

การบำบัดน้ำ Produced water ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟลเดชั่นเทียบกับ
เทคนิคอินดิวิชแอโรโฟลเดชั่น



วิทยานิพนธ์นี้เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
กรกฎาคม 2560
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง “การบำบัดน้ำ Produced water ด้วยเทคโนโลยีอิเล็กโทรโฟลเตซิสเทียบกับเทคนิค
อินดิซ์แอร์โฟลเตซิส”

ของ นายพิพัฒน์ พิทักษ์สุธีพงศ์

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพียรรมกุล)

.....ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนพล เพ็ญรัตน์)

.....กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลเดช ตั้งตระการพงษ์)

.....กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อิศราวุธ ประเสริฐสังข์)

.....กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปจรรย์ ทองสนิท)

อนุมัติ

.....

(ดร.ภาณุ พุทธวงศ์)

รองคณบดีฝ่ายบริหารและวางแผน ปฏิบัติราชการแทน

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

24 ก.ค. 2560

ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจาก บริษัท ปตท.สผ.สยาม จำกัด สัญญาเลขที่ DSO-14_36639.1 จ้างวิจัยและพัฒนาต้นแบบระบบ บำบัดน้ำเสียโดยไฟฟ้า โครงการเอสวัน

ข้าพเจ้าขอขอบคุณคุณเจริญ จิงธนาเจริญ ผู้จัดการแผนกสนับสนุนปฏิบัติการผลิตของ บริษัท ปตท.สผ.สยาม จำกัด ที่สนับสนุนและนำเสนองานวิจัยต่อผู้บริหารของบริษัทเพื่ออนุมัติทุน ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนพล เพ็ญรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่คอยดูแลและให้ คำปรึกษาตลอดระยะเวลาการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณบริษัท ปตท.สผ. สยาม จำกัด ที่ให้การ สนับสนุนงานวิจัย ขอขอบคุณคุณสมบัติ โนพิชัย หัวหน้าห้องปฏิบัติการเคมี ที่ให้คำแนะนำและ คอยอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี บริษัท ปตท.สผ. สยาม จำกัด ทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการเก็บตัวอย่างมาใช้ในการทำงานวิจัย ขอขอบคุณ นางสาวพิมลพรรณ หมูเฮง ที่ช่วยวิเคราะห์น้ำและตัวอย่างของแข็ง ขอขอบคุณบริษัท นาลโก้ ประเทศไทย จำกัด ที่เอื้อเฟื้อสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือ ภาควิชา เคมี มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ ที่เอื้อเฟื้อเครื่อง IR และ XRD ขอขอบคุณคุณเพื่อนๆ ปรียญาไททุกท่าน ที่คอยให้คำแนะนำและเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ เพียรมนกุล ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับงานวิจัย เมื่อครั้งมาเยี่ยมชมแหล่งน้ำมันสิริกิติ์

ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยเล่มนี้ขอยกให้แก่ครอบครัวพิทักษ์สุธีพงศ์ ที่คอยอบรม สั่งสอน ให้การสนับสนุน เป็นกำลังใจ จนผู้วิจัยสามารถสำเร็จการศึกษา ผู้วิจัยต้องขอกราบ ขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

พิพัฒน์ พัทธษุธีพงศ์

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์	การบำบัดน้ำ Produced water ด้วยเทคนิคอิเล็กโทรไลต์ เตชันเทียบกับเทคนิคอินดิคเตอร์ไฟลเตชัน
ผู้วิจัย	พิพัฒน์ พิทักษ์สุธิพงศ์
สถานที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนพล เพ็ญรัตน์
กรรมการที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดลเดช ตั้งตระการพงษ์
กรรมการที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อิสราวุธ ประเสริฐสังข์
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วศ.ม. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2559
คำสำคัญ	Produced water, อิเล็กโทรไลต์เตชัน, อินดิคเตอร์ไฟล เตชัน, โบรอนไดโบไดมอนด์

บทคัดย่อ

ศึกษาการบำบัดน้ำ Produced water จากแหล่งน้ำมันสิริกิติ์ ด้วยวิธีอิเล็กโทรไลต์เตชันและอินดิคเตอร์ไฟลเตชัน จากการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่อยู่ในน้ำพบว่าประกอบด้วยสารอินทรีย์, สารอนินทรีย์ และสิ่งมีชีวิต โดยสารโดยเมื่อสารอินทรีย์บางตัวสัมผัสกับออกซิเจน เกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์เตชันจะทำให้คุณสมบัติความเป็นคอลลอยด์ของสารละลายเปลี่ยนแปลงไป

จากการศึกษาปฏิกิริยาเคมีของวิธี IAF ร่วมกับการเติมสารโพลิเมอร์ พบว่าระหว่างการเติมอากาศออกซิเจนในอากาศมีส่วนทำให้ Fe^{2+} เปลี่ยนไปเป็น Fe^{3+} ส่งผลให้ค่าความขุ่นเพิ่มขึ้นซึ่งตรงข้ามกับวิธี IAF ด้วยการเติมไนโตรเจน เนื่องจากไม่เกิดการออกซิไดซ์ของออกซิเจนกับ Fe^{2+} และยังพบอีกว่าประสิทธิภาพของวิธี IAF จะเพิ่มขึ้นเมื่อฟองก๊าซมีขนาดเล็กลง โดยค่า A/S ที่เหมาะสมสำหรับวิธี IAF ด้วยการเติมไนโตรเจนและอากาศคือ 30.7 และ 61.5 มิลลิลิตรอากาศต่อมิลลิกรัมของแข็งแขวนลอย

ปฏิกิริยาเคมีของกระบวนการ ECF ซึ่งเป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ เกิดการละลายของซิลิกาในดินคือ อลูมิเนียม และเหล็ก ส่งผลให้เกิด Al^{3+} หรือ Fe^{2+} เพิ่มขึ้นในสารละลายโดยสารเหล่านี้มีคุณสมบัติลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse Layer) ส่งผลทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ทำให้วิธีการ ECF มีค่าการบำบัดความขุ่นที่ดีกว่าวิธี EF

การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธี IAF ผลการทดลองเผยให้เห็นประสิทธิภาพการบำบัดค่า TSS ที่ 58 เปอร์เซ็นต์ น้ำมันในน้ำ 100 เปอร์เซ็นต์ ความขุ่น 94 เปอร์เซ็นต์ไม่มีประสิทธิภาพในการบำบัดแบคทีเรีย และให้ผลการบำบัดอนุภาคที่มากกว่า 5 ไมครอน 87 เปอร์เซ็นต์

การบำบัดน้ำด้วยวิธี ECF ให้ประสิทธิภาพการบำบัดค่า TSS, น้ำมันในน้ำ และความขุ่น มากกว่า 85 เปอร์เซ็นต์

การบำบัดน้ำด้วยวิธีอิเล็กโทรโฟลเทซิส (EF) ให้ประสิทธิภาพการบำบัด TSS ที่ดีกว่าวิธี ECF โดยวิธี EF ให้ประสิทธิภาพการบำบัด TSS ที่ 49 เปอร์เซ็นต์ และให้ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและน้ำมันในน้ำมากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเบคทีเรีย 100 เปอร์เซ็นต์ และสามารถบำบัดอนุภาคที่มากกว่า 5 ไมครอน 98 เปอร์เซ็นต์

จากการประเมินความเป็นไปได้ทางวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์ พบว่าระบบ ECF สามารถให้กำเนิดการคลอรีนซึ่งเป็นสารเคมีที่มีความสามารถในการกัดกร่อนสูงต่อระบบท่อ ซึ่งยังคงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม ในการทดลองนี้จึงเสนอให้ใช้วิธี IAF ณ แหล่งน้ำมันสิริกิติ์ จากการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์พบว่าการติดตั้งระบบ IAF สามารถคุ้มทุนได้ตั้งแต่ปีแรก



Title	TREATMENT OF PRODUCED WATER BY USING ELECTROFLOTATION COMPARED WITH INDUCED AIR FLOTATION
Author	Pipat Pituksuteepong
Advisor	Assistant Professor Tanapon Phenrat, Ph.D.
Co-Advisor	Assistant Professor Dondej Tungtrakanpong, Ph.D.
Co-Advisor	Assistant Professor Isarawut Prasertsung, Ph.D.
Academic Paper	Thesis M.Eng. in Environmental Engineering, Nareasuan University, 2016
Keywords	Produced water, Electroflotation, Induced Air Flowtation, Boron Doped Diamond

ABSTRACT

Treatment of Produced water from Sirikit Oil field by Electroflotation and Induced air flotation was studied. Water chemistry of the produced water was determined. The produced water composed of organic matter, Inorganic matter and bio-organism. Some of organic matter are able to react with oxygen by oxidization reaction. This reaction effects directly to the stability of colloid in produced water.

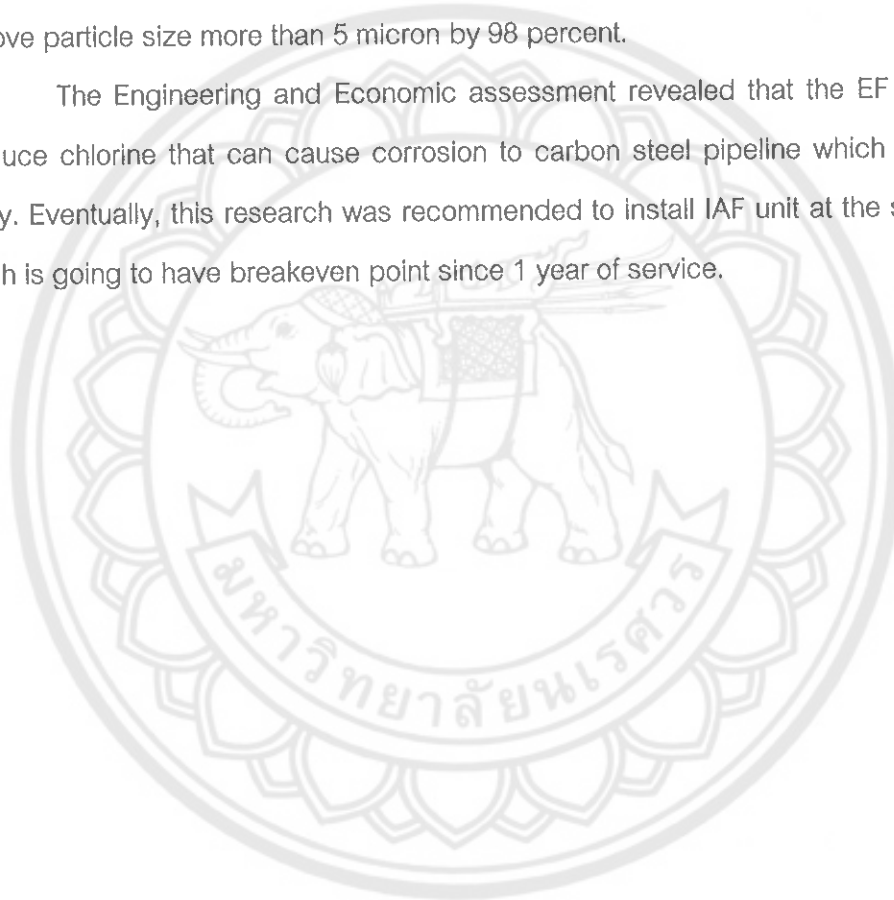
Induced air flotation (IAF) with polymer added, the Oxygen in the air was able to oxidize Ferrous (Fe^{2+}) to form Ferric(Fe^{3+}) this reaction lead to increasing of the turbidity. In contrary, IAF using Nitrogen instead of the air had less turbidity because there was no oxidation reaction occur. The optimal A/S ratio for air and nitrogen were 61.5 and 30.7 ml gas per mg suspended solid, respectively.

Redox reaction of ECF was able to produce Al^{3+} or Fe^{2+} depend on electrode type at the Anode. The Al^{3+} and Fe^{2+} were able to reduce the thickness of the diffuse layer that impact directly to the stability of colloid in produced water. With this reason, ECF then had better turbidity than EF.

The experimental reveals that the IAF was able to remove TSS 58 percent, Oil in water 100 percent, turbidity 94 percent, particle size more than 5 micron 87 percent however it was unable to remove SRB or PRD bacteria. The ECF was able to remove TSS, oil in water and turbidity more than 85 percent.

The EF treatment efficiency was lower than ECF in TSS removal. It was found EF was able to remove TSS by 49 percent, Turbidity and oil in water more than 95 percent. Moreover EF was able to kill SRB and PRD bacteria by 100 percent and was able to remove particle size more than 5 micron by 98 percent.

The Engineering and Economic assessment revealed that the EF was able to produce chlorine that can cause corrosion to carbon steel pipeline which need further study. Eventually, this research was recommended to install IAF unit at the sirikit oil field which is going to have breakeven point since 1 year of service.



สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	6
กรอบแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	6
สมมติฐานของการวิจัย.....	6
ขอบเขตการวิจัย.....	7
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	8
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	9
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
องค์ประกอบของ produced water.....	10
เส้นทางการกระจายตัวและผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อ Produced water ถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม.....	11
การจัดการ Produced water.....	12
จุดประสงค์ของการบำบัด Produced Water.....	13
วิธีการบำบัด Produced Water.....	13
คอลลอยด์ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม.....	17
คอลลอยด์.....	18
แรงผลักทางไฟฟ้าในระดับไมครอน (Microscopic Electrical Forces).....	18
ความหนาของ "ผนังสองชั้น".....	19
ศักย์ซีต้า (Zeta Potential).....	20
สมดุลแรงกระทำระหว่างคอลลอยด์.....	21
กำแพงพลังงาน (Energy Barrier).....	22
การลดขนาดกำแพงพลังงาน (Lowering the Energy Barrier).....	24

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
กระบวนการโคแอกกูเลชัน-ฟลอคคูเลชัน.....	25
การทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์.....	25
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำเสีย.....	28
การบำบัดสารปนเปื้อนด้วยกระแสไฟฟ้า.....	33
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำด้วยเทคนิคอินดิวิจแอโรไฟลเตชัน.....	42
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	44
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	47
ตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการวิจัย.....	49
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	49
สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	50
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	50
ปัจจัยควบคุม.....	52
วิธีการทำการทดลอง.....	52
4 ผลการวิจัย.....	56
วิเคราะห์องค์ประกอบของสารแขวนลอย.....	56
การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีอินดิวิจแอโรไฟลเตชัน (IAF).....	59
การหาปริมาณแคโทดไอออนิกฟิลเบอร์ที่เหมาะสมกับวิธีการบำบัดแบบ IAF.....	62
การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีอิเล็กโตรโคแอกกูเลชันไฟลเตชัน (ECF) และอิเล็กโตรไฟลเตชัน (EF).....	85

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 บทสรุป.....	106
สรุปผลการวิจัย.....	106
ความเป็นไปได้ในการนำวิธี IAF และวิธี EF และ ECF ไปใช้งาน.....	106
การประเมินความเป็นไปได้ทางวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์.....	108
ข้อเสนอแนะ.....	111
บรรณานุกรม.....	112
ภาคผนวก.....	116
ประวัติผู้วิจัย.....	125

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1 คุณภาพน้ำเสียของแหล่งน้ำมันสิริกิติ์.....	2
2 ค่าเฉลี่ยองค์ประกอบของ Produced Water.....	10
3 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธีในการบำบัด Produced Water.....	13
4 ข้อดีข้อเสียของอิเล็กโทรไลต์แต่ละชนิด.....	38
5 วิธีการวัดคุณภาพน้ำเสียเบื้องต้น.....	53
6 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอิเล็กโทรโพลเดชั่น.....	54
7 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินดิคเตอร์โพลเดชั่น.....	55
8 ผลการการวิเคราะห์ค่าความขุ่นและสารอินทรีย์ระเหย.....	58
9 ผลการการวิเคราะห์ค่าพีเอช ,คลอไรด์, ค่าของแข็งแขวนลอย, ค่าของแข็งทั้งหมด, ค่าของแข็งละลาย, ค่าน้ำมันในน้ำตัวอย่างที่เก็บจากบ่อทิ้งน้ำระบบปิด.....	59
10 ลักษณะของหิวเติมอากาศบริษัท PYREX.....	66
11 สรุปผลการศึกษาค่าสัดส่วนปริมาณอากาศต่อปริมาณสารแขวนลอยที่เหมาะสม...	78
12 สรุปผลการบำบัดแบบที่เรีย จากวิธีเติมอากาศ.....	82
13 จำนวนอนุภาคแขวนลอยในน้ำเสียก่อนบำบัดและหลังบำบัดด้วยวิธี IAF โดยใช้หิวเติมอากาศที่มีขนาดความพรุนแตกต่างกัน วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Backman Z1.....	83
14 ประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคแขวนลอยโดยใช้หิวเติมอากาศที่มีขนาดความพรุนแตกต่างกัน.....	84
15 พารามิเตอร์แคโทดิกแอโนดิกแอโนดิก ของน้ำก่อนและหลังการบำบัดด้วยวิธี IAF.....	84
16 ผลการศึกษาพารามิเตอร์แคโทดิกแอโนดิกแอโนดิก ของน้ำก่อนและหลังการบำบัดด้วยวิธี EF โดยใช้ขั้วแอโนดและคาโทดเป็น BDD.....	100
17 สรุปประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียชนิดต่างๆ ของน้ำก่อนและหลังการบำบัดด้วยวิธี ECF.....	102

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
18	จำนวนอนุภาคแขวนลอยในน้ำเสียก่อน-หลัง บำบัดด้วยวิธี EF โดยใช้ กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์เป็นเวลา 4 นาที ใช้ BDD เป็นขั้วแอโนดและแคโทด วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Backman Z1.....	103
19	ประสิทธิภาพการใช้วิธี EF กำจัดอนุภาคแขวนลอยในน้ำเสียก่อน-หลังบำบัด วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Backman Z1.....	105
20	ผลเปรียบเทียบการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิค EF, ECF และ IAF.....	107
21	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบระบบ IAF.....	108
22	ค่าใช้จ่ายของระบบ IAF.....	108
23	ค่าใช้จ่ายในการ Re-perforation.....	109
24	เปรียบเทียบเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระหว่างการติดตั้งระบบ IAF กับเทคนิค Re-perforation.....	110

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
1 การเปรียบเทียบผลระหว่างการอัดน้ำกับไม่อัดน้ำสู่แหล่งปิโตรเลียม.....	2
2 การทำงานของเอสอาบีแบบที่เรี่ย.....	4
3 การทำปฏิกิริยาระหว่างเหล็กและก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	4
4 ลักษณะของ Petroleum Schmoo.....	5
5 การชนกันไปมาของอนุภาคคอลลอยด์.....	18
6 ลักษณะของผนังสองชั้นของคอลลอยด์.....	19
7 ความหนาของผนังคอลลอยด์ตามปริมาณไอออนในสารละลาย.....	20
8 เปรียบเทียบค่าศักย์ Zeta ระหว่างน้ำจืดและน้ำทะเล	21
9 ค่าการผลักกันทางไฟฟ้า(ซ้าย) และค่าแรงวัลเดอรวาล (ขวา).....	22
10 ผลรวมระหว่างแรงทางไฟฟ้าสถิตและแรงวัลเดอรวาล.....	23
11 การลดขนาดของชั้นกระจาย(ซ้าย) และ การลดประจุที่ผิวคอลลอยด์ (ขวา).....	24
12 คอลลอยด์ที่ถูกทำลายเสียสภาพและรวมตัวกัน.....	25
13 การลดความหนาของ ชั้นกระจาย.....	26
14 การดูดติดและทำลาย.....	26
15 การใช้สารอินทรีย์โพลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์.....	27
16 การจับอนุภาคคอลลอยด์ไว้ในสารประกอบที่สร้างขึ้น.....	27
17 กราฟแสดงสถานะความหนาแน่นของโลหะ จนวน และสารกึ่งตัวนำ.....	28
18 การเกิดไฮลขึ้นในผลึกของซิลิกอน.....	29
19 การนำไฟฟ้าของเซมิคอนดักเตอร์.....	30
20 ภาพจำลองการเติมแอนติโมนี ลงในผลึกซิลิกอน และอธิบายด้วยทฤษฎีแถบ.....	31
21 ภาพจำลองการเติมโบรอน ลงในผลึกซิลิกอน และอธิบายด้วยทฤษฎีแถบ.....	31
22 แบบจำลองโครงสร้างผลึกของโบรอนโดปโดมอนต์.....	32
23 การเปรียบเทียบแถบพลังงานระหว่างโดมอนต์ และโดปโดมอนต์.....	33
24 ความสัมพันธ์ของการบำบัดน้ำเสียด้วยไฟฟ้า.....	33
25 ลักษณะถึงปฏิกิริยาแบบอิเล็กโทรโฟลเดชั่น.....	35

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
26 ตัวอย่างการออกแบบเซลล์แบบสองชั้นตอนโดยมีการเติมโคแอกกูแลนต์เอด.....	36
27 ตัวอย่างการออกแบบเซลล์อิเล็กโตรโพลเตชันแบบปกติ.....	36
28 การวางอิเล็กโตรดแนวตั้ง.....	38
29 การวางอิเล็กโตรดรูปคล้ายช่อม.....	38
30 ไฮโดรไดนามิกของน้ำมันและฟองก๊าซ.....	43
31 แผนภูมิขั้นตอนวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียเบื้องต้น.....	47
32 แผนภูมิขั้นตอนอิเล็กโตรโพลเตชัน.....	48
33 แผนภูมิขั้นตอนอินดิคเตอร์แอโรโพลเตชัน.....	48
34 ระบบน้ำเสียของแหล่งศิริกิติ.....	49
35 ลักษณะถังปฏิกรณ์ ECF.....	49
36 ถังปฏิกรณ์ IAF.....	50
37 การหาปริมาณแอมโรบิคแบคทีเรียและแบคทีเรียเฮสตาปีด้วยเทคนิคเจือจาง สิบเท่า (NACE Standard TM0194-94 item no.21224).....	53
38 องค์ประกอบของตะกอนในหลุม LKU-C33.....	56
39 องค์ประกอบของตะกอนในหลุม LKU-C38.....	57
40 ผล IR ของหลุม LKU-C33.....	58
41 ผล IR ของหลุม LKU-C38.....	58
42 การบำบัดความขุ่นของ Coagulant EC60294A.....	60
43 การบำบัดความขุ่นของ Optimizer 7194 Plus.....	60
44 การบำบัดน้ำเสียโดยการปรับค่าพีเอชเพียงอย่างเดียว.....	61
45 การบำบัดด้วยวิธี IAFร่วมกับการเติมสารพอลิเมอร์.....	61
46 การหาปริมาณแคทไอออนนิคพอลิเมอร์ที่เหมาะสมกับวิธีการบำบัดแบบ IAF.....	63
47 การหาอัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด ของถังแขวนลอย.....	64

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
48 การหาอัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด น้ำมันในน้ำ.....	64
49 การหาอัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด ความขุ่น.....	65
50 ลักษณะหัวเติมอากาศที่ใช้ในการทดลอง.....	66
51 ผลการศึกษาปัจจัยด้านขนาดรูพรุนของหัวเติมอากาศที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพ การบำบัด โดยเปรียบเทียบค่าของแ่งแขวนลอย.....	67
52 ผลการศึกษาปัจจัยด้านขนาดรูพรุนของหัวเติมอากาศที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพ การบำบัด โดยเปรียบเทียบค่าของน้ำมันในน้ำ.....	67
53 ผลการศึกษาปัจจัยด้านขนาดรูพรุนของหัวเติมอากาศที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพ การบำบัด โดยเปรียบเทียบค่าความขุ่น.....	68
54 การหาอัตราการเติมในโตรเจนที่เหมาะสมโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพ การบำบัดของแ่งแขวนลอย น้ำมันในน้ำ และความขุ่น.....	69
55 การหาอัตราการเติมในโตรเจนที่เหมาะสมโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพ การบำบัดของแ่งแขวนลอย น้ำมันในน้ำ และความขุ่น.....	70
56 การหาอัตราการเติมในโตรเจนที่เหมาะสมโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพ การบำบัดของแ่งแขวนลอย น้ำมันในน้ำ และความขุ่น.....	70
57 การเปรียบเทียบผลการบำบัดของแ่งแขวนลอยระหว่างวิธีเติมอากาศและวิธี เติมในโตรเจน ที่อัตราการเติมก๊าซ 2 ลิตรต่อนาทีตามลำดับ.....	71
58 การเปรียบเทียบผลการบำบัดของแ่งแขวนลอยระหว่างวิธีเติมอากาศและวิธี เติมในโตรเจน ที่อัตราการเติมก๊าซ 4 ลิตรต่อนาทีตามลำดับ.....	72
59 การเปรียบเทียบผลการบำบัดของแ่งแขวนลอยระหว่างวิธีเติมอากาศและวิธี เติมในโตรเจน ที่อัตราการเติมก๊าซ 7 ลิตรต่อนาทีตามลำดับ.....	72
60 การเปรียบเทียบผลการบำบัดน้ำมันในน้ำระหว่างวิธีเติมอากาศและวิธีเติม ในโตรเจน ที่อัตราการเติมก๊าซ 2 ลิตรต่อนาทีตามลำดับ.....	73

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
61 การเปรียบเทียบผลการบำบัดน้ำมันในน้ำระหว่างวิธีเติมอากาศและวิธีเติม ไนโตรเจน ที่อัตราการเติมก๊าซ 4 ลิตรต่อนาทีตามลำดับ.....	73
62 การเปรียบเทียบผลการบำบัดน้ำมันในน้ำระหว่างวิธีเติมอากาศและวิธีเติม ไนโตรเจน ที่อัตราการเติมก๊าซ 7 ลิตรต่อนาทีตามลำดับ.....	74
63 การเปรียบเทียบผลการบำบัดความขุ่นระหว่างวิธีเติมอากาศและวิธีเติม ไนโตรเจน ที่อัตราการเติมก๊าซ 2 ลิตรต่อนาทีตามลำดับ.....	75
64 การเปรียบเทียบผลการบำบัดความขุ่นระหว่างวิธีเติมอากาศและวิธีเติม ไนโตรเจน ที่อัตราการเติมก๊าซ 4 ลิตรต่อนาทีตามลำดับ.....	75
65 การเปรียบเทียบผลการบำบัดความขุ่นระหว่างวิธีเติมอากาศและวิธีเติม ไนโตรเจน ที่อัตราการเติมก๊าซ 7 ลิตรต่อนาทีตามลำดับ.....	76
66 ลักษณะของน้ำตัวอย่างเมื่อสัมผัสกับออกซิเจนเปรียบเทียบกับไม่สัมผัส ออกซิเจน.....	77
67 ผลการหาปริมาณซัลเฟตรีดิวซ์แบคทีเรียของน้ำตัวอย่าง.....	78
68 ผลการหาปริมาณแบคทีเรียสร้างกรดของน้ำตัวอย่าง.....	79
69 ผลการหาปริมาณซัลเฟตรีดิวซ์แบคทีเรียของน้ำตัวอย่างหลังบำบัดด้วยวิธีเติม อากาศโดยใช้หัวเติมอากาศเบอร์ 2.....	80
70 ผลการหาปริมาณซัลเฟตรีดิวซ์แบคทีเรียของน้ำตัวอย่างหลังบำบัดด้วยวิธีเติม อากาศโดยใช้หัวเติมอากาศเบอร์ 3.....	80
71 ผลการหาปริมาณแบคทีเรียสร้างกรดของน้ำตัวอย่างหลังบำบัดด้วยวิธีเติม อากาศโดยใช้หัวเติมอากาศเบอร์ 2.....	81
72 ผลการหาปริมาณแบคทีเรียสร้างกรดของน้ำตัวอย่างหลังบำบัดด้วยวิธีเติม อากาศโดยใช้หัวเติมอากาศเบอร์ 3.....	81
73 แสดงจำนวนอนุภาคแขวนลอยในน้ำเสียก่อนบำบัดและหลังบำบัดด้วยวิธี IAF โดยใช้หัวเติมอากาศที่มีขนาดความพรุนแตกต่างกัน วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Backman Z1.....	83

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
74 การหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเมื่อใช้แสดงเลขเป็นอาโนด และคาโทด โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำบัคของแข็งแชนวอลอย.....	86
75 การหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเมื่อใช้แสดงเลขเป็นอาโนด และคาโทด โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำบัคน้ำมันในน้ำ.....	87
76 การหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเมื่อใช้อลูมิเนียมเป็นอาโนด และคาโทด โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำบัคของความชุ่ม.....	87
77 การหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเมื่อใช้อลูมิเนียมเป็นอาโนด และคาโทด โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำบัคของแข็งแชนวอลอย.....	88
78 การหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเมื่อใช้อลูมิเนียมเป็นอาโนด และคาโทด โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำบัคน้ำมันในน้ำ.....	89
79 การหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเมื่อใช้อลูมิเนียมเป็นอาโนด และคาโทด โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำบัคความชุ่ม.....	89
80 การหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเมื่อใช้เหล็กเป็นอาโนด และคาโทด โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำบัคของแข็งแชนวอลอย น้ำมันในน้ำ และความชุ่ม.....	91
81 การหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเมื่อใช้เหล็กเป็นอาโนด และเป็นคาโทด โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำบัคของแข็งแชนวอลอย น้ำมันในน้ำ และความชุ่ม.....	91
82 การหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเมื่อใช้เหล็กเป็นอาโนด และคาโทด โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำบัคของแข็งแชนวอลอย น้ำมันในน้ำ และความชุ่ม.....	92
83 การหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเมื่อใช้ BDD เป็นอาโนด และคาโทด โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำบัคของแข็งแชนวอลอย.....	93
84 การหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเมื่อใช้ BDD เป็นอาโนด และคาโทด โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำบัคน้ำมันในน้ำ.....	94

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
85 การหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเมื่อใช้ BDD เป็นแอโนด และคาโทด โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น.....	94
86 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอย จากการเปลี่ยนชนิด ของอิเล็กโทรดที่ขั้วแอโนดคือ แสตนเลส, อลูมิเนียม, เหล็ก, BDD ที่ ปริมาณกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์.....	95
87 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอย จากการเปลี่ยนชนิด ของอิเล็กโทรดที่ขั้วแอโนดคือ แสตนเลส, อลูมิเนียม, เหล็ก, BDD ที่ ปริมาณกระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์.....	96
88 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดค่าน้ำมันในน้ำจากการเปลี่ยนชนิดของ อิเล็กโทรดที่ขั้วแอโนดคือ แสตนเลส, อลูมิเนียม, เหล็ก, BDD ที่ปริมาณ กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์.....	97
89 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดค่าน้ำมันในน้ำจากการเปลี่ยนชนิดของ อิเล็กโทรดที่ขั้วแอโนดคือ แสตนเลส, อลูมิเนียม, เหล็ก, BDD ที่ปริมาณ กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์.....	97
90 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดค่าความขุ่นในน้ำจากการเปลี่ยนชนิดของ อิเล็กโทรดที่ขั้วแอโนดคือ แสตนเลส, อลูมิเนียม, เหล็ก, BDD ที่ปริมาณ กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์.....	98
91 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดค่าความขุ่นในน้ำจากการเปลี่ยนชนิดของ อิเล็กโทรดที่ขั้วแอโนดคือ แสตนเลส, อลูมิเนียม, เหล็ก, BDD ที่ปริมาณ กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์.....	99
92 ผลการหาปริมาณแบคทีเรียสร้างกรดหลังการบำบัดด้วยวิธี EF โดยใช้ขั้วแอโนด และคาโทดเป็น BDD.....	101
93 ผลการหาปริมาณแบคทีเรีย SRB หลังการบำบัดด้วยวิธี EF โดยใช้ขั้วแอโนด และคาโทดเป็น BDD.....	101

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
94 ลักษณะตะกอนที่ได้จากการบำบัดด้วยวิธี EF เมื่อใช้ BDD เป็นอาโนด และ คาโทด.....	102
95 ผลการวิเคราะห์ตะกอนที่ได้จากการบำบัดด้วยวิธี EF เมื่อใช้ BDD เป็นอาโนด และคาโทดด้วยเครื่อง FT-IR.....	103
96 จำนวนอนุภาคแขวนลอยในน้ำเสียก่อน-หลังบำบัดด้วยวิธี EF โดยให้ กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ เป็นเวลา 4 นาที ใช้ BDD เป็นอาโนดและคาโทด วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Backman Z1.....	104
97 การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟลเดชั่นโดยใช้เหล็กเป็นขั้วอาโนดและคาโทด ให้กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ หลังทำปฏิกิริยา.....	117
98 การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟลเดชั่นโดยใช้เหล็กเป็นขั้วอาโนดและคาโทด ให้กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์และปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 7 วัน.....	117
99 การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟลเดชั่นโดยใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วอาโนดและ คาโทด ให้กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ หลังทำปฏิกิริยา.....	118
100 การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟลเดชั่นโดยใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วอาโนดและ คาโทด ให้กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์และปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 7 วัน...	118
101 การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟลเดชั่นโดยใช้สแตนเลสเป็นขั้วอาโนดและ คาโทด ให้กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ หลังทำปฏิกิริยา.....	119
102 การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟลเดชั่นโดยใช้สแตนเลสเป็นขั้วอาโนดและ คาโทด ให้กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์และปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 7 วัน...	119
103 การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟลเดชั่นโดย BDD เป็นขั้วอาโนดและคาโทด ให้กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ หลังทำปฏิกิริยา.....	120
104 การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟลเดชั่นโดยใช้ BDD เป็นขั้วอาโนดและคาโทด ให้กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์และปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 7 วัน.....	120
105 การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟลเดชั่นโดย เหล็ก เป็นขั้วอาโนดและคาโทด ให้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ หลังทำปฏิกิริยา.....	121

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
106 การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโพลเดชันโดยใช้ เหล็ก เป็นขั้วแอโนดและคาโทด ให้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์และปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 7 วัน.....	121
107 การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโพลเดชันโดย อลูมิเนียม เป็นขั้วแอโนดและ คาโทด ให้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ หลังทำปฏิกิริยา.....	122
108 การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโพลเดชันโดยใช้ อลูมิเนียม เป็นขั้วแอโนดและ คาโทด ให้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์และปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 7 วัน...	122
109 การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโพลเดชันโดย สแตนเลส เป็นขั้วแอโนดและ คาโทด ให้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ หลังทำปฏิกิริยา.....	123
110 การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโพลเดชันโดยใช้ สแตนเลส เป็นขั้วแอโนดและ คาโทด ให้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์และปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 7 วัน...	123
111 การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโพลเดชันโดย BDD 124 เป็นขั้วแอโนดและ คาโทด ให้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ หลังทำปฏิกิริยา.....	124
112 การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโพลเดชันโดยใช้ BDD เป็นขั้วแอโนดและคาโทด ให้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ และปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 7 วัน.....	124

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

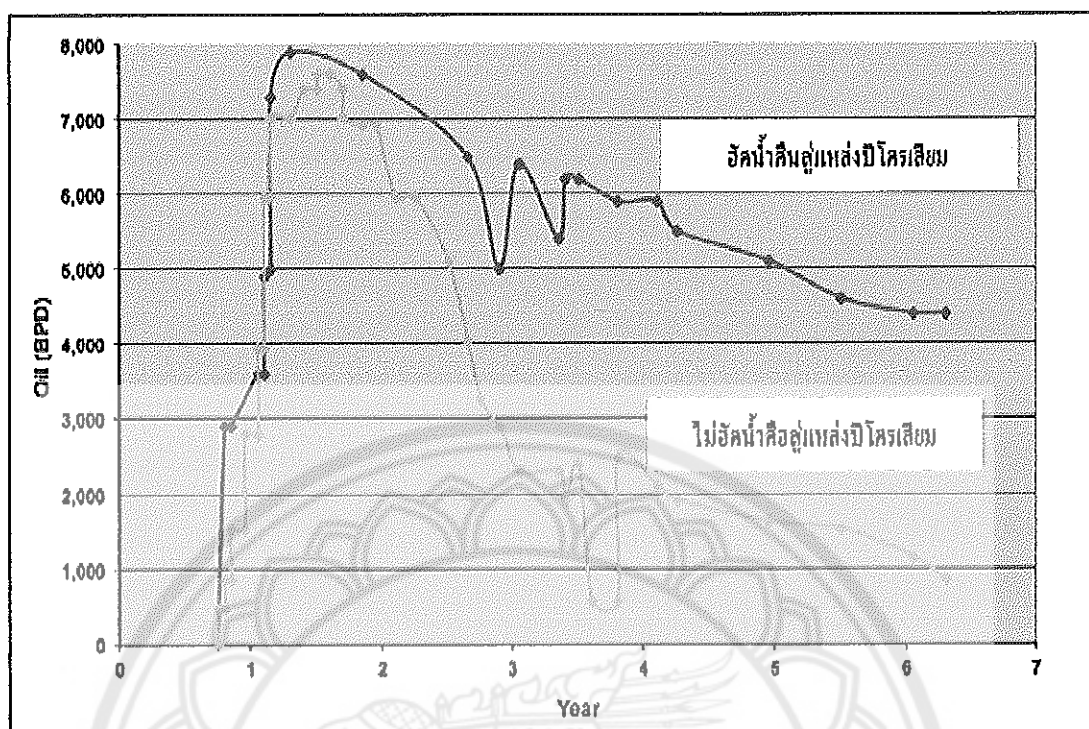
กระบวนการผลิตปิโตรเลียมโดยปกติแล้วจะมีน้ำติดขึ้นมากับปิโตรเลียมด้วย ปริมาณน้ำที่ผลิตได้มักจะแปรผันตามอายุของหลุมที่ผลิต คือในช่วงเริ่มต้นของการผลิต จะยังไม่มีน้ำติดขึ้นมา แต่เมื่อผลิตไปสักระยะหนึ่งจะมีปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น น้ำที่ผลิตขึ้นมานั้นมาจากน้ำที่อาศัยอยู่ในแหล่งกักเก็บเดียวกับปิโตรเลียม

น้ำเหล่านี้เมื่อผลิตขึ้นมาแล้วไม่สามารถปล่อยทิ้งลงสู่สิ่งแวดล้อม เช่น แหล่งน้ำผิวดินตามธรรมชาติได้เนื่องจาก มีสารพิษที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมปนอยู่เช่น คลอไรด์ที่มีปริมาณสูงหรือสารอินทรีย์ จำพวกสารประกอบปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนทั้งที่ละลายในน้ำและแขวนลอย องค์ประกอบของสารปนเปื้อนที่ติดมากับน้ำ (Fakhru'l-Razi Ahmadun, et al., 2009)

ในปัจจุบัน แหล่งสิริกิติ์กักน้ำเสียเหล่านี้โดยการอัดน้ำกลับลงไปยังแหล่งผลิตปิโตรเลียมเดิม โดยไม่มีการปล่อยน้ำเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมเลย การอัดน้ำกลับคืนสู่แหล่งปิโตรเลียมเดิมมีประโยชน์ 2 ประการคือ

1. ไม่ปล่อยสารเคมีที่เป็นพิษสู่สิ่งแวดล้อม
2. เพิ่มศักยภาพในการผลิตปิโตรเลียมเนื่องจากน้ำเหล่านี้จะไปช่วยรักษาความดันใน

แหล่งผลิต



ภาพ 1 การเปรียบเทียบผลระหว่างการอัดน้ำกับไม่อัดน้ำสู่แหล่งปิโตรเลียม

ที่มา: Robinson, D., 2013

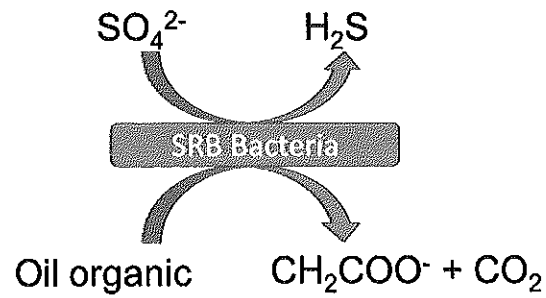
อย่างไรก็ตามคุณสมบัติของน้ำเสียที่สามารถอัดลงสู่แหล่งกักเก็บปิโตรเลียมได้นั้น จะแปรผันไปตามชนิดของความพรุนของชั้นหินในแต่ละแหล่งกักเก็บ ซึ่งจากผลการศึกษาการอัดน้ำของบริษัท "Oil Plus Limited" เมื่อปี 2536 พบว่าขนาดอนุภาคที่ผ่านไปได้สำหรับการอัดน้ำของแหล่งสิริกิติ์มีขนาด 1 ไมครอน อย่างไรก็ตามขนาด 1 ไมครอน เป็นขนาดเล็กมาก ซึ่งต้องใช้เงินลงทุนอย่างมากในการบำบัดน้ำ บริษัทจึงกำหนดค่ามาตรฐานขึ้นใหม่คือ อนุภาคที่ผ่านไปได้ไม่ควรเกิน 5 ไมครอน คุณสมบัติของน้ำเสียของแหล่งน้ำมันสิริกิติ์แสดงในตาราง 1

ตาราง 1 คุณภาพน้ำเสียของแหล่งน้ำมันสิริกิติ์

คุณสมบัติ	ค่าที่วัดได้ในปัจจุบัน (พ.ศ. 2556)	ค่ามาตรฐานของแหล่งน้ำมัน สิริกิติ์
ไขมันละลาย (ppm)	63.7	น้อยกว่า 200 พีพีเอ็ม
คลอไรด์ (mg/l)	8,892	-
พีเอช	7.7	5.0-9.0
เอสอาบี แบบที่เรย์ (จำนวน แบบที่เรย์ต่อ 1 มิลลิลิตร)	10^1 ถึง 10^2	ไม่พบ
อนุภาคที่มีขนาดมากกว่า 5 ไมครอน	89,740	ไม่พบ*

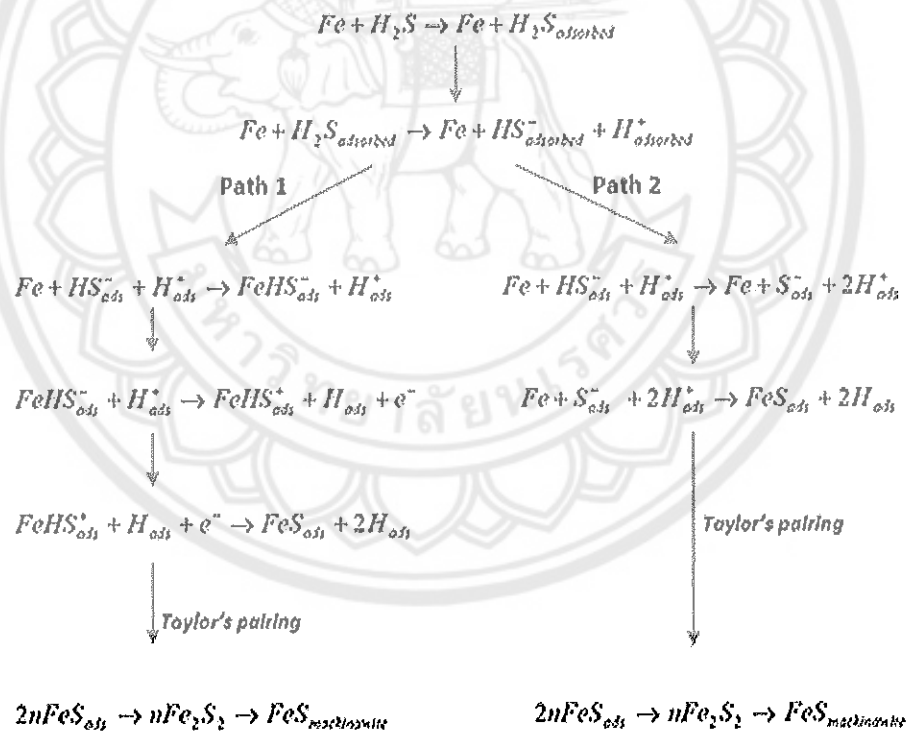
หมายเหตุ: * เป็นค่าที่กำหนดโดยวิศวกรแหล่งกักเก็บปิโตรเลียม (Reservoir Engineer) อย่างไรก็ตามในทางวิศวกรรมอาจจะไม่สามารถสร้างเครื่องมือที่สามารถกำจัดอนุภาคที่มีขนาดมากกว่า 5 ไมครอนได้ทั้งหมด ปริมาณขนาดอนุภาคที่สามารถอนุโลมให้เหลืออยู่หลังบำบัดได้อาจต้องมีการหาจุดคุ้มทุนภายหลัง เนื่องจากการกำจัดอนุภาคออกไปมากจะทำให้เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม

จากค่าที่แสดงดังตาราง 1 พบว่าค่าเอสอาบีแบบที่เรย์ (Patton,C.C.,1995, p.194) และค่าอนุภาคที่มีมากกว่า 5 ไมครอน มีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่กำหนด (ค่าเฉพาะของแหล่งสิริกิติ์) เอสอาบีแบบที่เรย์เป็นแบบที่เรย์ทำให้เกิดการกัดกร่อนโลหะ โดยเมื่อเอสอาบีแบบที่เรย์ได้รับสารอินทรีย์โมเลกุลเล็ก และ ซัลเฟต จะปลดปล่อยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และ อะซิติกแอซิด ดังอธิบายตามภาพ



ภาพ 2 การทำงานของเอสอาร์บีแบคทีเรีย

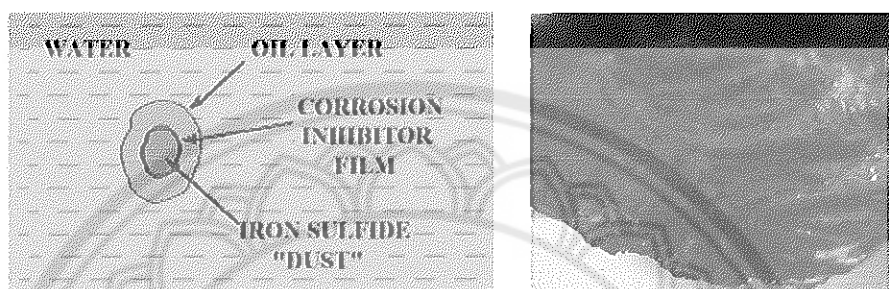
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์หรือก๊าซไฮเน่าที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากัดกร่อนโลหะ เขียนปฏิกิริยาได้ดังนี้



ภาพ 3 การทำปฏิกิริยาระหว่างเหล็กและก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

ที่มา: <http://apac.totalmateria.com>

FeS ที่เกิดขึ้นมักจะไปรวมตัวกับน้ำมันและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตปิโตรเลียม เกิดเป็นอนุภาคนาขนาดเล็กที่เรียกว่า Petroleum Schmoos โดยอนุภาคนี้จะทำให้เกิดการอุดตันใน หลุมทิ้งน้ำ โดยในทางปฏิบัติจะต้องทำการยิง PIG (pressure inspection gauge) เพื่อทำการ กวาดสิ่งสกปรกเหล่านี้ไปสองครั้ง



ภาพ 4 ลักษณะของ Petroleum Schmoos

ที่มา: Reference, T., 2010

อนึ่งนอกจาก FeS แล้วยังมีอนุภาคนาขนาดเล็กอื่นๆ อีกเช่น ตะกั่ว แคดเมียมคาร์บอนเนต แคดเมียมซัลเฟต เป็นต้น ซึ่งปฏิกิริยาเกิดจากการนำน้ำจากแหล่งผลิตที่ต่างกันมารวมกัน ทำให้ เกิดการตกตะกอน

การกำจัด H_2S ให้หมดไปจากระบบเป็นสิ่งที่ยาก เนื่องจากไม่สามารถทำการฆ่าเชื้อ แบคทีเรียได้ทั้งระบบการผลิต อีกทั้งแหล่งผลิตปิโตรเลียมบางแหล่งยังพบ H_2S ได้เองโดยธรรมชาติ การหลีกเลี่ยงการตกตะกอนของตะกั่วต่างๆ จากปัญหาความเข้ากันได้ของน้ำแต่ละแหล่งก็เป็น สิ่งที่ปฏิบัติได้ยาก งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การกำจัดอนุภาคที่เกิดจากการผลิต เพื่อลดปัญหาการ อุดตันในหลุมทิ้งน้ำโดยทดลองหาวิธีการใหม่ๆ คือเทคนิคอิเล็กโตรโฟลเดชั่นซึ่งพบว่ามีศักยภาพใน การลดทั้งปริมาณแบคทีเรีย และอนุภาคแขวนลอย โดยนำมาเปรียบเทียบกับเทคนิคที่ใช้แพร่หลาย ในปัจจุบันคือ อินดิวิจอร์อิเล็กโตรโฟลเดชั่น

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้และปัจจัยสำคัญในการบำบัดน้ำเสียจากการขุดเจาะน้ำมัน (Produced Water) ด้วยวิธีอิเล็กโทรโฟลเดชั่น และวิธีโคแอกกูเลชันร่วมกับอินดิวิจอร์โฟลเดชั่น
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดค่ามลสารต่างๆ ในน้ำเสียจากการขุดเจาะน้ำมัน (Produced Water) โดยวิธีอิเล็กโทรโฟลเดชั่น และวิธีโคแอกกูเลชันร่วมกับอินดิวิจอร์โฟลเดชั่น
3. เพื่อประเมินความเป็นไปได้ทางวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์ ในการสร้างระบบมาใช้จริง

กรอบแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

เทคนิคอินดิวิจอร์ หรือ อินดิวิจอร์แก๊สโฟลเดชั่นเป็นเทคนิคการกำจัดอนุภาคแขวนลอยที่ให้กับอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ซึ่งสามารถบำบัดน้ำปนเปื้อนน้ำมันไปพร้อมกับอนุภาคนขนาดเล็กโดยอาศัยการเกาะติดของฟองก๊าซกับอนุภาคแล้วกอนุภาคต่างๆ ขึ้นสู่ผิวน้ำ ทั้งนี้การเติมสารโคแอกกูแลนต์เอดจะช่วยให้ น้ำที่บำบัดแล้วมีค่าพารามิเตอร์ตามต้องการ โดยสิ่งสกปรกที่ลอยขึ้นมาสามารถกำจัดออกได้ด้วยอุปกรณ์ทางกล อย่างไรก็ตามยังมีเทคนิคใหม่ๆ คือ อิเล็กโทรโฟลเดชั่นที่สามารถบำบัดน้ำปนเปื้อนน้ำมันไปพร้อมกับอนุภาคนขนาดเล็ก เช่นเดียวกัน โดยมีข้อดีคือสามารถ ผลิตออกซิไดซ์เจเนนท์ คือก๊าซคลอรีนซึ่งสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรีย SRB ได้โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมีเพิ่ม อย่างไรก็ตามก๊าซคลอรีนที่มากเกินไปทำให้เกิดการกัดกร่อน ท่อและอุปกรณ์การผลิตที่ทำจากโลหะ อีกทั้งอาจเกิดสารเคมีข้างเคียงจากปฏิกิริยาออกซิเดชั่น งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้วิธีอิเล็กโทรโฟลเดชั่น ต่อการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมปิโตรเลียมโดยเปรียบเทียบกับเทคนิคเดิมคืออินดิวิจอร์โฟลเดชั่น โดยทำการทดลองด้วยอุปกรณ์ตัวต้นแบบ ที่เป็นแบบกะ เพื่อให้สามารถนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ไปใช้ในการออกแบบอุปกรณ์การบำบัดแบบต่อเนื่องได้ในอนาคต

สมมติฐานของการวิจัย

น้ำจากอุตสาหกรรมปิโตรเลียมประกอบไปด้วยอนุภาคแขวนลอยได้แก่ แอสฟัลทีน ตะกั่ว ทราเย เป็นต้น มักถูกห่อหุ้มด้วยน้ำมันชนิดไม่ละลายน้ำ ส่งผลให้อนุภาคเหล่านี้มีค่าความหนาแน่นไม่ต่างจากน้ำ การอัดน้ำที่ยังไม่ได้รับการบำบัดกลับคืนสู่แหล่งกักเก็บ จะทำให้เกิดปัญหาการอุดตันในหลุมทิ้งน้ำ เทคนิคอินดิวิจอร์โฟลเดชั่นเป็นเทคนิคหนึ่งซึ่งใช้ในการบำบัดน้ำเสียอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน อย่างไรก็ตามยังมีเทคนิคโฟลเดชั่นอื่นๆ ที่น่าสนใจคือ อิเล็กโทรโฟลเดชั่น

ที่สามารถทำปฏิกิริยาออกซิเดชันไปพร้อมกับการบำบัด ส่งผลให้มีการกำจัดแบคทีเรียไปพร้อมกับอนุภาคแขวนลอย ซึ่งมีศักยภาพสามารถนำไปพัฒนาเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมได้

ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาคุณภาพของน้ำเสียจากแหล่งน้ำมันสิริกิติ์

1.1 หาปริมาณของแข็งทั้งหมด ของแข็งแขวนลอย ของแข็งละลายน้ำ ของแข็งอินทรีย์ของแข็งอนินทรีย์

1.2 หาค่าพีเอชด้วยเครื่อง พีเอชมิเตอร์

1.3 หาค่าคลอไรด์ด้วยวิธีไทเทรชันกับซิลเวอร์ไนเตรท

1.4 หาค่าของแข็งละลายและค่าการนำไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดค่าการนำกระแสไฟฟ้า

1.5 หาขนาดการกระจายตัวของอนุภาคแขวนลอยด้วยเครื่องวัด particle size distribution

1.6 หาค่าแบคทีเรียเอสอาบีโดยนำไปเพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อ

1.7 หาปริมาณซัลเฟตและซัลไฟด์

1.8 หาค่าไขมันละลายในน้ำ

1.9 หาปริมาณเหล็กทั้งหมด

2. ออกแบบและสร้างถังปฏิกรณ์แบบกะสำหรับเทคนิคอิเล็กโตรโฟลเดชั่น และอินดิวิชแอโรโฟลเดชั่น

3. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของเทคนิคอิเล็กโตรโฟลเดชั่นกับการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีอินดิวิชแอโรโฟลเดชั่นโดยพิจารณาค่า พีเอช, คลอไรด์, ของแข็งทุกชนิด, SRB, ซัลเฟต, ซัลไฟด์, ค่าการนำไฟฟ้า

4. ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบอิเล็กโตรโฟลเดชั่น คือ

4.1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 5, 10, 15, 30 นาที

4.2 ปริมาณกระแสไฟฟ้าคือ 3 แอมแปร์, 5 แอมแปร์ และ 7 แอมแปร์

4.3 ชนิดของอิเล็กโทรด

4.3.1 ละลายเมื่อเกิดปฏิกิริยา คือ เหล็ก และอลูมิเนียม

4.3.2 ไม่ละลายเมื่อเกิดปฏิกิริยา

5. ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบอินดิวิชแอโรโฟลเดชั่น

5.1 อัตราการไหลของก๊าซ

5.2 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา คือ 5, 10, 15, 30 นาที

5.3 สารโคแอกกูแลนต์คือ พอลิเมอร์ พร้อมทั้งหาความเข้มข้นที่เหมาะสม คือ 5 ppm และ 10 ppm

5.4 ประเมินค่าใช้จ่ายในการบำบัดระหว่างอิเล็กโทรโฟลเตชั่นเทียบกับโคแอกกูเลชั่น

5.5 ประเมินความเป็นไปได้ในการสร้างใช้จริง

นิยามศัพท์เฉพาะ

อิเล็กโทรโฟลเตชั่น หมายถึง การบำบัดน้ำเสียโดยการให้กระแสไฟฟ้ากับน้ำเสียเพื่อให้เกิดฟองก๊าซ ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะไปเกาะติดกับสิ่งสกปรกในน้ำ พร้อมกับกวาดอนุภาคอื่นๆ ที่อยู่ด้านบน แล้วพาให้ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ

อินดิวิชแอโรโฟลเตชั่น หมายถึง การบำบัดน้ำเสียโดยการใช้ปั๊มลมหรือแหล่งจ่ายก๊าซ จ่ายลมเข้าสู่หัวฟู่ เพื่อให้เกิดฟองก๊าซขนาดเล็ก ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะไปเกาะติดกับสิ่งสกปรกในน้ำ แล้วพาให้ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ

โคแอกกูเลชั่น หมายถึง ขั้นตอนการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ โดยเมื่อกำแพงพลังงานในทฤษฎี DLVO ถูกกำจัด

ฟลักคูเลชั่น หมายถึง ขั้นตอนการรวมตัวกันของคอลลอยด์

Petroleum Schmoos หมายถึง อนุภาคที่ประกอบไปด้วยของแข็งที่ถูกห่อหุ้มด้วยน้ำมัน

BDD หมายถึง โบรอนโดปไดมอนด์ ใช้เป็นอิเล็กโทรดสำหรับเครื่องอิเล็กโทรโฟลเตชั่น

SS หมายถึง สแตนเลสสตีล ใช้เป็นอิเล็กโทรดสำหรับเครื่องอิเล็กโทรโฟลเตชั่น

FeS หมายถึง เหล็กซัลไฟด์ เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างเหล็กกับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

H₂S หมายถึง ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เกิดจากการทำปฏิกิริยาของเอสอาบีแบคทีเรีย โดยใช้สารตั้งต้นคือน้ำมันและซัลเฟต ในสภาวะไร้อากาศ

SRB แบคทีเรีย หมายถึง แบคทีเรียแอนแอโรบิก ที่สามารถมีชีวิตอยู่ได้ในแหล่งกักเก็บปิโตรเลียมและระบบการผลิตปิโตรเลียม ซึ่งจะใช้น้ำมันเป็นอาหารและหายใจโดยใช้ซัลเฟต โดยจะปล่อยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งสามารถกัดกร่อนโลหะที่เป็นเหล็ก

BPD หมายถึง ปริมาณน้ำมันดิบเป็นบาร์เรลต่อวัน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้องค์ความรู้สำหรับการออกแบบระบบสาธิต เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียของแหล่ง
น้ำมันสิริกิติ์



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

องค์ประกอบของ Produced Water

1. สารอินทรีย์ละลาย ได้แก่ สารอินทรีย์ชนิดมีขั้ว
2. สารอินทรีย์ที่กระจายตัวอยู่ในน้ำ เช่น น้ำมันแขวนลอยหยดเล็กๆ ซึ่งหยดน้ำมันเหล่านี้มักเกิดมาจากการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วน
ตัวอย่างของสารอินทรีย์ทั้งข้อ 1 และข้อ 2 ได้แก่ สารเบนซีน, โทลูอีน, เอทิลเบนซีน, เนฟทาซีน, ฟีนานทรีน, ไดเบนซิไธโอเฟน, พอลิอะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน ซึ่งมักพบสารอินทรีย์แบบกระจายตัวมากกว่าแบบละลายในน้ำ
3. สารอนินทรีย์ที่ละลายน้ำ ได้แก่ สารที่มีประจุบวก(แคตไอออน) เช่น Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , Sr^{2+} , Fe^{2+} และสารที่มีประจุลบ(แอนไอออน) เช่น Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^-
4. โลหะหนัก ซึ่งมักแปรผันไปตามลักษณะทางธรณีวิทยาของแต่ละแหล่งกักเก็บ
5. สารกัมมันตรังสี (NORM, Naturally occurring radioactive materials) ส่วนใหญ่จะเป็นธาตุเรเดียม ซึ่งอยู่ในหมู่ที่ 2 ของตารางธาตุ ซึ่งถือว่าเป็นธาตุหมู่ที่มีมากที่สุดในโลก
6. สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตปิโตรเลียม เช่น สารป้องกันการผุกร่อน สารดักจับไฮโดรเจนซัลไฟด์
7. ของแข็ง เช่น ของแข็งที่อยู่ในแหล่งกักเก็บ ทราาย แวก แอสฟัลทีน
8. แก๊สที่ละลายน้ำได้ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์

ตาราง 2 ค่าเฉลี่ยองค์ประกอบของ Produced Water

พารามิเตอร์	ปริมาณ	โลหะหนัก	ปริมาณ (mg/l)
ความถ่วงจำเพาะ (kg/m^3)	1014-1140	Calcium	13-25800
ความตึงผิว (dynes/cm)	43-78	Sodium	132-97000
TOC (mg/l)	0-1500	Potassium	24-4300
COD (mg/l)	1220	Magnesium	8-6000
TSS (mg/l)	1.2-1000	Iron	<0.1-100

ตาราง 2 (ต่อ)

พารามิเตอร์	ปริมาณ	โลหะหนัก	ปริมาณ (mg/l)
pH	4.3-1000	Aluminum	310-410
Total oil (IR:mg/l)	2-565	Boron	5-95
Volatile (BTX: mg/l)	0.39-35	Barium	1.3-650
Base Neutrals (mg/l)	<140	Cadmium	<0.005-0.2
Total non-volatile oil and grease by GLC (MS) base (µg/l)	275	Chromium	0.02-1.1
Chloride (mg/l)	80-200,000	Copper	<0.002-1.5
Bicarbonate (mg/l)	77-3990	Lithium	3-50
Sulfate (mg/l)	<2-1650	Manganese	<0.004-175
Ammonical nitrogen (mg/l)	10-300	Lead	0.002-8.8
Sulfite (mg/l)	10	Strontium	0.02-1000
Total polar (mg/l)	9.7-600	Titanium	<0.01-0.7
Higher acids (mg/l)	<1-63	Zinc	0.01-35
Phenols (mg/l)	0.009-23	Arsenic	<0.005-0.3
VFA (mg/l)	2-4900	Mercury	<0.001-0.002
		Silver	<0.001-0.15
		Beryllium	<0.001-0.004

ที่มา: P.J.C. Tibbetts, I.T. Buchanan, et al., 1992.

เส้นทางการกระจายตัวและผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อ Produced water ถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม

น้ำที่ติดขึ้นมากับปิโตรเลียมโดยปกติหลังการบำบัดแล้วสามารถทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติเช่น ทะเลได้ ทั้งนี้ค่าปริมาณสารเคมีที่เป็นพิษต้องเป็นไปตามมาตรฐานของแต่ละประเทศกำหนด สารพิษที่สำคัญได้แก่

1. ความเค็ม

น้ำที่มีเกลือละลายอยู่จะเป็นปัญหาสำหรับเกษตรกรรม เนื่องจากความเค็มส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช อย่างไรก็ตามหากแหล่งปิโตรเลียมอยู่ในทะเลจะไม่เกิดปัญหานี้ขึ้น

2. น้ำมันที่กระจายตัวในน้ำ (Emulsion) และละลายอยู่ในน้ำ

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในตอนต้นแล้วปิโตรเลียมมีประกอบเป็นสารอินทรีย์ที่มีพิษต่อสิ่งมีชีวิต อย่างไรก็ตามยังพบสารอินทรีย์ที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต ซึ่งสารเหล่านี้แบคทีเรียสามารถใช้เป็นอาหารได้ ปัญหาที่ตามมาคือค่าบีโอดีจะสูงขึ้น

3. สารเคมีที่ใช้ในการบำบัด

ในกระบวนการผลิตปิโตรเลียม มีสารเคมีเข้ามาเกี่ยวข้องกับหลายชนิด ได้แก่ ดีมัลซิไฟเออร์, ไฮโดรเจนซัลไฟด์, สกาเวนเจอร์, สารป้องกันการกัดกร่อน, สารป้องกันการตะกอน เป็นต้น สารเหล่านี้บางชนิดเป็นสารก่อมะเร็ง โดยเมื่อทิ้งน้ำที่ปนเปื้อนสารเหล่านี้ลงสู่ทะเล สารเหล่านี้จะตกตะกอนไปเป็นตะกอนใต้ทะเล

4. โลหะหนัก

โลหะหนักใน Produced Water จะมีค่ามากกว่าโลหะหนักในน้ำทะเลเสมอ ทั้งนี้การทิ้งโลหะหนักเหล่านี้ลงสู่ทะเล จะไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมในทะเลเนื่องจาก จะถูกเจือจางด้วยน้ำทะเลที่มีมากกว่าอย่างรวดเร็ว ในทางตรงกันข้ามหากปล่อยน้ำนี้ลงสู่แหล่งน้ำจืด จะเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมอย่างยิ่ง

5. สารกัมมันตรังสี

สารกัมมันตรังสีที่พบจะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสภาพทางธรณีวิทยาของแต่ละแหล่ง จากการศึกษาพบว่าปริมาณสารกัมมันตรังสีที่พบมีค่าความเสี่ยงต่อสิ่งมีชีวิตในทะเลที่ต่ำมาก

การจัดการ Produced water

การจัดการ Produced Water ที่ผลิตขึ้นมาได้นั้นมีหลายวิธี โดยวิธีที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีดังนี้

1. การอัดน้ำปนเปื้อนไปยังแหล่งปิโตรเลียมเดิม หรือแหล่งปิโตรเลียมข้างเคียง
2. ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม เช่นทะเล ซึ่งคุณภาพของน้ำเสียที่สามารถปล่อยได้ขึ้นอยู่กับกฎหมายของแต่ละประเทศ
3. นำกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตเช่น การนำมาใช้เป็นน้ำเติมหม้อไอน้ำ
4. ใช้ในการเพาะปลูก หรือเป็นน้ำดื่มสำหรับการปศุสัตว์

อย่างไรก็ตามน้ำที่จะนำไปใช้ประโยชน์ดังที่กล่าวข้างต้นต้องมีการบำบัด หรือควบคุมคุณภาพอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้มั่นใจในคุณภาพก่อนนำไปใช้งาน

จุดประสงค์ของการบำบัด Produced Water

1. กำจัดน้ำมันแขวนลอย (Emulsified)
2. กำจัดน้ำมันละลาย
3. ฆ่าเชื้อโรค
4. กำจัดตะกอนแขวนลอย
5. กำจัดแก๊สละลาย
6. กำจัดเกลือ
7. ปรับความกระด้าง
8. กำจัดสารกัมมันตรังสี

วิธีการบำบัด Produced Water

วิธีการบำบัดแบ่งใหญ่ๆ ได้ 2 วิธี คือ

1. วิธีทางกายภาพ

เช่น ใช้เทคนิคการดูดซับโดยอาศัยตัวกลาง เช่น เอ็กติเวทเตท คาร์บอน, การกรองด้วยสารกรอง, การกรองด้วยเมมเบรน, การปล่อยให้ระเหย เป็นต้น

2. วิธีการบำบัดทางเคมี

เช่น การตกตะกอนด้วยเทคนิคฟล็อกคูเลชัน, การออกซิเดชัน, กระบวนการอิเล็กโทรเคมีคอล, การบำบัดด้วยเทคนิคโฟโตคะตาไลติก, เฟนตัน, โอโซน เป็นต้น

ตาราง 3 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธีในการบำบัด Produced Water

วิธีการบำบัด	คำอธิบาย	ข้อดี	ข้อเสีย	ของเสีย	การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันและก๊าซ
Corrugated plate separator	ใช้สำหรับแยกน้ำมันออกจากน้ำด้วยแรงโน้มถ่วง โดยอาศัยตัวกลาง	ไม่ต้องการพลังงานจากภายนอก, ราคาถูก, สามารถ	ประสิทธิภาพไม่ดีพอที่จะใช้กำจัดอนุภาคที่ละเอียดมากที่	ตะกอนตกสะสมตัวอยู่ที่ก้นของ	ใช้สำหรับแยกน้ำมันจากอิมัลชัน หรือน้ำที่มีน้ำมันมากๆ

ตาราง 3 (ต่อ)

วิธีการบำบัด	คำอธิบาย	ข้อดี	ข้อเสีย	ของเสีย	การประยุกต์ใช้ ในอุตสาหกรรม น้ำมันและก๊าซ
	การสร้างฟลักค ด้วย corrugated plates	กำจัดอนุภาค แขวนลอยได้, ไม่ มีอุปกรณ์ เคลื่อนที่, ทนทาน	ต้องอาศัยเวลา ในการ ตกตะกอนมาก	อุปกรณ์	ที่นิยมนำมา ผ่านเครื่องมือนี้ คือน้ำ produced water จาก reservoir ชนิด water drive และ การผลิต น้ำมันโดยใช้ เทคนิค water flood น้ำอาจมี ปริมาณน้ำมัน เกิน 1000 มิลลิกรัมต่อ ลิตร
centrifuge	ใช้สำหรับแยก น้ำมันออกจาก น้ำด้วยแรง เหวี่ยง ที่สร้าง ขึ้นโดยการหมุน	มีประสิทธิภาพดี ในการแยกน้ำมัน ที่มีขนาดเล็ก ใช้ เวลาในการแยก น้อย และใช้กับ น้ำปริมาณมากๆ ได้	ใช้พลังงานใน การเหวี่ยง ราคาซ่อมบำรุง แพง	ตะกอน อนุภาค แขวน ลอย	
hydrocyclone	แยกน้ำมันด้วย แรงเหวี่ยงที่เกิด จากการเพิ่ม แรงดัน	อุปกรณ์ขนาดเล็ก ประสิทธิภาพสูง บำบัดได้อนุภาค น้ำมันขนาดเล็ก	ใช้พลังงานใน การเพิ่มแรงดัน ไม่มีการแยก ของแข็ง อาจ เกิดการอุดตัน ราคาซ่อมบำรุง		

ตาราง 3 (ต่อ)

วิธีการบำบัด	คำอธิบาย	ข้อดี	ข้อเสีย	ของเสีย	การประยุกต์ใช้ ในอุตสาหกรรม น้ำมันและก๊าซ
gas flotation	อนุภาคของ น้ำมันยึดติดกับ ฟองก๊าซแล้ว ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ	ไม่มีอุปกรณ์ เคลื่อนที่ ประสิทธิภาพสูง ใช้งานง่าย ทนทาน	สูง ให้ปริมาณก๊าซ มาก ใช้เวลาใน การแยก ปริมาณ ของเหลวที่ต้อง ตักออก	ตักออก	
Extraction	กำจัดน้ำมันที่ ละลายในน้ำ ด้วยตัวทำ ละลายอินทรีย์	ไม่ต้องการ พลังงานจาก ภายนอก, ใช้งาน ง่าย, ใช้กำจัด น้ำมันที่ละลายใน น้ำ	ใช้ตัวทำละลาย , ต้องการการ สกัดแยก, นำ ตัวทำละลายมา ใช้ใหม่,	เกิดขยะ ตัวทำ ละลาย อินทรีย์	ใช้สำหรับแยก น้ำมันที่ละลาย ในน้ำปริมาณ ต่ำ (<1000 มิลลิกรัมต่อ ลิตร) ใช้บำบัด น้ำเสียก่อนจะ เข้าเมมเบรน
Ozone	โอโซนเป็นสาร ออกซิไดซ์ที่แรง ใช้งานง่าย ให้ ประสิทธิภาพดี ในการบำบัด สารที่ละลายใน น้ำ และกำจัด ออกโดยการ ตกตะกอน	ใช้งานง่าย มี ประสิทธิภาพใน การบำบัด เบื้องต้น	ต้องมีอุปกรณ์ ปล่อยโอโซน ต้องมี กระบวนการ แยกและ ตกตะกอน ผลิตภัณฑ์ พลอยได้คือก๊าซ คาร์บอน ไดออกไซด์	ตะกอน เหลว	

ตาราง 3 (ต่อ)

วิธีการบำบัด	คำอธิบาย	ข้อดี	ข้อเสีย	ของเสีย	การประยุกต์ใช้ ในอุตสาหกรรม น้ำมันและก๊าซ
Adsorption	อาศัยตัวกลางที่มีรูพรุนสูงในการดูดซับ	มีราคาถูก ประสิทธิภาพดี	ใช้เวลาในการบำบัดนาน ความสามารถในการบำบัดจะลดลงเมื่ออัตราการใช้เพิ่มขึ้น	ของเสียจากตัวกลางดูดซับที่ใช้แล้ว	
Lime softening	เติมปูนขาวเพื่อกำจัดคาร์บอเนตไบคาร์บอเนตและความกระด้าง	ราคาถูก	ต้องการบำบัดอีกครั้ง	เกิดขยะจากการใช้สารเคมี	ใช้พลังงานน้อย ไม่ต้องการการบำบัดเบื้องต้นซึ่งแตกต่างจากการใช้เมมเบรนเหมาะกับน้ำเสียที่มี TDS ระหว่าง 1000 ถึง 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
Ion-Exchange	ใช้กำจัดไอออนต่างๆ ออกจากน้ำเสีย	ใช้พลังงานต่ำ มีประสิทธิภาพสูง	ต้องมี pre-post treatment เพื่อให้การบำบัดดีขึ้น	นำสารกลับมาใช้ใหม่ได้	
Rapid spray evaporation	ฉีดน้ำด้วยความเร็วสูงให้สัมผัสกับอากาศร้อนเพื่อให้น้ำระเหย	ได้น้ำที่สะอาดระบบมีประสิทธิภาพสูง	ใช้พลังงานสูงต้องกำจัดของแข็งที่เกิดขึ้น	เกิดกากของแข็ง	กากของแข็งที่ได้อาจมีน้ำมันปนต้องทำการบำบัดต่อ

ตาราง 3 (ต่อ)

วิธีการบำบัด	คำอธิบาย	ข้อดี	ข้อเสีย	ของเสีย	การประยุกต์ใช้ ในอุตสาหกรรม น้ำมันและก๊าซ
Freeze-thaw evaporation	อาศัยหลักการ ทางธรรมชาติ ทำให้น้ำแข็ง แล้วปล่อยให้ ละลาย	ไม่ใช้พลังงาน เป็นกระบวนการ ทางธรรมชาติ	ประสิทธิภาพ ต่ำ ใช้ ระยะเวลานาน		
Microfiltration/ Ultrafiltration/ Reverse osmosis	ใช้การกรองด้วย เมมเบรนเพื่อ กำจัดอนุภาค ระดับไมครอน	ได้น้ำสะอาด ปริมาณมาก	ใช้พลังงานสูง	ของเสีย เข้มข้นที่ ได้จาก การ back wash	ใช้บำบัดน้ำมัน จุลชีพ สารอินทรีย์ ละลาย เกลือ โดยสามารถ เลือกชนิดของ เมมเบรนที่ เหมาะสมได้
Activated sludge	อาศัยการย่อย สลายด้วยจุล ชีพ	ราคาถูก เป็น เทคโนโลยีสะอาด	ใช้พื้นที่มาก ต้องการ ปริมาณ ออกซิเจน	ตะกอน จากการ บำบัด	ใช้กำจัด TSS แอมโมเนีย โบรอน โลหะ หนัก

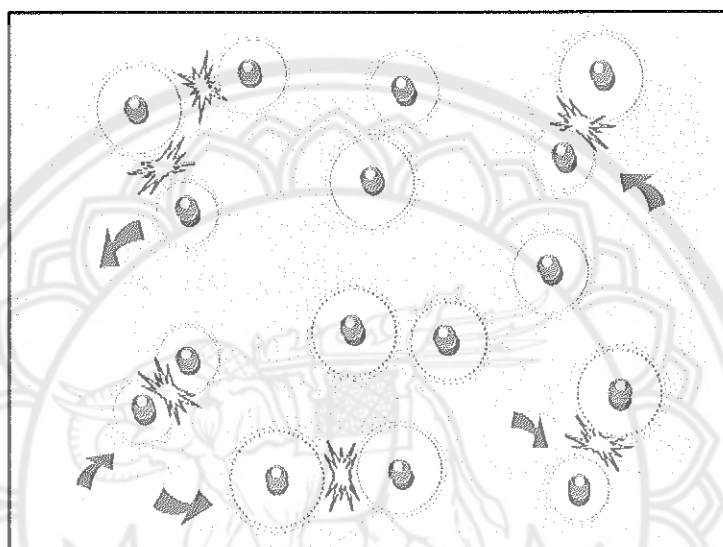
ที่มา: Fakhru'l-Razi Ahmadun, et al., 2009.

คอลลอยด์ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม

น้ำเสียในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมมีอนุภาคแขวนลอยตั้งแต่ระดับไมครอนขึ้นไปจนถึงเป็นแผ่นสเกลขนาดใหญ่ น้ำเสียเหล่านี้จึงประกอบไปด้วยอนุภาคคอลลอยด์ การบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมนี้จึงมีความจำเป็นต้องการเติมสารโคแอกกูแลนต์เอ็ด ซึ่งสามารถช่วยทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ และเมื่อใช้ร่วมกับเทคนิคโฟลเตชันจะสามารถช่วยในการบำบัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ คุณสมบัติของคอลลอยด์และวิธีการบำบัดแสดงในหัวข้อถัดไป

คอลลอยด์

อนุภาคที่มีขนาดระหว่าง 0.01 ถึง 100 ไมครอน การตกตะกอนอนุภาคเหล่านี้จะใช้เวลานานมาก เนื่องจากแต่ละอนุภาคมีประจุไฟฟ้าของตัวเอง (ในธรรมชาติมักเป็นประจุลบ) ประจุไฟฟ้าจะผลักกันไปมาระหว่างอนุภาคเป็นเหตุให้อนุภาคไม่เกิดการตกตะกอนลงมา ในทางตรงกันข้ามหากประจุเหล่านี้ถูกกำจัดไปคอลลอยด์จะเกิดการรวมตัวและเกิดการตกตะกอนลงมา



ภาพ 5 การชนกันไปมาของอนุภาคคอลลอยด์

ที่มา: Zeta-meter, Inc., 1993

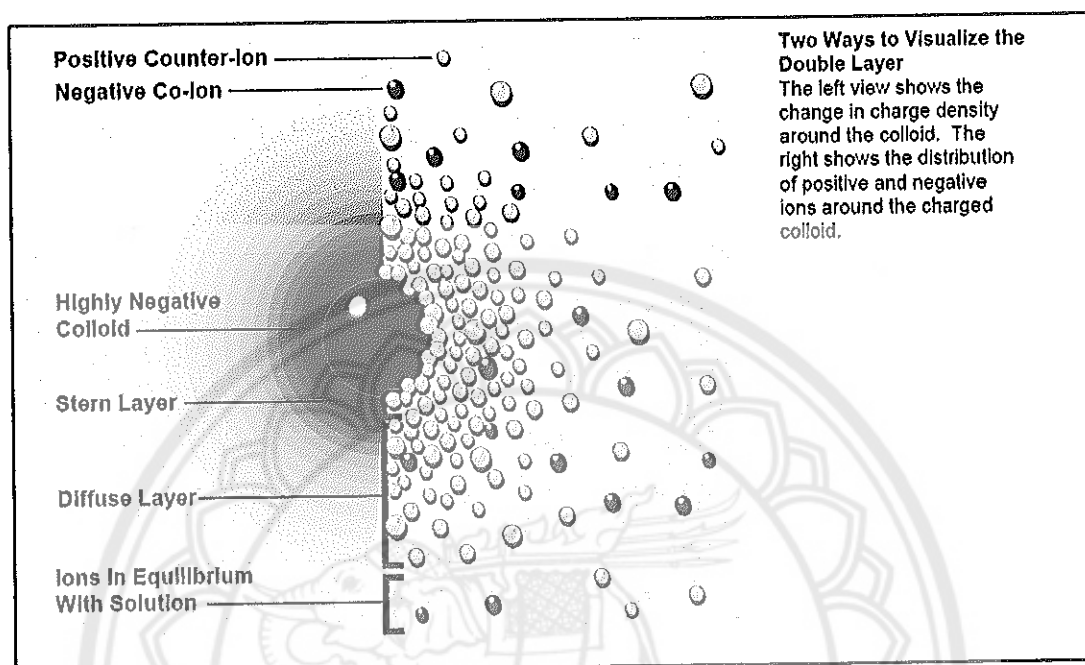
แรงผลัทางไฟฟ้าในระดับไมครอน (Microscopic Electrical Forces)

ทฤษฎี "ผนังสองชั้น" (The Double Layer)

1. Stern Layer อนุภาคคอลลอยด์ในธรรมชาติมักมีประจุลบ และมีขนาดใหญ่กว่าโมเลกุลของไอออนในสารละลาย อนุภาคเหล่านี้จึงมีแรงดึงดูดอนุภาคประจุบวกที่มาก ประจุบวกในสารละลายจะถูกดูดติดแน่นด้วยแรงทางไฟฟ้าเกิดเป็นผนังชั้นแรก ที่เรียกว่า "Stern Layer" เมื่อสังเกตจากภาพจะพบว่า Stern Layer ต้องมีประจุตรงข้ามกับอนุภาคคอลลอยด์เสมอ เรียกประจุบวกที่ล้อมรอบ คอลลอยด์ว่า "counter-ions"

2. Diffuse Layer บริเวณที่ถัดจาก "Stern Layer" ออกมาคือบริเวณที่ไอออนยังได้รับแรงดึงดูดทางไฟฟ้าจากอนุภาคคอลลอยด์ แต่ไม่มากเท่า "Stern Layer" เป็นบริเวณที่จะเริ่มพบไอออนลบ (Negative Co-Ion) บ้าง แต่ไม่มาก เกิดเป็นผนังชั้นที่สองที่เรียกว่า "Diffuse Layer"

บริเวณที่ห่างจาก Diffuse Layer จะเป็น บริเวณของสารละลายปกติ ที่ไม่ได้รับอิทธิพลของ คอลลอยด์



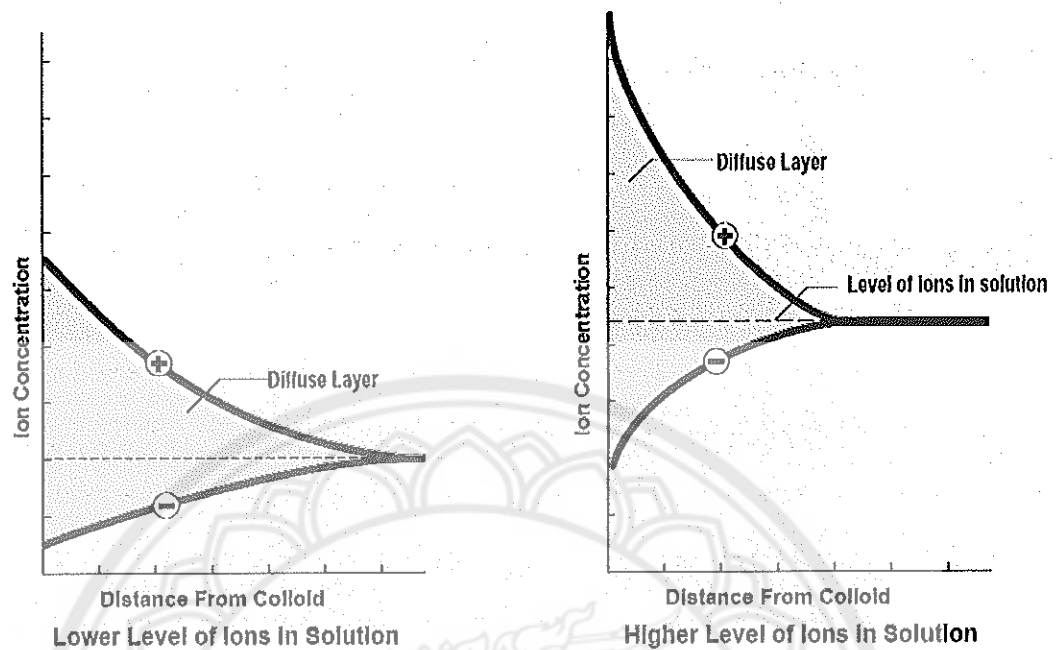
ภาพ 6 ลักษณะของผนังสองชั้นของคอลลอยด์

ความหนาของ “ผนังสองชั้น”

ความหนาของผนังทั้งสองชั้นอยู่กับ ประจุบวก หรือ counter ion ที่ทำให้คอลลอยด์เป็น กลางทางไฟฟ้า ปัจจัยที่มีผลต่อความหนาแบ่งได้เป็นสองประเภทคือ

1. ความเข้มข้นของไอออนในสารละลาย ถ้ามีประจุบวกในสารละลายมาก จะทำให้ ความหนาของผนังบางลง ในทางตรงกันข้ามถ้ามีประจุบวกในสารละลายน้อย ก็จะทำให้ความหนา ของผนังเพิ่มขึ้น

2. ชนิดของประจุบวก โดยประจุบวกที่มีเวเลนซ์มากจะมีผลต่อความหนามากกว่า ประจุ บวกที่มีเวเลนซ์น้อย ตัวอย่างเช่น อลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) จะมีผลในการลดความหนามากกว่า โซเดียมไอออน (Na^+) ผนังที่บางลงเนื่องจากมีประจุบวกมาก เป็นการทำลายเสถียรภาพของ คอลลอยด์อย่างหนึ่งที่เรียกว่า “การอัดผนังสองชั้น”(Double layer compression)

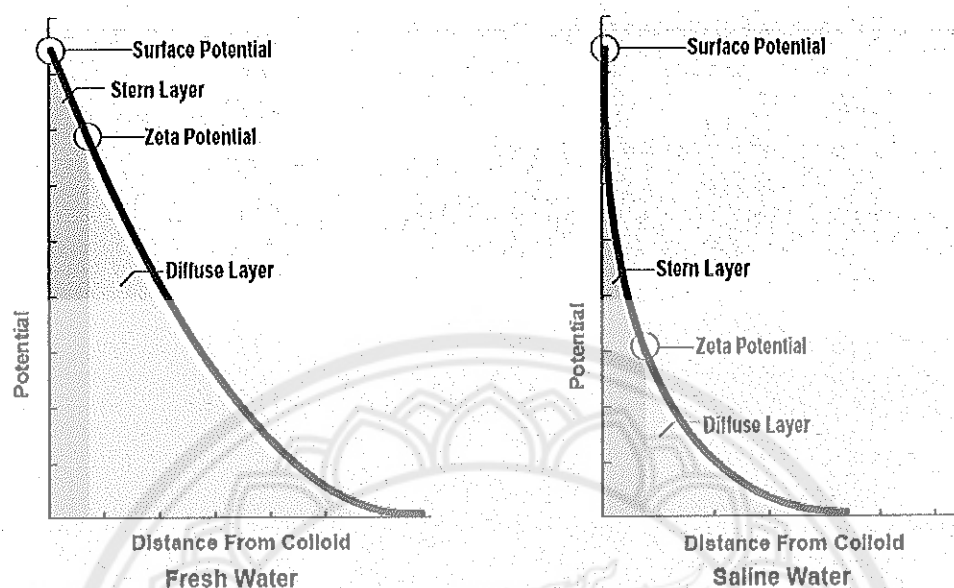


Variation of Ion Density in the Diffuse Layer
Increasing the level of ions in solution reduces the thickness of the diffuse layer. The shaded area represents the net charge density.

ภาพ 7 ความหนาของผนังคอลลอยด์ตามปริมาณไอออนในสารละลาย

ศักย์ซีต้า (Zeta Potential)

ค่าศักย์ซีต้า หมายถึง ค่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่าง Stern Layer และ Diffuse Layer ค่าศักย์ซีต้าสามารถวัดได้ด้วยเครื่องมือพิเศษ และเนื่องจากไม่สามารถวัดค่า surface potential ได้โดยตรง จึงใช้ค่าศักย์ซีต้าเป็นตัวแทน แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงผลักระหว่างคอลลอยด์



ภาพ 8 เปรียบเทียบค่าศักย์ Zeta ระหว่างน้ำจืดและน้ำทะเล

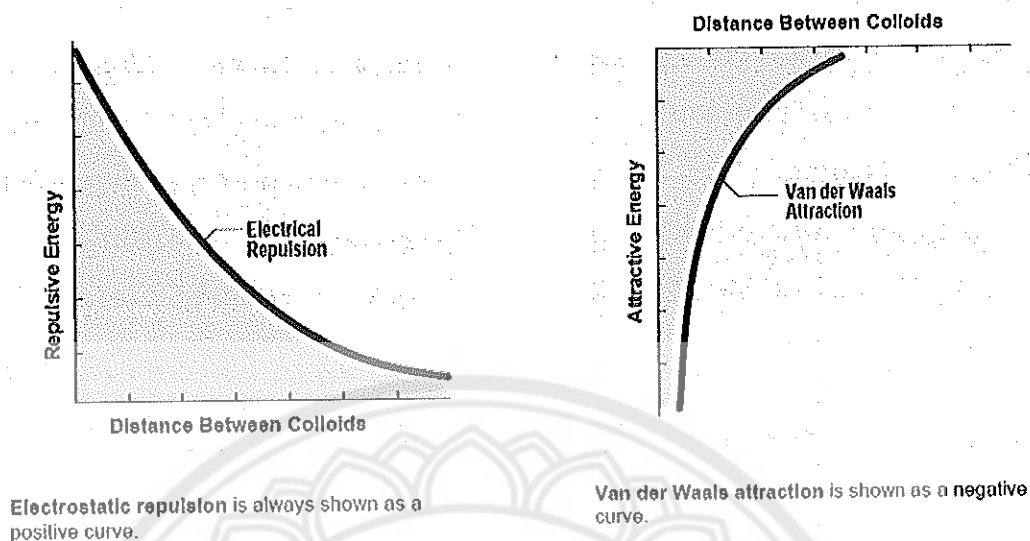
จากภาพด้านบนเมื่อคอลลอยด์ชนิดเดียวกันแต่อยู่ในความเข้มข้นไอออนที่ต่างกันจะพบว่าน้ำจืด (ซ้าย) มีค่าศักย์ที่ต่ำกว่าสูงกว่่าน้ำทะเล (ขวา) ทั้งนี้เนื่องจากการเกิด double layer compression

สมดุลแรงกระทำระหว่างคอลลอยด์

ทฤษฎี DLVO (ชื่อของ Derjaguin, Landau, Vervy และ Overbeek) ใช้สำหรับอธิบายว่าอนุภาคคอลลอยด์การกระทำซึ่งกันและกันอย่างไร โดยมีแรงที่เกี่ยวข้อง 2 แรงคือ แรงทางไฟฟ้าสถิตย์ และแรงแวนเดอร์วาล

1. แรงผลักทางไฟฟ้าสถิตย์

เมื่อคอลลอยด์สองอนุภาคเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันคอลลอยด์ที่มีประจุชนิดเดียวกันจะมีแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ผลักให้อนุภาคทั้งสองออกห่างกัน ภาพ 9 แสดงจำนวนแรงที่ใช้ในการเอาชนะแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ โดยจุดสูงสุดของกราฟคือ ค่าศักย์ที่ผิวของอนุภาค



ภาพ 9 ค่าการผลักกันทางไฟฟ้า(ซ้าย) และค่าแรงแวลเดออร์วาล (ขวา)

ที่มา: Zeta-meter, Inc., 1993.

2. แรงแวลเดออร์วาล หรือแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล

เมื่อโมเลกุลของคอลลอยด์สองโมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหากันจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลขึ้นที่เรียกว่าแรงแวลเดออร์วาล แรงดึงดูดนี้จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อโมเลกุลเข้าใกล้กัน โดยคอลลอยด์ที่สามารถรวมตัวกันเป็นก้อน แรงแวลเดออร์วาลจะเท่ากับผลรวมของแรงทั้งหมด

กำแพงพลังงาน (Energy Barrier)

ทฤษฎี DLVO ได้รวมแรงแวลเดออร์วาลและแรงผลักทางไฟฟ้าสถิตเข้าด้วยกันเพื่อใช้อธิบายว่าคอลลอยด์นั้นจะตกตะกอนหรือไม่ เมื่อรวมกราฟแรงแวลเดออร์วาลกับแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตเข้าหากัน จะได้กราฟแรงกระทำระหว่างโมเลกุลขึ้นมาเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$W(D) = W(D)_A + W(D)_R$$

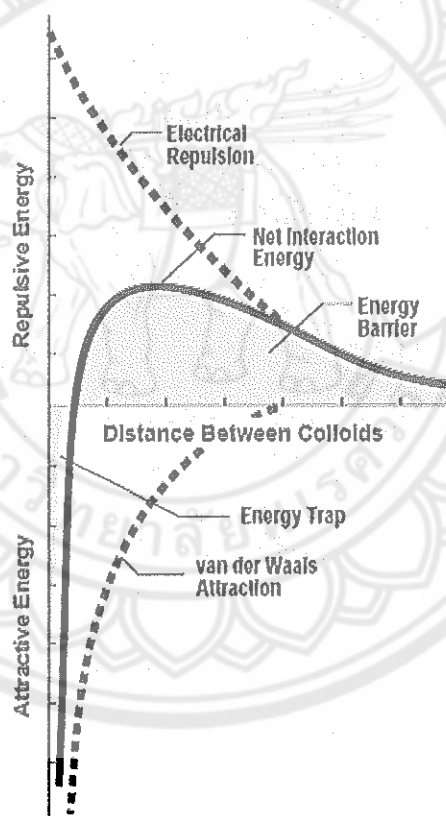
เมื่อกำหนดให้

$W(D)_A$ คือ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลด้วยแรงแวลเดออร์วาล

$W(D)_R$ คือ แรงผลักทางไฟฟ้าสถิต

$W(D)$ คือ พลังงานรวม

จากภาพ 10 แสดงกราฟแรงกระทำระหว่างโมเลกุลตามระยะทางระหว่างคอลลอยด์ กราฟเส้นที่ขยับตัวสูงขึ้นเหนือแกน X แสดงความสามารถในการผลักกันระหว่างโมเลกุลของคอลลอยด์ พื้นที่ใต้กราฟบริเวณด้านบนบนแกน x คือ "กำแพงพลังงาน" โมเลกุลของคอลลอยด์ที่มีพลังงานมากพอจะสามารถข้ามกำแพงพลังงานและตกตะกอนได้ บริเวณใต้กราฟที่อยู่ใต้แกน X แสดงบริเวณของ "กับดักพลังงาน (Energy Trap)" เมื่อโมเลกุลเข้ามาอยู่ในบริเวณนี้จะถูกดึงดูดให้ติดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาล



Interaction

The net interaction curve is formed by subtracting the attraction curve from the repulsion curve.

ภาพ 10 ผลรวมระหว่างแรงทางไฟฟ้าสถิตและแรงแวนเดอร์วาล

การลดขนาดกำแพงพลังงาน (Lowering the Energy Barrier)

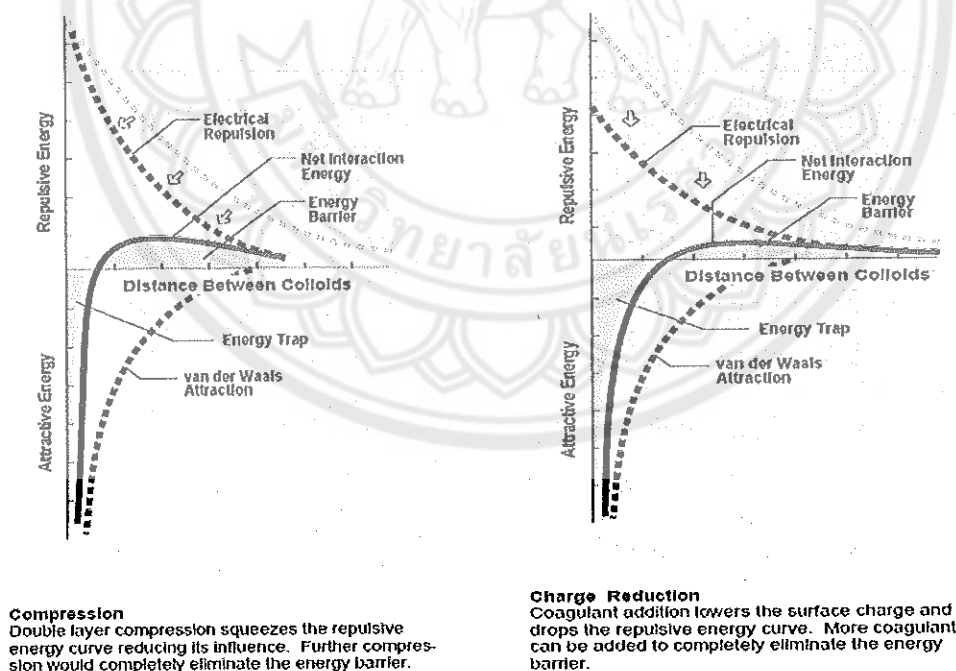
วิธีการตกตะกอนคอลลอยด์อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดคือการลดหรือกำจัดกำแพงพลังงานออกไปมี 2 วิธีคือ

1. การลดขนาดของชั้นกระจาย

วิธีการลดขนาดของชั้นกระจายหรือ "Salting Out" เกี่ยวข้องกับการเติมเกลือลงในสารละลาย เมื่อความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้นชั้นกระจายจะถูกกดให้เล็กลง จนเมื่อถึงระดับที่กำแพงพลังงานหายไป คอลลอยด์จะตกตะกอนอย่างรวดเร็วด้วยแรงดึงดูดระหว่างอนุภาค อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ไม่เป็นที่นิยมในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

2. การลดประจุที่ผิวคอลลอยด์

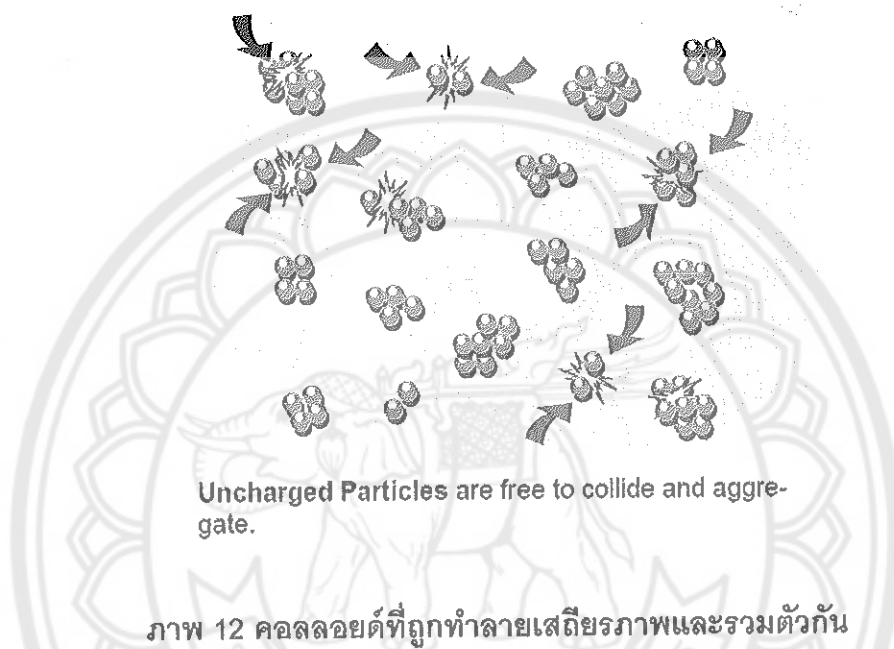
การลดประจุที่ผิวคอลลอยด์สามารถทำได้โดยเติมสารที่เรียกว่า "โคแอกกูแลนต์" เมื่อประจุที่ผิวคอลลอยด์ลดลงจะทำให้ ค่าศักย์ซีต้า ลดลง ซึ่งเราสามารถหาค่าศักย์ซีต้าในการติดตามการลดประจุที่ผิวคอลลอยด์ ค่าศักย์ซีต้าไม่จำเป็นต้องมีค่าเป็นศูนย์ แต่ต้องมีค่าน้อยที่สุดเพื่อลด "กำแพงพลังงาน" ลง



ภาพ 11 การลดขนาดของชั้นกระจาย(ซ้าย) และ การลดประจุที่ผิวคอลลอยด์ (ขวา)

กระบวนการโคแอกกูเลชัน-ฟลอคคูเลชัน

เมื่อประจุไฟฟ้าที่อยู่ในสภาพสมดุลถูกทำลายเสียสภาพด้วยกลไกต่างๆที่จะพูดถึงต่อไป อนุภาคทั้งหลายสามารถรวมตัวกันแล้ว แล้วตกตะกอน เรียกขั้นตอนที่ทำให้เกิดการตกตะกอนนี้ว่า "โคแอกกูเลชัน-ฟลอคคูเลชัน" เรียกสารเคมีที่ทำให้เกิดการตกตะกอนว่า "โคแอกกูเลนต์ เอจ"



การทำลายเสียสภาพคอลลอยด์

การทำลายเสียสภาพคอลลอยด์ แบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทคือ

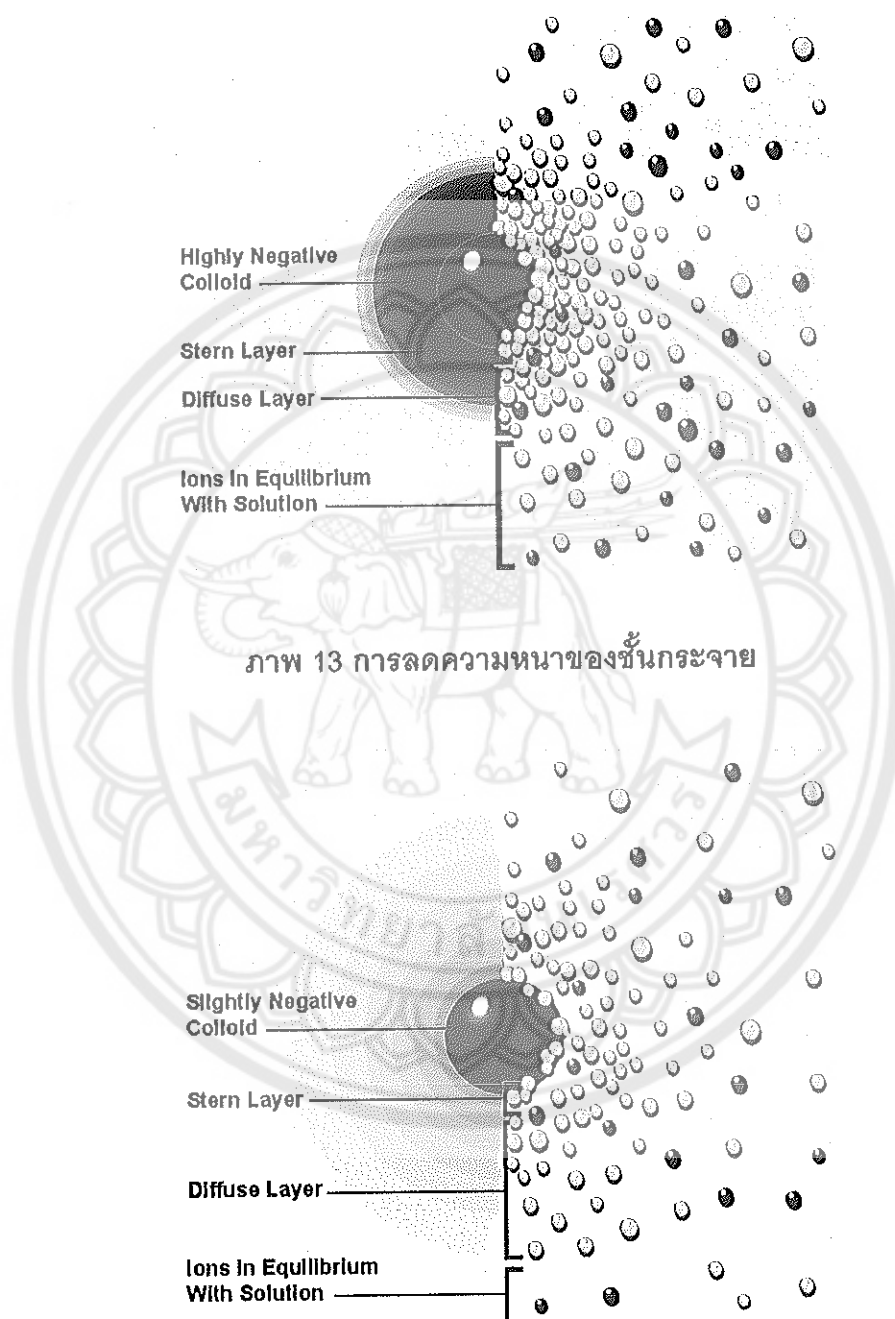
1. การลดความหนาของชั้นกระจาย (Double Layer compression) หมายถึงการเพิ่มปริมาณอิเล็กโทรไลต์เช่นเกลือโซเดียมคลอไรด์ เพื่อให้เกิดการลดลงของประจุชั้นนอกสุด วิธีการนี้มักถูกเรียกว่า "salting out"

2. การดูดติดและการทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาค (Charge Neutralization) หมายถึงการเติมสารโคแอกกูเลนต์อนินทรีย์เช่น สารส้ม และ Cationic polymers เพื่อให้เกิดการทำลายกำแพงพลังงาน DLVO

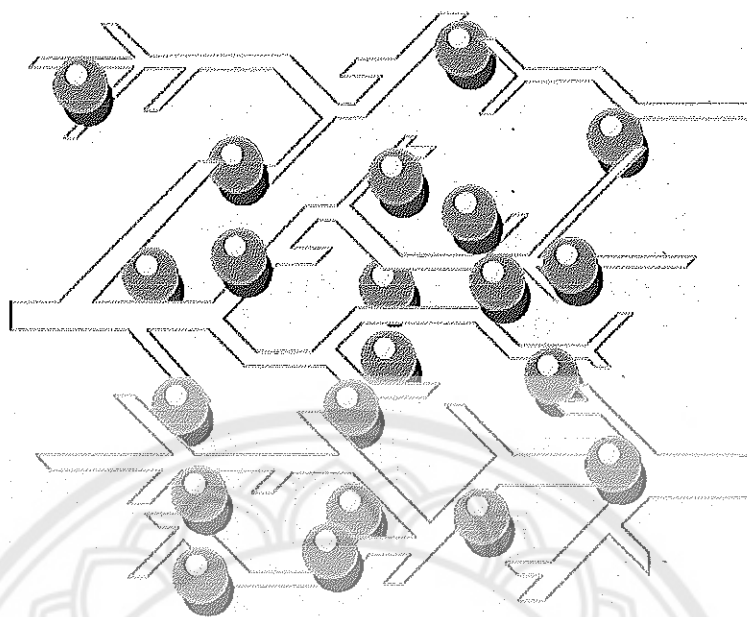
3. การใช้สารอินทรีย์โพลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ (bridging) หมายถึงการใช้โพลิเมอร์ที่เป็นไฟเบอร์ไปยึดเกาะจับอนุภาคคอลลอยด์

4. การจับอนุภาคคอลลอยด์ไว้ในสารประกอบที่สร้างขึ้น (Colloid entrapment) หมายถึงการใช้ coagulant ปริมาณมาก ปกติมักใช้สารส้มหรือเกลือของเหล็ก ซึ่งจะตกตะกอนและ

กวาดอนุภาคคอลลอยด์ให้ตกตะกอนไปด้วย วิธีการนี้มักถูกเรียกว่า "sweep floc"



ภาพ 14 การดูดติดและทำลายประจุ



ภาพ 15 การใช้สารอินทรีย์โพลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์



ภาพ 16 การจับอนุภาคคอลลอยด์ไว้ในสารประกอบที่สร้างขึ้น

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำเสีย

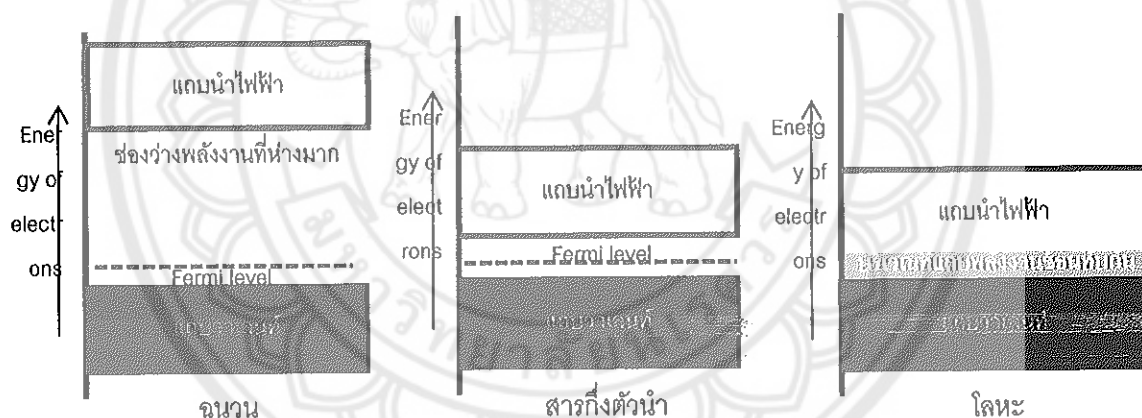
1. ทฤษฎีแถบ (Carl R. Nave, 2012)

วิธีการหนึ่งในการอธิบายความแตกต่างของสารทั้งสามชนิดคือ 1) จนวน 2) สารกึ่งตัวนำ 3) โลหะ คือการอธิบายด้วยทฤษฎีแถบ โดยทฤษฎีแถบอาศัยการอธิบายความแตกต่างของสารทั้งสามชนิดด้วยระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่อยู่ในสารชนิดนั้นๆ แถบต่างๆ ในทฤษฎีแถบมีดังนี้

1.1 แถบวาเลนซ์ หมายถึงระดับพลังงานปกติของอิเล็กตรอนในอะตอม

1.2 แถบนำไฟฟ้า หมายถึงระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนจะทำให้เกิดการนำไฟฟ้า หรืออาจอธิบายได้ว่าหากอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ เมื่อได้รับพลังงานจากภายนอกในปริมาณที่มากพอจะขึ้นไปสู่แถบนำไฟฟ้าได้ สารนั้นจะแสดงคุณสมบัตินำไฟฟ้าออกมา

1.3 ระดับเฟอร์มี หมายถึง ระดับพลังงานสูงสุดที่สามารถพบอิเล็กตรอนได้ โดยอ้างอิงที่อุณหภูมิสัมบูรณ์ 0 องศาเคลวิน



ภาพ 17 กราฟแสดงสถานะความหนาแน่นของโลหะ จนวน และสารกึ่งตัวนำ

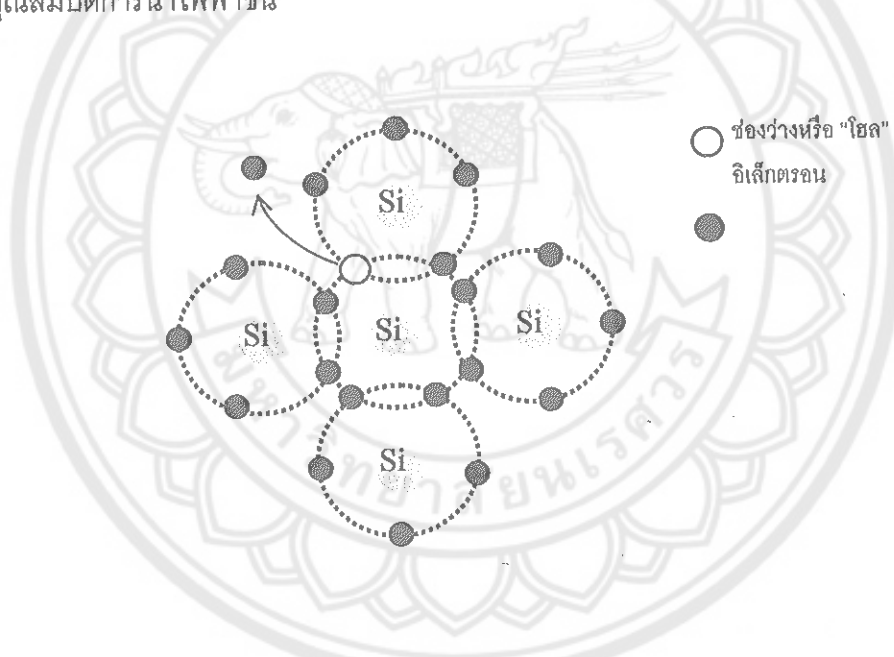
จากภาพ 17 อธิบายได้ดังนี้

1. จนวน เป็นสารที่ไม่นำไฟฟ้าเนื่องจากแถบวาเลนซ์และแถบนำไฟฟ้ามีระยะห่างกันมาก อิเล็กตรอนไม่สามารถรับพลังงานจากภายนอกแล้วกระโดดขึ้นไปสู่แถบนำไฟฟ้าได้
2. สารกึ่งตัวนำ เป็นสารที่สามารถนำไฟฟ้าได้ก็ต่อเมื่ออิเล็กตรอนรับพลังงานจากภายนอกเข้ามาแล้วกระโดดเข้าไปสู่แถบนำไฟฟ้า ทั้งนี้สารกึ่งตัวนำจะนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

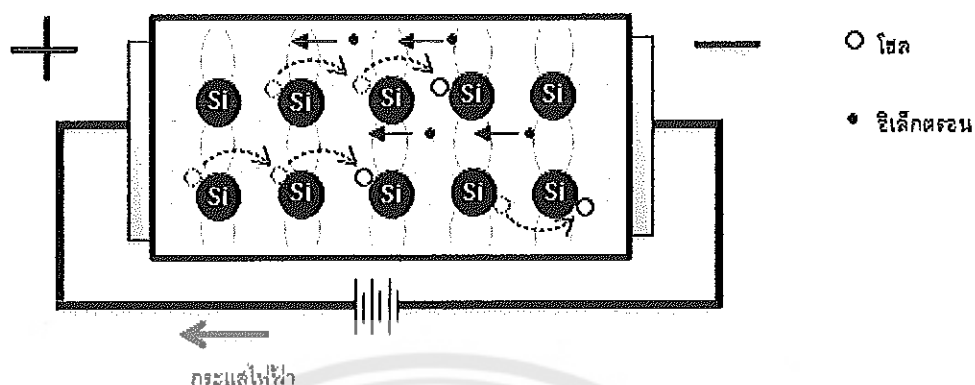
3. โลหะ เป็นสารที่สามารถนำไฟฟ้าได้ทุกอุณหภูมิเนื่องจากมีแถบเวเลนซ์ซ้อนทับกับแถบนำไฟฟ้า อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้ขึ้นพบว่าโลหะมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้น้อยลง คุณสมบัตินี้เป็นคุณสมบัติตรงข้ามกับสารกึ่งตัวนำ

2. สารกึ่งตัวนำ (Carl R. Nave, 2012)

สารกึ่งตัวนำคือสารที่สามารถแสดงคุณสมบัติได้ทั้งนำไฟฟ้าและไม่นำไฟฟ้า สิ่งที่ทำให้สารกึ่งตัวนำมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับ การให้หรือลดพลังงาน เช่น เมื่อนำสารกึ่งตัวนำไปไว้ที่อุณหภูมิสัมบูรณ์ 0 องศาเคลวิน สารกึ่งตัวนำจะไม่นำไฟฟ้า แต่เมื่อมีการให้พลังงาน โดยการเพิ่มอุณหภูมิ สารกึ่งตัวนำจะแสดงคุณสมบัติการนำไฟฟ้าขึ้นมา สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากอิเล็กตรอนที่สร้างพันธะภายในสารกึ่งตัวนำสามารถหลุดออกมาจากผลึกได้ เกิดเป็นช่องว่างที่เรียกว่า "โฮล" โดยโฮลแต่ละโฮลจะอนุญาตให้อิเล็กตรอนข้างเคียงไหลเข้ามาได้ ส่งผลให้เกิดคุณสมบัติการนำไฟฟ้าขึ้น



ภาพ 18 การเกิดโฮลขึ้นในผลึกของซิลิกอน



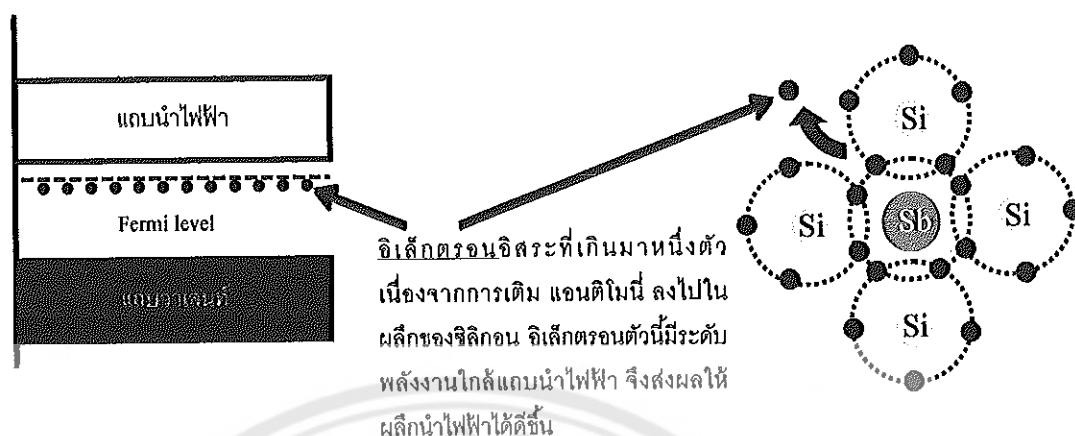
ภาพ 19 การนำไฟฟ้าของเซมิคอนดักเตอร์

3. เซมิคอนดักเตอร์ชนิดดอปป์ (The Doping of Semiconductors) (Carl R. Nave, 2012)

โดยปกติแล้วผลึกของสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าสามารถทำให้มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นได้ โดยการเติมสารบางชนิดลงไป เรียกวิธีการนี้ว่า ดอปป์ (Doping) โดยสามารถแบ่งเซมิคอนดักเตอร์แบบดอปป์ออกเป็น 2 ชนิดคือ 1. N-Type และ 2. P-Type

เซมิคอนดักเตอร์ชนิด N-Type

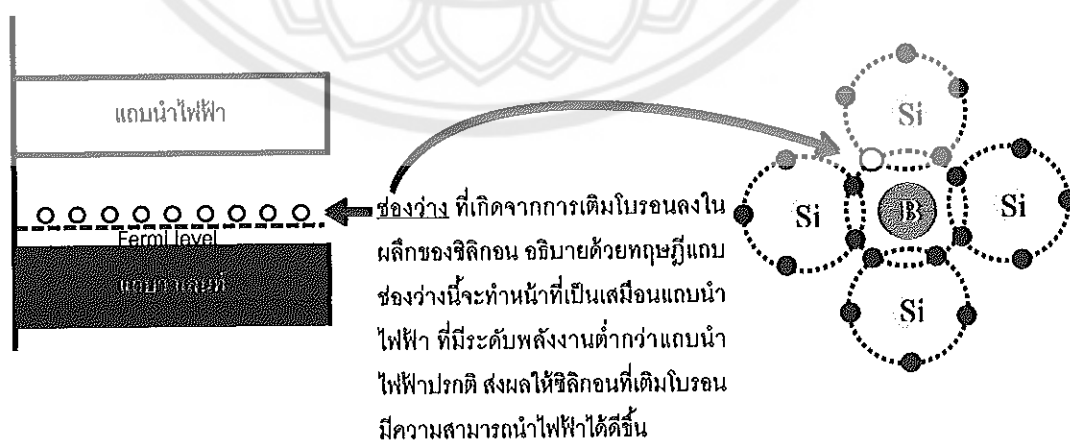
เมื่อเติมสารบางชนิดที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 5 อิเล็กตรอน เช่น แอนติโมนี หรือ อาร์เซนิก หรือ ฟอสฟอรัส ลงในสารเซมิคอนดักเตอร์ สารเหล่านี้จะไปเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ เนื่องจากไปเพิ่มอิเล็กตรอนในโครงสร้างผลึก ทำให้ในโครงสร้างผลึกมีอิเล็กตรอนเกินอยู่ 1 ตัว เรียกสารที่มีคุณสมบัติเช่นนี้ว่า เซมิคอนดักเตอร์ ชนิด N-Type ภาพ 20 แสดงผลของการเติมแอนติโมนีลงในผลึกของซิลิกอน โดยแอนติโมนีไปทำให้เกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกขึ้นแต่เนื่องจากผลึกนี้ต้องการพยายามรักษารักษาจำนวนอิเล็กตรอนให้อยู่ในสภาวะสมดุลคือประจุบวกเท่ากับลบ ดังนั้นผลึกจึงยอมมีอิเล็กตรอนอิสระที่ไม่สร้างพันธะกับซิลิกอนเกินมาหนึ่งตัว โดยอิเล็กตรอนที่เกินมาหนึ่งตัวนี้จะส่งผลให้เกิดการนำกระแสไฟฟ้าได้ดีขึ้น



ภาพ 20 ภาพจำลองการเติมแอนติโมนี ลงในผลึกซิลิกอนและอธิบาย
ด้วยทฤษฎีแถบ

เซมิคอนดักเตอร์ชนิด P-Type

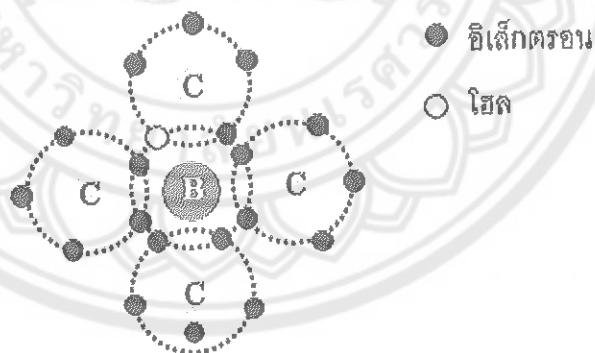
เมื่อเติมสารบางชนิดที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 3 อิเล็กตรอน เช่น โบรอน หรือ อลูมิเนียม หรือ แกลเลียม ลงในสารเซมิคอนดักเตอร์ สารเหล่านี้มีเวเลนซ์อิเล็กตรอนเพียงสามตัวเมื่อสร้างพันธะกับอะตอมซิลิกอนจะทำให้เวเลนซ์อิเล็กตรอนที่ใช้สร้างพันธะหายไปหนึ่งตัวเกิดเป็นออบิทอลว่างขึ้น ส่งผลให้อิเล็กตรอนที่อยู่ข้างเคียงสามารถเคลื่อนที่เข้าไปในช่องว่างนี้ได้ เป็นเหตุให้ผลึกนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น เมื่อช่องว่างนี้มีมากขึ้น เซมิคอนดักเตอร์จะมีพฤติกรรมใกล้เคียงโลหะมากขึ้น ภาพ 21 แสดงผลของการเติมโบรอนลงในผลึกของซิลิกอน



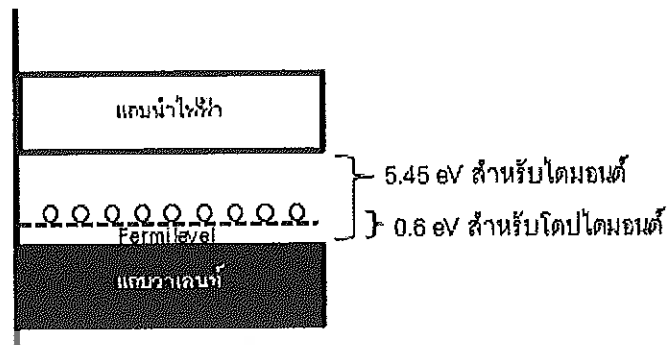
ภาพ 21 ภาพจำลองการเติมโบรอน ลงในผลึกซิลิกอน และอธิบายด้วยทฤษฎีแถบ

4. โบรอนโดปไดมอนด์

โดยปกติแล้วเพชรซึ่งเป็นสารประกอบโควาเลนต์จะไม่นำไฟฟ้าหรือเรียกว่ามีคุณสมบัติเป็นฉนวน เมื่อวัดค่าแถบพลังงานพบว่ามีความประมาณ 5.45 eV อย่างไรก็ตามมีวิธีการหนึ่งที่จะทำให้เพชรสามารถมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำได้ เรียกวิธีการนี้ว่า “การดอปปี้ง” (dopping) หรือ การเติมอะตอมที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 3 อิเล็กตรอนลงไปในโครงสร้างของเพชร เช่น การเติมโบรอนลงในผลึกของเพชร ทำได้โดยเติม ก๊าซไดโบเรน หรือ ไตรเมทิล โบเรน ในขั้นตอนการสร้างฟิล์มเพชร เนื่องจากโบรอนไม่สามารถเกิดพันธะ 4 พันธะได้เหมือนคาร์บอน แต่จะเกิดพันธะได้มากที่สุดเพียง 3 พันธะเท่านั้น สุดท้ายจะได้โครงสร้างผลึกที่มีช่องว่างประจุบวกเกิดขึ้น เรียกว่า “positive hole” หรือช่องว่างประจุบวก โดยช่องว่างนี้ที่อุณหภูมิสัมบูรณ์ หรืออุณหภูมิต่ำมากๆ จะไม่เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเข้ามาในช่องว่างประจุบวกนี้ แต่หากอุณหภูมิปกติหรือมีการกระตุ้นโดยต่อเข้ากับวงจรไฟฟ้า เวเลนซ์อิเล็กตรอนของอะตอมคาร์บอนที่อยู่ใกล้เคียง ที่มีพลังงานมากพอจะเคลื่อนที่เข้ามาที่ช่องว่างนี้ นั่นคือจะเกิดการเคลื่อนที่ของช่องว่างประจุบวกไปทั่วทั้งผลึก ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้น เรียกสารกึ่งตัวนำที่เกิดขึ้นนี้ว่า “โบรอนโดปไดมอนด์” (Boron doped diamond, BDD) โบรอนโดปไดมอนด์เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด P-Type โดยสามารถเขียนแบบจำลองโครงสร้างผลึกแลททิซได้ดังนี้



ภาพ 22 แบบจำลองโครงสร้างผลึกของโบรอนโดปไดมอนด์



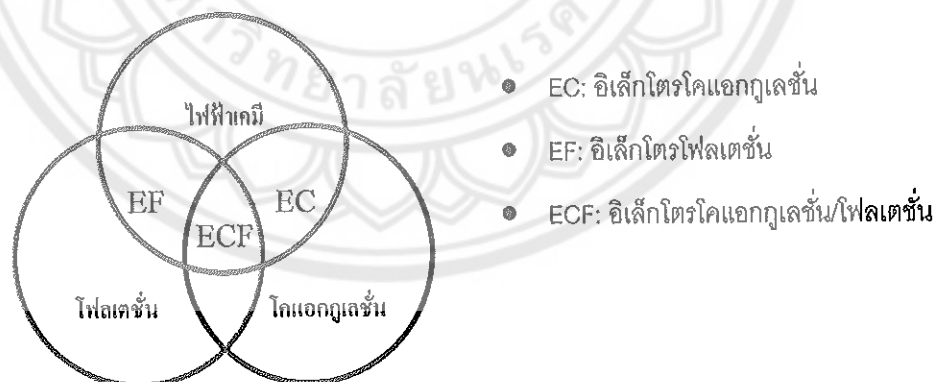
ภาพ 23 การเปรียบเทียบแถบพลังงานระหว่างไดมอนด์ และไดโพลไดมอนด์

ที่มา: Alexander K., 2007

การบำบัดสารปนเปื้อนด้วยกระแสไฟฟ้า

การบำบัดสารปนเปื้อนในน้ำด้วยกระแสไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธีหลักคือ

1. อิเล็กโทรโฟลเตชัน (Electroflotation, EF)
2. อิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน (Electrocoagulation, EC)
3. อิเล็กโทรออกซิเดชัน (Electrooxidation)



ภาพ 24 ความสัมพันธ์ของการบำบัดน้ำเสียด้วยไฟฟ้า

ที่มา: Mohammad M.E. and Muttucumaru S., 2009

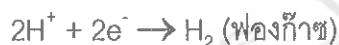
1. อิเล็กโทรไลต์

อิเล็กโทรไลต์ หมายถึง กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่อาศัยการสร้างฟองก๊าซด้วยกระแสไฟฟ้า โดยฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะทำหน้าที่พองสารปนเปื้อนที่ละลายอยู่ในน้ำให้ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ซึ่งระหว่างฟองก๊าซและสิ่งปนเปื้อน ต้องอาศัยแรงทางฟิสิกส์คือ การดูดติดผิวและการดูดซับ (adhesion/adsorption) ปฏิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

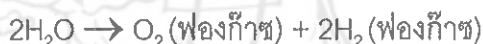
ที่แอโนด



ที่แคโทด



ปฏิกิริยารวม



จากสมการข้างต้นพบว่าที่ขั้วแอโนดจะเกิดจะเกิดก๊าซออกซิเจนขึ้น ส่วนที่ขั้วแคโทดจะเกิดก๊าซไฮโดรเจน อัตราการเกิดปฏิกิริยาข้างต้นสามารถคำนวณได้จากกฎของฟาราเดย์ดังนี้

$$Q = \frac{IV_0}{nF}$$

เมื่อ

Q = อัตราการเกิดก๊าซที่สภาวะปกติ (L/s)

V_0 = ปริมาณก๊าซในหน่วยโมลาร์ (22.4 L/mol)

F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,500 C/mol. Electrons)

N = จำนวนอิเล็กตรอนที่ถ่ายเทระหว่างอิเล็กโทรด (2 อิเล็กตรอนต่อ

โมลของก๊าซไฮโดรเจน และ 4 อิเล็กตรอนต่อโมลของก๊าซออกซิเจน)

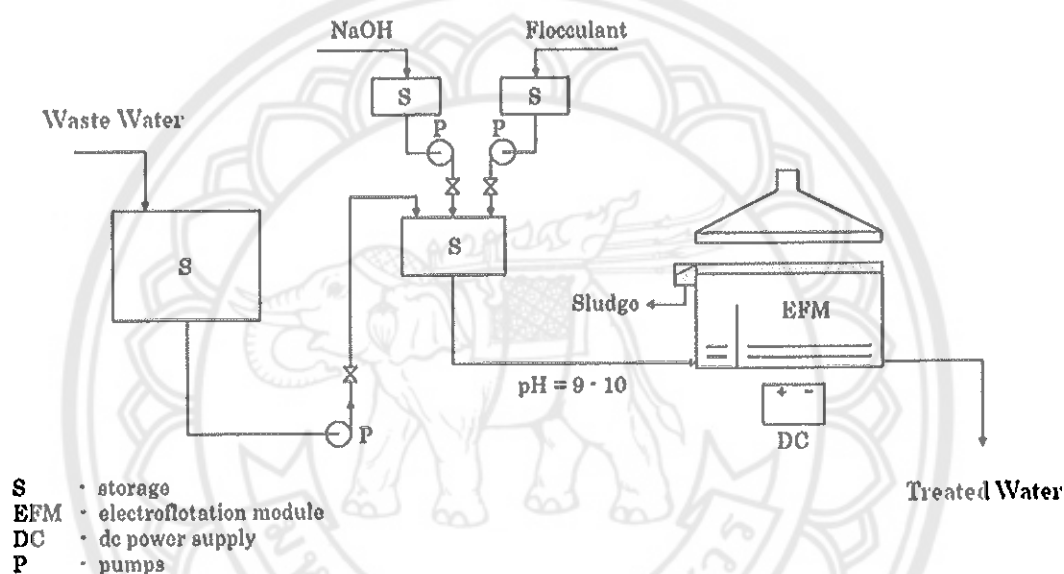
เมื่อรวมปฏิกิริยาทั้งหมดเข้าด้วยกันสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$Q_g = Q_H + Q_O$$

$$Q_g = \frac{IV_0}{n_H F} + \frac{IV_0}{n_O F}$$

เมื่อแทนค่าทั้งหมดลงในสมการจะได้อัตราการเกิดก๊าซคือ

$$Q_g = 1.74 \times 10^{-4} \text{ l}$$



ภาพ 25 ลักษณะถังปฏิกรณ์แบบอิเล็กโทรโฟลเตชั่น

ปัจจัยที่มีผลต่ออิเล็กโทรโฟลเตชั่น

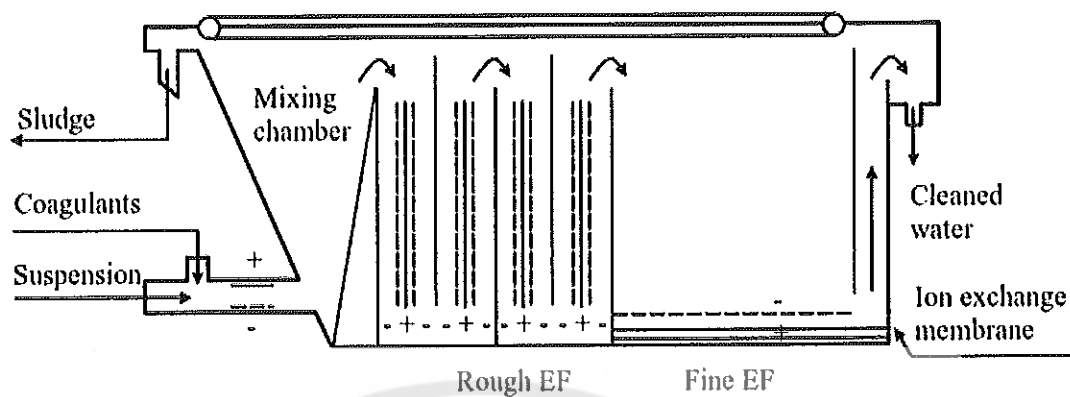
ประสิทธิภาพของอิเล็กโทรโฟลเตชั่นขึ้นอยู่กับปัจจัยคือ

1. ความสามารถในการบำบัด ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของฟองก๊าซ
2. ปริมาณไฟฟ้าที่ต้องการ ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณกระแส ค่าความนำไฟฟ้าของการ

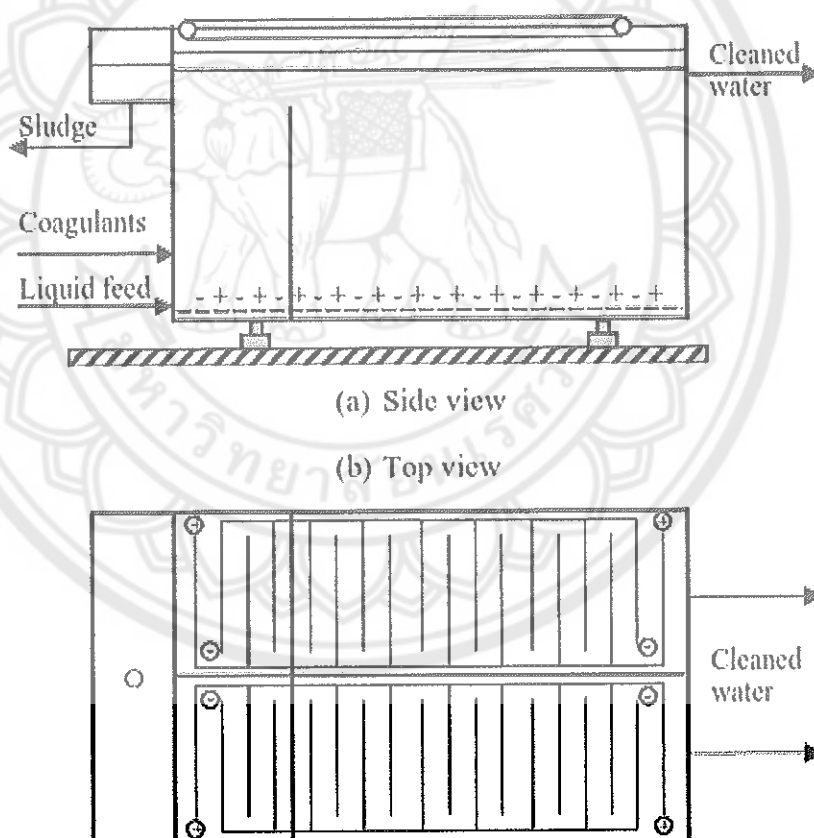
ออกแบบเซลล์ไฟฟ้า

การออกแบบระบบเซลล์ไฟฟ้า

ในระบบอิเล็กโทรโฟลเตชั่นจะมีลักษณะการวางอิเล็กโทรดที่ต่างกันสองแบบคือ แบบตั้งและแบบนอน โดยส่วนใหญ่พบว่าแบบนอนเป็นที่นิยมมากกว่า การออกแบบโดยปกติมี 2 ประเภทคือแบบ ชั้นตอนเดียว หรือแบบ สองชั้นตอน



ภาพ 26 ตัวอย่างการออกแบบเซลล์แบบสองขั้นตอนโดยมีการเติมโคแอกกูแลนซ์เอ็ด



ภาพ 27 ตัวอย่างการออกแบบเซลล์อิเล็กโทรโพลเตชันแบบปกติ

ที่มา: Gouhua C., 2004

ผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง

ขนาดของฟองก๊าซนั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้คือ

1. ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ
2. ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้า

วัสดุที่นำมาใช้ทำอิเล็กโทรดขนาดของฟองก๊าซนั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้คือ

1. ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ
2. ความเข้มข้นกระแสไฟฟ้า

3. วัสดุที่นำมาใช้ทำอิเล็กโทรด

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า

1. ออกซิเจนมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อค่าพีเอชมากกว่า 7
2. ไฮโดรเจนมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อมีค่าพีเอชน้อยกว่า 7 โดยฟองก๊าซไฮโดรเจนมี

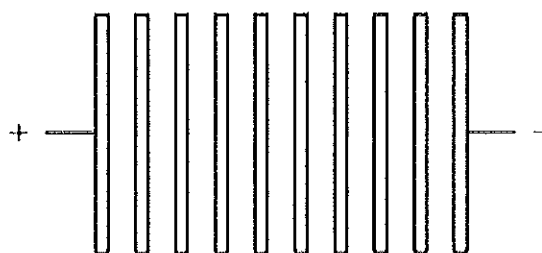
ขนาดเล็กที่สุดที่พีเอชเป็นกลาง

ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

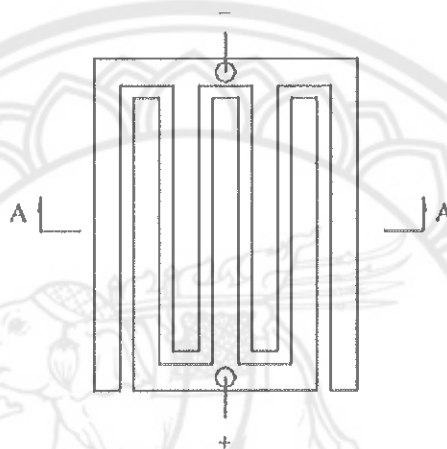
งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าขนาดของฟองก๊าซไม่แปรผันตามปริมาณกระแสไฟฟ้า แต่จะแปรผันตามความเรียบของแผ่นอิเล็กโทรด โดยพบว่าแผ่นอิเล็กโทรดที่เรียบจะให้ฟองก๊าซที่ใหญ่กว่าขนาดอิเล็กโทรดที่ขรุขระ

การจัดวางอิเล็กโทรด

การวางอิเล็กโทรดในระบบอิเล็กโทรไลต์สามารถจัดวางได้หลายวิธี โดยปกติแบบแนวนอนจะวางตะแกรงคาโทดไว้ด้านบนและแผ่นแอโนดไว้ด้านล่าง โดยให้มีระยะห่างกัน 10 ถึง 50 มิลลิเมตร การวางอิเล็กโทรดแบบนี้จะมีเพียงอิเล็กโทรดด้านบนที่ทำปฏิกิริยากับน้ำโดยตรงในขณะที่อิเล็กโทรดด้านล่างจะไม่ทำปฏิกิริยาโดยตรง ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะไม่ทำปฏิกิริยาโดยทันที แต่จะทำให้เกิดฟองก๊าซขนาดใหญ่ ซึ่งจะส่งผลให้ฟลักซ์ที่เกิดขึ้นแตกออกยิ่งไปกว่านั้นค่าความนำกระแสไฟฟ้าของน้ำมีผลต่อปริมาณการใช้พลังงาน เนื่องจากหากน้ำมีค่าความนำกระแสไฟฟ้าต่ำ จะทำให้ต้องใช้พลังงานมาก และหากใช้พลังงานมากก็ต้องให้แผ่นอิเล็กโทรดมีระยะห่างกันมากเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรระหว่างแผ่นตะแกรงคาโทดและแผ่นแอโนด อีกปัญหาที่พบจากการวางแผ่นอิเล็กโทรดแนวนอนคือหากมีตะกอนไปสะสมระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด จะทำความสะอาดยาก การวางอิเล็กโทรดแบบแนวตั้งแสดงดังภาพ 29



ภาพ 28 การวางอิเล็กโทรดแนวตั้ง



ภาพ 29 การวางอิเล็กโทรดรูปคล้ายช่อม

การวางอิเล็กโทรดแบบแนวตั้งมีข้อดีคือสามารถติดตั้งได้ง่ายเพราะทั้งสองขั้วเป็นแผ่นเหมือนกัน ขณะที่แบบคล้ายช่อมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบได้เนื่องจากสามารถสร้างฟองก๊าซได้เร็ว และทำปฏิกิริยาได้ทั้งฮาโนดและคาโทด

วัสดุที่นำมาใช้ทำอิเล็กโทรด

หัวใจหลักของระบบอิเล็กโทรโฟลเตชันอยู่ที่การจัดวางอิเล็กโทรดและชนิดของอิเล็กโทรด ข้อดีข้อเสียของอิเล็กโทรดแต่ละชนิดแสดงดังตาราง 4

ตาราง 4 ข้อดีข้อเสียของอิเล็กโทรดแต่ละชนิด

วัสดุที่นำมาทำอิเล็กโทรด	ข้อดี	ข้อเสีย
เหล็ก	ราคาถูก	ละลาย
อลูมิเนียม	ราคาถูก	ละลาย
	นิยมใช้ในระบบ EC-EF	ไม่นิยมใช้กับระบบ EF เนื่องจาก

ตาราง 4 (ต่อ)

วัสดุที่นำมาทำอิเล็กโทรด	ข้อดี	ข้อเสีย
สแตนเลส	ราคาถูก นิยมใช้ในระบบ EC-EF	ให้ฟองก๊าซขนาดใหญ่ ละลาย ไม่นิยมใช้กับระบบ EF เนื่องจาก ให้ฟองก๊าซขนาดใหญ่
กราไฟท์	ราคาถูก ให้ก๊าซออกซิเจนมาก	ไม่ทนทาน
ตะกั่วออกไซด์	ราคาถูก ให้ก๊าซออกซิเจนมาก	ไม่ทนทาน มี ตะกั่วไฮดรอกไซด์ ละลายออกมากับ น้ำที่บำบัดแล้ว
แพลทินัม	มีความเสถียรสูง	ราคาแพง ไม่นิยมใช้กับเครื่อง ขนาดใหญ่
DSA (Dimensionally stable anode)		
TiO ₂ – RuO ₂	ให้ก๊าซคลอรีนมาก	ไม่ทนทาน
IrO _x -based	ทนทานกว่า RuO ₂ 20 เท่า	

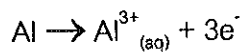
หมายเหตุ: DSA ประกอบไปด้วยโลหะสองส่วนคือ

1. RuO₂ หรือ IrO₂ เป็นอิเล็กโทรดกระตุ้น
2. TiO₂, Ta₂O₅, ZrO₂, Nb₂O₅ เป็นสารเสถียร (stabilizing agent)
นำสารในข้อ 1 และ 2 ไปเคลือบลงบนโลหะมีค่าเช่น Ti, Ta, Zr, W, Nb, Bi

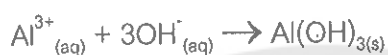
2. อิเล็กโทรดแอโนด

อิเล็กโทรดแอโนด หมายถึงกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่อาศัยการสร้างสารโคแอโนดที่ด้วยกระแสไฟฟ้า สารโคแอโนดที่ถูกสร้างขึ้นโดยอาศัยการละลายของขั้วแอโนด (Sacrificial anode) โลหะที่นิยมนำมาใช้ทำขั้วแอโนดคือ อลูมิเนียม หรือ เหล็ก ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

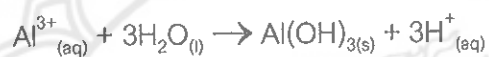
2.1 สำหรับอลูมิเนียม ปฏิกิริยาที่แอโนด



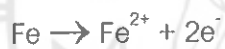
ที่พีเอชสูงกว่า 7



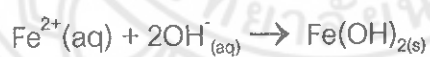
ที่พีเอชต่ำกว่า 7



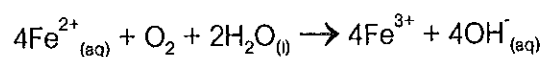
2.2 สำหรับเหล็ก ปฏิกิริยาที่แอโนด



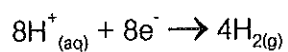
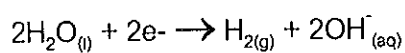
ที่พีเอชสูงกว่า 7



ที่พีเอชต่ำกว่า 7



ปฏิกิริยาที่แคโทด



กระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนคือ

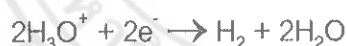
1. การสร้างสารโคแอกกูแลนต์จากการละลายของขั้วแอโนด
2. สารโคแอกกูแลนต์ที่เกิดขึ้น ไปทำลายเสถียรภาพของสิ่งปนเปื้อน
3. การรวมตัวกันของอนุภาคเกิดเป็นฟล็อก

โดยในปฏิกิริยาอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันจะเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสของน้ำควบคู่ไปด้วย โดยเกิดฟองก๊าซออกซิเจนขึ้นที่ขั้วแอโนดและฟองก๊าซไฮโดรเจนขึ้นที่ขั้วแคโทด ฟองก๊าซนี้จะไปเกาะที่ฟล็อกและยกฟล็อกให้ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ดังนั้นจึงพบว่าอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันมักใช้ร่วมกับอิเล็กโทรฟลอตเตชัน นอกจากนี้ที่ขั้วแคโทดยังสามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับสิ่งปนเปื้อนในน้ำได้อีกด้วย

3. อิเล็กโทรออกซิเดชัน

อิเล็กโทรออกซิเดชัน หมายถึงกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่อาศัยการสร้างออกซิไดซิงเอเจนต์จากการทำปฏิกิริยาระหว่างกระแสไฟฟ้ากับน้ำและสารเคมีที่ละลายอยู่ในน้ำโดยเมื่อพิจารณาจากสารออกซิไดซิงเอเจนต์ที่เกิดขึ้น (Cl_2 , ClO_2 , O_3 , $\cdot\text{OH}$, $\text{O}^\cdot$, H_2O_2 , O_2 , H_2 , CO_2) สามารถคาดเดาปฏิกิริยาได้ดังต่อไปนี้

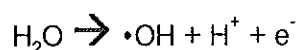
ปฏิกิริยาที่แคโทด
ที่พีเอชต่ำ



ที่พีเอชกลางถึงต่ำ



ที่แอโนด



โดยไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เกิดขึ้นจะไปเกาะที่ตัวกลาง หรือโลหะเร่งปฏิกิริยาก่อนเข้าทำปฏิกิริยา

ในกรณีมีคลอไรด์ไฮดรอกไซด์เกิดปฏิกิริยาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่แอโนดเป็นดังต่อไปนี้



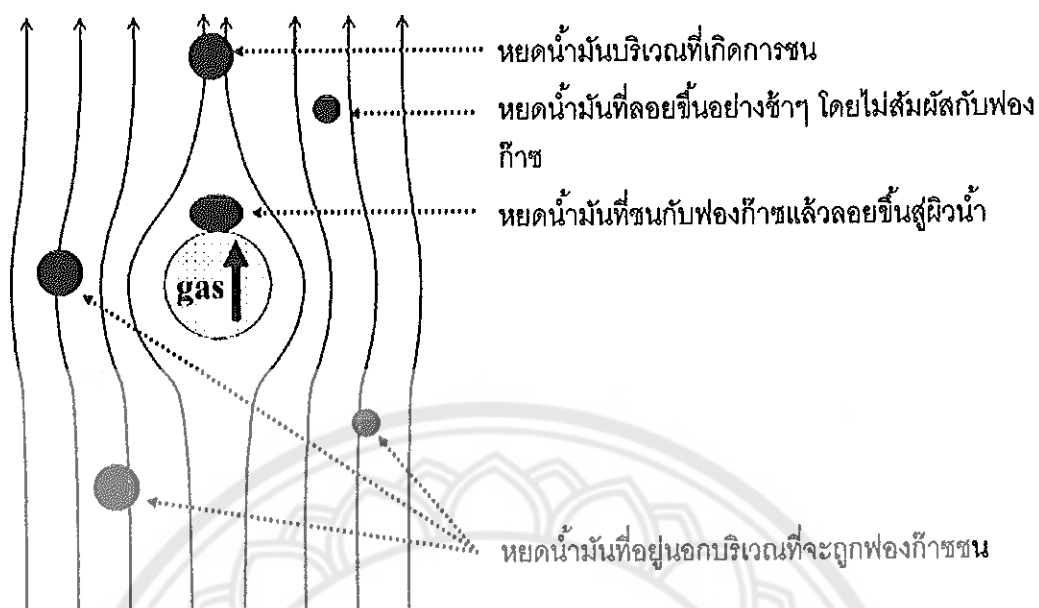
ปฏิกิริยาขณะเข้าสู่สลายสารอินทรีย์เกิดดังนี้



ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำด้วยเทคนิคอินดิวิชแอโรไฟลเตชั่น

1. การลอยตัวด้วยก๊าซ (Gas flotation)

หลักการลอยตัวด้วยก๊าซ ใช้วิธีการไปเพิ่มความแตกต่างระหว่างน้ำหนักของน้ำและอนุภาคที่ต้องการกำจัด โดยเมื่อให้ก๊าซที่มีความละเอียดมากไหลผ่านอนุภาคของน้ำมันดิบหรืออนุภาคของแข็ง อนุภาคเหล่านี้จะเกาะติดกับก๊าซ ส่งผลให้อนุภาคมีค่าความหนาแน่นที่ลดลง เมื่อความหนาแน่นระหว่างน้ำและอนุภาคมีความแตกต่างกันมากขึ้นส่งผลให้อนุภาคลอยขึ้นสู่ผิวน้ำเร็วขึ้น โดยอนุภาคเหล่านี้จะอยู่ในรูปโฟมที่ผิวน้ำและทำให้สามารถนำออกได้ง่าย



ภาพ 30 ไฮโดรไดนามิกของน้ำมันและฟองก๊าซ

กฎของสโตก

เมื่อกำหนดให้

$$F_g - F_b = (\rho_s - \rho) g V$$

F_b = แรงลอยตัว (Buoyancy force)

F_g = แรงขับเคลื่อน (impelling force)

ρ_s = ความหนาแน่นของอนุภาค (mass density of the particle)

ρ = ความหนาแน่นของของเหลว (mass density of liquid)

V = ปริมาตรของอนุภาค (Volume of particle)

g = อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (acceleration due to gravity)

$$F_d = C_D A \rho v^2 / 2$$

F_d = แรงต้าน (drag force)

C_D = สัมประสิทธิ์ของการต้าน (coefficient of drag, which is a function of Reynolds number)

A_c = พื้นที่หน้าตัดตั้งฉากกับการไหล (area in cross section at right angle to the velocity)

ρ = ความหนาแน่นของของเหลว (mass density of liquid)

V_s = ความเร็วในการตกตะกอน (Settling velocity)

ลักษณะของน้ำมันที่ไม่ละลายน้ำ สามารถอยู่ในน้ำได้ 3 รูปแบบ คือ

1. ขนาดหยดมากกว่า 150 ไมโครเมตร สามารถแยกออกได้ด้วยวิธีทั่วไป
2. ขนาดหยด 15-150 ไมโครเมตร
3. 3-20 ไมโครเมตร จะอยู่ในรูปอิมัลชัน มักยึดติดกับ surfactant ประจุลบ ส่วนน้ำมันที่ละลายในน้ำสามารถกำจัดออกได้โดยใช้วิธีการบำบัดทางชีวภาพ

3. ปัจจัยที่มีผลต่อวิธีการลอยตัวด้วยก๊าซ

- 3.1 ขนาดของหยदनํ้ามัน
- 3.2 ขนาดของก๊าซ
- 3.3 ปัจจัยอื่นๆ
- 3.4 Oil-Gas bubble hydrodynamics

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ประจักษ์ ศาสตร์เวช (2551) ได้ศึกษาการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิวด้วยกระบวนการอินดิคเตอร์แอร์โฟลเทชัน และโมดิฟายอินดิคเตอร์แอร์โฟลเทชัน โดยใช้สารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด คือ 1) Sodium Dodecyl sulphate (SDS) 2) Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide (CTAB) และ 3) Polysorbate 20 (Tween 20) พบว่าสารลดแรงตึงผิว SDS ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด 98.84 เปอร์เซ็นต์ โดยให้ความเข้มข้นเฟอริกคลอไรด์ 0.8 กรัมต่อลิตร ผลการศึกษาด้านศาสตร์ของกระบวนการ IAF และ MIAF เป็นปฏิกิริยาอันดับสอง ให้ค่า K ในช่วง 2×10^{-4} ถึง 2×10^{-6} (ลิตรต่อมิลลิกรัมวินาที) ผลการศึกษาด้านอุทกพลศาสตร์พบว่าค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (a) ค่าความเร็วแกรเดียนท์ (G) มีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของอากาศ โดยสัดส่วน a/G สูงสุดจะให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด

เกียรติพงศ์ เจริญสุข (2546) ได้ศึกษาประสิทธิภาพ และสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดน้ำมันสำหรับน้ำเสียโรงกลั่นน้ำมันด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันกับกระบวนการลอยตัวด้วย

อากาศละลาย จากผลการทดลอง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันตามด้วยการตกตะกอนคือค่าพีเอชเท่ากับ 6 ปริมาณสารส้มเท่ากับ 20 มก./ล. และโพลิเมอร์ประจุลบเท่ากับ 1 มก./ล. ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย ของแข็งทั้งหมด ซีไอดี และน้ำมันและไขมัน เท่ากับร้อยละ 89.6 3.6 51.8 และ 81.4 ตามลำดับ กระบวนการโคแอกกูเลชันทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการดีเอเอฟดีขึ้น จากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันกับกระบวนการดีเอเอฟ คือค่าพีเอชเท่ากับ 6 ความเข้มข้นสารส้มเท่ากับ 20 มก./ล. และโพลิเมอร์ประจุลบเท่ากับ 1 มก./ล. ที่ค่าความดันอัดอากาศ 5 บาร์ ค่าความเข้มข้นของปริมาตรฟองอากาศ 11 ล./ลบ.ม. ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย ของแข็งทั้งหมดซีไอดี และน้ำมันและไขมัน เท่ากับร้อยละ 86.5 6.4 49.2 87.2 ตามลำดับ จากการทดลองโดยใช้กระบวนการดีเอเอฟแบบโคแอกเจียลดีเอเอฟคอลัมน์ พบว่าเมื่อใช้ค่าภาระทางชลศาสตร์เท่ากับ 9 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ค่าพีเอชเท่ากับ 6 ความเข้มข้นสารส้มเท่ากับ 20 มก./ล. และ โพลิเมอร์ประจุลบเท่ากับ 1 มก./ล. ความดันอัดอากาศ 5 บาร์ ความเข้มข้นของปริมาตรฟองอากาศ 11 ล./ลบ.ม. ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย ของแข็งทั้งหมด ซีไอดีและน้ำมันและไขมัน เท่ากับร้อยละ 88.6 11.6 39.1 และ 80.6 ตามลำดับ

ฐิติกร ชุกกลิน (2547) ศึกษาการขจัดน้ำมันเสถียรในอิมัลชันของน้ำเสีย โดยเทคนิคอินดิวิจแอรีโฟลเทชัน โดยใช้สารลดแรงตึงผิวต่างๆ ดังนี้ สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (โพลิออกซีเอทิล ลีนซอบิเทนโมโนโอลีเอต, ทวิน 80) สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก (เฮกซะเดคซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์, ซีเทป) สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต, เอสดีเอส) และ สารลดแรงตึงผิวผสมระหว่าง ซีเทปกับทวิน 80 ที่อัตราส่วน (2:8) (5:5) และ (8:2) ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการขจัดน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำ ขึ้นกับชนิดของสารลดแรงตึงผิวชนิดและ ปริมาณของอิเล็กโทรไลต์ เช่น ทวิน 80 1 ซีเอ็มซี และอลูมิเนียมซัลเฟต 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ซีเทป 0.25 ซีเอ็มซี และอลูมิเนียมซัลเฟต 480 มิลลิกรัมต่อลิตร เอสดีเอส 0.25 ซีเอ็มซี และอลูมิเนียมซัลเฟต 280 มิลลิกรัมต่อลิตร ซีเทป : ทวิน 80 (2:8) 1 ซีเอ็มซี และอลูมิเนียมซัลเฟต 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ซีเทป : ทวิน 80 (5:5) 1 ซีเอ็มซี และอลูมิเนียมซัลเฟต 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ซีเทป : ทวิน 80 (8:2) 1 ซีเอ็มซี มีค่า pH ที่เหมาะสมอยู่ที่ 7 ในขณะที่ใช้เอสดีเอส มีค่า pH ที่เหมาะสมที่ 4 โดยใช้อัตราการไหลของอากาศ 8 มิลลิตรต่อวินาที ขนาดของฟองอากาศในช่วง 615-688 ไมโครเมตรและเวลาในการเติมอากาศที่ 20 นาที ผลจากการทดลองพบว่าสามารถกำจัดน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำได้มากกว่า 99%

Al-Shamrani (2002) ได้ศึกษาการทำลายเสถียรภาพของอิมัลชัน ด้วยกระบวนการ DAF

พบว่า การเติมอลูมิเนียมซัลเฟต และเฟอร์ริกซัลเฟต สามารถบำบัดน้ำมันได้ 99.4 และ 99.94 เปอร์เซ็นต์ความเร็วที่เหมาะสมในการกวนเร็วและกวนช้าเท่ากับ 110 และ 12 รอบต่อวินาทีตามลำดับ เวลาที่เหมาะสมคือ 120 และ 15-20 วินาที ตามลำดับ โดยสรุปว่ากระบวนการฟล็อกคูเลชันก่อนกระบวนการ DAF ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดให้สูงขึ้น

Da Rosa, & Rubio (2005) ได้ศึกษาประสิทธิภาพเทคนิคฟล็อกคูเลชัน โฟลเตชันโดยใช้ร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟล็อกรูปทรงต่างๆ พบว่าอุปกรณ์ทั้งหมดให้ประสิทธิภาพในการบำบัดใกล้เคียงกัน เทคนิคฟล็อกคูเลชัน โฟลเตชัน ให้ประสิทธิภาพการบำบัด 80 – 90 เปอร์เซ็นต์ และสามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยสรุปว่าประสิทธิภาพการบำบัดขึ้นอยู่กับปริมาณฟล็อกคูเลนต์ และสารลดแรงตึงผิว

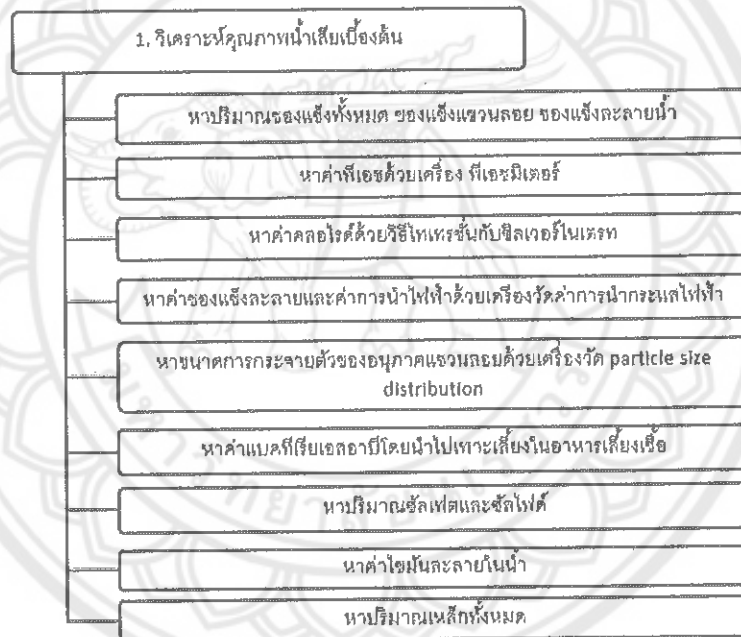
Meyssami, & Kasaelan (2005) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีโคแอกูแลชันร่วมกับการเติมอากาศ ผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ ใช้โคโคซาน 100 พีพีเอ็ม ร่วมกับอัตราการเติมอากาศ 3 ลิตรต่อนาที นาน 45 วินาที ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ที่เอชเท่ากับ 6 มีความสามารถในการบำบัดถึง 95 เปอร์เซ็นต์ สามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดจะขึ้นกับ ชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกูแลนต์ ค่าพีเอช อัตราการเติมอากาศ และระยะเวลาเติมอากาศ

พชร โพธิ์ทอง (2554) ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำมันตัดและน้ำเสียปนเปื้อนสารร้ายด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (Modified Dissolved Air Flotation) ร่วมกับกระบวนการโคแอกูแลชัน พบว่าชนิดของน้ำเสียส่งผลต่อ 1) กระบวนการโคแอกูแลชัน 2) ปริมาณฟองอากาศที่เหมาะสม หรือ ค่า A/S ในขณะที่ปัจจัยทางพลศาสตร์ของไหลที่ส่งผลต่อการรวมและการแยกตะกอนสามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปร G.T (ผลคูณระหว่างความปั่นป่วนและระยะเวลากัก) และค่า OFR (อัตราน้ำดันที่ผิว)

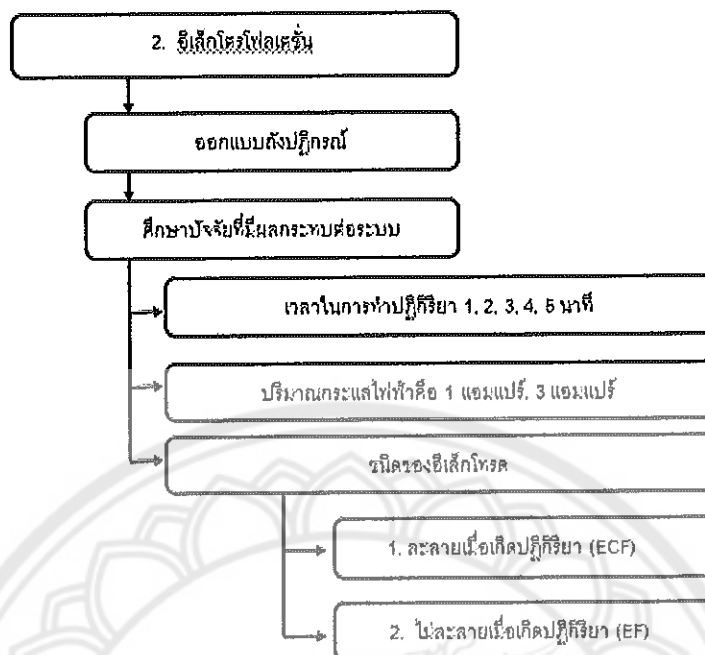
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

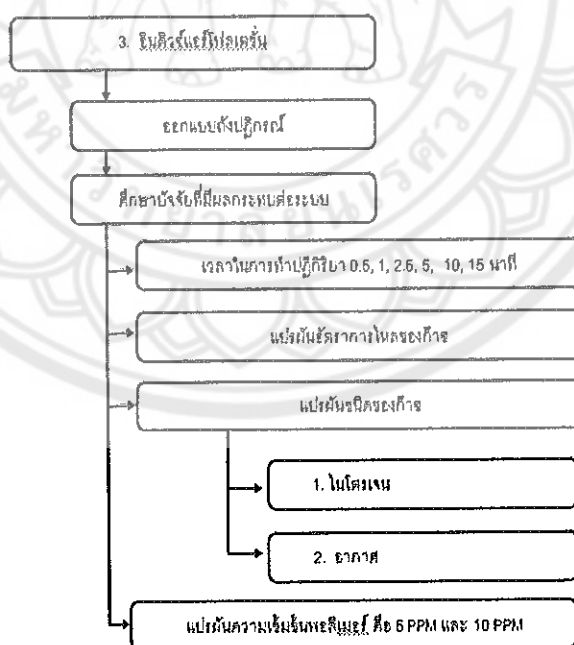
งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร และ ห้องปฏิบัติการ แหล่งน้ำมันสิริกิติ์ อำเภอลานกระบือ จังหวัดกำแพงเพชร เพื่อศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตปิโตรเลียมจากแหล่งน้ำมัน สิริกิติ์ ด้วยวิธีการอิเล็กโตรโฟลเดชั่น โดยเปรียบเทียบผลกับวิธีทั่วไปคืออินดิซ์แอร์โฟลเดชั่น การ ดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนแสดงตามแผนภูมิดังนี้



ภาพ 31 แผนภูมิขั้นตอนวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียเบื้องต้น



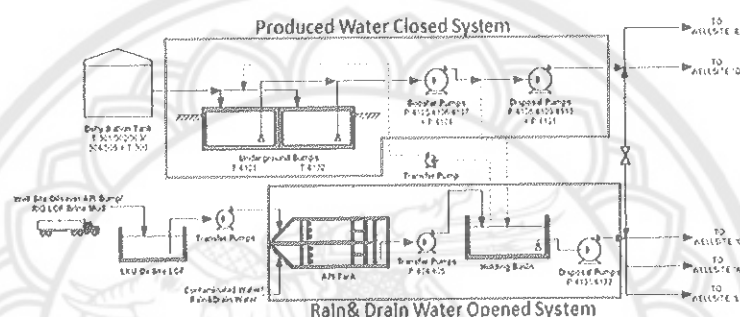
ภาพ 32 แผนภูมิขั้นตอนอีเล็กโตรโพลเตชัน



ภาพ 33 แผนภูมิขั้นตอนอินดิวิจแอทีโพลเตชัน

ตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการวิจัย

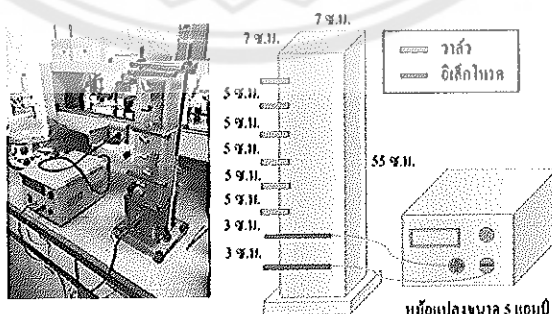
น้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยได้รับความอนุเคราะห์จากแหล่งน้ำมันสิริกิติ์ โดยใช้น้ำจากบ่อ close drain ของแหล่งน้ำมันสิริกิติ์ รองรับน้ำเสียที่ถ่ายมาจากระบบ Dehydration ของ Tank Farm งานวิจัยนี้ไม่ใช้น้ำจากแหล่ง API เนื่องจากเป็นบ่อเปิดจึงทำให้พบปริมาณแบคทีเรียทั้งแบบใช้อากาศและไม่ใช้อากาศ และพบว่าปริมาณอนุภาคแขวนลอยมากกว่าระบบบ่อปิด อีกทั้งยังรองรับน้ำฝนและน้ำจากกระบวนการขุดเจาะ หากนำไปใช้ในการทดลองจะทำให้ไม่สามารถควบคุมคุณภาพของน้ำเสียให้คงที่ได้เนื่องจากมีปัจจัยดังกล่าวซึ่งอาจส่งผลให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อน



ภาพ 34 ระบบน้ำเสียของแหล่งสิริกิติ์

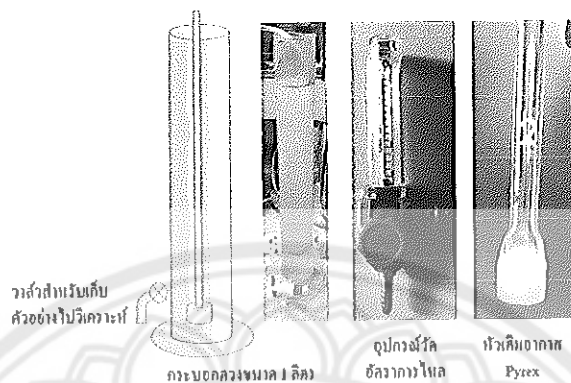
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. ถังปฏิกรณ์สำหรับอิเล็กโทรไลต์เตชั่นมีขนาด 2 ลิตร โดยใช้หม้อแปลงขนาด 100 V หรือ 5 A ใช้อิเล็กโทรดขนาด 5×7 เซนติเมตร เป็นไบรอนโคปเปอร์เคลือบสแตนเลสสตีล, อลูมิเนียมเคลือบสแตนเลสสตีล หรือเหล็กกล้าเคลือบสแตนเลสสตีล



ภาพ 35 ลักษณะถังปฏิกรณ์ ECF

2. ตั้งปฏิกรณ์สำหรับอินดิวิจแอโรโพลเตชันขนาดของอุปกรณ์มีปริมาตร 1 ลิตรใช้อากาศหรือก๊าซไนโตรเจนสำหรับเติมอากาศ โดยติดตั้งหัวฟู่



ภาพ 36 ตั้งปฏิกรณ์ IAF

3. เครื่องชั่งสารละเอียด, Metler-Toledo
4. เครื่องวัดขนาดอนุภาค, counter counter, Model Blackman Z1
5. เครื่องวัดพีเอช, Methome, Medel 875 pH lab
6. ตู้อบ, Memmert, Model UN 55
7. เครื่องวัด conductivity, ULTRAMETER Model 4P
8. เครื่องวัดน้ำมันในน้ำ Oil in water, Horiba, Model OCMA-350

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. Coagulant Aid (Optimer 7194 Plus)
2. Coagulant Aid (EC60294A)
3. Sodium hydroxide, AR grade, Merck
4. Silver Nitrate, AR grade, Merck

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การทดลองที่ 1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโพลเตชันโดยใช้ขั้วไฟฟ้าเป็น โบรอนโดปไดมอนด์เป็นขั้วบวก และ สเตนเลสสตีลเป็นขั้วลบ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ โดยทำการแปรผันค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

1. หาประมาณ กระแสไฟฟ้า ที่เหมาะสม โดยแปรผันกระแสไฟฟ้า 3 ค่า คือ 3 แอมแปร์, 5 แอมแปร์ และ 7 แอมแปร์
2. ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม โดยแปรผันระยะเวลา 3 ค่า คือ 5 นาที, 10 นาที 15 และ 30 นาที
3. ทิ้งให้ตะกอนลอยเป็นเวลา 5 นาที
4. วิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังการบำบัด

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียด้วยอิเล็กโทรโฟลเตชันโดยใช้อิเล็กโทรดที่ไม่ละลาย

การทดลองที่ 2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคอิเล็กโทรโฟลเตชันโดยใช้ขั้วไฟฟ้าเป็นขั้วบวกและขั้วลบและสแตนเลสตีลเป็นขั้วลบ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ โดยทำการแปรผันค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

1. หาประมาณ กระแสไฟฟ้า ที่เหมาะสม โดยแปรผันกระแสไฟฟ้า 3 ค่า คือ 3 แอมแปร์, 5 แอมแปร์ และ 7 แอมแปร์
2. ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม โดยแปรผันระยะเวลา 3 ค่า คือ 5 นาที, 10 นาที 15 และ 30 นาที
3. ทิ้งให้ตะกอนลอยเป็นเวลา 5 นาที
4. วิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังการบำบัด

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียด้วยอิเล็กโทรโฟลเตชันโดยใช้อิเล็กโทรดที่ละลาย โดยมีสมมุติฐานว่าหากปฏิกิริยาในการทดลองที่ 2 ให้ผลการกำจัดอนุภาคแขวนลอยได้ดีกว่าการทดลองที่ 1 แสดงว่าสารโคแอกกูแลนต์ที่เกิดจากการละลายของอิเล็กโทรด มีส่วนช่วยในการทำปฏิกิริยา

การทดลองที่ 3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคอิเล็กโทรโฟลเตชันโดยใช้ขั้วไฟฟ้าเป็นเหล็กเป็นขั้วบวกและสแตนเลสตีลเป็นขั้วลบ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะโดยทำการแปรผันค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

1. หาประมาณ กระแสไฟฟ้า ที่เหมาะสม โดยแปรผันกระแสไฟฟ้า 3 ค่า คือ 3 แอมแปร์, 5 แอมแปร์ และ 7 แอมแปร์
2. ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม โดยแปรผันระยะเวลา 3 ค่า คือ 5 นาที, 10 นาที 15 และ 30 นาที
3. ทิ้งให้ตะกอนลอยเป็นเวลา 5 นาที

4. วิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังการบำบัด การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียด้วย อิเล็กโทรโฟลเตซิสโดยใช้อิเล็กโทรดที่ต่างจากการทดลองที่ 2 เพื่อศึกษาความแตกต่างของการบำบัดเมื่อเปลี่ยนชนิดของอิเล็กโทรด โดยมีสมมุติฐานว่าหากปฏิกิริยาในการทดลองที่ 3 ให้ผลการกำจัดอนุภาคแขวนลอยได้ดีกว่าการทดลองที่ 2 แสดงว่าสารโคแอกกูแลนต์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดที่เป็นเหล็กให้ประสิทธิภาพการบำบัดดีกว่า สารโคแอกกูแลนต์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดที่เป็นอลูมิเนียม

การทดลองที่ 4 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคอินดิวิจแอโรโฟลเตซิส โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ทำการแปรผันค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

1. ใช้โคแอกกูแลนต์ชนิดพอลิเมอร์ ความเข้มข้น 5 ppm และ 10 ppm (อ้างอิงปริมาณความเข้มข้นจากผู้ผลิต และผลการทดลองเบื้องต้นในปีเคอร์)
2. ใช้ตัวกลางในการทดลองที่ต่างกัน คือ อากาศ และก๊าซไนโตรเจน
3. แปรผันการไหลของอากาศ 3 ค่า
4. ใช้ระยะเวลาในการทำทดลองที่ต่างกันคือ 5 นาที 10 นาที และ 15 นาที
5. วิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังการบำบัด

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคอินดิวิจแอโรโฟลเตซิส โดยมีสมมุติฐานว่าหากปฏิกิริยาโดยใช้ตัวกลางเป็นอากาศให้ประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคแขวนลอยดีกว่าการใช้ตัวกลางที่เป็นไนโตรเจน แสดงว่าออกซิเจนมีส่วนช่วยในการทำปฏิกิริยา

ปัจจัยควบคุม

คุณภาพของน้ำเสีย โดยน้ำเสียต้องมาจากแหล่งเดียวกัน คุณภาพน้ำเสียอาจมีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันขึ้นกับสภาพอากาศเช่น ฝนตก ในการทำการทดลองต้องมีการจดค่าเริ่มต้นของการทดลองไว้ทุกครั้ง

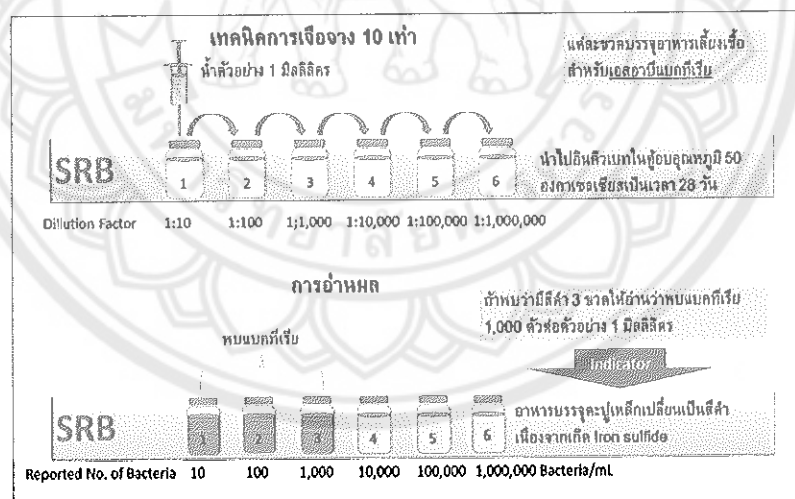
วิธีการทำการทดลอง

1. วัดคุณภาพน้ำเสียเบื้องต้น

ตาราง 5 วิธีการวัดคุณภาพน้ำเสียเบื้องต้น

พารามิเตอร์	วิธีการทดลอง
หาค่าประกอบของสารแขวนลอยในน้ำเสีย	นำไปrun ด้วยเครื่อง XRD
หาค่าพีเอช	pH meter, ASTM-D1253
หาค่าคลอไรด์	วิธีไทเทรชันกับซิลเวอร์ไนเตรท, ASTM-D0512
หาค่าของแข็งละลาย	วัดค่าการนำกระแสไฟฟ้า
หาค่าของแข็งทั้งหมด	วิธีการระเหย
หาขนาดการกระจายตัวของอนุภาคแขวนลอย	เครื่องวัด particle size distribution
หาค่าแบคทีเรียเอสอาบี	เทคนิคการเจือจางสิบเท่า โดยนำไปเพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อ

ที่มา: Patton, C.C., 1995



ภาพ 37 การหาปริมาณแอโรบิคแบคทีเรียและแบคทีเรียเอสอาบีด้วยเทคนิคเจือจางสิบเท่า (NACE Standard TM0194-94 item no.21224)



ภาพ 37 (ต่อ)

2. อิเล็กโตรโพลเตชั่น นำตัวอย่างน้ำเสียมา 2 ลิตร ทำการทดลองโดยแปรผันค่าพารามิเตอร์

ดังตาราง

ตาราง 6 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโพลเตชั่น

อิเล็กโทรด	ตัวแปร		วิเคราะห์					
	กระแสไฟฟ้า (A)	Time, min	pH	Oil & Grease	TSS, mg/l	Turbidity	Cation & Anion	PRD, SRB
BDD & BDD	1	1	/	/	/	/		
SS & SS	3	1	/	/	/	/		
Al & Al	1	2	/	/	/	/		
Fe & Fe	3	2	/	/	/	/		
	1	3	/	/	/	/		
	3	3	/	/	/	/		
	1	4	/	/	/	/		
	3	4	/	/	/	/		
	1	5	/	/	/	/		
	3	5	/	/	/	/		
	Optimum		/	/	/	/	/	/

3. อินดิวิจแอโรโฟลเตชัน นำตัวอย่างน้ำเสียมา 1 ลิตร ทำการทดลองโดยแปรผันค่าพารามิเตอร์ดังตาราง

ตาราง 7 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินดิวิจแอโรโฟลเตชัน

ตัวกลาง	ตัวแปร							วิเคราะห์				
	Polymer, ppm	Flow, gas	Time, min	pH	Oil & Grease	TSS, mg/l	Turbidity	Cation & Anion	PRD, SRB	ตะกอนอินทรีย์	XRD, FTIR	Particle size distribution
อากาศ ไนโตรเจน	5	2	0.5	/	/	/	/					
	5	4	0.5	/	/	/	/					
	5	7	0.5	/	/	/	/					
	5	2	2.5	/	/	/	/					
	5	4	2.5	/	/	/	/					
	5	7	2.5	/	/	/	/					
	5	2	5	/	/	/	/					
	5	4	5	/	/	/	/					
	5	7	5	/	/	/	/					
	5	2	10	/	/	/	/					
	5	4	10	/	/	/	/					
	5	7	10	/	/	/	/					
	5	2	15	/	/	/	/					
	5	4	15	/	/	/	/					
	5	7	15	/	/	/	/					
Optimum								/	/	/	/	/

บทที่ 4

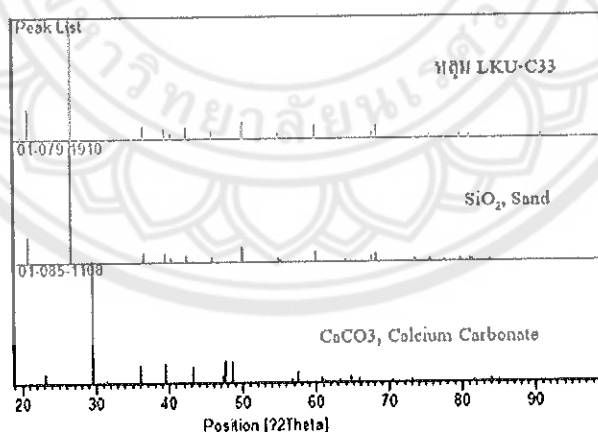
ผลการวิจัย

วิเคราะห์องค์ประกอบของสารแขวนลอย

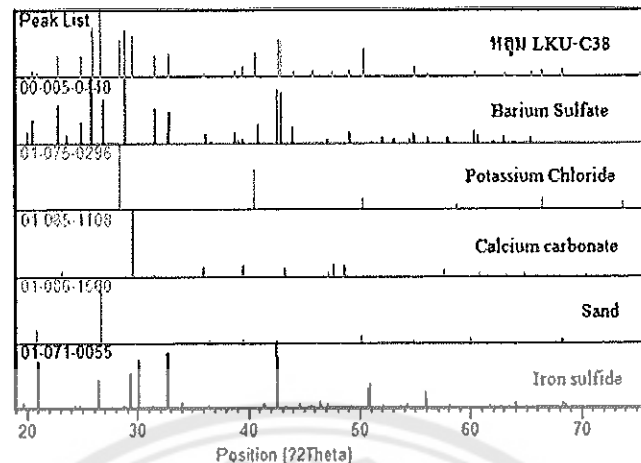
เนื่องจากการหาปริมาณของสารแขวนลอยในน้ำต้องการปริมาณของสารแขวนลอยเป็นจำนวนมาก ซึ่งสารแขวนลอยที่ได้จากการทำการทดลองไม่เพียงพอ จึงจำเป็นต้องเก็บตัวอย่างสารแขวนลอยจากบริเวณใต้หลุมอัดน้ำ ซึ่งเป็นวิธีโดยอ้อมใช้เป็นตัวแทนสารแขวนลอยทั้งหมดได้

สารแขวนลอยเก็บมาจาก 2 แหล่งคือ 1 หลุม LKU-C33 และ หลุม LKU-C38 โดยหลุมทั้งสองรับน้ำที่มาจากแหล่งน้ำทั้งต่างกันคือ หลุม LKU-C33 รับน้ำทิ้งที่มากจากระบบปิดซึ่งปราศจากออกซิเจน และ หลุม LKU-C38 รับน้ำทิ้งที่มากจากระบบเปิด รวมไปถึงน้ำฝน และน้ำที่มากจากระบบการชุดหลumnน้ำมัน ตัวอย่างของแข็งจากหลุม LKU-C33 ถูกเก็บที่ความลึก 2,222 เมตร ตามความยาวของหลุม (along hole) ตัวอย่างของแข็งจากหลุม LKU-C38 ถูกเก็บที่ความลึก 1,354 เมตร ตามความยาวของหลุม (along hole)

1. ผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวอย่างจากหลุม LKU-C33 และ LKU-C38 แสดงตามภาพ 38 และภาพ 39 ตามลำดับ



ภาพ 38 องค์ประกอบของตะกอนในหลุม LKU-C33



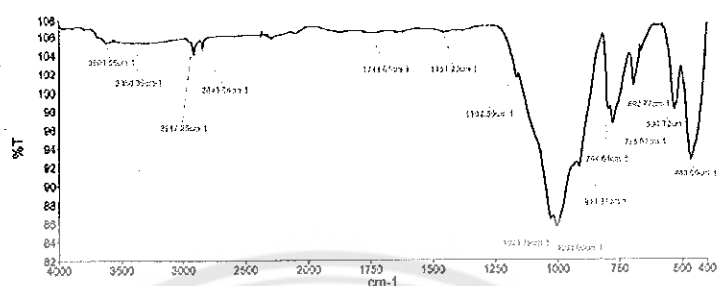
ภาพ 39 องค์ประกอบของตะกอนในหลุม LKU-C38

จากภาพ 35 และภาพ 39 พบว่าตัวอย่างของแข็งจากหลุม LKU-C33 มีองค์ประกอบของตะกอนคือทราย และตะกักรินหินปูน และตัวอย่างของแข็งจากหลุม LKU-C38 มีองค์ประกอบของตะกอนคือตะกักรินแบเรียมซัลเฟต, เกลีสโซโปแตสเซียมคลอไรด์, หินปูน, ทราย และเหล็กซัลไฟด์ ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการอัดน้ำของหลุมทั้งสอง สามารถอธิบายได้ดังนี้

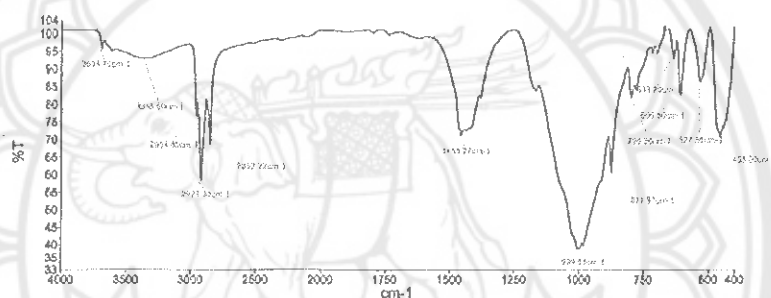
1. หลุม LKU-C33 รับน้ำทั้งที่มากจากระบบปิดสารเคมีที่ละลายในน้ำในแต่ละสปีชีส์ ยังไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จึงไม่พบตะกอนมากนัก โดยตะกอนส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นคือแคลเซียมคาร์บอเนต เกิดจากปัญหาความเข้ากันได้ของน้ำ คือน้ำบางหลุมมีปริมาณคาร์บอเนตสูง บางหลุมมีปริมาณแคลเซียมสูง เมื่อแต่ละหลุมไหลเข้ามาพบกันสมดุลเคมีจึงเปลี่ยนไปทำให้เกิดการตกตะกอน ส่วนทรายที่พบมากจากทรายในแหล่งกักเก็บปิโตรเลียมที่มีโอกาสติดขึ้นมากับน้ำมันระหว่างกระบวนการผลิต

2. หลุม LKU-C38 รับน้ำทั้งที่มาจากระบบเปิด รวมไปถึงน้ำฝน และน้ำที่มากจากระบบการขุดหลุมน้ำมัน น้ำเหล่านี้เมื่อสัมผัสอากาศจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสำหรับโลหะบางชนิด เช่น Fe^{2+} เกิดเป็น Fe^{3+} อีกทั้งระบบเปิดอาจเกิดปฏิกิริยา Anoxic โดยแบคทีเรียประเภท Sulfate reducing bacteria (SRB) เปลี่ยนซัลเฟตให้เกิดเป็นซัลไฟด์ เกิดการตกตะกอนของ Iron sulfide ชนิดต่างๆ คาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศเมื่อสัมผัสกับ produced water จะละลายลงไปในน้ำในรูปคาร์บอเนต เกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ส่วนของโปแตสเซียมคลอไรด์เป็นส่วนผสมของน้ำโคลน (Mud fluid) หรือน้ำเกลือ (brine) ที่ใช้ในกระบวนการขุดเจาะหรือซ่อมหลุมน้ำมัน ตะกอนแบเรียมซัลเฟต สามารถพบได้บ้างเกิดจากการตกตะกอน ของแบเรียมและซัลเฟตที่มีจากแหล่งกักเก็บปิโตรเลียม

2. ผลการวิเคราะห์ IR ของตัวอย่างจากหลุม LKU-C33 และ LKU-C38 แสดงตาม ภาพ 40 และภาพ 41 ตามลำดับ



ภาพ 40 ผล IR ของหลุม LKU-C33



ภาพ 41 ผล IR ของหลุม LKU-C38

จากภาพ 41 และภาพ 42 พบว่า หลุมตัวอย่างของแข็งจากหลุม LKU-C33 ปรากฏพีคของ ไฮโดรคาร์บอนเล็กน้อย ขณะที่ ตัวอย่างของแข็งจากหลุม LKU-C38 ปรากฏพีคของ ไฮโดรคาร์บอนชัดเจนคือที่ 2921 (C-H Stretch), 1455 (C-C Bending) , 796 (C-C Rocking)

3. การวิเคราะห์ค่าความชื้นและสารอินทรีย์ระเหยจากตัวอย่างของแข็งหลุม LKU-C33 และ LKU-C38 เป็นไปดังตาราง 8

ตาราง 8 ผลการการวิเคราะห์ค่าความชื้นและสารอินทรีย์ระเหย

ตัวอย่างของแข็ง	ความชื้น	สารอินทรีย์ระเหย
LKU-C33	24.5%	0.0319 กรัมต่อตะกอนเปียก 1 กรัม
LKU-C38	22.5%	0.1452 กรัมต่อตะกอนเปียก 1 กรัม

4. การหาค่าพีเอช, คลอไรด์, ค่าของแข็งแขวนลอย, ค่าของแข็งทั้งหมด, ค่าของแข็งละลาย, ค่าน้ำมันในน้ำตัวอย่างที่เก็บจากบ่อทิ้งน้ำระบบปิด

เนื่องจากน้ำที่มาจากระบบเปิดอาจมีปริมาณน้ำฝน น้ำทิ้งที่มาจากแท่นขุดเจาะ ซึ่งไม่ใช่ water produced water จริงๆ งานวิจัยนี้จึงทำการทดลองเฉพาะน้ำที่มาจากระบบปิดเท่านั้น

ตาราง 9 ผลการวิเคราะห์ค่าพีเอช, คลอไรด์, ค่าของแข็งแขวนลอย, ค่าของแข็งทั้งหมด, ค่าของแข็งละลาย, ค่าน้ำมันในน้ำตัวอย่างที่เก็บจากบ่อทิ้งน้ำระบบปิด

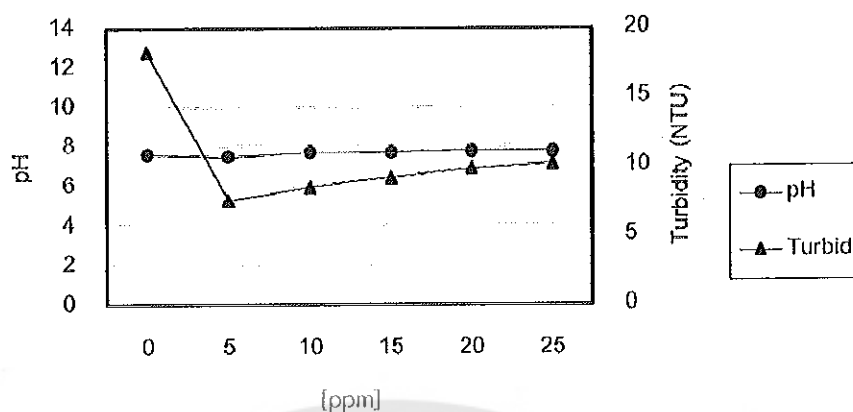
พารามิเตอร์	คุณสมบัติ
พีเอช	7.7
คลอไรด์	8,892 มิลลิกรัมต่อลิตร
ของแข็งแขวนลอย	70 มิลลิกรัมต่อลิตร
ของแข็งทั้งหมด	19,458 มิลลิกรัมต่อลิตร
ของแข็งละลาย	19,388 มิลลิกรัมต่อลิตร

การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีอินดิวิชแอโรไฟลเตชัน (IAF)

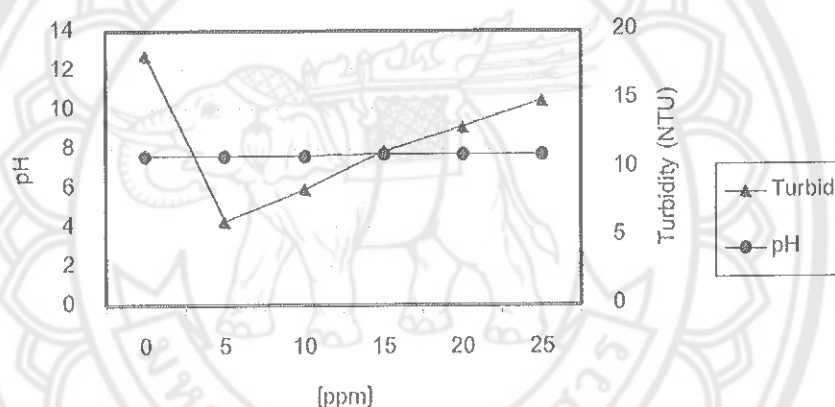
ศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีอินดิวิชแอโรไฟลเตชัน (IAF) ผลกระทบจากการเปลี่ยนชนิดของตัวกลางที่ใช้สร้างฟองจากอากาศเป็นไนโตรเจน พร้อมทั้งศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนขนาดรูพรุนของหัวเติมอากาศ

1. การเลือกโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม

ทำการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคโคแอกกูเลชัน โดยไม่มีการปรับพีเอชเริ่มต้น เพื่อสำรวจความสามารถในการบำบัดน้ำเสียของพอลิเมอร์ 2 ชนิด คือ EC60294A และ Optimer 7194 Plus ของบริษัทนาโลโก้ พร้อมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดโดยอาศัยค่าความขุ่นของน้ำเสีย ในขั้นแรกใช้น้ำเสีย 300 มิลลิลิตร 6 ปีเคเกอร์แปรผันปริมาณสารพอลิเมอร์ 0, 5, 10, 15, 20, 25 พีพีเอ็ม ผลการทดลองการบำบัดน้ำเสียด้วย EC60294A และ Optimer 7194 Plus แสดงดังภาพ 42 และภาพ 43 ตามลำดับ



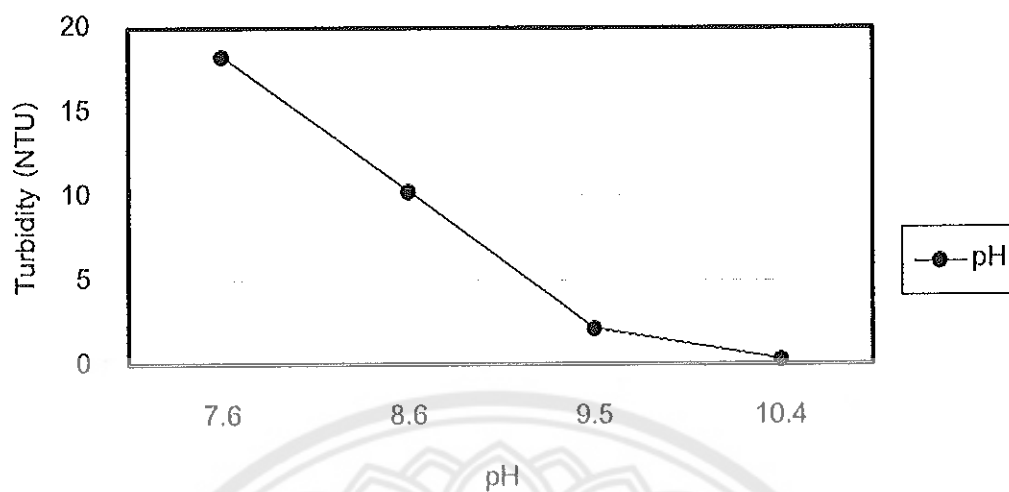
ภาพ 42 การบำบัดความขุ่นของ Coagulant EC60294A



ภาพ 43 การบำบัดความขุ่นของ Optimizer 7194 Plus

จากภาพ 42 และภาพ 43 พบว่าหลังจากผลการทำจาร์เทสแล้ว สารพอลิเมอร์ Optimizer 7194 Plus ให้ผลการบำบัดความขุ่นได้ดีกว่า Coagulant EC60294A ให้ค่าความขุ่นของ Optimizer 7194 Plus ที่เหมาะสมคือ 5 พีพีเอ็ม โดยประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นที่ดีที่สุดสำหรับ สารพอลิเมอร์ Optimizer 7194 Plus และ Coagulant EC60294A ให้ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นที่ 66 เปอร์เซ็นต์ และ 59 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

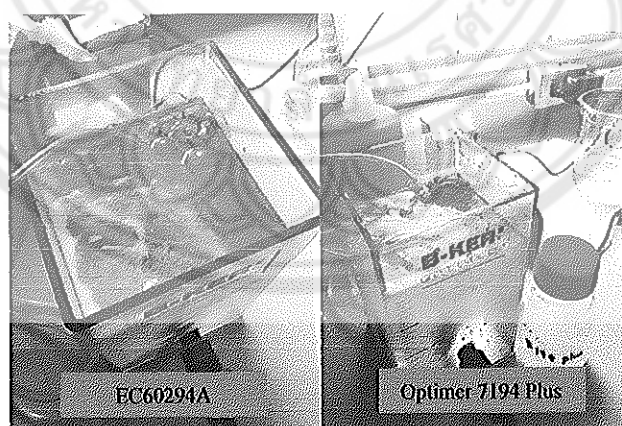
การศึกษาการบำบัดน้ำเสียโดยการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียว โดยไม่มีการเติมสารโคแอกกูแลนต์ เพื่อเปรียบเทียบกับสารพอลิเมอร์เนื่องจากการปรับพีเอชเพียงอย่างเดียวมีค่าการบำบัดที่ต่ำกว่าการใช้สารพอลิเมอร์ การทดลองทำได้โดยเปลี่ยนค่าพีเอชคือ 7.6, 8.6, 9.5, 10.4 ผลการทดลองแสดงดังภาพ 44



ภาพ 44 การบำบัดน้ำเสียโดยการปรับค่าพีเอชเพียงอย่างเดียว

จากภาพ 44 พบว่าที่พีเอช 10.4 สามารถบำบัดค่าความขุ่นลงได้เหลือเพียง 0.34 NTU จากความขุ่นเริ่มต้น 18.3 NTU คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 98%

การศึกษากการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธี IAF โดยการเติมพอลิเมอร์ความเข้มข้น 5 พีพีเอ็ม เปรียบเทียบกับการปรับค่าพีเอชที่ 10.4 ผลการทดลองแสดงตามภาพ 45 และภาพ 46 ตามลำดับ



ภาพ 45 การบำบัดด้วยวิธี IAF ร่วมกับการเติมสารพอลิเมอร์



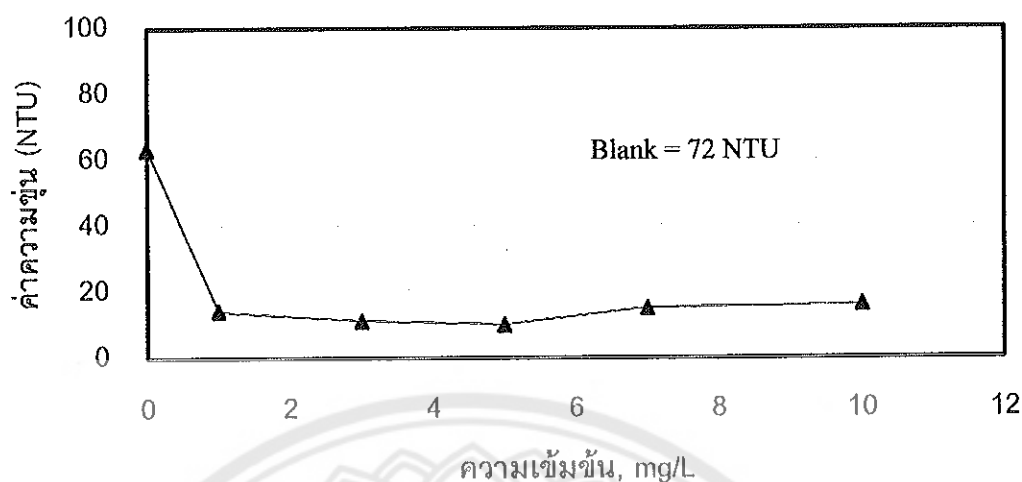
ภาพ 45 (ต่อ)

จากภาพ 45 พบว่าการบำบัดด้วยวิธี IAF ร่วมกับการเติมสารพอลิเมอร์ สามารถทำให้ตะกอนลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้ ซึ่งให้ผลตรงข้ามกับการบำบัดด้วยวิธี IAF ร่วมกับการปรับพีเอชเพียงอย่างเดียวที่ทำให้ตะกอนจมลงสู่ก้นภาชนะ ทั้งนี้สาเหตุของการเติมสารพอลิเมอร์แล้วสามารถทำให้ตะกอนลอย เนื่องจากสารพอลิเมอร์เมื่อดักจับอนุภาคในน้ำและรวมตัวกับฟองอากาศ จะทำให้มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำและลอยตัวขึ้น ซึ่งตรงข้ามกับวิธีปรับพีเอชอย่างเดียวเพราะตะกอนไม่จับกับฟองอากาศทำให้ตะกอนยังคงมีค่าความหนาแน่นมากกว่าน้ำและจมตัวลงสู่ก้นภาชนะ

ผลการเลือกโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมสามารถสรุปได้ว่า สาร Optimer 7194 Plus ให้ผลการบำบัดค่าความขุ่นด้วยเทคนิค IAF ดีที่สุด โดยสามารถลอยตะกอนขึ้นสู่ผิวน้ำได้ ทั้งนี้เทคนิคการปรับพีเอชเพียงอย่างเดียวก็สามารถให้ผลการบำบัดค่าความขุ่นได้ดีเช่นกันแต่ไม่เหมาะกับเทคนิค IAF เนื่องจากไม่สามารถลอยตะกอนขึ้นสู่ผิวน้ำได้

การหาปริมาณแคทไอออนิกพอลิเมอร์ที่เหมาะสมกับวิธีการบำบัดแบบ IAF

นำน้ำเสียใส่ลงในกระบอกตวงขนาด 1 ลิตร จำนวน 6 ใบ ใช้หัวเติมอากาศ Pyrex หมายเลข 2 ปริมาณใบละ 1 ลิตร ทำการแปรผันความเข้มข้นของสาร Optimer 7194 Plus 0, 1, 3, 5, 7, 10 พีพีเอ็ม ตามลำดับ พร้อมทั้งเติมอากาศในอัตรา 4 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที และทิ้งให้ตะกอนลอย 5 นาที ผลการทดลองแสดงตามภาพ 46

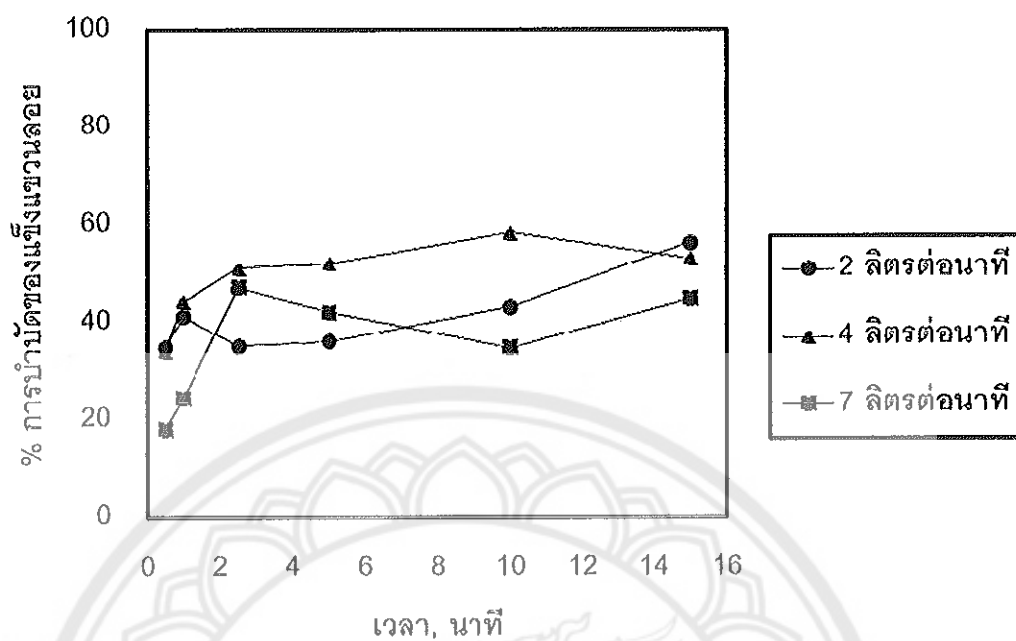


ภาพ 46 การหาปริมาณแคทไอออนิกพอลิเมอร์ที่เหมาะสมกับวิธีการบำบัดแบบ IAF

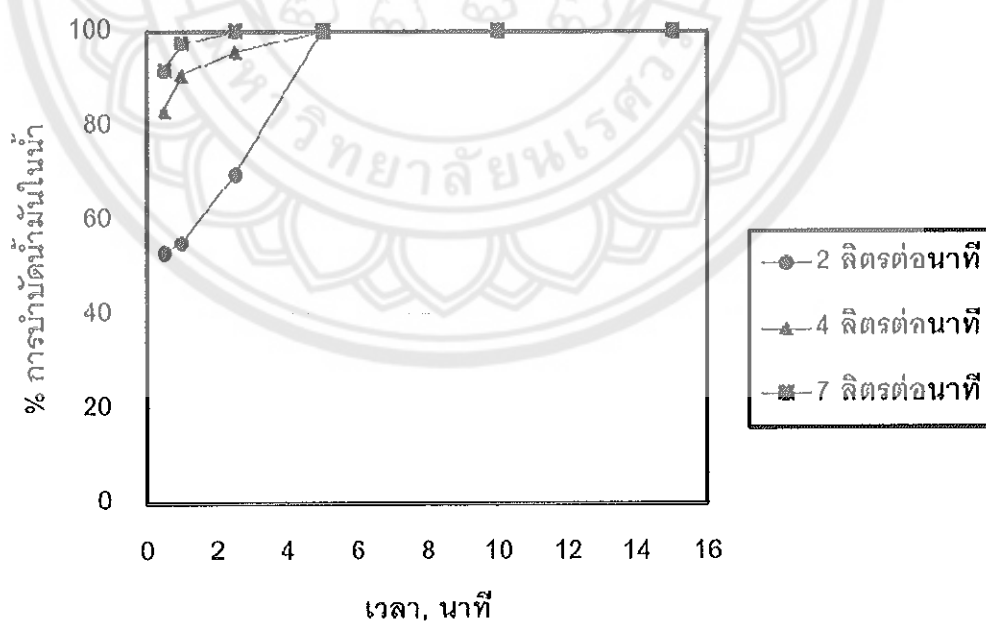
จากภาพ 46 พบว่าปริมาณแคทไอออนิกพอลิเมอร์ที่เหมาะสมกับวิธีการบำบัดแบบ IAF คือ 3 ถึง 5 พีพีเอ็ม สามารถปริมาณความขุ่นจาก 72 NTU ลงได้เหลือ 11 และ 10 NTU ตามลำดับ โดยให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ 83 และ 84 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จากการทดลองยังพบอีกว่าหากเติมสารพอลิเมอร์มากเกินไปจะส่งผลให้น้ำมีความขุ่นหลังบำบัดเพิ่มขึ้น ทั้งอาจเป็นผลเนื่องมาจากการละลายของสารพอลิเมอร์ที่มีมากเกินไปที่ยังคงอยู่ในน้ำเสียหลังบำบัด

การหาปริมาณอัตราการเติมอากาศที่เหมาะสม

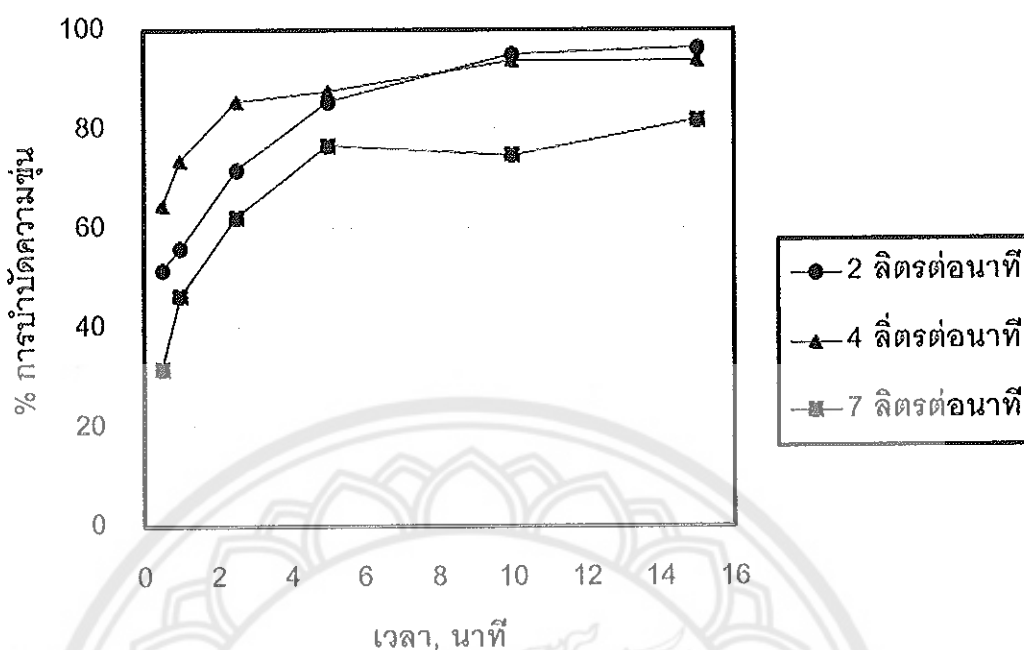
ทำการทดลองในระบบบ่อตวงขนาด 1 ลิตร แปรผันอัตราการเติมอากาศ 2, 4, 7 ลิตรต่อนาที และแปรผันระยะเวลาในการทดลอง 0.5, 1, 2.5, 5, 10, 15 นาที กำหนดความเข้มข้นของสาร Optimizer 7194 Plus ที่ 5 พีพีเอ็ม ทำการหาค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ค่าน้ำมันในน้ำ และค่าความขุ่น ผลการทดลองแสดงดังภาพ 47, ภาพ 48 และภาพ 49 ตามลำดับ



ภาพ 47 การหาอัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอย



ภาพ 48 การหาอัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันในน้ำ



ภาพ 49 การหาอัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดความชุ่ม

จากภาพ 47, ภาพ 48 และภาพ 49 พบว่าอัตราการเติมอากาศที่ 4 ลิตรต่อนาที ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีที่สุดโดยให้ผลการบำบัดของแข็งแขวนลอยทั้งหมด น้ำมันในน้ำ และความชุ่ม 60%, 100% และ 90% ตามลำดับ โดยระยะเวลาในการบำบัดที่เหมาะสมคือตั้งแต่ 2.5 นาทีขึ้นไป

จากการทดลองที่ผ่านมา (ประจักษ์ ศาสตรเวช, 2551) ที่ได้ศึกษาตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ พบว่าค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (a) ค่าความเร็วเกรเดียนท์ (G) หรือค่าความปั่นป่วนของระบบซึ่งมีค่าสูงขึ้นตามอัตราการไหลของอากาศ โดยค่าอัตราส่วน a/G สูงสุดจะให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด

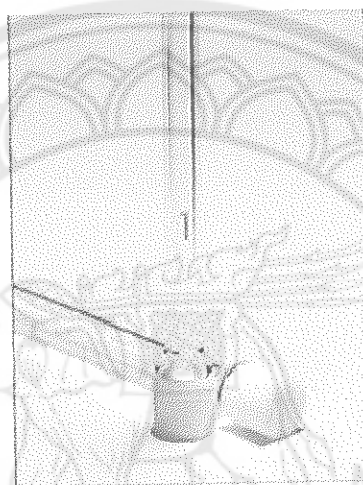
เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองจะพบว่าค่า a ที่อัตราการไหลที่ 7 ลิตรต่อนาที > 4 ลิตรต่อนาที > 2 ลิตรต่อนาที และพิจารณาค่า G จะพบว่าอัตราการไหลที่ 7 ลิตรต่อนาที > 4 ลิตรต่อนาที > 2 ลิตรต่อนาที

เมื่อพิจารณาค่า a ที่อัตราการเติมอากาศที่ 7 ลิตรต่อนาที พบว่าระบบควรให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด แต่เมื่อพิจารณาค่า G พบว่าอัตราการเติมอากาศที่ 7 ลิตรต่อนาทีที่มีค่า G สูงส่งผลต่อเสถียรภาพของฟล็อกที่ไม่ดีกลับฟุ้งกระจายอยู่ในระบบส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพการบำบัดต่ำ ขณะที่อัตราการเติมอากาศ 4 ลิตรต่อนาทีให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดเนื่องจากมีค่า a/G ที่เหมาะสม รองลงมาคือที่ 2 ลิตรต่อนาที ทั้งนี้หากเติมอากาศที่ 2 ลิตรต่อนาทีให้ระยะเวลานานขึ้นก็จะ

ให้ประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกับอัตราการเติมอากาศที่ 4 ลิตรต่อนาที ดังจะเห็นได้จากผลการทดลองที่นาที่ที่ 15

ศึกษาขนาดรูปทรงของหัวเติมอากาศที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด

ใช้หัวเติมอากาศของบริษัท PYREX ชนิดแก้วโบริซิลิเกตที่มีขนาดความพรุนแตกต่างกัน 2 ขนาด หัวเติมอากาศที่มีระดับความพรุน 3 จะให้ฟองก๊าซที่มีความละเอียดมากกว่าหัวเติมอากาศที่มีระดับความพรุน 2 ตามรายละเอียดในตาราง 10



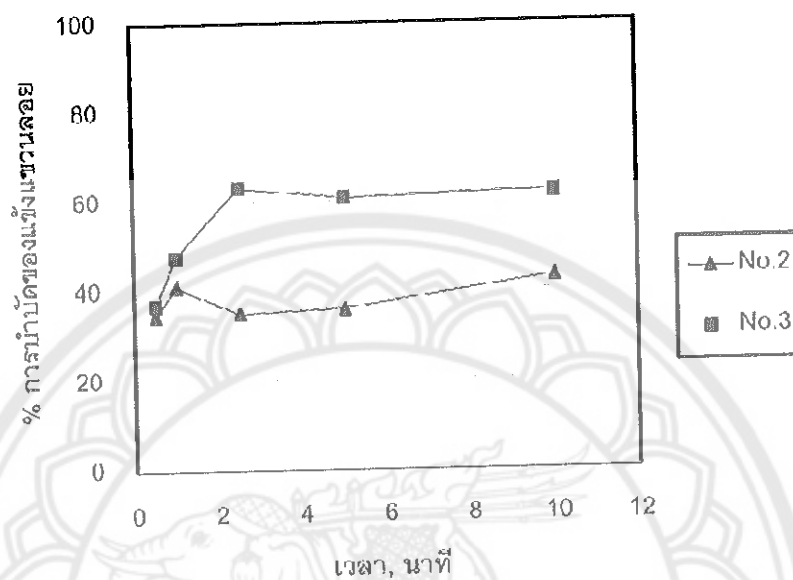
ภาพ 50 ลักษณะหัวเติมอากาศที่ใช้ในการทดลอง

ตาราง 10 ลักษณะของหัวเติมอากาศบริษัท PYREX

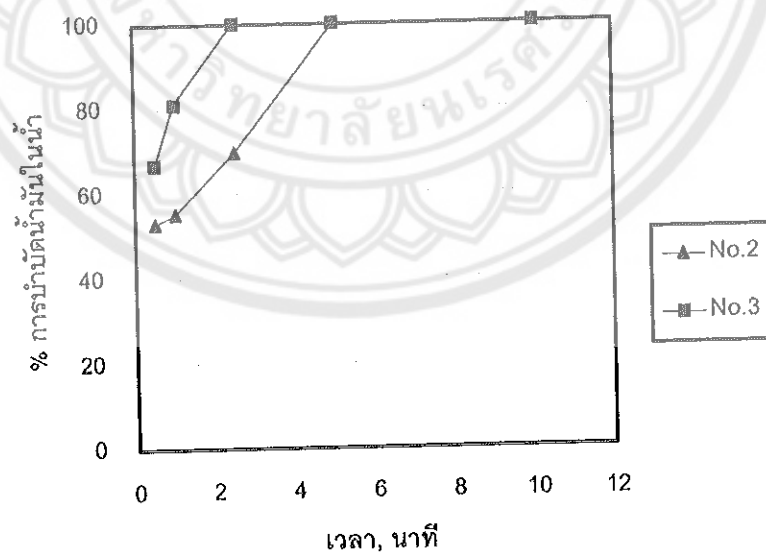
รหัสผลิตภัณฑ์	ระดับความพรุน	เส้นผ่าศูนย์กลางหัวเติมอากาศ, มิลลิเมตร	ความยาวหัวเติมอากาศ, มิลลิเมตร	เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ, มิลลิเมตร
3830'04M	No.2	15	15	8
3830'06M	No.3 (ฟองละเอียดกว่า)	15	15	8

ทำการทดลองในกระบอกตวงขนาด 1 ลิตร กำหนดอัตราการเติมอากาศที่ 2 ลิตรต่อนาที และแปรผันระยะเวลาในการทดลอง 0.5, 1, 2.5, 5, 10 นาที กำหนดความเข้มข้นของสาร Optimizer

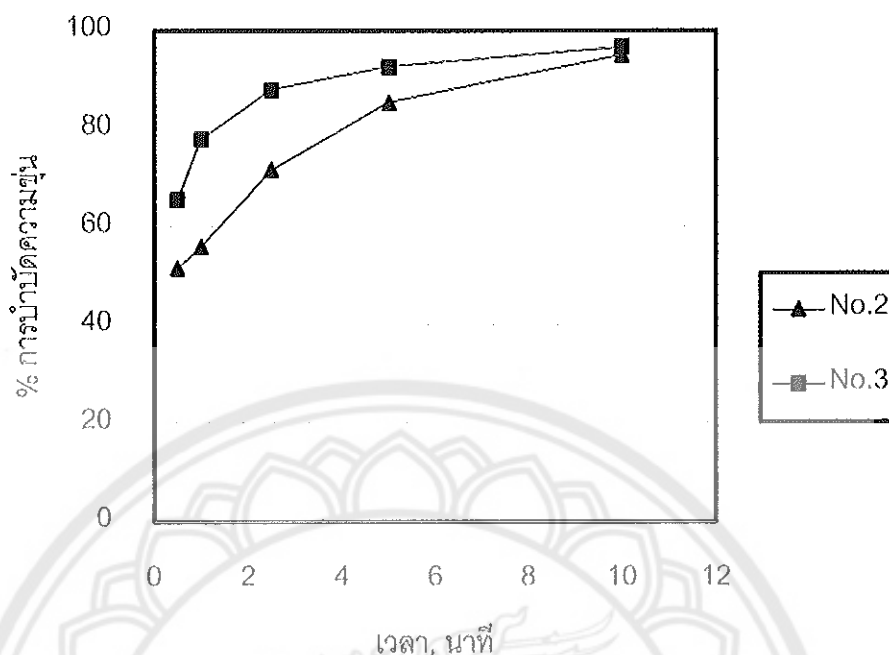
7194 Plus ที่ 5 พีพีเอ็ม ทำการหาค่าของแรงแรงลอนยทั้งหมด ค่าน้ำมันในน้ำ และค่าความขุ่น ผลการทดลองแสดงดังภาพ 51, ภาพ 52 และภาพ 53 ตามลำดับ



ภาพ 51 ผลการศึกษาปัจจัยด้านขนาดรูพรุนของหัวเติมอากาศที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยเปรียบเทียบค่าของแรงแรงลอนย



ภาพ 52 ผลการศึกษาปัจจัยด้านขนาดรูพรุนของหัวเติมอากาศที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยเปรียบเทียบค่าของน้ำมันในน้ำ



ภาพ 53 ผลการศึกษาปัจจัยด้านขนาดรูพรุนของหัวเติมอากาศที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยเปรียบเทียบค่าความชื้น

จากภาพ 51, ภาพ 52 และภาพ 53 พบว่าหัวเติมอากาศที่มีระดับความพรุนเบอร์ 3 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอย น้ำมันในน้ำ และความชื้น ดีกว่าหัวเติมอากาศที่มีระดับความพรุนเบอร์ 2 โดยให้ประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอย น้ำมันในน้ำ และความชื้นสูงสุดที่ 62%, 100%, 97% ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาค่า a/G พบว่าหัวเติมอากาศความพรุนเบอร์ 3 มีความพรุนมากกว่าหัวเติมอากาศเบอร์ 2 ดังนั้นหัวเติมอากาศเบอร์ 3 จะให้พื้นที่ผิวสัมผัสของอากาศมากกว่าเพราะให้ฟองอากาศขนาดเล็กกว่า เมื่อพิจารณาที่อัตราการไหลของอากาศที่เท่ากัน จะได้สมการดังนี้

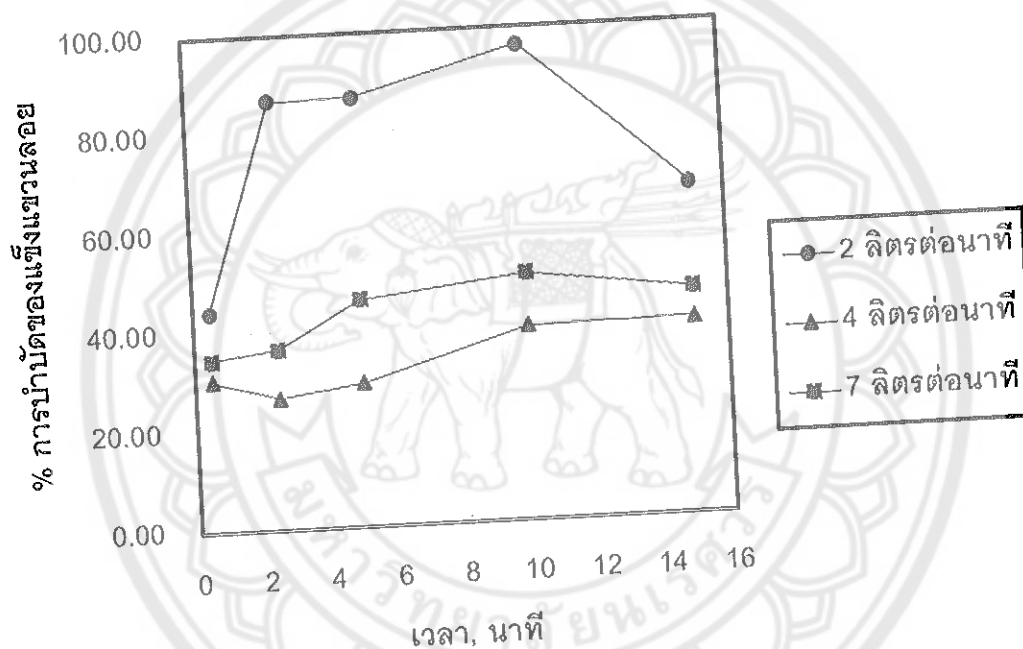
$$\frac{a \text{ (หัวเติมอากาศเบอร์ 3)}}{G} > \frac{a \text{ (หัวเติมอากาศเบอร์ 2)}}{G}$$

จากสมการข้างต้นซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองจึงสามารถสรุปได้ว่าฟองอากาศขนาดเล็กจะให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่

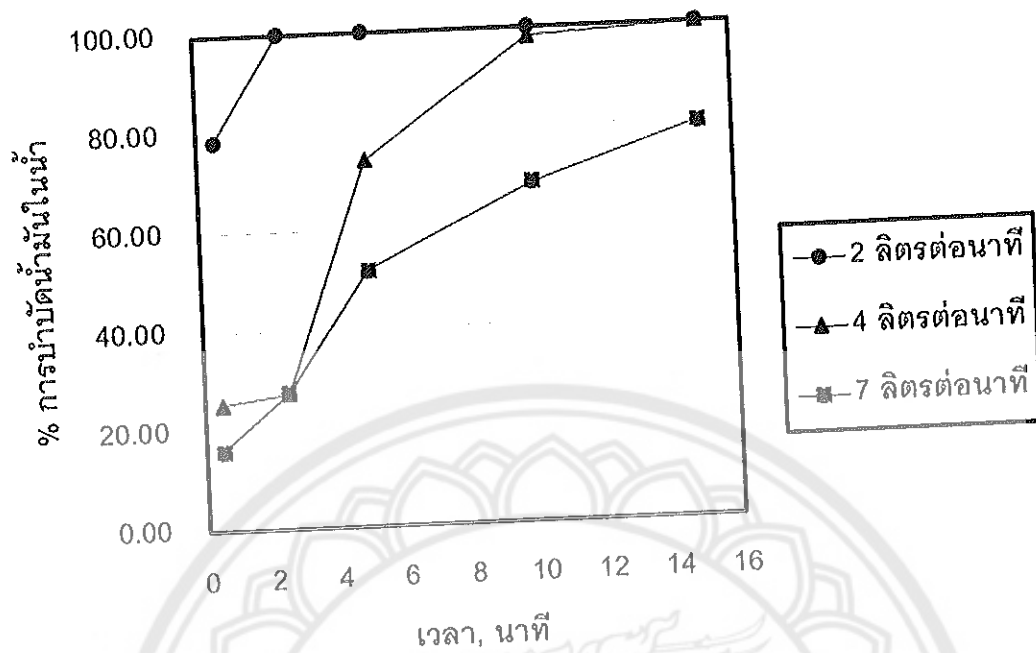
ศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนชนิดของตัวกลางที่ใช้สร้างฟองจากอากาศเป็นไนโตรเจน

1. การหาปริมาณอัตราการเติมไนโตรเจนที่เหมาะสม

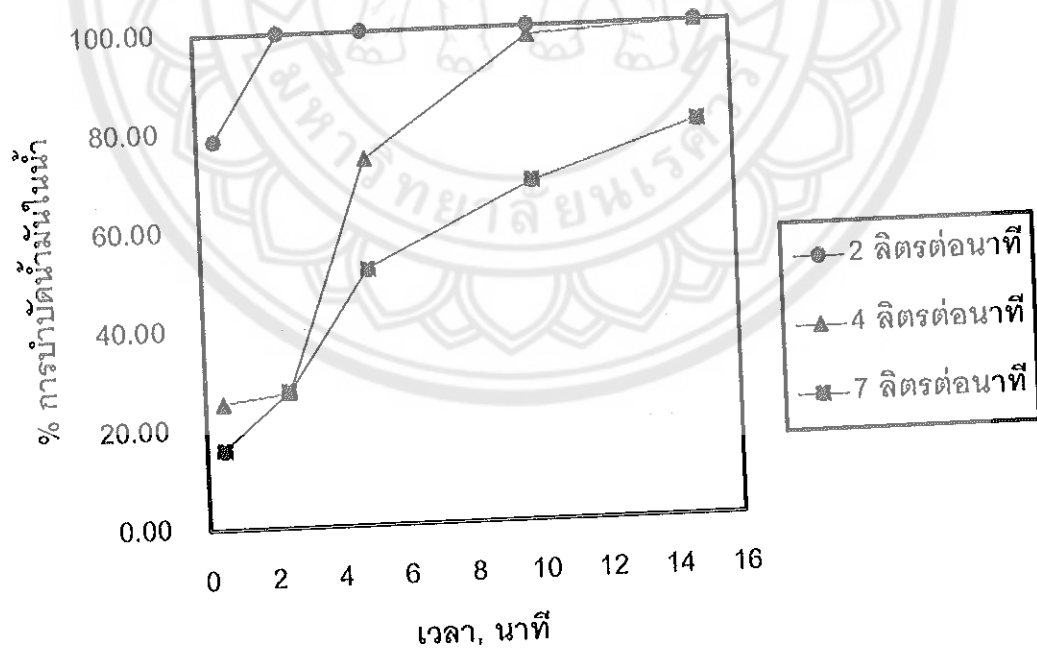
ทำการทดลองในระบบอกตวงขนาด 1 ลิตร แปรผันอัตราการเติมก๊าซไนโตรเจน 2, 4, 7 ลิตรต่อนาที และแปรผันระยะเวลาในการทดลอง 0.5, 2.5, 5, 10, 15 นาที กำหนดความเข้มข้นของสาร Optimer 7194 Plus ที่ 5 พีพีเอ็ม ทำการหาค่าของแรงแขวนลอยทั้งหมด ค่าน้ำมันในน้ำ และค่าความขุ่น ผลการทดลองแสดงดังภาพ 54, ภาพ 55 และภาพ 56 ตามลำดับ



ภาพ 54 การหาอัตราการเติมไนโตรเจนที่เหมาะสมโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอย น้ำมันในน้ำและความขุ่น



ภาพ 55 การหาอัตราการเติมไนโตรเจนที่เหมาะสมโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอย น้ำมันในน้ำและความขุ่น



ภาพ 56 การหาอัตราการเติมไนโตรเจนที่เหมาะสมโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอย น้ำมันในน้ำและความขุ่น

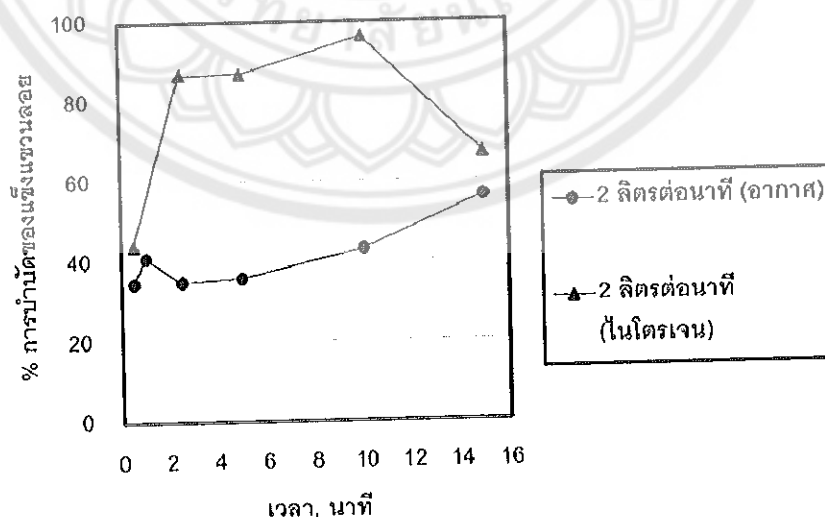
จากภาพ 54, ภาพ 55 และภาพ 56 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดจะลดลงเมื่ออัตราการเติมไนโตรเจนเพิ่มขึ้น โดยอัตราการเติมไนโตรเจนที่ 2 ลิตรต่อนาที่ ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดดีที่สุด โดยให้ผลการบำบัดของแข็งแขวนลอยทั้งหมด น้ำมันในน้ำ และความขุ่นเท่ากับ 86%, 100% และ 87% ตามลำดับ โดยระยะเวลาในการบำบัดที่เหมาะสมคือตั้งแต่ 5 นาทีขึ้นไป

ประสิทธิภาพการบำบัดที่ลดลงเมื่ออัตราการเติมไนโตรเจนเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการไหลของไนโตรเจนที่สูงเกินไปทำให้เกิดความปั่นป่วน (G) ของการสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับอนุภาคน้ำมัน และระยะเวลาในการสัมผัสของฟองอากาศกับอนุภาคน้ำมันในคอลัมน์ลดลง

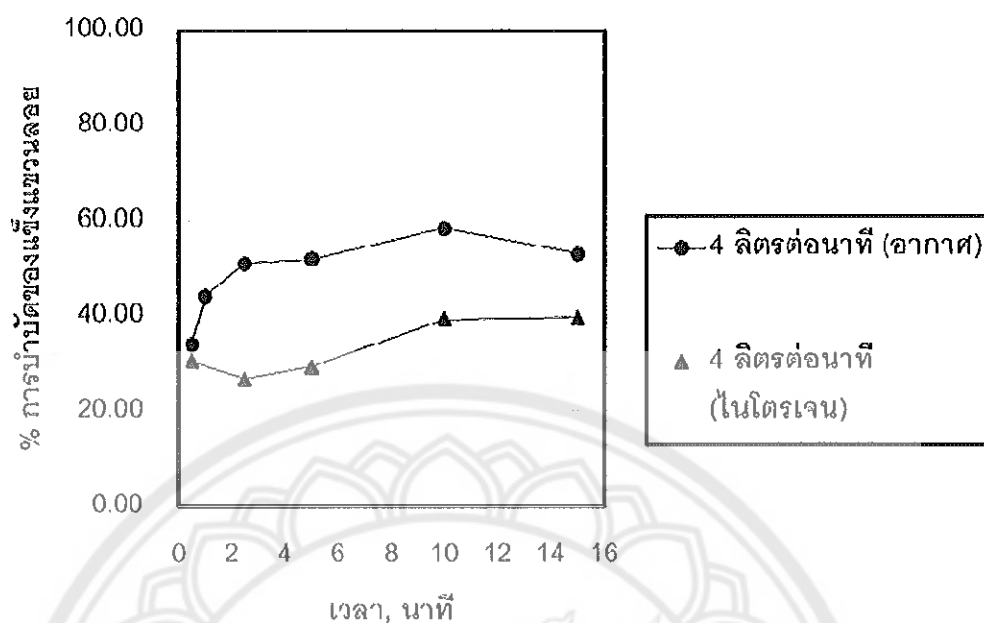
2. เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการบำบัดโดยวิธีเติมอากาศและวิธีเติมไนโตรเจน

นำผลการทดลองจากหัวข้อที่ 1 และ 2 มาทำการสร้างกราฟเปรียบเทียบเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอย น้ำมันในน้ำ และความขุ่น โดยวิธีเติมอากาศและวิธีเติมไนโตรเจนที่อัตราการเติมก๊าซต่างๆ กัน โดยทำการทดลองร่วมกับการเติมสารพอลิเมอร์ Optimer 7194 Plus

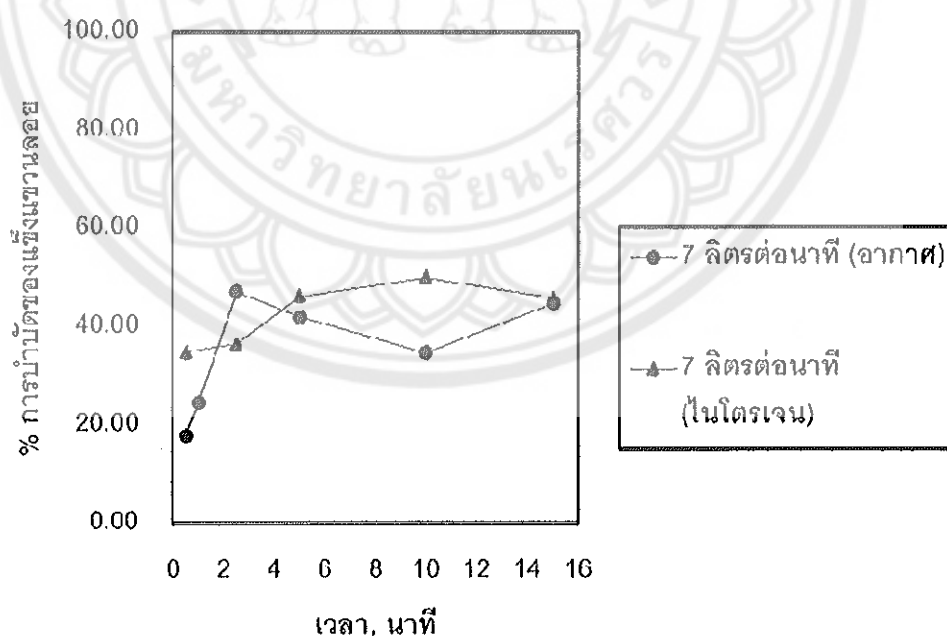
จากภาพ 57, ภาพ 58 และภาพ 59 พบว่าที่อัตราการเติมก๊าซ 2 ลิตรต่อนาที่ การบำบัดโดยการเติมไนโตรเจนจะให้ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยดีกว่าอากาศ โดยให้ผลตรงข้ามกับอัตราการเติมก๊าซ 4 ลิตรต่อนาที่ การบำบัดโดยการเติมอากาศจะให้ผลที่ดีกว่าการบำบัดโดยการเติมไนโตรเจน



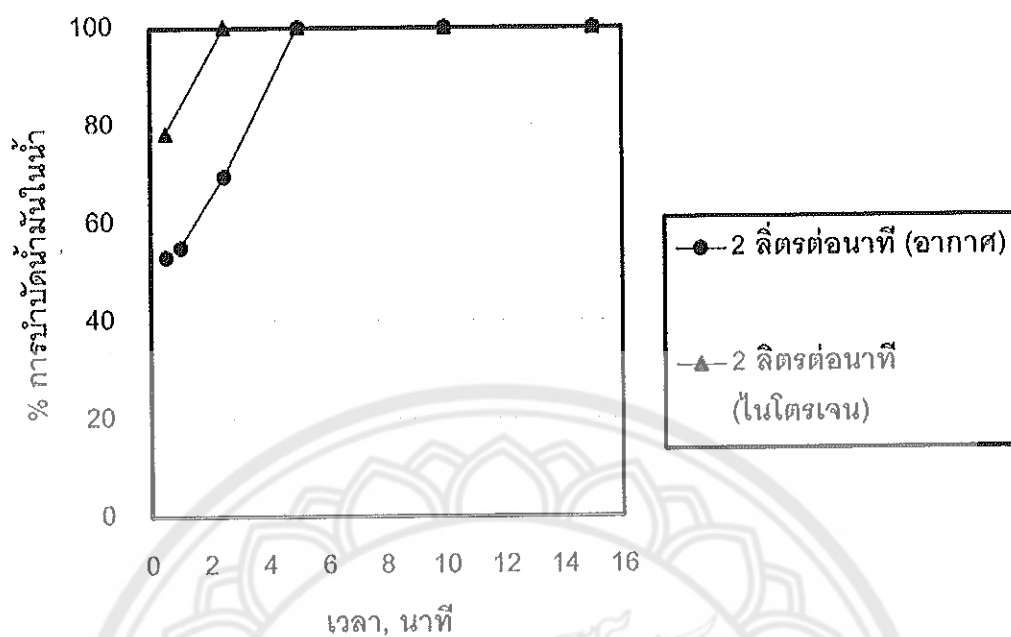
ภาพ 57 การเปรียบเทียบผลการบำบัดของแข็งแขวนลอยระหว่างวิธีเติมอากาศและวิธีเติมไนโตรเจน ที่อัตราการเติมก๊าซ 2 ลิตรต่อนาที่ตามลำดับ



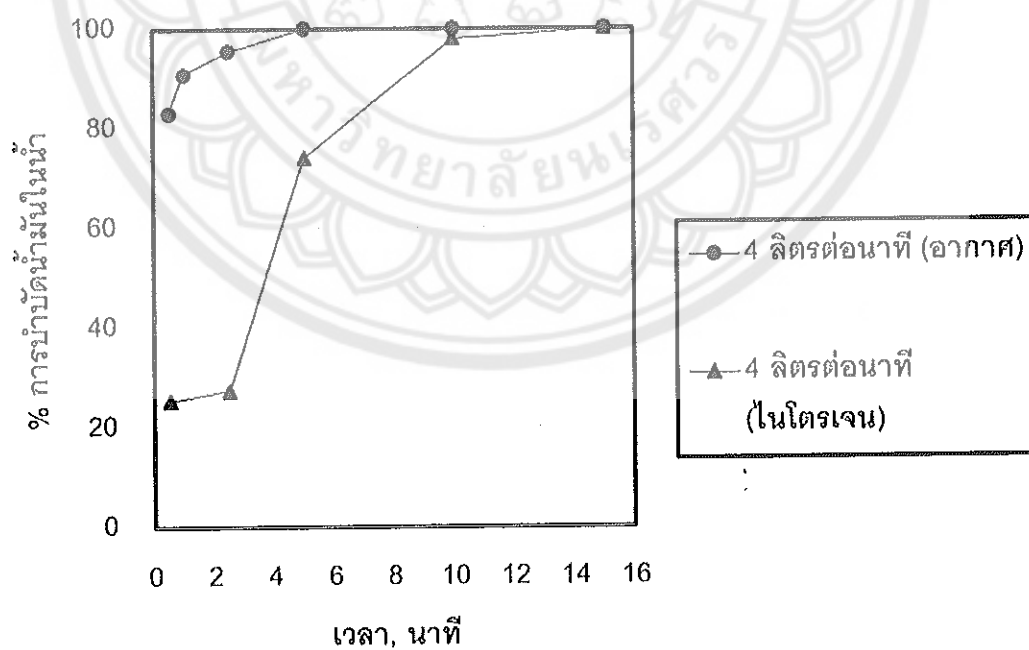
ภาพ 58 การเปรียบเทียบผลการนำออกซิเจนเข้าร่างกายของวิธีเติมอากาศและวิธีเติมไนโตรเจน ที่อัตราการเติมก๊าซ 4 ลิตรต่อนาทีตามลำดับ



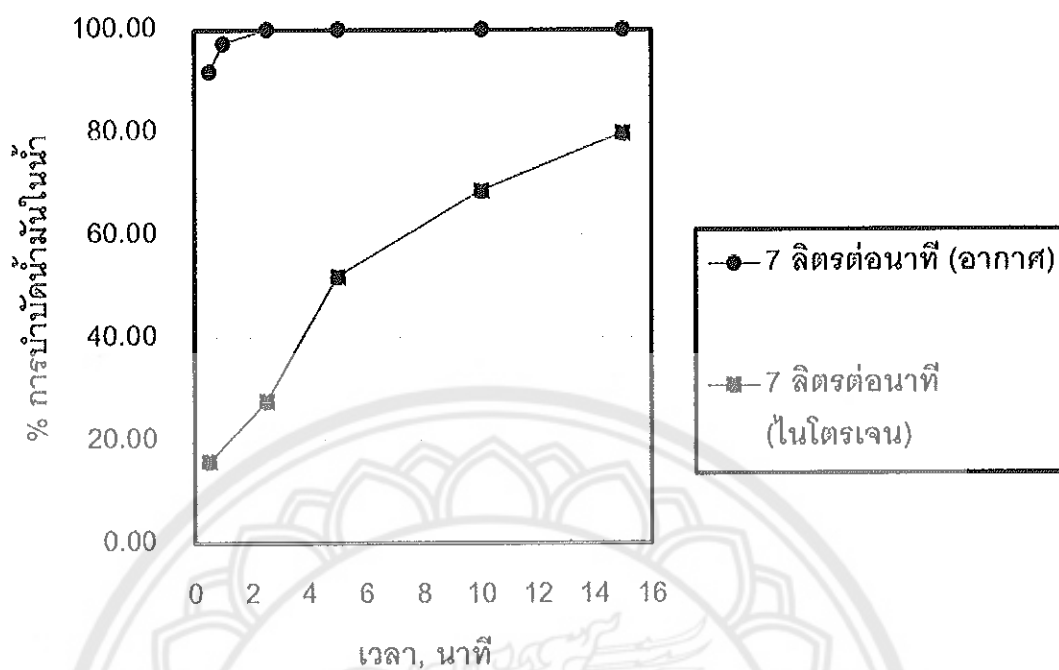
ภาพ 59 การเปรียบเทียบผลการนำออกซิเจนเข้าร่างกายของวิธีเติมอากาศและวิธีเติมไนโตรเจน ที่อัตราการเติมก๊าซ 7 ลิตรต่อนาทีตามลำดับ



ภาพ 60 การเปรียบเทียบผลการบำบัดน้ำมันในน้ำระหว่างวิธีเติมอากาศและวิธีเติมไนโตรเจน ที่อัตราการเติมก๊าซ 2 ลิตรต่อนาทีตามลำดับ

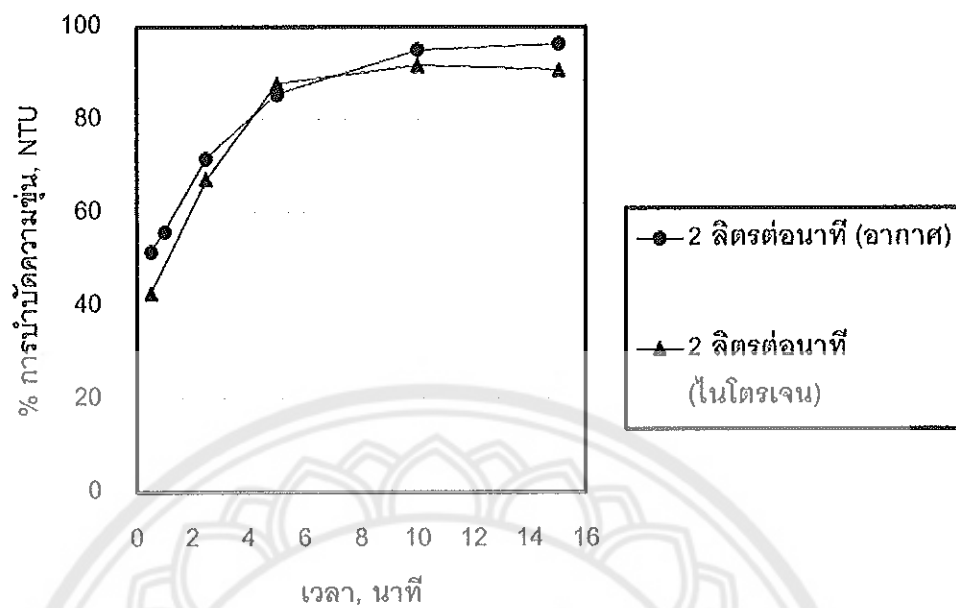


ภาพ 61 การเปรียบเทียบผลการบำบัดน้ำมันในน้ำระหว่างวิธีเติมอากาศและวิธีเติมไนโตรเจน ที่อัตราการเติมก๊าซ 4 ลิตรต่อนาทีตามลำดับ

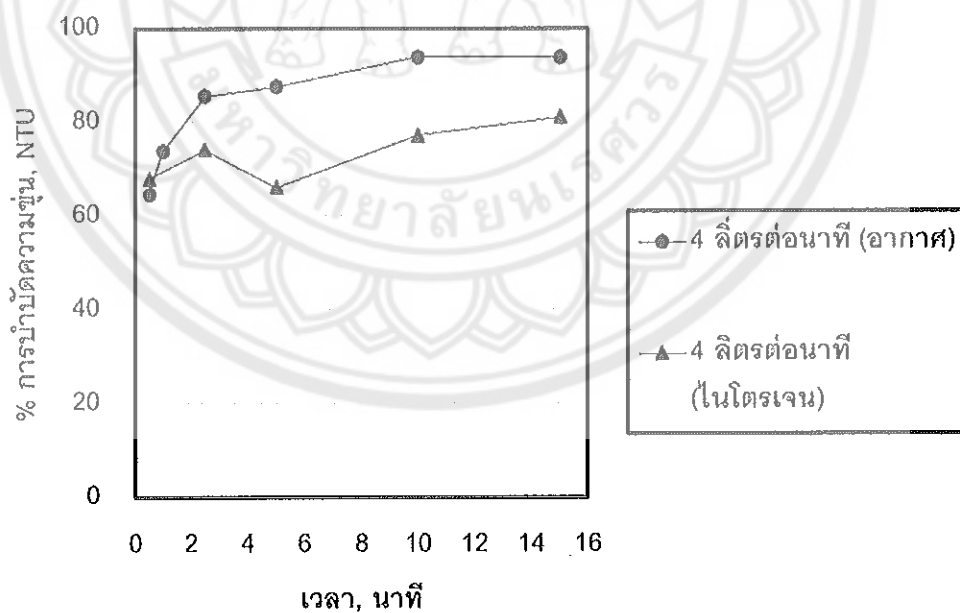


ภาพ 62 การเปรียบเทียบผลการบำบัดน้ำมันในน้ำระหว่างวิธีเติมอากาศและวิธีเติมไนโตรเจน ที่อัตราการเติมก๊าซ 7 ลิตรต่อนาทีตามลำดับ

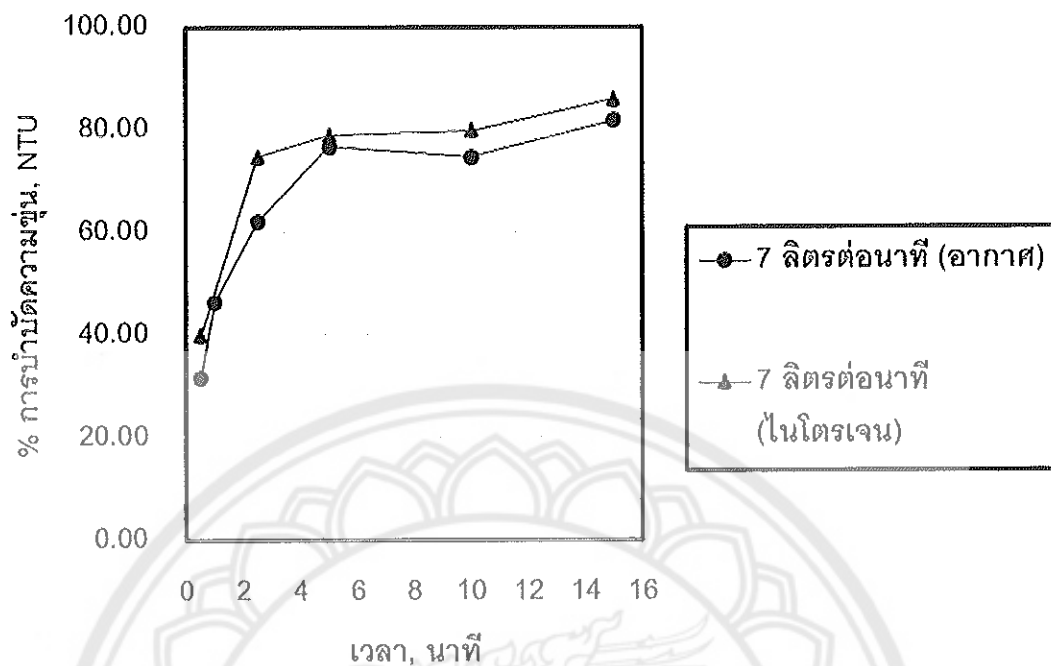
จากภาพ 60, ภาพ 61 และภาพ 62 พบว่าเมื่ออัตราการเติมอากาศเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำมันในน้ำด้วยการเติมไนโตรเจนจะลดลงในขณะที่ ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำมันด้วยการเติมอากาศให้ผลที่ค่อนข้างให้ผลคงที่ซึ่งมีแนวโน้มผลการบำบัดเป็นไปตามการบำบัดของแข็งแขวนลอย



ภาพ 63 การเปรียบเทียบผลการบำบัดความขุ่นระหว่างวิธีเติมอากาศและวิธีเติมไนโตรเจน ที่อัตราการเติมก๊าซ 2 ลิตรต่อนาทีตามลำดับ



ภาพ 64 การเปรียบเทียบผลการบำบัดความขุ่นระหว่างวิธีเติมอากาศและวิธีเติมไนโตรเจน ที่อัตราการเติมก๊าซ 4 ลิตรต่อนาทีตามลำดับ



ภาพ 65 การเปรียบเทียบผลการบำบัดความขุ่นระหว่างวิธีเติมอากาศและวิธีเติมไนโตรเจน ที่อัตราการเติมก๊าซ 7 ลิตรต่อนาที่ตามลำดับ

จากภาพ 57 ถึงภาพ 65 พบว่าอัตราการเติมไนโตรเจนที่มากเกินไปจะทำให้การไหลของก๊าซในถังปฏิกรณ์ที่ปั่นป่วนเกินไป ส่งผลให้ฟลักซ์ที่ได้ไม่มีเสถียรภาพและกลับฟุ้งกระจายอยู่ในระบบ ซึ่งตรงข้ามกับการเติมอากาศ เนื่องจากการเติมอากาศ สารเฟอร์รัสที่มีอยู่ในน้ำจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เปลี่ยนไปเป็นเฟอร์ริก ประกอบกับในสารละลายมีคลอไรด์ละลายอยู่เป็นจำนวนมาก ระบบจึงเปรียบเสมือนมีการเติมสารเฟอร์ริกคลอไรด์ ซึ่งเป็นสารโคแอกกูแลนซ์เฮดและจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษากระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับการเติมอากาศ พบว่าสารโคแอกกูแลนซ์สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันได้สูงขึ้น



ภาพ 66 ลักษณะของน้ำตัวอย่างเมื่อสัมผัสกับออกซิเจนเปรียบเทียบกับ ไม่สัมผัสออกซิเจน

จากภาพ 66 แสดงลักษณะของน้ำตัวอย่างเมื่อสัมผัสกับออกซิเจนเปรียบเทียบกับไม่สัมผัสออกซิเจน พบว่าน้ำตัวอย่างที่สัมผัสออกซิเจนมีการเปลี่ยนสีจากสีดำไปเป็นสีเหลือง ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของเฟอร์รัส (Fe^{2+}) เปลี่ยนไปเป็นเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ซึ่งสนับสนุนสมมติฐานของการบำบัดที่ดีกว่าเนื่องจากเปรียบเสมือนมีการเติมสารเฟอร์ริกคลอไรด์ เมื่อตัวอย่างสัมผัสออกซิเจน

จากผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการบำบัดโดยวิธีเติมอากาศและวิธีเติมไนโตรเจน สามารถสรุปประสิทธิภาพการบำบัดได้ดังนี้

1. วิธีเติมไนโตรเจนให้ประสิทธิภาพการบำบัดดีที่สุดที่อัตรา 2 ลิตรต่อนาที่
2. วิธีเติมอากาศให้ประสิทธิภาพการบำบัดดีที่สุดที่อัตรา 4 ลิตรต่อนาที่
3. อัตราการเติมก๊าซที่ 7 ลิตรต่อนาที่ พบว่ามีความปั่นป่วนมากเกินไปจึงไม่

เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการบำบัด

ผลการศึกษาค่าสัดส่วนปริมาณอากาศต่อปริมาณสารแขวนลอย (มิลลิลิตรอากาศต่อมิลลิกรัมสารแขวนลอย)

A/S คือ ค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณอากาศต่อปริมาณสารแขวนลอย สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\frac{A}{S} = \frac{1.3s_a(f \cdot P - 1)R}{s_a \cdot Q}$$

S_a	=	ปริมาณอากาศที่ละลายอยู่ในน้ำ (มิลลิลิตรต่ออนาทิ)
S_a	=	ความเข้มข้นของสารแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
f	=	ประสิทธิภาพที่อากาศสามารถละลายในน้ำ
P	=	ค่าความดันอากาศ (atm)
R	=	อัตราการไหลของน้ำผ่านปั๊ม (ลิตรต่ออนาทิ)
Q	=	อัตราการไหลของน้ำเสีย (ลิตรต่ออนาทิ)

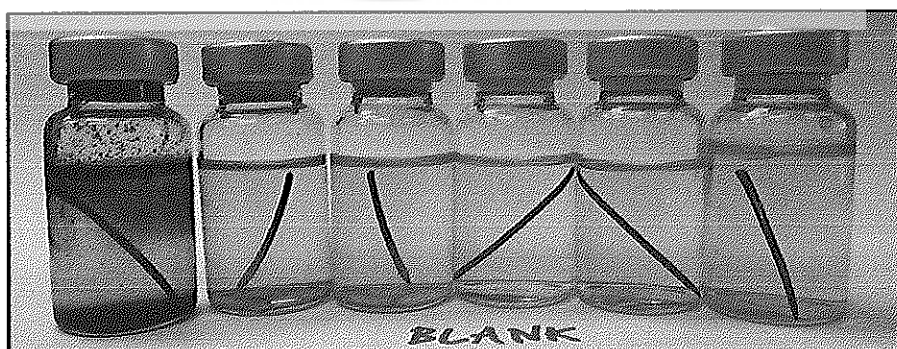
ตาราง 11 สรุปผลการศึกษาค่าสัดส่วนปริมาณอากาศต่อปริมาณสารแขวนลอยที่เหมาะสม

ก๊าซ	อัตราการเติมก๊าซ, A (มิลลิลิตรต่ออนาทิ)	ของแข็งแขวนลอย, S (มิลลิกรัมต่อลิตร)	A/S (มิลลิลิตรอากาศต่อมิลลิกรัม ของแข็งแขวนลอย)
ไนโตรเจน	2000	65	30.7
อากาศ	4000	65	61.5

จากตาราง 11 พบว่าอัตรา A/S ที่เหมาะสมสำหรับบำบัดน้ำ Produced water ด้วยวิธีการเติมไนโตรเจนและอากาศ ร่วมกับสารพอลิเมอร์ คือ 30.7 และ 61.5 ตามลำดับ

ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียชนิดต่างๆ โดยใช้หัวเติมอากาศที่มีขนาดความพรุนแตกต่างกัน

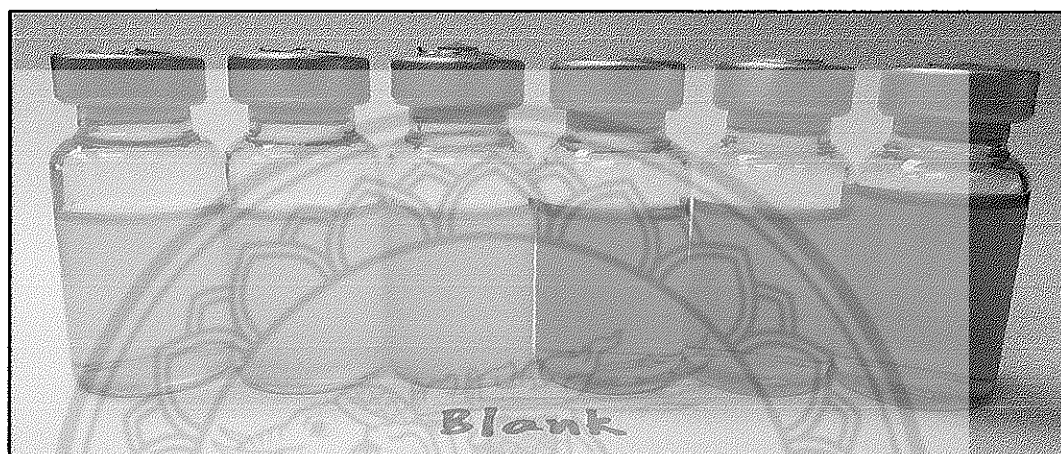
การหาปริมาณเซลล์เฟสที่เจริญหรือเซลล์ที่ตายก่อนบำบัดด้วยวิธี Serial Dilution ผลการทดลองตามภาพ 67



ภาพ 67 ผลการหาปริมาณเซลล์เฟสที่เจริญหรือเซลล์ที่ตายของน้ำตัวอย่าง

จากภาพ 67 พบว่ามีปริมาณเอสอาร์บีแบคทีเรียในน้ำเสียของระบบปิด 10 แบคทีเรียต่อปริมาณน้ำ 1 มิลลิลิตร

การหาปริมาณแบคทีเรียสร้างกรด (acid forming bacteria) ก่อนการบำบัด ด้วยวิธี Serial Dilution ผลการทดลองตามภาพ 68

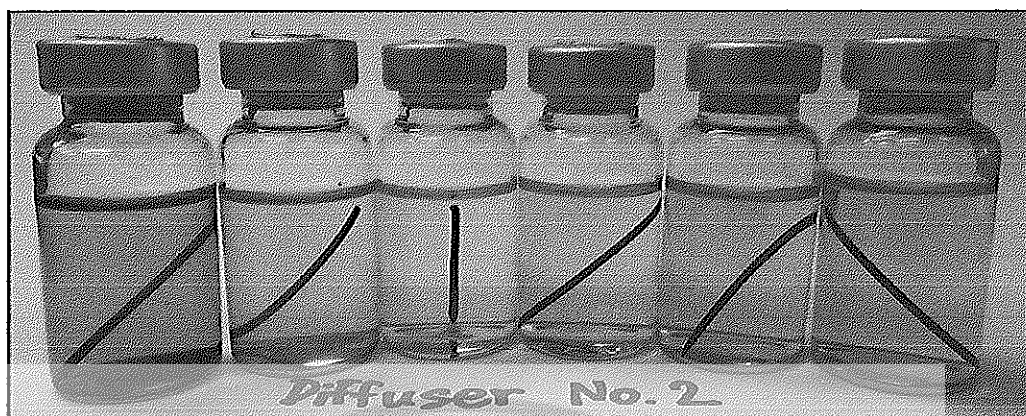


ภาพ 68 ผลการหาปริมาณแบคทีเรียสร้างกรดของน้ำตัวอย่าง

จากภาพ 68 พบว่ามีปริมาณเอสอาร์บีแบคทีเรีย 1000 แบคทีเรียต่อปริมาณน้ำ 1 มิลลิลิตร

ผลการหาปริมาณซัลเฟตรีดิวซ์แบคทีเรียหลังการบำบัดด้วยการเติมอากาศ โดยใช้หัวเติมอากาศที่มีขนาดความพรุนแตกต่างกัน

ทำการทดลองบำบัดน้ำเสียในกระบอกตวงขนาด 1 ลิตร ใช้หัวเติมอากาศเบอร์ 2 และเบอร์ 3 ตามลำดับ กำหนดอัตราการเติมอากาศที่ 4 ลิตรต่อนาที และแปรผันระยะเวลาในการทดลอง 10 นาที กำหนดความเข้มข้นของสาร Optimer 7194 Plus ที่ 5 พีพีเอ็ม เมื่อทำการทดลองเสร็จทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 10 นาที นำน้ำตัวอย่างหลังบำบัดปริมาณ 1 มิลลิลิตร มาทำการหาปริมาณซัลเฟตรีดิวซ์แบคทีเรียด้วยวิธี Serial Dilution ผลการทดลองตามภาพ 69



ภาพ 69 ผลการหาปริมาณซัลเฟตริตวซึ่งแบคทีเรียของน้ำตัวอย่างหลังบำบัด
ด้วยวิธีเติมอากาศโดยใช้หัวเติมอากาศเบอร์ 2



ภาพ 70 ผลการหาปริมาณซัลเฟตริตวซึ่งแบคทีเรียของน้ำตัวอย่างหลังบำบัด
ด้วยวิธีเติมอากาศโดยใช้หัวเติมอากาศเบอร์ 3

จากภาพ 69 และภาพ 70 พบว่าหัวเติมอากาศเบอร์ 2 และเบอร์ 3 ให้ผลการบำบัด
เท่ากัน โดยสามารถแปลผลเป็นปริมาณแบคทีเรียในน้ำเสียของระบบปิด 10 แบคทีเรียต่อปริมาณ
น้ำ 1 มิลลิลิตร และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณแบคทีเรียกับน้ำก่อนบำบัดพบว่า การเติมอากาศด้วย
หัวเติมอากาศเบอร์ 2 และเบอร์ 3 ไม่สามารถกำจัดแบคทีเรียได้

ผลการหาปริมาณแบคทีเรียสร้างกรดหลังการบำบัดด้วยการเติมอากาศ โดยใช้หัว
เติมอากาศที่มีขนาดความพรุนแตกต่างกัน

ทำการทดลองโดยใช้ตัวอย่างผลการทดลองตามภาพ 71



ภาพ 71 ผลการหาปริมาณแบคทีเรียสร้างกรดของน้ำตัวอย่างหลังบำบัดด้วยวิธีเติมอากาศโดยใช้หัวเติมอากาศเบอร์ 2



ภาพ 72 ผลการหาปริมาณแบคทีเรียสร้างกรดของน้ำตัวอย่างหลังบำบัดด้วยวิธีเติมอากาศโดยใช้หัวเติมอากาศเบอร์ 3

จากภาพ 71 และภาพ 72 พบว่าหัวเติมอากาศเบอร์ 3 ให้ผลการบำบัดแบคทีเรียสร้างกรดดีกว่า หัวเติมอากาศเบอร์ 2 อยู่ 1 ขวด สามารถแปลผลการทดลองได้ดังนี้คือ หัวเติมอากาศเบอร์ 2 พบปริมาณแบคทีเรียหลังบำบัดแล้ว 1,000 แบคทีเรียต่อปริมาณน้ำ 1 มิลลิลิตร และหัวเติมอากาศเบอร์ 3 พบปริมาณแบคทีเรียหลังบำบัดแล้ว 100 แบคทีเรียต่อปริมาณน้ำ 1 มิลลิลิตร จากผลการทดลองข้างต้นพบว่าหัวเติมอากาศเบอร์ 3 สามารถกำจัดแบคทีเรียได้ 90 เปอร์เซ็นต์

ตาราง 12 สรุปผลการบำบัดแบคทีเรียจากวิธีเติมอากาศ

หัวเติมอากาศ	ประสิทธิภาพการบำบัด			
	เอสอาร์บี		แบคทีเรียสร้างกรด	
	No. Bacteria	% การกำจัด	No. Bacteria	% การกำจัด
ก่อนบำบัด	10	0	1000	0
No.2	10	0	1000	0
No.3	10	0	100	90

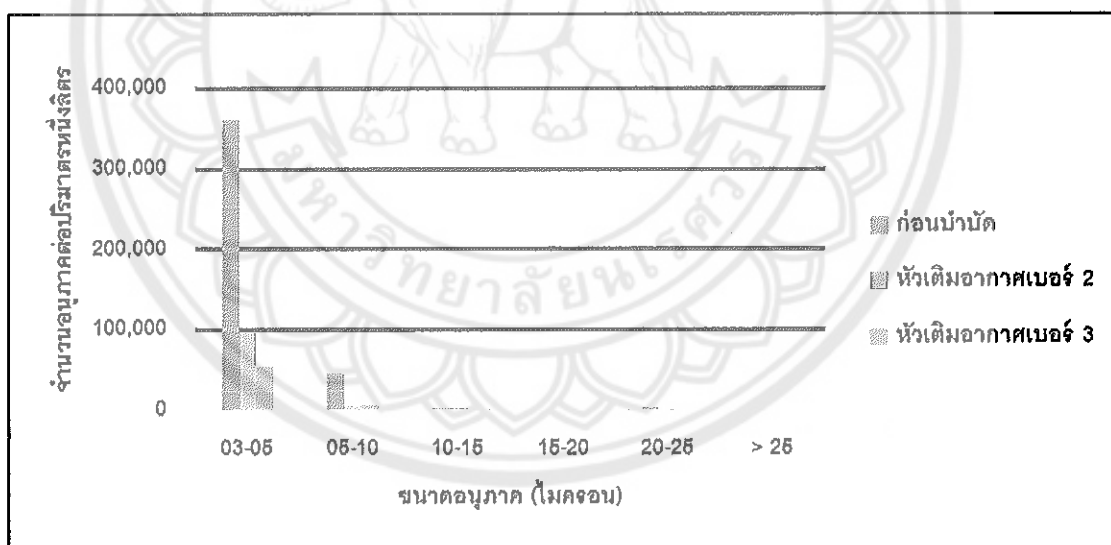
การกำจัดแบคทีเรียด้วยวิธี IAF ให้ประสิทธิภาพการกำจัดต่ำเนื่องจากการเติมสารเคมีสำหรับฆ่าเชื้อแบคทีเรีย กลไกการกำจัดจึงอาศัยการ absorption-adsorption เท่านั้น สาเหตุที่หัวเติมอากาศเบอร์ 3 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดแบคทีเรีย สร้างกรดได้ดีกว่า หัวเติมอากาศเบอร์ 2 เนื่องจากหัวเติมอากาศเบอร์ 3 ให้ฟองก๊าซที่มีความละเอียดมากกว่าจึงมีโอกาสสัมผัสกับอนุภาคแบคทีเรียได้มากกว่า แต่อย่างไรก็ตามสามารถสรุปได้ว่าวิธีการเติมอากาศอย่างเดียวโดยไม่เติมสารเคมีฆ่าเชื้อแบคทีเรียไม่สามารถกำจัดแบคทีเรียได้ โดยผลการทดลองที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบผลกับการบำบัดน้ำด้วยวิธี EF ต่อไป

ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัด อนุภาคแขวนลอย (particle size distribution) โดยใช้หัวเติมอากาศที่มีขนาดความพรุนแตกต่างกัน

ทำการทดลองบำบัดน้ำเสียในกระบอกตวงขนาด 1 ลิตร ใช้หัวเติมอากาศเบอร์ 2 และเบอร์ 3 ตามลำดับ กำหนดอัตราการเติมอากาศที่ 4 ลิตรต่อนาที และแปรผันระยะเวลาในการทดลอง 10 นาที กำหนดความเข้มข้นของสาร Optimer 7194 Plus ที่ 5 พีพีเอ็ม เมื่อทำการทดลองเสร็จจึงให้ตกตะกอนเป็นเวลา 10 นาที นำน้ำตัวอย่างหลังบำบัดปริมาณ 1 มิลลิลิตร ทำการหาจำนวนอนุภาคแขวนลอยในน้ำเสียหลังบำบัด ด้วยเครื่อง Backman Z1 ได้ผลการทดลองดังตาราง 13

ตาราง 13 จำนวนอนุภาคแขวนลอยในน้ำเสียก่อนบำบัดและหลังบำบัดด้วยวิธี IAF โดยใช้หัวเติมอากาศที่มีขนาดความพรุนแตกต่างกัน วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Backman Z1

หัวเติมอากาศ ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	ก่อนบำบัด จำนวนอนุภาค	No.2 จำนวนอนุภาค	No.3 จำนวนอนุภาค
3-5	361,400	98,000	53,800
5-10	44,800	5,200	5,800
10-15	2,000	800	800
15-20	0	0	0
20-25	200	0	0
> 25 μm .	0	0	0
% of particle < 5 μm .	88.49	94.23	89.07
No. of particle > 5 μm .	47,000	6,000	6,600



ภาพ 73 จำนวนอนุภาคแขวนลอยในน้ำเสียก่อนบำบัดและหลังบำบัดด้วยวิธี IAF โดยใช้หัวเติมอากาศที่มีขนาดความพรุนแตกต่างกัน วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Backman Z1

ตาราง 14 ประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคแขวนลอยโดยใช้หัวเติมอากาศที่มีขนาด
ความพรุนแตกต่างกัน

หัวเติมอากาศ ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	No.2 เปอร์เซ็นต์การกำจัด	No.3 เปอร์เซ็นต์การกำจัด
< 5 μm .	73	85
> 5 μm .	87	86

จากตาราง 13 และตาราง 14 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดอนุภาคขนาด < 5 μm . จะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้หัวเติมอากาศที่มีความพรุนสูง เนื่องจากฟองก๊าซที่มีปริมาณมากกว่าและละเอียดกว่าของหัวเติมอากาศเบอร์ 3 สามารถยึดติดและพาเอาอนุภาคที่มีขนาด < 5 μm . ขึ้นสู่ผิวน้ำได้ดีกว่า ในขณะที่ประสิทธิภาพการบำบัดอนุภาคขนาด > 5 μm . จะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มขนาดความพรุนของหัวเติมอากาศ

ศึกษาพารามิเตอร์แคทไอออน แอนไอออน ของน้ำก่อนและหลังการบำบัดด้วยวิธี IAF

ทำการทดลองบำบัดน้ำเสียในระบบอกตวงขนาด 1 ลิตร ใช้หัวเติมอากาศเบอร์ 2 และเบอร์ 3 ตามลำดับ กำหนดอัตราการเติมอากาศที่ 4 ลิตรต่อนาที และแปรผันระยะเวลาในการทดลอง 10 นาที กำหนดความเข้มข้นของสาร Optimer 7194 Plus ที่ 5 พีพีเอ็ม เมื่อทำการทดลองเสร็จทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 10 นาที นำน้ำตัวอย่างก่อนและหลังบำบัดมาหาปริมาณแคทไอออน และ แอนไอออน ได้ผลดังตาราง 15

ตาราง 15 พารามิเตอร์แคทไอออน แอนไอออน ของน้ำก่อนและหลังการบำบัดด้วย วิธี IAF

พารามิเตอร์	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด
โซเดียมไอออน (Na^+)	8801.6 (mg/l)	8344 (mg/l)
แคลเซียมไอออน (Ca^{2+})	2000 (mg/l)	1800 (mg/l)
แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+})		
เหล็กไอออน (Fe^{3+} & Fe^{2+})	5.05 (mg/l)	1.0 (mg/l)

ตาราง 15 (ต่อ)

	พารามิเตอร์	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด
แอนไอออน	เหล็กไอออน (Fe^{2+})	0.35 (mg/l)	0.51 (mg/l)
	เบเรียมไอออน (Ba^{2+})	11	12
	คลอไรด์ไอออน (Cl^-)	10,818	9,682
	ซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-})	0	0
	ไบคาร์บอเนตไอออน (HCO_3^-)	0	0
	คาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-})	0	474.9 (mg/l)
	พีเอช	7.34	8
ค่าอื่นๆ	ค่าความขุ่น	89 NTU	13 NTU
	ปริมาณน้ำมันในน้ำ	93.8 mg/l	2.4 mg/l
	ค่าของแข็งละลาย	27.58 mg/l	27.47 mg/l
	ค่าการนำกระแสไฟฟ้าของน้ำ	28.08	27.86
	ปริมาณคลอรีน	0.139 mg/l	0.086 mg/l
	ค่าซีโอดี	1,268 mg/l	1,154 mg/l

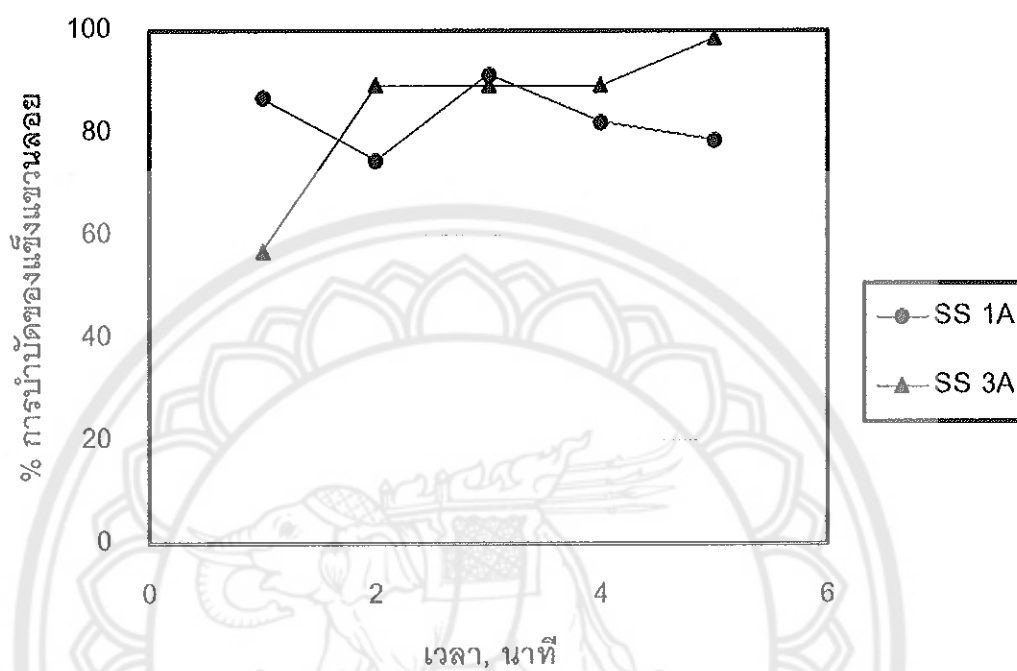
จากตาราง 15 พบว่าแคทไอออน และ แอนไอออน ก่อนและหลังทำปฏิกิริยามีการเปลี่ยนแปลง สามารถอธิบายได้ว่า การเติมอากาศจะส่งผลให้น้ำหลังบำบัดมีปริมาณคาร์บอเนต เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ ส่งผลให้เกิดการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตได้ดีขึ้น โดยจะสังเกตว่าปริมาณแคลเซียม แมกนีเซียมหลังบำบัดมีปริมาณลดลง น้ำหลังบำบัดจะมีค่าความขุ่นลดลง และมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้น

การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีอิเล็กโทรโคแอกกูแลชั่นโฟลเตชั่น (ECF) และอิเล็กโทรโฟลเตชั่น (EF)

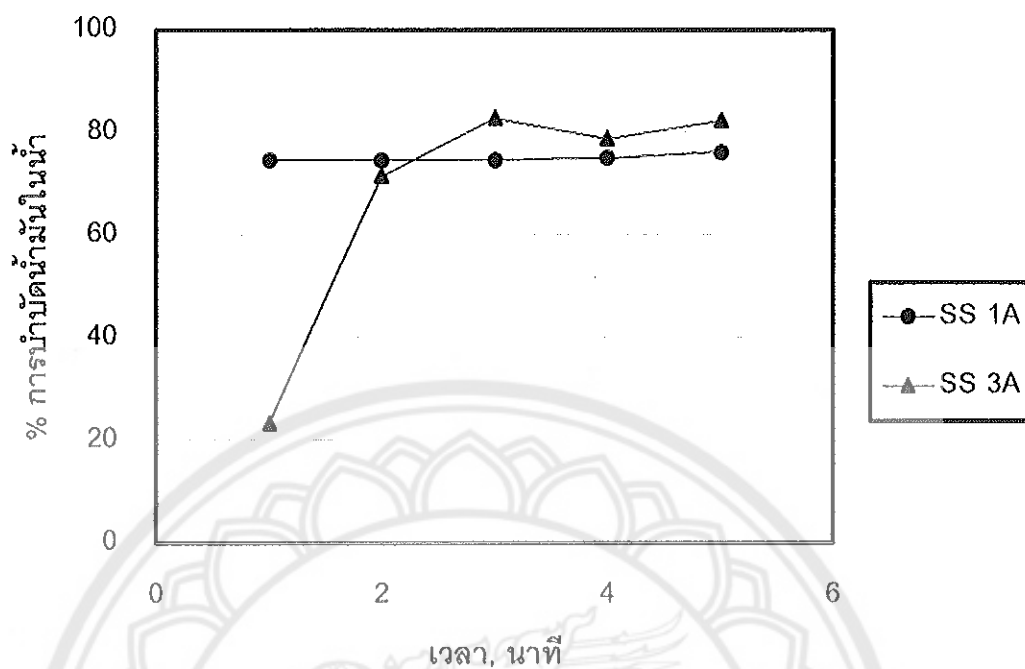
ศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีอิเล็กโทรโคแอกกูแลชั่นโฟลเตชั่น ECF และอิเล็กโทรโฟลเตชั่น (EF) ผลกระทบจากการเปลี่ยนชนิดของอิเล็กโทรดที่ขั้วแอโนดคือ แสตนเลส, อลูมิเนียม, เหล็ก, BDD พร้อมทั้งหาปริมาณไฟฟ้า และระยะเวลาที่เหมาะสม

1. การหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม

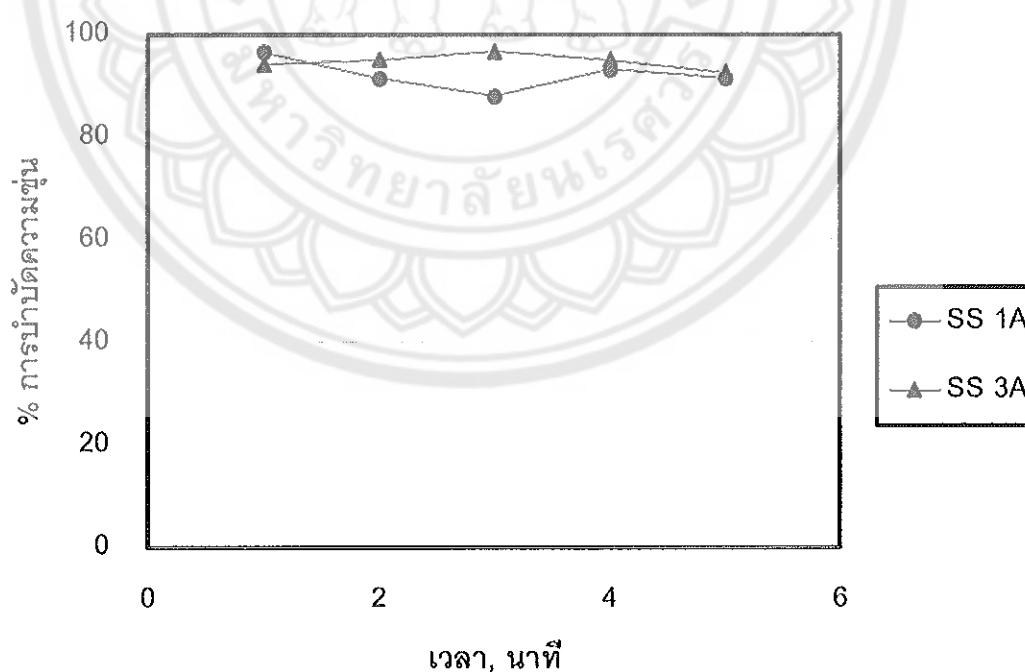
1.1 การหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเมื่อใช้สแตนเลสเป็นแอโนด และสแตนเลสเป็น คาโทด



ภาพ 74 การหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเมื่อใช้สแตนเลสเป็นแอโนดและคาโทดโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอย



ภาพ 75 การหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเมื่อใช้สแตนเลสเป็นแอโนด และ
คาโทดโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันในน้ำ



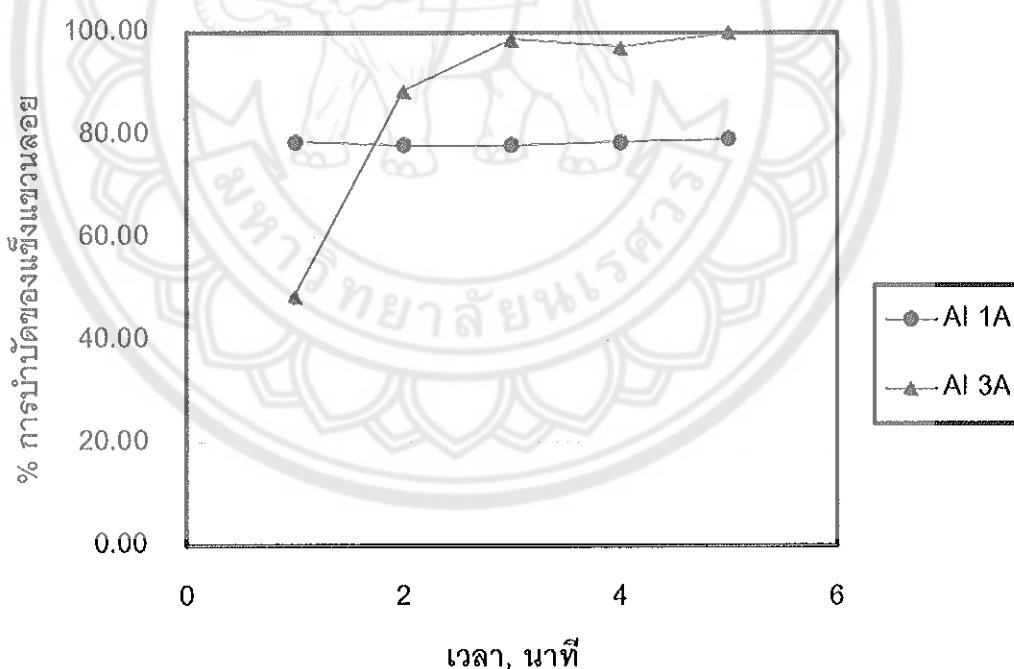
ภาพ 76 การหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเมื่อใช้สแตนเลสเป็นแอโนดและ
คาโทดโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดความฟุ้ง

จากภาพ 74 พบว่าเมื่อใช้แอสแตนเลสเป็นอาโนด และคาโทด ซึ่งเป็นอิเล็กโทรดชนิดละลาย ให้ประสิทธิภาพการบำบัดแปรผันตามปริมาณกระแสไฟฟ้า คือกระแสไฟฟ้าที่ 3 แอมแปร์จะให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีกว่าที่ 1 แอมแปร์ ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งละลายที่มากกว่า 95 % ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 นาที

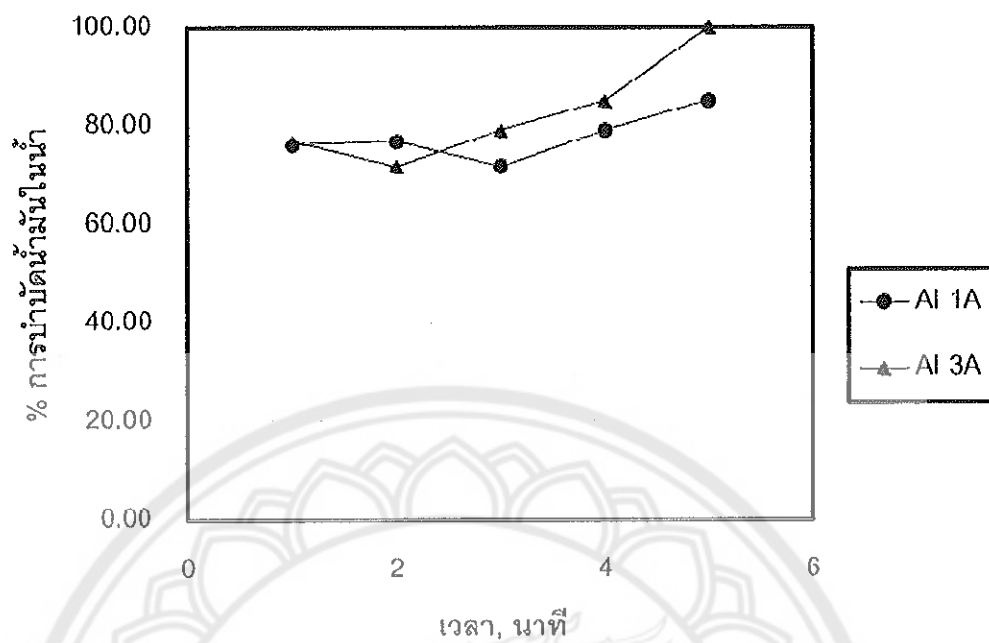
จากภาพ 75 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันในน้ำจะเป็นแปรผันตามปริมาณกระแสไฟฟ้าและระยะเวลา คือกระแสไฟฟ้าที่ 3 แอมแปร์จะให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีกว่าที่ 1 แอมแปร์ เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ 3 แอมแปร์สามารถผลิตฟองก๊าซได้มากกว่า และพบว่าการให้ระยะเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าที่นานขึ้นก็จะทำให้การบำบัดน้ำมันในน้ำดีขึ้น

จากภาพ 76 พบว่าการบำบัดความขุ่นจะแปรผันตามปริมาณกระแสไฟฟ้า คือกระแสไฟฟ้าที่ 3 แอมแปร์จะให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีกว่าที่ 1 แอมแปร์โดยให้ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นที่มากกว่า 95%

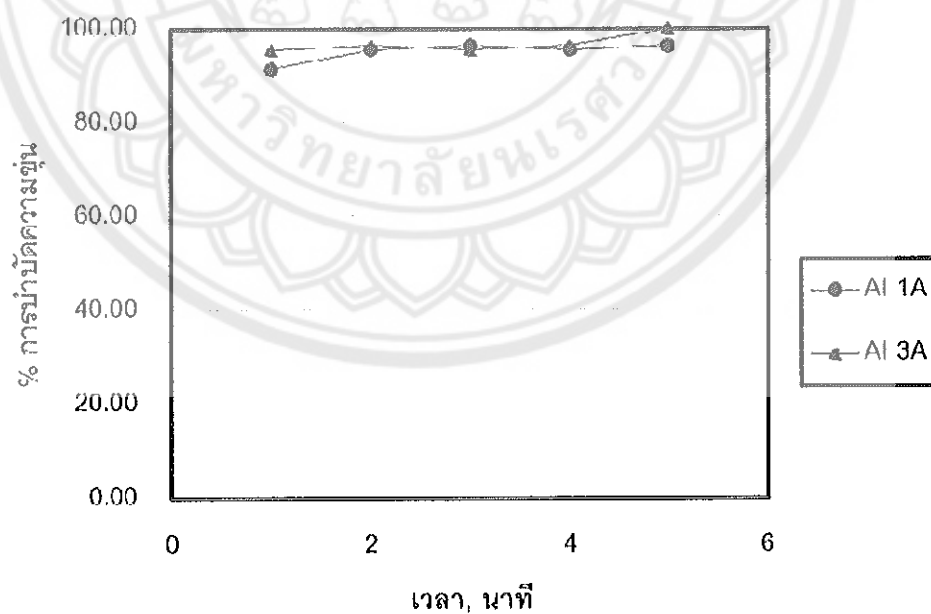
1.2 การหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเมื่อใช้อลูมิเนียมเป็นอาโนดและคาโทด



ภาพ 77 การหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเมื่อใช้อลูมิเนียมเป็นอาโนดและคาโทดโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอย

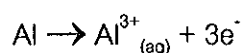


ภาพ 78 การหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเมื่อใช้อลูมิเนียมเป็นแอโนดและคาโทดโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันในน้ำ

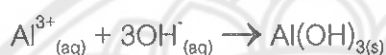


ภาพ 79 การหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเมื่อใช้อลูมิเนียมเป็นแอโนดและคาโทดโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น

จากภาพ 77 พบว่าผลการบำบัดของแข็งแขวนลอยจะเปลี่ยนตามปริมาณการปล่อยกระแสไฟฟ้าและระยะเวลา คือเมื่อให้กระแสไฟฟ้าปริมาณมากขึ้น และนานขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดจะดีขึ้น เมื่อพิจารณาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดดังนี้



ที่พีเอชสูงกว่า 7



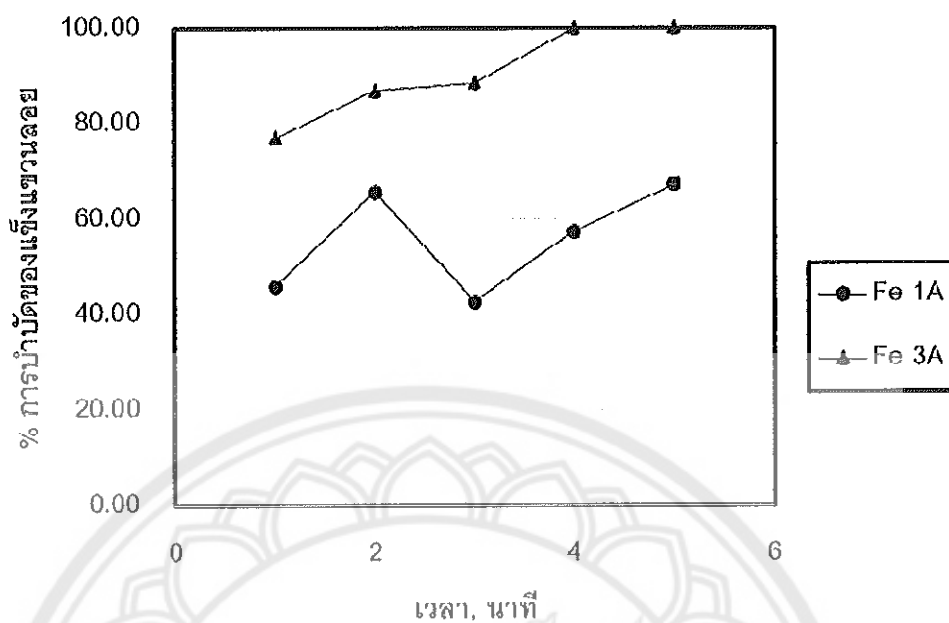
ที่พีเอชต่ำกว่า 7



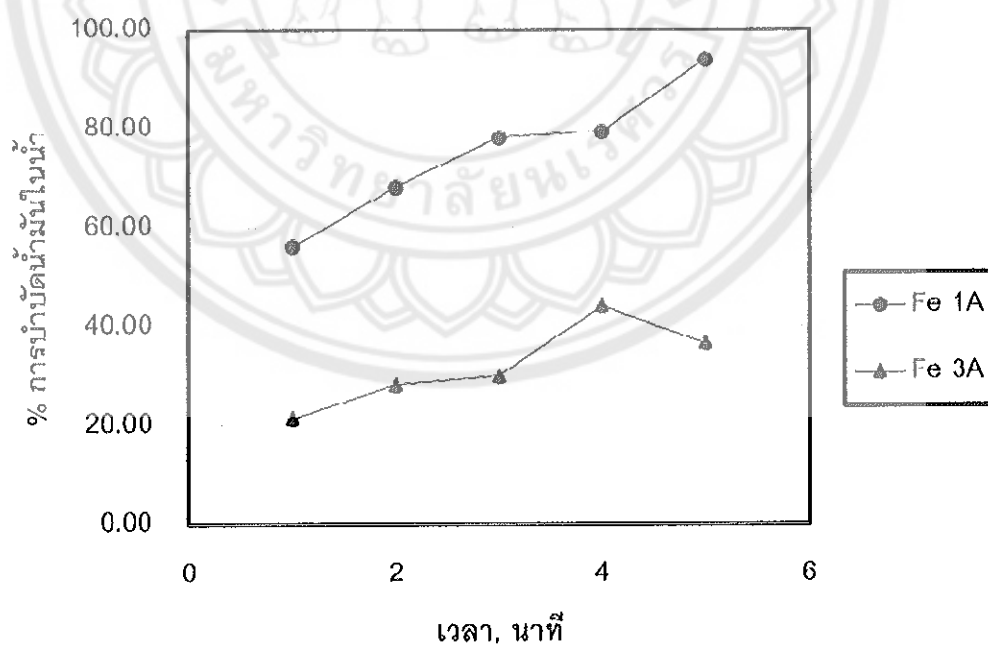
จากผลการทดลองและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อขั้วแอโนดละลายทำให้เกิด Al^{3+} ส่งผลให้เกิดกลไกการลดความหนาของชั้นกระจาย โดยให้ประสิทธิภาพของการบำบัดมากกว่า 95% จากภาพ 78 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันในน้ำจะเป็นแปรผันตามปริมาณกระแสไฟฟ้าและระยะเวลา คือกระแสไฟฟ้าที่ 3 แอมแปร์จะให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีกว่าที่ 1 แอมแปร์ เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ 3 แอมแปร์สามารถผลิตฟองก๊าซได้มากกว่า และพบว่าการให้ระยะเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าที่นานขึ้นก็จะทำให้การบำบัดน้ำมันในน้ำดีขึ้น

จากภาพ 79 พบว่าการบำบัดความขุ่นจะเปลี่ยนตามปริมาณกระแสไฟฟ้า คือกระแสไฟฟ้าที่ 3 แอมแปร์จะให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีกว่าที่ 1 แอมแปร์โดยให้ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นที่มากกว่า 95%

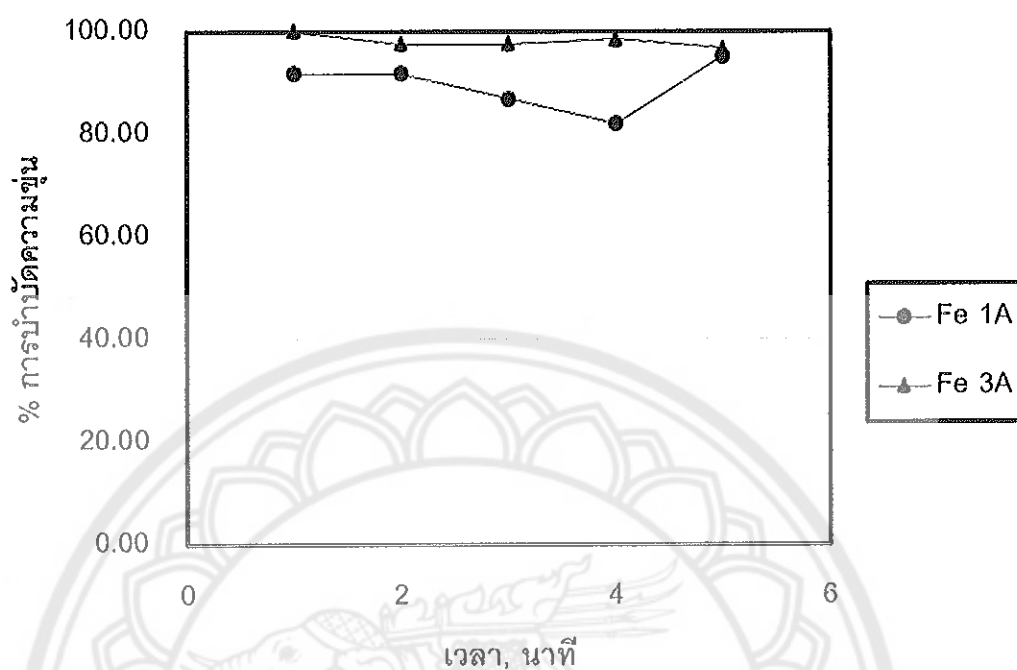
1.3 การหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเมื่อใช้เหล็กเป็นแอโนด และคาโทด



ภาพ 80 การหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเมื่อใช้เหล็กเป็นแอโนดและคาโทด โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอย น้ำมันในน้ำ และความขุ่น

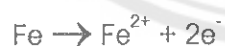


ภาพ 81 การหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเมื่อใช้เหล็กเป็นแอโนด และเป็นคาโทดโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยน้ำมันในน้ำและความขุ่น

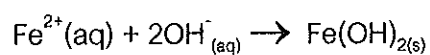


ภาพ 82 การหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเมื่อใช้เหล็กเป็นแอโนดและคาโทด โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอย มันในน้ำ และความขุ่น

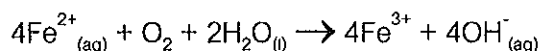
จากภาพ 80 พบว่าผลการบำบัดของแข็งแขวนลอยจะเปลี่ยนตามปริมาณการปล่อยกระแสไฟฟ้าและระยะเวลา คือเมื่อให้กระแสไฟฟ้าปริมาณมากขึ้น และนานขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดจะดีขึ้น เมื่อพิจารณาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดดังนี้



ที่พีเอชสูงกว่า 7



ที่พีเอชต่ำกว่า 7

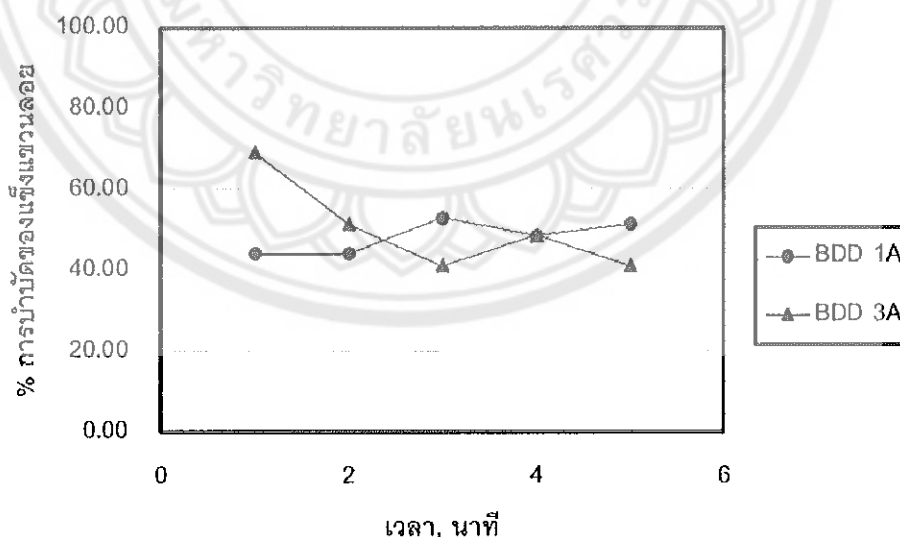


จากผลการทดลองและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อตัวอาโนดละลายทำให้เกิด Fe^{2+} และ Fe^{3+} อีกทั้งลักษณะทางกายภาพของน้ำ produced water ที่มีปริมาณ คลอไรด์ ประมาณ 10,000 มล./ล. เมื่อรวมกับ Fe^{3+} จะเปรียบเสมือนปฏิกิริยาที่มีการเติม FeCl_3 ซึ่งเป็นสารโคแอกกูแลนต์เอด ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยในน้ำดีขึ้น

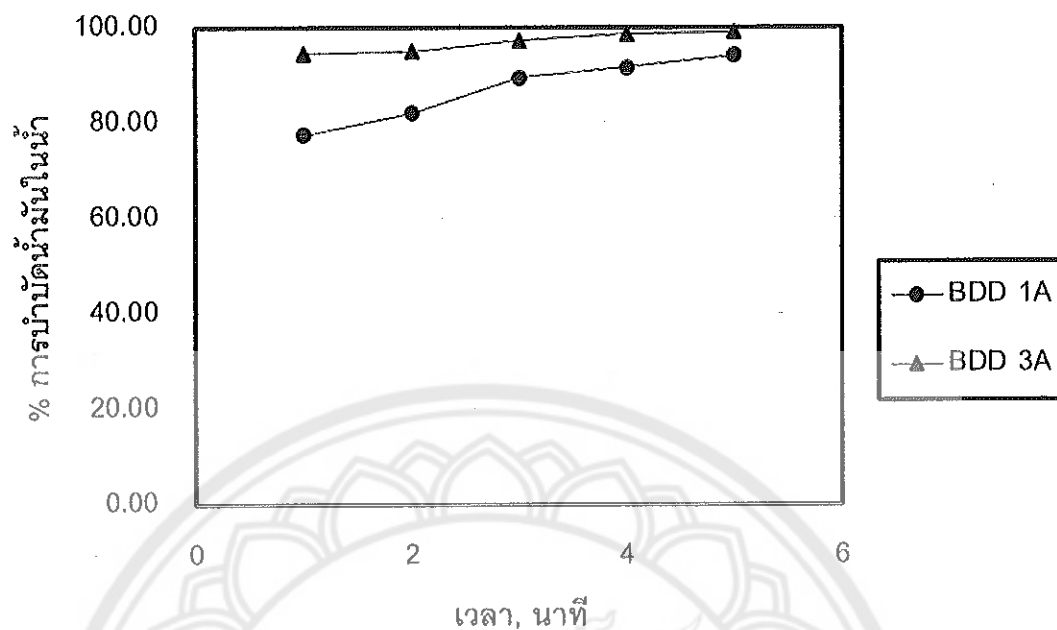
จากภาพ 81 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันในน้ำจะเป็นแปรผกผันกับปริมาณกระแสไฟฟ้า คือกระแสไฟฟ้าที่ 1 แอมแปร์จะให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีกว่าที่ 3 แอมแปร์ ทั้งนี้จากการสังเกตการทดลองจะพบว่าอิเล็กโทรดที่ทำมาจากเหล็กจะให้ตะกอนที่มาก (ภาพ 97 ในภาคผนวก) ตะกอนที่ได้อาจไปขัดขวางการไหลเต้านของน้ำมันในน้ำ

จากภาพ 82 พบว่าการบำบัดความขุ่นจะแปรผันตามปริมาณกระแสไฟฟ้า คือกระแสไฟฟ้าที่ 3 แอมแปร์จะให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีกว่าที่ 1 แอมแปร์โดยให้ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นที่มากกว่า 95%

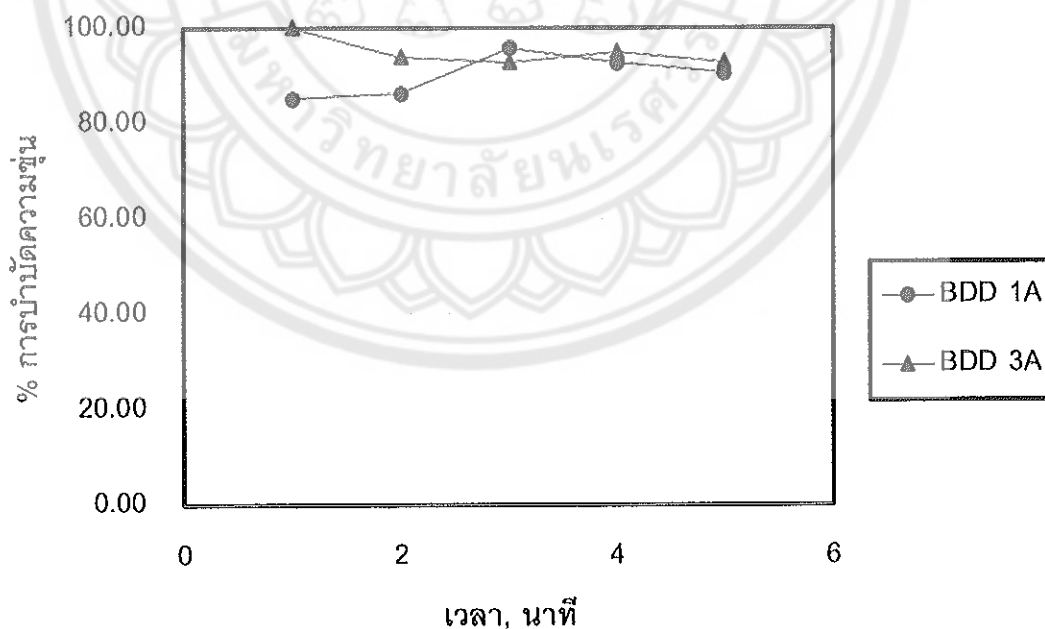
1.4 การหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเมื่อใช้ BDD เป็นอาโนด และ BDD เป็นคาโทด



ภาพ 83 การหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเมื่อใช้ BDD เป็นอาโนดและคาโทดโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอย



ภาพ 84 การหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเมื่อใช้ BDD เป็นแอโนดและ
คาโทดโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันในน้ำ



ภาพ 85 การหาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเมื่อใช้ BDD เป็นแอโนดและ
คาโทดโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น

จากภาพ 83 พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอยแปรผกผันกับระยะเวลาในการให้กระแสไฟฟ้า โดยจะลดลงเมื่อให้กระแสไฟฟ้าที่ 3 แอมแปร์เป็นระยะเวลานาน เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันระดับชั้นที่เกิดขึ้น ทำให้เกิดตะกอนที่มากขึ้นตามระยะเวลา

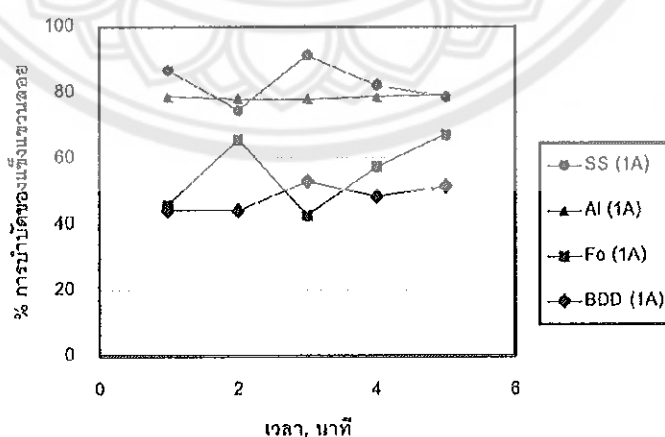
จากภาพ 84 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันในน้ำจะเป็นแปรผันตามปริมาณกระแสไฟฟ้า คือกระแสไฟฟ้าที่ 3 แอมแปร์จะให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีกว่าที่ 1 แอมแปร์ เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ 3 แอมแปร์สามารถผลิตฟองก๊าซได้มากกว่า และพบว่าการให้ระยะเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าที่นานขึ้นก็จะทำให้การบำบัดน้ำมันในน้ำดีขึ้น

จากภาพ 85 พบว่าผลการบำบัดค่าความขุ่นแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องของการบำบัดของแข็งแขวนลอย และน้ำมันในน้ำ การปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ 3 แอมแปร์ ที่ระยะเวลานานขึ้น น้ำมันในน้ำจะถูกกำจัดออกไปแต่ของแข็งแขวนลอยมีปริมาณเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความขุ่นที่ได้เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

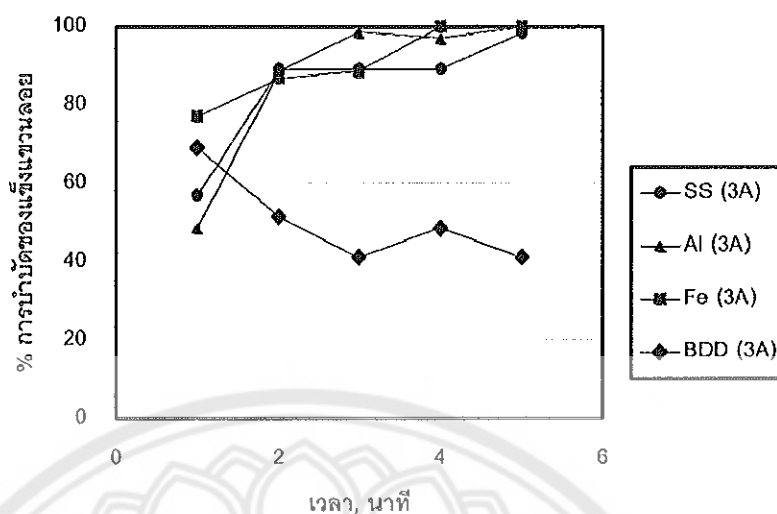
2. เปรียบเทียบประสิทธิภาพจากการเปลี่ยนชนิดของอิเล็กโทรดที่ขั้วแอโนดคือ แสตนเลส, อลูมิเนียม, เหล็ก, BDD

นำผลการทดลองจากหัวข้อ 3.1 มาสร้างกราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอย น้ำมันในน้ำ และความขุ่นจากการเปลี่ยนชนิดของอิเล็กโทรดที่ขั้วแอโนด คือ แสตนเลส, อลูมิเนียม, เหล็ก, BDD ที่ปริมาณกระแสไฟฟ้าต่างๆ กัน

2.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอย จากการเปลี่ยนชนิดของอิเล็กโทรดที่ขั้วแอโนดคือ แสตนเลส, อลูมิเนียม, เหล็ก, BDD ที่ปริมาณกระแสไฟฟ้า 1 และ 3 แอมแปร์



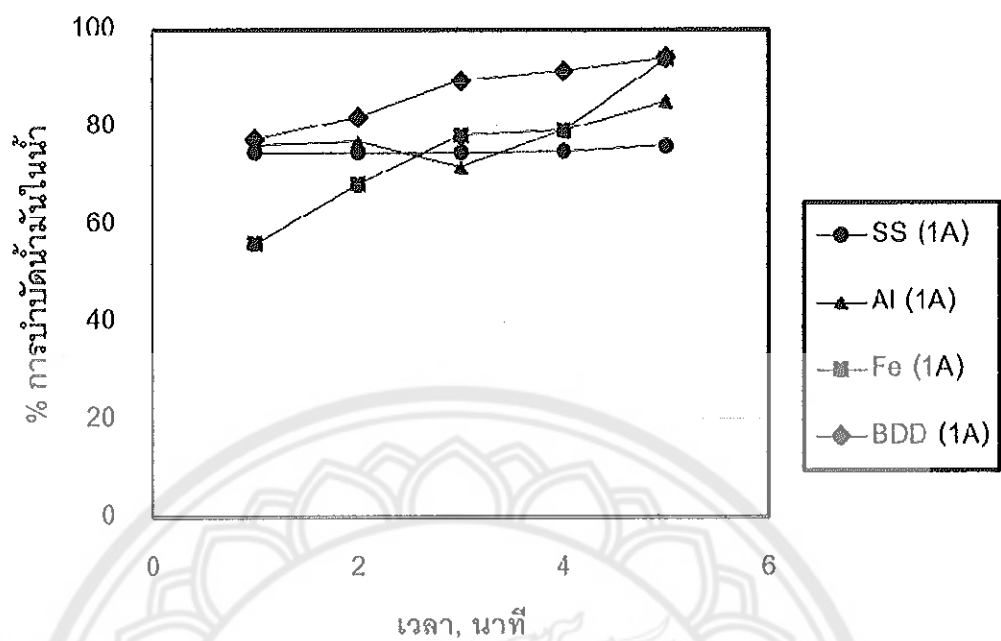
ภาพ 86 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอย จากการเปลี่ยนชนิดของอิเล็กโทรดที่ขั้วแอโนดคือ แสตนเลส, อลูมิเนียม, เหล็ก, BDD ที่ปริมาณกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์



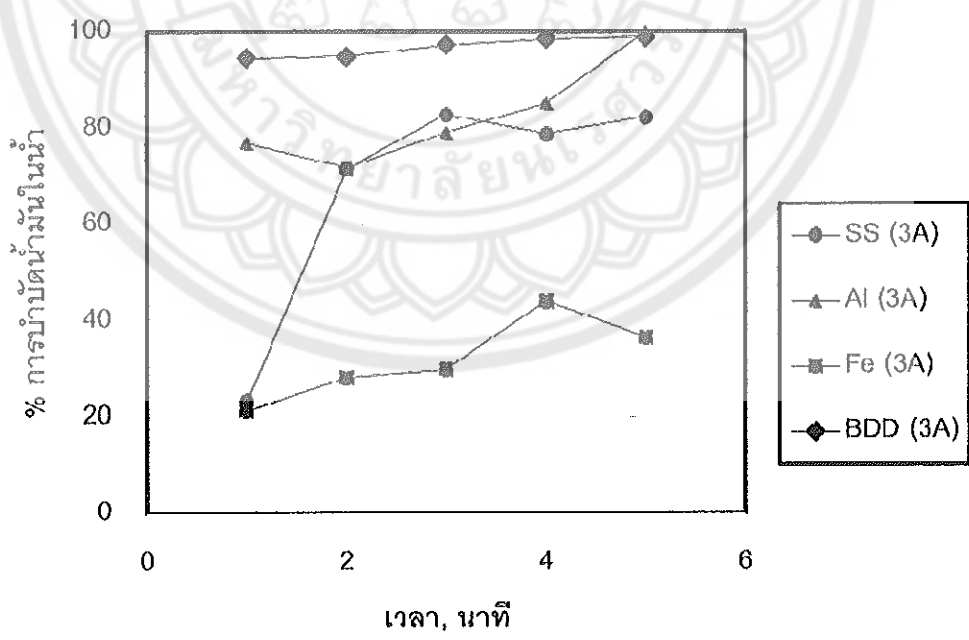
ภาพ 87 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอย จากการเปลี่ยนชนิดของอิเล็กโทรดที่ขั้วแอโนดคือ แสตนเลส, อลูมิเนียม, เหล็ก, BDD ที่ปริมาณกระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์

จากภาพ 86 และภาพ 87 พบว่า BDD ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอยต่ำที่สุดในขณะที่ อิเล็กโทรดที่ทำมาจาก แสตนเลส, อลูมิเนียมและ เหล็ก ให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากอิเล็กโทรดที่ทำมาจากแสตนเลส, อลูมิเนียมและ เหล็ก มีการเติมโคแอ็กทูแลนท์จากการละลายของขั้วอิเล็กโทรด

2.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดค่าน้ำมันในน้ำจากการเปลี่ยนชนิดของอิเล็กโทรดที่ขั้วแอโนดคือ แสตนเลส, อลูมิเนียม, เหล็ก, BDD ที่ปริมาณกระแสไฟฟ้า 1 และ 3 แอมแปร์



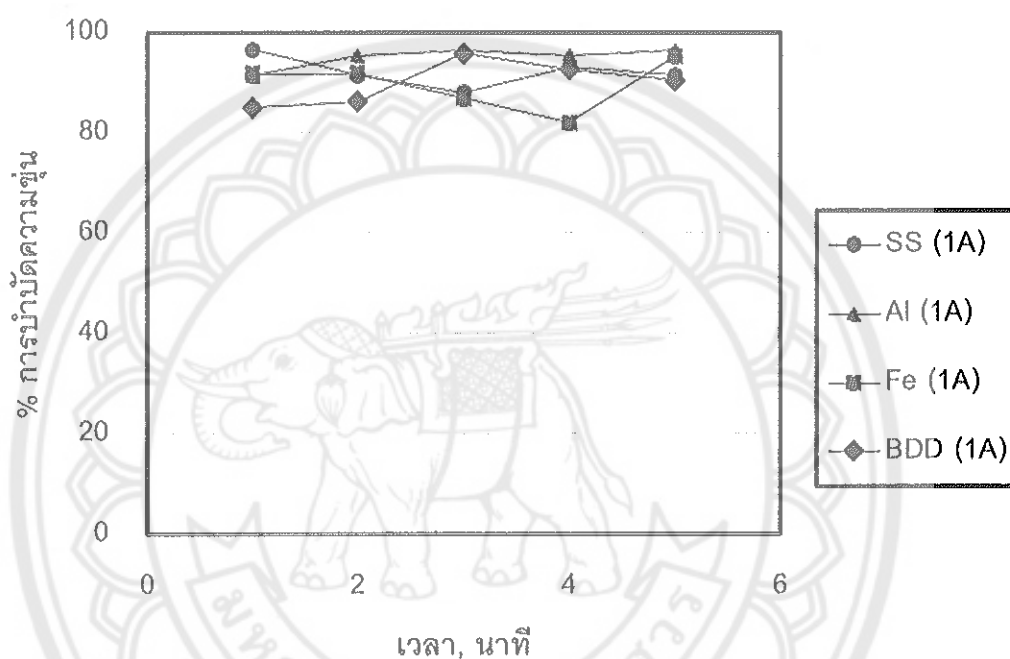
ภาพ 88 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันในน้ำจากการเปลี่ยนชนิดของอิเล็กโทรดที่ขั้วแอโนดคือ แสตนเลส, อลูมิเนียม, เหล็ก, BDD ที่ปริมาณกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์



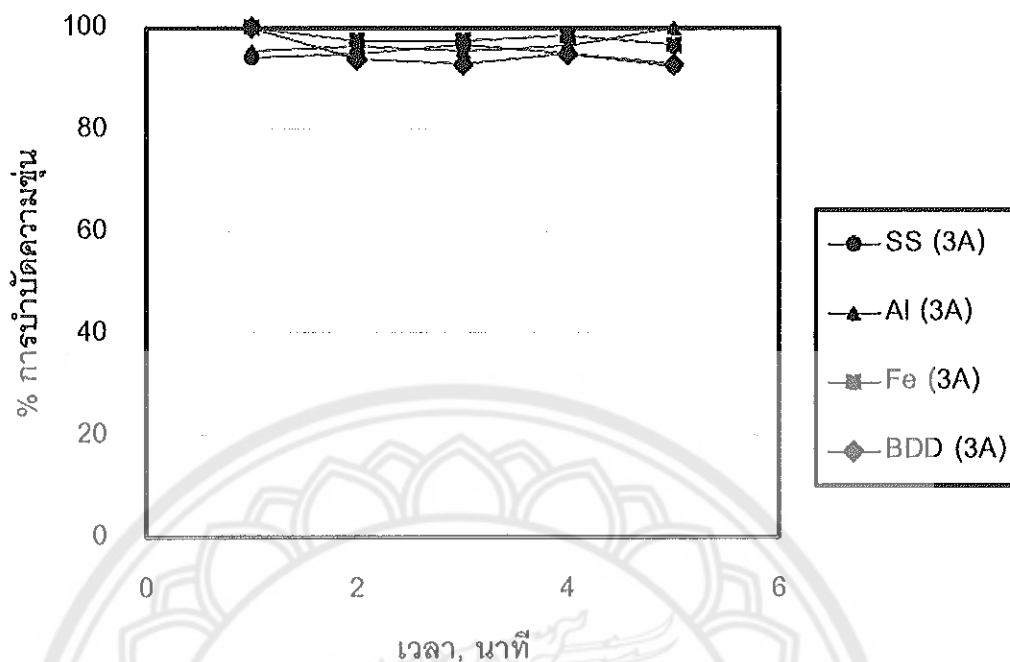
ภาพ 89 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันในน้ำจากการเปลี่ยนชนิดของอิเล็กโทรดที่ขั้วแอโนดคือ แสตนเลส, อลูมิเนียม, เหล็ก, BDD ที่ปริมาณกระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์

จากภาพ 88 และภาพ 89 พบว่า BDD ให้ประสิทธิภาพการบำบัดดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับอิเล็กโทรดชนิดละลาย ทั้งนี้เนื่องมาจาก อิเล็กโทรดชนิด BDD ให้ฟองก๊าซมากที่สุดจึงสามารถบำบัดน้ำมันในน้ำได้ดีที่สุด

2.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดค่าความขุ่นจากการเปลี่ยนชนิดของอิเล็กโทรดที่ขั้วแอโนดคือ แสตนเลส, อลูมิเนียม, เหล็ก, BDD ที่ปริมาณกระแสไฟฟ้า 1 และ 3 แอมแปร์



ภาพ 90 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดค่าความขุ่นในน้ำจากการเปลี่ยนชนิดของอิเล็กโทรดที่ขั้วแอโนดคือ แสตนเลส, อลูมิเนียม, เหล็ก, BDD ที่ปริมาณกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์



ภาพ 91 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดค่าความขุ่นในน้ำจากการเปลี่ยนชนิดของอิเล็กโทรดที่ขั้วแอโนดคือ แสตนเลส, อลูมิเนียม, เหล็ก, BDD ที่ปริมาณกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์

จากภาพ 90 และภาพ 91 พบว่าอิเล็กโทรดแสตนเลส, อลูมิเนียม, เหล็ก, BDD ให้ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นที่ใกล้เคียงกับ ซึ่งการกระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์มีแนวโน้มให้ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นได้ดีกว่ากระแสไฟฟ้าที่ 1 แอมแปร์ เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ 3 แอมแปร์จะให้ปริมาณฟองก๊าซที่มากกว่า และเกิดสารโคเอกกูเลนท์เอดที่มากกว่า

หนึ่งจากการศึกษาที่ผ่านตาม ภาพ 86 และภาพ 90 มาพบว่าค่าความขุ่นในน้ำมีแนวโน้มไม่เป็นไปตามของเชิงเส้นลวย ทั้งนี้เนื่องจากที่กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์จะให้ปริมาณฟองก๊าซที่น้อย ทำให้อาจพบปริมาณน้ำมันในน้ำหลงเหลืออยู่ การหาปริมาณของเชิงเส้นลวยด้วยการวิธีการกรองน้ำมันที่เหลืออยู่จะไปติดที่กระดาษกรอง ทำให้ผลการวัดปริมาณของเชิงเส้นลวยมีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเราสามารถประเมินประสิทธิภาพของการทดลองได้จาก 2 พารามิเตอร์คือ จากการวัดค่าความขุ่น และการวัดปริมาณน้ำมันในน้ำ

3. ศึกษาพารามิเตอร์แคโทดไอออน แอนไอออน ของน้ำก่อนและหลังการบำบัดด้วยวิธี EF โดยใช้ขั้วแอโนดและคาโทดเป็น BDD

ตาราง 16 ผลการศึกษาพารามิเตอร์แคดไอออน แอนไอออน ของน้ำก่อนและหลังการบำบัดด้วยวิธี EF โดยใช้ขี้วัวอินดและคาโทดเป็น BDD

	พารามิเตอร์	ก่อนบำบัด	หลังบำบัดด้วยกระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์เป็นระยะเวลา 4 นาที
แคดไอออน	โซเดียมไอออน (Na^+)	8,999 mg/l	8,878 mg/l
	แคลเซียมไอออน (Ca^{2+})	2,220 mg/l	2,000 mg/l
	แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+})	6.1 mg/l	0.03 mg/l
	เหล็กไอออน (Fe^{3+} & Fe^{2+})	0.22 mg/l	0 mg/l
	เบเรียมไอออน (Ba^{2+})	11	4
	สตรอนเทียมไอออน (Sr^{2+})	0	0
แอนไอออน	คลอไรด์ไอออน (Cl^-)	11,236	10,319
	ซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-})	0	0
	ไบคาร์บอเนตไอออน (HCO_3^-)	598.29	563
	คาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-})	0	0
	พีเอช	8.15	8.04
ค่าอื่นๆ	ค่าความขุ่น	97 NTU	5 NTU
	ปริมาณน้ำมันในน้ำ	89.7 mg/l	1.3 mg/l
	ค่าของแข็งละลาย	58 mg/l	35 mg/l
	ค่าการนำกระแสไฟฟ้าของน้ำ	28.07	20.45
	ปริมาณคลอไรด์	0	0
	COD	532 mg/l	319 mg/l

จากตาราง 15 พบว่า น้ำหลังบำบัดด้วยวิธีวิธี EF โดยใช้ชีวอาโนดและคาโทดเป็น BDD พบว่าหลังจากให้กระแสไฟฟ้าในน้ำปริมาณน้ำมันในน้ำถูกทำให้ลอยขึ้นโดยฟองก๊าซ ดังจะเห็นได้ว่าปริมาณน้ำมันในน้ำหลังทำปฏิกิริยามีค่าลดลง เมื่อทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 7 วัน เหล็กไอออนซึ่งเป็นสารโคแอกกูแลนต์เอด ได้รวมตัวกับความขุ่นในน้ำและเกิดการตกตะกอน ปริมาณคลอไรด์ไอออนที่ลดลงเล็กน้อย เป็นผลจากการทำปฏิกิริยารีดอกซ์ของคลอไรด์เกิดเป็นก๊าซคลอรีน ปริมาณของแข็งละลายที่ลดลง เป็นผลสอดคล้องกับผลรวมปริมาณแอมโมเนียมไอออนและแคโทดไอออนที่ลดลง และค่า COD ที่ลดลงสอดคล้องกับปริมาณน้ำมันในน้ำที่ลดลง ทั้งนี้ค่า COD หลังบำบัดที่ยังเหลืออยู่แสดงให้เห็นว่ายังมีสารอินทรีย์อื่นๆ ที่สามารถออกซิไดซ์ได้หลงเหลืออยู่

4. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียชนิดต่างๆ ของน้ำก่อนและหลังการบำบัดด้วยวิธี EF โดยให้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ เป็นเวลา 4 นาที ใช้ BDD เป็นอาโนดและคาโทด



ภาพ 92 ผลการหาปริมาณแบคทีเรียสร้างกรดหลังการบำบัดด้วยวิธี EF โดยใช้ชีวอาโนดและคาโทดเป็น BDD



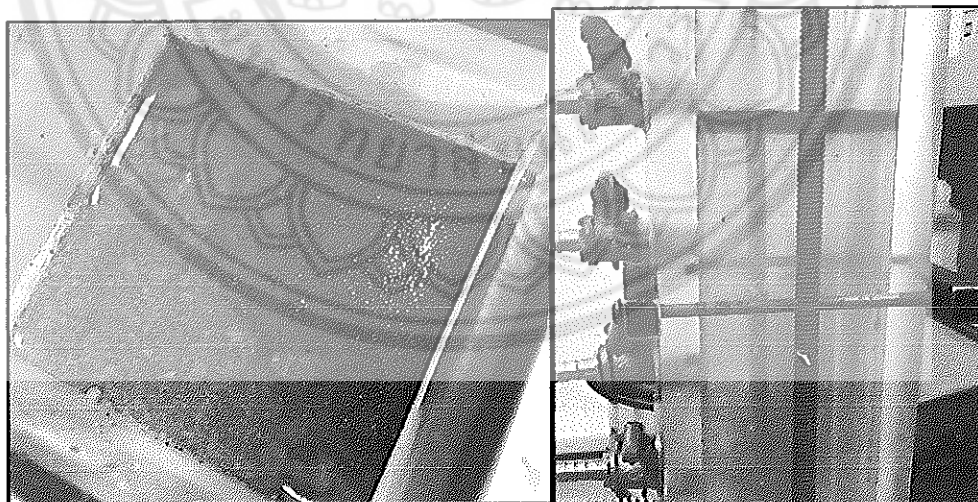
ภาพ 93 ผลการหาปริมาณแบคทีเรีย SRB หลังการบำบัดด้วยวิธี EF โดยใช้ชีวอาโนดและคาโทดเป็น BDD

ตาราง 17 สรุปประสิทธิภาพการกำจัดแบคทีเรียชนิดต่าง ๆ ของน้ำก่อนและหลังการบำบัดด้วยวิธี ECF

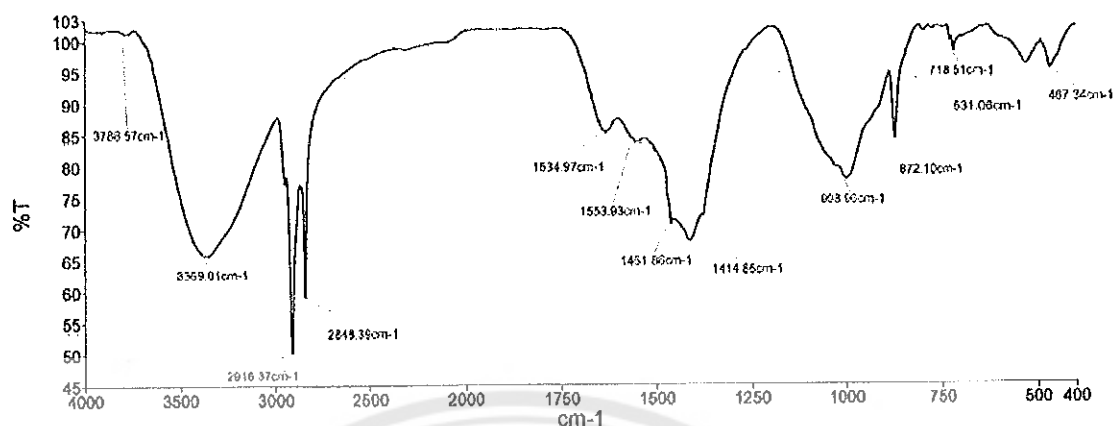
	ประสิทธิภาพการบำบัด เมื่อใช้ BDD เป็นอาโนดและคาโทด			
	เอสอาร์บี		แบคทีเรียสร้างกรด	
	No. Bacteria	% การกำจัด	No. Bacteria	% การกำจัด
ก่อนบำบัด (อ้างอิงจากภาพ 67 และภาพ 68)	10	0	1000	0
หลังบำบัด	0	100	0	100

จากภาพ 92 และภาพ 93 สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังตาราง 16 พบว่าการบำบัดด้วยวิธี EF สามารถบำบัดแบคทีเรียในน้ำได้ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ให้ก๊าซคลอรีนที่สามารถฆ่าแบคทีเรียได้ทั้ง แบคทีเรียสร้างกรดและ แบคทีเรีย SRB

5. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตะกอนลอยด้วยเครื่อง FT-IR ของน้ำหลังบำบัดด้วยวิธี EF โดยให้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ เป็นเวลา 4 นาที ใช้ BDD เป็นอาโนดและคาโทด



ภาพ 94 ลักษณะตะกอนที่ได้จากการบำบัดด้วยวิธี EF เมื่อใช้ BDD เป็นอาโนดและคาโทด



ภาพ 95 ผลการวิเคราะห์ตะกอนที่ได้จากการบำบัดด้วยวิธี EF เมื่อใช้ BDD เป็น
แอโนด และคาโทดด้วยเครื่อง FT-IR

นำตะกอนลอยที่ได้จากภาพ 94 มาทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ได้ผลการทดลอง
ดังภาพ 95 พบว่าผลการวิเคราะห์ตะกอนด้วยเครื่อง FT-IR ปรากฏพีคของ ไฮโดรคาร์บอนชัดเจน
คือที่ 2921 (C-H Stretch), 1455 (C-C Bending) , 796 (C-C Rocking) จึงสามารถสรุปได้ว่า
ตะกอนลอยประกอบไปด้วยสารไฮโดรคาร์บอนซึ่งก็คือน้ำมันในน้ำที่ถูกฟองก๊าซยกตัวให้ลอย
ออกมาจากน้ำ

6. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัด อนุภาคแขวนลอย (particle size distribution) ก่อน
และหลังการบำบัดด้วยวิธี EF โดยให้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ เป็นเวลา 4 นาที ใช้ BDD เป็น
แอโนดและคาโทด

ทำการหาจำนวนอนุภาคแขวนลอยในน้ำเสียด้วยเครื่อง Backman Z1 ได้ผลการทดลอง
ดังตาราง 18

ตาราง 18 จำนวนอนุภาคแขวนลอยในน้ำเสียก่อน-หลังบำบัดด้วยวิธี EF โดยให้กระแสไฟฟ้า
3 แอมแปร์ เป็นเวลา 4 นาที ใช้ BDD เป็นแอโนดและคาโทดวิเคราะห์ด้วยเครื่อง
Backman Z1

หัวเดิมอากาศ	ก่อนบำบัด	วัดทันที	ทิ้งให้ตกตะกอน 1 สัปดาห์
ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	จำนวนอนุภาค	จำนวนอนุภาค	จำนวนอนุภาค
03-05	451,600	198,900	55,025

ตาราง 18 (ต่อ)

หัวเดิมอากาศ	ก่อนบำบัด	วัดทันที	ทิ้งให้ตกตะกอน 1 สัปดาห์
05-10	83,400	15,500	2,200
10-15	5,300	800	0
15-20	700	0	0
20-25	0	0	0
> 25 μm .	0	0	0
% of particle < 5 μm .	83	92	96
No. of particle > 5 μm .	89400	16300	2200



ภาพ 96 จำนวนอนุภาคแขวนลอยในน้ำเสียก่อน-หลังบำบัดด้วยวิธี EF โดยให้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ เป็นเวลา 4 นาที ใช้ BDD เป็นแอโนดและคาโทด วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Backman Z1

ตาราง 19 ประสิทธิภาพการใช้วิธี EF กำจัดอนุภาคแขวนลอยในน้ำเสียก่อน-หลัง บำบัด
วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Backman Z1

หัวเดิมอากาศ	วัดทันที	ทิ้งให้ตกตะกอน 1 สัปดาห์
ขนาดอนุภาค (ไมครอนเมตร)	เปอร์เซ็นต์การกำจัด	เปอร์เซ็นต์การกำจัด
< 5 μm .	56	88
> 5 μm .	82	98

จากตาราง 18 พบว่าการบำบัดอนุภาคแขวนลอยด้วยวิธี EF (ใช้ BDD เป็นคาโทดและอโนด) โดยให้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ เป็นเวลา 4 นาที เมื่อทำการวัดปฏิกิริยาทันทีที่ให้กระแสไฟฟ้าเสร็จสิ้นให้ประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคที่เล็กกว่า 5 ไมครอน และใหญ่กว่า 5 ไมครอนที่ 56 และ 82 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และหากทำการทิ้งให้ตกตะกอนโดยให้ระยะเวลา 1 สัปดาห์ จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดที่เพิ่มขึ้นคือ อนุภาคที่เล็กกว่า 5 ไมครอน และใหญ่กว่า 5 ไมครอนที่ 88 และ 98 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ สรุปได้ว่าหากต้องการนำน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโพลเดชั่นไปทำการจัดลงหลุม อาจมีความจำเป็นต้องมีระบบกำจัดตะกอนเพิ่มเติม เช่นระบบกรองหรือถังตกตะกอนเพื่อให้ได้น้ำที่มีจำนวนอนุภาคและขนาดตามต้องการ

บทที่ 5

บทสรุป

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่อยู่ในน้ำพบว่าประกอบด้วยสารอินทรีย์, สารอนินทรีย์ และสิ่งมีชีวิตโดยสารอนินทรีย์บางตัวสัมผัสกับออกซิเจน เกิดปฏิกิริยาออกซิโดรีดักชันจะทำให้คุณสมบัติความเป็นคอลลอยด์ของสารละลายเปลี่ยนไป สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. จากการศึกษาปฏิกิริยาเคมีของวิธี IAF ร่วมกับการเติมสารโพลีเมอร์ พบว่าระหว่างการเติมอากาศออกซิเจนในอากาศมีส่วนทำให้ Fe^{2+} เปลี่ยนไปเป็น Fe^{3+} ทำให้สีของน้ำตัวอย่างเปลี่ยนไป Fe^{3+} ที่เกิดขึ้นเมื่อรวมกับคลอไรด์ซึ่งมีอยู่มากมาย จึงเปรียบเสมือนการเติมสาร $FeCl_3$ ลงในน้ำ ทำให้เกิดการทาลายเสถียรภาพความเป็นคอลลอยด์ของสารละลายมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามการปริมาณ Fe^{3+} ที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าความขุ่นเพิ่มขึ้น ซึ่งตรงข้ามกับวิธี IAF โดยใช้ไนโตรเจน ที่ให้ค่าการบำบัดความขุ่นที่ดีกว่า เนื่องจากไม่เกิดการออกซิเดชันของออกซิเจนกับ Fe^{2+} และยังพบอีกว่าประสิทธิภาพของวิธี IAF จะเพิ่มขึ้นเมื่อฟองก๊าซมีขนาดเล็กลง ซึ่งเป็นไปตามค่า a/G โดยค่า A/S ที่เหมาะสมสำหรับวิธี IAF โดยใช้ไนโตรเจนและอากาศคือ 30.7 และ 61.5 มิลลิลิตรอากาศต่อมิลลิกรัมของแข็งแขวนลอย

2. ปฏิกิริยาเคมีของกระบวนการ ECF ซึ่งเป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ เกิดการละลายของซิลิกาในคือ อลูมิเนียม และเหล็ก ส่งผลให้เกิด Al^{3+} หรือ Fe^{2+} เพิ่มขึ้นในสารละลายโดยสารเหล่านี้มีคุณสมบัติลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse Layer) ส่งผลทาลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ ทำให้วิธีการ ECF มีค่าการบำบัดความขุ่นที่ดีกว่าวิธี EF

ความเป็นไปได้ในการนำวิธี IAF และวิธี EF และ ECF ไปใช้งาน

วิธี IAF ร่วมกับการเติมสารพอลิเมอร์และวิธี EF, ECF ต่างก็มีศักยภาพในการบำบัดน้ำ Produced water จากการทดลองที่ผ่านมาพบว่าวิธี EF, ECF จะให้ตะกอนหลังบำบัดมากกว่าวิธี IAF ตะกอนจากวิธี EF, ECF บางส่วนจะลอยขึ้นสู่ผิวน้ำโดยอาศัยการยกตัวของฟองก๊าซ อย่างไรก็ตามยังมีตะกอนเกิดขึ้นอีกหลังการทำปฏิกิริยาเสร็จสิ้นลง ทั้งนี้ในทางปฏิบัติจริงนั้น วิธี EF, ECF จึงจำเป็นต้องมีระบบกำจัดตะกอน ก่อนที่จะนำน้ำไปอัดลงหลุม หรือนำไปต่อกับวิธีการ IAF เพื่อช่วยในการกำจัดตะกอน โดยพบว่าการบำบัดน้ำด้วยวิธี ECF ให้ประสิทธิภาพการบำบัดค่า TSS, น้ำมันในน้ำ และความขุ่น มากกว่า 85 เปอร์เซ็นต์

การบำบัดน้ำด้วยวิธี EF ให้ประสิทธิภาพการบำบัด TSS ที่ดีกว่าวิธี ECF โดยให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ 49 เปอร์เซ็นต์ ให้ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและน้ำมันในน้ำมากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเบคทีเรีย 100 เปอร์เซ็นต์ และสามารถบำบัดอนุภาคที่มากกว่า 5 ไมครอน 98 เปอร์เซ็นต์ สรุปผลการบำบัดด้วยวิธี EF, ECF และ IAF ดังตาราง 19

การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธี IAF ปริมาณฟองอากาศและสารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ มีผลอย่างมากต่อความสำเร็จของระบบ โดยปริมาณฟองอากาศที่มาก ทำให้เกิดการปั่นป่วนมาก ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง เนื่องจากความปั่นป่วนสูงจะไปทำลายเสถียรภาพของฟล็อก ผลการทดลองเผยให้เห็นประสิทธิภาพการบำบัดค่า TSS ที่ 58 เปอร์เซ็นต์ น้ำมันในน้ำ 100 เปอร์เซ็นต์ ความขุ่น 94 เปอร์เซ็นต์ไม่มีประสิทธิภาพในการบำบัดเบคทีเรีย และให้ผลการบำบัดอนุภาคที่มากกว่า 5 ไมครอน 87 เปอร์เซ็นต์

ตาราง 20 ผลเปรียบเทียบการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิค EF, ECF และ IAF

พารามิเตอร์	EF*				ECF*		IAF	
(การบำบัด)							อากาศ	ไนโตรเจน
	BDD-BDD	Iron-Iron	Al-Al	SS-SS			**	***
TSS (%)	49	100	97	89			58	96
ความขุ่น (%)	95	98	96	95			94	100
น้ำมันในน้ำ (%)	99	44	85	79			100	92
กำจัดเบคทีเรีย (%)	SRB = 100%	N/A	N/A	N/A			ไม่	N/A
	PRD = 100%						สามารถ	
อนุภาคที่มากกว่า 5 ไมครอน	98%	N/A	N/A	N/A			87%	N/A

หมายเหตุ: * ทิ้งให้ตกตะกอนนาน 1 สัปดาห์ และให้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ เป็นเวลา 4 นาที

** เติมอากาศที่ 4 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที

*** เติมไนโตรเจนที่ 2 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที

การประเมินความเป็นไปได้ทางวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์

ระบบ ECF มีการใช้ไฟฟ้าในการสร้างฟองก๊าซ ซึ่งยังเป็นที่ถกเถียงเรื่องความปลอดภัย เนื่องจากระบบต้องสัมผัสกับสารไฮโดรคาร์บอน หากมีปริมาณออกซิเจนที่เหมาะสม กระแสไฟฟ้า อาจเหนี่ยวนำให้เกิดการลุกไหม้ได้ การนำระบบ ECF มาใช้งานจึงจำเป็นต้องมีระบบความปลอดภัยอื่นๆ เพิ่มเติม อีกทั้งยังก่อให้เกิดก๊าซคลอรีนซึ่งจะไปเร่งการกัดกร่อนของระบบท่อซึ่งยังคงต้องการการศึกษาเพิ่มเติม ต่างกับระบบ IAF หรือ IGF ที่สามารถเลือกใช้ก๊าซไฮโดรคาร์บอนเป็นตัวสร้างฟอง ลดปัญหาการกัดกร่อนท่อ และไม่มีปริมาณออกซิเจนในระบบ ทำให้เกิดความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น ผู้ทำการทดลองจึงเสนอวิธี IAF หรือ IGF ไปทำการติดตั้ง ณ แหล่งน้ำมันสิริกิติ์

การออกแบบระบบ IAF

ตาราง 21 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบระบบ IAF

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ในการออกแบบ
Design life	15 years
Flow rate	60,000 BPD
Design margin	10%
Turndown	20%
Product specification	
- Oil content	≤ 5 mg/l
- TSS	≤ 20 mg/l

ตาราง 22 ค่าใช้จ่ายของระบบ IAF

Capital cost	
- ค่าเครื่อง IAF (60,000 bpd)	800,000 USD
	<u>28,000,000 บาท</u>
Operational cost	
- Bubble maker (Motor power 12 kW)	12 kW
- กำหนดให้อัตราค่าไฟฟ้า	5 บาท ต่อ kW

ตาราง 22 (ต่อ)

Operational cost	
- ค่าไฟฟ้า Bubble maker (Motor power 12 kW)	60 บาทต่อชั่วโมง
- เติมน้ำระบบ = 24 ชั่วโมงต่อวัน	1440 บาทต่อวัน
- เติมน้ำระบบ = 365 วันต่อปี	525,600 บาทต่อปี
- ค่าซ่อมบำรุง	840,000 บาทต่อปี
- ค่าสารเคมี	1,800,000 บาทต่อปี
รวม	31,106,650 บาท

หมายเหตุ: คิดอัตราแลกเปลี่ยน 1 USD = 35 บาท

ตาราง 23 ค่าใช้จ่ายในการ Re-perforation

Operational cost	
จำนวนหลุมอัดน้ำทั้งหมด	100 หลุม
- จำนวนหลุมที่ต้องทำ Re-perforation	20 หลุมต่อปี
- ค่าใช้จ่ายในการ Re-perforation	1000 \$ / 1 เมตร
- ระยะที่ทำการ Re-perforation	100 เมตร
- ค่าใช้จ่ายรวม	2,000,000 \$ ต่อปี
	70,000,000 บาทต่อปี

หมายเหตุ: คิดอัตราแลกเปลี่ยน 1 USD = 35 บาท

ตาราง 24 เปรียบเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระหว่างการติดตั้งระบบ IAF กับเทคนิค
Re-perforation

ปีที่	ค่าใช้จ่ายของระบบ IAF (บาท)	ค่าใช้จ่าย Re-perforation (บาท)	Diff	%Diff
1	31,106,650	70,000,000	38,893,350	55.6
2	33,373,300	140,000,000	106,626,700	76.2
3	35,639,950	210,000,000	174,360,050	83.0
4	37,906,600	280,000,000	242,093,400	86.5
5	40,173,250	350,000,000	309,826,750	88.5
6	42,439,900	420,000,000	377,560,100	89.9
7	44,706,550	490,000,000	445,293,450	90.9
8	46,973,200	560,000,000	513,026,800	91.6
9	49,239,850	630,000,000	580,760,150	92.2
10	51,506,500	700,000,000	648,493,500	92.6
11	53,773,150	770,000,000	716,226,850	93
12	56,039,800	840,000,000	783,960,200	93.3
13	58,306,450	910,000,000	851,693,550	93.6
14	60,573,100	980,000,000	919,426,900	93.8
15	62,839,750	1,050,000,000	987,160,250	94.0

จากตาราง 24 พบว่าการติดตั้งระบบ IAF จะประหยัดเงินได้ประมาณ 38 ล้านบาทในปี
แรก และ 987 ล้านบาทในปีที่ 15

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมดังนี้

1. วิเคราะห์ปริมาณ chlorine ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ ECF เนื่องจากคลอรีนทำให้เกิดการกัดกร่อนระบบท่อ
2. วิเคราะห์การกัดกร่อนท่อเนื่องมาจากก๊าซคลอรีนของระบบ ECF
3. หาชนิดของโคแอกกูแลนต์เฮดที่เหมาะสมของระบบ IAF
4. ศึกษาอัตราการอุดตันของหลุม จากการอันน้ำที่ผ่านระบบ IAF และ ECF
5. ศึกษาการติดตั้ง Nut shell filter ก่อนและหลังผ่านระบบ IAF และ ECF
6. ศึกษา วิธี Modify EF โดยใช้ BDD เป็นอิเล็กโทรด พร้อมกับเติม โคแอกกูแลนต์เฮด เช่น

Alum





บรรณานุกรม

- ชูลีกร ชุกกลีน (2547). *การขจัดน้ำมันเสถียรในอิมัลชันของน้ำเสียโดยวิธีอินดิวิชแอโรโฟลเทชัน* (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ). สืบค้น 20 มีนาคม 2560, จาก <http://tdc.thailis.or.th>
- ประจักษ์ ศาสตรเวช. (2551). *การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันและสารลดแรงตึงผิวด้วยกระบวนการอินดิวิชแอโรโฟลเทชัน* (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ). สืบค้น 20 มีนาคม 2560, จาก <http://tdc.thailis.or.th>
- พชร โพธิ์ทอง. (2554). *การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำเสียปนเปื้อนสารหล่อลื่นโดยกระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลายร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน* (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ). สืบค้น 20 มีนาคม 2560, จาก <http://tdc.thailis.or.th>
- Alexander, K. (2007). Doped Diamond, A Compact Review on a New, Versatile Electrode Material. *International Journal of Electrochemical science*, 2(1), 355-385. Retrieved June 7, 2015, from <http://www.electrochemsci.org/papers/vol2/2050355.pdf>
- Al-Shamrani, A.A., James, A., & Xiao, X. (2002). Separation of oil from water by dissolved air flotation. *Colloids and Surfaces A*, 209(1), 15-26. Retrieved June 7, 2015, from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092777570200208X>
- Arthur, J.D., Langhus, B.G., & Patel, C. (2005). *Technical Summary of Oil and Gas Produced Water Treatment Technologies*. Retrieved May 11, 2015, from <http://www.all-llc.com/publicdownloads/ALLConsulting-WaterTreatmentOptionsReport.pdf>
- Chen, G. (2003). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 38(1), 11-41. Retrieved June 15, 2015, from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586603002636>
- Emamjomeh, M.M., & Sivakumar, M. (2009). Review of pollutants removed by elector coagulation and electrocoagulation/flotation processes. *Journal of Environmental Management*, 90(5), 1663-1679. Retrieved June 14, 2015, from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479708003617>

- Fakhru'l, R.A. (2009). Review of Technologies for oil and gas produced water treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 170(2-3), 530-551. Retrieved April 6, 2015, from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030438940900778X>
- Gupta, V.K. (2013). *Environmental Water*. UK: Elsevier. Hongzhu, M., & Bo, W., (2006). Electrochemical pilot-scale plant for oil field produced wastewater by M/C/Fe electrodes for injection. *Journal of Hazardous Materials*, 132(2-3), 237-243. Retrieved June 13, 2015, from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389405005868>
- Ly, K.T., David, J.B., Bohon, W.M., & Chan, A. (1998). Novel Chemical Dispersant for Removal of Organic/Inorganic "Schmoo" Scale in Produced Water Injection Systems. *Nace international*, 98(73). Retrieved from <https://www.onepetro.org/conference-paper/NACE-98073>
- Meyssami, B., & Kasaelan, A.B. (2005). Use of coagulants in treatment of olive oil wastewater model solutions by induced air flotation. *Bioresource Technology*, 96(3), 303-307. Retrieved May 10, 2015, from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852404001567>
- Moosai, R., & Dawe, R.A. (2003). Gas attachment of oil droplets of gas flotation for oily wastewater cleanup. *Separation and Purification Technology*, 33(3), 303-314. Retrieved April 13, 2015, from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586603000911>
- Nave, C.R. (2017). *HyperPhysics*. Retrieved May 15, 2015, from <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>
- Nave, C.R. (2017). *Band Theory of Solids*. Retrieved May 15, 2015, from <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/band.html>
- Rosa, D., & Rubio, J. (2005). The FF (Flocculation Flotation) Process. *Minerals Engineering*, 18(7), 701-707. Retrieved May 10, 2015, from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687504002729>

Strickland, W.T. (1980). Laboratory results of cleaning produced water by gas flotation.

Society of Petroleum Engineers Journal, 20(3). Retrieved from

<https://www.onepetro.org/journal-paper/SPE-7805-PA>

Tibbetts, P.J.C., Buchanan, I.T., Gawel, L.J., & Large, R. (1992). *A comprehensive*

determination of produced water composition. New York, NY: Plenum.

Zeta-meter.Inc, (1993). *Everything you want to know about Coagulation and*

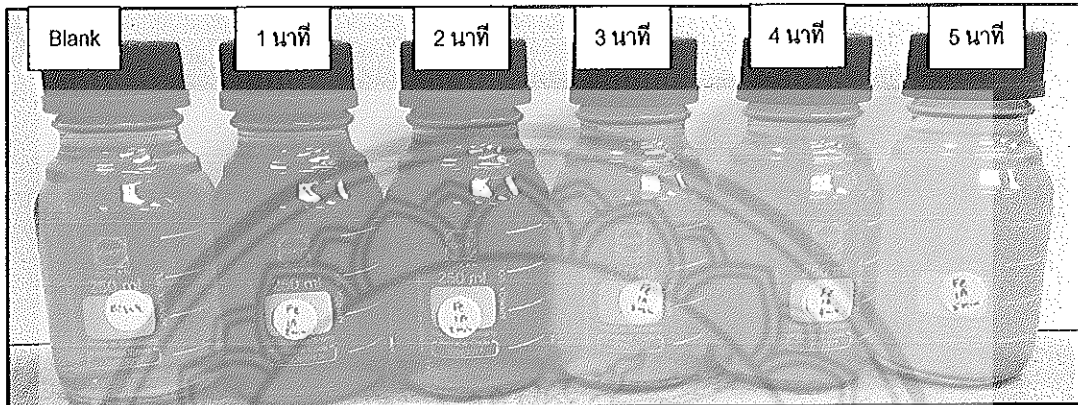
flocculation. Retrieved June 30, 2016, from <http://www.zeta-meter.com/coag.pdf>





ลักษณะทางกายภาพของน้ำหลังการบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโทรโฟลเดชั่น

1. การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโทรโฟลเดชั่นโดยใช้เหล็กเป็นขั้วแอโนดและคาโทดให้กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์

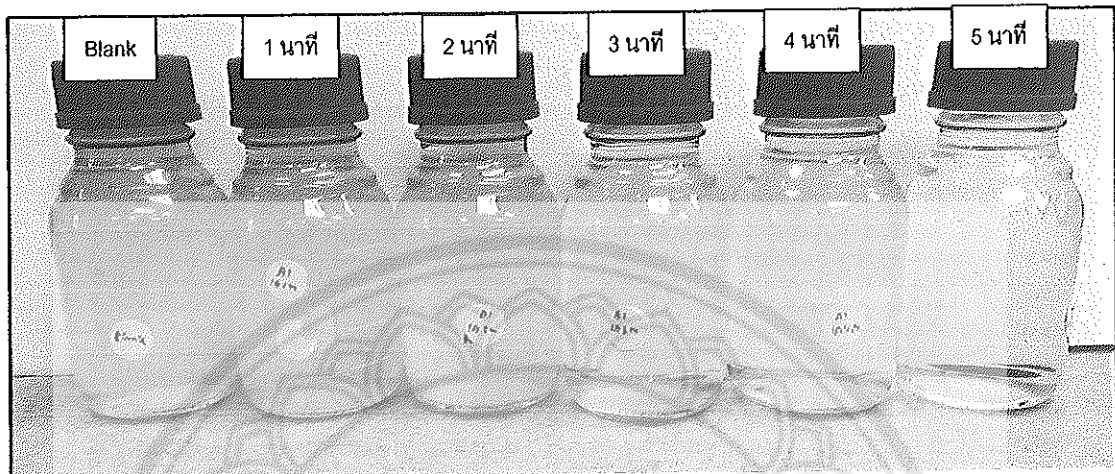


ภาพ 97 การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโทรโฟลเดชั่นโดยใช้เหล็กเป็นขั้วแอโนดและคาโทดให้กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ หลังทำปฏิกิริยา

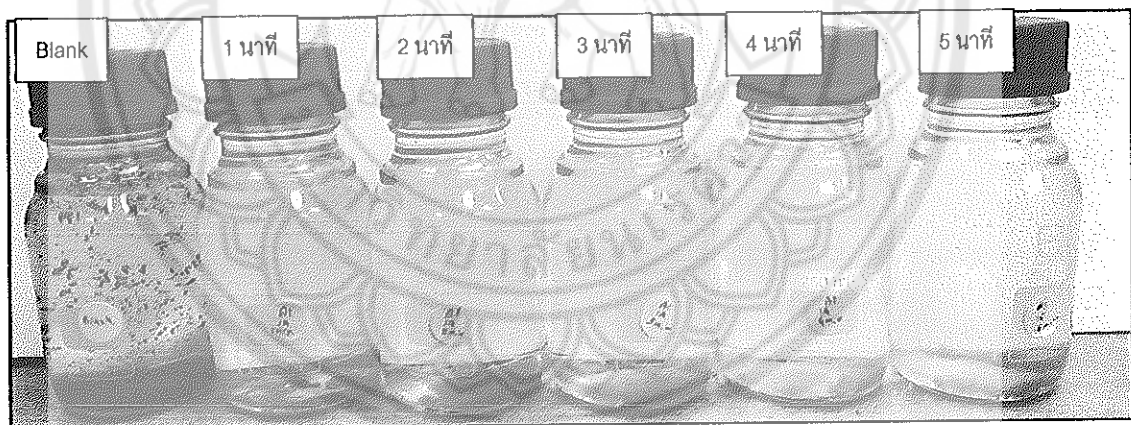


ภาพ 98 การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโทรโฟลเดชั่นโดยใช้เหล็กเป็นขั้วแอโนดและคาโทดให้กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์และปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 7 วัน

2. การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟลเตชันโดยใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วแอโนดและคาโทดให้กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์

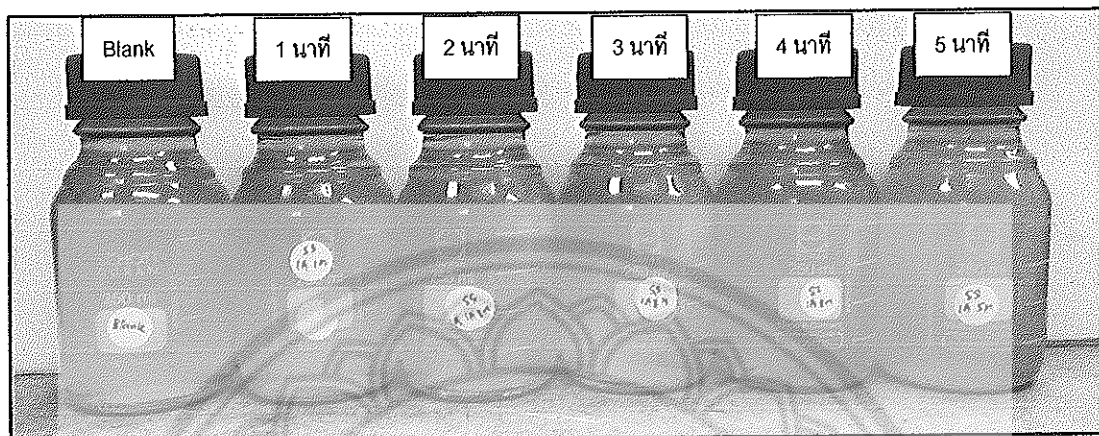


ภาพ 99 การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟลเตชันโดยใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วแอโนดและคาโทดให้กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ หลังทำปฏิกิริยา

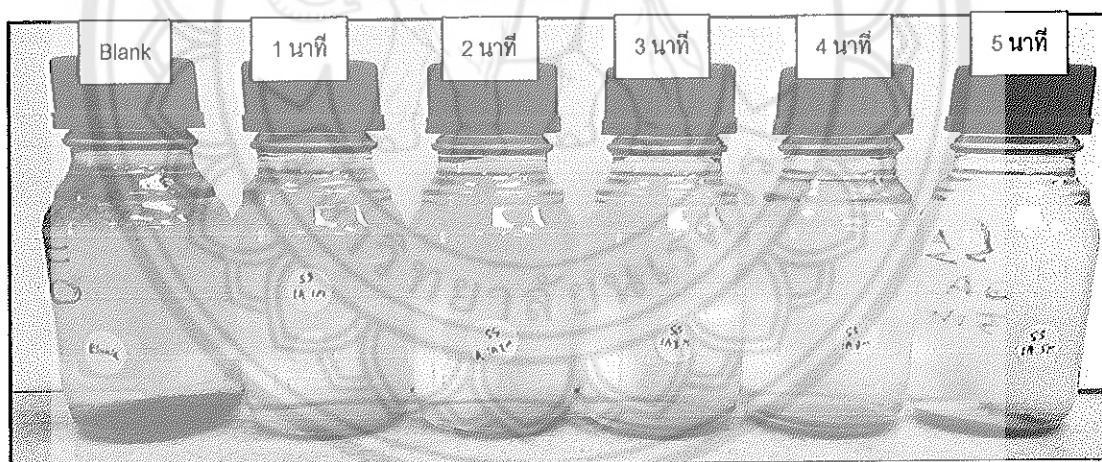


ภาพ 100 การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟลเตชันโดยใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วแอโนดและคาโทดให้กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์และปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 7 วัน

3. การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโทรโฟลเดชันโดยใช้สแตนเลสเป็นขั้วแอโนดและคาโทดให้กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์

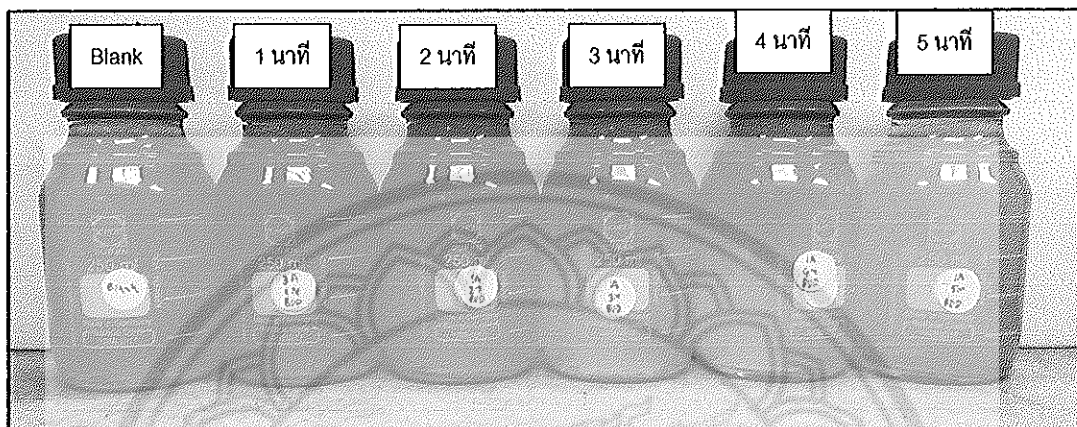


ภาพ 101 การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโทรโฟลเดชันโดยใช้สแตนเลสเป็นขั้วแอโนดและคาโทดให้กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ หลังทำปฏิกิริยา

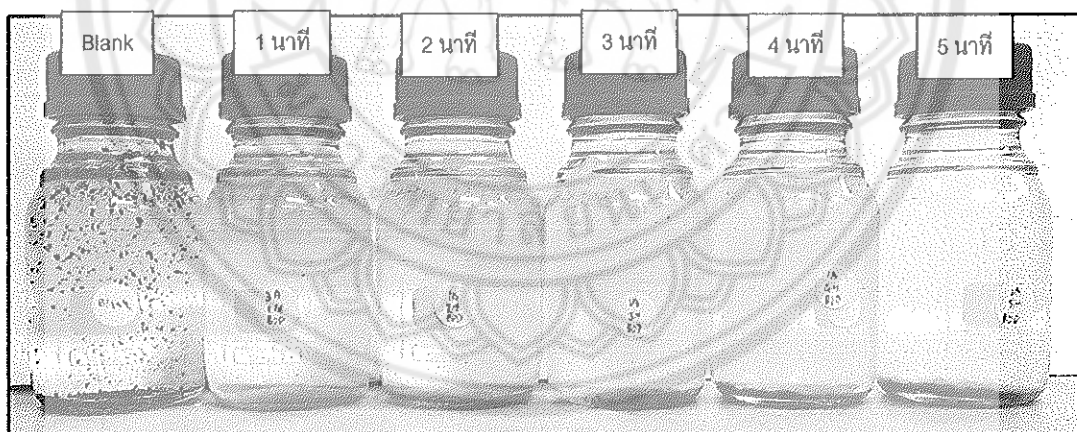


ภาพ 102 การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโทรโฟลเดชันโดยใช้สแตนเลสเป็นขั้วแอโนดและคาโทดให้กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์และปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 7 วัน

4. การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟลเดชั่นโดยใช้ BDD เป็นขั้วแอโนดและคาโทดให้กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์

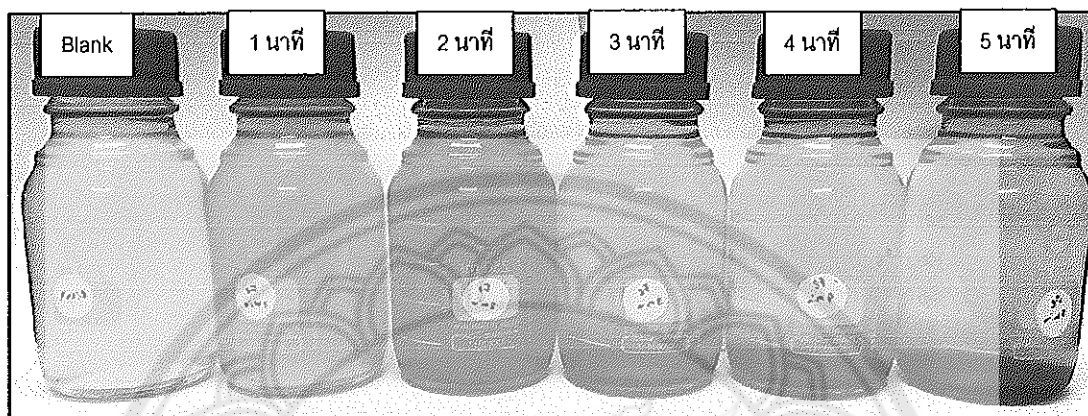


ภาพ 103 การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟลเดชั่นโดยใช้ BDD 120 เป็นขั้วแอโนดและคาโทดให้กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ หลังทำปฏิกิริยา



ภาพ 104 การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟลเดชั่นโดยใช้ BDD เป็นขั้วแอโนดและคาโทดให้กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์และปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 7 วัน

5. การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟลเดชั่นโดยใช้เหล็กเป็นขั้วแอโนดและคาโทดให้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์

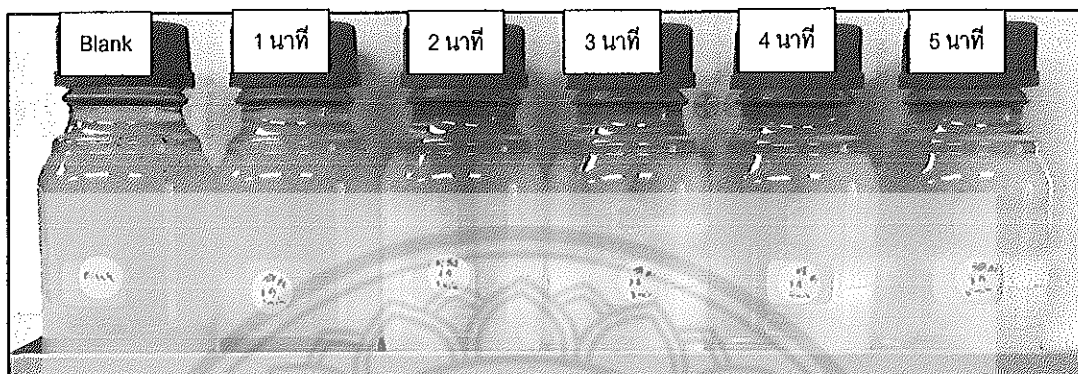


ภาพ 105 การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟลเดชั่นโดยใช้ เหล็ก 121 เป็นขั้วแอโนดและคาโทด ให้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ หลังทำปฏิกิริยา



ภาพ 106 การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟลเดชั่นโดยใช้ เหล็ก เป็นขั้วแอโนดและคาโทด ให้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์และปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 7 วัน

6. การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโทรโฟลเดชั่นโดยใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วแอโนดและคาโทดให้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์

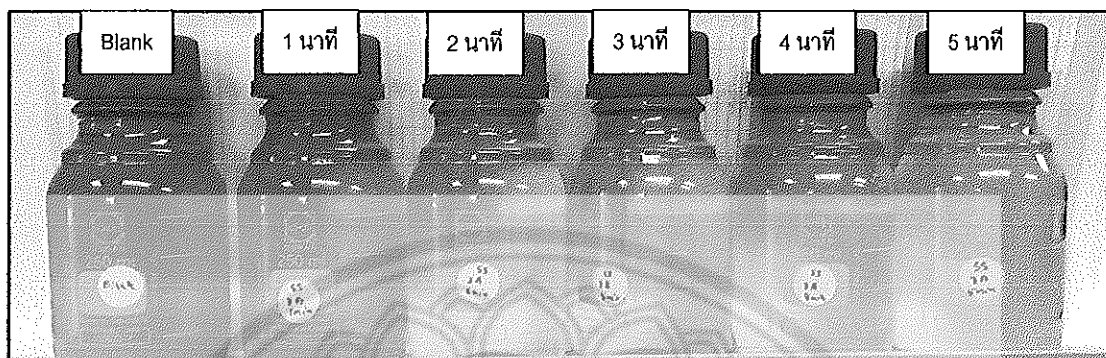


ภาพ 107 การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโทรโฟลเดชั่นโดย อลูมิเนียม 122 เป็นขั้วแอโนด และคาโทดให้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ หลังทำปฏิกิริยา

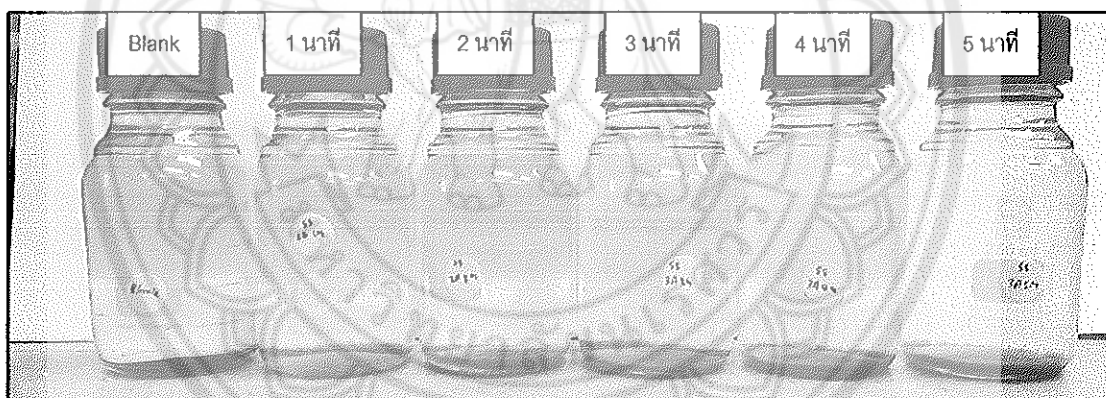


ภาพ 108 การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโทรโฟลเดชั่นโดยใช้อลูมิเนียม เป็นขั้วแอโนด และคาโทดให้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์และปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 7 วัน

7. การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟลเดชั่นโดยใช้สแตนเลสเป็นขั้วแอโนดและคาโทดให้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์

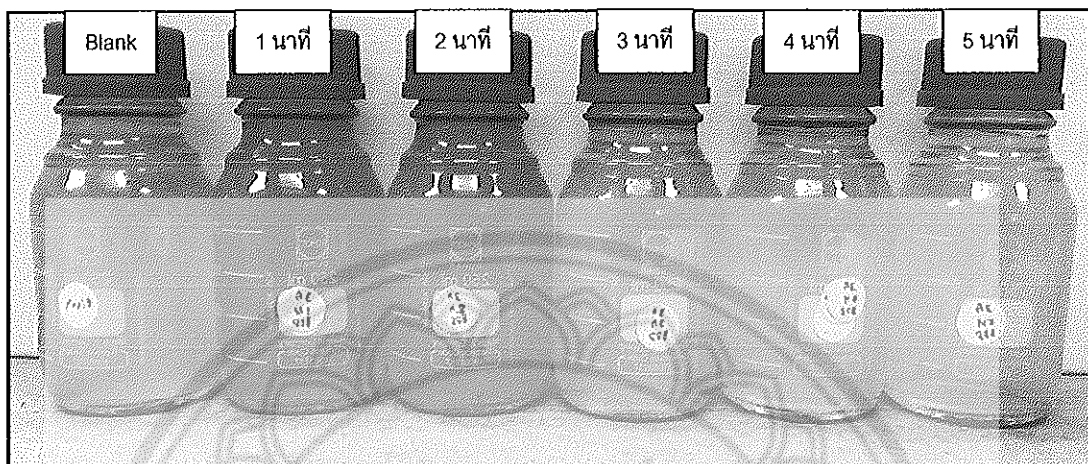


ภาพ 109 การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟลเดชั่นโดย สแตนเลส 123 เป็นขั้วแอโนดและคาโทดให้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ หลังทำปฏิกิริยา

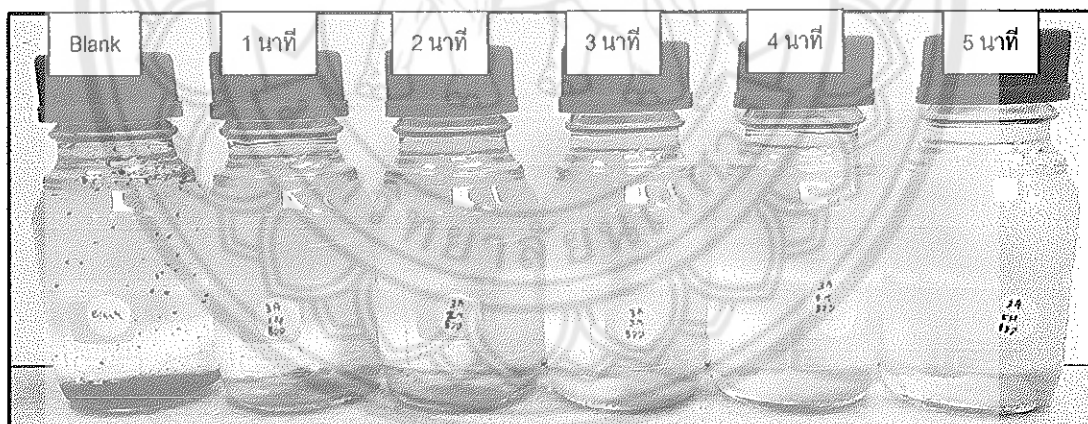


ภาพ 110 การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟลเดชั่นโดยใช้ สแตนเลส เป็นขั้วแอโนดและคาโทด ให้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์และปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 7 วัน

8. การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟลเดชั่นโดยใช้ BDD เป็นขั้วแอโนดและคาโทดให้ กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์



ภาพ 111 การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟลเดชั่นโดยใช้ BDD 124 เป็นขั้วแอโนดและคาโทด ให้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ หลังทำปฏิกิริยา



ภาพ 112 การบำบัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟลเดชั่นโดยใช้ BDD เป็นขั้วแอโนดและคาโทด ให้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์และปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 7 วัน