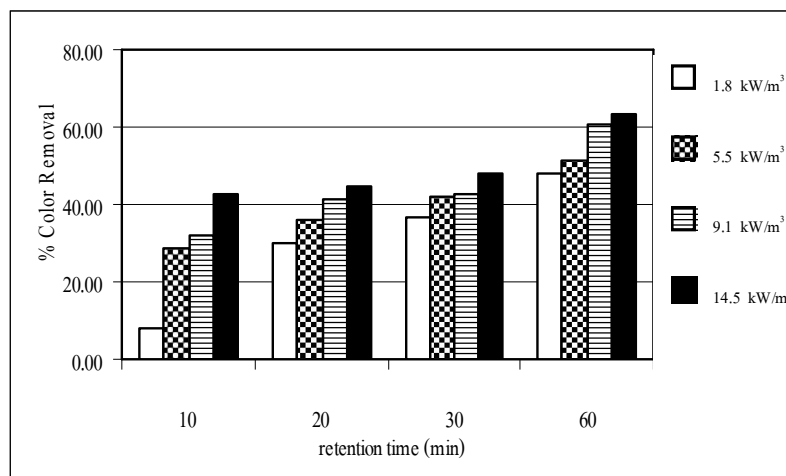


รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงค่าของแรงแจ้งวนลอยจากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$

ในขณะที่สารช่วยตกตะกอนซึ่งเกิดจากการแตกตัวของขี้ไฟฟ้า เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของอลูมิเนียมออกไซด์ที่สามารถละลายน้ำได้น้อยมาก มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่สามารถดูดซับประจุลบได้ดี ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นสารแอกกูแลนที่จับกับโมเลกุลของสีในน้ำเสีย และตกตะกอนลงมาทำให้สีของน้ำเสียลดลงได้ (กัณทมาศ สุทธิเรืองวงศ์, 2539) ซึ่งโอกาสในการจับกับโมเลกุลของสีขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด หากมีระยะห่างมาก การเคลื่อนที่ของผลิตภัณฑ์



รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงสีจากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขี้ไฟฟ้าแบบขนาน พื้นที่ของขี้ไฟฟ้า 29 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>



รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงสีจากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขี้ไฟฟ้าแบบขนาน พื้นที่ของขี้ไฟฟ้า 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

(อ็อน) จะช้าลง และเพิ่มโอกาสในการจับกับฟล็อก ทำให้โมเลกุลของสีถูกดูดซับได้มากขึ้น (Daneshvar *et al.*, 2004) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสี สำหรับพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า  $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$  จึงสูงกว่าที่พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า  $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$

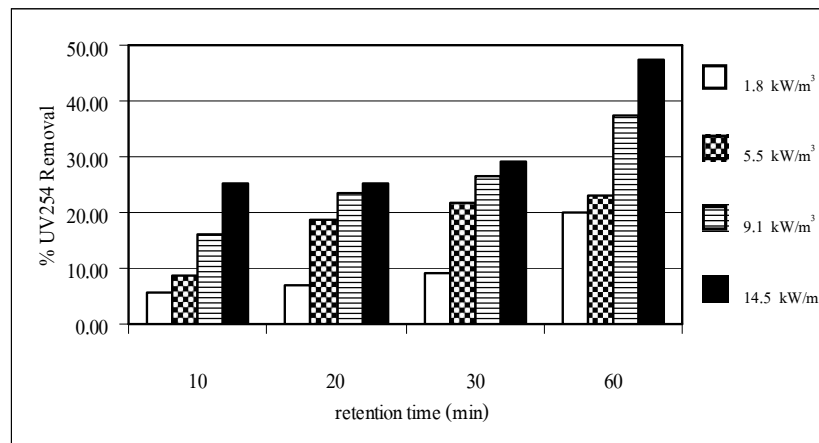
#### 4.2.3 UV<sub>254</sub> Absorption

สารประกอบอินทรีย์หลายชนิดในน้ำเสีย เช่น ลิกนิน แทนนิน สารฮิวมิกและสารประกอบอโรมาติก เป็นต้น สามารถดูดกลืนรังสียูวีได้เป็นอย่างดี และได้มีการวิจัยพบความสัมพันธ์ระหว่าง UV Absorption กับสารอินทรีย์คาร์บอน (มันซิน ตัณจุลเวสม์, 2543) ซึ่งได้มีการใช้หลักการดูดกลืนรังสียูวี (UV<sub>254</sub> Absorption) วัดประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในการบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี เนื่องจากค่า UV<sub>254</sub> Absorption เป็นค่าที่แสดงถึงลักษณะโครงสร้างของสารอินทรีย์ โดยอาศัยหลักการดูดกลืนของคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 254 nm กล่าวคือ สารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน และยากต่อการย่อยสลายทางชีวภาพสามารถดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงความยาวคลื่น 254 nm ได้มากกว่าสารประกอบที่โครงสร้างไม่ซับซ้อนหรือย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มพลังงานไฟฟ้าและเวลาเก็บกัก ประสิทธิภาพการลดค่า UV<sub>254</sub> Absorption จะเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.5-4.6 โดยประสิทธิภาพการกำจัด UV<sub>254</sub> Absorption สูงสุด พบที่พลังงานไฟฟ้า  $14.5 \text{ kW}/\text{m}^3$  เวลาเก็บกัก 60 min คือ 47% และ 50% สำหรับพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 และ  $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$  ตามลำดับ จากผลการทดลอง ทำให้ทราบว่ากระบวนการไฟฟ้าเคมีมีประสิทธิผลการลดค่า UV<sub>254</sub> Absorption ได้ดี แต่อย่างไรก็ตามการกำจัดสารอินทรีย์ด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีนั้นต้องการพลังงานไฟฟ้าในการบำบัดสูงและพื้นที่ผิวของอิเล็กโทรดมาก สำหรับการกำจัดสารอินทรีย์แบบสมบูรณ์ หรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบของสารอินทรีย์เพื่อเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไม่ใช่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ง่ายจะเกิดขึ้นกับสารอินทรีย์บางตัว ในอัตราการกำจัดต่ำและบางสถานะเท่านั้น ยิ่งไปกว่านั้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ เพื่อการเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของสารอินทรีย์ให้เล็กลง ต้องการการถ่ายเทมวลอิเล็กตรอนจำนวนมาก จึงต้องใช้พลังงานไฟฟ้าสูงมาก อีกทั้งต้องใช้อิเล็กโทรดที่มีพื้นที่ผิวมาก (กัณหา มาศ สุทธิเรืองวงศ์, 2539)

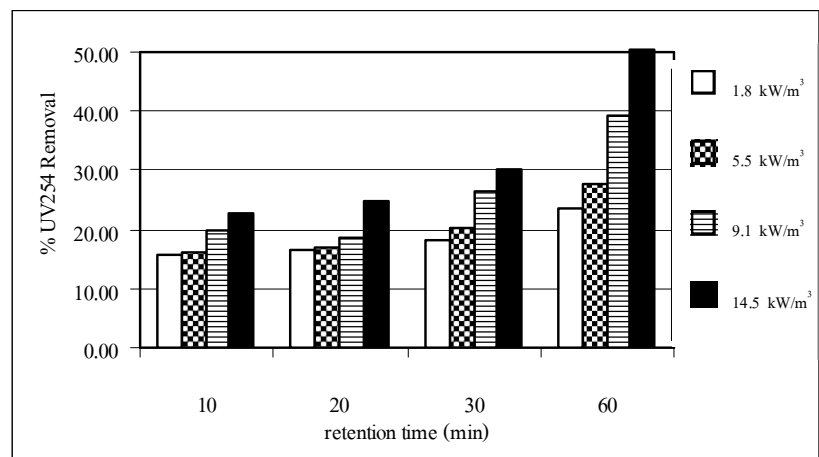
#### 4.2.4 ซีไอดี

ค่าซีไอดีเฉลี่ยของน้ำเสียก่อนการทดลองอยู่ในช่วง  $27,476 \pm 2,697 \text{ mg}/\text{l}$  ซึ่งหลังจากผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี พบว่า การใช้พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$  มีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีอยู่ในช่วง 2-37% ซึ่งที่พลังงานไฟฟ้า  $16 \text{ kW}/\text{m}^3$  เวลาเก็บกัก 60 min มีประสิทธิภาพสูงสุด คือ 37% มี

ค่าซีไอลดลงเหลือ 18,578 mg/l ดังรูปที่ 4.7 และสำหรับการใช้พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$  พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอคือในช่วง 3-43% ซึ่งที่พลังงานไฟฟ้า  $14.5 \text{ kW}/\text{m}^3$  เวลาเก็บกัก 60 min มีประสิทธิภาพสูงสุด คือ 43% มีค่าซีไอเหลือเพียง 17,951 mg/l ดังรูปที่ 4.8 การเพิ่มค่าพลังงานไฟฟ้าและเวลาเก็บกัก มีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอเพิ่มขึ้น เนื่องจาก เมื่อค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ความต้านทานในระบบจะน้อยลง ทำให้การเคลื่อนที่ของสารประกอบอินทรีย์หรืออนินทรีย์ไปยังขั้วไฟฟ้ามีมากขึ้น (Ugurlu *et al.*, 2007) ประกอบกับเมื่ออุณหภูมิเริ่มเกิดปฏิกิริยา

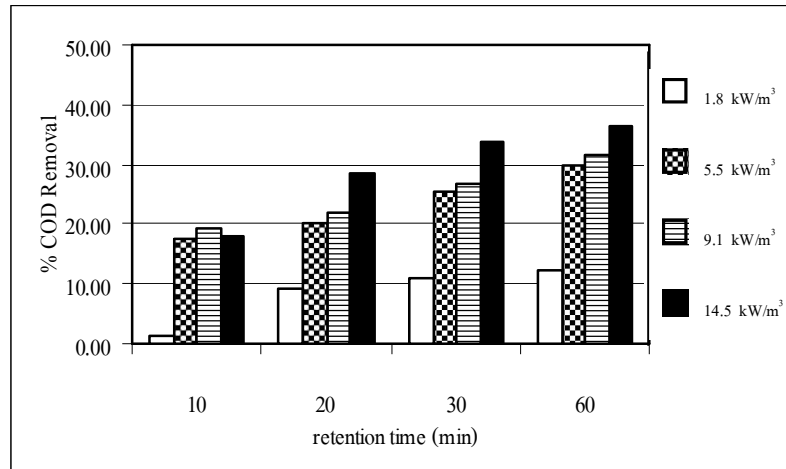


รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลง UV<sub>254</sub> absorbance จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$

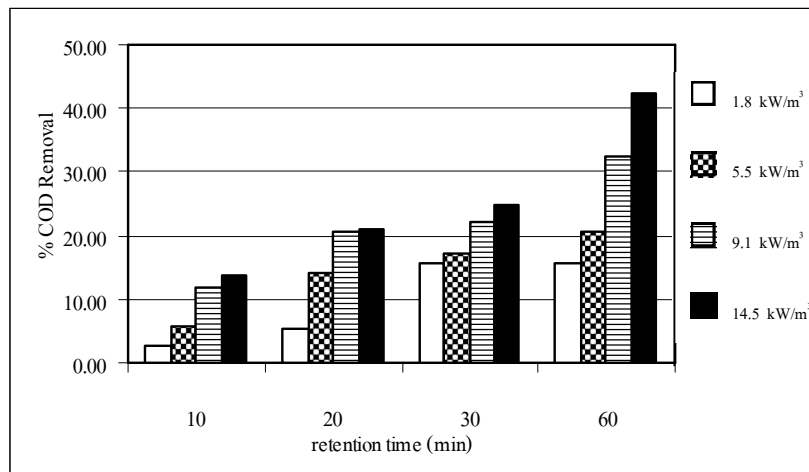


รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลง UV<sub>254</sub> absorbance จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$

ออกซิเดชัน ก่อให้เกิดไอออนของอลูมิเนียมชนิดเดียวเท่านั้น คือ  $Al^{3+}$  ซึ่งเมื่อรวมกับไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) จะได้ อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ [ $Al(OH)_3$ ] ซึ่งมีความสามารถในการละลายน้ำได้ต่ำที่พีเอชน้อยกว่า 4 (น้ำเสียที่ใช้ทดลองมีค่าพีเอชเริ่มต้น 4.71) ทำให้สารประกอบอินทรีย์ถูกดูดซับและตกตะกอนได้มากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับไอออนของเหล็ก กล่าวคือ ไอออนของเหล็ก มี 2 ชนิด



รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงค่า COD จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>



รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงค่า COD จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

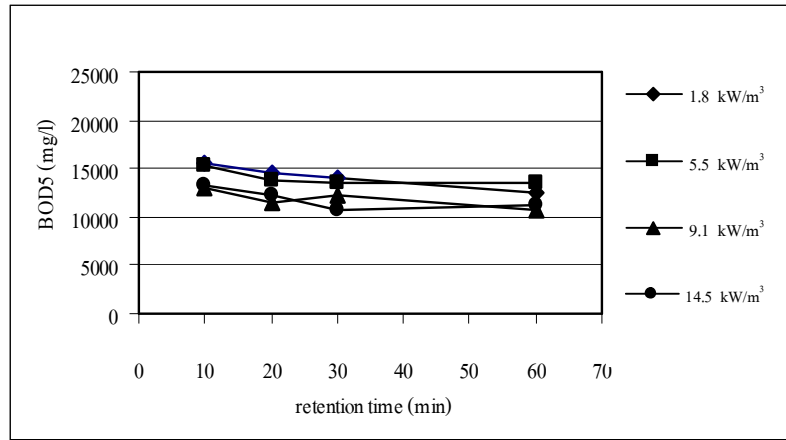
คือ  $Fe^{2+}$  และ  $Fe^{3+}$  สำหรับ  $Fe^{2+}$  เมื่อรวมกับไฮดรอกไซด์ไอออน มักอยู่ในรูปที่สามารถละลายน้ำได้  $[Fe(OH)_2]$  ทำให้การตกตะกอนของสารอินทรีย์เกิดขึ้นน้อยกว่าไอออนของออลูมิเนียม ประการสุดท้าย คือ ขั้วออลูมิเนียมจะเกิดออกซิเจนที่ขั้วแคโทด ทำให้สารอินทรีย์บางส่วนหายไปจากการนำออกซิเจนไปใช้ (Merenó-Casillas *et al.*, 2007)

#### 4.2.5 บีโอดี

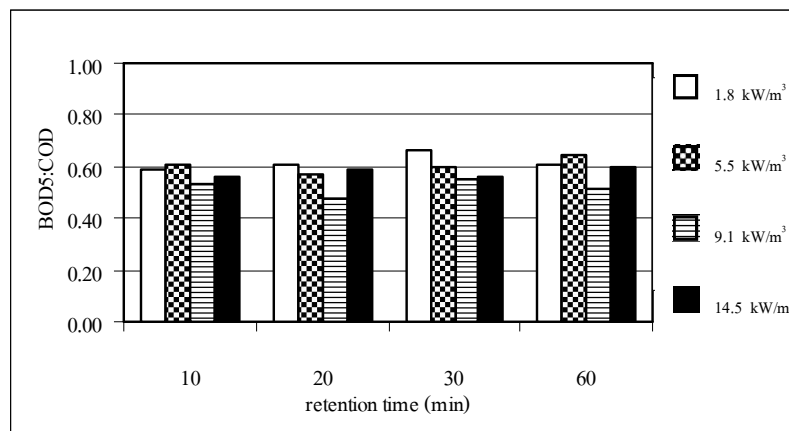
จากการทดลองพบว่า ค่า  $BOD_5$  เริ่มต้นเฉลี่ย  $15,119 \pm 2,553$  mg/l ทำให้ค่าการย่อยสลายทางชีวภาพหรืออัตราส่วนระหว่างค่า  $BOD_5$  และค่า COD เท่ากับ 0.55 เมื่อผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี พบว่า ที่พลังงานไฟฟ้า  $1.8$  kW/m<sup>3</sup> เวลาเก็บกัก 30 min พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $29$  m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> ค่า  $BOD_5$  เพิ่มขึ้นเป็น  $14,039$  mg/l ดังรูปที่ 4.9 ค่า COD ลดลง 10.81% ทำให้ค่า  $BOD_5$ :COD เพิ่มขึ้นจาก 0.58 เป็น 0.66 ดังรูปที่ 4.10 และเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $39$  m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> พบว่า ที่พลังงานไฟฟ้า  $9.1$  kW/m<sup>3</sup> เวลาเก็บกัก 60 min ค่า  $BOD_5$  เพิ่มขึ้นเป็น  $17,207$  mg/l ดังรูปที่ 4.11 ค่า COD ลดลง 32.35% ทำให้ค่า  $BOD_5$ :COD เพิ่มขึ้นจาก 0.58 เป็น 0.94 ดังรูปที่ 4.12 ซึ่งค่า  $BOD_5$ :COD ที่เพิ่มขึ้นหลังผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี บ่งบอกถึง ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ที่จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ เนื่องจาก สารประกอบอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก เมื่อผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมีจะถูกดูดซับด้วย  $Al(OH)_3$  หรือก๊าซไฮโดรเจน และกลายเป็นตะกอนแยกออกจากน้ำ สำหรับสารอินทรีย์อีกส่วนหนึ่ง จะถูกเปลี่ยนแปลง โครงสร้างโมเลกุลให้อยู่ในรูปที่สามารถละลายน้ำได้หรือถูกออกซิไดส์กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ ทำให้น้ำเสียที่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมีแล้วจึงมีค่า  $BOD_5$ :COD สูงขึ้น

#### 4.2.6 ปริมาณออลูมิเนียม

จากผลการทดลอง พบว่า เมื่อเพิ่มพลังงานไฟฟ้าและเวลาเก็บกัก ปริมาณออลูมิเนียมในน้ำจะเพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณออลูมิเนียมต่ำสุดและสูงสุด ดังรูปที่ 4.13 คือ  $13.32$  mg/l พบที่พลังงานไฟฟ้า  $1.8$  kW/m<sup>3</sup> เวลาเก็บกัก 10 min และ  $414.60$  mg/l พบที่ พลังงานไฟฟ้า  $14.5$  kW/m<sup>3</sup> เวลาเก็บกัก 60 min ตามลำดับ สำหรับปริมาณออลูมิเนียมในตะกอน พบว่า ที่พลังงานไฟฟ้า  $1.8$  kW/m<sup>3</sup> มีปริมาณออลูมิเนียมอยู่ในช่วง  $13,719 - 53,476$  mg/kg รูปที่ 4.14 ซึ่งสูงกว่าพลังงานไฟฟ้า  $5.5-14.5$  kW/m<sup>3</sup> เนื่องจากเมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้าน้อย ทำให้การแตกตัวของออลูมิเนียมเกิดขึ้นน้อย การเคลื่อนที่ของออลูมิเนียมไอออนเพื่อจับกับอนุภาคที่มีประจุลบจึงไม่รวดเร็วเหมือนการให้ค่าพลังงานไฟฟ้าสูงๆ ซึ่งเมื่อตั้งทิ้งไว้ 1 hr ออลูมิเนียมส่วนใหญ่จึงตกตะกอนมากกว่าสะสมอยู่ในน้ำ และเมื่อเปรียบเทียบ

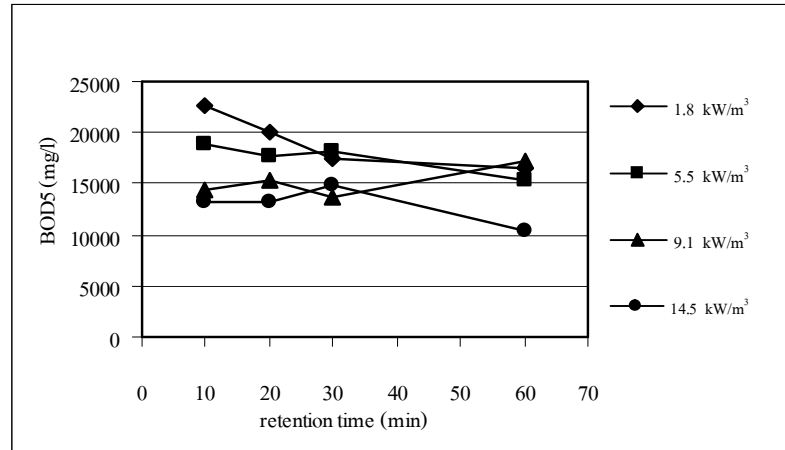


รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงค่า BOD<sub>5</sub> จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

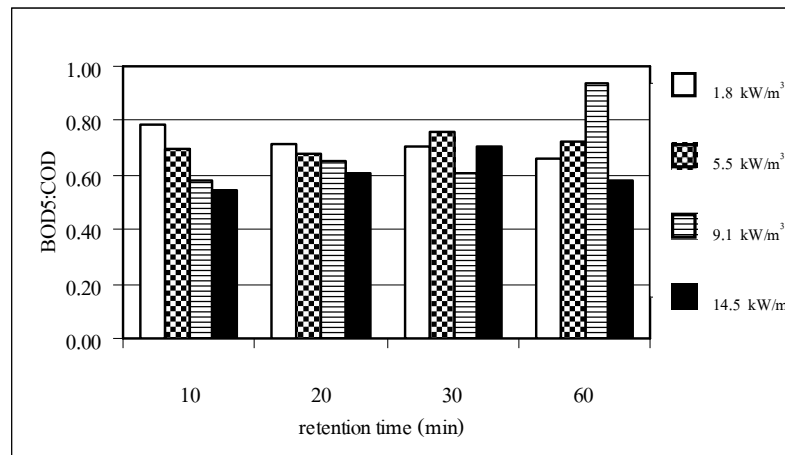


รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงค่า BOD<sub>5</sub>:COD จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>





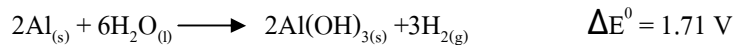
รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงค่า BOD<sub>5</sub> จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>



รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงค่า BOD<sub>5</sub>:COD จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

กับปริมาณอลูมิเนียมในน้ำจากการใช้พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 และ 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> พบว่า เมื่อเพิ่มพลังงานไฟฟ้า เวลาเก็บกัก และพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า ปริมาณอลูมิเนียมในน้ำจะเพิ่มขึ้น โดยที่พลังงานไฟฟ้า 1.8 kW/m<sup>3</sup> เวลาเก็บกัก 20 min ปริมาณอลูมิเนียม 15.83 mg/l และ 70.56 mg/l สำหรับพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 และ 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.15 ซึ่งปริมาณอลูมิเนียมในตะกอนสูงสุด สำหรับพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> พบที่พลังงานไฟฟ้า 14.5 kW/m<sup>3</sup> เวลาเก็บกัก 20-30 min ซึ่งอยู่ในช่วง 75,260 – 77,424 mg/kg ดังรูปที่ 4.16 ปริมาณกระแสไฟฟ้า และพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้ามีผลต่อการแตกตัวของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่ขั้วแอโนดมาก ซึ่งการสูญเสียอลูมิเนียมหรือการกัดกร่อนพื้นผิวที่ขั้วแอโนด เกิดจาก 4 ขั้นตอน (Hu *et al.*, 2003) คือ

1. การดูดซับประจุลบ เช่น Cl<sup>-</sup> ions เข้าที่ผิวของออกไซด์แอโนดซึ่งมีประจุบวก
2. เกิดปฏิกิริยาเคมี โดยประจุลบถูกดูดซับด้วย Al<sup>3+</sup> ซึ่งเป็นเยื่อบางๆ หุ้มผิวของแอโนด (Oxide film)
3. การสลายหรือแตกตัวของแผ่น Oxide film
4. น้ำและพวกประจุเข้าทำลายเนื้อขั้วแอโนด (direct oxidation)



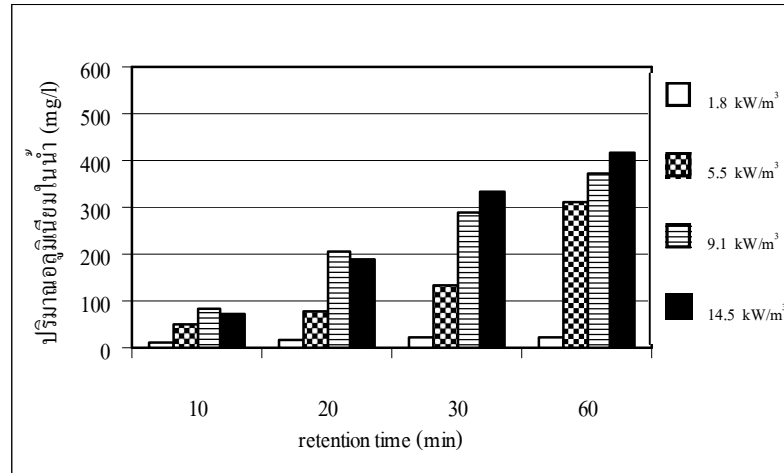
เมื่อมวลของอลูมิเนียมถูกปล่อยออกมาเพิ่มขึ้น พวกที่มีประจุลบ เช่น NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, F<sup>-</sup> และ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> จะทำปฏิกิริยาเช่นเดียวกับ Cl<sup>-</sup> ions ซึ่งสารประกอบอินทรีย์หรือของแข็งทั้งหมดจะลดลงจากการจับกับอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์หรืออลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และกลายเป็นตะกอนจมตัว แต่หากถูกดูดซับด้วยก๊าซไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) จะกลายเป็นตะกอนลอยตัวอยู่บนผิวน้ำ ดังนั้น ปริมาณอลูมิเนียมจึงสะสมอยู่ในน้ำน้อยกว่าในตะกอน นอกจากนี้อลูมิเนียมที่แตกตัวจากขั้วแอโนด หรือสูญเสียอิเล็กตรอน มีการเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทด และเกาะสะสมที่บริเวณผิวด้านนอกหรือรับอิเล็กตรอน ดังรูปที่ 4.17 ซึ่งพบว่า ปริมาณการสูญเสียอลูมิเนียมบริเวณขั้วแอโนด และการรับอลูมิเนียมบริเวณขั้วแคโทด ขึ้นอยู่กับระยะเวลาเก็บกัก และพลังงานไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบ

#### 4.2.7 สรุปประสิทธิภาพและสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากการจัดเรียง

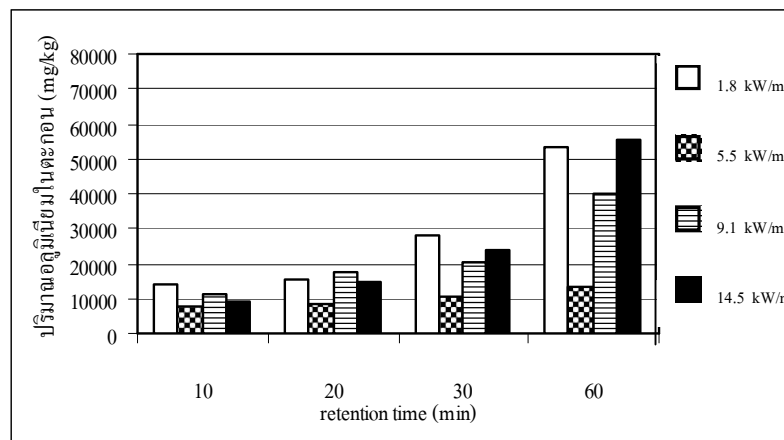
##### อิเล็กโทรดแบบขนาน

จากการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานไฟฟ้า เวลาเก็บกัก และพื้นที่ผิวของอิเล็กโทรด พบว่า พลังงานไฟฟ้า 14.5 kW/m<sup>3</sup> เวลาเก็บกัก 60 min มีประสิทธิภาพการกำจัดค่า COD สี และของแข็งแขวนลอยได้สูงสุด คือ 43% (39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) 72% (29 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) และ 87.40-86.22% (29-39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) ตามลำดับ สถานะที่เหมาะสมที่สุด เมื่อพิจารณาโดยใช้ค่าการย่อยสลายทางชีวภาพ (BOD<sub>5</sub>:COD) สูงสุด เป็นเกณฑ์ ในหัวข้อ 4.2.5 คือ พลังงานไฟฟ้า 9.1 kW/m<sup>3</sup> เวลาเก็บกัก 60 min พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39

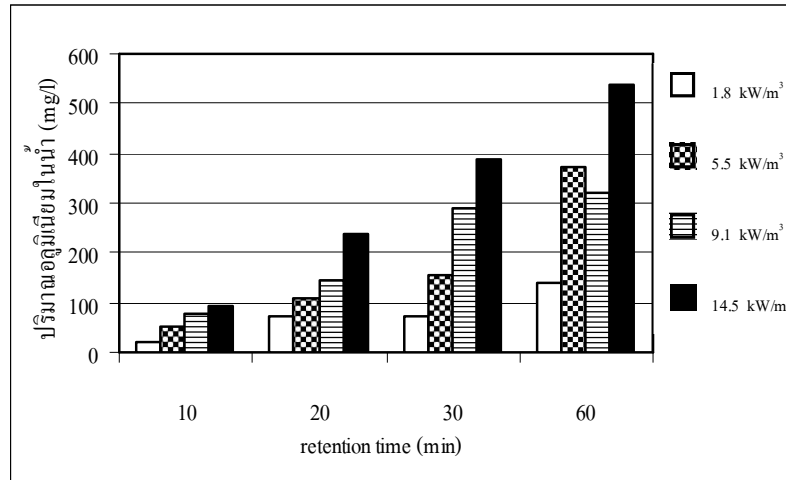
$\text{m}^2/\text{m}^3$  ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2.5 cm มีประสิทธิภาพในการเพิ่มค่า  $\text{BOD}_5:\text{COD}$  จาก 0.58 เป็น 0.94 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ซี และ TSS คือ 32.35% 60.77% และ 82.40% ตามลำดับ ปริมาณตะกอนจมตัวลดลงจาก 500 ml เหลือ 138 ml ซึ่งตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยกว่าน้ำเสียที่ไม่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี ทำให้ง่าย และลดต้นทุนในการกำจัดทิ้ง



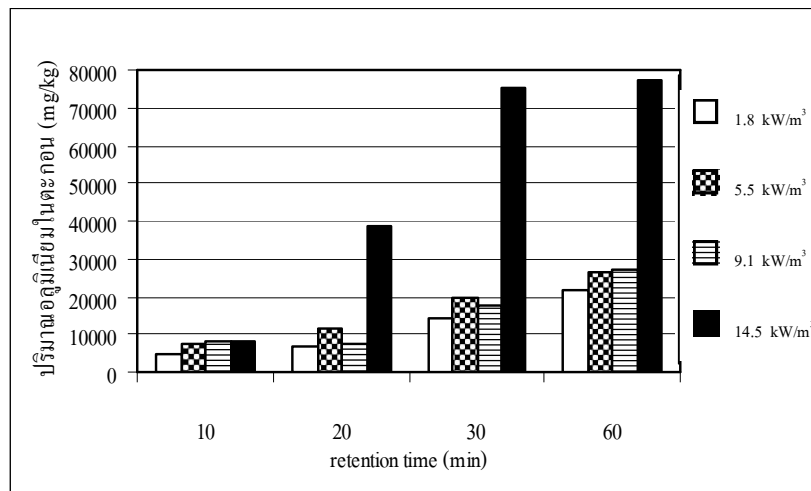
รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงปริมาณอูมิเนียมน้ำจากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$



รูปที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงปริมาณอูมิเนียมนในตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$



รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงปริมาณอลูมิเนียมในน้ำจากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียง  
ขั้วไฟฟ้าแบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

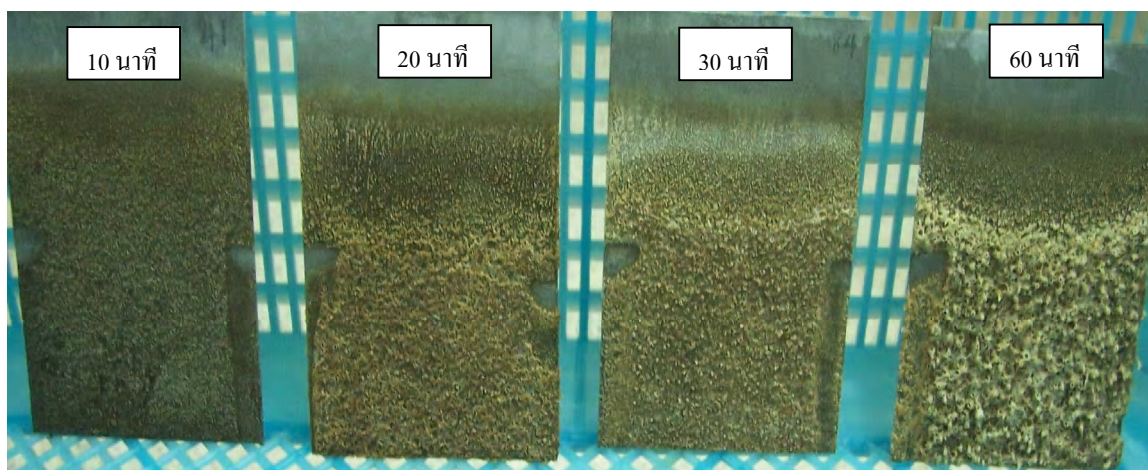
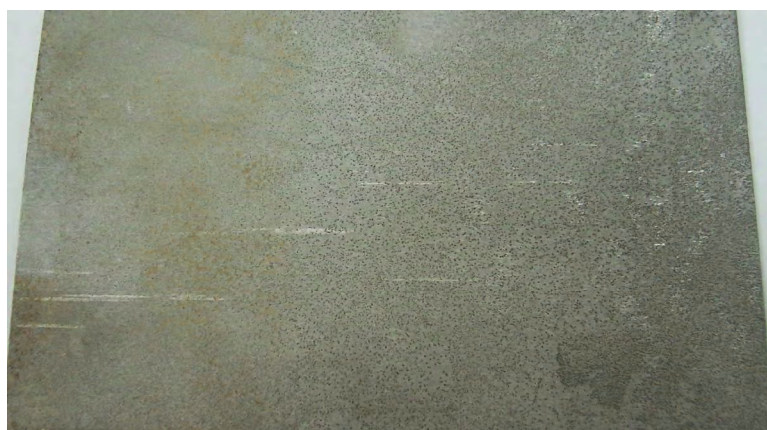


รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงปริมาณอลูมิเนียมในตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียง  
ขั้วไฟฟ้าแบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.17 ลักษณะของขี้ไฟฟ้าก่อนและหลังผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี (ก) ขี้อลูมิเนียมก่อนการทดลอง (ข) การสีกร่อนของขี้แอโนดหลังทดลอง (ค) การสะสมของอลูมิเนียมบริเวณขี้แคโทดเพิ่มขึ้นตามเวลาเก็บกัก

### 4.3 การทดลองที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพและสถานะที่เหมาะสมโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีจากการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบอนุกรม

ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมาผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี ด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานไฟฟ้า 4 ค่า คือ 1.8 5.5 9.1 และ 14.5 kW/m<sup>3</sup> และปรับเปลี่ยนเวลาเก็บกัก 4 ค่า คือ 10 20 30 และ 60 min ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.3

#### 4.3.1 ของแข็งแขวนลอย

จากการทดลอง ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียเริ่มต้นเฉลี่ย 3,366±496 mg/l เมื่อผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี พบว่า เมื่อเพิ่มพลังงานไฟฟ้าและเวลาเก็บกัก ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยจะเพิ่มขึ้น เช่น ที่พลังงานไฟฟ้า 14.5 kW/m<sup>3</sup> ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยสูงสุดอยู่ในช่วง 58.61-86.10% และ 69.00-86.44% สำหรับพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 และ 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.18-4.19 เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กของของแข็งแขวนลอยจะถูกดูดซับด้วย Al(OH)<sub>3</sub> และเปลี่ยนเป็น monomeric, polymeric hydroxides ดังกล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.2.2 ทำให้เกิดการตกตะกอนหรือถูกดูดซับโดยฟองก๊าซไฮโดรเจนและกลายเป็นตะกอนลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำ (Asselin *et al.*, 2007) ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียจึงลดลง

#### 4.3.2 สี

น้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีความเข้มข้นของสีเริ่มต้น 1,968 SU ซึ่งมีสีน้ำตาลเข้มและกลิ่นเหม็นมาก จากผลการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี พบว่า เมื่อเพิ่มพลังงานไฟฟ้า และระยะเวลาในการเก็บกัก ประสิทธิภาพการกำจัดสีจะเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.20-4.21 โดยที่พลังงานไฟฟ้า 1.8 kW/m<sup>3</sup> มีประสิทธิภาพการกำจัดสีได้ต่ำสุดอยู่ในช่วง 12.51-30.20% และ 20.17-44.62% สำหรับพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 และ 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> ตามลำดับ และที่พลังงานไฟฟ้า 5.5-14.5 kW/m<sup>3</sup> มีประสิทธิภาพการกำจัดสีได้ใกล้เคียงกัน ซึ่งพบว่า พลังงานไฟฟ้า 14.5 kW/m<sup>3</sup> เวลาเก็บกัก 60 min มีประสิทธิภาพการกำจัดสีได้ดีที่สุด คือ 52 % และ 59% สำหรับพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 และ 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณกระแสไฟฟ้า การเกิดอออนที่ขั้วแอโนด และแคโทดจะเพิ่มขึ้น รวมทั้งเมื่อเพิ่มเวลาเก็บกัก ปริมาณของ Al<sup>3+</sup> (อลูมิเนียมอออน) และ OH<sup>-</sup> flocs จะเพิ่มขึ้น ทำให้โมเลกุลของสีจะถูกดูดซับได้มากประกอบกับการเคลื่อนที่ของอออนเพิ่มขึ้นเมื่อมีระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดน้อย (Modirshahla *et al.*, 2007)

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองในการบำบัดน้ำเสีย โดยจัดเรียงอิเล็กโตรดแบบอนุกรม

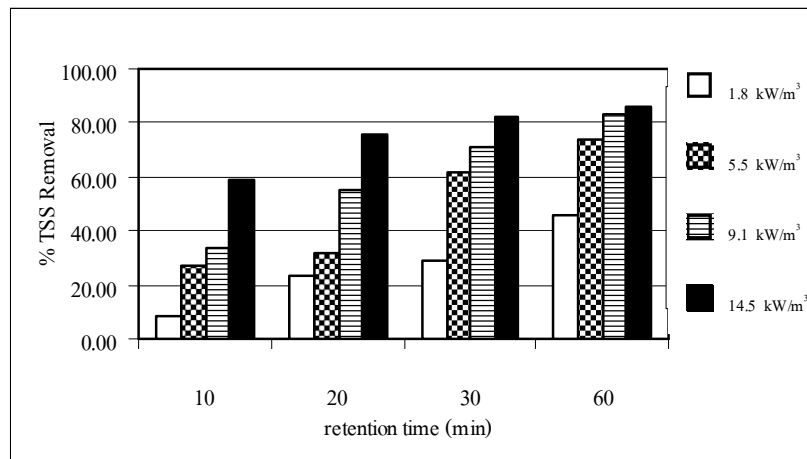
พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	ระยะห่างขั้วไฟฟ้า (cm)	พลังงานไฟฟ้า (kWh/m <sup>3</sup> )	เวลา (min.)	อุณหภูมิ (°C)	พีเอช	ความเร็วไฟฟ้า (mS/cm)	SV <sub>60</sub> (ml/l)	TSS		Color		COD		BOD <sub>5</sub> (mg/l)	BOD <sub>5</sub> :COD	ปริมาณออกซิเจนในน้ำ	
								(mg/l)	(%)	(SU)	(%)	(mg/l)	(%)			(mg/l)	(mg/l)
29	3.0	1.8	10	24.3	4.72	11.55	300.0	3517	8.65	1496	12.51	29126	2.59	15602	0.54	37.61	10418
			30	25.3	4.77	11.70	180.0	2717	29.43	1245	27.21	23762	13.05	13080	0.55	93.73	28889
			10	24.7	4.73	11.48	260.0	3200	26.99	1355	31.68	25347	4.69	15520	0.61	56.50	10761
		30	26.5	4.77	11.52	140.0	1667	61.97	1070	45.48	23689	15.63	13011	0.55	160.35	32805	
																	60
		9.1	10	26.7	4.76	11.57	120.0	2000	33.33	1106	39.47	24800	7.25	15856	0.64	62.89	
																	20
			30	29.5	4.80	11.51	15.0	867	71.10	975	46.03	23200	18.67	15150	0.65	167.48	
																	60
10	28.5		4.77	11.51	13.0	1483	58.61	1105	40.76	22911	17.33	15637	0.68	70.23	15279		
																20	32.0
30	32.5	4.84	11.32	9.0	633	82.33	885	46.62	20282	22.67	14622	0.72	196.82	37524			
															60	38.0	4.90

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองในการบำบัดน้ำเสีย โดยจัดเรียงอิเล็กโตรดแบบอนุกรม (ต่อ)

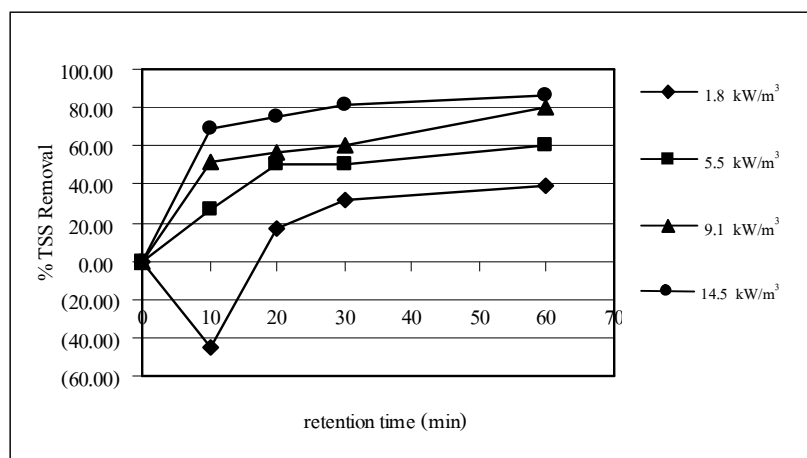
พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	ระยะห่างขั้วไฟฟ้า (cm)	พลังงานไฟฟ้า (kWh/m <sup>3</sup> )	เวลา (min.)	อุณหภูมิ (°C)	พีเอช	ความเร็วไฟฟ้า (mS/cm)	SV <sub>60</sub> (ml/l)	TSS		Color		COD		BOD <sub>5</sub> (mg/l)	BOD <sub>5</sub> :COD	ปริมาณออกซิเจนในน้ำ		
								(mg/l)	(%)	(SU)	(%)	(mg/l)	(%)			(mg/l)	(mg/l)	(mg/kg)
39	2.5	1.8	10	24.8	4.73	11.65	300.0	4817	-45.22	1483	20.17	28738	2.63	11835	0.41	53.10	4953	
																		20
			30	25.5	4.78	11.81	90.0	2283	31.17	1105	40.52	26408	10.53	11217	0.42	63.60	7533	
																		60
			5.5	10	25.5	4.76	11.69	115.0	2683	26.49	1076	41.09	25347	13.51	11687	0.46	54.60	
																		20
		30		28.0	4.82	11.72	1.5	1833	49.78	1003	45.11	22970	21.62	10378	0.45	164.90	10299	
																		60
		9.1		10	27.0	4.78	11.74	4.0	1633	51.97	1060	45.41	24265	18.92	10897	0.45	71.80	
																		20
			30	29.0	4.83	11.72	1.0	1367	59.79	972	49.60	21991	27.03	13652	0.62	207.00	13396	
																		60
10	29.0		4.80	11.55	5.5	1333	69.00	987	46.59	23762	21.95	13399	0.56	104.80	10709			
																20	31.5	4.82
30	33.5	4.84	11.36	5.0	817	81.00	944	51.03	21386	29.27	10752	0.50	313.10	22120				
															60	39.0	4.90	11.15



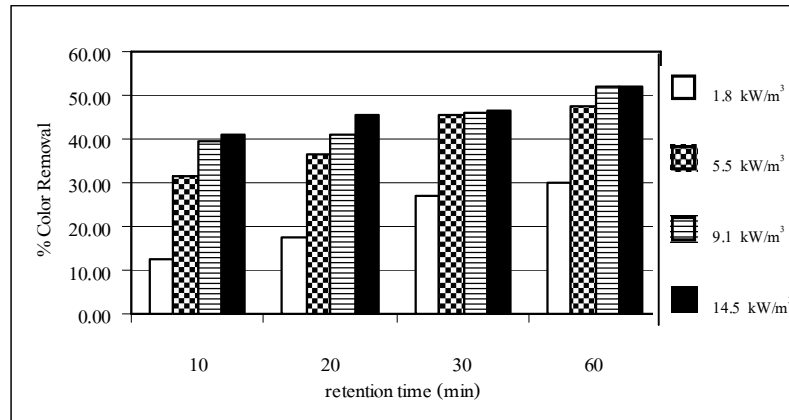
จึงทำให้การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบอนุกรมซึ่งมีความต้านทานในระบบสูง สำหรับพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$  มีประสิทธิภาพกำจัดดีสูงกว่าที่พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$  นอกจากนี้คุณภาพของสี เช่น ฟีนอล ลิกนิน และกรดอินทรีย์ เมื่อจับกับประจุที่เป็นบวกจะกลายเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ และไม่สามารถกลับเปลี่ยนรูปเป็น โมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดสีได้อีก แต่ถูกกำจัดโดยการ ตกตะกอนหรือตะกอนลอยตัว (Ugurlu *et al.*, 2007)



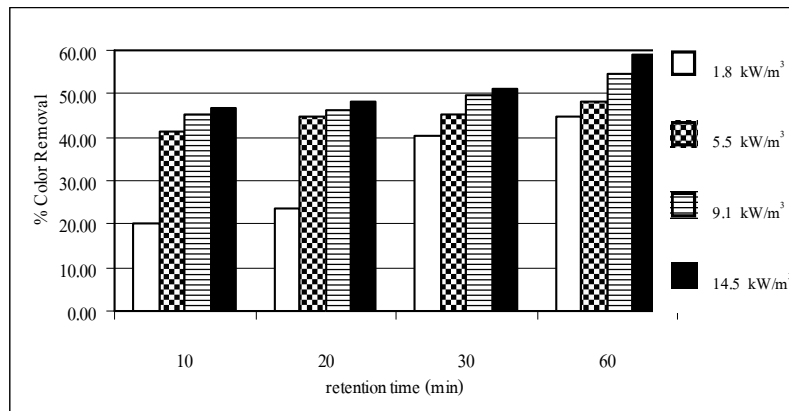
รูปที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงค่าของแรงแจ้งแวนลอยจากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบอนุกรม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$



รูปที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลงค่าของแรงแจ้งแวนลอยจากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบอนุกรม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$



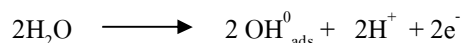
รูปที่ 4.20 การเปลี่ยนแปลงสีจากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้า แบบอนุกรม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>



รูปที่ 4.21 การเปลี่ยนแปลงสีจากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้า แบบอนุกรม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

### 4.3.3 UV<sub>254</sub> Absorption

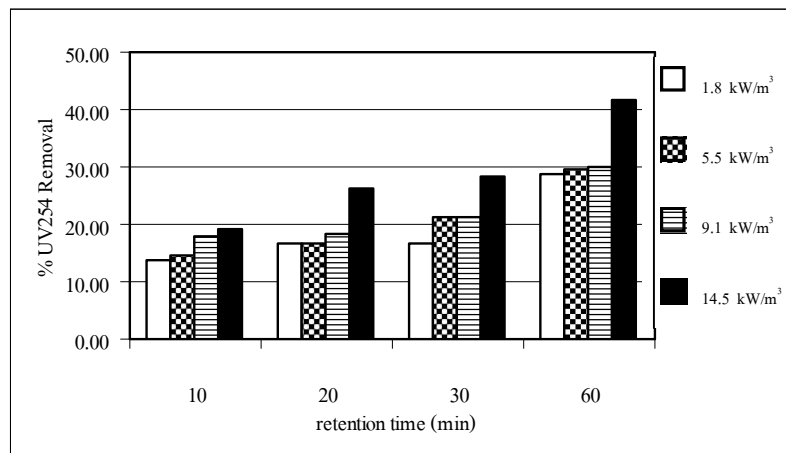
จากการทดลอง พบว่า ค่า UV<sub>254</sub> Absorption เฉลี่ยของน้ำเสียก่อนการทดลอง คือ 47.62 ซึ่งเมื่อเพิ่มพลังงานไฟฟ้าและเวลาเก็บกัก ประสิทธิภาพการลดค่า UV<sub>254</sub> Absorption จะเพิ่มขึ้น โดยที่พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> พลังงานไฟฟ้า 1.8-9.1 kW/m<sup>3</sup> มีประสิทธิภาพการกำจัด UV<sub>254</sub> Absorption ใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง 13.86-30.13% ดังรูปที่ 4.22 โดยประสิทธิภาพการกำจัด UV<sub>254</sub> Absorption สูงสุด พบที่พลังงานไฟฟ้า 14.5 kW/m<sup>3</sup> เวลาเก็บกัก 60 min คือ 41.75% และสำหรับพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> ประสิทธิภาพการกำจัด UV<sub>254</sub> Absorption สูงสุด พบที่พลังงานไฟฟ้า 14.5 kW/m<sup>3</sup> อยู่ในช่วง 21.36%-34.64% ดังรูปที่ 4.23 เนื่องจากการกำจัดสารอินทรีย์ด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีนั้นต้องการพลังงานไฟฟ้าในการบำบัดสูง และเวลาใช้ในการทำปฏิกิริยานาน จึงจะทำให้สารที่มีพิษหรือยากต่อการย่อยสลายทางชีวภาพถูกกำจัดโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน 2 แบบ คือ direct anodic oxidation และ indirect anodic oxidation ซึ่งเมื่อเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH<sup>0</sup>) ขึ้นที่ขั้วแอโนดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังสมการ



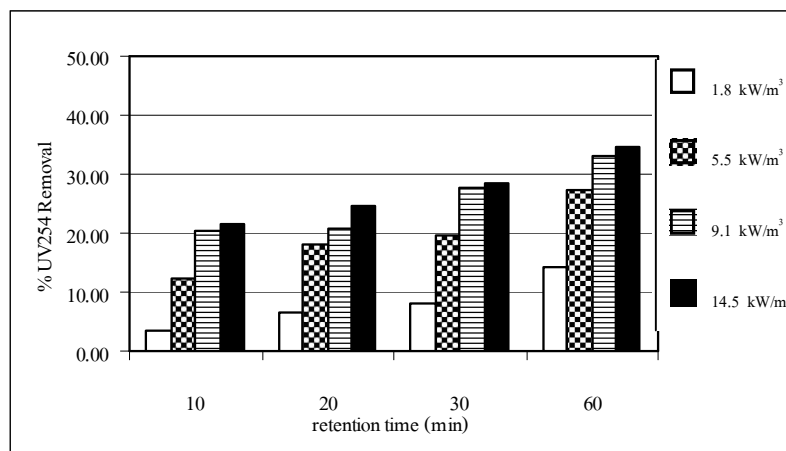
สารประกอบอินทรีย์จะลดลงและถูกกำจัดโดยการจับกับ OH<sup>0</sup> จากปฏิกิริยา direct anodic oxidation สำหรับสารประกอบที่มีพิษหรือสามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีถูกเปลี่ยนแปลงให้กลายเป็นสารที่มีอันตรายน้อยลงโดยปฏิกิริยา indirect anodic oxidation (Panizza *et al.*, 2000)

### 4.3.4 ซีโอดี

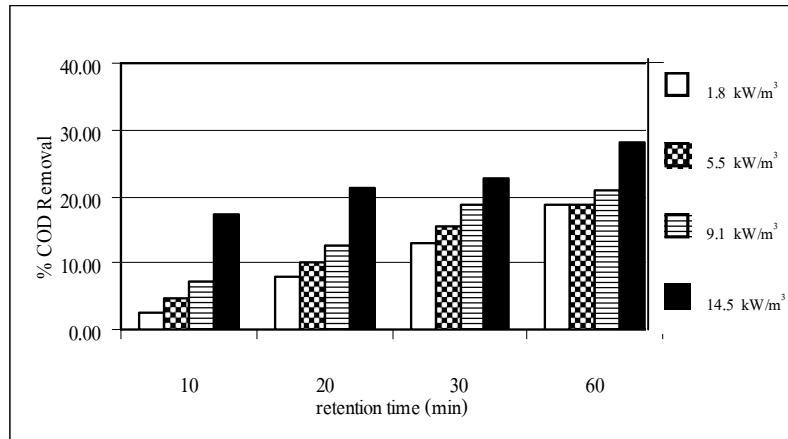
ค่าซีโอดีเฉลี่ยของน้ำเสียก่อนการทดลอง คือ 27,476 mg/l หลังจากผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี ที่ได้ปรับเปลี่ยนค่าพลังงานไฟฟ้าและเวลาเก็บกัก พบว่า การใช้พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> พลังงานไฟฟ้า 1.8-9.1 kW/m<sup>3</sup> มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีได้ใกล้เคียงกัน และที่พลังงานไฟฟ้า 14.5 kW/m<sup>3</sup> มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงสุด อยู่ในช่วง 17.33%-28% ดังรูปที่ 4.24 ทำให้ค่าซีโอดีเหลือเพียง 19,031 mg/l ในเวลาเก็บกัก 60 min และสำหรับการใช้จำนวนอิเล็กโทรด 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงสุด พบที่พลังงานไฟฟ้า 14.5 kW/m<sup>3</sup> เวลาเก็บกัก 60 min คือ 34 % ดังรูปที่ 4.25 การเพิ่มค่าพลังงานไฟฟ้า และเวลาเก็บกัก มีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเพิ่มขึ้น เนื่องจาก Al<sup>3+</sup> และ Al(OH)<sub>2</sub><sup>+</sup> จะแตกตัวได้ดิวที่พีเอชต่ำๆ และเมื่อเวลาทำปฏิกิริยานานขึ้น ค่าพีเอชจะเพิ่มขึ้น ทำให้ Al(OH)<sub>3</sub> ละลายอยู่ในรูปของ hydroxo-complexes หรือ [Al(OH)<sub>n</sub>]<sup>(n-3)</sup> ซึ่งทำให้น้ำเสียมีลักษณะเป็นเบส ส่งผลให้การทำงานของ Al(OH)<sub>3</sub> คีลิ่งขึ้น จึงสามารถกำจัดสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยอาศัยกลไกการดูดซับและเกิดการตกตะกอน ดังนั้นน้ำเสียที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเป็นกรดกลางๆ (4-5) อลูมิเนียมจะสามารถลดค่าซีโอดีได้ดี (Inan *et al.*, 2004)



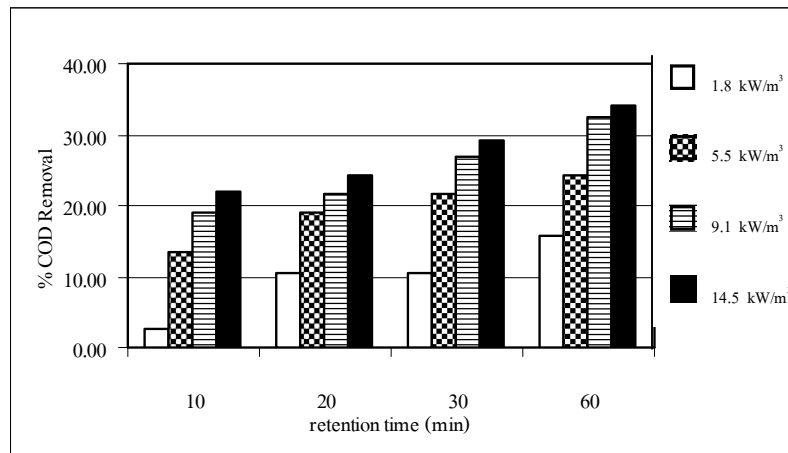
รูปที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลง UV<sub>254</sub> Absorption จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบอนุกรม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>



รูปที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลง UV<sub>254</sub> Absorption จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบอนุกรม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>



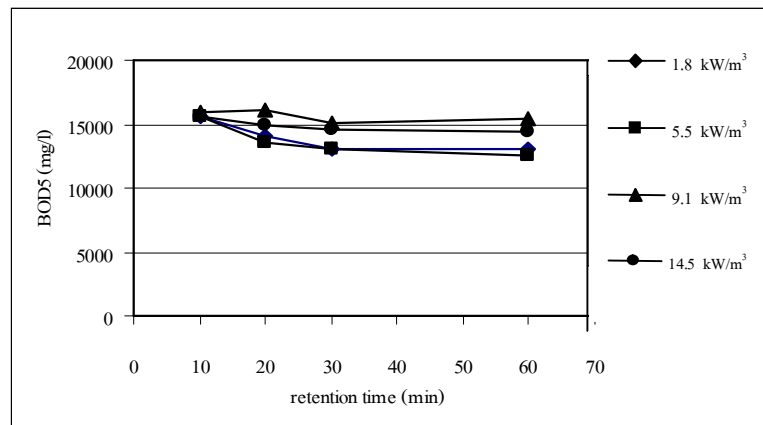
รูปที่ 4.24 การเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดีจากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้า แบบอนุกรม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>



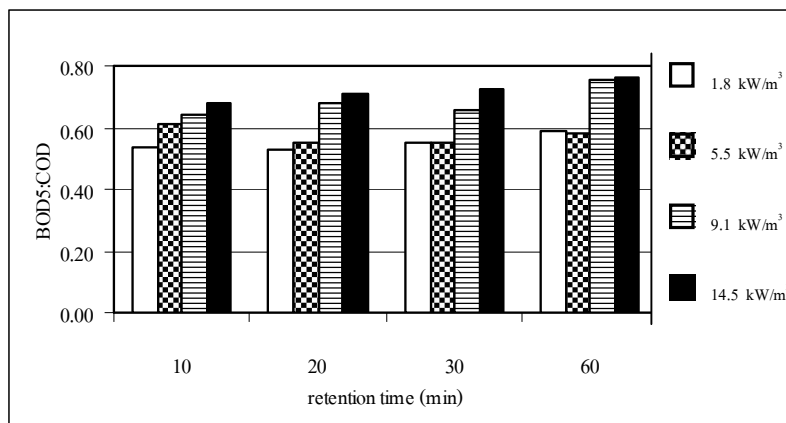
รูปที่ 4.25 การเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดีจากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้า แบบอนุกรม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

#### 4.3.5 บีโอดี

จากการทดลองพบว่า ค่า  $BOD_5$  เริ่มต้นเฉลี่ย  $15,119 \pm 2,553$  mg/l ทำให้ค่าการย่อยสลายทางชีวภาพหรืออัตราส่วนระหว่างค่า  $BOD_5$  และค่า COD เท่ากับ 0.55 เมื่อผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมีพบว่า ที่พลังงานไฟฟ้า  $9.1$  kW/m<sup>3</sup> เวลาเก็บกัก 60 min พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $29$  m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> ค่า  $BOD_5$  เพิ่มขึ้นเป็น  $15,499$  mg/l ดังรูปที่ 4.26 ค่า COD ลดลง 20.85% ทำให้ค่า  $BOD_5$ :COD เพิ่มขึ้นจาก 0.58 เป็น 0.75 ดังรูปที่ 4.27 และเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $39$  m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> พบว่า ที่พลังงานไฟฟ้า  $9.1$  kW/m<sup>3</sup> เวลาเก็บกัก 30 min ค่า  $BOD_5$  เพิ่มขึ้นเป็น  $13,652$  mg/l ดังรูปที่ 4.28 ค่า COD ลดลง 27.03% ทำให้ค่า  $BOD_5$ :COD เพิ่มขึ้นจาก 0.58 เป็น 0.62 ดังรูปที่ 4.29 อัตราส่วนของค่าการ

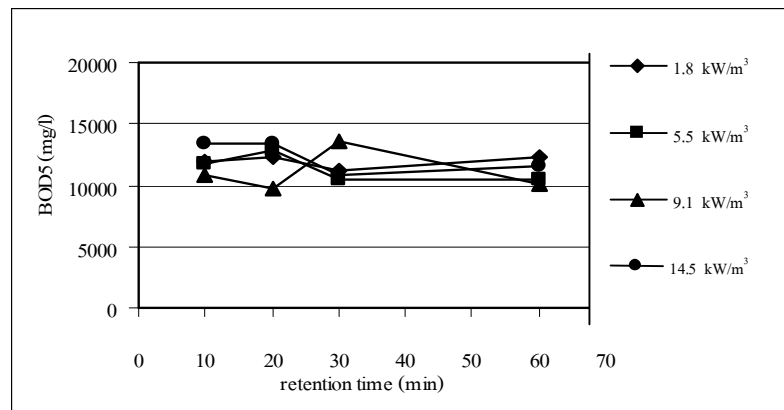


รูปที่ 4.26 การเปลี่ยนแปลงค่า  $BOD_5$  จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบอนุกรม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $29$  m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

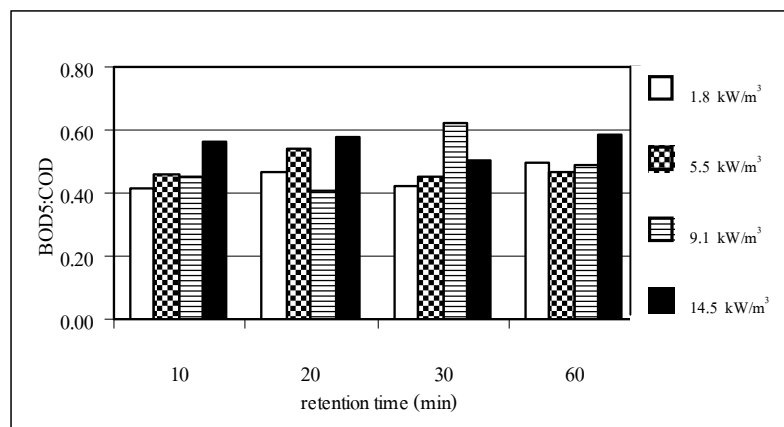


รูปที่ 4.27 การเปลี่ยนแปลงค่า  $BOD_5$ :COD จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบอนุกรม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $29$  m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

ย่อยสลายทางชีวภาพหรือ  $BOD_5:COD$  ขึ้นอยู่กับการลดลงของค่า COD โดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี จะทำให้อนุภาคของสารประกอบอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่าย (Biodegradable organic compounds) เกิดความไม่เสถียร และกระตุ้นให้รวมกลุ่มกันจนกลายเป็นตะกอนเบาหรือตะกอนจมตัว จึงทำให้ สารอินทรีย์บางส่วนหายไป ดังนั้น ค่า COD จึงลดลงเฉพาะบางส่วนเท่านั้น (Mereno-Casillas *et al.*, 2007) มีผลให้ค่า  $BOD_5:COD$  เพิ่มขึ้นน้อย ซึ่งหากค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านสูง การแตกตัวของ  $Al^{3+}$  หรือการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันก็จะเพิ่มขึ้น จึงสามารถเปลี่ยนแปลงสารประกอบที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Non-biodegradable compounds) ให้มีพันธะโมเลกุลที่เล็กลงได้ ทำให้ค่า COD จะลดลงมาก อัตราส่วนระหว่าง  $BOD_5:COD$  จึงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.28 การเปลี่ยนแปลงค่า  $BOD_5$  จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้า แบบอนุกรม จำนวน  $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$



รูปที่ 4.29 การเปลี่ยนแปลงค่า  $BOD_5:COD$  จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้า แบบอนุกรม จำนวน  $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$

#### 4.3.6 ปริมาณอลูมิเนียม

จากผลการทดลอง พบว่า เมื่อเพิ่มพลังงานไฟฟ้าและเวลาเก็บกัก ปริมาณอลูมิเนียมในน้ำ และในตะกอนจะเพิ่มขึ้น สำหรับพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$  ปริมาณอลูมิเนียมในน้ำต่ำสุดและสูงสุด คือ  $37.61 \text{ mg/l}$  พบที่พลังงานไฟฟ้า  $1.8 \text{ kW/m}^3$  เวลาเก็บกัก  $10 \text{ min}$  และ  $312.50 \text{ mg/l}$  พบที่พลังงานไฟฟ้า  $14.5 \text{ kW/m}^3$  เวลาเก็บกัก  $60 \text{ min}$  ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.30 สำหรับปริมาณอลูมิเนียมในตะกอน พลังงานไฟฟ้า  $14.5 \text{ kW/m}^3$  มีปริมาณอลูมิเนียมสะสมในตะกอนมากที่สุด อยู่ในช่วง  $10,418 - 45,056 \text{ mg/kg}$  ดังรูปที่ 4.31 เนื่องจากเมื่อค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ปริมาณการแตกตัวของอลูมิเนียมที่ขั้วแอโนดจะเพิ่มขึ้นประกอบด้วย  $\text{Al}^{3+}$  ซึ่งอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ และตกตะกอนเมื่อจับกับอนุภาคที่มีประจุลบ ทำให้ปริมาณอลูมิเนียมในตะกอนสูงกว่าในน้ำ สำหรับพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$  ปริมาณอลูมิเนียมในน้ำต่ำสุดและสูงสุด คือ  $53.10 \text{ mg/l}$  พบที่พลังงานไฟฟ้า  $1.8 \text{ kW/m}^3$  เวลาเก็บกัก  $10 \text{ min}$  และ  $433.20 \text{ mg/l}$  พบที่พลังงานไฟฟ้า  $14.5 \text{ kW/m}^3$  เวลาเก็บกัก  $60 \text{ min}$  ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.32 สำหรับปริมาณอลูมิเนียมในตะกอน พลังงานไฟฟ้า  $14.5 \text{ kW/m}^3$  มีปริมาณอลูมิเนียมสะสมในตะกอนมากที่สุด อยู่ในช่วง  $4,953 - 35,849 \text{ mg/kg}$  ดังรูปที่ 4.33 และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณอลูมิเนียมในตะกอน สำหรับการใช้พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $29$  และ  $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$  พบว่า ปริมาณอลูมิเนียมในตะกอนลดลง เมื่อใช้พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้ามาก หรือระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าน้อย เนื่องจาก การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าที่มีระยะห่างมากทำให้การเคลื่อนที่ของ  $\text{Al}^{3+}$  จากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด หรือการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจะช้ากว่า และเพิ่มโอกาสในการจับกับมลสารในน้ำเสีย จึงทำให้อลูมิเนียมเกิดการตกตะกอนมากกว่าที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าน้อย

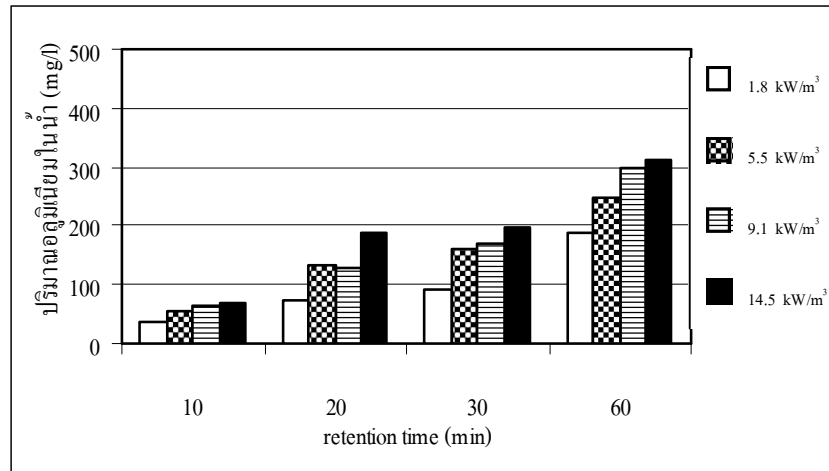
#### 4.3.7 สรุปประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากการจัดเรียง

##### อิเล็กโทรดแบบอนุกรม

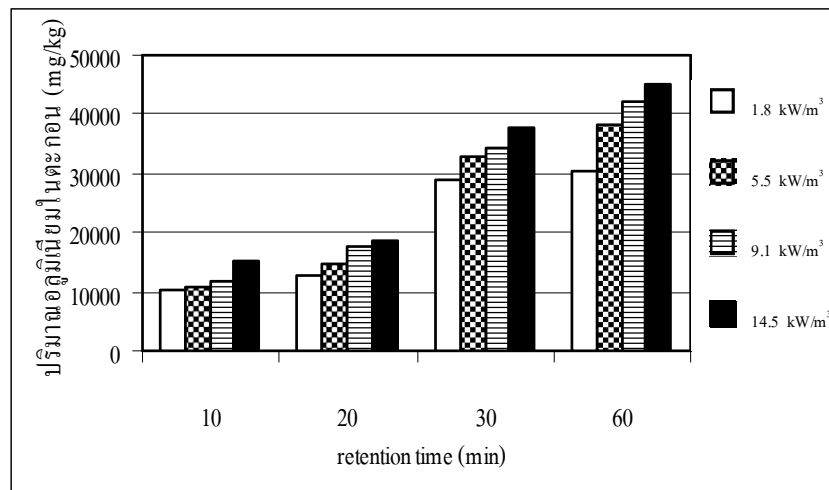
จากการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานไฟฟ้า เวลาเก็บกัก และพื้นที่ผิวของอิเล็กโทรด พบว่า พลังงานไฟฟ้า  $14.5 \text{ kW/m}^3$  เวลาเก็บกัก  $60 \text{ min}$  มีประสิทธิภาพการกำจัดค่า COD สี และของแข็งแขวนลอยได้สูงสุด คือ  $34\%$  ( $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$ )  $59\%$  ( $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ) และ  $86.10-86.44\%$  ( $29-39 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ) ตามลำดับ สภาวะที่เหมาะสมที่สุด เมื่อพิจารณาโดยใช้ค่าการย่อยสลายทางชีวภาพ ( $\text{BOD}_5:\text{COD}$ ) สูงสุดเป็นเกณฑ์ในหัวข้อ 4.3.9 คือพลังงานไฟฟ้า  $9.1 \text{ kW/m}^3$  เวลาเก็บกัก  $60 \text{ min}$  พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$  ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด  $3.0 \text{ cm}$  มีประสิทธิภาพในการเพิ่มค่า  $\text{BOD}_5:\text{COD}$  จาก  $0.58$  เป็น  $0.75$  ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี สี และ TSS คือ  $20.83\%$   $52\%$  และ  $83\%$  ตามลำดับ ปริมาณตะกอนจมตัวลดลงจาก  $500 \text{ ml}$  เหลือ  $55 \text{ ml}$  ซึ่งตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียที่ไม่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี ทำให้ง่ายและลดต้นทุนในการกำจัดทิ้ง



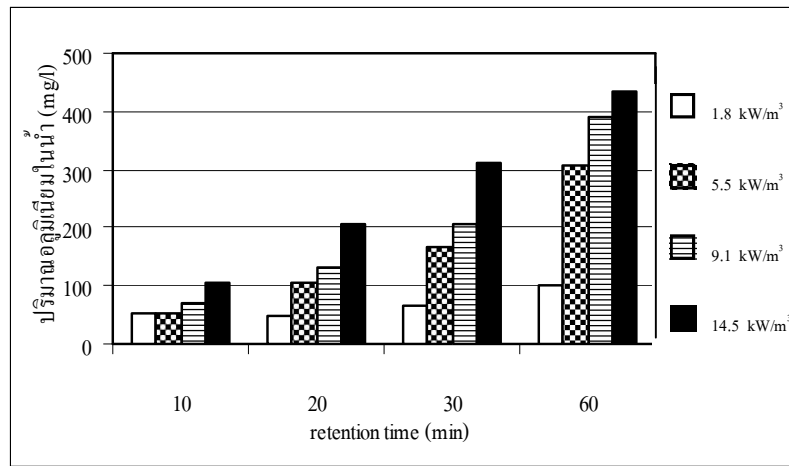
สำหรับที่พลังงานไฟฟ้า  $14.5 \text{ kW/m}^3$  เวลาเก็บกัก 60 min แม้จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ได้สูง และมีค่า  $\text{BOD}_5:\text{COD}$  เท่ากัน คือ 0.75 แต่ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นสูงกว่า ซึ่งทำให้มีปริมาณอูมิเนียมสะสมในน้ำและในตะกอนมาก และต้องสูญเสียพลังงานไฟฟ้ามากกว่าด้วย



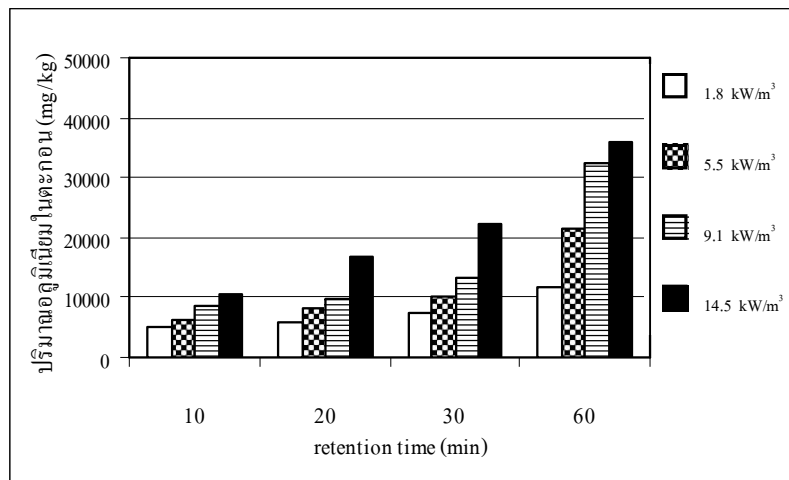
รูปที่ 4.30 การเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณอูมิเนียมในน้ำจากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบอนุกรม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$



รูปที่ 4.31 การเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณอูมิเนียมในตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบอนุกรม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$



รูปที่ 4.32 การเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณอนุภาคแขวนลอยในน้ำจากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบอนุกรม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>



รูปที่ 4.33 การเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณอนุภาคแขวนลอยในตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบอนุกรม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

#### 4.4 การทดลองที่ 3 ศึกษาประสิทธิภาพและสถานะที่เหมาะสมโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีจากการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์

ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมาผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี ด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานไฟฟ้า 4 ค่า คือ 1.8 5.5 9.1 และ 14.5 kW/m<sup>3</sup> และปรับเปลี่ยนเวลาเก็บกัก 4 ค่า คือ 10 20 30 และ 60 min ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.4

##### 4.4.1 ของแข็งแขวนลอย

จากการทดลอง ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียเริ่มต้นเฉลี่ย 3,366±496 mg/l เมื่อนำมาทดลองโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี พบว่า เมื่อเพิ่มพลังงานไฟฟ้าและเวลาเก็บกัก ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยจะเพิ่มขึ้น เช่น ที่พลังงานไฟฟ้า 14.5 kW/m<sup>3</sup> ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยสูงสุดอยู่ในช่วง 65-88.59% และ 54.14-90% สำหรับพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 และ 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.34-4.35 เนื่องจากการจัดเรียงแบบไบโพลาร์ แต่ละแผ่นของอิเล็กโทรดมีด้านหนึ่งเป็นขั้วบวก (แอโนด) และอีกด้านหนึ่งเป็นขั้วลบ (แคโทด) จึงทำให้เกิดอออนขึ้นทั้ง 2 ด้านของแต่ละแผ่นอิเล็กโทรด เมื่อพลังงานไฟฟ้า เวลาเก็บกัก และพื้นที่ผิวของอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น ปริมาณอออนจะเพิ่มขึ้น ซึ่งอออนที่เกิดขึ้นจะจับกับอนุภาคของแข็งแขวนลอยและเกิดเป็นตะกอนลอยตัว ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยสูงกว่าการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบขนานและแบบอนุกรม สอดคล้องกับการทดลองบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม โดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี และมีการจัดเรียงอิเล็กโทรด 3 รูปแบบ พบว่า พิเศษประมาณ 5 การจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยและของแข็งละลายน้ำได้สูงสุด รองลงมา คือ แบบขนานและแบบอนุกรม (Koby et al., 2007)

##### 4.4.2 สี

น้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีความเข้มข้นของสีเริ่มต้น 1,968 SU ซึ่งจากการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี พบว่า เมื่อเพิ่มพลังงานไฟฟ้า และระยะเวลาเก็บกัก ประสิทธิภาพการกำจัดสีจะเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.36-4.37 โดยที่พลังงานไฟฟ้า 1.8 kW/m<sup>3</sup> มีประสิทธิภาพการกำจัดสีได้ดีที่สุดในช่วง 7.11-43.76% และ 16.35-45.57% สำหรับพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 และ 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> ตามลำดับ และพบว่า ที่พลังงานไฟฟ้า 14.5 kW/m<sup>3</sup> มีประสิทธิภาพการกำจัดสีได้ดีที่สุด คืออยู่ในช่วง 50-61% และ 42.71-54.15% สำหรับพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 และ 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> ตามลำดับ โดยกลไกในการกำจัดสีเป็นไปตามหัวข้อ 4.2.2 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบ

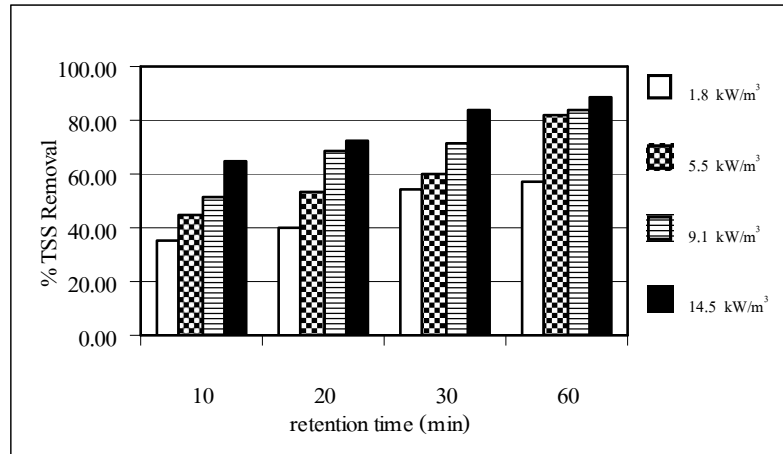
ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองในการบำบัดน้ำเสีย โดยจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบไปโพลาร์

พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	ระยะห่างขั้วไฟฟ้า (cm)	พลังงานไฟฟ้า (kW/m <sup>3</sup> )	เวลา (min.)	อุณหภูมิ (°C)	พีเอช	ความเร็วไฟฟ้า (mS/cm)	SV <sub>60</sub> (ml/l)	TSS		Color		COD		BOD <sub>5</sub> (mg/l)	BOD <sub>5</sub> :COD	ปริมาณออกซิเจนในน้ำ		
								(mg/l)	(%)	(SU)	(%)	(mg/l)	(%)			(mg/l)	(mg/l)	ตะกอน (mg/kg)
29	3.0	1.8	10	25.8	4.72	11.53	470.0	3433	35.05	1399	7.11	29278	5.33	14510	0.50	26.80	2996	
																		20
			30	27.4	4.76	11.61	400.0	2217	54.29	946	39.07	26804	13.33	13018	0.49	45.50	7743	
																		60
			5.5	10	26.0	4.75	11.63	290.0	2783	45.20	1385	21.52	27629	9.59	12272	0.44	32.20	
																		20
		30		28.8	4.79	11.59	50.0	1617	60.11	908	42.47	25155	20.78	12686	0.50	124.70	13052	
																		60
		9.1		10	27.5	4.77	11.60	72.0	1900	51.32	1017	38.19	26146	11.84	13736	0.53	54.30	
																		20
			30	32.0	4.84	11.48	1.3	1383	71.72	905	54.47	22634	23.69	12409	0.55	233.30	15524	
																		60
10	28.0		4.78	11.58	45.0	1483	64.97	930	50.00	25756	12.99	13889	0.54	137.80	10795			
																20	31.2	4.80
30	34.0	4.86	11.44	7.0	700	83.46	791	55.65	20293	28.77	11650	0.57	260.30	22071				
															60	40.2	4.91	11.02

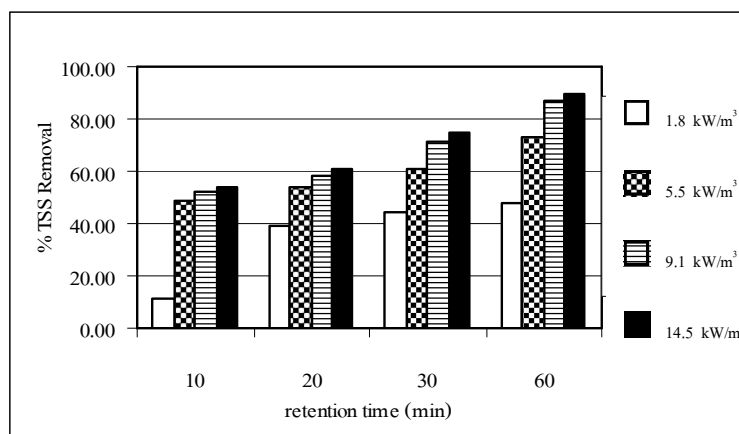
ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองในการบำบัดน้ำเสีย โดยจัดเรียงอิเล็กทรอนิกส์แบบโปรแกรมโฟลาร์ (ต่อ)

พื้นที่ ของ ขี้โพฟฟ้า (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	ระยะห่าง ระหว่าง ขี้โพฟฟ้า (cm)	พลังงาน โพฟฟ้า (KW/m <sup>3</sup> )	เวลา (min.)	อุณหภูมิ ( <sup>0</sup> C)	พีเอช	ความเร็ว โพฟฟ้า (mS/cm)	SV <sub>60</sub> (ml/l)	TSS		Color		COD		BOD <sub>5</sub> (mg/l)	BOD <sub>5</sub> : COD	ปริมาณออกซิเจนใน																
								(mg/l)	(%)	(SU)	(%)	(mg/l)	(%)			น้ำ (mg/l)	ตะกอน (mg/kg)															
39	2.5	1.8	10	25.5	4.73	11.60	275.0	2433	11.59	1555	16.35	25882	12.33	11652	0.45	36.90	4349															
																		20	26.0	4.76	11.66	150.0	2367	39.04	1394	31.51	24706	19.18	11528	0.47	45.00	6728
			60	29.8	4.88	11.62	1.3	2017	48.06	1091	45.57	22353	24.29	11445	0.51	235.80	13963															
																		10	25.8	4.75	11.55	115.0	1883	49.11	1310	30.00	25098	15.44	13145	0.52	37.70	6982
		30	28.8	4.83	11.77	1.0	1583	60.91	1099	40.22	22353	21.92	11445	0.51	151.00	8480																
																	60	30.0	4.89	11.70	1.0	1100	72.84	998	45.57	20150	27.85	11197	0.55	357.30	18465	
																																10
		20	29.7	4.82	11.55	5.0	1617	58.18	1199	40.84	22906	21.43	15688	0.68	162.70	10626																
																	30	32.0	4.86	11.40	3.0	1067	71.16	1003	45.81	21404	22.78	13444	0.63	235.80	16811	
																																60
10	29.0	4.81	11.53	26.0	1850	54.14	1154	42.71	22160	16.47	14027	0.63	72.40	10754																		
															20	30.0	4.84	11.46	1.5	1433	61.27	1050	47.88	21657	22.56	14152	0.68	159.50	10968			
																														30	33.0	4.88
60	38.8	4.96	11.10	7.0	383	89.65	914	54.15	18431	36.99	12699	0.69	416.30	35129																		

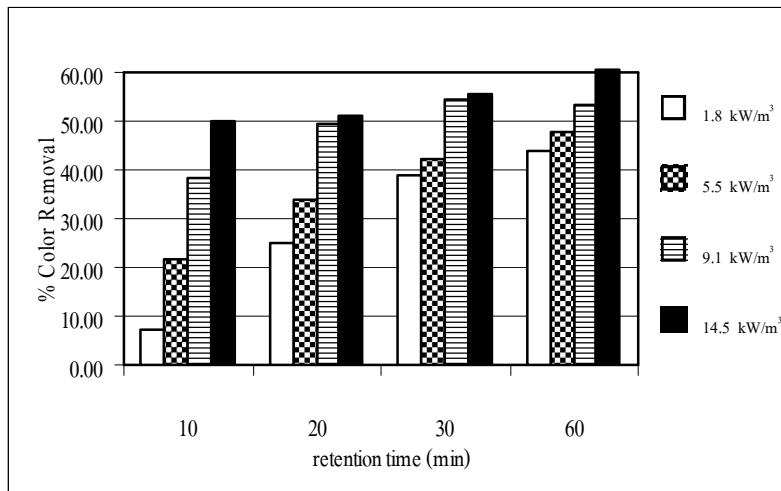
เทียบประสิทธิภาพการกำจัดสี ของทั้ง 3 รูปแบบการจัดเรียงอิเล็กโทรด พบว่า ที่พลังงานไฟฟ้า 14.5 kW/m<sup>3</sup> เวลาเก็บกัก 60 min มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้ดีที่สุดซึ่งลักษณะสีของน้ำเสียที่ลดลง ในแต่รูปแบบการจัดเรียงอิเล็กโทรด เมื่อเปรียบเทียบกับสีของน้ำเสียที่ไม่ผ่านกระบวนการไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.38



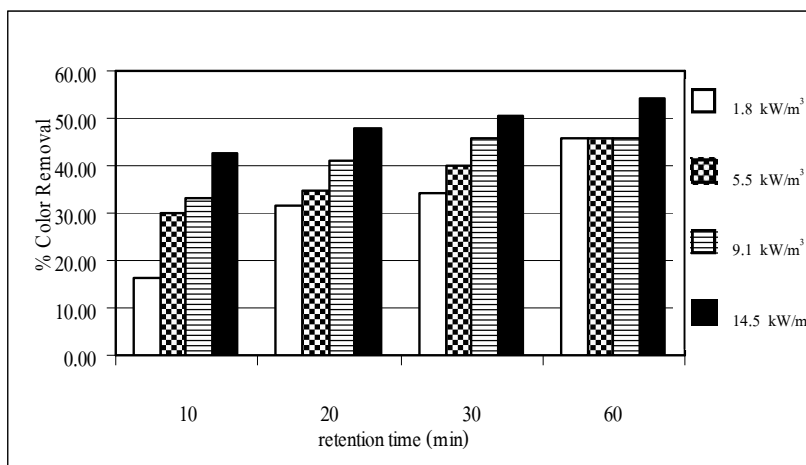
รูปที่ 4.34 การเปลี่ยนแปลงค่าของแรงแจ้วนลอยจากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>



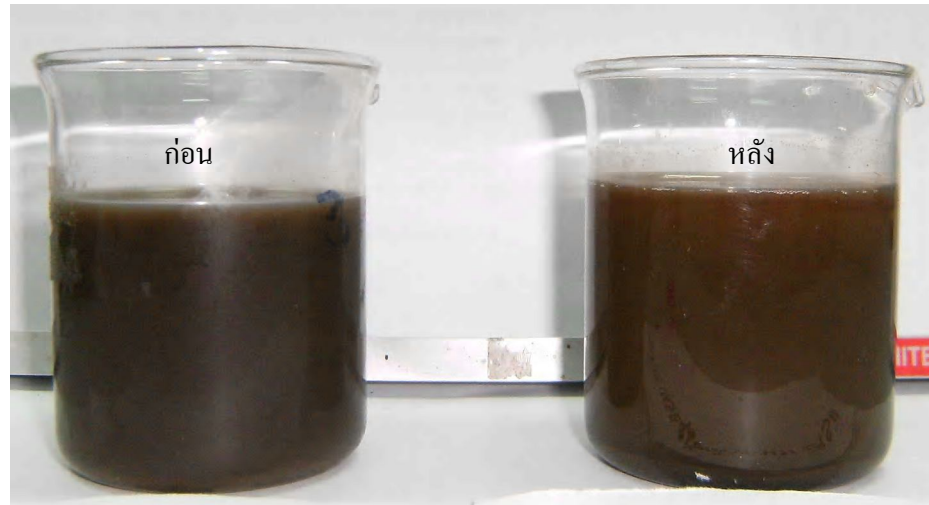
รูปที่ 4.35 การเปลี่ยนแปลงค่าของแรงแจ้วนลอยจากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>



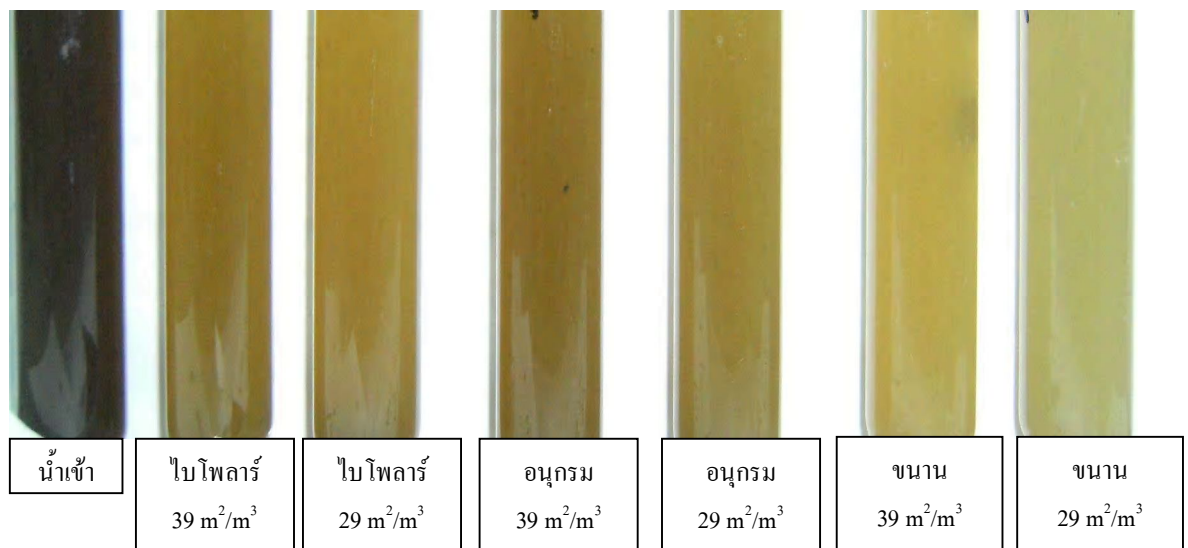
รูปที่ 4.36 การเปลี่ยนแปลงสี จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้า แบบไบโพลาร์  
พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>



รูปที่ 4.37 การเปลี่ยนแปลงสี จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้า แบบไบโพลาร์  
พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.38 ลักษณะสีของน้ำเสีย (ก) น้ำเสียที่ไม่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี (ก่อนและหลังเข้าสู่ระบบหมักแบบไร้อากาศ) (ข) น้ำเสียที่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมีจากการจัดเรียงอิเล็กโทรด 3 รูปแบบ ที่พลังงานไฟฟ้า 14.5 kW/m<sup>3</sup> เวลาเก็บกัก 60 min



#### 4.4.3 UV<sub>254</sub> Absorption

จากการทดลอง พบว่า ค่า UV<sub>254</sub> Absorption เฉลี่ยของน้ำเสียก่อนการทดลอง คือ 47.62 ซึ่งเมื่อเพิ่มพลังงานไฟฟ้าและเวลาเก็บกัก ประสิทธิภาพการลดค่า UV<sub>254</sub> Absorption จะเพิ่มขึ้น โดยที่พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> พลังงานไฟฟ้า 1.8 kW/m<sup>3</sup> มีประสิทธิภาพการกำจัด UV<sub>254</sub> Absorption ต่ำสุดอยู่ในช่วง 3.39-13.66% ดังรูปที่ 4.39 และประสิทธิภาพการกำจัด UV<sub>254</sub> Absorption สูงสุด พบที่พลังงานไฟฟ้า 14.5 kW/m<sup>3</sup> คือ 19.59-35.39% และสำหรับพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> ประสิทธิภาพการกำจัด UV<sub>254</sub> Absorption ใกล้เคียงกันที่พลังงานไฟฟ้า 1.8-5.5 kW/m<sup>3</sup> โดยที่พลังงานไฟฟ้า 9.1-14.5 kW/m<sup>3</sup> มีประสิทธิภาพการกำจัด UV<sub>254</sub> Absorption อยู่ในช่วง 28.84-48.13% ดังรูปที่ 4.40 โดยกลไกในการลดค่า UV<sub>254</sub> Absorption เป็นไปตามหัวข้อ 4.2.3

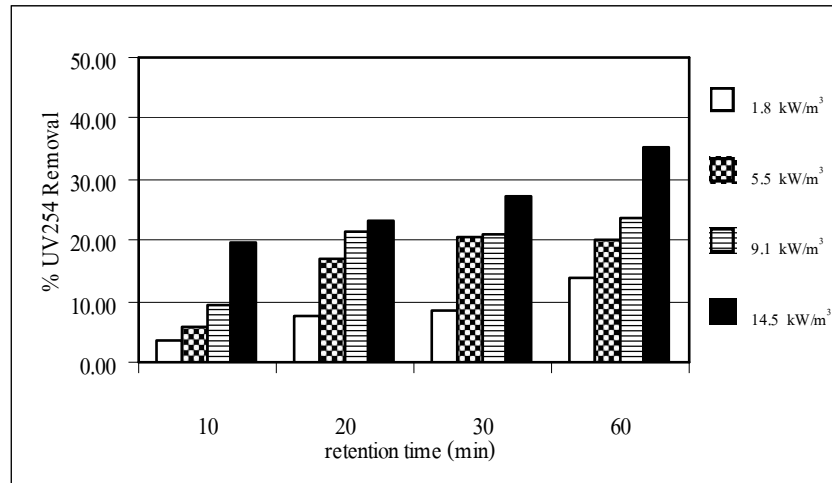
#### 4.4.4 ซีโอดี

ค่าซีโอดีเฉลี่ยของน้ำเสียก่อนการทดลอง คือ 27,476 mg/l หลังจากผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี ที่ได้ปรับเปลี่ยนค่าพลังงานไฟฟ้าและเวลาเก็บกัก พบว่า เมื่อเพิ่มพลังงานไฟฟ้าและเวลาเก็บกัก ประสิทธิภาพการลดค่า COD จะเพิ่มขึ้น และจากการใช้พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> พบว่า พลังงานไฟฟ้า 14.5 kW/m<sup>3</sup> มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงสุด อยู่ในช่วง 13-35.62% ดังรูป 4.41 และสำหรับการใช้พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> พลังงานไฟฟ้า 1.8-9.1 kW/m<sup>3</sup> เวลาเก็บกัก 10-30 min มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีได้ใกล้เคียงกัน และที่พลังงานไฟฟ้า 14.5 kW/m<sup>3</sup> เวลาเก็บกัก 60 min มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงสุด คือ 37% ดังรูป 4.42 โดยกลไกในการกำจัดค่า COD เป็นไปตามหัวข้อ 4.2.4 และ 4.3.4

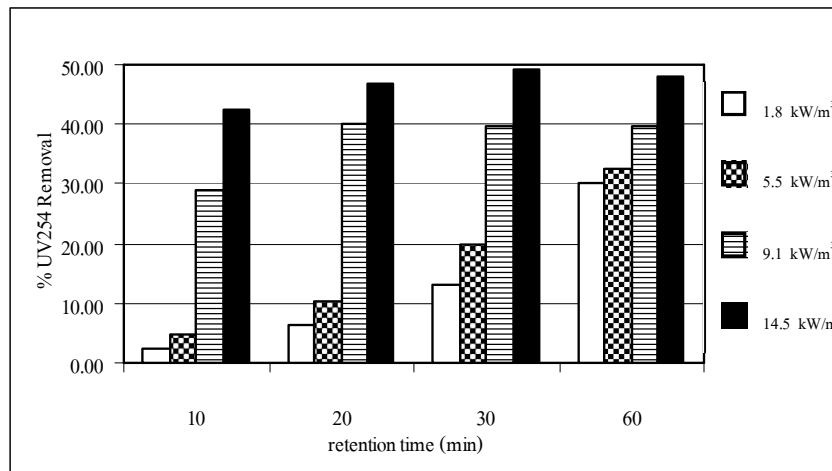
#### 4.4.5 บีโอดี

จากการทดลองพบว่า ค่า BOD<sub>5</sub> เริ่มต้นเฉลี่ย 15,119±2,553 mg/l ทำให้ค่าการย่อยสลายทางชีวภาพหรือความสัมพันธ์ระหว่างค่า BOD<sub>5</sub> และค่า COD เท่ากับ 0.55 ซึ่งเมื่อผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี พบว่า ที่พลังงานไฟฟ้า 9.1-14.5 kW/m<sup>3</sup> ของทั้ง 2 จำนวนพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า มีค่า BOD<sub>5</sub>:COD ใกล้เคียงกันมากอยู่ในช่วง 0.53-0.69 ซึ่งที่พลังงานไฟฟ้า 14.5 kW/m<sup>3</sup> เวลาเก็บกัก 60 min พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> ค่า BOD<sub>5</sub> ลดลงเป็น 12,355 mg/l ดังรูปที่ 4.43 ค่า COD ลดลง 37% ทำให้ค่า BOD<sub>5</sub>:COD เพิ่มขึ้นจาก 0.58 เป็น 0.69 ดังรูปที่ 4.44 และเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> พบว่า ที่พลังงานไฟฟ้า 9.1 kW/m<sup>3</sup> เวลาเก็บกัก 60 min ค่า BOD<sub>5</sub> เพิ่มขึ้นเป็น 13,860 mg/l ดังรูปที่ 4.45 ค่า COD ลดลง 32.09% ทำให้ค่า BOD<sub>5</sub>:COD เพิ่มขึ้นจาก

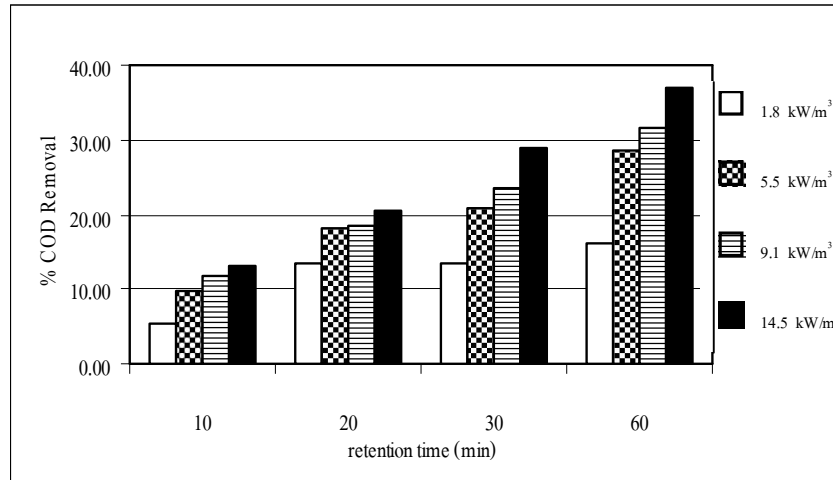
0.58 เป็น 0.69 ดังรูปที่ 4.46 เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างค่า  $BOD_5:COD$  สูงสุด พบว่า ทั้งพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 และ  $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$  มีค่า  $BOD_5:COD$  สูงสุดเท่ากัน



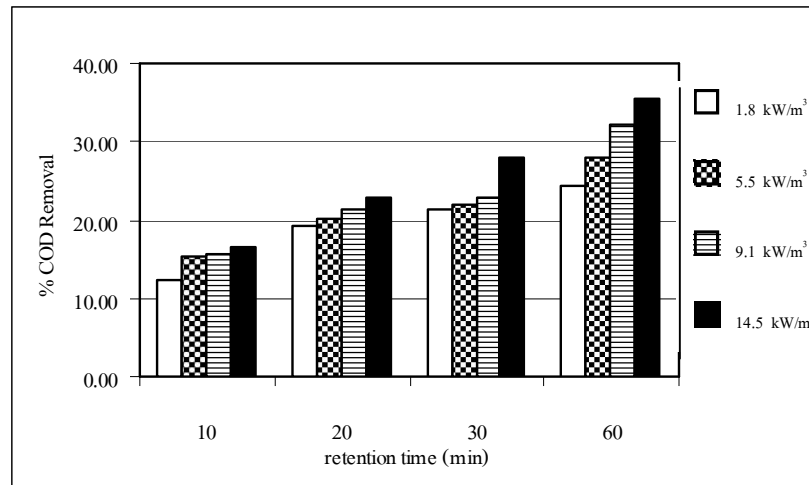
รูปที่ 4.39 การเปลี่ยนแปลง  $UV_{254}$  absorption จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$



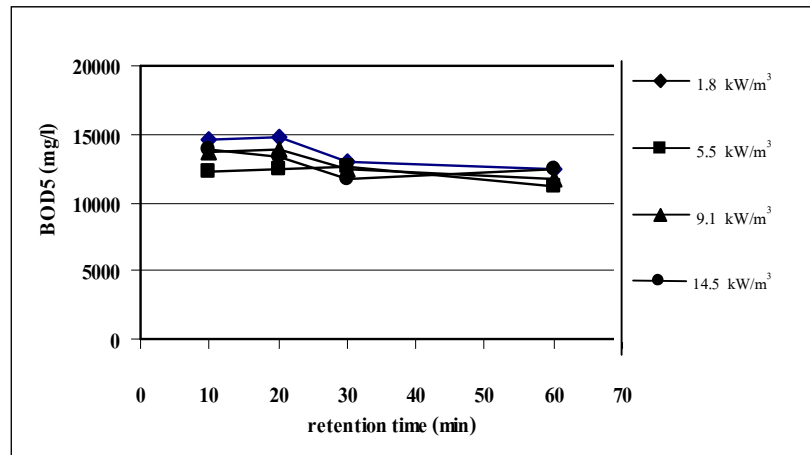
รูปที่ 4.40 การเปลี่ยนแปลง  $UV_{254}$  absorption จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$



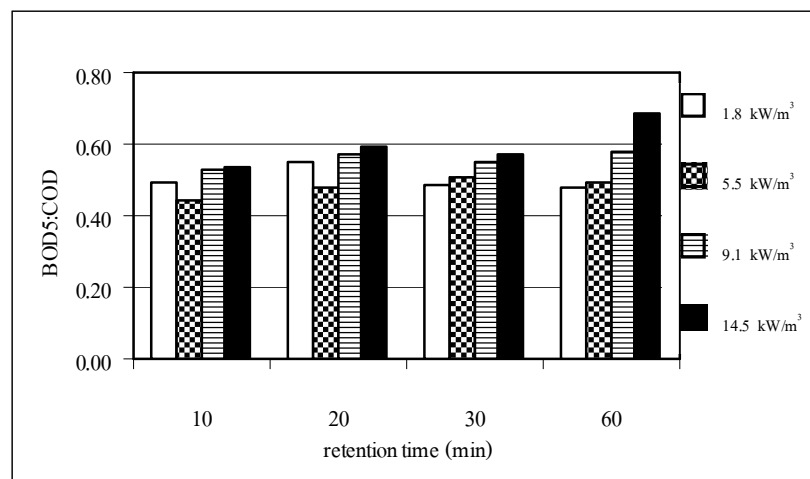
รูปที่ 4.41 การเปลี่ยนแปลงค่า COD จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>



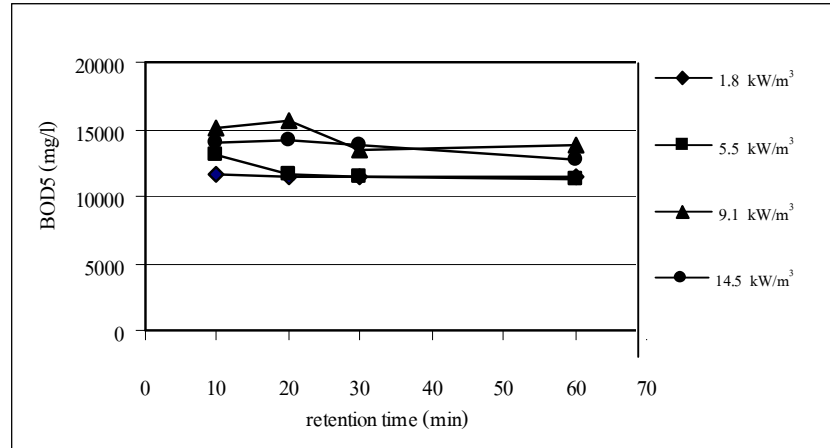
รูปที่ 4.42 การเปลี่ยนแปลงค่า COD จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>



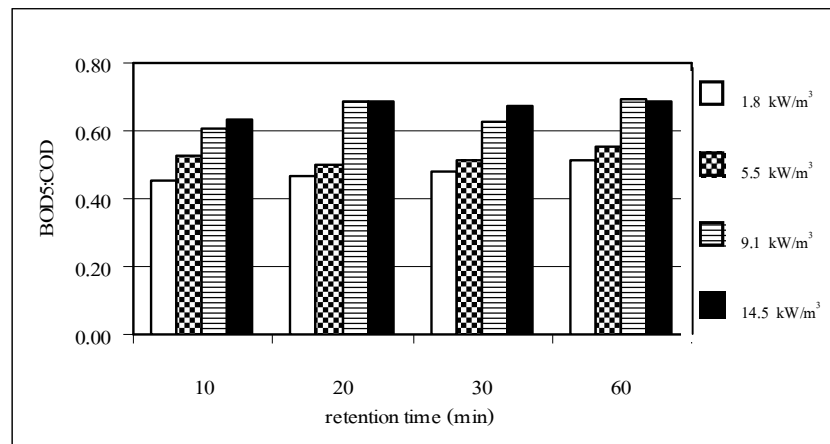
รูปที่ 4.43 การเปลี่ยนแปลงค่า BOD<sub>5</sub> จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้า แบบไบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>



รูปที่ 4.44 การเปลี่ยนแปลงค่า BOD<sub>5</sub>:COD จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้า แบบไบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>



รูปที่ 4.45 การเปลี่ยนแปลงค่า BOD<sub>5</sub> จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้า แบบไบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>



รูปที่ 4.46 การเปลี่ยนแปลงค่า BOD<sub>5</sub>:COD จากการบำบัดน้ำเสียโดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

#### 4.4.6 ปริมาณอลูมิเนียม

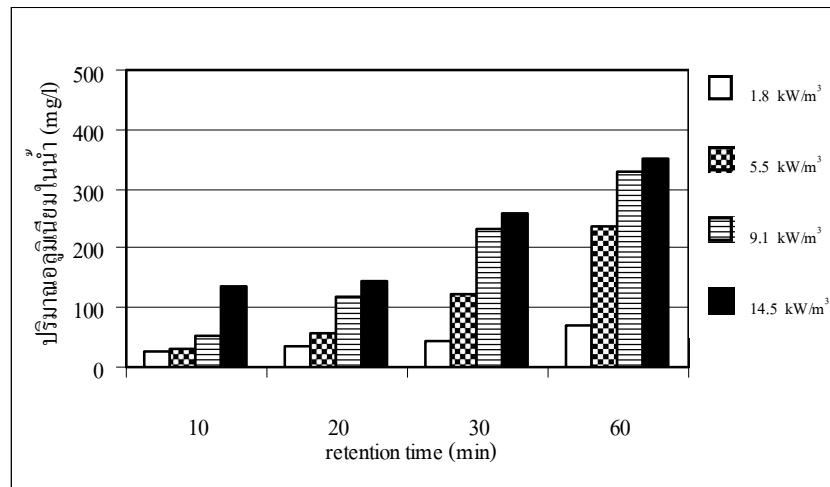
จากผลการทดลอง พบว่า เมื่อเพิ่มพลังงานไฟฟ้าและเวลาเก็บกัก ปริมาณอลูมิเนียมในน้ำ และในตะกอนจะเพิ่มขึ้น สำหรับพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$  ปริมาณอลูมิเนียมในน้ำต่ำสุดและสูงสุด คือ  $26.80 \text{ mg/l}$  พบที่พลังงานไฟฟ้า  $1.8 \text{ kW/m}^3$  เวลาเก็บกัก  $10 \text{ min}$  และ  $352.10 \text{ mg/l}$  พบที่พลังงานไฟฟ้า  $14.5 \text{ kW/m}^3$  เวลาเก็บกัก  $60 \text{ min}$  ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.47 สำหรับปริมาณอลูมิเนียมในตะกอน อยู่ในช่วง  $2,996 - 46,535 \text{ mg/kg}$  โดยที่พลังงานไฟฟ้า  $14.5 \text{ kW/m}^3$  มีปริมาณอลูมิเนียมสะสมในตะกอนมากที่สุด ดังรูปที่ 4.48 เนื่องจากเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ปริมาณการแตกตัวของอลูมิเนียมที่ขั้วแอโนดจะเพิ่มขึ้น ประกอบ  $\text{Al}^{3+}$  ซึ่งอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ และเมื่อจับกับอนุภาคที่มีประจุลบจึงเกิดการตกตะกอน ทำให้ปริมาณอลูมิเนียมสะสมในตะกอนสูงกว่าสะสมในน้ำ สำหรับพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$  ปริมาณอลูมิเนียมในน้ำต่ำสุดและสูงสุด คือ  $36.90 \text{ mg/l}$  พบที่พลังงานไฟฟ้า  $1.8 \text{ kW/m}^3$  เวลาเก็บกัก  $10 \text{ min}$  และ  $416.30 \text{ mg/l}$  พบที่พลังงานไฟฟ้า  $14.5 \text{ kW/m}^3$  เวลาเก็บกัก  $60 \text{ min}$  ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.49 สำหรับปริมาณอลูมิเนียมในตะกอน อยู่ในช่วง  $6,982 - 35,129 \text{ mg/kg}$  โดยที่พลังงานไฟฟ้า  $14.5 \text{ kW/m}^3$  มีปริมาณอลูมิเนียมสะสมในตะกอนมากที่สุด ดังรูปที่ 4.50 และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณอลูมิเนียมในน้ำจากการใช้พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $29$  และ  $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$  พบว่า ปริมาณอลูมิเนียมในน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อใช้พื้นที่ของขั้วไฟฟ้ามากหรือระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าน้อย เนื่องจากเมื่อระยะการถ่ายโอนอิเล็กตรอนน้อย การเคลื่อนที่ของไอออนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดจะรวดเร็ว และไม่เสถียรจึงทำให้อลูมิเนียมบางส่วนเกิดการตกตะกอนน้อย

#### 4.4.7 สรุปประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากการจัดเรียง

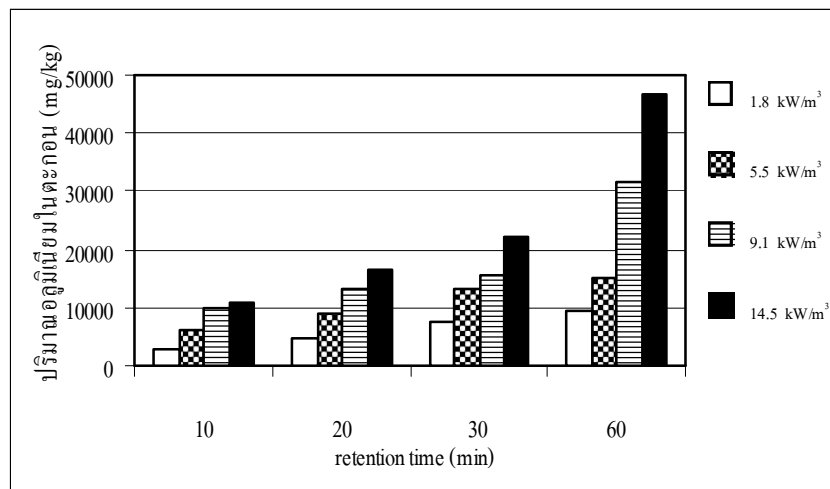
##### อิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์

จากการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานไฟฟ้า เวลาเก็บกัก และพื้นที่ผิวของอิเล็กโทรด พบว่า พลังงานไฟฟ้า  $14.5 \text{ kW/m}^3$  เวลาเก็บกัก  $60 \text{ min}$  มีประสิทธิภาพการกำจัดค่า COD สี และของแข็งแขวนลอยได้สูงสุด คือ  $37\%$  ( $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$ )  $61\%$  ( $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ) และ  $88.59-90\%$  ( $29-39 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ) ตามลำดับ สภาวะที่เหมาะสมที่สุด เมื่อพิจารณาโดยใช้ค่าการย่อยสลายทางชีวภาพ ( $\text{BOD}_5:\text{COD}$ ) สูงสุดเป็นเกณฑ์ ในหัวข้อ 4.4.9 ที่พลังงานไฟฟ้า  $14.5 \text{ kW/m}^3$  เวลาเก็บกัก  $60 \text{ min}$  พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$  ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด  $3.0 \text{ cm}$  มีประสิทธิภาพในการเพิ่มค่า  $\text{BOD}_5:\text{COD}$  จาก  $0.58$  เป็น  $0.69$  และมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี สี และ TSS คือ  $35.62\%$   $60.56\%$  และ  $88.60\%$  ตามลำดับ และปริมาณตะกอนจมน้ำลดลงจาก  $500 \text{ ml}$  เหลือ  $262 \text{ ml}$  ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ พลังงานไฟฟ้า  $9.1 \text{ kW/m}^3$  เวลาเก็บกัก  $60 \text{ min}$  พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$  ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด  $2.5 \text{ cm}$  แม้จะสามารถเพิ่มค่า  $\text{BOD}_5:\text{COD}$  ได้เท่ากัน คือ  $0.69$  แต่ ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี สี

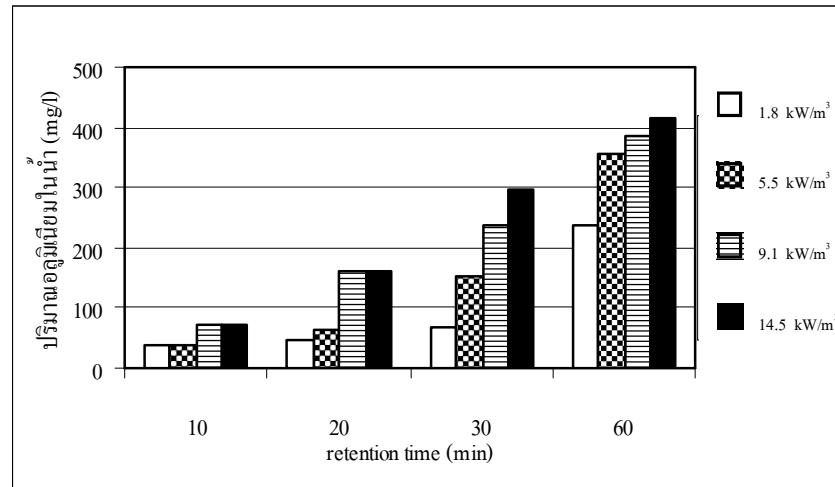
และ TSS คือ 32% 46% และ 87% ตามลำดับ ยังต่ำกว่าที่พลังงานไฟฟ้า  $14.5 \text{ kW/m}^3$  พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$  ประกอบกับการใช้จำนวนขั้วไฟฟ้ามากจะทำให้สูญเสียค่าใช้จ่ายสูง และมีปริมาณอลูมิเนียมสะสมอยู่ในน้ำและตะกอนมากกว่า ดังกล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.4.10



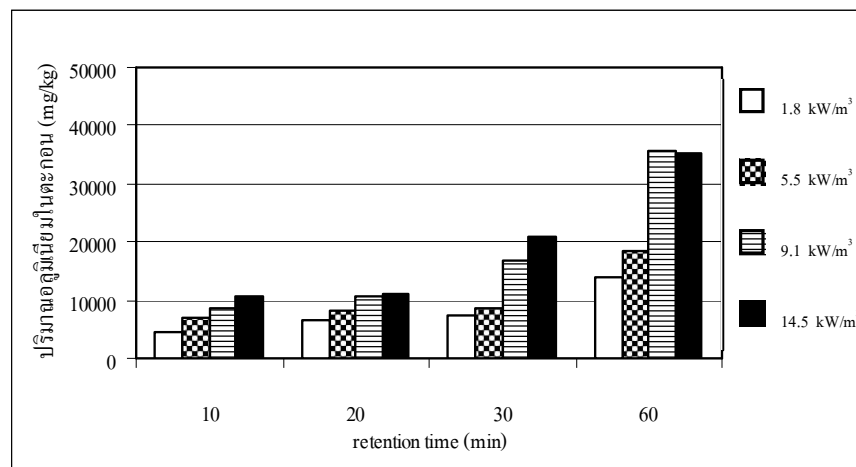
รูปที่ 4.47 การเปลี่ยนแปลงปริมาณอลูมิเนียมในน้ำจากการบำบัดน้ำเสีย โดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$



รูปที่ 4.48 การเปลี่ยนแปลงปริมาณอลูมิเนียมในตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย โดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$



รูปที่ 4.49 การเปลี่ยนแปลงปริมาณอูมิเนียมน้ำจากการบำบัดน้ำเสีย โดยจัดเรียง  
ขั้วไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$



รูปที่ 4.50 การเปลี่ยนแปลงปริมาณอูมิเนียมนในตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย โดยจัดเรียง  
ขั้วไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$



#### 4.5 ผลของการใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีต่อค่าพารามิเตอร์อื่นๆ

ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมาผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี ด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานไฟฟ้า 4 ค่า คือ 1.8 5.5 9.1 และ 14.5 kW/m<sup>3</sup> ปรับเปลี่ยนเวลาเก็บกัก 4 ค่า คือ 10 20 30 และ 60 min และปรับเปลี่ยนรูปแบบการจัดเรียงอิเล็กโทรด 3 แบบ คือ แบบขนาน แบบอนุกรม และแบบไบโพลาร์ พบว่า

##### 4.5.1 อุณหภูมิ

จากผลการทดลอง พบว่า น้ำเสียที่อุณหภูมิห้อง (23-25 °C) เมื่อผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี แล้วจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งจากการปรับค่าพลังงานไฟฟ้าและเวลาเก็บกักที่ต่างกัน จึงทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นไม่เท่ากัน ดังตารางที่ 4.2-4.4 โดยที่พลังงานไฟฟ้า 14.5 kW/m<sup>3</sup> เวลาเก็บกัก 60 min อุณหภูมิหลังทดลองเพิ่มขึ้นสูงสุดเป็น 42 และ 44 °C (แบบขนาน) 38 และ 39 °C (แบบอนุกรม) และ 40 และ 39 °C (แบบไบโพลาร์) สำหรับพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 และ 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> ตามลำดับ ทั้งนี้ เนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน (Ampere loss) ดังนั้น เมื่อเพิ่มค่าพลังงานไฟฟ้าและเวลาเก็บกักจะทำให้อุณหภูมิของน้ำหลังผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมีสูงขึ้น และหากใช้พลังงานไฟฟ้าสูงเกินไปจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานมากขึ้น ซึ่งสามารถลดค่าอุณหภูมิของน้ำเสียที่เกิดจากการสูญเสียพลังงาน โดยการลดระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (Essadki *et al.*, 2008)

##### 4.5.2 พีเอช

พีเอชของน้ำเสียเริ่มต้นมีค่าเฉลี่ยในช่วง 4.71±0.04 หลังผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี พบว่า ค่าพีเอชจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังตารางที่ 4.2-4.4 เมื่อเพิ่มพลังงานไฟฟ้า เวลาเก็บกัก และพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า พีเอชจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาณไอออนจากขั้วลุ่มิเนียมมีการละลาย หรือแตกตัวออกมา มาก ทำให้มีการสูญเสียก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทด เป็นผลให้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH<sup>-</sup>) เพิ่มขึ้น (Vijayaraghavan *et al.*, 2008) และพวกประจุลบ (anions) เช่น Cl<sup>-</sup> SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> สามารถเปลี่ยน Al (OH)<sub>3</sub> ให้เป็น OH<sup>-</sup> อิสระได้ ทำให้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH<sup>-</sup>) เพิ่มขึ้น (Mouedhen *et al.*, 2007) ค่าพีเอช หลังการทดลองจึงเพิ่มขึ้น ซึ่งพบว่า การจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบขนานและแบบอนุกรม ค่าพีเอชหลังการทดลองเพิ่มขึ้นได้ใกล้เคียงกัน แตกต่างจากการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ ซึ่งค่าพีเอชเพิ่มขึ้นสูงสุดเป็น 4.91 และ 4.96 สำหรับพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 และ 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> ตามลำดับ ที่พลังงานไฟฟ้า 14.5 kW/m<sup>3</sup> เวลาเก็บกัก 60 min ทั้งนี้เนื่องจาก การจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ซึ่งมี

จุดเชื่อมอิเล็กโทรดเพียง 2 จุด เฉพาะแผ่นอิเล็กโทรดที่อยู่ปลายนอกสุด ทำให้แต่ละแผ่นของอิเล็กโทรดด้านหนึ่งเป็นขั้วบวกทำหน้าที่เป็นแอโนดและอีกด้านหนึ่งเป็นขั้วลบทำหน้าที่เป็นแคโทด ดังนั้นจึงทำให้เกิด  $\text{OH}^-$  มากขึ้นตามปฏิกิริยาที่เกิดจากขั้วไฟฟ้า

#### 4.5.3 ความนำไฟฟ้า

น้ำเสียก่อนการทดลองมีค่าความนำไฟฟ้าเฉลี่ยในช่วง  $11.65 \pm 0.14$  mS/cm แต่หลังจากผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี พบว่า ที่เวลาเก็บกัก 10-20 min ค่าความนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากหลังผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมีในช่วงแรกจะเกิดอออนจากปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ค่าความนำไฟฟ้าจึงเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น คือ 30-60 min ค่าความนำไฟฟ้าจะลดลงทั้งนี้เพราะอออนบางส่วนได้จับกับสารประกอบอินทรีย์แล้วตกตะกอน จึงทำให้ปริมาณอออนมีค่าลดลง ค่าความนำไฟฟ้าก็จะลดลงตามเช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้า พบว่า ที่พลังงานไฟฟ้า  $1.8-5.5$  kW/m<sup>3</sup> เมื่อเวลาเก็บกักเพิ่มขึ้น ค่าความนำไฟฟ้าค่อนข้างคงที่ แตกต่างกับที่พลังงาน  $9.1-14.5$  kW/m<sup>3</sup> เมื่อเพิ่มเวลาเก็บกัก ค่าความนำไฟฟ้าจะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากอออนที่ถูกกระตุ้นจากกระแสไฟฟ้าสูง ทำให้มีพลังงานและความสามารถในการจับกับสารประกอบอินทรีย์แล้วกลายเป็นตะกอนได้ดี จึงทำให้ปริมาณอออนมีค่าลดลง ค่าความนำไฟฟ้าก็จะลดลงตามเช่นกัน ซึ่งพลังงานไฟฟ้า  $14.5$  kW/m<sup>3</sup> เวลาเก็บกัก 60 min มีค่าความนำไฟฟ้าที่ต่ำสุด คือ 11.07 และ 10.73 mS/cm (แบบขนาน) 11.14 และ 11.15 mS/cm (แบบอนุกรม) และ 10.02 และ 11.10 mS/cm (แบบไบโพลาร์) สำหรับพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 และ 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

#### 4.5.4 $\text{SV}_{60}$

จากการทดลองได้วัดค่า  $\text{SV}_{60}$  เนื่องจากน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี จะมีปริมาณตะกอนค่อนข้างมาก และใช้เวลาในการตกตะกอนนาน รวมทั้งน้ำเสียก่อนการทดลองมีความขุ่นและของแข็งส่วนใหญ่เป็นของแข็งแขวนลอยซึ่งตกตะกอนยาก แม้จะตั้งทิ้งไว้เวลานาน และจากการทดลองพบว่า ค่า  $\text{SV}_{60}$  เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มพลังงานไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด เนื่องจากเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น การแตกตัวของอูมิเนียมอออนจากขั้วแอโนดมาก ประกอบกับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามากทำให้ผลผลิตก๊าซ (อออน) เคลื่อนที่ช้าลง ซึ่งเป็นการเพิ่มโอกาสในการจับกับมลสารต่างๆ จึงเกิดการตกตะกอนของอูมิเนียมไฮดรอกไซด์และสารอินทรีย์ จำนวนมากขึ้น อย่างไรก็ตาม พบว่า สำหรับเวลาเก็บกัก 30 min ของทั้ง 2 จำนวนขั้วไฟฟ้า ปริมาณตะกอนเกิดขึ้นน้อยมาก ซึ่งทำให้ค่า  $\text{SV}_{60}$  อยู่ในช่วง 1.5-65 ml/l (แบบขนาน) 1.0-7.1 ml/l (แบบอนุกรม) และ 1.0-5.0 ml/l (แบบไบโพลาร์)

## 4.6 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของระบบไฟฟ้าเคมี

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาทดลองในระดับห้องปฏิบัติการเบื้องต้น เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ระบบไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ซึ่งมีการพิจารณาค่าใช้จ่ายเบื้องต้นของระบบ ได้แก่ ค่าขั้วไฟฟ้า (อลูมิเนียม) และค่าพลังงานไฟฟ้า ซึ่งค่าใช้จ่ายเบื้องต้นของระบบจะมีค่าสูงขึ้น เมื่อใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า และเวลาเก็บกักเพิ่มขึ้น โดยค่าใช้จ่ายที่คำนวณนี้อ้างอิงการทดลองโดยใช้น้ำเสียที่มีปริมาตร  $1 \text{ m}^3$

### 4.6.1 ค่ากระแสไฟฟ้า

การทดลองนี้จะใช้ค่าพลังงานไฟฟ้าคงที่ คือ 1.8 5.5 9.1 และ 14.5  $\text{kW/m}^3$  พบว่า หลังจากผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมีเป็นเวลา 10 20 30 และ 60 min แล้ว ค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 4.5 เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้า และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับค่าพลังงานไฟฟ้า ดังสมการ  $P = VI$  ดังนั้น เมื่อค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์เพิ่มขึ้น ค่าพลังงานไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น สำหรับการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบขนาน จะมีค่ากระแสไฟฟ้าสูงกว่าการจัดเรียงแบบอนุกรมและแบบไบโพลาร์ เนื่องจาก กระแสไฟฟ้ามีการไหลผ่านไปแต่ละขั้วไฟฟ้าความต้านทานจึงเป็นความต้านทานของขั้วไฟฟ้าเพียงขั้วเดียวทำให้ค่าความต้านทานน้อย ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้มาก (Mollah *et al.*, 2001) ดังสมการ  $V = IR$  เมื่อค่าความต้านทานต่ำ ค่ากระแสไฟฟ้าจะสูงขึ้นและค่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สำหรับการจัดเรียงแบบไบโพลาร์และแบบอนุกรม มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าแบบขนาน กล่าวคือ ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบเท่ากัน เนื่องจากกระแสไฟฟ้าเดียวกันไหลผ่านอิเล็กโทรดทั้งหมด กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านจึงต้อง การความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความต้านทานสูง

### 4.6.2 ค่าขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม

น้ำหนักของขั้วไฟฟ้าจะลดลง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้มีการหลุดออกของไอออนโลหะที่ขั้วบวก น้ำหนักขั้วอลูมิเนียมลดลงมาก เมื่อพลังงานไฟฟ้า เวลาเก็บกัก และพื้นที่ผิวของอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่าใช้จ่ายของขั้วไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.6-4.8

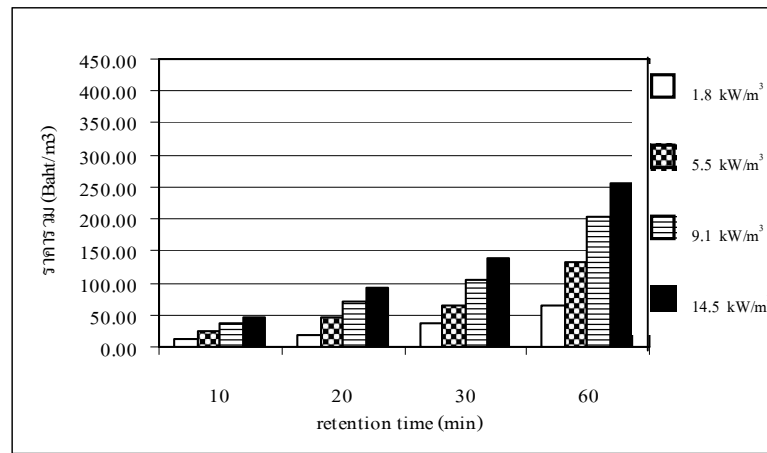
### 4.6.3 ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นของกระบวนการไฟฟ้าเคมี

ระบบบำบัดโดยอาศัยกระบวนการไฟฟ้าเคมี เป็นระบบบำบัดที่สามารถกำจัดค่าซีโอดี สี และของแข็งแขวนลอยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจากการพิจารณาค่าการย่อยสลายทางชีวภาพ

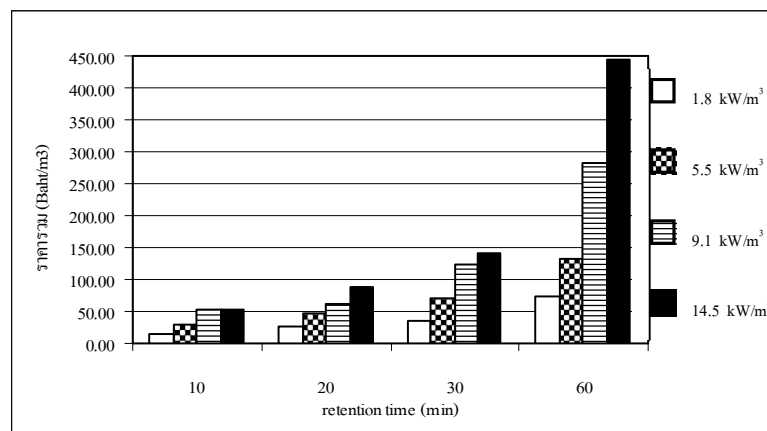
ตารางที่ 4.5 อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสัตว์น้ำ

เวลา (mm)	อนุกรม 29 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>			อนุกรม 39 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>			ขนาน 29 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>			ขนาน 39 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>			ใบพัดาร์ 29 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>			ใบพัดาร์ 39 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>		
	I (A)	V (Volt)	P (watt)	I (A)	V (Volt)	P (watt)	I (A)	V (Volt)	P (watt)	I (A)	V (Volt)	P (watt)	I (A)	V (Volt)	P (watt)	I (A)	V (Volt)	P (watt)
10	0.28	6.99	1.96	0.26	7.93	2.06	0.98	2.03	1.99	1.15	1.77	2.04	0.21	9.50	1.99	0.20	10.00	2.00
20	0.27	7.43	2.01	0.25	7.95	1.99	0.99	2.03	2.01	1.11	1.89	2.10	0.22	9.50	2.09	0.19	10.03	1.91
30	0.28	6.99	1.96	0.26	7.84	2.04	0.97	2.13	2.07	1.11	1.87	2.08	0.22	9.30	2.05	0.22	9.94	2.19
60	0.29	6.77	1.96	0.24	8.26	1.98	0.98	2.09	2.05	1.12	1.79	2.00	0.21	9.50	1.99	0.22	9.34	2.05
ค่าเฉลี่ย	พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 2.00 watt ตั้งขึ้น 2/1.1 = 1.8 kW/m <sup>3</sup> (น้ำตัวอย่างที่ 1.1.1)																	
10	0.45	11.00	4.95	0.42	11.85	4.98	1.58	3.20	5.06	2.00	2.53	5.06	0.43	11.49	4.94	0.38	13.05	4.96
20	0.46	11.01	5.06	0.45	11.04	4.97	1.59	3.20	5.09	2.09	2.34	4.89	0.43	11.62	5.00	0.40	12.44	4.98
30	0.45	11.21	5.04	0.44	11.46	5.04	1.61	3.07	4.94	2.12	2.38	5.05	0.42	11.89	4.99	0.39	13.05	5.09
60	0.44	11.45	5.04	0.45	11.16	5.02	1.6	3.14	5.02	2.08	2.43	5.05	0.43	11.69	5.03	0.38	13.15	5.00
ค่าเฉลี่ย	พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 5.00 watt ตั้งขึ้น 5/1.1 = 5.5 kW/m <sup>3</sup> (น้ำตัวอย่างที่ 1.1.1)																	
10	0.69	14.60	10.07	0.65	15.28	9.93	2.65	3.75	9.94	3.08	3.25	10.01	0.55	18.15	9.98	0.56	18.04	10.10
20	0.7	14.23	9.96	0.66	15.24	10.06	2.62	3.81	9.98	3.00	3.32	9.96	0.54	18.25	9.86	0.52	19.08	9.92
30	0.72	13.78	9.92	0.67	14.94	10.01	2.63	3.82	10.05	3.16	3.18	10.05	0.56	18.02	10.09	0.52	19.09	9.93
60	0.73	13.79	10.07	0.65	15.12	9.83	2.64	3.81	10.06	3.14	3.2	10.05	0.56	18.05	10.11	0.55	18.54	10.20
ค่าเฉลี่ย	พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 10.00 watt ตั้งขึ้น 10/1.1 = 9.1 kW/m <sup>3</sup> (น้ำตัวอย่างที่ 1.1.1)																	
10	0.94	16.98	15.96	0.86	18.6	16.00	3.19	4.99	15.92	4.00	4.00	16.00	0.72	22.00	15.84	0.76	21.05	16.00
20	0.92	17.28	15.90	0.82	19.51	16.00	3.18	5.03	16.00	4.05	3.94	15.96	0.71	22.42	15.92	0.78	20.45	15.95
30	0.92	17.29	15.91	0.84	19.11	16.05	3.19	5.00	15.95	4.00	3.98	15.92	0.72	22.35	16.09	0.76	21.08	16.02
60	0.93	17.10	15.90	0.87	18.24	15.87	3.20	4.97	15.90	4.00	3.95	15.80	0.72	22.25	16.02	0.76	21.1	16.04
ค่าเฉลี่ย	พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 16.00 watt ตั้งขึ้น 16/1.1 = 14.5 kW/m <sup>3</sup> (น้ำตัวอย่างที่ 1.1.1)																	

(BOD<sub>5</sub>:COD) ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพการบำบัดและสภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดในแต่ละรูปแบบการจัดเรียงอิเล็กโทรด และเมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของแต่ละรูปแบบการจัดเรียงอิเล็กโทรด พบว่า เมื่อเพิ่มค่าพลังงานไฟฟ้า เวลาเก็บกัก และพื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วไฟฟ้า ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นจะเพิ่มขึ้น โดยการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบขนาน มีค่าขั้วไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด (29 และ 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) ทำให้ค่าใช้จ่ายรวมอยู่ในช่วง 12-255 Baht /m<sup>3</sup> และ 15-443 Baht /m<sup>3</sup> สำหรับพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 และ 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.51 -4.52 และ ตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.51 ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นหลังการทดลองน้ำเสียโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

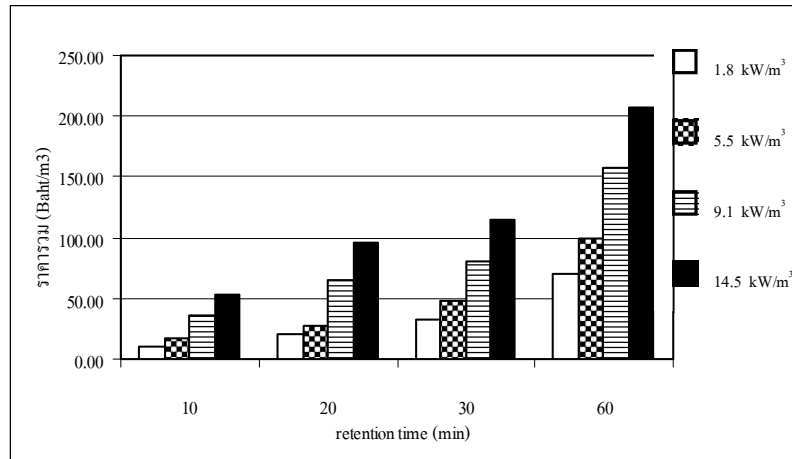


รูปที่ 4.52 ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นหลังการทดลองบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

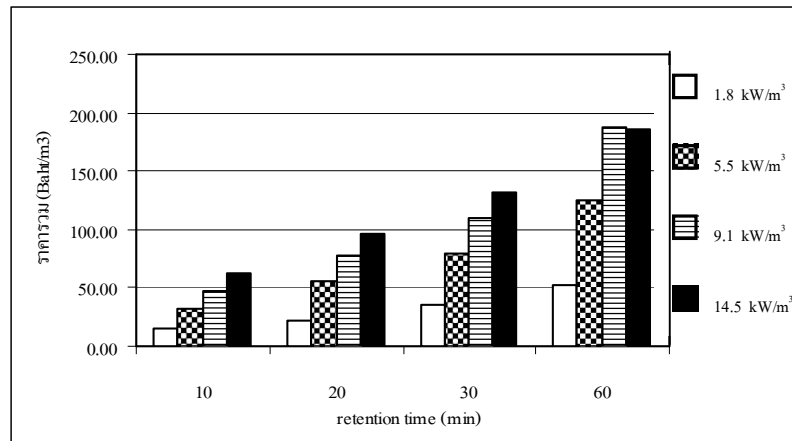
ตารางที่ 4.6 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี ซึ่งจัดเรียงอิเล็กโตรดแบบขนาน

พลังงานไฟฟ้า (kW/m <sup>3</sup> )	เวลา (min)	ค่าไฟฟ้า (Bahr/m <sup>3</sup> )	พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>				พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>			
			ผลต่างแอมโวนิต (g)	ค่า AI (Bahr/m <sup>3</sup> )	ราคาารวม (Bahr/m <sup>3</sup> )	ผลต่าง (Bahr)	ผลต่างแอมโวนิต (g)	ค่า AI (Bahr/m <sup>3</sup> )	ราคาารวม (Bahr/m <sup>3</sup> )	ผลต่าง (Bahr)
1.8	10	0.91	0.0683	11.69	12.60		0.0838	14.47	15.38	
	20	1.82	0.1087	17.80	19.62	7.02	0.1378	24.14	25.96	10.58
	30	2.73	0.1988	34.49	37.22	17.60	0.1924	33.43	36.16	10.20
5.5	60	5.45	0.3539	58.60	64.05	26.83	0.3912	67.04	72.49	36.33
	10	2.27	0.1290	21.52	23.79		0.1547	26.60	28.87	
	20	4.55	0.2365	40.60	45.15	21.36	0.2490	41.50	46.05	17.18
9.1	30	6.82	0.3488	58.75	65.57	20.42	0.3688	63.94	70.76	24.71
	60	13.64	0.6958	119.33	132.97	67.40	0.6630	117.31	130.95	60.19
	10	4.55	0.1916	33.23	37.78		0.2705	47.38	51.93	
14.5	20	9.09	0.3605	61.03	70.12	32.34	0.3005	52.86	61.95	10.02
	30	13.64	0.5268	89.83	103.47	33.34	0.6143	109.13	122.77	60.82
	60	27.27	1.0112	175.35	202.62	99.15	1.4592	254.26	281.53	158.77
14.5	10	7.27	0.2329	39.75	47.02		0.2638	46.76	54.03	
	20	14.55	0.4685	78.51	93.06	46.03	0.4568	75.16	89.71	35.67
	30	21.82	0.7074	118.08	139.90	46.84	0.6997	120.00	141.82	52.11
	60	43.64	1.2361	212.30	255.94	116.04	2.4001	399.75	443.39	301.57

ซึ่งการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบอนุกรม ค่าใช้จ่ายรวมอยู่ในช่วง 10-206 Baht /m<sup>3</sup> และ 15-186 Baht /m<sup>3</sup> สำหรับพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 และ 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.53-4.54 และ ตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.53 ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นหลังการทดลองบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบอนุกรม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>



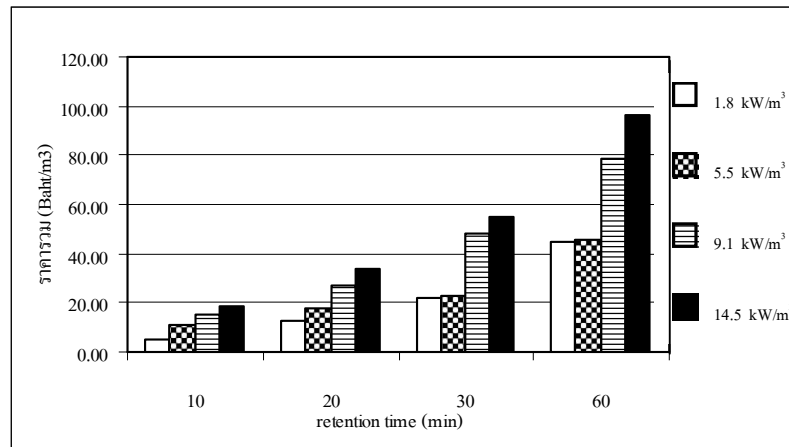
รูปที่ 4.54 ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นหลังการทดลองบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบอนุกรม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

ตารางที่ 4.7 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี ซึ่งจัดเรียงอิเล็กทรอนิกส์โดยแบบอนุกรม

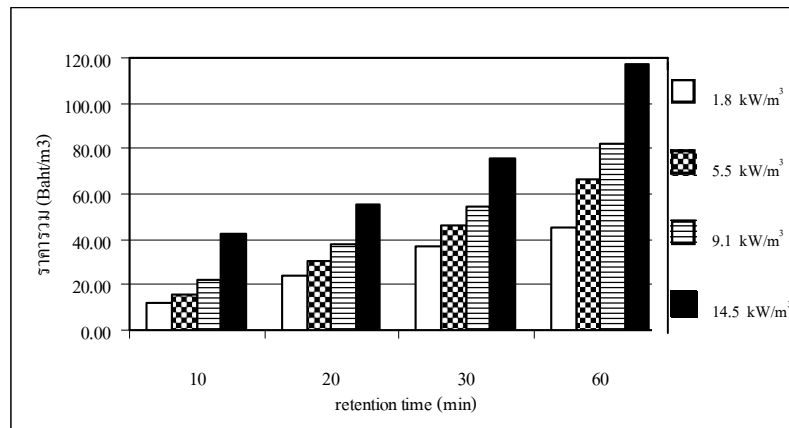
พลังงานไฟฟ้า (KW/m <sup>3</sup> )	เวลา (min)	ค่าไฟฟ้า (Bahr/m <sup>3</sup> )	พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>				พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>			
			ผลต่างของไนต (g)	ค่า AI (Bahr/m <sup>3</sup> )	ราคารวม (Bahr/m <sup>3</sup> )	ผลต่าง (Bahr)	ผลต่างของไนต (g)	ค่า AI (Bahr/m <sup>3</sup> )	ราคารวม (Bahr/m <sup>3</sup> )	ผลต่าง (Bahr)
1.8	10	0.91	0.0553	9.36	10.27		0.0861	14.83	15.74	
	20	1.82	0.1115	18.92	20.74	10.47	0.1219	20.88	22.70	6.96
	30	2.73	0.1711	28.99	31.72	10.98	0.1903	32.16	34.89	12.18
5.5	60	5.45	0.3832	65.29	70.74	39.02	0.2812	47.55	53.01	18.12
	10	2.27	0.0854	15.09	17.36		0.1587	29.68	31.95	
	20	4.55	0.1352	23.05	27.59	10.23	0.2961	50.92	55.47	23.52
9.1	30	6.82	0.2437	40.49	47.30	19.71	0.4063	72.36	79.18	23.71
	60	13.64	0.4997	85.22	98.86	51.55	0.6241	110.80	124.43	45.26
	10	4.55	0.1775	30.72	35.26		0.2387	42.13	46.68	
14.5	20	9.09	0.3306	56.30	65.39	30.12	0.3845	68.50	77.59	30.91
	30	13.64	0.3802	66.15	79.79	14.40	0.519	95.85	109.49	31.90
	60	27.27	0.7661	130.61	157.88	78.09	0.8927	159.68	186.95	77.46
14.5	10	7.27	0.2721	46.17	53.44		0.3283	55.59	62.86	
	20	14.55	0.4743	81.88	96.42	42.98	0.4761	81.35	95.89	33.03
	30	21.82	0.5212	92.26	114.08	17.66	0.6447	110.43	132.25	36.35
	60	43.64	0.9670	162.90	206.53	92.45	0.8411	143.00	186.64	54.39



และสำหรับการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ มีค่าขั้วไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าต่ำสุด (ทั้ง 29 และ 39  $\text{m}^2/\text{m}^3$ ) ทำให้ค่าใช้จ่ายรวมอยู่ในช่วง 5-96 Baht / $\text{m}^3$  และ 12. -117 Baht / $\text{m}^3$  สำหรับพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 และ 39  $\text{m}^2/\text{m}^3$  ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.55-4.56 และ ตารางที่ 4.8



รูปที่ 4.55 ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นหลังการทดลองบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29  $\text{m}^2/\text{m}^3$



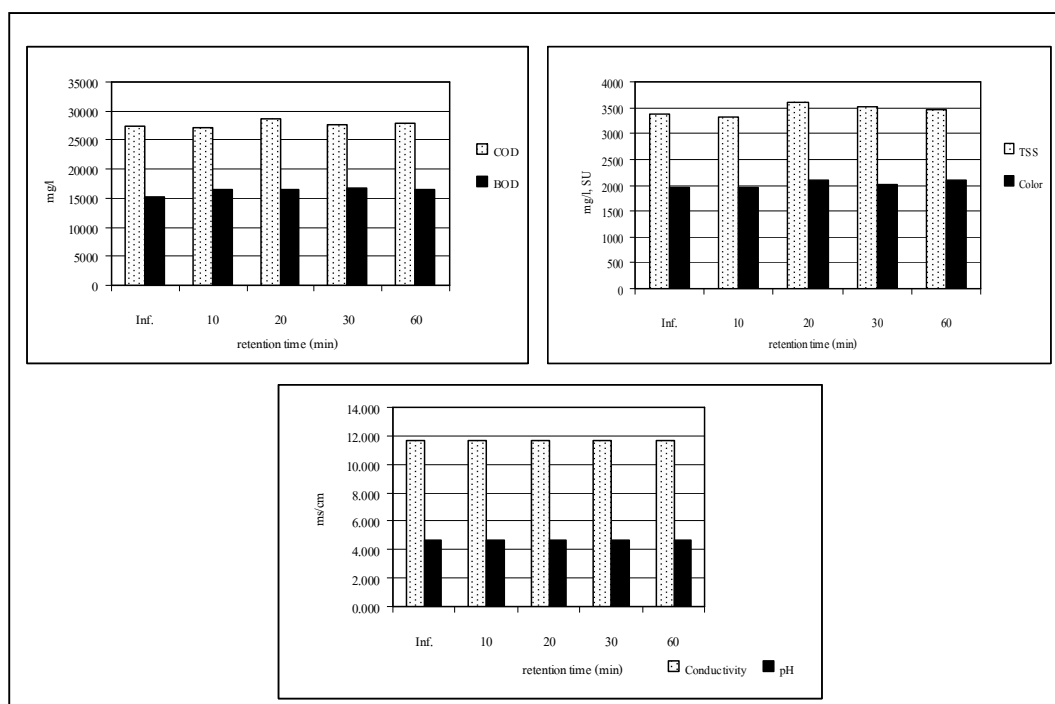
รูปที่ 4.56 ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นหลังการทดลองบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39  $\text{m}^2/\text{m}^3$

ตารางที่ 4.8 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี ซึ่งจัดเรียงอิเล็กโทดแบบไปโพลาร์

พลังงานไฟฟ้า (kW/m <sup>3</sup> )	เวลา (min)	ค่าไฟฟ้า (Bahr/m <sup>3</sup> )	พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>				พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>			
			ผลต่างแอโนด (g)	ค่า AI (Bahr/m <sup>3</sup> )	ราคารวม (Bahr/m <sup>3</sup> )	ผลต่าง (Bahr)	ผลต่างแอโนด (g)	ค่า AI (Bahr/m <sup>3</sup> )	ราคารวม (Bahr/m <sup>3</sup> )	ผลต่าง (Bahr)
1.8	10	0.91	0.0227	4.13	5.04		0.0649	11.10	12.01	
	20	1.82	0.0607	10.95	12.77	7.73	0.1209	21.94	23.76	11.74
	30	2.73	0.1081	18.97	21.70	8.93	0.1931	34.55	37.27	13.52
5.5	60	5.45	0.2251	39.58	45.04	23.34	0.2278	39.66	45.12	7.85
	10	2.27	0.0515	9.12	11.39		0.0771	13.27	15.54	
	20	4.55	0.0746	12.86	17.40	6.02	0.1512	26.26	30.80	15.26
9.1	30	6.82	0.0942	16.14	22.96	5.55	0.2159	38.88	45.70	14.90
	60	13.64	0.1765	31.91	45.54	22.59	0.2962	52.59	66.23	20.53
	10	4.55	0.0605	11.05	15.59		0.0951	17.32	21.87	
14.5	20	9.09	0.1004	18.20	27.29	11.69	0.1627	28.63	37.72	15.85
	30	13.64	0.1892	34.75	48.38	21.10	0.2269	40.57	54.20	16.48
	60	27.27	0.2774	51.49	78.76	30.38	0.3097	54.66	81.93	27.73
14.5	10	7.27	0.0666	11.72	18.99		0.1933	34.76	42.03	
	20	14.55	0.1139	19.53	34.07	15.08	0.2302	40.68	55.23	13.20
	30	21.82	0.1885	33.45	55.27	21.19	0.3048	53.79	75.61	20.38
	60	43.64	0.3010	52.57	96.20	40.94	0.4115	73.95	117.58	41.98

#### 4.7 การทดลองที่ 4 การเปรียบเทียบลักษณะของน้ำเสียก่อนเข้าสู่กระบวนการไฟฟ้าเคมีและไม่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี (ชุดควบคุม)

จากการทดลองเก็บตัวอย่างน้ำเสียซึ่งไม่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี ตามเวลาเก็บกัก 10 20 30 และ 60 min พบว่า ที่เวลาเก็บกักต่างกัน ค่า TSS มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง  $3,315 \pm 581.61$  mg/l และ  $3,523 \pm 550.11$  mg/l สำหรับเวลาเก็บกัก 10 และ 30 min ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.9 และดังรูปที่ 4.57 และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างน้ำเสียก่อนเข้าระบบ (Inf.) พบว่า มีค่า COD เฉลี่ยอยู่ในช่วง  $27,477 \pm 2,697.86$  mg/ และ  $27,676 \pm 2,888.16$  mg/l สำหรับน้ำเสียก่อนเข้าระบบ และน้ำเสียที่ไม่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี ในเวลาเก็บกัก 30 min ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยวิธี ANOVA เปรียบเทียบกันระหว่างน้ำเสียก่อนเข้าระบบและน้ำเสียที่ไม่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี พบว่า ทุกค่าพารามิเตอร์ของน้ำเสียที่ไม่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมีกับน้ำเสียก่อนเข้าระบบไม่มีความแตกต่างกัน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% นอกจากนี้ยังพบว่า น้ำเสียที่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมีสามารถลดค่ามลสารต่างๆ ในน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มได้ดีกว่าน้ำเสียที่ไม่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี



รูปที่ 4.57 ลักษณะของน้ำก่อนเข้าระบบและน้ำที่ไม่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี

ตารางที่ 4.9 ลักษณะน้ำเสียที่ผ่านระบบไฟฟ้าเคมี

parameter	BOD <sub>5</sub> (mg/l)			COD (mg/l)			TSS (mg/l)		
	range	average	SD	range	average	SD	range	average	SD
Inf.	12126-20000	15120	2553.24	23400-33171	27477	2697.86	2450-4383	3367	496.04
10 min	12259-18444	16392	1942.13	21240-33171	27242	2975.92	2150-3917	3315	581.61
20 min	12005-19444	16574	2233.44	25820-32341	28537	2030.32	2633-4250	3615	436.67
30 min	12501-18776	16762	1934.81	23400-32391	27676	2888.16	2267-4100	3523	550.11
60 min	13169-20588	16449	2594.80	23286-32079	28245	2814.53	2367-4267	3450	642.43

ตารางที่ 4.9 ลักษณะน้ำเสียที่ผ่านระบบไฟฟ้าเคมี (ต่อ)

parameter	Color (SU)			pH			conductivity (ms/cm)		
	range	average	SD	range	average	SD	range	average	SD
Inf.	1555-2435	1968	258.58	4.63-4.80	4.71	0.042	11.47-11.96	11.66	0.14
10 min	1665-2272	1960	239.27	4.62-4.79	4.71	0.048	11.44-11.95	11.67	0.16
20 min	1794-2472	2113	243.16	4.65-4.81	4.71	0.050	11.40-11.94	11.65	0.17
30 min	1668-2533	2028	269.69	4.64-4.76	4.72	0.033	11.44-11.92	11.68	0.15
60 min	1618-2526	2092	304.45	4.66-4.76	4.71	0.028	11.43-11.94	11.69	0.15

หมายเหตุ ข้อมูลจากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำจำนวน 24 ตัวอย่าง ซึ่งรอให้ตกตะกอนเป็นเวลา 1 hr แล้วจึงนำน้ำส่วนใสมาวิเคราะห์

#### 4.8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี

สถานะที่สามารถเพิ่มอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพหรือค่า BOD<sub>5</sub>:COD ได้สูงสุดของแต่ละรูปแบบการจัดเรียงอิเล็กโทรดในการบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ดังแสดงในตารางที่ 4.10 พบว่า การจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> สามารถเพิ่มค่า BOD<sub>5</sub>:COD ได้สูงสุด ทำให้เกิดการสูญเสียเนื้ออูมิเนียมจากการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 1,326.54 g/m<sup>3</sup> ซึ่งสูงกว่าแบบอนุกรม และแบบไบโพลาร์ เนื่องจากปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในระบบได้มากกว่า ทำให้การสูญเสียเนื้ออูมิเนียมมาก สำหรับการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบอนุกรม พื้นที่ผิวดารางที่ 4.10 เปรียบเทียบสถานะและรูปแบบการจัดเรียงแบบต่างๆ โดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี

พารามิเตอร์	การจัดเรียงอิเล็กโทรด					
	แบบขนาน		แบบอนุกรม		แบบไบโพลาร์	
	29 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	39 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	29 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	39 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	29 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	39 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
กระแสไฟฟ้า (A)	0.97	3.14	0.73	0.67	0.72	0.55
ความต่างศักย์ไฟฟ้า(Volt)	2.13	3.20	13.79	14.94	22.25	18.54
เวลาเก็บกัก (min)	30	60	60	30	60	60
pH Inf.	4.63	4.76	4.70	4.72	4.73	4.73
pH Eff.	4.78	4.92	4.88	4.83	4.91	4.94
TCOD Inf. (mg/l)	24,000	27,200	26,000	29,907	28,488	29,671
TCOD Eff. (mg/l)	21,282	18,400	20,583	21,991	17,951	19,906
BOD <sub>5</sub> :TCOD Inf.	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58
BOD <sub>5</sub> :TCOD Eff.	0.66	0.94	0.75	0.62	0.69	0.69
Color Inf. (SU)	5,004.1	2,570.0	1,827.5	1,985.7	1,989.0	1,841.7
Color Eff. (SU)	4,116.5	1,063.2	849.7	972.5	784.5	997.0
แผ่นอิเล็กโทรด (g/m <sup>3</sup> )	180.73	1,326.54	696.45	471.8	273.64	281.55
แผ่นอิเล็กโทรด (Baht /m <sup>3</sup> )	34.49	254.26	130.61	95.85	52.57	54.66
พลังงานไฟฟ้า ( Baht /m <sup>3</sup> )	2.73	27.27	27.27	13.64	43.64	27.27

ของขั้ว ไฟฟ้า 29 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> พบว่า สามารถเพิ่มค่า BOD<sub>5</sub>:COD ได้รองลงมาจากแบบขนาน และการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ สามารถเพิ่มค่า BOD<sub>5</sub>:COD ได้น้อยสุด เมื่อเปรียบเทียบกับทั้ง 3 รูป

แบบการจัดเรียงอิเล็กโทรด เนื่องจากการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์มีการสูญเสียเนื้ออลูมิเนียมจากการทำปฏิกิริยาน้อยที่สุด ทำให้ค่าใช้จ่ายรวม (ค่าอลูมิเนียม + ค่าไฟฟ้า) น้อย

#### 4.9 พิจารณาการประยุกต์ใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีสำหรับบำบัดน้ำเสียในโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

เมื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่าในการใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีบำบัดน้ำเสียเบื้องต้น จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยใช้สภาวะที่สามารถเพิ่มค่า BOD<sub>5</sub>-COD ได้สูงสุดในแต่ละรูปแบบการจัดเรียงอิเล็กโทรด พบว่า ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น สามารถคิดเป็นค่าไฟฟ้าได้ โดยการเปรียบเทียบก๊าซชีวภาพ 1 m<sup>3</sup> กับพลังงานไฟฟ้า 1.20 kWh (สถานเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพ ม.เชียงใหม่, 2250) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าไฟฟ้าที่ได้จากการนำก๊าซชีวภาพไปผลิตเป็นกระแสไฟฟ้ากับค่าใช้จ่ายรวม (ค่าไฟฟ้า + ค่าอลูมิเนียม) ในการเดินระบบของแต่ละสภาวะ พบว่า ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบของกระบวนการไฟฟ้าเคมีสูงกว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้รับคืนมามาก ดังแสดงในตารางที่ 4.11 ซึ่งค่าใช้จ่ายจำนวนมากเกิดจากการสูญเสียเนื้ออลูมิเนียมที่ใช้เดินระบบแต่ละครั้ง จึงควรศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำอลูมิเนียมที่ใช้เดินระบบแล้วกลับมาใช้ใหม่ เพื่อลดต้นทุนในการเดินระบบครั้งต่อไปอย่างไรก็ตาม สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้จริงในโรงงานต่อไป คือ การจัดเรียง

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบความคุ้มค่า สำหรับสภาวะที่ดีที่สุดของแต่ละรูปแบบการจัดเรียง

ค่าไฟฟ้าที่ได้และค่าใช้จ่ายในระบบ	การจัดเรียงอิเล็กโทรด					
	ขนาน		อนุกรม		ไบโพลาร์	
	29 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	39 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	29 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	39 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	29 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	39 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
BOD <sub>5</sub> Inf. (mg/l)	12,363	16,459	13,968	12,126	12,126	13,480
BOD <sub>5</sub> Eff. (mg/l)	14,039	17,207	15,499	13,652	12,355	13,860
ΔBOD <sub>5</sub> (Eff. - inf. )	1,676	1,748	1,531	1,526	229	380
kg BOD <sub>5</sub> ที่เพิ่มขึ้น	1.68	1.75	1.53	1.53	0.23	0.38
m <sup>3</sup> ของก๊าซชีวภาพ	1.68	1.75	1.53	1.53	0.23	0.38
พลังงานไฟฟ้า (kWh)	2.01	2.10	1.84	1.83	0.27	0.46
ค่าไฟฟ้าที่ได้ (Baht /m <sup>3</sup> )	6.03	6.29	5.51	5.49	0.82	1.37
ค่าใช้จ่ายรวมในการเดินระบบ (Baht /m <sup>3</sup> )	37.22	281.53	157.88	109.49	96.21	81.93

อเล็กโตรดแบบขนาน พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า  $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$  เนื่องจาก มีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพสูงกว่าแบบอนุกรมและแบบไบโพลาร์ รวมทั้งมีค่าใช้จ่ายรวมในการเดินระบบน้อยมาก คือ 37.22 Baht / $\text{m}^3$

#### 4.10 ประเมินผลการเกิดก๊าซชีวภาพในระบบหมักแบบไร้อากาศ โดยเปรียบเทียบระหว่างน้ำเสียที่ไม่ผ่านการบำบัดและน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี (pre-treatment)

จากข้อมูลลักษณะของน้ำเสียที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น ของโรงงานเอเซียขน้ำมันปาล์ม อำเภอ อ่าวลึก จังหวัด กระบี่ พบว่า ค่า COD ก่อนและหลังผ่านระบบแบบไร้อากาศ เท่ากับ 31,687 และ 11,270 mg/l ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพการกำจัดค่า COD เท่ากับ 64% ซึ่งเมื่อคิดอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพจาก  $0.4 \text{ m}^3 \text{ biogas} / \text{kg COD Removal}$  (เกรียงศักดิ์ อุดมศิลป์โรจน์, 2543) พบว่า น้ำเสียที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ เท่ากับ  $8.17 \text{ m}^3 \text{ biogas}$

สำหรับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี คิดอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ จากค่า COD ที่ผ่านระบบไฟฟ้าเคมี และบำบัดต่อด้วยระบบหมักแบบไร้อากาศ ซึ่งกำหนดให้มีประสิทธิภาพการกำจัดค่า COD ของระบบหมักแบบไร้อากาศ เท่ากับ 64% เช่นเดียวกันกับสภาพ

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบความคุ้มค่า สำหรับสภาวะที่ดีที่สุดของแต่ละรูปแบบการจัดเรียง

ปริมาณก๊าซชีวภาพ ( $\text{m}^3$ )	การจัดเรียงอเล็กโตรด					
	ขนาน		อนุกรม		ไบโพลาร์	
	$29 \text{ m}^2/\text{m}^3$	$39 \text{ m}^2/\text{m}^3$	$29 \text{ m}^2/\text{m}^3$	$39 \text{ m}^2/\text{m}^3$	$29 \text{ m}^2/\text{m}^3$	$39 \text{ m}^2/\text{m}^3$
COD Eff. (EC)	21,282	18,400	20,583	21,991	17,951	19,906
64% efficiency digester	64	64	64	64	64	64
COD Eff.(digester)	7,662	6,624	7,410	7,917	6,462	7,166
COD Eff. (EC-Digester)	13,620	11,776	13,173	14,074	11,489	12,740
$\text{kg}/\text{m}^3 \text{ COD}$	13.62	11.78	13.17	14.07	11.49	12.74
$\text{m}^3 \text{ biogas (0.4)}$	5.45	4.71	5.27	5.63	4.60	5.10
$\text{m}^3 \text{ biogas (BOD}_5)$	1.68	1.75	1.53	1.53	0.23	0.38
$\text{m}^3 \text{ biogas (COD+BOD}_5)$	7.12	6.46	6.80	7.16	4.82	5.48

การกำจัดได้ที่แท้จริงของโรงงาน โดยเลือกคิดเฉพาะสภาวะที่สามารถเพิ่มค่า  $BOD_5:COD$  ได้สูงสุดในแต่ละรูปแบบการจัดเรียงอิเล็กทรอนิกส์ ดังแสดงในตารางที่ 4.12 พบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นสำหรับน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี (ผลรวมของปริมาณก๊าซชีวภาพซึ่งเกิดจากค่า  $BOD_5$  ที่เพิ่มขึ้น กับปริมาณก๊าซชีวภาพซึ่งเกิดจากค่า  $COD$  ที่ลดลงจากการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในระบบหมักแบบไร้อากาศ) น้อยกว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากน้ำเสียที่ไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น อย่างไรก็ตามน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี ส่วนใหญ่ประกอบด้วยสารอินทรีย์มีโครงสร้างโมเลกุลที่ซับซ้อนน้อยหรือสามารถละลายน้ำได้ ซึ่งเหมาะสมต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ ทำให้ลดระยะเวลาเก็บกักในการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ และลดขนาดของถังปฏิกรณ์ให้มีขนาดเล็กลง ทำให้ประหยัดพื้นที่และค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบ



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ในการทดลองบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี เพื่อหาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัด สรุปผลการทดลองได้ดังนี้ คือ

5.1.1 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากการใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีสูงขึ้นเมื่อพลังงานไฟฟ้า และเวลาเก็บกักสูงขึ้น

5.1.2 กระบวนการไฟฟ้าเคมีทุกสภาวะของการทดลอง ทำให้ค่าอุณหภูมิ และค่าพีเอชของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วสูงขึ้น เมื่อพลังงานไฟฟ้า เวลาเก็บกัก และจำนวนอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น

5.1.3 การทดลองที่ 1 ศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี จากการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบขนาน พบว่า พลังงานไฟฟ้า 14.5 kW/m<sup>3</sup> เวลาเก็บกัก 60 min มีประสิทธิภาพการกำจัดค่า COD สี และของแข็งแขวนลอยได้สูงสุด คือ 43% (39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) 72% (29 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) และ 87.40-86.22% (29-39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) ตามลำดับ สภาวะที่เหมาะสม เมื่อพิจารณาพร้อมกับความคุ้มทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ และการนำไปใช้จริงในโรงงาน พบว่า พลังงานไฟฟ้า 1.8 kW/m<sup>3</sup> เวลาเก็บกัก 30 min พื้นที่ของอิเล็กโทรด 29 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 3.0 cm สามารถทำให้เกิดก๊าซชีวภาพ 7.12 m<sup>3</sup> คิดเป็นค่าไฟฟ้าที่ได้ 8.54 Baht /m<sup>3</sup> และราคาค่าใช้จ่ายรวม (ค่าไฟฟ้า+ ค่าลูมิเนียม) เท่ากับ 37.22 Baht /m<sup>3</sup>

5.1.4 การทดลองที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี จากการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบอนุกรม พบว่า พลังงานไฟฟ้า 14.5 kW/m<sup>3</sup> เวลาเก็บกัก 60 min มีประสิทธิภาพการกำจัดค่า COD สี และของแข็งแขวนลอยได้สูงสุด คือ 34% (39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) 59% (39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) และ 86.10-86.44% (29-39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) ตามลำดับ สภาวะที่เหมาะสม เมื่อพิจารณาพร้อมกับความคุ้มทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ และการนำไปใช้จริงในโรงงาน พบว่า คือ พลังงานไฟฟ้า 9.1 kW/m<sup>3</sup> เวลาเก็บกัก 30 min จำนวนอิเล็กโทรด 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2.5 cm สามารถทำให้เกิดก๊าซชีวภาพ 7.16 m<sup>3</sup> คิดเป็นค่าไฟฟ้าที่ได้ 8.59 Baht /m<sup>3</sup> และราคาค่าใช้จ่ายรวม (ค่าไฟฟ้า+ ค่าลูมิเนียม) เท่ากับ 109.49 Baht /m<sup>3</sup>

5.1.5 การทดลองที่ 3 ศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี จากการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ พบว่า พลังงานไฟฟ้า  $14.5 \text{ kW/m}^3$  เวลาเก็บกัก 60 min มีประสิทธิภาพการกำจัดค่า COD สี และของแข็งแขวนลอยได้สูงสุด คือ 37% ( $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ) 61% ( $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ) และ 88.59-90% ( $29-39 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ) ตามลำดับ สภาวะที่เหมาะสมที่สุด เมื่อพิจารณาพร้อมกับความคุ้มทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์และการนำไปใช้จริงในโรงงาน พบว่า คือ พลังงานไฟฟ้า  $9.1 \text{ kW/m}^3$  เวลาเก็บกัก 60 min จำนวนอิเล็กโทรด  $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$  ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2.5 cm สามารถทำให้เกิดก๊าซชีวภาพ  $5.48 \text{ m}^3$  คิดเป็นค่าไฟฟ้าที่ได้ 6.58 Baht / $\text{m}^3$  และราคาค่าใช้จ่ายรวม (ค่าไฟฟ้า+ ค่าอลูมิเนียม) เท่ากับ 81.93 Baht / $\text{m}^3$

5.1.6 สภาวะที่เหมาะสมที่สุด เมื่อพิจารณาพร้อมกับความคุ้มทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ และการนำไปใช้จริงในการบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม คือ การจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบขนาน ซึ่งสามารถทำให้สารประกอบอินทรีย์มีโครงสร้างโมเลกุลที่ซับซ้อนน้อยลงหรือละลายน้ำได้ ซึ่งเหมาะสมต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ ส่งผลให้ลดระยะเวลาในการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ และลดขนาดของถังปฏิกรณ์ให้มีขนาดเล็กลง ทำให้ประหยัดพื้นที่และค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบ และเมื่อพิจารณาการสูญเสียเนื้ออลูมิเนียมจากการทำปฏิกิริยา และค่าใช้จ่ายรวม (ค่าไฟฟ้า+ค่าอลูมิเนียม) การจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบขนาน พบว่า มีค่าใช้จ่ายรวมสูงกว่าแบบอนุกรมและแบบไบโพลาร์ เนื่องจากปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในระบบได้มากกว่า ทำให้มีการสูญเสียเนื้ออลูมิเนียมมาก สำหรับการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบไบโพลาร์ พบว่า การสูญเสียเนื้ออลูมิเนียมจากการทำปฏิกิริยาและค่าใช้จ่ายรวมน้อยที่สุด ทั้งยังมีประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD สี และของแข็งแขวนลอยได้ดี

5.1.7 น้ำเสียที่ไม่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 10 20 30 และ 60 min พบว่า มีคุณลักษณะของพารามิเตอร์ต่างๆ ไม่แตกต่างกับน้ำเสียก่อนเข้ากระบวนการไฟฟ้าเคมี และน้ำเสียที่ไม่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมียังมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ สี และของแข็งแขวนลอย ต่ำกว่าน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรทำการทดลองบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง เพื่อที่จะตรวจสอบความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ในงานจริงได้

5.2.2 ควรทำการทดลองโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีกับน้ำเสียประเภทอื่นที่มีสีเข้ม มีการสะสมของน้ำมันและไขมันสูง เช่น น้ำเสียจากเรือ น้ำมัน ห้องเก็บน้ำมันใต้ท้องเรือ โรงฆ่าสัตว์ โรงงานน้ำมันมะกอก เป็นต้น

5.2.3 ควรทดลองเติมสารโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) หรือสารนำไฟฟ้าอื่น เพื่อเพิ่มความนำไฟฟ้า และลดการสูญเสียของเนื้ออิเล็กโทรดขณะทำปฏิกิริยา รวมทั้งลดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ

5.2.4 ควรทดลองใช้สารลดแรงตึงผิว หรือออกแบบการจัดเรียงอิเล็กโทรดที่สามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยโดยการตกตะกอน เพื่อลดการเกิดโฟมบนผิวน้ำ

5.2.5 ศึกษาการสลับขั้วไฟฟ้า เพื่อแก้ไขปัญหากระแสไฟฟ้าลดต่ำลง เมื่อเกิดการสะสมโลหะออกไซด์บนผิวแผ่นขั้วไฟฟ้าบวก

5.2.6 ศึกษาต้นแบบของถังปฏิกรณ์ และต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ที่สามารถนำไปใช้ได้ในการบำบัดน้ำเสียระดับอุตสาหกรรมต่อไป

5.2.7 ศึกษาลักษณะการเกิดก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการแยกน้ำมันออกจากน้ำ และได้ก๊าซไฮโดรเจนเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนต่อไป

5.2.8 ศึกษาวิธีการกำจัดอูมิเนียมที่สะสมอยู่ในน้ำและตะกอนของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีแล้ว เนื่องจากมีการตกค้างของอูมิเนียมจำนวนมาก

## เอกสารอ้างอิง

กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. 2539. กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำ  
ทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม. ประกาศ  
กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3. กรมควบคุมมลพิษ  
กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

กัณขมาศ สุทธิเรืองวงศ์. 2539. การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีไฟฟ้าเคมีเพื่อกำจัดสารอินทรีย์และสี. วิทยา  
นิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหา  
วิทยาลัย.

กัลยา วานิชย์บัญชา. 2549. การใช้ SPSS for windows ในการวิเคราะห์ข้อมูล. กรุงเทพมหานคร:

กรมควบคุมมลพิษและสมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. 2538. ศัพท์บัญญัติและ  
นิยามสิ่งแวดล้อมน้ำ. กรุงเทพมหานคร.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2545. ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ. สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่ง  
ประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร.

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2543. วิศวกรรมการจัดการน้ำเสีย เล่ม 4. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
มหาวิทยาลัยรังสิต.

จุฑารัตน์ หนูสุข. 2546. การใช้บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินเพื่อการบำบัดขั้นที่สามสำหรับน้ำ  
เสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยา  
ศาสตร์สภาวะสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

จินตนา แก้วบริสุทธิ์. 2541. การปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยกระบวนการ  
การดูดซับในชั้นตริง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม  
คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

- จิราวรรณ ศรีโยม. 2546. การบำบัดน้ำเสียที่มีสารประกอบอินทรีย์ด้วยปฏิกิริยาเฟนตั้มร่วมกับ การตกตะกอนวิเคราะห์การลดลงของค่า COD และสารเคมีตกค้างในน้ำและตะกอน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาการวิศวกรรมเคมี คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ทรงยศ สารภูษิต. 2547. ประสิทธิภาพของกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีในการรีดิวส์และ กำจัดเฮกซวาเลนท์โครเมียม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ธนาวัฒน์ รักกมล. 2549. ประสิทธิภาพของระบบบำบัดเอเอสบีอาร์ แบบเทอร์โมฟิลิกและมีโซฟิลิก ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ธรรมศักดิ์ ศรีสุขใส. 2547. การกำจัดสารประกอบฟีนอลในน้ำทิ้งโรงงานน้ำมันปาล์มโดยการใช้ เอนไซม์เปอร์ออกซิเดสจากใบยางพารา. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, สาขาวิชา การจัดการสิ่งแวดล้อม คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ธีระ เอกสมทราเมษฐ์. 2548. เส้นทางสู่ความสำเร็จการผลิตปาล์มน้ำมัน: ศูนย์วิจัยและพัฒนา การผลิตปาล์มน้ำมัน คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ปาริชาติ หมิ่นสีทา. 2547. การกำจัดสีและซีโอดีจากน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ผ่านการ บำบัดบางส่วนโดยใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปรีชา มุณีศรี. 2539. การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยจุลินทรีย์. วิทยานิพนธ์วิทยา ศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลา นครินทร์.

- พนา เมฆตรง พิระพล เก้าเอี้ยน และพรชัย แซ่ตั้ง. 2544. การจำกัดสีในน้ำเสียโรงงานน้ำมัน  
ปาล์มโดยใช้โอโซน. โครงงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- พูนสุข ประเสริฐสรรพ เสาวลักษณ์ จิตบรรเจิดกุล และอรัญ หันพงศัคดีกุล. 2533. กระบวนการ  
ผลิตและการใช้ประโยชน์วัสดุเหลือทิ้งและ คุณลักษณะน้ำทิ้งจากโรงงานน้ำมันปาล์ม.  
วารสารสงขลานครินทร์. 12 (เมษายน-มิถุนายน 2533) 169-176.
- พรรณนีย์ วิชชาชู. 2548. ปาล์มน้ำมันจากน้ำมันพืชถึงไบโอดีเซล. วารสารกสิกร. 78(พฤษภาคม-  
มิถุนายน 2548). 75.
- มันสิน ต้นทุลเวศม์. 2546. คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. กรุงเทพมหานคร.
- วรรณรัตน์ วัฒนชัย. 2547. กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสำหรับน้ำเสียปนเปื้อนโลหะหนัก  
จากโรงงานประกอบรถยนต์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรม  
สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. 2543. อัตราค่าไฟฟ้าจำแนกตามกิจการไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วน  
ภูมิภาค[Online] แหล่งที่มา: <http://www.eppo.go.th/power/pw-Rate-MEA-Char.html>  
[2007, Dec 23]
- สถานเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2549. ทฤษฎีก๊าซชีวภาพ[Online] แหล่งที่มา:  
<http://www.teenet.chiangmai.ac.th/btc/introbiogas02.php#05> [2008, Jan 12]
- อานนท์ คุชฎีพรรณ. 2538. การขจัดสารอินทรีย์และสีของน้ำกากส่าโดยกระบวนการบำบัดแบบไร้  
ออกซิเจนและแบบเคมีไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาเทคโนโลยี  
ทางชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- Adhoum, N., and Monser, L., 2004. Decolorization and removal of phenolic compounds from olive mill wastewater by electrocoagulation, **Chemical Engineering and Processing**. B43: 1281-1287.
- Ahmad, A.L., Chong, M.F., Bhatia, S. and Ismail., 2006. Drinking water reclamation from palm oil mill effluent(POME) using membrane technology, **Desalination**. 191: 34-44.
- APHA, AWWA and WEF. 2005. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater** 21<sup>th</sup> edition, Washington, DC : American Public Health Association.
- Asselin, M., Drogui, P., Brar, S.K., Benmoussa, H. and Blais, J.F., 2007. Organics removal in Oily bilgewater by electrocoagulation process, **Journal of Hazardous Materials**. 150: 124-135.
- Avsar, Y., Kurt, U. and Gonullu, T., 2007. Comparison of classical chemical and electrochemical processes for treating rose processing wastewater, **Journal of Hazardous Materials**. 148: 340-345.
- Bensadok, K., Benammar, S., Lopicque, F., and Nezzal, G., 2008. Electrocoagulation of cutting oil Emulsions using aluminum plate electrode, **Journal of Hazardous Materials**. 152: 423-430.
- Borja, R., Bankb, C.J. and Sanchez, E., 1996. Anaerobic treatment of palm oil mill effluent in a two-stage up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) system, **Journal of Biotechnology**. 45: 125-135.
- Can, O.T., Kobyte, M., Demirbas, E., and Bayramoglu, M., 2006. Treatment of the textile Waste water by combined electrocoagulation, **Chemosphere**. 62: 181-187.

- Carmona, M., Khemis, M., Leclerc, J.P., and Lapicque, F., 2006. A simple model to predict the removal of oil suspension from water using the electrocoagulation technique, **Chemical Engineering Science**. 61: 1237-1246.
- Chen, G., 2004. Electrochemical technologies in wastewater treatment, **Separation and Purification Technology**. 38: 11-41.
- Daneshvar, N., Sorkhabi, H.A., and Kasiri, M.B., 2004. Decolorization of dye solution containing Acid Red 14 by electrocoagulation with a comparative investigation of different electrodes connections, **Journal of Hazardous Materials**. B112: 55-62.
- Deng, Y., and Englehardt, J.D., 2006. Electrochemical oxidation for landfill leachate treatment, **Waste Management**, 27: 380-388.
- Drogui, P., Asselin, M., Brar, S.K., Benmoussa, H. and Blais, J.F., 2007. Electrochemical removal of pollutants from agro-industry wastewater, **Separation and Purification technology**. 61: 301-310.
- Emamjomeh, M.M., and Sivakumar, M., 2005. An empirical model for defluoridation by batch monopolar electrocoagulation/flotation(ECF) process, **Journal of Hazardous Materials**. 131: 118-125.
- Essadki, A.H., Bennajah, M., Gourich, B., Vial, C., Azzi, M. and Delmas, H. Electrocoagulation /electroflotation in an external-loop airlift reactor-Application to the decolorization of textile dye wastewater: A case study, **Chem. Eng. Process.(2007),doi:10.1011/j. cep. 2007.03.013**
- Faisal, M. and Unno, H., 2001. Kinetic analysis of palm oil mill wastewater treatment by a modified anaerobic baffled reactor, **Biochemical Engineering Journal**. 9(1): 25-31.



- Hotman, M., Drtil, M., and Kalina, A., 2006. Anaerobic stabilization of sludge produced during municipal wastewater treatment by electrocoagulation, **Journal of Hazardous Materials**. B131: 163-169.
- Hu, C.Y., Lo, S.L. and Kuan, W.H., 2003. Effects of co-existing anions on fluoride removal in electrocoagulation (EC) process using aluminum electrodes, **Water Research**. 37: 4513-4523.
- Inan, H., Dimoglo, A., Simsek, K. and Karpuzcu, M., 2004. Olive oil mill wastewater treatment by Means of Electrocoagulation, **Separation and Purification technology**. 36: 23-31.
- Khoufi, S., Feki, F., and Sayadi, S., 2006. Detoxification of olive mill wastewater by Electrocoagulation and sedimentation processes, **Journal of Hazardous Materials**. 142: 58-67.
- Kobyte, M., Can, O.T., and Bayramoglu, M., 2003. Treatment of textile wastwwaters by Electrocoagulation using iron and aluminum electrodes, **Journal of Hazardous Materials**. B100: 163-178.
- Kobyte, M., Senturk, E., and Bayramoglu, M., 2005. Treatment of poultry slaughterhouse wastewater by electrocoagulation, **Journal of Hazardous Materials**. 133: 172-176.
- Kobyte, M., Bayramoglu, M. and Eyvaz, M., 2007. Techno-economical evaluation of Electrocoagulation for the textile wastewater using different electrode connections, **Journal of Hazardous Materials**. 148: 311-318.
- Kongsricharoern, N. 1994. **Application of electro-chemical precipitation for treatment of Cr(VI) wastewater. Doctoral Dissertation, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.**

- Mereno-Casillas, H.A., Cocke, D.L., Gomes, J.A.G., Morkovsky, P., Parga, J.R., and Peterson, E., 2007. Electrocoagulation mechanism for COD removal, **Separation and Purification technology**. 56: 204-211.
- Modirshahla, N., Behnajady, M.A. and Kooshaiian, S., 2007. Investigation of the effect of different electrode connections on the removal efficiency of Tartrazine from aqueous solutions by electrocoagulation, **Dyes and Pigments**. 74: 249-257.
- Mollah, M.Y.A., Schennach, R., Parga, J.R and Cocke, D.L., 2001. Electrocoagulation (EC) – science and applications, **Journal of Hazardous Materials**. B84: 29-41.
- Mouedhen, G., Feki, M., Wery, M.D.P. and Ayedi, H.F., 2007. Behavior of aluminum electrodes in Electrocoagulation process, **Journal of Hazardous Materials**. 150: 124-135.
- Najafpour, G., Yieng, H.A., Younesi, H., and Zinatizadeh, A., 2005. Effect of organic loading on PerformMance of rotating biological contactors using palm oil mill effluents, **Process Biochemistry**.40: 2879-2884.
- Panizza, M., Bocca, C. and Cerisola, G., 2000. Electrochemical treatment of wastewater containing polyaromatic organic pollutants, **Water Research**. 34: 2601-2605.
- Pechsuth, P., Prasertsan, P. and Okita, M., 2001. **High-rate anaerobic treatment of palm oil mill effluent**. Songklanakarin J. Sci. Technol. 23(Suppl.): 779-789.
- Puetpaiboon, U., and Chotwattanasak, J. 2004. **Anaerobic treatment of palm oil mill wastewater under mesophilic condition**. 10<sup>th</sup> World Congress Anaerobic Digestion 2004. Montreal, Canada.

- Ugurlu, M., Gurses, A., Dogar, C. and Yalcin, M. The removal of lignin and phenol from paper mill effluents by electrocoagulation. **Journal of Environment Management (2007)**, doi: **10.1016/j.jenvman.2007.01.007**
- Un. U. T., Ugur. S., Koparal. A. S., and Ogutveren. U.B., 2006. Electrocoagulation of olive mill Wastewater, **Separation and Purification Technology**\_52: 136-141.
- Vijayaraghavan, K., Ahmad, D. and Yazid, A.Y.A., 2008. Electrolytic treatment of latex wastewater, **Desalination**\_219: 214-221.
- Santos, M.R.G., Goulart, M.O.F., Tonholo, J., Zanta, C.L.P.S., 2006. The application of Electrochemical technology to the remediation of oily wastewater, **Chemosphere**. B64: 393-399.
- Yacob, S., Hassan, M.A., Shirai, Y., Wakisaka, M., and Sunderaj, S., 2005. Baseline study of methane emission from open digesting tanks of palm oil mill effluent treatment, **Hemospere**. 59: 1575 – 1581.
- Yilmaz, A.E., Boncukcuoglu, R., Kocakerim, M.M., and Keskinler, B., 2005. The investigation of Parameters affecting boron removal by electrocoagulation method, **Journal of Hazardous Materials**. B125: 160-165.
- Yu, Z., Zhen, L., and Yanxin, W., 2008. Decolorization and COD removal of secondary yeast wastewater effluents by coagulation using aluminum sulfate, **Desalination**. 226: 301-311.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
ผลการวิเคราะห์ห่อสุมนิยาม

ตารางภาคผนวก ก 1 ปริมาณอุมิเนียมในน้ำและตะกอน มีการจัดเรียงอิเล็กโตรลบบนขบวนการฟื้นฟูกิ่งข้าวไฟฟ้า 29 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> \* Improf. Conc.

พลังงานไฟฟ้า (kWh/m <sup>3</sup> )	เวลา (min)	con.AL (water) mg/l	เท่า	(mg/l) *เท่า	con.AL (sludge) mg/l	เท่า	Mg	นบ. ก่อน -นบ. หลัง (g)	mg/kg	(mg/kg) *เท่า	%	*water (ml)	Al water (mg)	*Sludge (ml)	Al sludge (g)	Al sludge (mg)	Total (mg)	
1.8	Inf.	3.76			6.85													
	10	13.32	-	13.32	8.10	5	0.4050	0.1476	2743.90	13720	1.37	830.0	11.06	170.0	0.0020	2.03	13.08	
	20	15.83	-	15.83	9.92	5	0.4960	0.1576	3147.21	15736	1.57	800.0	12.66	200.0	0.0025	2.48	15.14	
	30	21.60	-	21.60	17.37	5	0.8685	0.1562	5560.18	27801	2.78	935.0	20.20	65.0	0.0043	4.34	24.54	
	60	4.41	5	22.05	3.60	25	0.1800	0.0841	2139.04	53476	5.35	998.5	22.02	1.5	0.0045	4.50	26.52	
	10	0.51	100	51.00	0.22	100	0.0110	0.1435	76.66	7666	0.77	780.0	39.78	220.0	0.0011	1.10	40.88	
5.5	20	0.78	100	77.90	0.22	100	0.0109	0.1369	79.25	8537	0.85	935.0	72.84	65.0	0.0012	1.17	74.01	
	30	1.35	100	135.30	0.28	100	0.0140	0.1271	110.15	10226	1.02	998.5	135.10	1.5	0.0013	1.30	136.40	
	60	3.13	100	312.60	0.32	100	0.0161	0.1177	136.36	13636	1.36	918.5	287.12	1.5	0.0016	1.61	288.73	
	10	0.82	100	81.70	0.29	100	0.0144	0.1311	109.46	10946	1.09	984.0	80.39	16.0	0.0014	1.44	81.83	
9.1	20	2.06	100	205.70	0.51	100	0.0253	0.1428	177.17	17717	1.77	889.0	182.87	11.0	0.0025	2.53	185.40	
	30	2.88	100	287.70	1.03	100	0.0516	0.2526	204.08	20408	2.04	894.0	257.20	6.0	0.0052	5.16	262.36	
	60	1.85	200	370.40	1.31	200	0.0657	0.3260	201.38	40276	4.03	640.0	237.06	100.0	0.0131	13.13	250.19	
	10	0.74	100	74.30	0.25	100	0.0125	0.1347	92.80	9280	0.93	982.0	72.96	18.0	0.0013	1.25	74.21	
14.5	20	1.90	100	189.60	0.35	100	0.0173	0.1254	137.96	13796	1.38	916.5	173.77	3.5	0.0017	1.73	175.50	
	30	3.31	100	331.00	0.56	100	0.0280	0.1186	235.67	23567	2.36	796.5	263.64	3.5	0.0028	2.80	266.44	
	60	2.07	200	414.60	0.87	200	0.0433	0.1570	275.48	55096	5.51	510.0	211.45	210.0	0.0087	8.65	220.10	

ตารางภาคผนวก ก 2 ปริมาณอูมิเนียมในน้ำและตะกอน มีการจัดเรียงอิเล็กโตรลบบนบาน พื้นที่ของข้าวโพด 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> \* Improf. Conc.

พลังงานไฟฟ้า (kWh/m <sup>3</sup> )	เวลา (min)	con.AL (water) mg/l	เท่า	(mg/l) *เท่า	con.AL (sludge) mg/l	เท่า	mg	นบ.ก้อน -นบ.หลัง (g)	mg/kg	(mg/kg) *เท่า	%	*water (ml)	AI water (mg)	*Sludge (ml)	AI sludge (g)	AI sludge (mg)	Total (mg)	
1.8	Inf.	3.737			4.534													
	10	3.900	5	19.50	2.90	5	0.1448	0.1591	910.12	451	0.46	650.0	12.68	350.0	0.0007	0.72	13.40	
	20	14.111	5	70.56	4.15	5	0.2073	0.1535	1350.49	6752	0.68	725.0	51.15	275.0	0.0010	1.04	52.19	
	30	14.712	5	73.56	1.44	25	0.0721	0.1268	568.61	14215	1.42	905.0	66.57	95.0	0.0018	1.80	68.37	
	60	14.119	10	141.19	1.09	50	0.0545	0.1247	437.25	21862	2.19	993.5	140.27	6.5	0.0027	2.73	143.00	
	10	10.680	5	53.40	3.86	5	0.1930	0.1339	1441.37	7207	0.72	895.0	47.79	105.0	0.0010	0.97	48.76	
5.5	20	10.900	10	109.40	6.95	5	0.3475	0.1530	2271.24	11356	1.14	966.0	105.68	34.0	0.0017	1.74	107.42	
	30	15.627	10	156.27	2.40	25	0.1200	0.1503	798.24	19956	2.00	992.5	155.10	7.5	0.0030	3.00	158.10	
	60	37.000	10	370.00	2.27	25	0.1134	0.1077	1052.92	26323	2.63	898.5	332.45	1.5	0.0028	2.84	335.28	
	10	15.339	5	76.70	4.90	5	0.2448	0.1532	1597.91	7990	0.80	955.0	73.24	45.0	0.0012	1.22	74.47	
9.1	20	14.705	10	147.05	0.55	25	0.0276	0.0929	297.20	7430	0.74	987.0	145.14	13.0	0.0007	0.69	145.83	
	30	29.000	10	290.00	10.18	5	0.5092	0.1459	3490.06	17450	1.75	867.0	251.43	3.0	0.0025	2.55	253.98	
	60	3.184	100	318.35	0.45	200	0.0226	0.1684	134.20	26841	2.68	690.0	219.66	110.0	0.0045	4.52	224.18	
	10	18.621	5	93.11	4.00	5	0.2002	0.1221	1639.64	8198	0.82	987.0	91.89	13.0	0.0010	1.00	92.90	
14.5	20	47.500	5	237.50	3.84	25	0.1921	0.1236	1553.80	38845	3.88	898.6	213.42	1.4	0.0048	4.80	218.22	
	30	39.000	10	390.00	6.94	25	0.3471	0.1153	3010.41	75260	7.53	798.0	311.22	2.0	0.0087	8.68	319.90	
	60	54.000	10	540.00	9.84	25	0.4918	0.1588	3096.98	77424	7.74	400.0	216.00	200.0	0.0123	12.30	228.30	

ตารางภาคผนวก ก 3 ปริมาณอุมิเนียมในน้ำและตะกอน มีการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบอนุกรม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> \* Improf. Conc.

พลังงานไฟฟ้า (kWh/m <sup>3</sup> )	เวลา (min)	con.AL (water) mg/l	เท่า	(mg/l) *เท่า	con.AL (sludge) mg/l	เท่า	mg	น.น.ก้อน -น.น.หลัง (g)	mg/kg	(mg/kg) *เท่า	%	*water (ml)	AI water (mg)	*Sludge (ml)	AI sludge (g)	AI sludge (mg)	Total (mg)	
1.8	Inf.	3.399			5.49													
	10	7.521	5	37.61	7.19	5	0.3597	0.1726	2083.72	10419	1.04	700.0	26.32	300.0	0.0018	1.80	28.12	
	20	7.347	10	73.47	7.80	5	0.3900	0.1547	2521.01	12605	1.26	800.0	58.78	200.0	0.0020	1.95	60.73	
	30	9.373	10	93.73	6.12	10	0.3059	0.1564	1955.56	28889	2.89	820.0	76.86	180.0	0.0045	4.52	81.38	
	60	18.905	10	189.05	6.48	20	0.3240	0.1600	2024.69	30617	3.06	993.0	187.73	7.0	0.0049	4.90	192.63	
	10	11.300	5	56.50	5.16	5	0.2579	0.1198	2152.34	10762	1.08	740.0	41.81	260.0	0.0013	1.29	43.10	
5.5	20	2.616	50	130.80	2.84	10	0.1419	0.1496	948.53	14853	1.49	810.0	105.95	190.0	0.0022	2.22	108.17	
	30	3.207	50	160.35	3.35	25	0.1676	0.1504	1114.03	32806	3.28	860.0	137.90	140.0	0.0049	4.93	142.83	
	60	12.400	20	248.00	5.64	25	0.2819	0.1352	2085.06	38126	3.81	820.0	203.36	130.0	0.0052	5.15	208.51	
	10	12.579	5	62.90	7.05	5	0.3525	0.1502	2346.54	11733	1.17	880.0	55.35	120.0	0.0018	1.76	57.11	
9.1	20	6.414	20	128.28	10.28	5	0.5139	0.1460	3519.52	17598	1.76	928.0	119.04	22.0	0.0026	2.57	121.61	
	30	8.374	20	167.48	10.68	5	0.5338	0.1528	3493.13	34466	3.45	936.0	156.76	14.0	0.0053	5.27	162.03	
	60	6.007	50	300.35	3.61	50	0.1807	0.1389	1300.94	42047	4.20	897.5	269.56	2.5	0.0058	5.84	275.40	
	10	14.047	5	70.24	2.74	5	0.1368	0.1295	1055.98	15280	1.53	888.0	62.37	12.0	0.0020	1.98	64.35	
14.5	20	37.250	5	186.25	7.15	5	0.3577	0.1303	2745.20	18726	1.87	892.5	166.23	7.5	0.0024	2.44	168.67	
	30	19.682	10	196.82	9.95	5	0.4974	0.1419	3504.93	37525	3.75	892.0	175.56	8.0	0.0053	5.32	180.89	
	60	31.250	10	312.50	28.75	10	1.4375	0.1709	8411.35	45057	4.51	823.0	257.19	77.0	0.0077	7.70	264.89	



ตารางภาคผนวก ก 4 ปริมาณออกซิเจนในน้ำและตะกอน มีการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบอนุกรม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> \* Improf. Cone.

พลังงานไฟฟ้า (kWh/m <sup>3</sup> )	เวลา (min)	con.AL (water) mg/l	ค่า	(mg/l) *ค่า	con.AL (sludge) mg/l	ค่า	mg	นูน.ก้อน -นูน.หลัง (g)	mg/kg	(mg/kg) *ค่า	%	*water (ml)	Al water (mg)	*Sludge (ml)	Al sludge (g)	Al sludge (mg)	Total (mg)	
1.8	Inf.	2.861			3.916													
	10	0.531	100	53.10	0.16	100	0.0081	0.1625	49.54	4954	0.50	700.0	37.17	300.0	0.0008	0.81	37.98	
	20	0.480	100	48.00	0.20	100	0.0099	0.1649	60.04	6004	0.60	680.0	32.64	320.0	0.0010	0.99	33.63	
	30	0.636	100	63.60	0.23	100	0.0117	0.1553	75.34	7534	0.75	910.0	57.88	90.0	0.0012	1.17	59.05	
	60	1.025	100	102.50	0.38	100	0.0190	0.1616	117.26	11726	1.17	800.0	82.00	200.0	0.0019	1.90	83.90	
	10	0.546	100	54.60	0.20	100	0.0102	0.1630	62.56	6256	0.63	885.0	48.32	115.0	0.0010	1.02	49.34	
5.5	20	1.048	100	104.80	0.17	100	0.0087	0.1039	83.25	8325	0.83	998.0	104.59	2.0	0.0009	0.87	105.46	
	30	1.649	100	164.90	0.29	100	0.0145	0.1403	102.99	10299	1.03	998.5	164.65	1.5	0.0014	1.45	166.10	
	60	3.066	100	306.60	0.67	100	0.0336	0.1566	214.24	21424	2.14	898.3	275.42	1.7	0.0034	3.36	278.77	
	10	0.718	100	71.80	0.21	100	0.0105	0.1236	84.92	8492	0.85	996.0	71.51	4.0	0.0011	1.05	72.56	
	20	1.336	100	133.60	0.24	100	0.0120	0.1207	99.42	9942	0.99	998.5	133.40	1.5	0.0012	1.20	134.60	
	30	2.070	100	207.00	0.38	100	0.0191	0.1422	133.97	13397	1.34	999.0	206.79	1.0	0.0019	1.91	208.70	
14.5	60	3.889	100	388.90	1.02	100	0.0508	0.1561	325.43	32543	3.25	844.0	328.23	6.0	0.0051	5.08	333.31	
	10	1.048	100	104.80	0.30	100	0.0148	0.1382	107.09	10709	1.07	974.5	102.13	5.5	0.0015	1.48	103.61	
	20	2.069	100	206.90	0.43	100	0.0215	0.1271	168.76	16876	1.69	894.0	184.97	6.0	0.0021	2.15	187.11	
	30	3.131	100	313.10	0.63	100	0.0315	0.1424	221.21	22121	2.21	796.0	249.23	4.0	0.0032	3.15	252.38	
	60	4.332	100	433.20	1.10	100	0.0551	0.1537	358.49	35849	3.58	797.0	345.26	3.0	0.0055	5.51	350.77	

ตารางภาคผนวก ก 5 ปริมาณออกซิเจนในน้ำและตะกอน มีการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบไปโพลาร์ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 29 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> \* Improf. Cone.

พลังงานไฟฟ้า (kWh/m <sup>3</sup> )	เวลา (min)	con.AL (water) mg/l	เท่า	(mg/l) *เท่า	con.AL (sludge) mg/l	เท่า	mg	น.ก่อน-น.หลัง (g)	mg/kg	(mg/kg) *เท่า	%	*water (ml)	Al water (mg)	*Sludge (ml)	Al sludge (g)	Al sludge (mg)	Total (mg)	
1.8	Inf.	4.695			5.666													
	10	0.268	100	26.8	0.09	100	0.0045	0.1485	29.97	2997	0.30	530.0	14.20	470.0	0.0004	0.45	14.65	
	20	0.357	100	35.7	0.14	100	0.0072	0.1493	47.89	4789	0.48	640.0	22.85	360.0	0.0007	0.72	23.56	
	30	0.455	100	45.5	0.23	100	0.0116	0.1498	77.44	7744	0.77	600.0	27.30	400.0	0.0012	1.16	28.46	
	60	0.702	100	70.2	0.28	100	0.0141	0.1508	93.50	9350	0.94	890.0	62.48	110.0	0.0014	1.41	63.89	
	10	0.322	100	32.2	0.20	100	0.0101	0.1498	67.42	6742	0.67	710.0	22.86	290.0	0.0010	1.01	23.87	
5.5	20	0.572	100	57.2	0.27	100	0.0136	0.1508	90.19	9019	0.90	920.0	52.62	80.0	0.0014	1.36	53.98	
	30	1.247	100	124.7	0.42	100	0.0210	0.1605	130.53	13053	1.31	950.0	118.47	50.0	0.0021	2.10	120.56	
	60	2.376	100	237.6	0.34	100	0.0168	0.1098	153.01	15301	1.53	997.0	236.89	3.0	0.0017	1.68	238.57	
9.1	10	0.543	100	54.3	0.29	100	0.0143	0.1456	97.87	9787	0.98	928.0	50.39	72.0	0.0014	1.43	51.8	
	20	1.168	100	116.8	0.35	100	0.0175	0.1325	132.08	13208	1.32	983.0	114.81	17.0	0.0018	1.75	116.56	
	30	2.333	100	233.3	0.39	100	0.0193	0.1240	155.24	15524	1.55	923.7	215.50	1.3	0.0019	1.93	217.42	
	60	3.521	100	352.1	0.95	100	0.0475	0.1498	317.09	31709	3.17	898.7	316.43	1.3	0.0048	4.75	321.18	
14.5	10	1.378	100	137.8	0.29	100	0.0143	0.1320	107.95	10795	1.08	955.0	131.60	45.0	0.0014	1.43	133.02	
	20	1.429	100	142.9	0.44	100	0.0219	0.1336	163.92	16392	1.64	949.0	135.61	11.0	0.0022	2.19	137.80	
	30	2.603	100	260.3	0.60	100	0.0302	0.1366	220.72	22072	2.21	894.0	232.71	6.0	0.0030	3.02	235.72	
	60	3.292	100	329.2	1.40	100	0.0699	0.1501	465.36	46536	4.65	590.0	194.23	210.0	0.0070	6.99	201.21	

ตารางภาคผนวก ก 6 ปริมาณอุทกนิยมน้ำและตะกอน มีการจัดเรียงอัตราแบบไปพลารี่พื้นที่ของขี้วัวไฟฟ้า 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> \* Improf. Cone.

พลังงานไฟฟ้า (kWh/m <sup>3</sup> )	เวลา (min)	con.AL (water) mg/l	ท่า	(mg/l) *ท่า	con.AL (sludge) mg/l	ท่า	Mg	น.น.ก้อน -น.น.หลัง (g)	mg/kg	(mg/kg) *ท่า	%	*water (ml)	Al water (mg)	*Sludge (ml)	Al sludge (g)	Al sludge (mg)	Total (mg)	
1.8	Inf.	3.747			5.654													
	10	0.369	100	36.9	0.13	100	0.0063	0.1437	43.49	4349	0.43	725.0	26.75	275.0	0.0006	0.63	27.38	
	20	0.450	100	45.0	0.20	100	0.0101	0.1501	67.29	6729	0.67	850.0	38.25	150.0	0.0010	1.01	39.26	
	30	0.697	100	69.7	0.18	100	0.0092	0.1223	75.22	7522	0.75	995.0	69.35	5.0	0.0009	0.92	70.27	
	60	2.358	100	235.8	0.34	100	0.0171	0.1221	139.64	13964	1.40	998.7	235.49	1.3	0.0017	1.71	237.20	
	10	0.377	100	37.7	0.21	100	0.0106	0.1518	69.83	6983	0.70	885.0	33.36	115.0	0.0011	1.06	34.42	
5.5	20	0.627	100	62.7	0.22	100	0.0110	0.1358	80.63	8063	0.81	991.0	62.14	9.0	0.0011	1.10	63.23	
	30	1.510	100	151.0	2.12	100	0.1060	0.1198	884.81	88481	8.85	999.0	150.85	1.0	0.0106	10.60	161.45	
	60	3.573	100	357.3	0.44	100	0.0219	0.1186	184.65	18465	1.85	919.0	328.36	1.0	0.0022	2.19	330.55	
	10	0.718	100	71.8	0.21	100	0.0105	0.1213	86.56	8656	0.87	991.0	71.15	9.0	0.0011	1.05	72.20	
	20	1.627	100	162.7	0.23	100	0.0117	0.1101	106.27	10627	1.06	995.0	161.89	5.0	0.0012	1.17	163.06	
	30	2.358	100	235.8	0.39	100	0.0194	0.1154	168.11	16811	1.68	897.5	211.63	2.5	0.0019	1.94	213.57	
14.5	60	3.846	100	384.6	0.89	100	0.0446	0.1250	356.40	35640	3.56	797.5	306.72	2.5	0.0045	4.46	311.17	
	10	0.724	100	72.4	0.29	100	0.0143	0.1325	107.55	10755	1.08	974.0	70.52	26.0	0.0014	1.43	71.94	
	20	1.595	100	159.5	0.24	100	0.0120	0.1094	109.69	10969	1.10	998.5	159.26	1.5	0.0012	1.20	160.46	
	30	2.951	100	295.1	0.50	100	0.0252	0.1205	208.71	20871	2.09	899.0	265.29	1.0	0.0025	2.52	267.81	
	60	4.163	100	416.3	0.82	100	0.0408	0.1160	351.29	35129	3.51	695.0	289.33	5.0	0.0041	4.08	293.40	

ตารางภาคผนวก ก 7 ค่าไฟฟ้าและปริมาณอุณหภูมิมินิมัมที่ใช้ไปจากการทดลองจัดเรียงอิเล็กทรอนิกส์ ทรานสมอนาน พื้นที่ของแผงไฟฟ้า 29 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

พลังงานไฟฟ้า (kW/m <sup>3</sup> )	เวลา (min)	นน. แอโนด ก่อน (g)	ผลต่าง แอโนด (g)	การคำนวณค่าอุณหภูมิมินิมัม	ค่า AI (Bahr)	ค่า AI (Bahr/m <sup>3</sup> )	ผลต่าง (Bahr)	การคำนวณค่าไฟฟ้า	จำนวนยูนิต	ค่าไฟฟ้า (Bahr)	ค่าไฟฟ้า (Bahr/m <sup>3</sup> )	ผลต่าง (Bahr)	ราคารวม (Bahr/m <sup>3</sup> )
1.8	10	12.9474	0.0683	แผ่น AI 120 cm * 240 cm = 28800 cm ราคา 1300 Bahr หากแผ่นเล็ก 6 cm * 9 cm = 54 cm ราคา 2.44 Bahr	0.0129	11.69		คิดค่าไฟฟ้าจากการ ไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ประเภทที่ 3.2.2 ประเภทกิจการขนาด กลาง ระดับแรงดัน 22-23 กิโลโวลต์ (Time of Use Tariff: TOU) ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย เฉลี่ย = 3.00 Bahr **จำนวนยูนิต = (watt*hr)/1000	0.0003	0.0010	0.909		12.60
	20	13.5291	0.1087		0.0196	17.80	6.11		0.0007	0.0020	1.818	0.91	19.62
	30	12.7722	0.1988		0.0379	34.49	16.69		0.0010	0.0030	2.727	0.91	37.22
5.5	60	13.3828	0.3539		0.0645	58.60	24.11		0.0020	0.0060	5.455	2.73	64.05
	10	13.2844	0.1290		0.0237	21.52			0.0008	0.0025	2.273		23.79
	20	12.9066	0.2365		0.0447	40.60	114.5		0.0017	0.0050	4.545	2.27	45.15
9.1	30	13.1559	0.3488		0.0646	58.75	18.15		0.0025	0.0075	6.818	2.27	65.57
	60	12.9207	0.6958		0.1313	119.33	60.58		0.0050	0.0150	13.636	6.82	132.97
	10	12.7752	0.1916		0.0366	33.23			0.0017	0.0050	4.545		37.78
14.5	20	13.0890	0.3605		0.0671	61.03	27.80		0.0033	0.0100	14.51	4.55	70.12
	30	12.9951	0.5268		0.0988	89.83	28.80		0.0050	0.0150	13.636	4.55	103.47
	60	12.7789	1.0112		0.1929	175.35	85.52		0.0100	0.0300	27.273	13.64	202.62
14.5	10	12.9827	0.2329		0.0437	39.75			0.0026	0.0080	7.273		47.02
	20	13.2226	0.4685		0.0864	78.51	38.76		0.0053	0.0160	14.55	7.27	93.06
	30	13.2753	0.7074		0.1299	118.08	39.57		0.0080	0.0240	21.818	7.27	139.90
	60	12.9019	1.2361		0.2335	212.30	94.22		0.0160	0.0480	43.636	21.8	255.94

ตารางภาคผนวก ก 8 ค่าไฟฟ้าและปริมาณอคูมิเตอร์ที่ใช้ไปจากการทดลองจัดเรียงอิเล็กทรอนิกส์แบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

พลังงานไฟฟ้า (kW/m <sup>3</sup> )	เวลา (min)	นน. แอโนด ก่อน (g)	ผลต่าง แอโนด (g)	การคำนวณค่าอคูมิเตอร์	ค่า AI (Bahr)	ค่า AI (Bahr /m <sup>3</sup> )	ผลต่าง (Bahr)	การคำนวณค่าไฟฟ้า	จำนวนชุด	ค่าไฟฟ้า (Bahr)	ค่าไฟฟ้า (Bahr /m <sup>3</sup> )	ผลต่าง (Bahr)	ราคา (Bahr /m <sup>3</sup> )
1.8	10	12.8315	0.0838	แผ่น AI 120 cm * 240 cm = 28800 cm <sup>2</sup> ราคา 1300 Bahr	0.0159	14.47		คิดค่าไฟฟ้าจากการใช้ไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ประเภทที่ 3.2.2 ประเภทกิจการขนาดกลาง	0.0003	0.001	0.909		15.38
	20	12.6489	0.1378		0.0266	24.14	9.67		0.0007	0.0020	1.818	0.91	25.96
	30	12.7517	0.1924		0.0368	33.43	9.29		0.0010	0.0030	2.727	0.91	36.16
	60	12.9309	0.3912		0.0737	67.04	33.60		0.0020	0.0060	5.455	2.73	72.49
	10	12.8888	0.1547		0.0293	26.60			0.0008	0.0025	2.273	2.27	28.87
	20	13.2941	0.2490		0.0457	41.50	14.91		0.0017	0.0050	4.545	2.27	46.05
5.5	20	13.2941	0.2490	6 cm * 9 cm = 54 cm <sup>2</sup> ราคา 2.44 Bahr	0.0703	63.94	22.44	ระดับแรงดัน 22-23 กิโลโวลต์ (Time of Use Tariff: TOU)	0.0025	0.0075	6.818	2.27	70.76
	30	12.7807	0.3688		0.1290	117.31	53.37		0.0050	0.0150	13.636	6.82	130.95
	60	12.5236	0.6630		0.0521	47.38			0.0017	0.0050	4.545		51.93
	10	12.6504	0.2705		0.0581	52.86	5.47		0.0033	0.0100	14.51	4.55	61.95
9.1	20	12.5981	0.3005	ค่าไฟฟ้าต่อหน่วยเฉลี่ย = 3.00 Bahr	0.1200	109.13	56.27	**จำนวนชุด = (watt*hr)/1000	0.0050	0.0150	13.636	4.55	122.77
	30	12.4735	0.6143		0.2797	254.26	145.13		0.0100	0.0300	27.273	13.64	281.53
	60	12.7171	1.4592		0.0514	46.76			0.0026	0.0080	7.273		54.03
	10	12.5008	0.2638		0.0827	75.16	28.40		0.0053	0.0160	14.55	7.27	89.71
	20	13.4676	0.4568		0.1320	120.00	44.84		0.0080	0.0240	21.818	7.27	141.8
	30	12.9209	0.6997										
14.5	60	13.3042	2.4001		0.4397	399.75	279.76		0.0160	0.0480	43.636	21.8	443.39

ตารางภาคผนวก ก ๑ ค่าไฟฟ้าและปริมาณอุณหภูมิขั้วที่ใช้ประกอบการทดลองจัดเตรียมอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมบนอุปกรณ์ที่ขั้วไฟฟ้า 29 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

พลังงานไฟฟ้า (kW/m <sup>3</sup> )	เวลา (min)	นน. แอโนด (g)	ผลต่างแอโนด (g)	การคำนวณค่าอุณหภูมิขั้ว	ค่า AI (Bahr)	ค่า AI (Bahr/m <sup>3</sup> )	ผลต่าง (Bahr)	การคำนวณค่าไฟฟ้า	จำนวนชนิด	ค่าไฟฟ้า (Bahr)	ค่าไฟฟ้า (Bahr/m <sup>3</sup> )	ผลต่าง (Bahr)	ราคารวม (Bahr/m <sup>3</sup> )	
														ค่า AI (Bahr)
1.8	10	13.086	0.0553	แผ่น AI 120 cm * 240 cm = 28800 cm	0.0103	9.36		คิดค่าไฟฟ้าจากการไฟฟ้าผ่านภูมิภาคประเภทที่ 3.2.2 ประเภทกิจการขนาดเล็กถึงระดับแรงดัน 22-23 กิโลวัตต์ (Time of Use Tariff: TOU) ค่าไฟฟ้าต่อหน่วยเฉลี่ย = 3.00 Bahr (**จำนวนชนิด = (watt*hr)/1000)	0.0003	0.0010	0.909		10.27	
					0.0208	18.92	9.56		0.0007	0.0020	1.818	0.91	20.74	
					0.0319	28.99	10.07		0.0010	0.0030	2.727	0.91	31.72	
	30	13.0779	0.1711		0.0718	65.29	36.29		0.0020	0.0060	5.455	2.73	70.74	
					0.0166	15.09			0.0008	0.0025	2.273		17.36	
					0.0253	23.05	7.96		0.0017	0.0050	4.545	2.27	27.59	
5.5	20	13.0002	0.1352	ราคา 1300 Bahr หากแผ่นเล็ก 6 cm * 9 cm = 54 cm	0.0445	40.49	17.44	Use Tariff: TOU) ค่าไฟฟ้าต่อหน่วยเฉลี่ย = 3.00 Bahr (**จำนวนชนิด = (watt*hr)/1000)	0.0025	0.0075	6.818	2.27	47.30	
					0.0937	85.22	44.73		0.0050	0.0150	13.636	6.82	98.86	
					0.0338	30.72			0.0017	0.0050	4.545		35.26	
	10	12.8049	0.1775		0.0619	56.30	25.58		0.0033	0.0100	14.51	4.55	65.39	
					0.0728	66.15	9.86		0.0050	0.0150	13.636	4.55	79.79	
					0.1437	130.61	64.45		0.0100	0.0300	27.273	13.64	157.88	
14.5	60	12.9980	0.7661	ราคา 2,44 Bahr	0.0508	46.17		(**จำนวนชนิด = (watt*hr)/1000)	0.0026	0.0080	7.273		53.44	
					0.0901	81.88	35.71		0.0053	0.0160	14.55	7.27	96.42	
					0.1015	92.26	10.39		0.0080	0.0240	21.818	7.27	114.08	
	30	12.5179	0.5212		0.1792	162.90	70.63		0.0160	0.0480	43.636	21.8	206.53	

ตารางภาคผนวก ก 10 ค่าไฟฟ้าและปริมาณอุณหภูมิที่ใช้ป้องกันการทดลองจัดเรียงอิเล็กทรอนิกส์ ทรานซอนกรวม พื้นที่ของแผงไฟฟ้า 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

พลังงานไฟฟ้า (kW/m <sup>3</sup> )	เวลา (min)	นน. แอโนด ก่อน (g)	ผลต่าง แอโนด (g)	การคำนวณค่าอุณหภูมิ	ค่า AI (Bahr)	ค่า AI (Bahr /m <sup>3</sup> )	ผลต่าง (Bahr)	การคำนวณค่าไฟฟ้า	จำนวนยูนิท	ค่าไฟฟ้า (Bahr)	ค่าไฟฟ้า (Bahr /m <sup>3</sup> )	ผลต่าง (Bahr)	ราคารวม (Bahr /m <sup>3</sup> )
1.8	10	12.8618	0.0861	แผ่น AI	0.0163	14.83		คิดค่าไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ประเภทที่ 3.2.2 ประเภทกิจการขนาดกลาง ระดับแรงดัน 22-23 กิโลโวลต์ (Time of Use Tariff: TOU)	0.0003	0.0010	0.909		15.74
	20	12.9340	0.1219		0.0230	20.88	6.05		0.0007	0.0020	1.818	0.91	22.70
	30	13.1125	0.1903		0.0354	32.16	11.27		0.0010	0.0030	2.727	0.91	34.89
	60	13.1041	0.2812		0.0523	47.55	15.39		0.0020	0.0060	5.455	2.73	53.01
	10	11.8492	0.1587		0.0326	29.68			0.0008	0.0025	2.273	2.27	31.95
	20	12.8851	0.2961		0.0560	50.92	21.24		0.0017	0.0050	4.545	2.27	55.47
5.5	30	12.4427	0.4063	หาคณพ่นเล็ก 6 cm * 9 cm = 54 cm ราคา 2.44 Bahr	0.0796	72.36	21.44	TOU)	0.0025	0.0075	6.818	2.27	79.18
	60	12.4818	0.6241		0.1219	110.80	38.44		0.0050	0.0150	13.636	6.82	124.43
	10	12.5540	0.2387		0.0463	42.13			0.0017	0.0050	4.545	6.82	46.68
	20	12.4388	0.3845		0.0753	68.50	26.36		0.0033	0.0100	14.51	4.55	77.59
	30	11.9982	0.519		0.1054	95.85	27.36		0.0050	0.0150	13.636	4.55	109.49
	60	12.3883	0.8927		0.1756	159.68	63.83		0.0100	0.0300	27.273	13.64	186.95
14.5	10	13.0866	0.3283	**จำนวนยูนิท = (wat*hr)/1000	0.0611	55.59		เฉลี่ย = 3.00 Bahr	0.0026	0.0080	7.273		62.86
	20	12.9690	0.4761		0.0895	81.35	25.76		0.0053	0.0160	14.55	7.27	95.89
	30	12.9368	0.6447		0.1215	110.43	29.08		0.0080	0.0240	21.818	7.27	132.25
	60	13.0333	0.8411		0.1573	143.00	32.57		0.0160	0.0480	43.636	21.8	186.64

ตารางภาคผนวก ก 11 ค่าไฟฟ้าและปริมาณอุณหภูมิที่ใช้ไปจากการทดลองจัดเรียงอิเล็กทรอนิกส์แบบไปโพลาร์พื้นที่ของหัวไฟฟ้า 29 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

พลังงานไฟฟ้า (kWh/m <sup>3</sup> )	เวลา (min)	นน. แอนโตนก่อน (g)	ผลต่างแอนโตน (g)	การคำนวณค่าอุณหภูมิขม	ค่า AI (Bahr)	ค่า AI (Bahr/m <sup>3</sup> )	ผลต่าง (Bahr)	การคำนวณค่าไฟฟ้า	จำนวนยูนิค	ค่าไฟฟ้า (Bahr)	ค่าไฟฟ้า (Bahr/m <sup>3</sup> )	ผลต่าง (Bahr)	ราคารวม (Bahr/m <sup>3</sup> )
1.8	10	12.1792	0.0227	แผ่น AI 120 cm *240 cm = 28800 cm ราคา 1300 Bahr หากแผ่นเล็ก 6 cm* 9 cm = 54 cm ราคา 2.44 Bahr	0.0045	4.13		คิดค่าไฟฟ้าจากการ ไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ประเภทที่ 3.2.2 ประเภทกิจการ ขนาดกลาง ระดับ แรงดัน 22-23 กิโล โวลต์ (Time of Use Tariff: TOU) ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย เฉลี่ย = 3.00 Bahr **จำนวนยูนิค = (watt*hr)/1000	0.0003	0.0010	0.909		5.04
					0.0120	10.95	6.82		0.0007	0.0020	1.818	0.91	12.77
					0.0209	18.97	8.02		0.0010	0.0030	2.727	0.91	21.70
	30	12.6251	0.1081		0.0435	39.58	20.61		0.0020	0.0060	5.455	2.73	45.04
					0.0100	9.12			0.0008	0.0025	2.273		11.39
					0.0141	12.86	3.74		0.0017	0.0050	4.545	2.27	17.40
20	12.8550	0.0746	0.0178	16.14	3.28	0.0025	0.0075	6.818	2.27	22.96			
			60	12.9349	0.0942	0.0351	31.91	15.77	0.0050	0.0150	13.636	6.82	45.5
						0.0122	11.05		0.0017	0.0050	4.545		15.59
0.0200	18.20	7.15				0.0033	0.0100	14.51	4.55	27.29			
9.1	10	12.1350	0.0605	ราคา 2.44 Bahr	0.0382	34.75	16.55	ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย เฉลี่ย = 3.00 Bahr **จำนวนยูนิค = (watt*hr)/1000	0.0050	0.0150	13.636	4.55	48.38
					0.0566	51.49	16.74		0.0100	0.0300	27.273	13.64	78.76
					0.0129	11.72			0.0026	0.0080	7.273		18.99
	30	12.0662	0.1892		0.0215	19.53	7.81		0.0053	0.0160	14.55	7.27	34.07
					0.0368	33.45	13.92		0.0080	0.0240	21.818	7.27	55.27
					0.0578	52.57	19.12		0.0160	0.0480	43.636	21.8	96.20
14.5	10	12.5922	0.0666	ราคา 2.44 Bahr	0.0382	34.75	16.55	ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย เฉลี่ย = 3.00 Bahr **จำนวนยูนิค = (watt*hr)/1000	0.0050	0.0150	13.636	4.55	48.38
					0.0566	51.49	16.74		0.0100	0.0300	27.273	13.64	78.76
					0.0129	11.72			0.0026	0.0080	7.273		18.99
20	12.9244	0.1139	0.0215		19.53	7.81	0.0053		0.0160	14.55	7.27	34.07	
			0.0368		33.45	13.92	0.0080		0.0240	21.818	7.27	55.27	
			0.0578		52.57	19.12	0.0160		0.0480	43.636	21.8	96.20	
60	12.4877	0.1885	0.0368	33.45	13.92	0.0080	0.0240	21.818	7.27	55.27			
			0.0578	52.57	19.12	0.0160	0.0480	43.636	21.8	96.20			
			0.0578	52.57	19.12	0.0160	0.0480	43.636	21.8	96.20			



ตารางภาคผนวก ก 12 ค่าไฟฟ้าและปริมาณอุณหภูมิขมที่ใช้ไปจากการทดลองจัดเรียงอิเล็กทรอนิกส์ โพลาริฟิล์มที่ของเหลวไฟฟ้า 39 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>

พลังงานไฟฟ้า (kWh/m <sup>3</sup> )	เวลา (min)	นน. แอนไนด์ ก่อน (g)	ผลต่าง แอนไนด์ (g)	การคำนวณ ค่าอุณหภูมิขม	ค่า AI (Bahr)	ค่า AI (Bahr/m <sup>3</sup> )	ผลต่าง (Bahr)	การคำนวณ ค่าไฟฟ้า	จำนวน ยูนิต	ค่าไฟฟ้า (Bahr)	ค่าไฟฟ้า (Bahr/m <sup>3</sup> )	ผลต่าง (Bahr)	ราคารวม (Bahr/m <sup>3</sup> )
1.8	10	12.9529	0.0649	แผ่น AI 120 cm *240 cm = 28800 cm	0.0122	11.10		คิดค่าไฟฟ้าจากการใช้ไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ประเภทที่ 3.2.2 ประเภทกิจการขนาดกลาง ระดับแรงดัน 22-23 กิโลโวลต์ (Time of Use Tariff: TOU) ค่าไฟฟ้าต่อหน่วยเฉลี่ย = 3.00 Bahr **จำนวนยูนิต = (watt*hr)/1000	0.0003	0.0010	0.909		12.01
	20	12.2121	0.1209		0.0241	21.94	10.83		0.0007	0.0020	1.818	0.91	23.76
	30	12.3865	0.1931		0.0380	34.55	12.61		0.0010	0.0030	2.727	0.91	37.27
	60	12.7263	0.2278		0.0436	39.66	5.12		0.0020	0.0060	5.455	2.73	45.12
	10	12.8775	0.0771		0.0146	13.27			0.0008	0.0025	2.273		15.5
	20	12.7611	0.1512		0.0289	26.26	12.99		0.0017	0.0050	4.545	2.27	30.80
5.5	30	12.3045	0.2159	ราคาแผ่นเล็ก 6 cm* 9 cm = 54 cm ราคา 2.44 Bahr	0.0428	38.88	12.63	0.0025	0.0075	6.818	2.27	45.70	
	60	12.4807	0.2962		0.0578	52.59	13.71	0.0050	0.0150	13.636	6.82	66.23	
	10	12.1644	0.0951		0.0191	17.32		0.0017	0.0050	4.545		21.87	
9.1	20	12.5936	0.1627		0.0315	28.63	11.30		0.0033	0.0100	14.51	4.55	37.72
	30	12.3945	0.2269		0.0446	40.57	11.94		0.0050	0.0150	13.636	4.55	54.20
	60	12.5547	0.3097		0.0601	54.66	14.10		0.0100	0.0300	27.273	13.64	81.93
	10	12.3242	0.1933		0.0382	34.76			0.0026	0.0080	7.273		42.03
14.5	20	12.5386	0.2302		0.0448	40.68	5.93		0.0053	0.0160	14.55	7.27	55.23
	30	12.5570	0.3048		0.0592	53.79	13.10		0.0080	0.0240	21.818	7.27	75.61
	60	12.3314	0.4115		0.0813	73.95	20.16		0.0160	0.0480	43.636	21.8	117.58

ตารางภาคผนวก ก 13 ค่าใช้จ่ายที่ลดลงจากการนำข้าวแกลบกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง (แบบขนาน)

พลังงานไฟฟ้า (kW/m <sup>3</sup> )	เวลา (mm)	ค่าไฟฟ้า (Bahr/m <sup>3</sup> )	แบบขนาน พืชของข้าวไฟฟ้า 29 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>				แบบขนาน พืชของข้าวไฟฟ้า 39 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>			
			นม แกลบทอด ที่เพิ่มขึ้น (g)	ราคารวม no recycle (Bahr/m <sup>3</sup> )	แกลบทอด recycle (Bahr/m <sup>3</sup> )	ราคารวม ที่ลดลง มือ recycle	นม แกลบทอด ที่เพิ่มขึ้น (g)	ราคารวม no recycle (Bahr/m <sup>3</sup> )	แกลบทอด recycle (Bahr/m <sup>3</sup> )	ราคารวมที่ลดลงมือ recycle
1.8	10	0.91	0.0078	12.60	1.33	11.26	0.0109	15.38	1.88	13.50
	20	1.8	0.0134	19.62	2.19	17.43	0.0493	25.96	8.64	17.32
	30	2.73	0.0776	37.22	13.46	23.75	0.0964	36.16	16.75	19.41
5.5	60	5.45	0.2311	64.05	38.27	25.79	0.1909	72.49	32.71	39.78
	10	2.27	0.1055	23.79	17.60	6.19	0.0762	28.87	13.10	15.77
	20	4.55	0.1095	45.15	18.80	26.35	0.1966	46.05	32.77	13.28
9.1	30	6.82	0.2668	65.57	44.94	20.63	0.3363	70.76	58.31	12.45
	60	13.64	0.4999	132.97	85.58	47.39	0.5676	130.95	100.43	30.52
	10	4.55	0.1496	37.78	25.95	11.83	0.2134	51.93	37.38	14.55
14.5	20	14.5	0.2536	70.12	42.93	27.19	0.2584	61.95	45.45	16.50
	30	13.64	0.3888	103.47	66.30	37.17	0.5219	122.77	92.72	30.05
	60	27.27	0.6073	202.62	105.31	97.31	1.3718	281.53	239.03	42.50
14.5	10	7.27	0.2261	47.02	38.59	8.43	0.1982	54.03	35.13	18.90
	20	14.55	0.3791	93.06	63.53	29.53	0.3585	89.71	58.99	30.72
	30	21.8	0.4203	139.90	70.16	69.74	0.5491	141.8	94.17	47.65
	60	43.64	1.1875	255.94	203.95	51.98	1.6465	443.39	274.24	169.15

ตารางภาคผนวก ก 14 ค่าใช้จ่ายที่ลดลงจากการนำขี้เถ้ากลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง (แบบอนุกรม)

พลังงาน ไฟฟ้า (kW/m <sup>3</sup> )	เวลา (min)	ค่าไฟฟ้า (Bahr/m <sup>3</sup> )	แบบอนุกรม พื้นที่ของขี้เถ้า 29 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>				แบบอนุกรม พื้นที่ของขี้เถ้า 39 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>			
			นม แต่ โทด ที่เพิ่มขึ้น (g)	ราคารวม no recycle (Bahr/m <sup>3</sup> )	แต่ โทด recycle (Bahr/m <sup>3</sup> )	ราคารวม ที่ลดลง เมื่อ recycle	นม แต่ โทด ที่เพิ่มขึ้น (g)	ราคารวม no recycle (Bahr/m <sup>3</sup> )	แต่ โทด recycle (Bahr/m <sup>3</sup> )	ราคารวมที่ ลดลงเมื่อ recycle
1.8	10	0.91	0.012	10.27	2.03	8.24	0.0186	15.74	3.20	12.54
	20	1.8	0.0263	20.74	4.46	16.28	0.0241	22.70	4.13	18.57
	30	2.73	0.0376	31.72	6.37	25.35	0.0303	34.89	5.12	29.77
5.5	60	5.45	0.1037	70.74	17.67	53.07	0.0897	53.01	15.17	37.84
	10	2.27	0.0797	17.36	14.08	3.28	0.0112	31.95	2.09	29.86
	20	4.55	0.1142	27.59	19.47	8.12	0.0592	55.47	10.18	45.29
9.1	30	6.82	0.1642	47.30	27.28	20.03	0.1667	79.18	29.69	49.49
	60	13.64	0.3962	98.86	67.57	31.29	0.4743	124.43	84.20	40.23
	10	4.55	0.1019	35.26	17.63	17.63	0.1578	46.68	27.85	18.83
14.5	20	14.5	0.2933	65.39	49.94	15.44	0.1945	77.59	34.65	42.94
	30	13.64	0.3502	79.79	60.93	18.86	0.3673	109.49	67.84	41.65
	60	27.27	0.5402	157.88	92.09	65.78	0.5939	186.95	106.23	80.72
14.5	10	7.27	0.2465	53.44	41.83	11.62	0.2623	62.86	44.41	18.45
	20	14.55	0.4684	96.42	80.86	15.56	0.3772	95.89	64.45	31.44
	30	21.8	0.4512	114.08	79.87	34.21	0.5731	132.25	98.16	34.08
	60	43.64	0.9363	206.53	157.73	48.81	0.7318	186.64	124.42	62.22

ตารางภาคผนวก ก 15 ค่าใช้จ่ายที่ลดลงจากการนำขวดพลาสติกกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง (แบบไป โพลาร์)

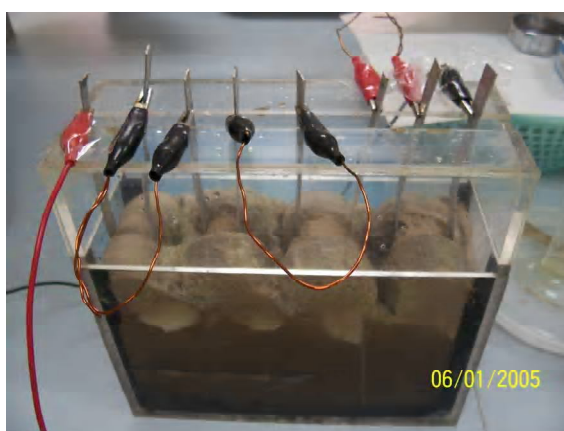
พลังงานไฟฟ้า (kW/m <sup>3</sup> )	เวลา (min)	ค่าไฟฟ้า (Bahr/m <sup>3</sup> )	แบบไป โพลาร์ พื้นที่ของขวดไฟฟ้า 29 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>				แบบไป โพลาร์ พื้นที่ของขวดไฟฟ้า 39 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>			
			นิน แคลโทด ที่เพิ่มขึ้น (g)	ราคารวม no recycle (Bahr/m <sup>3</sup> )	แคลโทด recycle (Bahr/m <sup>3</sup> )	ราคารวม ที่ลดลง เมื่อ recycle	นิน แคลโทด ที่เพิ่มขึ้น (g)	ราคารวม no recycle (Bahr/m <sup>3</sup> )	แคลโทด recycle (Bahr/m <sup>3</sup> )	ราคารวมที่ ลดลงเมื่อ recycle
1.8	10	0.91	0.0249	5.04	4.53	0.51	12.01	0.15	11.86	
	20	1.82	0.0367	12.77	6.62	6.15	23.76	0.40	23.36	
	30	2.73	0.0673	21.70	11.81	9.89	37.27	0.88	36.40	
5.5	60	5.45	0.0848	45.04	14.91	30.13	45.12	5.97	39.15	
	10	2.27	0.0227	11.39	4.02	7.37	15.54	1.62	13.92	
	20	4.55	0.0548	17.40	9.45	7.96	30.80	1.18	29.62	
9.1	30	6.82	0.0897	22.96	15.37	7.59	45.70	7.49	38.21	
	60	13.64	0.1294	45.54	23.39	22.15	66.23	17.79	48.44	
	10	4.55	0.0572	15.59	10.44	5.15	21.87	13.04	8.83	
14.5	20	9.09	0.0968	27.29	17.54	9.74	37.72	11.10	26.62	
	30	13.64	0.1293	48.38	23.75	24.64	54.20	28.57	25.63	
	60	27.27	0.2735	78.76	50.76	28.00	81.93	38.35	43.58	
14.5	10	7.27	0.063	18.99	11.09	7.91	42.03	12.05	29.98	
	20	14.55	0.1042	34.07	17.87	16.21	55.23	15.39	39.84	
	30	21.82	0.1803	55.27	31.99	23.27	75.61	27.03	48.57	
	60	43.64	0.2210	96.20	38.59	57.61	117.58	31.46	86.12	

ภาคผนวก ข

รูปภาพ



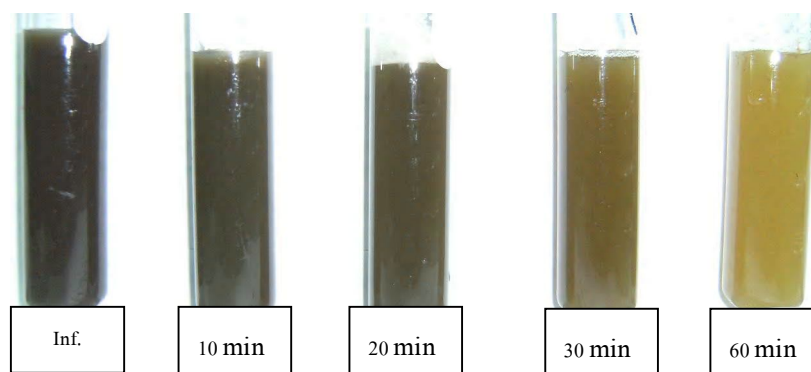
รูปภาคผนวก ข 1 การจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบขนาน



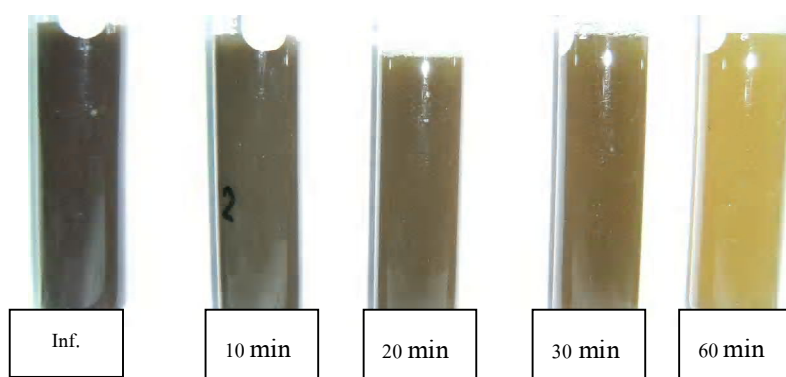
รูปภาคผนวก ข 2 การจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบอนุกรม



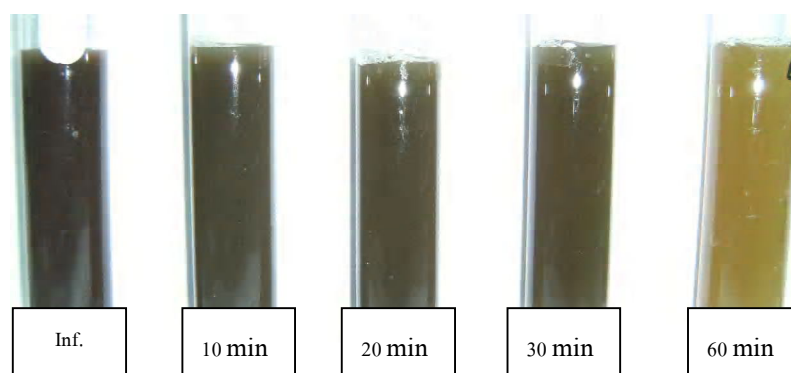
รูปภาคผนวก ข 3 การจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบไปโพลาร์



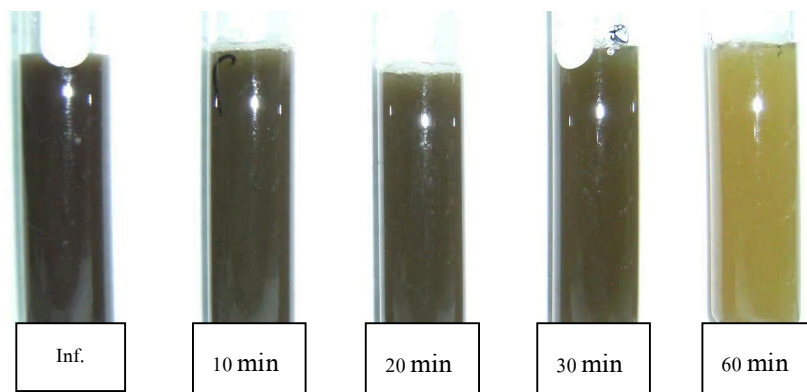
รูปภาคผนวก ข 4 ลักษณะของสีสำหรับการจัดเรียงอิเล็กโตรดแบบไบโพลาร์ พื้นที่ของ  
ขั้วไฟฟ้า  $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$  พลังงานไฟฟ้า  $14.5 \text{ kW}/\text{m}^3$



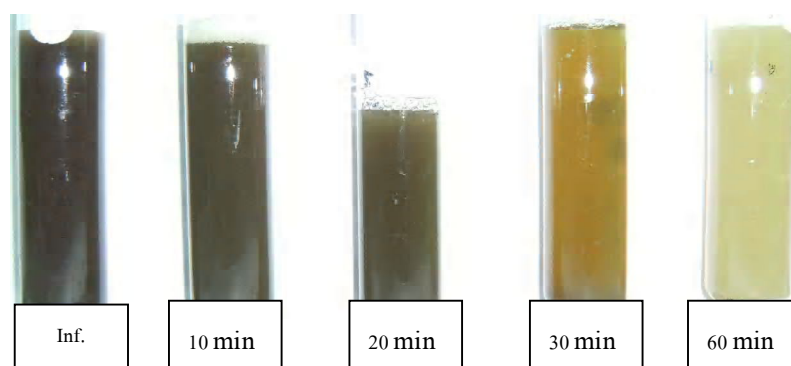
รูปภาคผนวก ข 5 ลักษณะของสีสำหรับการจัดเรียงอิเล็กโตรดแบบไบโพลาร์ พื้นที่ของ  
ขั้วไฟฟ้า  $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$  พลังงานไฟฟ้า  $14.5 \text{ kW}/\text{m}^3$



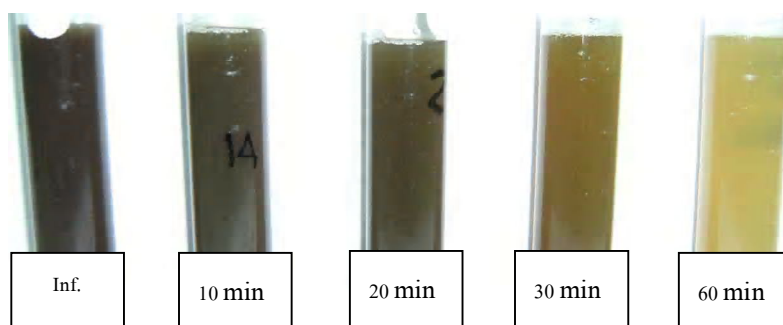
รูปภาคผนวก ข 6 ลักษณะของสีสำหรับการจัดเรียงอิเล็กโตรดแบบอนุกรม พื้นที่ของ  
ขั้วไฟฟ้า  $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$  พลังงานไฟฟ้า  $14.5 \text{ kW}/\text{m}^3$



รูปภาคผนวก ข 7 ลักษณะของสีสำหรับการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบอนุกรม พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$  พลังงานไฟฟ้า  $14.5 \text{ kW}/\text{m}^3$



รูปภาคผนวก ข 8 ลักษณะของสีสำหรับการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $29 \text{ m}^2/\text{m}^3$  พลังงานไฟฟ้า  $14.5 \text{ kW}/\text{m}^3$



รูปภาคผนวก ข 9 ลักษณะของสีสำหรับการจัดเรียงอิเล็กโทรดแบบขนาน พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า  $39 \text{ m}^2/\text{m}^3$  พลังงานไฟฟ้า  $14.5 \text{ kW}/\text{m}^3$





รูปภาพผนวก ข 10 น้ำเสียที่ออกกระบวนการผลิต



รูปภาพผนวก ข 11 น้ำเสียในบ่อปรับสภาพ ก่อนปล่อยเข้าสู่ถังหมักแบบไร้อากาศ



รูปภาพผนวก ข 12 ถังหมักแบบไร้อากาศ



รูปภาพผนวก ข 13 เครื่อง Spectrophotometer



รูปภาพผนวก ข 14 เครื่อง Centrifuge



รูปภาพผนวก ข 15 เครื่อง Atomic Absorption spectrometry

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นางสาวอมรภัค ชูทอง	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	4877020	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต (วิทยาศาสตร์ทั่วไป)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2546

## การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

อมรภัค ชูทอง ภัทรธร เอื้อกฤดาธิการ รศ.ดร.อุดมผล พิชนันไพบุลย์ และ ผศ.ดร.พนาลี ชิวกิดาการ. 2551. “กระบวนการไฟฟ้าเคมีสำหรับการบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม” เอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 7. จัดโดยสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย ณ สถาบันวิจัยจุฬาภรณ์ กรุงเทพฯ ระหว่างวันที่ 12-14 มีนาคม 2551.

อมรภัค ชูทอง ภัทรธร เอื้อกฤดาธิการ รศ.ดร.อุดมผล พิชนันไพบุลย์ และ ผศ.ดร. พนาลี ชิวกิดาการ. 2550. “การบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี” เอกสารประกอบการประชุมวิชาการและเสนอผลงานวิจัย. มหาวิทยาลัยทักษิณ จังหวัดสงขลา ครั้งที่ 17 ระหว่างวันที่ 20-21 กันยายน 2550.