ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
สาขา	**ภาควิชา**

เรื่อง การย่อยสลายเมทิลไดเอทาโนลามีน (MDEA) ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าที่ใช้ไทเทเนียมเป็นขั้วแอโนด

Methyldiethanolamine (MDEA) Degradation by Electrooxidation with Titanium (Ti) Anode

นามผู้วิจัย นางสาวพิมพ์ผกา สุวรรณมาลี

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

(.....รองศาสตราจารย์ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา, M.Appl.Sc.....)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

(.....รองศาสตราจารย์สัญญา สิริวิทยาปกรณ์, Ph.D.....)

หัวหน้าภาควิชา .....

(.....รองศาสตราจารย์ชาติ เจียมไชยศรี, D.Eng.....)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....

(.....รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.....)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....**เดือน**..... **พ.ศ.**.....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การย่อยสลายเมทิลไดเอทาโนลามีน (MDEA) ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าที่ใช้ไทเทเนียมเป็นขั้วแอโนด

Methyldiethanolamine (MDEA) Degradation by Electrooxidation with Titanium (Ti) Anode

โดย

นางสาวพิมพ์ผกา สุวรรณมาลี

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พิมพ์ผกา สุวรรณมาลี 2557: การย่อยสลายเมทิลไดเอทาโนลามีน (MDEA) ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าที่ใช้ไทเทเนียมเป็นขั้วแอโนด ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา, M.Appl.Sc. 86 หน้า

สารเมทิลไดเอทาโนลามีน (MDEA) เป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยาก โดยการศึกษานี้ใช้กระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าในการบำบัด โดยประเมินประสิทธิภาพและติดตามสารผลิตภัณฑ์ในการย่อยสลายสาร MDEA ทำการทดลองแบบทีละเท (Batch reactor) ในถังปฏิกิริยา 4 ลิตร ใช้แผ่นโลหะเคลือบไทเทเนียมเป็นขั้วแอโนด แผ่นเหล็กเป็นขั้วแคโทด ต่อวงจรแบบโมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยวกับเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้ากระแสตรง โดยการทดลองส่วนแรกแปรผันความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 10, 15, 20 โวลต์ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แปรผัน pH 4, 7, 9 ผลการทดลองพบว่าสภาวะที่ดีที่สุดคือ pH 4 ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 โวลต์ สามารถกำจัด MDEA ได้ 31.15% จากการติดตามสารอินทรีย์ในรูป COD และสารอินทรีย์ในโตรเจนมีค่าลดลงเล็กน้อย โดยลดได้ 7.69% และ 16.22% ตามลำดับ แสดงว่าสาร MDEA ย่อยสลายได้ไม่สมบูรณ์และยังเหลือสาร Amine อยู่ในระบบ โดยสารผลิตภัณฑ์ได้แก่ โมโนเอทาโนลามีน, ไดเอทาโนลามีน, กรดไกลโคลิค, ไกลซีน, กรดออกซาลิค, กรดฟอร์มิค และกรดอะซิติก การทดลองส่วนที่สอง ทำการแปรผันความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 100, 300, 500 มิลลิโมลาร์ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 โวลต์ แปรผัน pH 4, 7, 9 ผลการทดลองพบว่า สภาวะที่ดีที่สุดคือ pH 9 ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิโมลาร์ สามารถลดสารอินทรีย์ในโตรเจนได้สูงถึง 70.29% และตรวจพบปริมาณไนเตรทมากที่สุด 108.12 mg/l และตรวจพบสารผลิตภัณฑ์ได้แก่ ไกลซีน, กรดออกซาลิค และกรดอะซิติก

_____ _____ ___ / ___ / ____

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Pimpaka Suwanmalee 2014: Methyldiethanolamine (MDEA) Degradation by Electrooxidation with Titanium (Ti) Anode. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Patcharaporn Suwanvitaya, M.Appl.Sc. 86 pages.

Methyldiethanolamine (MDEA) is teriary amine, not readily degraded by biological process and stable in the environment. The objective of this study was to determine the efficiency of electrooxidation process of MDEA and investigate the products of process. Electrooxidation process was performed on synthetic wastewater, containing 500 mg MDEA/l, in a 4L batch reactor, using titanium coated metal as anode and stainless steel as cathode placed at 1 cm electrode distance. Electrolytic cell, with direct current power supply, was single cell monopolar type. The experiment was divided into 2 parts. In the first part, the variables were voltages (10, 15, 20V) and pH (4, 7, 9). In the second part, H_2O_2 was added at 100, 300, 500 mM under 20V at pH 4, 7, 9. The results from the first part showed that MDEA removal was influenced by pH and voltage. The highest MDEA removal of 31.15% was achieved at pH4, 20V. However, 7.69% COD and 16.22% organic nitrogen could be removed. This showed that MDEA was not completely oxidized. Monoethanolamine, dithanolamine, glycolic acid, glycine, oxalic acid, formic acid and acetic acid were electrooxidation products found. The addition of H_2O_2 (in the second part) enhanced organic nitrogen removal, The highest removal of organic nitrogen (70.29%) was achieved at pH 9 with the highest accumulated amount of NO_3^- (108.12 mg/l). Oxidation products from this condition were glycine, oxalic acid and acetic acid.

_____ _____ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักเป็นอย่างสูงที่ให้ความกรุณาและเมตตาในการให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และแก้ไขความบกพร่องในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด และขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์สัญญา สิริวิทยาปกรณ์ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่กรุณาให้คำปรึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นและสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณและขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และน้องชาย ของผู้เขียนที่ได้ให้การอบรมเลี้ยงดูและเป็นกำลังใจให้ผู้เขียน รวมถึงขอบคุณบรรดาเพื่อนทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา และกำลังใจตลอดระยะเวลาที่ทำวิทยานิพนธ์ จนสำเร็จการศึกษา

พิมพ์ผกา สุวรรณมาลี

กรกฎาคม 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	33
อุปกรณ์	33
วิธีการ	36
ผลและวิจารณ์	41
สรุปและข้อเสนอแนะ	61
สรุป	61
ข้อเสนอแนะ	62
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	63
ภาคผนวก	67
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์ทางเคมี	68
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลอง	77
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	86

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	คุณสมบัติของเมทิลไดเอทาโนลามีน	6
2	อันตรายจากสารเมทิลไดเอทาโนลามีน	8
3	ความสัมพันธ์ของเครื่องหมาย ΔG และ E_{cell}	15
4	สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	30
5	พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์ทางเคมี	38
6	สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นแต่ละสภาวะพีเอช	51
7	สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นแต่ละสภาวะพีเอชกรณีเติม H_2O_2	60

ตารางผนวกที่

ข1	ความเข้มข้น MDEA ก่อนและหลังกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าที่ 20 โวลต์ ที่ 0 นาที และ 240 นาที	78
ข2	Condition ของเครื่อง GC-FID	80
ข3	Condition ของเครื่อง LC-MS/MS	81

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบเอมีน	5
2	การจัดเรียงเซลล์ไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว	18
3	การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่ออนุกรม	18
4	การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน	19
5	การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบไบโพลาร์	20
6	แผนผังถังปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี	34
7	ถังปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีต่อวงจรแบบโมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว	34
8	แผนผังการทดลองกรณีไม่เติม H_2O_2	39
9	แผนผังการทดลองกรณีเติม H_2O_2	40
10	การกำจัด MDEA ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าที่ pH 4, 7, 9 ที่ 20 โวลต์ ที่ 0 นาที และ 240 นาที	42
11	ปริมาณ COD ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10, 15, 20 โวลต์ ที่สภาวะ pH 4	43
12	ปริมาณ COD ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10, 15, 20 โวลต์ ที่สภาวะ pH 7	44
13	ปริมาณ COD ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10, 15, 20 โวลต์ ที่สภาวะ pH 9	44
14	ปริมาณ Org-N ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10, 15, 20 โวลต์ ที่สภาวะ pH 4	45
15	ปริมาณ Org-N ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10, 15, 20 โวลต์ ที่สภาวะ pH 7	45
16	ปริมาณ Org-N ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10, 15, 20 โวลต์ ที่สภาวะ pH 9	46
17	ปริมาณ NH_3ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10, 15, 20 โวลต์ ที่สภาวะ pH 4	46
18	ปริมาณ NH_3ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10, 15, 20 โวลต์ ที่สภาวะ pH 7	47
19	ปริมาณ NH_3ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10, 15, 20 โวลต์ ที่สภาวะ pH 9	47
20	ปริมาณ NO_3^- ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10, 15, 20 โวลต์ ที่สภาวะ pH 4	48
21	ปริมาณ NO_3^- ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10, 15, 20 โวลต์ ที่สภาวะ pH 7	48
22	ปริมาณ NO_3^- ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10, 15, 20 โวลต์ ที่สภาวะ pH 9	49
23	ปริมาณ Org-N, NH_3-N, NO_3^- -N หลังผ่านกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า ที่ 20 โวลต์ ที่ pH 4, 7, 9 โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่า TKN ตั้งต้น	50
24	ปริมาณ Org-N ที่ความเข้มข้นของ H_2O_2 100, 300, 500 mM ที่สภาวะ pH 4	53
25	ปริมาณ Org-N ที่ความเข้มข้นของ H_2O_2 100, 300, 500 mM ที่สภาวะ pH 7	53
26	ปริมาณ Org-N ที่ความเข้มข้นของ H_2O_2 100, 300, 500 mM ที่สภาวะ pH 9	53

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

27	ปริมาณ NH_3 ที่ความเข้มข้นของ H_2O_2 100, 300, 500 mM ที่สภาวะ pH 4	54
28	ปริมาณ NH_3 ที่ความเข้มข้นของ H_2O_2 100, 300, 500 mM ที่สภาวะ pH 7	54
29	ปริมาณ NH_3 ที่ความเข้มข้นของ H_2O_2 100, 300, 500 mM ที่สภาวะ pH 9	55
30	ปริมาณ NO_3^- ที่ความเข้มข้นของ H_2O_2 100, 300, 500 mM ที่สภาวะ pH 4	56
31	ปริมาณ NO_3^- ที่ความเข้มข้นของ H_2O_2 100, 300, 500 mM ที่สภาวะ pH 7	56
32	ปริมาณ NO_3^- ที่ความเข้มข้นของ H_2O_2 100, 300, 500 mM ที่สภาวะ pH 9	56
33	ปริมาณ Org-N, NH_3-N หลังผ่านกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าที่ pH 4, 7, 9 ที่ 500 mM คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของ TKN ตั้งต้น	58

ภาพผนวกที่

ข1	Mass spectrum ของ Monoethanolamine	82
ข2	Mass spectrum ของ Diethanolamine	82
ข3	Mass spectrum ของ Methyldiethanolamine	83
ข4	Mass spectrum ของ Glycolic acid	83
ข5	Mass spectrum ของ Glycine	84
ข6	Mass spectrum ของ Oxalic acid	84
ข7	Mass spectrum ของ Formic acid	85
ข8	Mass spectrum ของ Acetic acid	85

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	พื้นที่หน้าตัดของขั้วไฟฟ้าที่สัมผัสกับสารละลายอิเล็กโตรไลต์หน่วยตารางเซนติเมตร
$Ag^{+}_{(aq)}$	=	เงินไอออน
$Ag_{(S)}$	=	โลหะเงิน
Al	=	อลูมิเนียม
$Al_{(S)}$	=	โลหะอลูมิเนียม
Al^{3+}	=	อลูมิเนียมไอออน
Au	=	ทอง
BDD	=	โบรอนโดปไดมอนด์ (Boron doped diamon)
C	=	คูลอมบ์
Cl^{-}	=	คลอไรด์ไอออน
Cl_2	=	คลอรีน
cm	=	เซนติเมตร
Cu	=	ทองแดง
COD	=	Chemical Oxygen Demand คือปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ทั้งในรูปที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำด้วยวิธีทางเคมี
D	=	ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า
e^{-}	=	อิเล็คตรอน
E_{anode}	=	ศักย์ของขั้วไฟฟ้าแอโนด
$E_{cathode}$	=	ศักย์ของขั้วไฟฟ้าแคโทด
E_{cell}	=	ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์
E°_{cell}	=	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์
E°_{cu}	=	ศักย์ไฟฟ้าของทองแดง
F	=	ค่าฟาราเดย์
Fe	=	เหล็ก
$Fe_{(S)}$	=	โลหะเหล็ก
Fe^{2+}	=	เฟอรัสไอออน
Fe^{3+}	=	เฟอริคไอออน
$Fe(OH)_2$	=	เฟอรัสไฮดรอกไซด์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

ΔG	=	พลังงานอิสระ
H_2	=	ก๊าซไฮโดรเจน
H_2O	=	น้ำ
H_2O_2	=	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
hr	=	ชั่วโมง
I	=	กระแสไฟฟ้า
l	=	ลิตร
KCl	=	โพแทสเซียมคลอไรด์
MDEA	=	สารเมทิลไดเอทาโนลามีน
m^2	=	ตารางเมตร
m^3	=	ลูกบาศก์เมตร
ml	=	มิลลิลิตร
mg/l	=	หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร
mM	=	หน่วยมิลลิโมลาร์
NaCl	=	โซเดียมคลอไรด์
Na_2SO_4	=	โซเดียมซัลเฟต
Na_3PO_4	=	โซเดียมฟอสเฟต
n	=	จำนวนโมลของอิเล็กตรอน
NH_3	=	ปริมาณแอมโมเนีย
NO_3^-	=	ปริมาณไนเตรท
OCl^-	=	ไฮโปคลอไรท์
OH^-	=	ไฮดรอกไซด์ไอออน
$^{\cdot}OH$	=	ไฮดรอกไซด์แรดดิคัล
O_2	=	ก๊าซออกซิเจน
Org-N	=	สารอินทรีย์ไนโตรเจน
PbO_2	=	โลหะผสมตะกั่ว
ppm	=	หน่วยหนึ่งส่วนในล้าน
Pt	=	แพลทินัม
pH	=	ค่าความเป็นกรดด่าง
Q	=	ปริมาณไฟฟ้า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

R	=	ความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโตรไลต์
TOC	=	ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในสารอินทรีย์
TKN	=	Total Kjeldahl Nitrogen คือปริมาณไนโตรเจนที่เป็นผลรวมแอมโมเนียไนโตรเจนและสารอินทรีย์ไนโตรเจน
Ti	=	ไทเทเนียม
TiO_2	=	ไทเทเนียมออกไซด์
$TiCl_4$	=	ไทเทเนียมคลอไรด์
Ti/RuO_2	=	โลหะผสมไทเทเนียม
$TiRuSnO_2$	=	โลหะผสมไทเทเนียม
t	=	เวลาหน่วยวินาที
UV	=	แสงอัลตราไวโอเลต
V	=	ความต่างศักย์ไฟฟ้าหน่วยโวลต์
W	=	งานทางไฟฟ้าเคมี
W_{max}	=	งานสูงสุด
Ω	=	โอห์ม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การย่อยสลายเมทิลไดเอทาโนลามีน (MDEA) ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าที่ใช้ไทเทเนียมเป็นขั้วแอโนด

Methyldiethanolamine (MDEA) Degradation by Electrooxidation with Titanium (Ti) Anode

คำนำ

สารเมทิลไดเอทาโนลามีน (MDEA) เป็นสารเคมีในกลุ่มอัลคาโนลามีน (Alkanolamine) ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย เช่น อุตสาหกรรมโรงกลั่นน้ำมัน (Oil refinery), อุตสาหกรรมสังเคราะห์ก๊าซ (Syngas production), อุตสาหกรรมผลิตก๊าซธรรมชาติ (Natural gas), อุตสาหกรรมปิโตรเคมี (Petrochemical plants) และอุตสาหกรรมผลิตสารเคมี (Chemical processing plants) เป็นต้น โดยสารเมทิลไดเอทาโนลามีน (MDEA) ใช้ในการกำจัดก๊าซปนเปื้อน (Acid gases) ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ออกจากแหล่งวัตถุดิบ และยังใช้ในการดูดซับก๊าซปนเปื้อนในอุตสาหกรรมการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและการสังเคราะห์แอมโมเนียอีกด้วย เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่บริสุทธิ์

เนื่องจากสารเมทิลไดเอทาโนลามีน (MDEA) เป็นสารอินทรีย์ย่อยยาก (Recalcitrant organic compound) ในกลุ่มเอมีน (Tertiary amine) มีความเสถียรและคงทนอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้นาน ยากต่อการย่อยสลายโดยกระบวนการทางชีวภาพ เช่นเดียวกับสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากอื่นๆ จึงต้องอาศัยวิธีการบำบัดทางเคมีที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อกำจัดหรือลดความเป็นอันตรายในของเสีย หรือทำให้สารอินทรีย์อยู่ในรูปโครงสร้างที่ง่ายต่อการย่อยสลายทางชีวภาพก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งการบำบัดวิธีทางเคมีที่มีประสิทธิภาพสูง (Advanced oxidation process; AOP) ได้แก่ Photooxidation, Ozonation, Electrochemical เป็นต้น พบว่าวิธี photooxidation โดยใช้ UV/H_2O_2 ในการบำบัดสาร MDEA สามารถลด TOC ได้ 67.05% ที่ความเข้มข้นของ H_2O_2 2079-6237 ppm ระดับแสง UV lamp 8 วัตต์ (Harimurti *et al*., 2011) และการบำบัดสาร MDEA จากกระบวนการแยกก๊าซธรรมชาติโดยกระบวนการ Ozonation สามารถบำบัด MDEA ได้ 80.45%, ลด COD ได้ 44.59%, ลด TOC ได้ 34.90% (Jampech, 2011) โดยหลายวิธีใช้สารที่ผลิตในกระบวนการจึงลดการใช้สารเคมี มีค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียต่ำ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical process) เป็นกระบวนการที่มีการประยุกต์สำหรับใช้บำบัดน้ำเสีย เช่น กระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า (Electrooxidation) กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation) กระบวนการทำให้ตะกอนลอยด้วยไฟฟ้า (Electroflotation) เป็นต้น โดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า (Electrooxidation) สามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้หลายประเภทรวมถึงสารกลุ่มเอมีนด้วย เช่น การบำบัดไนโตรฟีนอล สามารถลด COD ได้ 92% (Rabaaoui *et al*., 2013) การบำบัดสารอะโรมาติกเอมีน สามารถลด COD ได้ 90% และลด TOC ได้ 60-80% (Pacheco *et al*., 2010) การบำบัดสารกลุ่มซัลโฟเนตเอมีนที่มีสาร 4 ชนิด ได้แก่ อะนีลีน (Aniline), ออทานิลิค (Ortanilic), เมทานิลิค (Metanilic) และซัลฟานิลิค (Sulfanilic acid) สามารถลด COD ได้ 91%, 75%, 88% และ 85% ตามลำดับ และลด TOC ได้ 90%, 82%, 87% และ 79% ตามลำดับ (Santos *et al*., 2010) ในการศึกษานี้จึงเลือกใช้กระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าในการย่อยสลายสารเมทิลไดเอทาโนลามีน (MDEA) โดยประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการและติดตามสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ภายใต้สภาวะพีเอชที่ 4, 7, 9 และติดตามสารผลิตภัณฑ์ในรูป COD, TKN, Organic nitrogen, Ammonia (NH_3), Nitrate (NO_3^-) และผลิตภัณฑ์สารประกอบอินทรีย์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

1. ประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าในการย่อยสลายเมทิลไดเอทาโนลามีน (MDEA) โดยติดตามพารามิเตอร์ได้แก่ ปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมดในรูปซีโอดี (COD) และปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจน (Organic nitrogen)

2. ตรวจหาผลิตภัณฑ์จากกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าของสารเมทิลไดเอทาโนลามีน (MDEA)

ขอบเขตการศึกษา

1. น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์เตรียมจากสารเมทิลไดเอทาโนลามีน (MDEA) ที่ความเข้มข้น 500 mg/l

2. การทดลองนี้ดำเนินการในถังปฏิกิริยาขนาด 4 ลิตร ทำจากอะคริลิคขนาด 15×15×25 เซนติเมตร ต่อขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว (Monopolar electrode single cell) ขั้วไฟฟ้าแคโทดเป็นแผ่นเหล็กขนาด 13×18×0.2 เซนติเมตร ขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นแผ่นโลหะเคลือบไทเทเนียม (Titanium coated) ขนาด 13×18×0.2 เซนติเมตร ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 1 เซนติเมตร ต่อเข้ากับเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นกระแสตรง (DC Regulator Power Supply ยี่ห้อ Hammax PS-204111) ปรับความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ในช่วง 0-30 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าสูงสุด 3 แอมแปร์

3. การทดลองเป็นแบบทีละเท (Batch reactor) โดยส่วนแรกแปรผันความต่างศักย์ไฟฟ้า 10, 15, 20 โวลต์ ที่ pH 4, 7, 9 ทดลองเป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยเก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 60, 120, 180, 240 นาที เพื่อนำไปวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ส่วนที่สองแปรผันความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่ 100, 300, 500 มิลลิโมลาร์ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 โวลต์ ที่ pH 4, 7, 9 โดยเก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 60, 120, 180, 240 นาที เพื่อนำไปวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆเช่นกัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

1. สารอัลคาโนลามีน (Alkanolamines)

สารอัลคาโนลามีน (Alkanolamines) เป็นสารประกอบเอมีนที่มีกลุ่มสารอื่นๆเข้ามาแทนที่ตำแหน่งของไฮโดรเจนอะตอมของแอมโมเนียตั้งแต่หนึ่งตำแหน่งหรือมากกว่านั้น ทำให้สามารถแยกชนิดของกลุ่มสารเอมีนได้เป็น 3 ชนิด ได้แก่ ปฐมภูมิ (Primary), ทุติยภูมิ (Secondary), ตติยภูมิ (Tertiary) โดยการแทนที่ไฮโดรเจนอะตอมหนึ่งตำแหน่งเกิดกลุ่มสารเอมีนชนิดปฐมภูมิ (Primary amine) เช่น โมโนเอทาโนลามีน (Monoethanolamine, MEA) การแทนที่ไฮโดรเจนอะตอม 2 ตำแหน่ง เกิดกลุ่มสารเอมีนชนิดทุติยภูมิ (Secondary amine) เช่น ไดเอทาโนลามีน (Diethanolamine, DEA) การแทนที่ไฮโดรเจนอะตอม 3 ตำแหน่ง เกิดกลุ่มสารเอมีนชนิดตติยภูมิ (Tertiary amine) เช่น เมทิลไดเอทาโนลามีน (Methyldiethanolamine, MDEA) โดยโครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบเอมีนแสดงดังภาพที่ 1

สารอัลคาโนลามีน (Alkanolamines) เป็นสารกลุ่มเอมีนที่นิยมใช้เป็นสารทำละลายในหลายอุตสาหกรรม โดยใช้เป็นสารกำจัดก๊าซปนเปื้อน (Acid gases) เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ในอุตสาหกรรมโรงงานกลั่นน้ำมัน (Oil refinery) ในกระบวนการผลิตก๊าซแอลพีจี (LPG) อุตสาหกรรมผลิตก๊าซธรรมชาติ (Natural gas processing plants) อุตสาหกรรมปิโตรเคมี (Petrochemical plants) อีกทั้งยังใช้เป็นสารกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการขั้นสุดท้ายของการผลิตก๊าซไฮโดรเจน (H_2) อีกด้วย

ในการกำจัดก๊าซปนเปื้อน (Acid gases) ด้วยสารอัลคาโนลามีน (Alkanolamines)ในกระบวนการผลิตภาคอุตสาหกรรมต่างๆ พบว่า เมทิลไดเอทาโนลามีน (Methyldiethanolamine; MDEA) มีประสิทธิภาพในการกำจัดดีกว่ากลุ่มสารเอมีนตัวอื่น เพราะสามารถเลือกจับ (Selectivity) กับไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ได้ดี มีความสามารถในการดูดซับก๊าซปนเปื้อนสูง ใช้พลังงานในการนำกลับมาใช้ใหม่น้อย ใช้ความร้อนในการย่อยสลายต่ำและการกัดกร่อนต่ำ (Zhi and Kai, 2009) ทำให้เป็นที่นิยมมากในภาคอุตสาหกรรม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$H_2N\text{-}CH_2\text{-}CH_2\text{-}OH$ $HO\text{-}(CH_2)_2\text{-}NH\text{-}(CH_2)_2\text{-}OH$

Primary amine: Monoethanolamine (MEA) Secondary amine: Diethanolamine (DEA)

$$HO\text{-}CH_2\text{-}CH_2\text{-}N(CH_3)\text{-}CH_2\text{-}CH_2\text{-}OH$$

Tertiary amine: Methyldiethanolamine (MDEA)

ภาพที่ 1 โครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบเอมีน

ที่มา: Kidnay and William (2006)

2. สารเมทิลไดเอทาโนลามีน (Methyldiethanolamine)

สารเมทิลไดเอทาโนลามีน (MDEA) อยู่ในกลุ่มสารเอมีนชนิดตติยภูมิ (Tertiary amine) สถานะเป็นของเหลวใส ไม่มีสีหรือสีเหลืองจางๆสูตรโมเลกุล $C_5H_{13}NO_2$ น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 119.16 กรัมต่อโมล คุณสมบัติของ MDEA แสดงดังตารางที่ 1 สามารถละลายผสมกับน้ำ แอลกอฮอล์และเบนซีนได้ เป็นสารระเหยต่ำ (Lower volatility) มีเสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability) อยู่ในสภาวะด่างอ่อนๆ สามารถรับภาระ (Load) ของคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูง (Feng *et al*., 2010) และเมื่อสาร MDEA ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จะได้ไบคาร์บอเนตดังสมการที่ 1 (Danaldson and Nguyen, 1980)

$$MDEA + CO_2 + H_2O \longrightarrow MDEAH^+ + HCO_3^- \qquad (1)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเมทิลไดเอทาโนลามีน

Properties	Unit	Values
Molecular formula		$C_5H_{13}NO_2$
Molecular weight	g/mol	119.16
Melting point	°c	<-10°c
Boiling point	°c	>100°c
Density (20°c)	g/cm^3	1.03
Solubility in water (20°c)		miscible

ที่มา: BAFS The Chemical Company (2005)

Fürhacker *et al*. (2003) ศึกษาการย่อยสารเมทิลไดเอทาโนลามีน (MDEA) ด้วยจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนดำรงชีวิต โดยศึกษาในถังปฏิกิริยาแบบทีละเท (Batch) และแบบต่อเนื่อง (Continuous) พบว่าการศึกษาแบบทีละเท (Batch) มีการย่อยสลายทางชีวภาพน้อยกว่า 20% หลังผ่านไป 28 วัน ในขณะที่การศึกษาแบบต่อเนื่องใช้ระยะเวลานานกว่า สามารถลดปริมาณคาร์บอนในสารอินทรีย์ทั้งหมด (Total organic carbon; TOC) ได้ถึง 96% ถือได้ว่ามีการย่อยสลายทางชีวภาพได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับการศึกษาแบบทีละเท แต่เนื่องจากการทดลองนี้ต้องใช้เวลานานและต้องใช้จุลินทรีย์ที่ต้องเติมอากาศและอาหารเป็นระยะๆ ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานและใช้เวลานานในการย่อยสลายสารเมทิลไดเอทาโนลามีน (MDEA) หากมีการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม อาจต้องใช้เวลานานมากในการย่อยสลายตามธรรมชาติ ทำให้เกิดปัญหามลพิษตามมาได้

เนื่องจากการบำบัดสาร MDEA ด้วยวิธีทางชีวภาพมีความสามารถในการย่อยสลายต่ำ จึงนำกระบวนการบำบัดด้วยเทคโนโลยีขั้นสูงเข้ามาประยุกต์ใช้ Harimurti *et al.* (2011) ศึกษาการบำบัดสารเมทิลไดเอทาโนลามีน (MDEA) โดยใช้ UV/H_2O_2 ผลการทดลองพบว่าสามารถลดปริมาณคาร์บอนในสารอินทรีย์ทั้งหมด (Total organic carbon, TOC) ของสารเมทิลไดเอทาโนลามีน (MDEA) ได้ถึง 67.05% ที่ความเข้มข้นของ H_2O_2 2079-6237 ppm และที่ระดับแสง UV lamp 8 วัตต์ โดยประสิทธิภาพการบำบัด TOC เพิ่มขึ้นเมื่อระดับความเข้มข้นของ H_2O_2 และระดับแสง UV lamp เพิ่มขึ้นด้วย และ Jampech (2011) ศึกษาการบำบัดสารเมทิลไดเอทาโนลามีน (MDEA) จากกระบวนการแยกก๊าซธรรมชาติโดยโอโซน แนวโน้มการบำบัดสารเมทิลไดเอทาโนลามีน (MDEA)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของโอโซนมากขึ้น ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมที่ pH เท่ากับ 10 สามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมด (COD), ปริมาณคาร์บอนในสารอินทรีย์ทั้งหมด (TOC) และปริมาณการบำบัดสารเมทิลไดเอทาโนลามีนได้ เท่ากับ 44.59% , 34.90% และ 80.45% ตามลำดับ สัดส่วนการบำบัดสารเมทิลไดเอทาโนลามีน (MDEA) ต่อปริมาณโอโซนอยู่ช่วง 1.5-4.5

นอกเหนือจากวิธี Photooxidation และ Ozonation แล้ว กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical)ยังเป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ย่อยยากได้

สารเมทิลไดเอทาโนลามีน (MDEA) เป็นสารเคมีที่อันตรายต่อมนุษย์ ทั้งทางด้านสุขภาพอนามัย ทั้งทางระบบหายใจ ผิวหนัง ปาก ตา และทำให้เกิดความผิดปกติอื่น ๆ ค่าประมาณความเป็นพิษเฉียบพลัน เทียบโดยสัตว์ทดลอง และความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์ เทียบโดยสัตว์และพืชน้ำ อันตรายจากสารเมทิลไดเอทาโนลามีน (MDEA) แสดงดังตารางที่ 2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 2 อันตรายจากสารเมทิลไดเอทาโนลามีน

สัมผัสทางหายใจ	จะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินหายใจ ทำให้ไอ ปวดศีรษะ เจ็บคอ อ่อนเพลีย
สัมผัสทางผิวหนัง	จะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง
กินหรือกลืนเข้าไป	จะก่อให้เกิดการระคายเคือง ต่อระบบทางเดินอาหาร ทำให้คลื่นไส้ ท้องร่วง
สัมผัสถูกตา	จะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อตาอย่างรุนแรง
การก่อมะเร็ง ความผิดปกติอื่น ๆ	เป็นสารก่อมะเร็งตามบัญชีรายชื่อของ ACGIH, IARC, NIOSH, NTP และOSHA
ค่าประมาณ ความเป็นพิษเฉียบพลัน	ทางปากของหนูพุก: LD_{50} (Oral, Rat): 1045 mg/kg
	ทางผิวหนังของกระต่าย: LD_{50} (Dermal, Rabbit): 5990 mg/kg
ความเป็นพิษ ต่อระบบนิเวศน์	ต่อปลา salmo gairdneri LC_{50}: 762 mg/l/96 hrs
	ต่อ Crustacea: Daphnia magna EC_{50}: 230 mg/l/48 hrs
	ต่อสาหร่าย: Scenedesmus subspicatus ErC_{50}: 37 mg/l/72 hrs

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษและกรมโรงงานอุตสาหกรรม (2554)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. กระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electrochemical process)

กระบวนการไฟฟ้าเคมีคือ กระบวนการที่พลังงานไฟฟ้าเกิดจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเองได้ หรือกระบวนการที่ต้องอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากภายนอกมากระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาเคมี โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเรียกว่า ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical reaction) เกิดขึ้นได้ในเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ เซลล์กัลวานิก (Galvanic cell) และเซลล์อิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis)

- เซลล์กัลวานิก (Galvanic cell) คือเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่เปลี่ยนปฏิกิริยาเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นเองได้และทำให้ได้พลังงานไฟฟ้าออกมา โดยเซลล์กัลวานิกมีค่า E_{cell} เป็นบวก กำหนดให้ขั้วไฟฟ้าขั้วลบเป็นขั้วแอโนดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและขั้วไฟฟ้าขั้วบวกเป็นขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชัน โดยขั้วไฟฟ้าอาจใช้เป็นโลหะเช่น เหล็ก อลูมิเนียม ทองแดง เป็นต้น เซลล์กัลวานิกได้นำไปประยุกต์ใช้ทำแบตเตอรี่ ถ่านไฟฉาย ถ่านนาฬิกา ถ่านของเล่นเด็ก เป็นต้น

- เซลล์อิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) คือเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้พลังงานไฟฟ้าทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีโดยต้องอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากภายนอกเซลล์มาทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น โดยเซลล์อิเล็กโทรไลซิสมีค่า E_{cell} เป็นลบ ตรงข้ามกับเซลล์กัลวานิก เซลล์อิเล็กโทรไลซิสประกอบด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าสองขั้ว กำหนดให้ขั้วไฟฟ้าขั้วลบเป็นขั้วแคโทด เกิดปฏิกิริยารีดักชันและขั้วไฟฟ้าขั้วบวกเป็นขั้วแอโนด เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ขั้วไฟฟ้าอาจใช้เป็นแกรไฟต์ หรือโลหะอื่นเช่น แพลทินัม เงิน ทอง เป็นต้น เซลล์อิเล็กโทรไลซิสได้นำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยที่สำคัญทางสิ่งแวดล้อม เช่น การศึกษาการกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานสิ่งทอ (Miled *et al*., 2010) การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานกลั่นสุรา (Piya *et al*., 2006) เป็นต้น

โดยในงานวิจัยใช้เซลล์อิเล็กโตรไลซิสในการทดลอง สำหรับกลไกการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของเซลล์อิเล็กโทรไลซิส ต้องอาศัยพลังงานไฟฟ้าเพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี โดยให้กระแสไฟฟ้าผ่านลงไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ส่งผลให้อิเล็กโทรไลต์หรือตัวทำละลายเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ขั้วไฟฟ้า เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอน เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction reaction) กรณีใช้แผ่นเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า ที่ขั้วแอโนดเหล็กจ่ายอิเล็กตรอนเข้าวงจร เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เหล็กเกิดการสึกกร่อนเป็น Fe^{2+} (สมการ 2) และที่ขั้วแคโทดอิเล็กตรอนจากวงจร จะวิ่งมาออที่ขั้วและพร้อมจ่ายให้สารละลายหรือตัวที่จะมารับอิเล็กตรอน เกิดเป็นปฏิกิริยารีดักชัน เช่น น้ำเป็นตัวรับอิเล็กตรอน จะได้ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และไฮดรอกไซด์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ไอออน (OH^-) (สมการ 3) เมื่อครบวงจรแล้ว ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ขึ้น (สมการ 4) (Herñandez *et al*., 2009)

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (ขั้วแอโนด)

$$Fe_{(S)} \longrightarrow Fe^{2+}_{(aq)} + 2e^- \quad (2)$$

ปฏิกิริยารีดักชัน (ขั้วแคโทด)

$$2H_2O_{(l)} + 2e^- \longrightarrow 2OH^-_{(aq)} + H_{2(g)} \quad (3)$$

ปฏิกิริยารีดอกซ์

$$Fe_{(S)} + 2H_2O_{(l)} \longrightarrow Fe(OH)_{2(S)} + H_{2(g)} \quad (4)$$

3.1 กฎของฟาราเดย์

ไมเคิล ฟาราเดย์ นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ ได้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านลงไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับปริมาณสารที่เกิดขึ้นดังนี้

- ปริมาณสารที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านลงไปในสารละลาย

- ปริมาณสารที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักสมมูลของสาร โดยปริมาณประจุไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ หรือ 96,500 คูลอมบ์ ผ่านลงในสารละลายในกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส จะได้ผลิตภัณฑ์เท่ากับ 1 กรัมสมมูล

จำนวนอิเล็กตรอนที่ใช้แปรตามประจุ (Charge, Q) ที่ผ่านเซลล์ โดยจำนวนประจุทั้งหมดเป็นคูลอมบ์ เท่ากับ ผลคูณของกระแสไฟฟ้ากับเวลา (สมการ 5)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สูตร $Q = I \times t$ (5)

โดยที่ Q = จำนวนประจุทั้งหมดหน่วยคูลอมบ์

I = กระแสไฟฟ้าหน่วยแอมแปร์

t = เวลาหน่วยวินาที

3.2 ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (Cell potential)

ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีนั้นอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดผ่านลวดตัวนำไฟฟ้า ถ้านำโวลต์มิเตอร์ต่อระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองก็จะสามารถวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างขั้วได้ ซึ่งแรงที่ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในสายไฟได้ เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (Cell potential) สัญลักษณ์ E_{cell} หรือ แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive force: emf) หน่วยเป็นโวลต์ (V)

ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 6 โดยศักย์ไฟฟ้าของเซลล์หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้า (E_{cell}) ขึ้นกับปริมาณไอออนในเซลล์ อุณหภูมิและความดันย่อยของแก๊สที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยา ถ้าความเข้มข้นของไอออนเท่ากับ 1 M ความดันย่อยของแก๊สเท่ากับ 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เรียกแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้ว่า ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์ (Standard cell potential) ใช้สัญลักษณ์คือ E^{o}_{cell}

สูตรการคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (Cell potential)

$$E_{cell} = E_{cathode} - E_{anode} \quad (6)$$

โดยที่ E_{cell} = ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์

$E_{cathode}$ = ศักย์ของขั้วไฟฟ้าแคโทด

E_{anode} = ศักย์ของขั้วไฟฟ้าแอโนด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.3 ศักย์ขั้วไฟฟ้ามาตรฐาน (Standard electrode potential)

ศักย์ขั้วไฟฟ้ามาตรฐานคือ ศักย์ขั้วไฟฟ้าขั้วใดขั้วหนึ่งที่สภาวะมาตรฐาน หรือเรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐาน (Standard half cell potential) ใช้สัญลักษณ์ E^{o}_{cell} ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถวัดศักย์ขั้วไฟฟ้าครึ่งเซลล์ได้ แต่ต้องวัดผลรวมของศักย์ไฟฟ้าทั้งสองครึ่งเซลล์ อย่างไรก็ตามเราสามารถหาศักย์ขั้วไฟฟ้าสัมพันธ์ โดยการนำขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาศักย์ขั้วไฟฟ้ามาตรฐานมาต่อกับขั้วไฟฟ้ามาตรฐานอ้างอิงที่กำหนดศักย์ขั้วไฟฟ้าไว้แล้ว เช่น ต่อกับขั้วไฟฟ้ามาตรฐานอ้างอิงไฮโดรเจน ซึ่งมีค่าศักย์ขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 0.00 โวลต์ เป็นต้น เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ของคู่ที่มาต่อกันได้ ก็สามารถคำนวณหาศักย์ขั้วไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วที่ต้องการทราบได้ เช่น เมื่อนำขั้วทองแดงมาต่อกับขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนมาตรฐานแล้ววัดค่า E^{o}_{cell} ได้เท่ากับ + 0.34 โวลต์ แสดงว่าศักย์ขั้วไฟฟ้ามาตรฐานของทองแดงจะมีค่าเท่ากับ 0.34 โวลต์ เมื่อคิดเทียบกับศักย์ขั้วไฟฟ้ามาตรฐานไฮโดรเจน ซึ่งสามารถแสดงการคำนวณได้ดังสมการที่ 7-11

สูตร $E^{o}_{cell} = E^{o}_{cathode} - E^{o}_{anode}$ (7)

$= E^{o}_{Cu} - E^{o}_{H2}$ (8)

$0.34 = E^{o}_{Cu} - 0.00$ (9)

$E^{o}_{Cu} = 0.34 + 0.00$ (10)

$= 0.34$ โวลต์ (11)

ค่า E^{o}_{Cu} ที่คำนวณได้เรียกว่า ศักย์ขั้วไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐาน โดยเขียนสมการในรูปของปฏิกิริยารีดักชัน และจะเห็นว่าทองแดงเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ดีกว่าไฮโดรเจน ทองแดงจึงทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทดนั้นเอง ในเซลล์กัลวานิกจะให้ค่า E^{o}_{cell} เป็นบวกเสมอและอิเล็กตรอนจะวิ่งจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.4 พลังงานอิสระกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์

ศักย์ไฟฟ้าหรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์มีความสัมพันธ์โดยตรงกับพลังงานอิสระ (ΔG) สำหรับปฏิกิริยาเคมีปฏิกิริยาหนึ่ง การหาค่า ΔG จะหาได้จากงานที่ได้จากปฏิกิริยา (สมการ 12-13)

$$\text{งานสูงสุด } (W_{max}) = -\Delta G \qquad (12)$$

แต่งานทางไฟฟ้าเคมีหมายถึง พลังงาน 1 จูล ที่ทำให้ประจุไฟฟ้า 1 คูลอมบ์ เคลื่อนที่ระหว่างจุด 2 จุดที่มีความต่างศักย์ 1 โวลต์ หรือเรียกว่างานทางไฟฟ้าเคมี (W)

$$\text{สูตร} \quad W = \text{คูลอมบ์} \times \text{โวลต์} \qquad (13)$$

งานจากเซลล์ไฟฟ้าเคมี เกิดจากการถ่ายโอนอิเล็กตรอน ดังนั้นจำนวนประจุเป็นคูลอมบ์ จึงขึ้นกับจำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยา

เนื่องจากอิเล็กตรอน 1 โมล (หรือ 1 F) มีประจุไฟฟ้า 96,500 คูลอมบ์ ถ้าในปฏิกิริยามีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน n โมล ก็จะมีประจุ n (96,500) คูลอมบ์ หรือ nF คูลอมบ์ และในทางไฟฟ้าเคมีจะแทนโวลต์ด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้า (E_{cell}) จะได้สมการที่ 14

$$\text{ดังนั้น} \qquad W = nFE_{cell} \qquad (14)$$

โดยที่ W = งานทางไฟฟ้าเคมีหน่วยเป็นจูล

n = จำนวนโมลของอิเล็กตรอน

F = ปริมาณประจุไฟฟ้าของฟาราเดย์เท่ากับ 96,500 คูลอมบ์

E_{cell} = ศักย์ไฟฟ้าหรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์หน่วยเป็นโวลต์

สำหรับระบบไฟฟ้า งานสูงสุดจะหาได้จากกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (E_{cell}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 15-18

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากสมการ งานสูงสุด (W_{max}) = nFE_{cell} (15)

ดังนั้น $-\Delta G = nFE_{cell}$ (16)

$$\Delta G = - nFE_{cell} \quad (17)$$

หรือที่สภาวะมาตรฐาน

$$\Delta G = - nFE^{\circ}_{cell} \quad (18)$$

โดยที่ ΔG = พลังงานอิสระหน่วยเป็นจูล

n = จำนวนโมลของอิเล็กตรอน

F = ปริมาณประจุไฟฟ้าของฟาราเดย์เท่ากับ 96,500 คูลอมบ์

E°_{cell} = ศักย์ไฟฟ้าหรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์หน่วยโวลต์ที่สภาวะมาตรฐาน

ค่า ΔG เป็นค่าที่จะช่วยบอกให้ทราบว่าปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเองได้หรือไม่ ถ้า ΔG มีเครื่องหมายเป็นลบ ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้เองอย่างต่อเนื่อง ถ้า ΔG มีเครื่องหมายเป็นบวก ปฏิกิริยาไม่สามารถเกิดขึ้นได้เอง และถ้าค่า ΔG เป็นศูนย์ ปฏิกิริยาอยู่ในสภาวะสมดุล เครื่องหมาย E_{cell} จะตรงกันข้ามกับ ΔG สำหรับปฏิกิริยาประเภทเดียวกันสรุปดังตารางที่ 3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ของเครื่องหมาย ΔG และ E_{cell}

ประเภทของปฏิกิริยา	เครื่องหมาย ΔG	เครื่องหมาย E_{cell}
เกิดเองได้	ลบ (-)	บวก (+)
เกิดเองไม่ได้	บวก (+)	ลบ (-)
ที่สภาวะสมดุล	ศูนย์ (0)	ศูนย์ (0)

ที่มา: สุธาทิพย์ และคณะ (2548)

3.5 ความต่างศักย์ไฟฟ้า

ความต่างศักย์ไฟฟ้าหมายถึงความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุด ซึ่งทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลจากจุดที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงไปยังจุดที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่า และจะหยุดไหลเมื่อศักย์ไฟฟ้าทั้งสองจุดเท่ากัน ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลในวงจรได้ จะมีค่าเท่ากับผลคูณของกระแสไฟฟ้าและความต้านทานกระแสไฟฟ้า (สมการ 19)

สูตร $V = IR$ (19)

โดยที่ V = ความต่างศักย์ไฟฟ้าหน่วยโวลต์
I = กระแสไฟฟ้าหน่วยแอมแปร์
R = ความต้านทานหน่วยโอห์ม

3.6 ความต้านทานกระแสไฟฟ้า

ความต้านทานกระแสไฟฟ้าหมายถึงสมบัติของตัวนำไฟฟ้าที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้มากน้อยต่างกัน ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัวของตัวนำนั้นๆจะมีค่าแตกต่างกันไปแล้วแต่ชนิดของตัวนำ โดยตัวนำไฟฟ้าที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้มากจะมีความต้านทานน้อย ส่วนตัวนำไฟฟ้าที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้น้อยจะมีความต้านทานมาก มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω) สัญลักษณ์ตัว R โดยความต้านทานกระแสไฟฟ้าในกระบวนการไฟฟ้าเคมี มีความสัมพันธ์กับค่าการนำไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (สมการ 20)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สูตร $R = D/(C \times A)$ (20)

โดยที่

R = ความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์หน่วยโอห์ม

D = ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าหน่วยเซนติเมตร

C = ค่าการนำไฟฟ้าเฉพาะของสารละลายอิเล็กโทรไลต์หน่วยซีเมนท์

A = พื้นที่หน้าตัดของขั้วไฟฟ้าที่สัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์หน่วยตารางเซนติเมตร

4. ขั้วไฟฟ้า (Electrode)

ขั้วไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าและเป็นตัวเชื่อมระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ ขั้วไฟฟ้าโลหะ (Metal electrode) และขั้วไฟฟ้าแบบเยื่อ (Membrane electrode) โดยที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองประเภทแตกต่างกันในรูปแบบและการตอบสนองต่อไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เมื่อเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ถ้าเป็นขั้วไฟฟ้าโลหะจะเป็นการนำส่งอิเล็กตรอนข้ามรอยต่อระหว่างขั้วไฟฟ้าและสารละลาย แต่ถ้าเป็นขั้วไฟฟ้าแบบเยื่อจะตอบสนองไอออนที่บริเวณแผ่นเยื่อโดยไอออนถูกนำส่งจากด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่งของแผ่นเยื่อ

4.1 ขั้วไฟฟ้าโลหะ (Metal electrode) จำแนกได้ 2 ประเภท ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าเฉื่อย (Inert electrode) และขั้วไฟฟ้าว่องไว (Active electrode)

- ขั้วไฟฟ้าเฉื่อย (Inert electrode) ได้แก่ แท่งหรือชิ้นของโลหะเฉื่อย เช่น แพลทินัม (Pt), ไทเทเนียม (Ti), ทอง (Au) หรือคาร์บอน ขั้วไฟฟ้าชนิดนี้ให้อิเล็กตรอนและแตกตัวเป็นไอออนได้ยาก จึงใช้เป็นขั้วแอโนดเพื่อให้กระแสไฟฟ้าผ่านและเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ป้องกันไม่ให้ขั้วไฟฟ้าแตกตัวเป็นไอออนปะปนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์

- ขั้วไฟฟ้าว่องไว (Active electrode) ได้แก่ โลหะเงิน, ทองแดง, สังกะสี, เหล็ก, นิกเกิล เป็นต้น ขั้วไฟฟ้าชนิดนี้จะให้อิเล็กตรอนและแตกตัวเป็นไอออนจากตัวเองได้ง่าย ดังนั้นขั้วไฟฟ้าอาจถูกออกซิไดซ์เพื่อให้ไอออนจากตัวขั้วไฟฟ้าปะปนออกมากับสารละลายได้ (สมการ 21)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$Al_{(S)} \longrightarrow Al^{3+} + 3e^{-} \qquad (21)$$

ถ้านำอลูมิเนียมมาใช้เป็นขั้วแอโนดในสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย ขั้วอลูมิเนียมสามารถแตกตัวและให้ไอออนออกมาในรูปของ Al^{3+} ได้ง่ายกว่าน้ำ Al^{3+} จึงละลายปะปนออกมาในสารละลาย ขั้วไฟฟ้าว่องไวมีข้อเสียคือ โลหะบางชนิดมักเกิดออกไซด์เคลือบผิวของโลหะ ทำให้มีผลต่อขั้วไฟฟ้า เช่น เหล็ก เป็นต้น

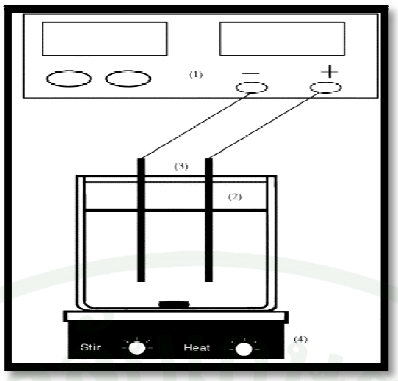
4.2 ขั้วไฟฟ้าแบบเยื่อ (Membrane electrode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการไฟฟ้าเคมีแบบใช้เยื่อ (Electrodialysis) โดยใช้เยื่อแบบ ion exchange membranes มีลักษณะเป็นแผ่นเยื่อติดอยู่ที่ปลายสุดของขั้ว ทำหน้าที่ตอบสนองต่อไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ สามารถแยกไอออนที่ต้องการออกจากสารละลายได้ โดยกำหนดชนิดของไอออนที่ต้องการให้ผ่านแผ่นเยื่อได้จากส่วนผสมของสารละลาย ซึ่งภายในกระบวนการไฟฟ้าเคมีแบบใช้เยื่อประกอบด้วย แอนไอออน แคทไอออน ขั้วไฟฟ้าแบบเยื่อที่มีการจัดเรียงแบบ Bipolar membranes ระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด ขั้วไฟฟ้าแบบเยื่อได้นำไปประยุกต์ใช้ในงานบำบัดน้ำเสีย เช่น การกำจัด Heat stable salts ออกจากสารละลายเอมีน กระบวนการ Demineralization ออกจากน้ำธรรมชาติ กระบวนการแยกกรดอินทรีย์ เป็นต้น

5. รูปแบบของการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าเคมี 4 แบบ

5.1 แบบโมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว (Monopolar electrode single cell)

โมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยวเป็นการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าที่ง่ายที่สุด โดยมีขั้วไฟฟ้าเพียง 1 คู่ ขั้วหนึ่งเป็นแอโนดและอีกขั้วเป็นแคโทด ซึ่งไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากการนำไปประยุกต์ใช้นั้นต้องการขนาดใหญ่เพื่อให้ได้พื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยามาก (ภาพที่ 2)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

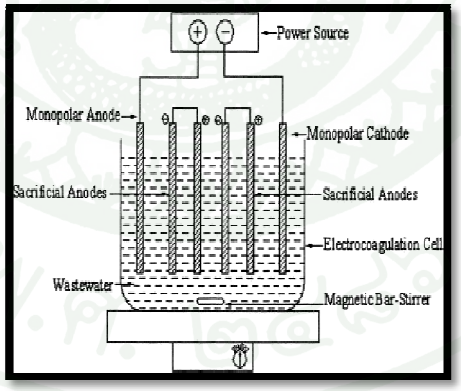


ภาพที่ 2 การจัดเรียงเซลล์ไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว

ที่มา: Mollah *et al.* (2000)

5.2 แบบโมโนโพลาร์ต่ออนุกรม (Monopolar electrode with cell in series)

การจัดเรียงอิเล็คโทรดคล้ายกับแบบโมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยวหลายๆเซลล์มาต่อกัน โดยมีการเชื่อมจุดของขั้วไฟฟ้าเพื่อให้ไฟฟ้ากระจายในขั้วไฟฟ้าแต่ละแผ่น (ภาพที่ 3)



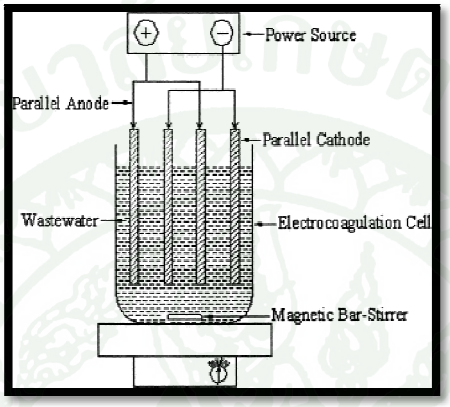
ภาพที่ 3 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่ออนุกรม

ที่มา: Mollah *et al.* (2000)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5.3 แบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน (Monopolar electrode in parallel)

กระแสไฟฟ้าจะถูกแบ่งไปในแต่ละเซลล์ขึ้นอยู่กับความต้านทานภายในเซลล์นั้นๆ โดยที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าของระบบจะเท่ากัน ความต้านทานของระบบที่มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่อขนานจะมีค่าน้อยกว่าการต่อแบบโมโนโพลาร์ต่ออนุกรม (ภาพที่ 4)



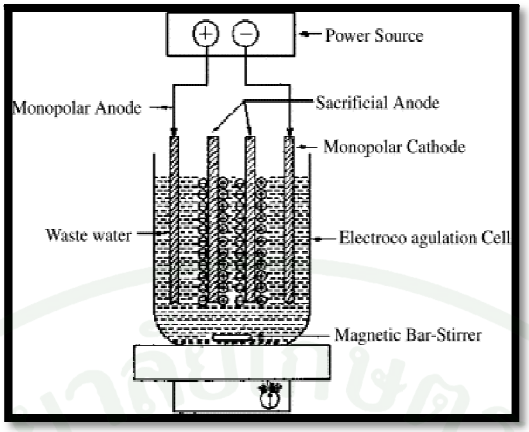
ภาพที่ 4 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ต่อขนาน

ที่มา: Mollah *et al.* (2000)

5.4 แบบไบโพลาร์ (Bipolar electrode with multiple in series)

การจัดเรียงขั้วไฟฟ้ามีจุดเชื่อมขั้วไฟฟ้าเพียง 2 จุดเท่านั้น เฉพาะขั้วไฟฟ้าที่อยู่ปลายนอกสุด แต่ละแผ่นของขั้วไฟฟ้าจะมีด้านหนึ่งเป็นขั้วลบซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด และอีกด้านหนึ่งเป็นขั้วบวกจะทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด (ภาพที่ 5)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 5 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบไบโพลาร์

ที่มา: Mollah *et al.* (2000)

6. วัสดุขั้วไฟฟ้า

วัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้ามีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบ จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องทราบถึงคุณสมบัติในการเลือกใช้ให้เหมาะกับการทำงานนั้นๆ สามารถแยกได้ตามชนิดของขั้วไฟฟ้า ได้แก่ วัสดุที่ทำขั้วไฟฟ้าเฉื่อย (Inert electrode) และวัสดุที่ทำขั้วไฟฟ้าว่องไว (Active electrode)

6.1 วัสดุที่ทำขั้วไฟฟ้าเฉื่อย (Inert electrode)

- แพลทินัม (Pt) มีจุดเดือดจุดหลอมเหลวสูง คือ มีจุดเดือด 3,827 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 1,770 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงถึงความแข็งแรงของพันธะโลหะและยังเป็นเหตุให้ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา นอกจากนี้สารประกอบของแพลทินัมมักไม่ค่อยเสถียร เมื่อให้ความร้อนสูงขึ้นจะสลายตัวเป็นโลหะ ดังนั้นจึงพบโลหะพวกนี้ในรูปของธาตุอิสระในธรรมชาติอยู่บ้าง นอกจากจะเกิดเป็นสินแร่กับธาตุอื่นๆ และมักจะพบอยู่รวมกันหลายธาตุเป็นโลหะเจือแล้ว และยังปรากฏรวมอยู่กับพวกธาตุทองแดง เงิน และทองคำอีกด้วย แพลทินัมนี้มีน้อยมากจึงมีราคาแพงมาก แพลทินัมมีสีขาวและอ่อน มีเลขออกซิเดชันได้หลายค่าตั้งแต่ +2 ถึง +8 แต่ที่สำคัญคือ +2 ถึง +4 เท่านั้น เนื่องจากมีสมบัติในการนำความร้อนและไฟฟ้าดีมาก มีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาจึงมี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประโยชน์ในการทำอิเล็กโทด เบ้าทนไฟ และภาชนะสำหรับงานที่อุณหภูมิสูงและต้องการความต้านทานการกัดกร่อนสูง

- ไทเทเนียม (Ti) เป็นธาตุหมู่เดียวกับเซอร์โคเนียม และ แฮฟเนียม ไทเทเนียมเป็นพวกโลหะทรานซิชัน คือ มีลักษณะขาวเทาคล้ายเงิน จุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูง แข็ง เหนียว ดึงเป็นเส้นได้ เป็นโลหะทรานซิชันที่มีความหนาแน่นต่ำที่สุด ที่สภาวะปกติไทเทเนียมค่อนข้างเฉื่อยมาก สามารถทนก๊าซคลอรีนแห้งได้ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงมาก (สูงกว่า 500 องศาเซลเซียส) จะสามารถทำปฏิกิริยาอย่างรุนแรงกับอโลหะได้สารประกอบโควาเลนต์ เช่น TiO_2, $TiCl_4$ เป็นต้น สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้ไฮดรอกไซด์และไฮโดรเจน ไทเทเนียมมีเลขออกซิเดชัน +2, +3, และ +4 ภายใต้สภาวะแวดล้อมต่างๆ ถึงแม้ไทเทเนียมจะมีข้อดีหลายประการแต่ไม่นิยมใช้เป็นวัสดุโครงสร้างแทนเหล็กเพราะว่องไวต่อปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง

โดยไทเทเนียมถูกนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลติกเซลล์ (Electrolytic cell) จะไม่ทำให้โลหะตัวอื่นกัดกร่อนในระหว่างเกิดปฏิกิริยา ยิ่งไปกว่านั้นที่ขั้วลบพบว่าจะมีโลหะหนักเกิดขึ้นมาก สารละลายใสไม่มีตะกอน อีกทั้งยังเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีเพราะจุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูงในสภาวะปกติ ดังนั้นจึงเป็นที่ยอมรับ แต่เนื่องจากไทเทเนียมมีราคาสูงและหาซื้อได้ยาก จึงมีการประยุกต์ใช้โลหะเคลือบไทเทเนียม (Titanium coated) ในการทดลอง ประสิทธิภาพในการนำไปใช้งานเทียบเท่ากับไทเทเนียมและราคาต่ำกว่า โดยมีการนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียโรงงายฟอกย้อมโดยกระบวนการรวมตะกอนไฟฟ้าและกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า (Raju *et al*., 2008) เป็นต้น

- โบรอนโดปไดมอนด์ (Boron doped diamond, BDD) เป็นธาตุที่นิยมนำมาทำเป็นขั้วไฟฟ้าแบบเฉื่อย เพราะมีความเสถียรสูงและเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ดี มีประสิทธิภาพสูงสามารถบำบัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ได้หลายชนิด

6.2 วัสดุที่ทำขั้วไฟฟ้าว่องไว (Active electrode)

- เหล็ก (Fe) เป็นโลหะหนักที่มีจุดเดือดจุดหลอมเหลวสูง มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา สารประกอบเหล็กมีเลขออกซิเดชัน +2 และ +3 โดยเหล็กที่มีเลขออกซิเดชันสูงๆ จะไม่เสถียรและเป็นตัวออกซิไดซ์อย่างแรง การใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าในเซลล์อิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis cell) เมื่อเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส เหล็กที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนด จะเกิดปฏิกิริยา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ออกซิเดชันมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนให้แก่ระบบและเหล็กจะกลายเป็นไอออน (Fe^{2+}) ไอออนของเหล็กที่เกิดขึ้นบางส่วนจะรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ไอออนที่เกิดบริเวณขั้วแคโทดกลายเป็นตะกอน ($Fe(OH)_2$) จากปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้ต้องมีการเปลี่ยนแผ่นเหล็กที่ใช้ทำขั้วแอโนดเมื่อใช้ไประยะเวลาหนึ่งเนื่องจากการสึกกร่อนของแผ่นเหล็ก แต่อย่างไรก็ตามแผ่นเหล็กสามารถหาซื้อได้ง่ายและมีราคาถูก และยังมีประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายไอออนโลหะหนักได้ดีจึงเป็นที่นิยม

- อลูมิเนียม (Al) เป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับ 3 ของโลก และเป็นโลหะที่หาได้ง่าย อลูมิเนียมจัดเป็นโลหะหมู่เดียวกับแกลเลียม อินเดียม และแทลเลียม อลูมิเนียมจะมีสีขาวน้ำหนักเบาและแข็ง ไม่ค่อยมีรอยแตกร้าวสามารถจัดรูปร่างโค้งงอได้ตามต้องการ ดังนั้นจึงถูกนำไปใช้ประโยชน์เป็นส่วนประกอบในการก่อสร้างต่างๆ ตามที่ต้องการ อลูมิเนียมจัดว่าเป็นธาตุที่ไวและทำปฏิกิริยาทันทีกับอโลหะตัวอื่นๆได้ อลูมิเนียมมีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +3 สารประกอบของโลหะที่มีเลขออกซิเดชัน +3 มักจะเป็นสารประกอบโควาเลนต์ แต่อย่างไรก็ตาม สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดชัน (Hydration) และไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) การใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลติกเซลล์ เมื่อเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสขึ้นทำให้อลูมิเนียมเกิดการกัดกร่อนแตกออกเป็นไอออนในสารละลายและให้อิเล็กตรอนแก่ระบบ

- ทองแดง (Cu) เป็นธาตุที่พบได้ทั่วไปในธรรมชาติ ส่วนใหญ่อยู่ในรูปซัลไฟด์ ทั้งในรูปซัลไฟด์ทั่วไปและในรูป sulfide mineral ทองแดงเป็นธาตุที่จำเป็นต่อปฏิกิริยาต่างๆในร่างกายมนุษย์และสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ทองแดงมีเลขออกซิเดชัน +1 และ +2 ซึ่งเรียกว่า cuprous และ cupric ตามลำดับ โดยทองแดงในรูป +1 มีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนเป็น +2 ซึ่งเป็นรูปที่มีความเสถียรภาพมากกว่าเมื่อละลายอยู่ในน้ำ ซึ่งทองแดงเป็นขั้วโลหะที่นำไฟฟ้าได้ดี สามารถยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้สูง แต่ไม่นิยมนำไปทำขั้วไฟฟ้าเพราะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงและไม่เสถียร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

7. การประยุกต์ใช้หลักการไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสียในปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้หลักการไฟฟ้าเคมีให้เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการบำบัด ซึ่งมีประสิทธิภาพสามารถทำลายสิ่งปนเปื้อนได้หลายประเภท และค่าใช้จ่ายในการบำบัดต่ำ กระบวนการไฟฟ้าเคมีที่ประยุกต์ใช้ได้แก่ กระบวนการทำให้ตะกอนลอยด้วยไฟฟ้า (Electroflotation) กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation) และกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า (Electrooxidation) เป็นต้น

7.1 กระบวนการทำให้ตะกอนลอยด้วยไฟฟ้า (Electroflotation)

กระบวนการทำให้ตะกอนลอยด้วยไฟฟ้า (Electroflotation) เป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีอย่างง่ายประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วและเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้ากระแสตรง ใช้ขั้วไฟฟ้าว่องไว(Active electrode) เช่น อลูมิเนียม เหล็ก ทองแดง เป็นต้น เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด รูปแบบการจัดวางขั้วไฟฟ้ามีทั้งแนวตั้งและแนวนอน อาศัยกลไกในการกำจัดสารปนเปื้อนโดยกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสของน้ำ เมื่อน้ำแตกตัวให้อิเล็กตรอนที่ขั้วแอโนดจะเกิดฟองของออกซิเจน (O_2) ขึ้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน (สมการ 22) และขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชันโดยน้ำ (H_2O) รับอิเล็กตรอน ทำให้มีฟองของไฮโดรเจน (H_2) ขึ้น (สมการ 23) หลังจากนั้นฟองของออกซิเจนและไฮโดรเจนจะลอยตัวพาอนุภาคปนเปื้อนขึ้นสู่ผิวน้ำ แล้วถูกกำจัดออกไป ทำให้ไม่ต้องเติมสารเคมีลงในระบบ ซึ่งประสิทธิภาพของการกำจัดสารปนเปื้อนขึ้นอยู่กับขนาดฟองอากาศ กระบวนการนี้ได้นำไปใช้บำบัดน้ำมัน สารแขวนลอย คอลลอยด์ น้ำเสียจากการประกอบอาหาร น้ำเสียจากการซักผ้า น้ำเสียจากโรงงานทอผ้า น้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษ น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน น้ำมันหล่อเย็น น้ำเสียจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน และยังใช้ในการกำจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำดื่ม (Defluoridation) เป็นต้น

ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนด

$$2H_2O \longrightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^- \qquad (22)$$

ปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทด

$$4H_2O + 4e^- \longrightarrow 2H_2 + 4OH^- \qquad (23)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

7.2 กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation)

กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation) เป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าว่องไว (Active electrode) ซึ่งจะให้อิเล็กตรอนและแตกตัวเป็นโลหะไอออนจากตัวเองได้ง่าย เช่น เหล็ก อลูมิเนียม ทองแดง สังกะสี เป็นต้น เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดต่อเข้ากับเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้ากระแสตรง การต่อวงจรมีทั้งแบบโมโนโพลาร์และแบบไบโพลาร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพมากขึ้น สำหรับการกำจัดสารปนเปื้อนที่ใช้ขั้วไฟฟ้าว่องไว เช่น เหล็ก เป็นขั้วแอโนดและแคโทด โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็กจะแตกตัวให้อิเล็กตรอนเกิดเป็น Fe^{2+} ออกมาที่ขั้วแอโนด (สมการ 24) ขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ (H_2O) รับอิเล็กตรอนเกิดเป็นไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) (สมการ 26) โดย Fe^{2+} รวมตัวกับ OH^- จากการแตกตัวของน้ำที่ขั้วแคโทดเป็น $Fe(OH)_{2(S)}$ (สมการ 25) ทำหน้าที่เป็นสารรวมตะกอน (Coagulant) แล้วจับตัวกับอนุภาคปนเปื้อนเป็นฟล๊อค (Floc) ตกตะกอนสู่ก้นถังปฏิกิริยา เมื่อครบวงจรจะได้สมการรีดอกซ์ (สมการ 27) กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่ดำเนินการได้ง่าย สามารถบำบัดคอลลอยด์ ความขุ่น สี น้ำเสียได้ใสสะอาด ไม่มีกลิ่น ไม่ต้องใช้สารเคมี ค่าใช้จ่ายต่ำ นำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานทอผ้า โรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม โรงงานปิโตรเลียม น้ำเสียจากภัตตาคาร เป็นต้น

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (ขั้วแอโนด)

$$Fe_{(S)} \longrightarrow Fe^{2+}_{(aq)} + 2e^- \qquad (24)$$

$$Fe^{2+}_{(aq)} + 2OH^-_{(aq)} \longrightarrow Fe(OH)_{2(S)} \qquad (25)$$

ปฏิกิริยารีดักชัน (ขั้วแคโทด)

$$2H_2O_{(l)} + 2e^- \longrightarrow 2OH^-_{(aq)} + H_{2(g)} \qquad (26)$$

ปฏิกิริยารีดอกซ์

$$Fe_{(S)} + 2H_2O_{(l)} \longrightarrow Fe(OH)_{2(S)} + H_{2(g)} \qquad (27)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

7.3 กระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า (Electrooxidation)

กระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า (Electrooxidation) เป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่สามารถเกิดได้ทั้งทางตรง (Direct) และทางอ้อม (Indirect) โดยเกิดในระบบที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแบบเฉื่อย (Inert electrode) เช่น แพลทินัม ไทเทเนียม แกรไฟต์ โบรอนโดปไดมอน (Boron doped diamond) เป็นต้น เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด ต่อเข้าเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้ากระแสตรงรูปแบบการต่อวงจรมีทั้งแบบโมโนโพลาร์และแบบไบโพลาร์ โดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าทางตรงเกิดจากสารปนเปื้อนเป็นตัวจ่ายอิเล็กตรอนให้แก่ระบบโดยตรง จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนด ทำให้สามารถทำลายสารปนเปื้อนได้โดยไม่ต้องอาศัยสารออกซิแดนท์ ส่วนกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าทางอ้อมเกิดจากมีสารมาจ่ายอิเล็กตรอนให้ระบบเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนด โดยสารบางชนิดเมื่อให้อิเล็กตรอนแล้วตัวมันเองสามารถเป็นสารออกซิแดนท์ (Oxidant) ที่รุนแรงได้ เช่น คลอไรด์ไอออน (Cl^-) ให้อิเล็กตรอนแล้วเป็นคลอรีน (Cl_2) และไฮโปคลอไรท์ (OCl^-) ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำเสีย อาจมีการเติมสารอิเล็กโทรไลต์ลงไป เพื่อเป็นแหล่งกำเนิดสารออกซิแดนท์ (Oxidant) ในการทำลายสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในน้ำเสีย โดยนิยมใช้โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ และที่สำคัญต้องใช้ขั้วไฟฟ้าแบบเฉื่อยในการเหนี่ยวนำให้เกิดการออกซิเดชันขึ้น เพราะขั้วไฟฟ้าแบบเฉื่อย (Inert electrode) จะทำหน้าที่เป็นทางให้อิเล็กตรอนไหลผ่านเข้าหรือออกได้โดยไม่มีปฏิกิริยากับไอออนในสารละลายนั้นๆ กระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า (Electrooxidation) เหมาะกับการใช้บำบัดน้ำเสียที่มีคลอไรด์ปนเปื้อนอยู่ โดยประสิทธิภาพของระบบขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคลอไรด์ในน้ำเสีย และนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมทอผ้า โรงงานอุตสาหกรรมอาหารกระป๋อง น้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบขยะ โรงงานกลั่นสุรา เป็นต้น

Panizza *et al*. (2013) ศึกษาการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า โดยใช้ขั้วไฟฟ้า Ti/Pt เป็นขั้วแอโนด มีการเติมโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ เพื่อติดตามประสิทธิภาพการทำงานของสารออกซิแดนท์ซึ่งก็คือ คลอรีน (Chlorine, Cl_2), ไฮโปคลอไรท์ไอออน (Hypochlorite ion, OCl^-) ในการบำบัด พบว่าสามารถลดค่า COD ได้ 35% ลดสีได้ 52% ลดแอมโมเนียได้ 65%

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นอกจากนี้ยังมีการเติมสารเคมีชนิดอื่นๆได้แก่ โอโซน, เฟนตันรีเอเจนท์ (Fenton's reagent), เพออ๊อกโซไดซัลเฟต (Peroxodisulphate), ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ลงไปในน้ำเสีย เพื่อใช้เป็นแหล่งสร้างสารออกซิแดนท์ในการกำจัดสารอินทรีย์ที่ยากต่อการกำจัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

Kornienko *et al*. (2003) ศึกษาการบำบัดสารอินทรีย์โดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าทางอ้อมโดยเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ใช้ขั้วไฟฟ้าแพลทินัมเป็นขั้วแอโนดและคาร์บอนเป็นขั้วแคโทด มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ลงไปเพื่อเป็นแหล่งกำเนิดสารออกซิแดนท์คือ $^{\cdot}OH$ (Hydroxyl radical) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงมาก (Strong oxidants) สามารถทำลายสารอินทรีย์ได้หลายประเภท เช่น ฟีนอล คลอโรฟีนอล ฟอร์มอลดีไฮด์ อะนาลีน อะโรมาติกเอมีน สี อะทราซีน เป็นต้น

การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ได้มีการประยุกต์ใช้สาร transition metal salts เช่น iron salts เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดสารออกซิแดนท์ ($^{\cdot}OH$, Hydroxy radical) ในกระบวนการบำบัดสารอินทรีย์ที่ย่อยยาก เรียกว่า เฟนตันรีเอเจนท์ (Fenton's reagent) นั่นเอง โดยประยุกต์ใช้บำบัดน้ำเสียได้หลายประเภท เช่น น้ำชะมูลฝอย น้ำเสียชุมชน น้ำเสียปนเปื้อนสารอินทรีย์ที่บำบัดทางชีวภาพได้ยาก เช่น อะโรมาติกคลอรีน ไซยาไนด์ เป็นต้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

8. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยพบว่า กระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้หลายประเภท เช่น อะโรมาติกเอมีน ฟอร์มอลดีไฮด์ ฟีนอล คลอโรฟีนอล สี เป็นต้น ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสารอินทรีย์นั้นๆ โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้

Babu *et al.* (2012) ศึกษาการลดสีของน้ำเสียสังเคราะห์และตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าทางอ้อม โดยการใช้สีสังเคราะห์ผสมลงในน้ำเสียสังเคราะห์ และใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแอโนด เหล็กเป็นขั้วแคโทด ทดลองในถังปฏิกิริยาขนาด 400 มิลลิลิตร แบบทีละเท (Batch reactor) เป็นเวลา 120 นาที แปรผันความต่างศักย์ไฟฟ้า 4, 8, 12, 16 โวลต์ ใช้โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เป็นสารอิเล็กโตรไลต์ ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่า COD และการลดสี ผลการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์พบว่า สามารถลด COD ได้ 75% ลดสีได้ 88% โดยประสิทธิภาพของการลดค่า COD และสีจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ที่ค่า pH ต่ำๆ ส่วนผลการทดลองในตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าพบว่าลดค่า COD ได้ 68% และลดสีได้ 75%

Miled *et al.* (2010) ศึกษาการกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานสิ่งทอโดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าทางอ้อม ใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแอโนดและเหล็กเป็นขั้วแคโทด ระยะห่างระหว่างแผ่น 10 เซนติเมตร ในถังปฏิกิริยาขนาด 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 120 นาที แปรผันค่า pH 2, 7, 13 แปรผันกระแสไฟฟ้า 100-400 มิลลิแอมแปร์ โดยเติมสารละลายอิเล็กโตรไลต์เป็นโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1 โมลาร์ ทำการศึกษาการกำจัดสีและค่า COD พบว่า สภาวะที่เหมาะสมคือ pH 13 ที่กระแสไฟฟ้า 200 มิลลิแอมแปร์ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 0.1 โมลาร์ สามารถกำจัดสีและ COD ได้ 43% และ 75% ตามลำดับ

Pacheco *et al.* (2010) ศึกษาการย่อยสลายสารอะโรมาติกเอมีนด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าที่ใช้ขั้วไฟฟ้าโบรอนโดปไดมอนด์ (Boron doped diamond, BDD) เป็นขั้วแอโนดและเหล็กเป็นขั้วแคโทด ทดลองในถังปฏิกิริยาแบบทีละเท (Batch reactor) เป็นเวลา 6 ชั่วโมง มีการเติมสารโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) เป็นสารอิเล็กโตรไลต์ แปรผันกระแสไฟฟ้า 20-30 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยศึกษาการกำจัด TKN, NH_3, NO_3^-, COD และ TOC พบว่ากระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้ามีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอะโรมาติกเอมีนที่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กระแสไฟฟ้า 30 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร สามารถบำบัดค่า TKN, NH_3, NO_3^- ได้สมบูรณ์ และสามารถกำจัด COD ได้ถึง 90% ในเวลา 6 ชั่วโมง และกำจัด TOC ได้ถึง 60-80%

Panizza *et al.* (2013) ศึกษาสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าสำหรับกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าของน้ำชะมูลฝอย วัสดุที่ทำขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ $TiRuSnO_2$, PbO_2 และโบรอนโดปไดมอนด์ (BDD) เป็นขั้วแอโนด และเหล็กเป็นขั้วแคโทด ทดลองแบบทีละเทเป็นเวลา 15-30 นาที ใช้กระแสไฟฟ้าคงที่ 2 แอมแปร์ และอัตราการไหล 420 ลูกบาศก์เดซิเมตรต่อชั่วโมง โดยมี hydroxyl radicals และ chloride ion จากน้ำเสียเป็นสารออกซิแดนท์ พารามิเตอร์ที่ศึกษา COD, แอมโมเนีย, สี และการใช้พลังงาน ผลการทดลองพบว่า ขั้วไฟฟ้า $TiRuSnO_2$ เป็นขั้วแอโนด ลดค่า COD ได้ 35% ลดสีได้ 52% ลดแอมโมเนียได้ 65% ส่วนขั้วไฟฟ้า PbO_2 สามารถบำบัดแอมโมเนียและสีได้สมบูรณ์ แต่คงเหลือ Residual COD และขั้วไฟฟ้าโบรอนโดปไดมอนด์ (BDD) สามารถลดค่า COD, แอมโมเนีย และสีได้สมบูรณ์ สำหรับการใช้พลังงานพบว่าขั้วโบรอนโดปไดมอนด์ (BDD) สามารถลดการใช้พลังงานได้ดีกว่าขั้วไฟฟ้าชนิด $TiRuSnO_2$, PbO_2 ดังนั้นขั้วไฟฟ้าโบรอนโดปไดมอนด์ (BDD) มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบ

Piya *et al.* (2006) ศึกษาการทำงานของกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานกลั่นสุรา ทดลองในถังปฏิกิริยาที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร และความสูง 0.35 เมตร เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ใช้แผ่นแกรไฟต์และไทเทเนียมเป็นขั้วแอโนด ส่วนขั้วแคโทดใช้ Ti/RuO_2 ขนาด 0.04-0.05 เมตร แปรผัน pH 1, 3, 5 ที่กระแสไฟฟ้า 1-10 แอมแปร์ ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เป็นสารอิเล็กโตรไลต์ โดยศึกษาการลดสีและค่า COD พบว่าการใช้แผ่นไทเทเนียมอย่างเดียวเป็นขั้วแอโนดมีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานกลั่นสุรา สภาวะที่ดีที่สุดคือ pH 1 ที่กระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ สามารถลดค่า COD และสีได้ถึง 89.62% และ 92.24% ตามลำดับ โดยทำปฏิกิริยาได้ดีที่สุด 30 นาทีแรก และใช้พลังงานในการบำบัดประมาณ 2.82-4.83 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัมซีโอดีหรือ 24.08-28.07 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Rabaaoui *et al*. (2013) ศึกษาการบำบัดไนโตรฟีนอลด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าที่ใช้โบรอนโดปไดมอนด์ (BDD) และ PbO_2 เป็นขั้วแอโนด และเหล็กเป็นขั้วแคโทด ทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ ใช้กระแสไฟฟ้า 60 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ทดลองเป็นเวลา 8 ชั่วโมง แปรผันชนิดสารอิเล็กโตรไลต์ ได้แก่ NaCl, KCl, Na_3PO_4, Na_2SO_4 พบว่าขั้วไฟฟ้าโบรอนโดปไดมอนด์ (BDD) สามารถบำบัด COD ได้ 92% ในขณะที่ขั้วไฟฟ้า PbO_2 สามารถบำบัด COD ได้เพียง 52% สารอิเล็กโตรไลต์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดคือ Na_3PO_4 และ Na_2SO_4 โดยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด COD ได้ดีกว่าสารอิเล็กโตรไลต์อีกสองชนิด

Santos *et al*. (2010) ศึกษาการย่อยสลายซัลโฟเนตเอมีนด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่ใช้โบรอนโดปไดมอนด์ (BDD) เป็นขั้วแอโนดและเหล็กเป็นขั้วแคโทด ทำการทดลองแบบทีละเท (Batch reactor) ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นเอมีน 200 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 6 ชั่วโมง กระแสไฟฟ้า 200-300 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเมตร มีการเติมโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) เป็นสารอิเล็กโตรไลต์ โดยสารกลุ่มซัลโฟเนตเอมีนที่ศึกษาได้แก่ Aniline, Ortanilic, Metanilic และ Sulfanilic acids โดยพบว่าที่กระแสไฟฟ้า 300 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเมตร สาร Aniline ค่า COD และ TOC ถูกบำบัดได้ 91% และ 90% ตามลำดับ สาร Ortanilic ค่า COD และ TOC ถูกบำบัดได้ 75% และ 82% ตามลำดับ สาร Metanilic ค่า COD และ TOC ถูกบำบัดได้ 88% และ 87% ตามลำดับ สาร Sulfanilic acids ค่า COD และ TOC ถูกบำบัดได้ 85% และ 79% ตามลำดับ ทั้งนี้ตรวจพบสารผลิตภัณฑ์เป็น Oxalic acid และ Maleic acid อีกด้วย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 4 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชื่อผู้วิจัย	หัวข้อวิจัย	สภาวะการทดลอง	ผลการทดลอง
Babu *et al*. (2012)	การลดสีของน้ำเสียสังเคราะห์และตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าทางอ้อม	- แกรไฟต์เป็นขั้วแอโนด - เหล็กเป็นขั้วแคโทด - ทดลองแบบทีละเทในถังปฏิกิริยาขนาด 400 มิลลิลิตร เป็นเวลา 120 นาที - ความต่างศักย์ไฟฟ้า 4, 8, 12, 16 โวลต์ - NaCl เป็นสารอิเล็กโตรไลต์	- ในน้ำเสียสังเคราะห์สามารถลด COD ได้ 75% และลดสีได้ 88% - ในน้ำตัวอย่างจากโรงงานทอผ้าสามารถลดค่า COD ได้ 68% และลดสีได้ 75%
Miled *et al*. (2010)	การกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานสิ่งทอโดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าทางอ้อม	- แกรไฟต์เป็นขั้วแอโนด - เหล็กเป็นขั้วแคโทด - ทดลองในถังปฏิกิริยาขนาด 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 120 นาที - แปรผัน pH 2, 7, 13 - กระแสไฟฟ้า 100-400 มิลลิแอมแปร์ - แปรผันความเข้มข้น NaCl ที่ 0.1, 0.5, 1 โมลาร์	สภาวะที่เหมาะสมคือ pH 13 ที่ NaCl 0.1 โมลาร์ กระแสไฟฟ้า 200 มิลลิแอมแปร์ สามารถกำจัดสีได้ 43% และลดค่า COD ได้ 75%
Pacheco *et al*. (2010)	การย่อยสลายสารอะโรมาติกเอมีนด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า	- BDD เป็นขั้วแอโนด - เหล็กเป็นขั้วแคโทด - ทดลองแบบทีละเทเป็นเวลา 6 ชั่วโมง - แปรผันกระแสไฟฟ้า 20-30 มิลลิแอมแปร์ต่อตาราง	กระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า ที่กระแสไฟฟ้า 30 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร สามารถบำบัด TKN, NH_3, NO_3^- ได้สมบูรณ์และสามารถกำจัด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 4 (ต่อ)

ชื่อผู้วิจัย	หัวข้อวิจัย	สภาวะการทดลอง	ผลการทดลอง
		เซนติเมตร - Na_2SO_4 เป็นสารอิเล็กโตรไลต์	COD ได้ 90% และกำจัด TOC ได้ 60-80%
Panizza *et al.* (2013)	ศึกษาสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าสำหรับกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าของน้ำชะมูลฝอย	- ใช้วัสดุ 3 ชนิดได้แก่ $TiRuSnO_2$, PbO_2 และ BDD เป็นขั้วแอโนด - เหล็กเป็นขั้วแคโทด - ทดลองแบบทีละเทเป็นเวลา 15-30 นาที - กระแสไฟฟ้าคงที่ 2 แอมแปร์ - โดยมี hydroxyl radicals และ chloride ion จากน้ำเสียเป็นสารออกซิแดนท์	- ขั้วไฟฟ้า $TiRuSnO_2$ ลด COD ได้ 35% ลดแอมโมเนียได้ 65% - ขั้วไฟฟ้า PbO_2 บำบัดแอมโมเนียและสีได้สมบูรณ์แต่คงเหลือ residual COD - ขั้วไฟฟ้า BDD ลด COD, แอมโมเนียและสีได้สมบูรณ์
Piya *et al.* (2006)	การทำงานของกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานกลั่นสุรา	- ใช้แกรไฟต์และไทเทเนียมเป็นขั้วแอโนด - Ti/RuO_2 เป็นขั้วแคโทด - ทดลองในถังปฏิกิริยาแบบทีละเท เป็นเวลา 6 ชั่วโมง - แปรผัน pH 1, 3, 5 - กระแสไฟฟ้า 1-10 แอมแปร์ - H_2O_2 และ NaCl เป็นสารอิเล็กโตรไลต์	การใช้ไทเทเนียมอย่างเดียวเป็นขั้วไฟฟ้าขั้วแอโนดมีประสิทธิภาพดีที่สุด ที่สภาวะ pH 1 กระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ โดยสามารถลด COD ได้ 89.62% และลดสีได้ 92.24%

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 4 (ต่อ)

ชื่อผู้วิจัย	หัวข้อวิจัย	สภาวะการทดลอง	ผลการทดลอง
Rabaaoui *et al*. (2013)	การบำบัดไนโตรฟีนอลด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า	- BDD และ PbO_2 เป็นขั้วแอโนด - เหล็กเป็นขั้วแคโทด - ทดลองเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ที่กระแสไฟฟ้า 60 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร - แปรผันสารอิเล็กโตรไลต์ 4 ชนิด ได้แก่ NaCl, KCl, Na_3PO_4 และ Na_2SO_4	- ขั้วไฟฟ้า BDD ลด COD ได้ 92% - ขั้วไฟฟ้า PbO_2 ลด COD ได้ 52% - สารอิเล็กโตรไลต์ที่มีประสิทธิภาพที่สุดได้แก่ Na_3PO_4 , Na_2SO_4 โดยเพิ่มประสิทธิภาพในการลด COD ได้ดีกว่าสารอิเล็กโตรไลต์อีกสองชนิด
Santos *et al*. (2010)	ศึกษาการย่อยสลายซัลโฟเนตเอมีนด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า	- BDD เป็นขั้วแอโนด - เหล็กเป็นขั้วแคโทด - ทดลองแบบทีละเทเป็นเวลา 6 ชั่วโมง - กระแสไฟฟ้า 200-300 แอมแปร์ต่อตารางเมตร - ศึกษากลุ่มสารซัลโฟเนต 4 ชนิด ได้แก่ Aniline, Ortanilic, Metanilic และ Sulfanilic acids - Na_2SO_4 เป็นสารอิเล็กโตรไลต์	- สาร Aniline ค่า COD และ TOC ถูกบำบัดได้ 91% และ 90% ตามลำดับ - สาร Ortanilic ค่า COD และ TOC ถูกบำบัดได้ 75% และ 82% ตามลำดับ - สาร Metanilic ค่า COD และ TOC ถูกบำบัดได้ 88% และ 87% ตามลำดับ - สาร Sulfanilic acids ค่า COD และ TOC ถูกบำบัดได้ 85% และ 79% ตามลำดับ - ตรวจพบสารผลิตภัณฑ์เป็น Oxalic acid และ Maleic acid

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

1.1 เครื่อง pH meter รุ่น 827 pH Lab Metrohm

1.2 เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer รุ่น Evolution 60S ยี่ห้อ Thermo scientific

1.3 เครื่อง Ion exchange chromatography รุ่น 882 compact IC plus ยี่ห้อ Metrohm

1.4 เครื่อง GC-FID (Perkin Elmer, Model N 610-0133)

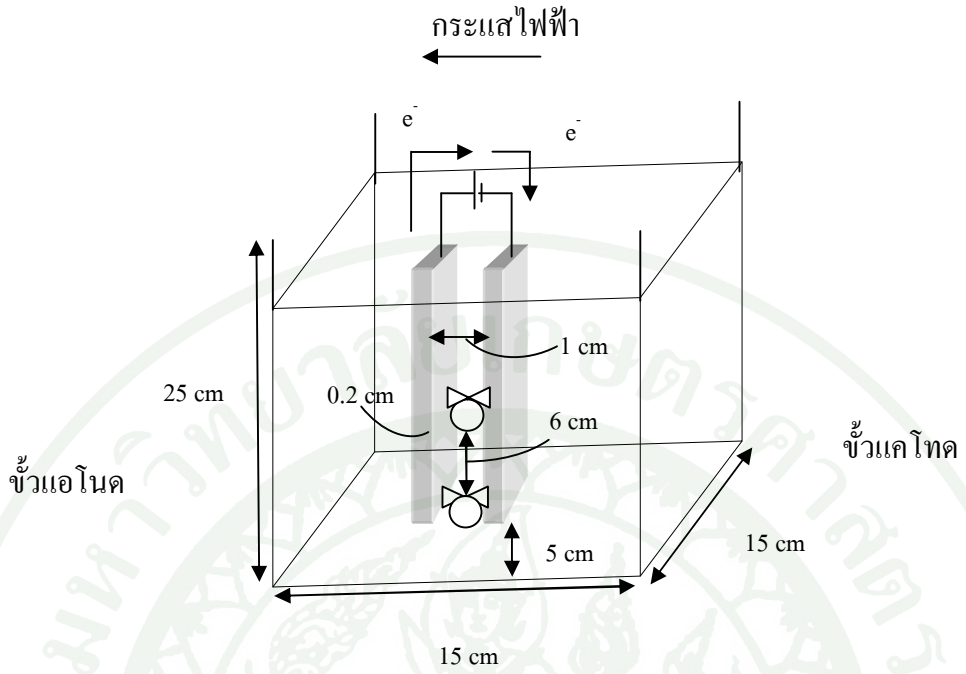
1.5 เครื่อง LC-MS/MS (Varian, Model 320MS Quadrupole)

1.6 เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นกระแสตรงยี่ห้อ Hammax PS-204111 ปรับความต่างศักย์ไฟฟ้า 0-30 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าสูงสุด 3 แอมแปร์

2. ถังปฏิกิริยา (Reactor)

ถังปฏิกิริยา (Reactor) เป็นถังทรงสี่เหลี่ยม ทำจากอะคริลิกใสขนาด 15×15×25 เซนติเมตร มีจุดเก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ 2 จุด คือ ที่กึ่งกลางถังและตำแหน่งต่ำลงมาจากกึ่งกลางถังปฏิกิริยา 6 เซนติเมตร โดยแผนผังถังปฏิกิริยาแสดงดังภาพที่ 6 ขั้วไฟฟ้าแคโทดเป็นแผ่นเหล็กขนาด 13×18×0.2 เซนติเมตร จำนวน 1 แผ่น ขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นแผ่นโลหะเคลือบไทเทเนียม (Coated titanium) ขนาด 13×18×0.2 เซนติเมตร จำนวน 1 แผ่น (จัดซื้อจากบริษัท โปรลอก เทรดดิง แอนด์ คอนเซาทิง จำกัด, Prolog titanium corporation Co., Ltd.) โดยต่อขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว (Monopolar electrode single cell) แสดงดังภาพที่ 7 โดยมีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 1 เซนติเมตร เข้ากับเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงยี่ห้อ Hammax PS-204111 ที่ปรับความต่างศักย์ไฟฟ้า 0-30 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าสูงสุด 3 แอมแปร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 6 แผนผังถังปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี

ภาพที่ 7 ถังปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีต่อวงจรแบบโมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. การเตรียมน้ำตัวอย่าง

น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองเตรียมจากเมทิลไดเอทาโนลามีน (99% pure MDEA) (BASF company, Germany) (M.W. 119.16, density 1.038 g/ml) ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปต MDEA 0.48 ml ใส่ในน้ำ Distilled Water (DI water) ปรับปริมาตรสุดท้ายให้ได้ 1 ลิตร

4. การเตรียมสารอิเล็กโตรไลต์

ในการทดลองใช้โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เป็นสารอิเล็กโตรไลต์ ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ โดยเตรียมจากสารโซเดียมคลอไรด์น้ำหนัก 2.34 กรัม ละลายลงไปในน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 4 ลิตร (คิดเป็น NaCl 0.585 กรัมต่อน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 1 ลิตร) แล้วคนผสมให้เข้ากัน

5. การเตรียมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ในการทดลองทำการแปรผันความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้อยู่ในช่วงความเข้มข้น 100, 300, 500 มิลลิโมลาร์ โดยเตรียมจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 50% (M.W. 34) ที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ประมาณ 100 มิลลิโมลาร์ ปิเปต H_2O_2 6.8 ml ใส่ในน้ำเสียสังเคราะห์ ปรับปริมาตรสุดท้ายให้ได้ 1 ลิตร ที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ประมาณ 300 มิลลิโมลาร์ ปิเปต H_2O_2 20.4 ml ใส่ในน้ำเสียสังเคราะห์ ปรับปริมาตรสุดท้ายให้ได้ 1 ลิตร และที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ประมาณ 500 มิลลิโมลาร์ ปิเปต H_2O_2 34 ml ใส่ในน้ำเสียสังเคราะห์ ปรับปริมาตรสุดท้ายให้ได้ 1 ลิตร (วิธีคำนวณแสดงตามภาคผนวก ข) โดยแต่ละความเข้มข้นของ H_2O_2 ที่กำหนด เตรียมให้ครบปริมาตร 4 ลิตร เพื่อใช้ทำการทดลอง

6. สภาวะที่ทำการทดลอง

6.1 ศึกษาการแปรผันความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 10, 15, 20 โวลต์ โดยทำการทดลองที่สภาวะ pH 4, 7, 9 ในถังปฏิกิรยาแบบทีละเท (Batch reactor) ปริมาตร 4 ลิตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6.2 ศึกษาการแปรผันความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่ 100, 300, 500 มิลลิโมลาร์ โดยทำการทดลองที่สภาวะ pH 4, 7, 9 ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 โวลต์ ในถังปฏิกิริยาแบบทีละเท (Batch reactor) ปริมาตร 4 ลิตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

วิธีการ

1. การศึกษาการแปรผันความต่างศักย์ไฟฟ้าและสภาวะพีเอชที่มีผลต่อกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า

1.1 เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น MDEA 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 4 ลิตร ลงในถังปฏิกิริยาแบบทีละเท (Batch reactor) เติมสารอิเล็กโตรไลต์ลงไป แล้วทำการต่อขั้วไฟฟ้ากับเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้ากระแสตรง โดยจัดระยะห่างขั้วไฟฟ้า 1 เซนติเมตร ปรับความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็น 10 โวลต์ ทดลองเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

1.2 เก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 60, 120, 180, 240 นาที เพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ได้แก่ COD (close reflux), TKN, NH_3 และ NO_3^- รายละเอียดพารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 5

1.3 ทดลองซ้ำ โดยแปรผันค่า pH 4 และ 7 ตามลำดับ ปรับพีเอชโดยใช้ 6N H_2SO_4

1.4 ทดลองซ้ำ โดยแปรผันความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 15 และ 20 โวลต์ ตามลำดับ และทำการทดลองตามข้อที่ 4.1-4.3

1.5 ทำการวิเคราะห์ปริมาณ MDEA ก่อนและหลังผ่านกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า โดยนำน้ำตัวอย่างที่เวลา 0 นาที และ 240 นาที ที่สภาวะ pH 4, 7, 9 ที่ 20 โวลต์ ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-FID

1.6 ทำการวิเคราะห์สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการย่อยสลายสาร MDEA โดยนำน้ำตัวอย่างที่เวลา 240 นาที ที่สภาวะ pH 4, 7, 9 ที่ 20 โวลต์ ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค LC-MS/MS Pursuit XRs C18 column, Mobile phase methanol 80%: water 20%

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. การศึกษาการแปรผันความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และสภาวะพีเอชที่มีผลต่อกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า

2.1 เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น MDEA 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 4 ลิตร ที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ลงในถังปฏิกิริยาแบบทีละเท (Batch reactor) เติมสารอิเล็กโตรไลต์ลงไป แล้วทำการต่อขั้วไฟฟ้ากับเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้ากระแสตรง โดยจัดระยะห่างขั้วไฟฟ้า 1 เซนติเมตร ปรับความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็น 20 โวลต์ ทดลองเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

2.2 เก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 60, 120, 180, 240 นาที เพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ได้แก่ TKN, NH_3 และ NO_3^- รายละเอียดพารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 5

2.3 ทดลองซ้ำ โดยแปรผันค่า pH 4 และ 7 ปรับพีเอชโดยใช้ 6N H_2SO_4

2.4 ทดลองซ้ำ โดยแปรผันความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 300 และ 500 มิลลิโมลาร์ ทำการทดลองตามข้อที่ 5.1-5.3

2.5 ทำการวิเคราะห์สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการย่อยสลายสาร MDEA โดยนำน้ำตัวอย่างที่เวลา 240 นาที สภาวะ pH 4, 7, 9 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 500 มิลลิโมลาร์ ที่ 20 โวลต์ ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค LC-MS/MS Pursuit XRs C18 column, Mobile phase methanol 80%: water 20%

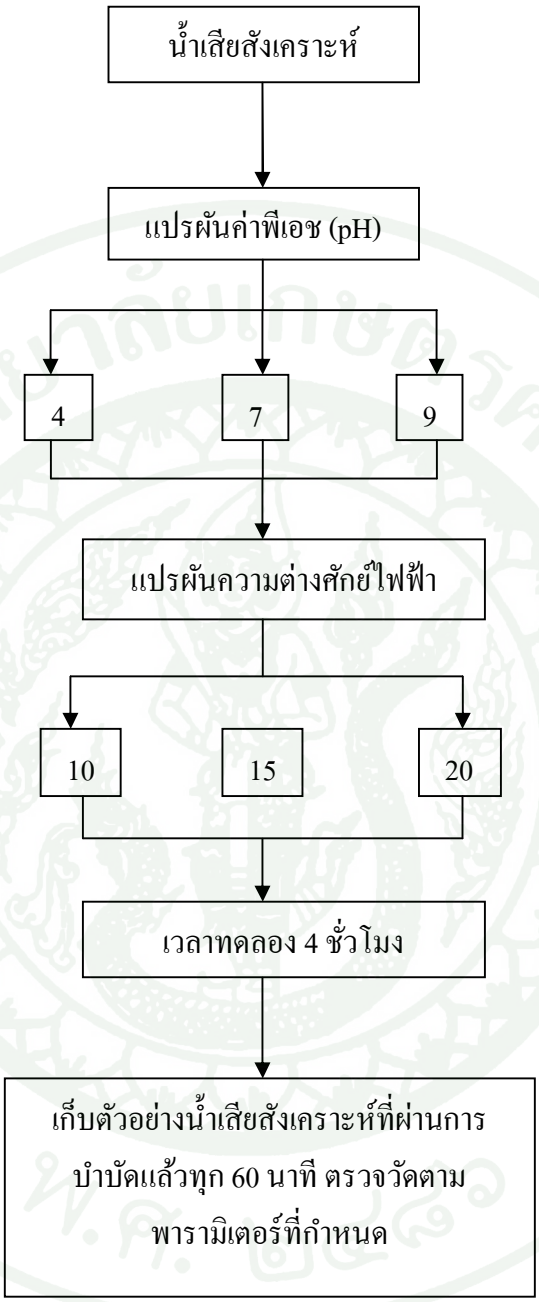
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 5 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์ทางเคมี

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	วิธีวิเคราะห์
COD	5220 C. Closed Reflux, Titrimetric Method
NH_3	4500 – NH_3 C. Titrimetric Method
NO_3^-	4500-NO_3- B. Ultraviolet Spectrophotometric Screening Method
NO_3^-	Ion exchange chromatography
TKN	4500-N_{org} B. Macro-Kjeldahl Method
MDEA	GC-FID (Perkin Elmer, Model N 610-0133) Colum: HP Ultra 1 (25 m×0.2 mm×0.33µm)
Organic compound	LC-MS/MS (Varian, Model 320MS Quadrupole) Column: Pursuit XRs C18 size 150mm×4.6 mm×5µm (Agilent) Mobile phase; solvent A: H_2O, solvent B: MeOH

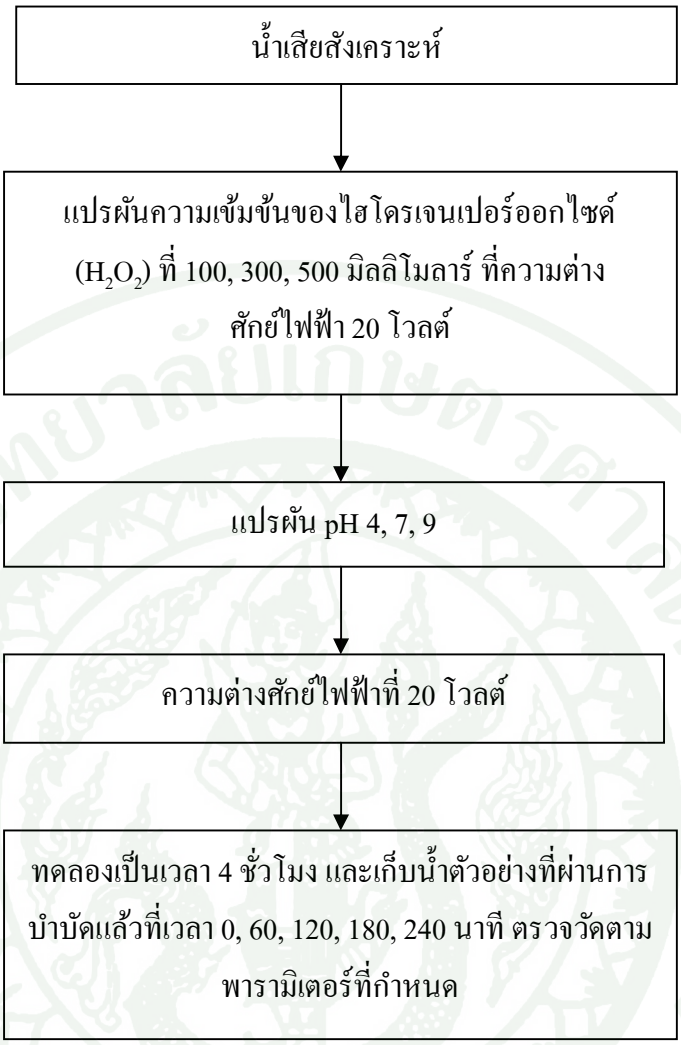
ที่มา: APHA Standard Methods for the Examination of water and wastewater 18th (1998)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 8 แผนผังการทดลองกรณีไม่เติม H_2O_2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 9 แผนผังการทดลองกรณีเติม H_2O_2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

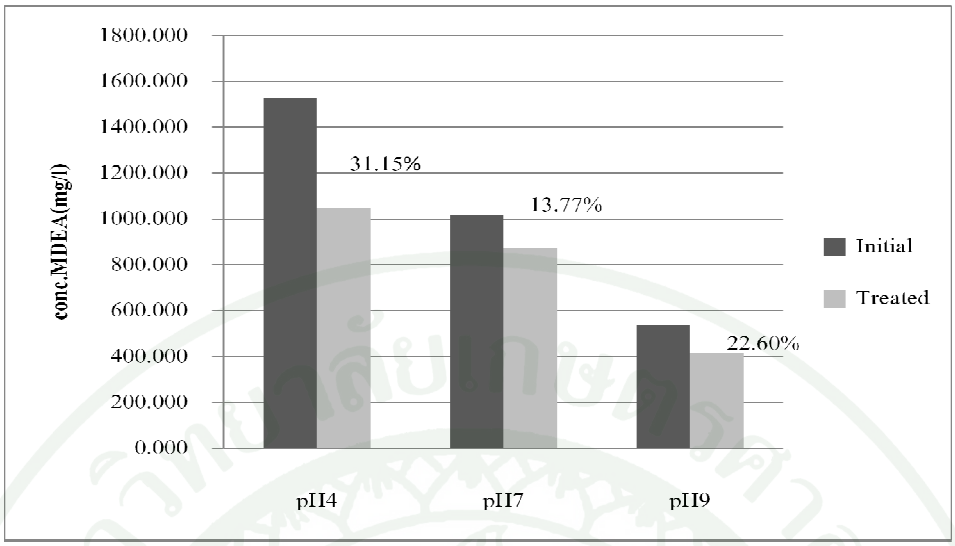
งานวิจัยครั้งนี้เป็นการทดลองเพื่อประเมินประสิทธิภาพและติดตามสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นของกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าในการย่อยสลายสารเมทิลไดเอทาโนลามีน (MDEA) โดยเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จากสาร 99% MDEA (BAFS company, Germany) ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองในถังปฏิกิริยาแบบทีละเท (Batch reactor) ปริมาตร 4 ลิตร ใช้แผ่นโลหะเคลือบไทเทเนียมเป็นขั้วแอโนดและแผ่นเหล็กเป็นขั้วแคโทด ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 1 เซนติเมตร ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 10, 15, 20 โวลต์ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 0.01 โมลาร์ เป็นสารอิเล็กโตรไลต์ (โดยคิดเป็น 0.585 กรัมต่อน้ำเสียสังเคราะห์ 1 ลิตร) แปรผันสภาวะ pH 4, 7, 9 พารามิเตอร์ที่ศึกษาได้แก่ COD, Organic nitrogen, NH_3 และ NO_3^-

1. ผลการทดลองการย่อยสลายเมทิลไดเอทาโนลามีน (MDEA) ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าที่ใช้ไทเทเนียมเป็นขั้วแอโนด กรณีไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)

1.1 ผลของกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าต่อการกำจัด MDEA

ในการติดตามปริมาณ MDEA ในน้ำตัวอย่างที่สภาวะ pH 4, 7, 9 โดยทำการตรวจปริมาณสาร MDEA ที่ผ่านการบำบัดที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 โวลต์ ที่เวลา 0 นาที และ 240 นาที โดยผลการกำจัดสาร MDEA แสดงดังภาพที่ 10 พบว่ากระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าสามารถกำจัดสาร MDEA ได้เล็กน้อย โดยสภาวะ pH เป็นกรดจะสามารถกำจัด MDEA ได้ดีที่สุด เนื่องจากโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ซึ่งเป็นสารอิเล็กโตรไลต์ เกิดการแตกตัวเป็นไฮโปรคลอรัสแอซิด (HOCl) และไฮโปรคลอไรด์ไอออน (OCl^-) ซึ่งเป็นสารออกซิแดนท์ที่รุนแรง จึงเข้าทำปฏิกิริยาออกซิเดชันไปออกซิไดซ์สาร MDEA โดยที่สภาวะ pH เป็นกรด โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) จะแตกตัวให้ไฮโปรคลอรัสแอซิด (HOCl) ได้ดีกว่าไฮโปรคลอไรด์ไอออน (OCl^-) มีผลทำให้ pH 4 เป็นสภาวะที่กำจัดสาร MDEA ได้ดีที่สุดคิดเป็น 31.15% ในขณะที่สภาวะ pH 9 และ 7 สามารถกำจัด MDEA ได้ 22.60% และ 13.77% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ายังคงเหลือสาร MDEA ส่วนใหญ่อยู่ในระบบ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 10 การกำจัด MDEA ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าที่ pH 4, 7, 9 ที่ 20 โวลต์ ที่ 0 นาที และ 240 นาที

1.2 ผลของกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าต่อ COD

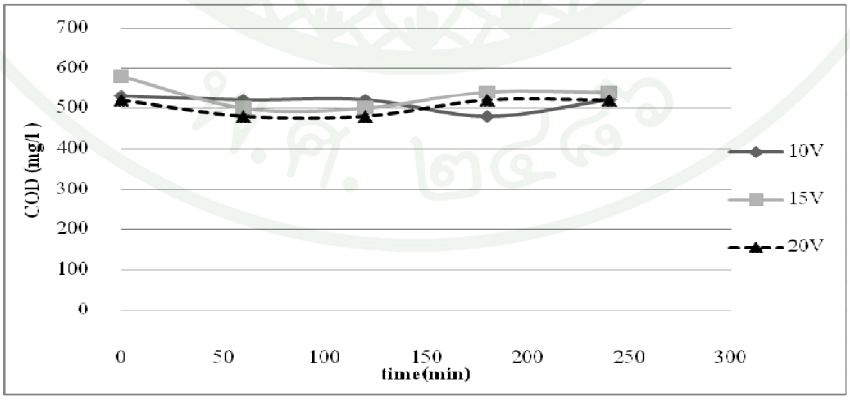
ในการศึกษานี้ทำการติดตามการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ในภาพรวมโดยใช้ค่า COD เป็นตัวแทนของสารอินทรีย์ ผลของกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าต่อค่า COD แสดงในภาพที่ 11-13 ทั้งนี้ค่า COD ตั้งต้นของน้ำตัวอย่างแต่ละชุดการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยมีค่า COD เริ่มต้นที่ 580 mg/l, 480 mg/l และ 500 mg/l ในชุดการทดลอง pH 4, 7, 9 ตามลำดับ ดังนั้นการลดลงของสาร MDEA จึงมีผลต่อปริมาณสารอินทรีย์ด้วย ซึ่งผลการทดลองพบว่ากระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าทั้งสามสภาวะ pH ให้ผลแนวโน้มเดียวกัน โดยที่ในช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ศึกษา (10-20V) การแปรผันความต่างศักย์ไฟฟ้าและเวลาไม่มีผลต่อการกำจัดสารอินทรีย์ ในขณะที่การแปรผัน pH แสดงให้เห็นว่า pH เป็นปัจจัยที่ส่งผลชัดเจนกว่าในการกำจัดสารอินทรีย์ โดยสภาวะ pH เป็นกรดสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ดีที่สุด

จากการทดลองพบว่า pH 4 เป็นสภาวะที่ดีที่สุด สามารถกำจัด COD ได้มากที่สุด จากความเข้มข้น 580 mg/l ลดลงเหลือ 500 mg/l ที่ 15 โวลต์ คิดเป็น 13.79% ในขณะที่สภาวะ pH เดียวกันที่ 10 โวลต์ สามารถกำจัด COD จากความเข้มข้น 530 mg/l ลดลงเหลือ 480 mg/l คิดเป็น 9.43% และที่ 20 โวลต์ สามารถกำจัด COD จากความเข้มข้น 520 mg/l ลดลงเหลือ 480 mg/l คิดเป็น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

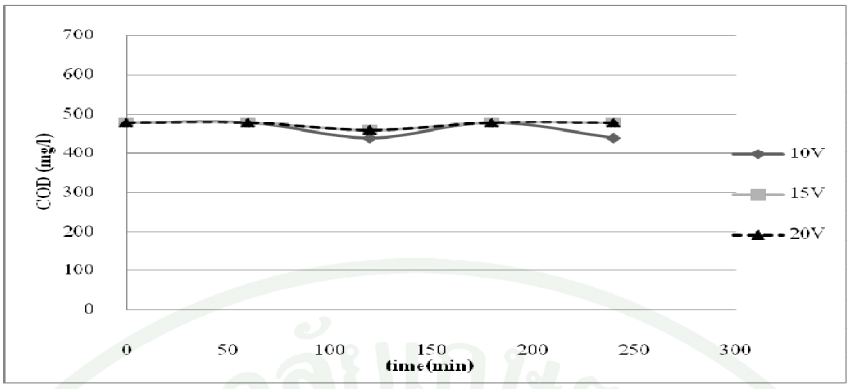
7.69% ในขณะที่สภาวะ pH 7 และ 9 สามารถกำจัด COD ให้ผลแนวโน้มใกล้เคียงกัน โดยที่ pH 7 สามารถกำจัด COD จากความเข้มข้น 480 mg/l ลดลงเหลือ 440 mg/l ที่ 10 โวลต์ คิดเป็น 8.33% ขณะที่ 15 โวลต์ สามารถกำจัด COD จากความเข้มข้น 480 mg/l ลดลงเหลือ 460 mg/l คิดเป็น 4.17% และที่ 20 โวลต์ สามารถกำจัด COD จากความเข้มข้น 480 mg/l ลดลงเหลือ 460 mg/l คิดเป็น 4.17% และที่ pH 9 สามารถกำจัด COD จากความเข้มข้น 460 mg/l ลดลงเหลือ 420 mg/l คิดเป็น 8.70% ที่ 10 โวลต์ ขณะที่ 15 โวลต์ สามารถกำจัด COD จากความเข้มข้น 500 mg/l ลดลงเหลือ 460 mg/l คิดเป็น 8% และที่ 20 โวลต์ สามารถกำจัด COD จากความเข้มข้น 500 mg/l ลดลงเหลือ 480 mg/l
คิดเป็น 4%

การที่ MDEA ถูกบำบัดไปได้ 13.77-31.15% แต่ค่า COD หรือสารอินทรีย์ลดลงเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าผลของกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าที่มีต่อ MDEA เป็นการออกซิเดชันไม่สมบูรณ์ อาจมีการเปลี่ยนรูปไปเป็นสารอินทรีย์อื่นๆ ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าการกำจัด MDEA ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าประสิทธิภาพต่ำ ทั้งนี้เมื่อเทียบกับงานของ Pacheco *et al*. (2010) ที่ทำการศึกษาการย่อยสลายสารอะโรมาติกเอมีนด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าที่ใช้โบรอนโดปไดมอนด์ (BDD) เป็นขั้วแอโนด เหล็กเป็นขั้วแคโทด แปรผันกระแสไฟฟ้า 20-30 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่าสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ ซึ่งบำบัดค่า COD ได้ถึง 90% ในเวลา 6 ชั่วโมง และบำบัดค่า TOC ได้ถึง 60-80% ซึ่งมีประสิทธิภาพดีกว่างานวิจัยที่ทำการศึกษา

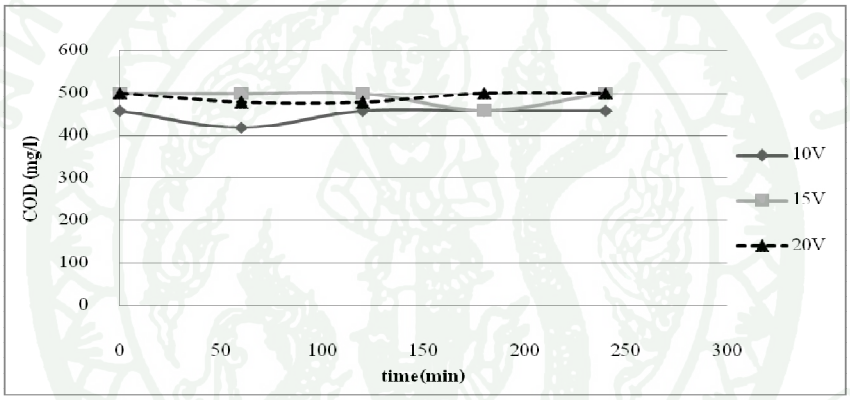


ภาพที่ 11 ปริมาณ COD ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10, 15, 20 โวลต์ ที่สภาวะ pH 4

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 12 ปริมาณ COD ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10, 15, 20 โวลต์ ที่สภาวะ pH 7



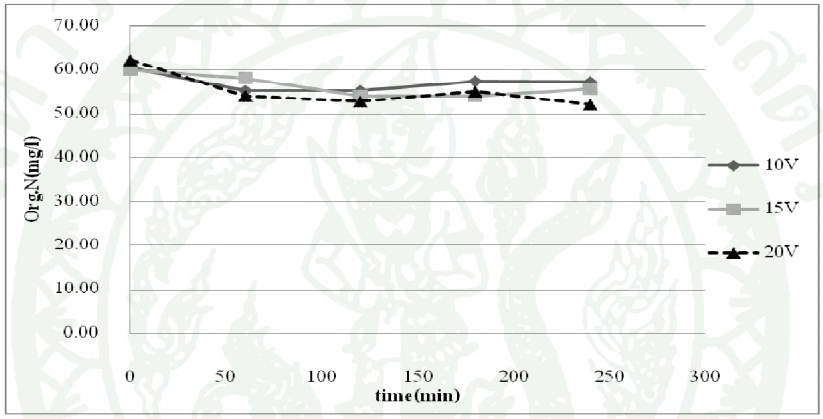
ภาพที่ 13 ปริมาณ COD ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10, 15, 20 โวลต์ ที่สภาวะ pH 9

1.3 การเปลี่ยนแปลงสารประกอบไนโตรเจนโดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า

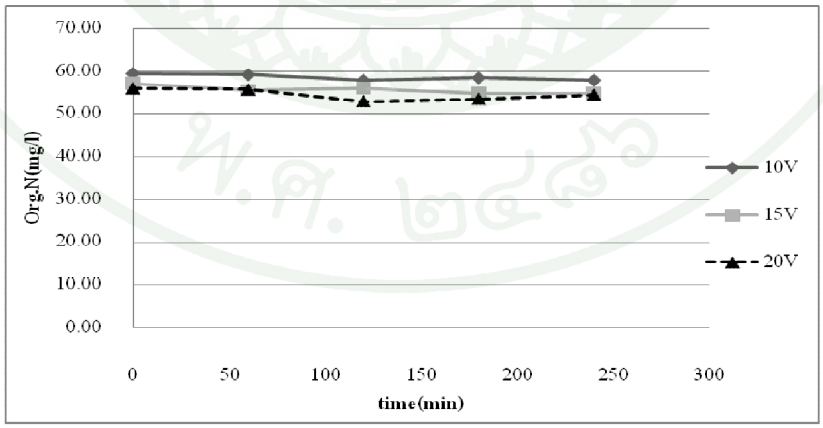
เนื่องจาก MDEA เป็นเอมีน สามารถตรวจวิเคราะห์ได้ในรูป Org-N ในการศึกษานี้จึงติดตามการเปลี่ยนแปลงของ MDEA ในรูปสารประกอบไนโตรเจนคือ Org-N และ NH_3 ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ที่อาจเกิดขึ้นคือ การออกซิไดซ์ของ NH_3 เป็น NO_3^- จากการทดลองพบว่า Org-N ลดลงเล็กน้อย และมี NH_3 อิสระเกิดขึ้นเล็กน้อย ซึ่งการลดลงของสารอินทรีย์ไนโตรเจนพร้อมกับการเพิ่มของ NH_3 แสดงว่าสารอินทรีย์ไนโตรเจนถูกทำลายจนได้ NH_3 ออกมา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลการทดลองพบว่าสภาวะ pH เป็นปัจจัยที่สำคัญ โดยที่สภาวะพีเอชเป็นกรดเป็นสภาวะที่ลดสารอินทรีย์ไนโตรเจนได้ดีที่สุด คือที่ pH 4 เป็นสภาวะที่ดีที่สุด โดยที่ 20 โวลต์ สามารถลด Org-N ได้ดีที่สุดคิดเป็น 16.22% ในขณะที่ 15 และ 10 โวลต์ ลดลงได้เพียง 9.81% และ 8.56% ตามลำดับ ในขณะที่สภาวะ pH 7 และ 9 มีปริมาณลดลงใกล้เคียงกัน โดยสภาวะ pH 7 ที่ 20 โวลต์ สามารถลด Org-N ได้ 5.50% ขณะที่ 15 และ 10 โวลต์ สามารถลด Org-N ได้ 4.17% และ 2.59% ตามลำดับ และที่สภาวะ pH 9 ที่ 20, 15, 10 โวลต์ สามารถลด Org-N ได้ 2.78%, 10.58%, 7.62% ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 14-16 เห็นได้ว่าสารผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ยังคงเป็นสารอินทรีย์ไนโตรเจนหรือสาร Amine ยังเหลืออยู่ในระบบ

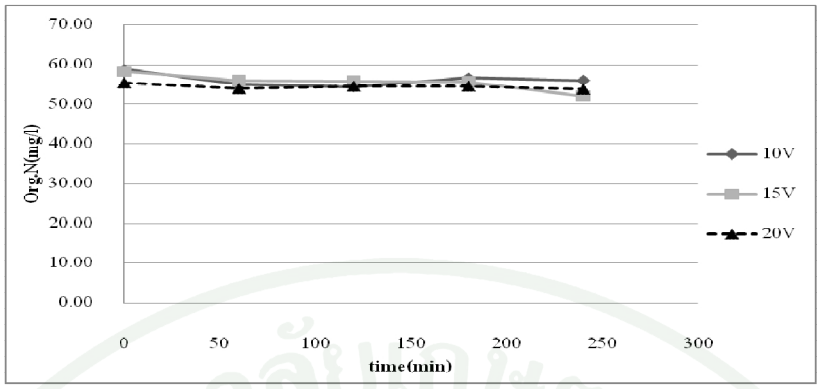


ภาพที่ 14 ปริมาณ Org-N ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10, 15, 20 โวลต์ ที่สภาวะ pH 4



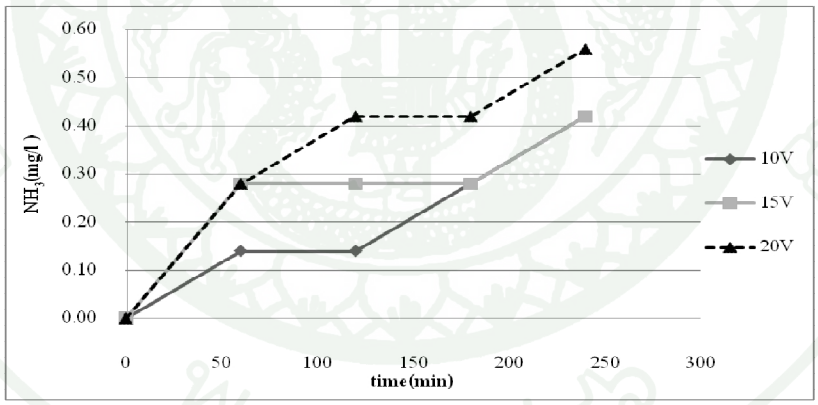
ภาพที่ 15 ปริมาณ Org-N ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10, 15, 20 โวลต์ ที่สภาวะ pH 7

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



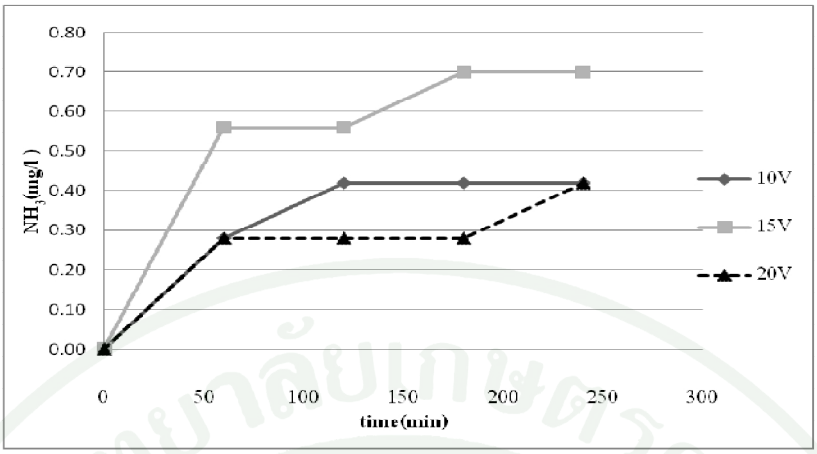
ภาพที่ 16 ปริมาณ Org-N ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10, 15, 20 โวลต์ ที่สภาวะ pH 9

ปริมาณ NH_3 ที่ได้จากการย่อยสลาย MDEA ถึงแม้จะแปรผันตามเวลาและพีเอช แต่ปริมาณที่ได้มีค่าน้อยมาก โดยที่ pH 9 เป็นสภาวะที่มีปริมาณ NH_3 มากที่สุด โดยที่ 15 โวลต์ มีปริมาณ NH_3 เท่ากับ 2.24 mg/l ในขณะที่ 10 และ 20 โวลต์ มีปริมาณ NH_3 เท่ากับ 1.12 mg/l และ 0.42 mg/l ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 17-19 ในขณะที่ pH 4 และ 7 มีปริมาณ NH_3ใกล้เคียงกัน

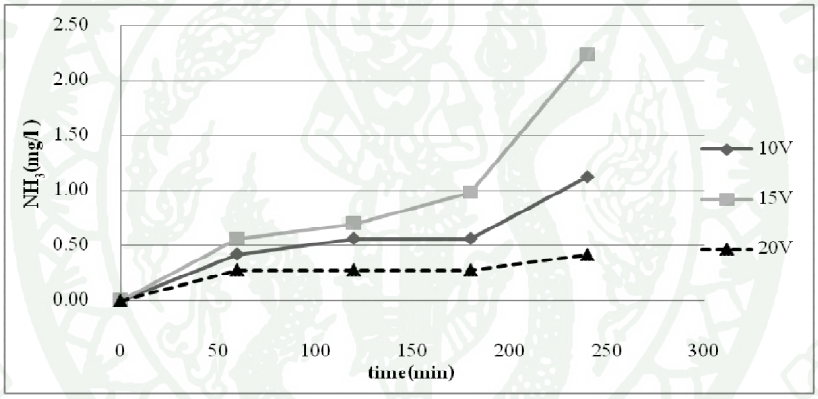


ภาพที่ 17 ปริมาณ NH_3ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10, 15, 20 โวลต์ ที่สภาวะ pH 4

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 18 ปริมาณ NH_3ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10, 15, 20 โวลต์ ที่สภาวะ pH 7



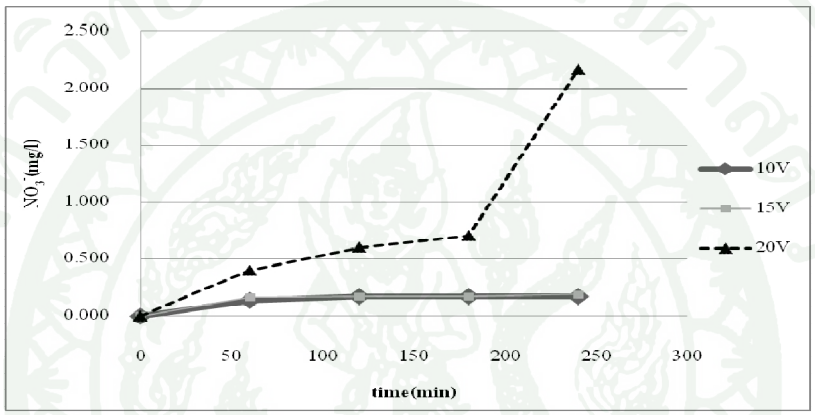
ภาพที่ 19 ปริมาณ NH_3ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10, 15, 20 โวลต์ ที่สภาวะ pH 9

ทั้งนี้ตรวจพบปริมาณ NO_3^- ซึ่งเป็นสารผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของ NH_3 โดยมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามเวลาทดลอง แสดงดังภาพที่ 20-22 เห็นได้ว่า นอกจาก NH_3 จะถูกตัดออกจากโมเลกุลสารอินทรีย์แล้ว ยังผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อไปเป็นไนเตรทได้อีกด้วย โดยปริมาณ NO_3^- พบมากที่สุดที่ pH 7 เท่ากับ 2.76 mg/l

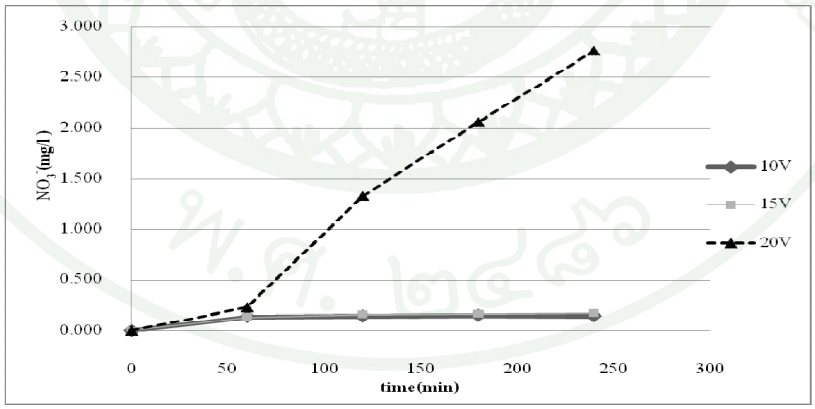
จากการทดลองในการกำจัด MDEA ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า พบว่า pH 4 เป็นสภาวะที่ดีที่สุด สามารถลด Org-N ได้สูงที่สุด โดยที่ 20 โวลต์สามารถลด Org-N ได้ 10.08 mg/l โดยตรวจพบ NH_3 0.56 mg/l และพบ NO_3^- 2.16 mg/l อีกด้วย ในขณะที่ 15 โวลต์ สามารถลด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Org-N ได้ 5.88 mg/l และตรวจพบ NH_3, NO_3^- เท่ากับ 0.42 mg/l, 0.185 mg/l ตามลำดับ และที่ 10 โวลต์ สามารถลด Org-N ได้ 5.18 mg/l และตรวจพบ NH_3, NO_3^- เท่ากับ 0.42 mg/l, 0.168 mg/l ตามลำดับ ในขณะที่สภาวะ pH 7 และ 9 มีผลแนวโน้มใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตามปริมาณ NH_3 พบมากที่สุดที่ pH 9 เท่ากับ 2.24 mg/l และปริมาณ NO_3^- พบมากที่สุดที่ pH 7 เท่ากับ 2.76 mg/l ทั้งนี้ผลการทดลองมีแนวโน้มเดียวกันกับผลการกำจัด MDEA ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าที่ pH 4 โดยสามารถกำจัด MDEA ได้สูงที่สุด 31.15% รวมถึงสามารถลด Org-N ได้สูงที่สุด 16.22% ที่ pH 4 เช่นกัน

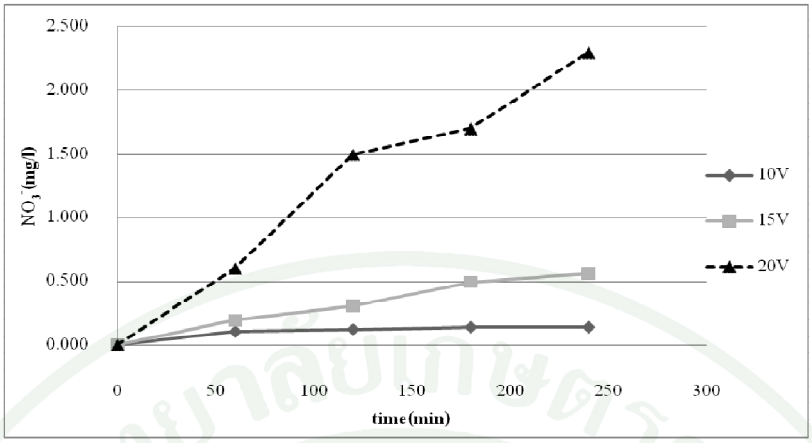


ภาพที่ 20 ปริมาณ NO_3^- ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10, 15, 20 โวลต์ ที่สภาวะ pH 4



ภาพที่ 21 ปริมาณ NO_3^- ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10, 15, 20 โวลต์ ที่สภาวะ pH 7

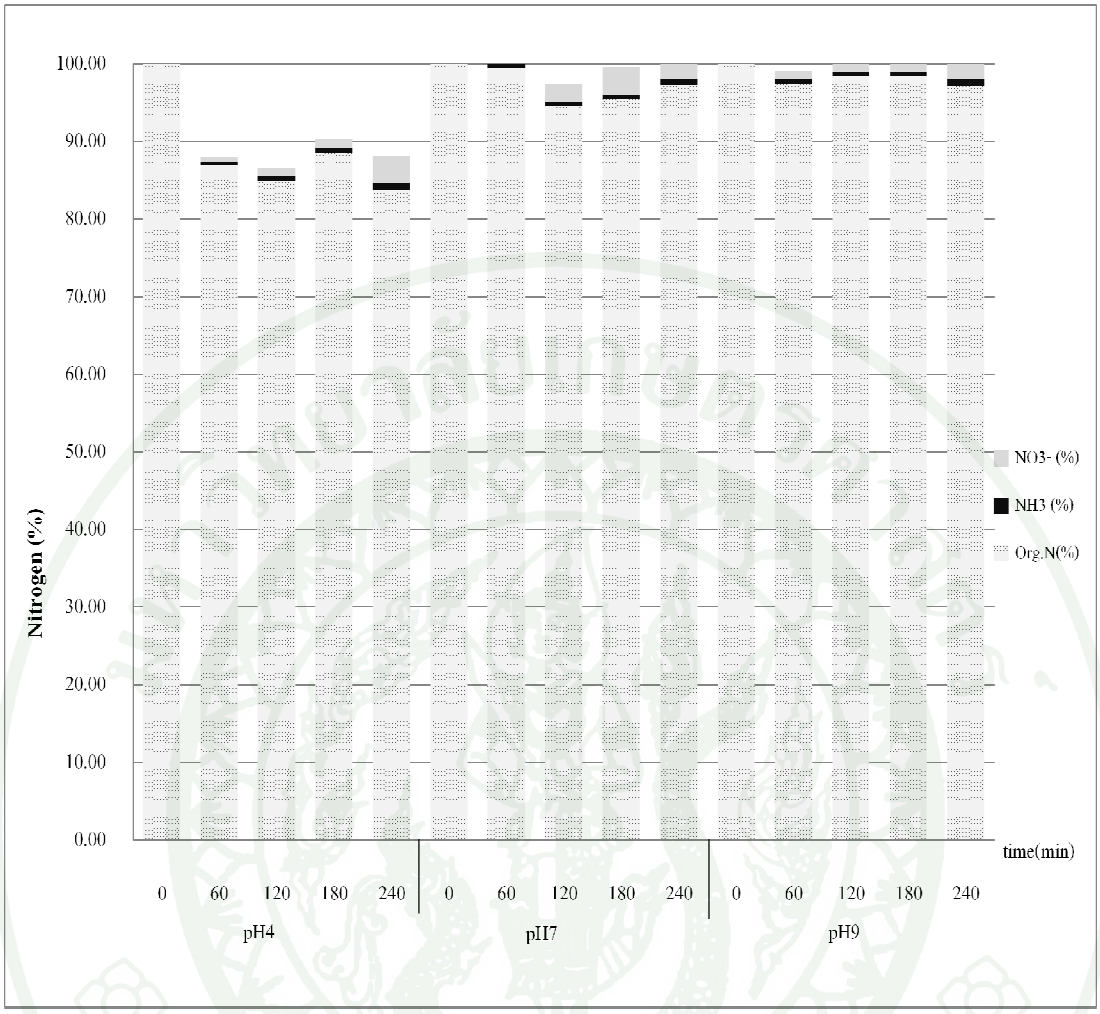
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 22 ปริมาณ NO_3^- ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10, 15, 20 โวลต์ ที่สภาวะ pH 9

เพื่อนำการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบไนโตรเจนทั้งสามรูปมาพิจารณาร่วมกัน จึงได้กำหนดให้ TKN ตั้งต้นเป็น 100% และคำนวณ Organic nitrogen, NH_3-N, NO_3^- -N เป็นสัดส่วนของ TKN แล้วนำมาเปรียบเทียบกัน แสดงดังภาพที่ 23 ที่สภาวะ pH 4, 7, 9 ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 20 โวลต์ พบว่าปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของ NH_3-N และ NO_3^- -N เพิ่มขึ้นตามเวลา โดยที่ pH 4 เป็นสภาวะที่ดีที่สุดในการกำจัด MDEA สามารถกำจัด TKN ลดเหลือ 84.68%, Organic nitrogen เหลืออยู่ 83.78%

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 23 ปริมาณ Org-N, NH_3-N, NO_3^--N หลังผ่านกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า ที่ 20 โวลต์ ที่ pH 4, 7, 9 โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่า TKN ตั้งต้น

1.4 สารผลิตภัณฑ์จากกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้ากรณีไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)

จากการทดลองข้างต้น แสดงให้เห็นว่าแม้ MDEA จะลดลงได้ 13.77-31.15% แต่สารอินทรีย์ในรูป COD และปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนลดลงเล็กน้อย จึงนำน้ำตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค LC-MS/MS พบว่าสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีทั้งสารประกอบเอมีนได้แก่ โมโนเอทาโนลามีน (Monoethanolamine), ไดเอทาโนลามีน (Diethanolamine) และกรดอินทรีย์โมเลกุลเล็ก ได้แก่ กรดไกลโคลิค (Glycolic

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

acid), กรดไกลซีน (Glycine), กรดออกซาลิค (Oxalic acid), กรดฟอร์มิค (Formic acid) และกรดอะซิติค(Acetic acid) ดังตารางที่ 6 จึงยืนยันได้ว่ากระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าย่อยสลายสาร MDEA ได้ไม่สมบูรณ์ ทำให้ได้สารผลิตภัณฑ์โมเลกุลเล็กๆเหลืออยู่ในระบบโดยให้ผลการทดลองในทำนองเดียวกับงานวิจัยของ Harimurti *et al*. (2011) ศึกษาการบำบัดสารMDEAด้วยกระบวนการ Photooxidation ซึ่งตรวจพบสารผลิตภัณฑ์ได้แก่ ไกลซีน (Glycine), กรดออกซาลิค(Oxalic acid) และกรดอะซิติค (Acetic acid) และงานวิจัยของ Jampech (2011) ศึกษาการบำบัดสาร MDEA จากกระบวนการแยกก๊าซธรรมชาติโดยกระบวนการ Ozonation พบว่า MDEA ย่อยสลายไม่สมบูรณ์ โดยมีการเปลี่ยนรูปไปเป็นสารอินทรีย์อื่นได้แก่ กรดฟอร์มิค (Formic acid) และกรดอะซิติค (Acetic acid)

ตารางที่ 6 สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นแต่ละสภาวะพีเอช

สารผลิตภัณฑ์	สูตรโมเลกุล	pH 4	pH 7	pH 9
1.Monoethanolamine	$HO\text{-}CH_2\text{-}CH_2\text{-}NH_2$	√	√	√
2.Diethanolamine	$HO\text{-}CH_2\text{-}CH_2\text{-}NH\text{-}CH_2\text{-}CH_2\text{-}OH$	√	√	√
3.Methyldiethanolamine	$HO\text{-}CH_2\text{-}CH_2\text{-}N(CH_3)\text{-}CH_2\text{-}CH_2\text{-}OH$	√	√	√
4.Glycolic acid	$HO\text{-}CH_2\text{-}COOH$	×	√	√
5.Glycine	$NH_2\text{-}CH_2\text{-}COOH$	√	×	√
6.Oxalic acid	HOOC-COOH	√	√	√
7.Formic acid	HOC-OH	√	√	√
8.Acetic acid	$CH_3\text{-}COOH$	√	×	×

หมายเหตุ: √ = พบสาร

× = ไม่พบสาร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. ผลการทดลองการย่อยสลายสารเมทิลไดเอทาโนลามีน (MDEA) ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าที่ใช้ไทเทเนียมเป็นขั้วแอโนด กรณีเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)

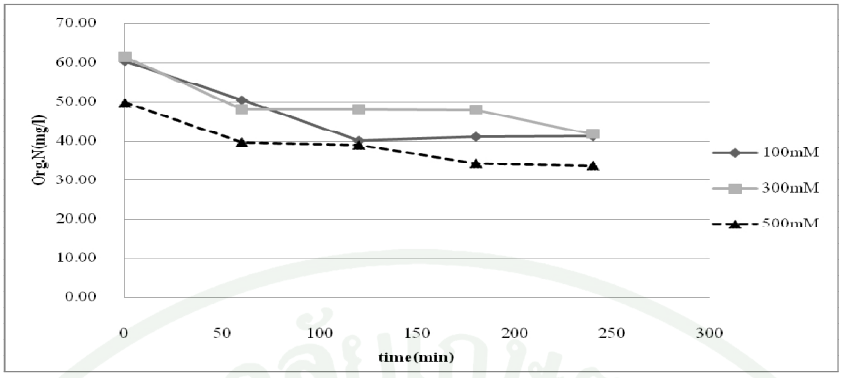
ในการทดลองนี้กรณีเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ได้ทำการแปรผันความเข้มข้นที่ 100, 300, 500 มิลลิโมลาร์ ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 โวลต์ ทำการทดลองเป็นเวลา 4 ชั่วโมง พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาได้แก่ Org-N, NH_3, NO_3^-

2.1 การเปลี่ยนแปลงสารประกอบไนโตรเจนโดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้ากรณีเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)

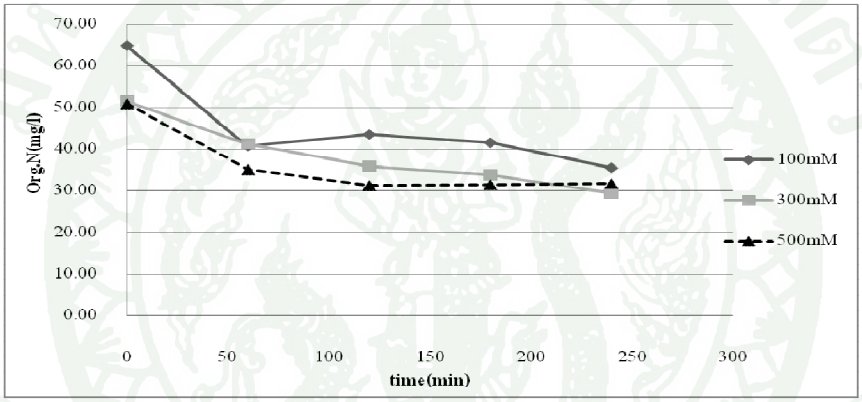
ในการทดลองส่วนที่สองเป็นการศึกษาผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โดยติดตามจากสารประกอบไนโตรเจนในรูป Org-N, NH_3 และ NO_3^- สภาวะ pH เป็นปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณ Org-N, NH_3 และ NO_3^- ซึ่งพบว่าที่สภาวะ pH เป็นด่างเป็นสภาวะที่สามารถลด Org-N ได้ดีที่สุด และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีผลต่อการลด Org-N พบว่าที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากที่สุดสามารถลด Org-N ได้ดีที่สุด ซึ่งปริมาณ Org-N ที่ถูกกำจัดแปรผันตามเวลาที่เพิ่มขึ้น

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองที่สภาวะ pH ต่างๆ พบว่า pH 9 เป็นสภาวะที่ดีที่สุด โดยสามารถลด Org-N ได้มากที่สุด คิดเป็น 70.29% ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิโมลาร์ ในขณะที่ความเข้มข้น 300 และ 100 มิลลิโมลาร์ สามารถลด Org-N ได้ 60.32% และ 48.71% ตามลำดับ ในขณะที่สภาวะ pH 7 และ 4 มีค่าลดลงใกล้เคียงกัน โดยที่ pH 7 สามารถลด Org-N ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ คิดเป็น 45.26% ขณะที่ความเข้มข้น 300 และ 500 มิลลิโมลาร์ สามารถลด Org-N ได้ 42.93% และ 38.46% ตามลำดับ และ pH 4 สามารถลด Org-N ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ คิดเป็น 33.56% ขณะที่ความเข้มข้น 300 และ 500 มิลลิโมลาร์ สามารถลด Org-N ได้ 32.05% และ 32.30% ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 24-26 เห็นได้ว่าเมื่อเทียบผลการทดลองส่วนแรกกับส่วนที่สองนั้น ผลการทดลองส่วนที่สองให้ผลที่ดีกว่าในการกำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนและยังคงเหลือสารอินทรีย์ไนโตรเจนหรือ Amine อยู่ในระบบ

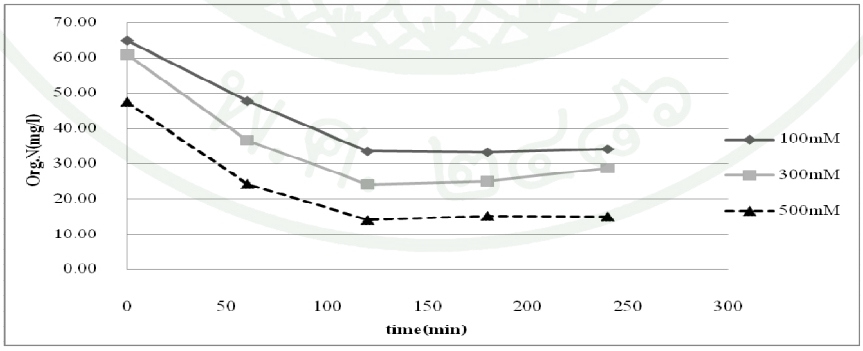
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 24 ปริมาณ Org-N ที่ความเข้มข้นของ H_2O_2 100, 300, 500 mM ที่สภาวะ pH 4



ภาพที่ 25 ปริมาณ Org-N ที่ความเข้มข้นของ H_2O_2 100, 300, 500 mM ที่สภาวะ pH 7

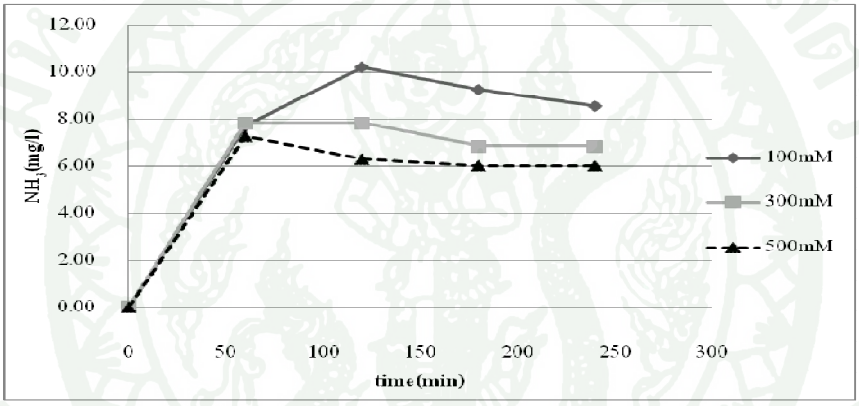


ภาพที่ 26 ปริมาณ Org-N ที่ความเข้มข้นของ H_2O_2 100, 300, 500 mM ที่สภาวะ pH 9

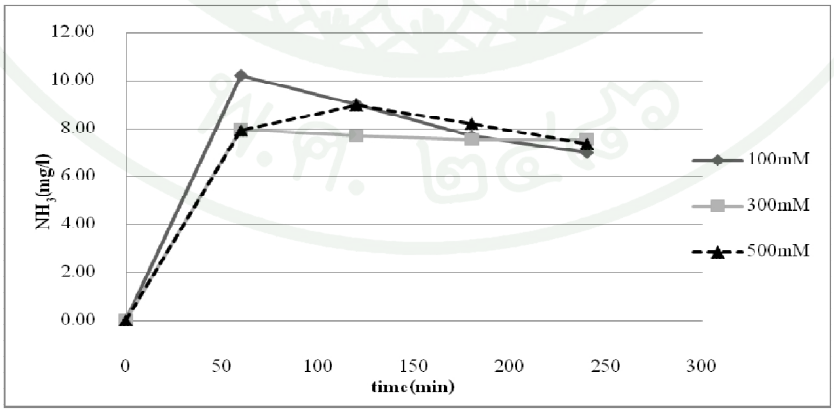
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สำหรับปริมาณ NH_3 มีค่าน้อยมาก โดยมีปริมาณเพิ่มขึ้นช่วง 0-120 นาที แล้วค่อยๆ ลดลงตามเวลาทดลอง โดยปริมาณ NH_3 ที่ทั้งสามสภาวะ pH มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีผลเล็กน้อยต่อปริมาณ NH_3ซึ่งทั้งสามความเข้มข้นให้ผลแนวโน้มใกล้เคียงกัน

ผลการทดลองพบว่าสภาวะ pH 4 ที่ความเข้มข้น 100, 300, 500 มิลลิโมลาร์ มีปริมาณ NH_3 เท่ากับ 10.22 mg/l, 7.84 mg/l, 7.28 mg/l ตามลำดับ ที่สภาวะ pH 7 ที่ความเข้มข้น 100, 300, 500 มิลลิโมลาร์ มีปริมาณ NH_3 เท่ากับ 10.22 mg/l, 7.98 mg/l, 7.91 mg/l ตามลำดับ และที่สภาวะ pH 9 มีปริมาณ NH_3 เท่ากับ 10.08 mg/l, 8.82 mg/l, 7.70 mg/l ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 27-29

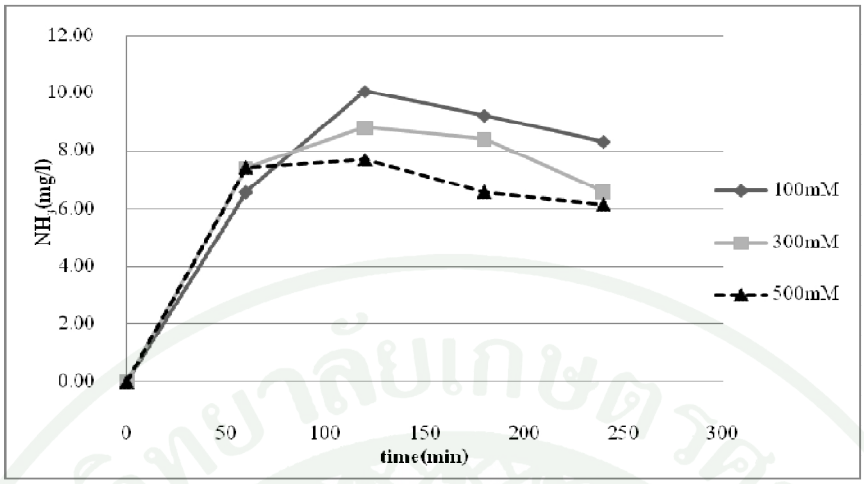


ภาพที่ 27 ปริมาณ NH_3 ที่ความเข้มข้นของ H_2O_2 100, 300, 500 mM ที่สภาวะ pH 4



ภาพที่ 28 ปริมาณ NH_3 ที่ความเข้มข้นของ H_2O_2 100, 300, 500 mM ที่สภาวะ pH 7

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

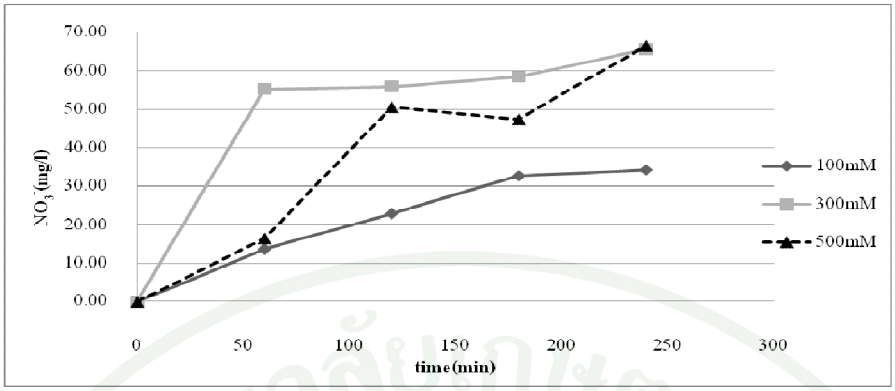


ภาพที่ 29 ปริมาณ NH_3 ที่ความเข้มข้นของ H_2O_2 100, 300, 500 mM ที่สภาวะ pH 9

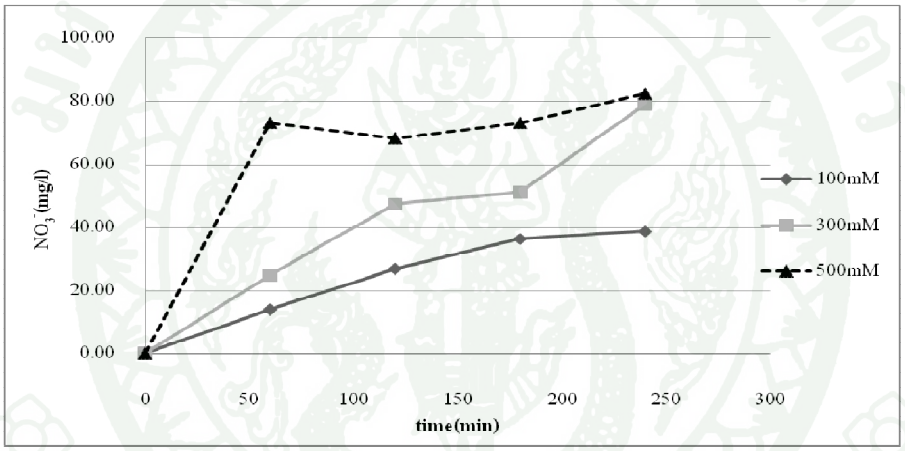
ทั้งนี้ตรวจพบปริมาณ NO_3^- ซึ่งเป็นสารผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของ NH_3 โดยมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามเวลาทดลอง แสดงดังภาพที่ 30-32 เห็นได้ว่า นอกจาก NH_3 จะถูกตัดออกจากโมเลกุลสารอินทรีย์แล้ว ยังผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อไปเป็นไนเตรทได้อีกด้วย โดยสภาวะ pHเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อปริมาณ NO_3^- ซึ่งที่สภาวะพีเอชเป็นด่างเป็นสภาวะที่ดีที่สุด อีกทั้งความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีผลต่อปริมาณ NO_3^- โดยตรวจพบปริมาณ NO_3^- ที่มากที่สุด ที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากที่สุดเช่นกัน

ผลการทดลองพบว่าที่สภาวะ pH 9 มีปริมาณ NO_3^- มากที่สุด โดยที่ความเข้มข้น 500, 300, 100 มิลลิโมลาร์ มีปริมาณ NO_3^- เท่ากับ 108.12 mg/l, 77.28 mg/l, 32.67 mg/l ตามลำดับ ในขณะที่สภาวะ pH 7 และ 4 มีปริมาณ NO_3^- แนวโน้มใกล้เคียงกัน โดยที่ pH 7 ที่ความเข้มข้น 500, 300, 100 มิลลิโมลาร์ มีปริมาณ NO_3^- เท่ากับ 82.47 mg/l, 79.08 mg/l, 38.85 mg/l ตามลำดับ และที่ pH 4 ที่ความเข้มข้น 500, 300, 100 มิลลิโมลาร์ มีปริมาณ NO_3^- เท่ากับ 66.66 mg/l, 65.82 mg/l, 34.32 mg/l ตามลำดับ

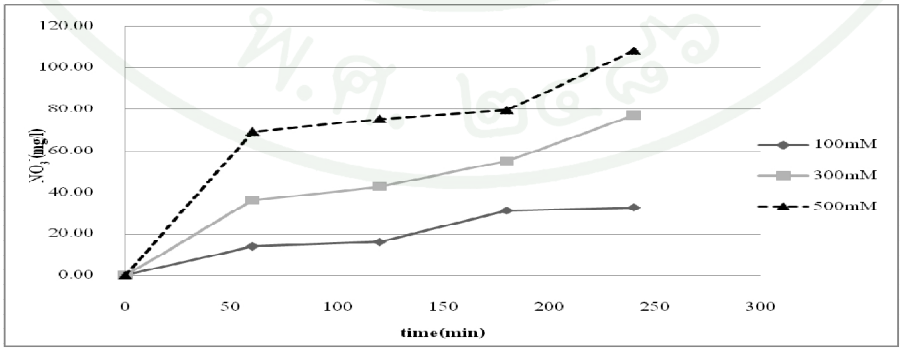
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 30 ปริมาณ NO_3^- ที่ความเข้มข้นของ H_2O_2 100, 300, 500 mM ที่สภาวะ pH 4



ภาพที่ 31 ปริมาณ NO_3^- ที่ความเข้มข้นของ H_2O_2 100, 300, 500 mM ที่สภาวะ pH 7



ภาพที่ 32 ปริมาณ NO_3^- ที่ความเข้มข้นของ H_2O_2 100, 300, 500 mM ที่สภาวะ pH 9

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

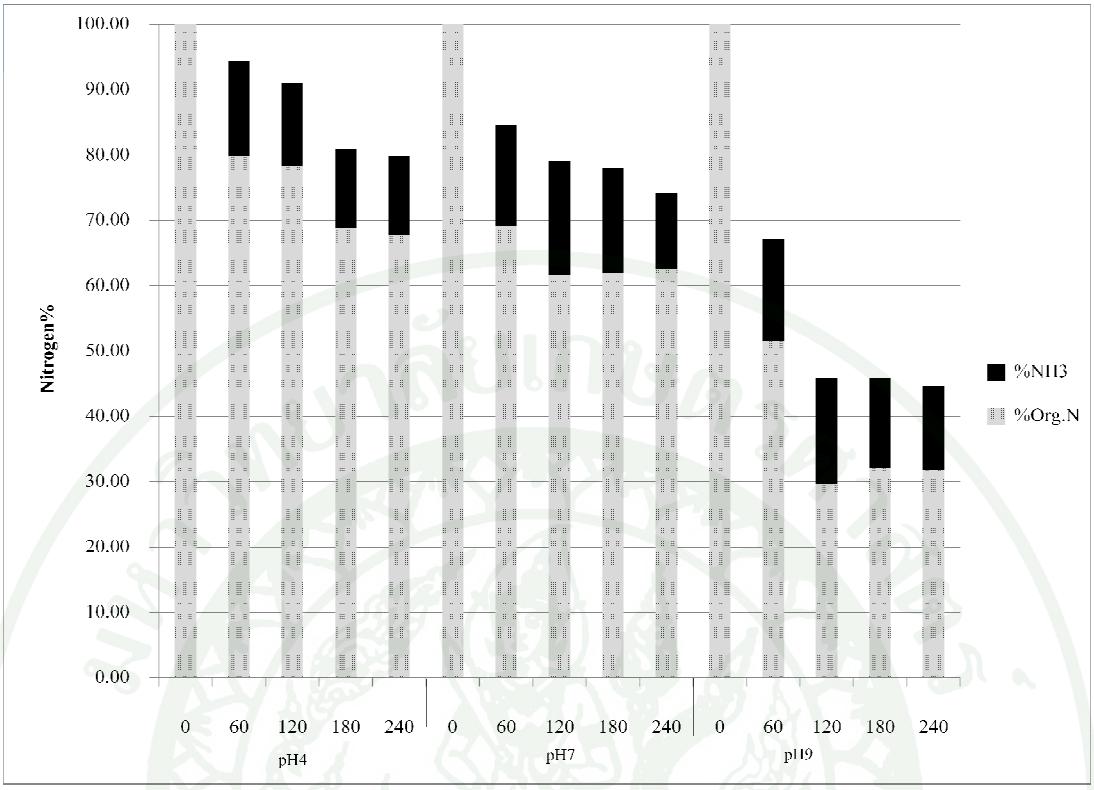
เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกรณีไม่เติมกับเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 โวลต์ พบว่าผลการทดลองกรณีเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีผลที่ดีกว่ากรณีไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยสามารถลด Org-N ได้ดีกว่า ตรวจพบปริมาณ NH_3 และ NO_3^- ที่ปริมาณมากกว่า โดยกรณีไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ pH 4 สามารถลด Org-N ได้ 16.22% ขณะที่กรณีเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ pH 4 สามารถลด Org-N ได้สูงถึง 33.56% และที่สภาวะ pH 7 และ 9 กรณีไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สามารถลด Org-N ได้เพียง 5.50% และ 2.78% ตามลำดับ ในขณะที่ pH 7 และ 9 กรณีเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สามารถลด Org-N ได้สูงถึง 45.26% และ 70.29% ตามลำดับ

ผลการติดตามปริมาณ NH_3 และ NO_3^- จากกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้ากรณีไม่เติมและเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าปริมาณ NH_3 มีปริมาณน้อย ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ NO_3^- ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามเวลา แสดงให้เห็นว่า NH_3 ถูกออกซิไดซ์ต่อเป็น NO_3^- ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าได้ โดยพบว่าปริมาณ NH_3 ในกรณีเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีปริมาณมากกว่ากรณีไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แต่อย่างไรก็ตามปริมาณ NH_3 ทั้งสองกรณียังมีปริมาณเพียงเล็กน้อย ในขณะที่ปริมาณ NO_3^- มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามเวลาทดลองทั้งสองกรณี โดยปริมาณ NO_3^- กรณีเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีปริมาณมากกว่ากรณีไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีผลต่อปริมาณ NH_3 และ NO_3^-

ผลการติดตามปริมาณ NH_3 กรณีไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่สภาวะ pH 4 พบปริมาณ NH_3 เท่ากับ 0.56 mg/l ในขณะที่กรณีเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่สภาวะ pH 4 พบปริมาณ NH_3 สูงถึง 10.22 mg/l และที่สภาวะ pH 7 และ 9 กรณีไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบปริมาณ NH_3 เพียง 0.42 mg/l และ 0.42 mg/l ตามลำดับ ในขณะที่สภาวะ pH 7 และ 9 กรณีเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบปริมาณ NH_3 สูงถึง 10.22 mg/l และ 10.08 mg/l ตามลำดับ

ผลการติดตามปริมาณ NO_3^- กรณีไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่สภาวะ pH 4 พบปริมาณ NO_3^- เท่ากับ 2.16 mg/l ในขณะที่กรณีเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่สภาวะ pH 4 พบปริมาณ NO_3^- สูงถึง 66.66 mg/l และที่สภาวะ pH 7 และ 9 กรณีไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบปริมาณ NO_3^- เพียง 2.76 mg/l และ 2.3 mg/l ตามลำดับ ในขณะที่สภาวะ pH 7 และ 9 กรณีเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบปริมาณ NO_3^- สูงถึง 82.47 mg/l และ 108.12 mg/l ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 33 ปริมาณ Org-N, NH_3-N หลังผ่านกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าที่ pH 4, 7, 9 ที่ 500 mM คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของ TKN ตั้งต้น

เพื่อนำการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบไนโตรเจนมาพิจารณาร่วมกัน จึงได้กำหนดให้ TKN ตั้งต้นเป็น 100% และคำนวณ Organic nitrogen, NH_3-N เป็นสัดส่วนของ TKN แล้วนำมาเปรียบเทียบกัน แสดงดังภาพที่ 33 ที่สภาวะ pH 4, 7, 9 ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 20 โวลต์ ที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 500 มิลลิโมลาร์ พบว่าปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนลดลงตามเวลา ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของ NH_3-N จะเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 0-120 นาที แล้วค่อยลดลงตามเวลา

ผลการทดลองพบว่า pH 9 เป็นสภาวะที่ดีที่สุดในการกำจัด MDEA สามารถกำจัด TKN ลดเหลือ 44.71%, Organic nitrogen เหลืออยู่ 31.76% ในขณะที่ pH 7 และ 4 ถูกบำบัดไปได้ในปริมาณใกล้เคียงกัน โดย pH 7 สามารถกำจัด TKN ลดเหลือ 76.92%, Org-N ลดเหลือ 61.54% และที่ pH 4 สามารถกำจัด TKN ลดเหลือ 79.78%, Org-N ลดเหลือ 67.7%

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.2 สารผลิตภัณฑ์จากกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้ากรณีเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)

การย่อยสลายสาร MDEA ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า กรณีเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ในระบบ โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์(H_2O_2)จะแตกตัวให้ $OH^{\cdot}$ ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง ทำให้เกิดการออกซิเดชันของสาร MDEA เกิดการย่อยสลายหรือเปลี่ยนรูปของสารอินทรีย์ในระบบ เมื่อนำน้ำตัวอย่างที่ผ่านการทดลองแล้วไปวิเคราะห์โดยเทคนิค LC-MS/MS พบสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กๆได้แก่ ไกลซีน (Glycine), กรดออกซาลิค (Oxalic acid) และกรดอะซิติค (Acetic acid) ดังตารางที่ 7 เมื่อเปรียบเทียบกรณีไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) จะเห็นได้ว่าตรวจไม่พบสารเอมีนบางตัว ได้แก่ โมโนเอทาโนลามีน (Monoethanolamine) และไดเอทาโนลามีน (Diethanolamine), กรดอินทรีย์บางตัวได้แก่ กรดไกลโคลิค (Glycolic acid) และกรดฟอร์มิค (Formic acid) แสดงว่าเกิดการย่อยสลายสาร MDEA ได้ ทำให้ตรวจไม่พบ Amine ในรูปปฐมภูมิ (Monoethanolamine) และรูปทุติยภูมิ (Diethanolamine) นั่นเอง อย่างไรก็ตามกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้ากำจัดสาร MDEA ได้ไม่หมด ทำให้ยังคงเหลือสาร MDEA อยู่ในระบบ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 7 สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นแต่ละสภาวะพีเอชกรณีเติม H_2O_2

สารผลิตภัณฑ์	สูตรโมเลกุล	pH 4	pH 7	pH 9
1.Monoethanolamine	$HO\text{-}CH_2\text{-}CH_2\text{-}NH_2$	×	×	×
2.Diethanolamine	$HO\text{-}CH_2\text{-}CH_2\text{-}NH\text{-}CH_2\text{-}CH_2\text{-}OH$	×	×	×
3.Methyldiethanolamine	$HO\text{-}CH_2\text{-}CH_2\text{-}N(CH_3)\text{-}CH_2\text{-}CH_2\text{-}OH$	√	√	√
4.Glycolic acid	$HO\text{-}CH_2\text{-}COOH$	×	×	×
5.Glycine	$NH_2\text{-}CH_2\text{-}COOH$	√	√	√
6.Oxalic acid	$HOOC\text{-}COOH$	√	√	√
7.Formic acid	$HOC\text{-}OH$	×	×	×
8.Acetic acid	$CH_3\text{-}COOH$	×	√	√

หมายเหตุ: √ = พบสาร

× = ไม่พบสาร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ในการทดลองการย่อยสลายเมทิลไดเอทาโนลามีน (MDEA) ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าที่ใช้ไทเทเนียมเป็นขั้วแอโนด สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ประสิทธิภาพของการย่อยสลายสาร MDEA ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าที่ใช้ไทเทเนียมเป็นขั้วแอโนดกรณีไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)

- ผลการกำจัด MDEA โดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าไม่สมบูรณ์ พบว่าแนวโน้มของสภาวะพีเอชเป็นกรดเป็นสภาวะที่ดีที่สุดคือ pH 4 โดยสามารถกำจัดสาร MDEA ได้สูงที่สุดถึง 31.15% รองลงมาที่ pH 9 คิดเป็น 22.60% และที่ pH 7 คิดเป็น 13.77%

- ในการติดตามสารอินทรีย์และสารประกอบไนโตรเจนในรูป COD และ Org-N ผลการทดลองพบว่า COD และ Org-N ถูกกำจัดได้เพียงเล็กน้อย โดยที่สภาวะ pH 4 เป็นสภาวะที่ดีที่สุด สามารถกำจัด COD และ Org-N ได้มากที่สุด คิดเป็น 13.79% และ 16.22% แสดงให้เห็นว่า MDEA ถูกย่อยสลายไม่สมบูรณ์ และเหลืออยู่ในรูปเอมีนหรือเปลี่ยนไปอยู่ในรูปสารอินทรีย์อื่น

- ในการย่อยสลายสาร MDEA ตรวจพบปริมาณ NH_3 เพียงเล็กน้อย โดยพบมากที่สุดที่สภาวะ pH 9 เท่ากับ 2.24 mg/l และตรวจพบปริมาณ NO_3^- แสดงว่า NH_3 สามารถถูกออกซิไดซ์ต่อเป็น NO_3^- ได้ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า โดยพบมากที่สุดที่สภาวะ pH 7 เท่ากับ 2.76 mg/l

- ทั้งนี้ตรวจพบสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายสาร MDEA ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 โวลต์ โดยวิเคราะห์ด้วยเทคนิค LC-MS/MS ได้แก่ โมโนเอทาโนลามีน (Monoethanolamine), ไดเอทาโนลามีน (Diethanolamine), กรดไกลโคลิค (Glycolia acid), กรดไกลซีน (Glycine), กรดออกซาลิค (Oxalic acid), กรดฟอร์มิค (Formic acid) และกรดอะซิติค (Acetic acid)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. ประสิทธิภาพของการย่อยสลายสาร MDEA ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าที่ใช้ไทเทเนียมเป็นขั้วแอโนดกรณีเติมสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)

- ผลการแปรผันความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าสภาวะพีเอชและความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อการย่อยสลาย MDEA โดยสภาวะ pH 9 เป็นสภาวะที่ดีที่สุด ที่ความเข้มข้นของ H_2O_2 500 มิลลิโมลาร์ สามารถลด Org-N ได้สูงถึง 70.29% อีกทั้งยังตรวจพบปริมาณ NH_3 สูงถึง 10.22 mg/l และปริมาณ NO_3^- สูงที่สุดถึง 108.12 mg/l อีกด้วย

- ทั้งนี้พบสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายสาร MDEA ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า กรณีเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่ 500 มิลลิโมลาร์ โดยวิเคราะห์ด้วยเทคนิค LC-MS/MS ได้แก่ ไกลซีน (Glycine), กรดออกซาลิค (Oxalic acid) และกรดอะซิติค (Acetic acid) และยังตรวจพบสาร MDEA ด้วย แสดงว่ากระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้ากำจัดสาร MDEA ไม่สมบูรณ์ ยังเหลือสาร Amine อยู่ในระบบ

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ระดับสูง เพื่อหาสภาวะเหมาะสมต่อการย่อยสลายสารMDEA ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า

2. ควรศึกษากลไกของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่มีผลต่อการย่อยสลายสาร MDEA เพื่อทราบถึงลักษณะการแตกพันธะในการบำบัดสาร MDEA ในน้ำเสียตัวอย่าง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2554. **ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์ เอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์ (MSDS).** แหล่งที่มา: http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?vID=674, 2 เมษายน 2556

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2554. **โครงการจัดทำระบบฐานข้อมูลการจำแนกและการสื่อสารความเป็นอันตรายของวัตถุอันตรายที่อยู่ในความรับผิดชอบของกรมโรงงานอุตสาหกรรมตามระบบ GHS.** แหล่งที่มา: http://ghs.diw.go.th:8080/GHSThaiUser/doc/sds/SDS105-59-9.pdf, 2 เมษายน 2556

สุธาทิพย์ ศิริไพศาลพิพัฒน์, อัจจนา วงศ์ชัยสุวัฒน์ และสายใจ ชาญเศรษฐิกุล. 2548. **เคมีทั่วไป 2.** พิมพ์ครั้งที่ 2. โอเอสพริ้นติ้ง เฮาส์, กรุงเทพฯ.

ปารัชญา ขาวศรี. 2553. **การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อนุสรณ์ ทัศนราพันธ์. 2552. **การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตสุราโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

APHA, AWWA and WEF. 1998. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** 18th ed., APHA, Washington DC.

Areetham, P.P., K. Shenchunthichai and M. Hunsom. 2006. Application of electrooxidation process for treating concentrated wastewater from distillery industry with a voluminous electrode. **Water Research** 40: 2857-2864.

Babu, S.A., S. Raja, S. Sibi and P. Neeraja. 2012. Decolorization of synthetic and real polluted water by indirect electrochemical oxidation process. **Poll Res** 31(1): 45-49.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

BASF. 2005. **BASF Safety data sheet, Product a MDEA HICAP**. The Chemical Company Germany.

Donaldson, T.L. and Y.N. Nguyen. 1980. Carbon-dioxide reaction kinetics and transport in aqueous amine membranes. **Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals 19**: 260-266.

Feng, Z., F.C. Gang, W.Y. Ting, W.Y. Tao, L.A. Min and Z.Z. Bing. 2010. Absorption of CO_2 in the aqueous solutions of functionalized ionic liquids and MDEA. **Chemical Engineering journal** 160: 691-697.

Fürhacker, M., A. Pressl and R. Allabashi. 2003. Aerobic biodegradability of methyldiethanolamine (MDEA) used in natural gas sweetening plants in batch tests and continuous flow experiments. **Chemosphere** 52: 1743-1748.

Harimurti, S., A.U. Rahmah, A.A. Omar and T. Murugesan. 2011. Effect of hydrogen peroxide (H_2O_2) on Mineralization of methyldiethanolamine (MDEA) using UV/H_2O_2. Universiti Teknologi Petronas, Malasia.

Hernández, I.L., C.B. Díaz, B. Bilyeu, P.J. GarcíaRojas and E.C. Medina. 2010. A combined electrocoagulation-electrooxidation treatment for industrial wastewater. **Journal of Hazardous Materials** 175: 688-694.

Jampech, B. 2011. **Treatment of methyldiethanolamine (MDEA) from gas separation plant using ozonation.** M.E. Thesis, Kasetsart University.

Kidnay, A.J. and P. William. 2006. **Fundamental of natural gas processing.** Taylor and Francis Group, LLC, USA.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Kornienko, G.V., N.V. Chaenko, I.S. Vasil'eva and V.L. Kornienko. 2004. Indirect electrooxidation of organic substrates by hydrogen peroxide generated in an oxygen gas-diffusion electrode. **Journal of Electrochemistry** 40 (2): 148-152.

Miled, W., A. Haj Said and S. Roudesli. 2010. Decolorization of high polluted textile wastewater by indirect electrochemical oxidation process. **Journal of Textile and Apparel, Technology and Management** 6 (3): 1-6.

Mollah, M.Y.A., R. Schennach, J.R. Parge and D.L. Cocke. 2000. Electrocoagulation (EC) – science and applications. **Journal of Hazardous Materials** B84: 29-41.

Pacheco, M.J., V. Santos, L. Ciríaco and A. Lopes. 2011. Electrochemical degradation of aromatic amines on BDD electrodes. **Journal of Hazardous Materials** 186: 1033-1041.

Panizza, M., C.A.M. Huitle. 2013. Role of electrode materials for the anodic oxidation of a real landfill leachate comparison between Ti-Ru-Sn ternary oxide, PbO_2 and boron-doped diamond anode. **Chemosphere** 90: 1455-1460.

Rabaaoui, N., M.E.K. Saad, Y. Moussaoui, M.S. Allagui, A. Bedoui and E. Elaloui. 2013. Anodic oxidation of o-nitrophenol on BDD electrode: Variable effects and mechanisms of degradation. **Journal of Hazardous Meterials** 250-251: 447-453.

Raju, G.B., M.T. Karuppiah, S.S. Latha, S. Parvathy and S. Prabhakar. 2008. Treatment of wastewater from synthetic textile industry by electrocoagulation-electrooxidation. **Chemical Engineering Journal** 144: 51-58.

Santos, V., J. Diogo, M.J.A. Pacheco, L. Ciríaco, A. Morão and A. Lopes. 2010. Electrochemical degradation of sulfonated amines on SI/BDD electrodes. **Chemosphere** 79: 637-645.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Zhi, Q and Guo Kai. 2009. Modeling and kinetic study on a absorption of CO_2 by aqueous solutions of N-methyldiethanolamine in a modified wetted wall column. **Journal of Chemical Engineering** 17 (4): 571-579.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์ทางเคมี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิธีวิเคราะห์ทางเคมี

1. การวิเคราะห์ค่าซีโอดีโดยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด

1.1. การเตรียมสารเคมี

1.1.1 สารละลาย digestion reagent เตรียมโดยการสารละลายโปแตสเซียมไดโครเมต สำหรับย่อยสลาย 0.1 นอร์มัล ชั่ง $K_2Cr_2O_7$ ซึ่งอบแห้งที่ 130 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง มา 4.913 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟุริคเข้มข้น 167 มิลลิลิตร และเติม $HgSO_4$ 33.3 กรัมทิ้งให้ละลายและปล่อยให้เย็นจึงเจือจางด้วยน้ำกลั่นเป็น 1 ลิตร

1.1.2 สารละลายกรดซัลฟุริค เตรียมโดยการเติม Ag_2SO_4 8.8 กรัม ลงในกรดซัลฟุริคเข้มข้น 1 ลิตร ตั้งทิ้งไว้ 1-2 วัน

1.1.3 สารละลายเฟอโรอีนอินดิเคเตอร์ เตรียมโดยการละลาย Phenanthroline Monohydrate 1.485 กรัม กับ $FeSO_4.7H_2O$ 695 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น 100 มิลลิลิตร

1.1.4 สารละลายมาตรฐานเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.10 นอร์มัล (FAS) เตรียมโดยการละลาย $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2.6H_2O$ 39.2 กรัมในน้ำกลั่นเติมกรดซัลฟุริคเข้มข้น 20 มิลลิลิตร ทิ้งให้เย็นแล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 1 ลิตร นำสารละลายนี้มาหาความเข้มข้นที่แน่นอนด้วยสารละลายมาตรฐานไดโครเมต (Standardization)

การหาความเข้มข้น $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$ 0.10 นอร์มัล โดยปิเปต $K_2Cr_2O_7$ 0.2 นอร์มัล 25 มิลลิลิตร เติม conc.H_2SO_4-$AgSO_4$ 20 มิลลิลิตรเจือจางในน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 250 มิลลิลิตรในขวดรูปชมพู่ หยดสารละลายเฟอโรอีนอินดิเคเตอร์จำนวน 2-3 หยดนำไปไตเตรทกับ สารละลายมาตรฐานเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.10 นอร์มัล สารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีฟ้าอมเขียวและเป็นสีน้ำตาลแดงที่จุดยุติ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$\text{Normality } Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 = \frac{\text{มล. } K_2Cr_2O_7 \times 0.10}{\text{มล. } Fe(NH_4)_2(SO_4)_2}$$

1.2 วิธีวิเคราะห์ค่าซีโอดีโดยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด

ตัวอย่างน้ำ 10 มิลลิลิตร+ $K_2Cr_2O_7$ 6 มิลลิลิตร+ conc.H_2SO_4-$AgSO_4$ 7 มิลลิลิตร

↓ เขย่าให้เข้ากัน

ย่อยที่ตู้อบที่ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

↓ ทิ้งไว้ให้เย็น

เทใส่ขวดรูปชมพู่ล้างด้วยน้ำกลั่น 2-3 ครั้ง

↓ หยดเฟอโรอีนอินดิเคเตอร์

ไตเตรทด้วย $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$ จากสีเหลืองเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแดง

1.3 การคำนวณค่าซีโอดี

$$\text{ค่าซีโอดี (มก./ล.)} = \frac{(A-B) \times C \times 8{,}000 \times D}{\text{มล. ตัวอย่างน้ำ}}$$

A = มิลลิลิตรของ FAS ที่ใช้ไตเตรทแบลงค์

B = มิลลิลิตรของ FAS ที่ใช้ไตเตรทตัวอย่างน้ำ

C = นอร์มัลลิตี้ของ FAS

D = อัตราการเจือจางของตัวอย่างน้ำ (dilution of sample)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. การวิเคราะห์ค่าทีเคเอ็นไนโตรเจน

2.1 การเตรียมสารเคมี

2.1.1 สารละลาย digestion reagent เตรียมโดยการละลาย K_2SO_4 134 กรัมและ $CuSO_4$ 7.3 กรัม ในน้ำกลั่น 800 มิลลิลิตร เติม conc.H_2SO_4 134 มิลลิลิตร ทำให้เย็นเติมน้ำกลั่นจนครบ 1 ลิตรเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการตกผลึก

2.1.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์-โซเดียมไธโอซัลเฟต เตรียมโดยการละลาย NaOH 500 กรัม และ $Na_2S_2O_3.5H_2O$ 25 กรัม ในน้ำและเจือจางเป็น 1 ลิตร

2.1.3 สารละลายบอเรตบัฟเฟอร์ เตรียมโดยการเติม NaOH 0.1 นอร์มัล 88 มิลลิลิตร ลงในสารละลาย $Na_2B_4O_7$ 0.25 โมลาร์ (เตรียมได้โดยละลาย $Na_2B_4O_7.10H_2O$ 9.5 กรัมในน้ำ 1 ลิตร) 500 มิลลิลิตรผสมให้เข้ากันแล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 1 ลิตร

2.1.4 สารละลายอินดิเคเตอร์ผสม เตรียมโดยการละลายเมทธิลเรด 200 มิลลิกรัม ในเอทธิลแอลกอฮอล์ 95% หรือในไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ 100 มิลลิลิตร และละลายเมทธิลีนบลู 100 มิลลิกรัม ในเอทธิลแอลกอฮอล์ 95% หรือในไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ 50 มิลลิลิตร นำสารละลายทั้งสองมาผสมกัน เตรียมใช้แต่ละเดือน

2.1.5 สารละลายกรดบอริคที่มีอินดิเคเตอร์ เตรียมโดยการละลาย H_3BO_3 20 กรัม ในน้ำกลั่นเติมสารละลายอินดิเคเตอร์ผสม 10 มิลลิลิตร เจือจางให้เป็น 1 ลิตร เตรียมใช้แต่ละเดือน

2.1.6 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 นอร์มัล เตรียมโดยการละลาย NaOH 240 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางจนครบ 1 ลิตร

2.1.7 สารละลายฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ เตรียมโดยการละลายฟีนอล์ฟทาลีน 5 กรัม ในเอทธิลแอลกอฮอล์ 95% จำนวน 500 มิลลิลิตรเติมน้ำกลั่นอีก 500 มิลลิลิตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.1.8 สารละลายมาตรฐาน H_2SO_4 0.02 นอร์มัล เตรียมโดยการเจือจางกรดซัลฟุริค 1.0 นอร์มัล จำนวน 20 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร นำสารละลายนี้มาหาความเข้มข้นที่แน่นอน (Standardization) ด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต 0.05 นอร์มัล จำนวน 20 มิลลิลิตร

$$\text{Normality } H_2SO_4 = \frac{0.05 \times 20}{\text{มล. } H_2SO_4 \text{ ที่ใช้ไตเตรท}}$$

2.2 วิธีวิเคราะห์ค่าทีเคเอ็น

ตัวอย่างน้ำ 50 มิลลิลิตรในขวดเจลดาลห์ เติมน้ำกลั่นจนได้ 200 มิลลิลิตร

↓ ใส่เม็ดแก้ว 3-4 เม็ด

เติมสารละลาย digestion reagent 50 มิลลิลิตร นำเข้าเครื่องย่อยสลาย
จนได้สารละลายใส

↓ ทิ้งไว้ให้เย็น

เติมน้ำกลั่น 300 มิลลิลิตร และฟีนอล์ฟทาลีน 0.5 มิลลิลิตร
เขย่าแล้วเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ไธโอซัลเฟต 50 มิลลิลิตรจนกลายเป็นสีชมพู

↓

นำขวดเจลดาห์ต่อเข้าเครื่องกลั่นโดยให้ปลายท่อกลั่นอยู่ใต้สารละลายกรดบอริค
ที่มีอินดิเคเตอร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตรในขวดรูปชมพู่
กลั่นจนได้สารละลาย 200 มิลลิลิตร

↓

นำมาไตเตรทกับ H_2SO_4 0.02 นอร์มัล จนถึงจุดยุติซึ่งสารละลายจะเป็นสีม่วง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.3 การคำนวณค่าทีเคเอ็น

$$\text{ทีเคเอ็น (มก./ล.)} = \frac{(A-B) \times N \times 14,000}{\text{มิลลิลิตรตัวอย่างน้ำ}}$$

A = มิลลิลิตร H_2SO_4 ที่ใช้ไตเตรทตัวอย่างน้ำ

B = มิลลิลิตร H_2SO_4 ที่ใช้ไตเตรทแบลงค์

N = ความเข้มข้นของ H_2SO_4 0.02 นอร์มัล

3. การวิเคราะห์แอมโมเนียไนโตรเจน

3.1 การเตรียมสารเคมี

3.1.1 สารละลายบอเรตบัฟเฟอร์ เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 นอร์มัล จำนวน 88 มิลลิลิตร ลงในสารละลายโซเดียมเตตระบอเรต 0.025 โมลาร์ (เตรียมได้โดย $Na_2B_4O_7.10H_2O$ 9.5 กรัม/น้ำ 1 ลิตร) ปริมาณ 500 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันแล้วเจือจางให้เป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น

3.1.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 นอร์มัล

3.1.3 สารละลายกรดบอริค ละลาย H_3BO_3 20 กรัม ในน้ำกลั่นเจือจางเป็น 1 ลิตร

3.1.4 สารละลายอินดิเคเตอร์ ละลายเมทธิลเรด 200 มิลลิกรัม ในเอทธิลแอลกอฮอล์ 95% หรือในไอโซโพรพิลอัลกอฮอล์ 100 มิลลิลิตร และละลายเมทธิลีนบลู 100 มิลลิกรัม ในเอทธิลแอลกอฮอล์ 95% หรือในไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ 50 มิลลิลิตร นำสารละลายทั้งสองชนิดมาผสมกัน

3.1.5 สารละลาย H_2SO_4 0.02 นอร์มัล

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.2 วิธีวิเคราะห์ค่าแอมโมเนีย

ตัวอย่างน้ำ 150 มิลลิลิตร ในขวดเจลดาลห์ เติมน้ำกลั่นจนได้ 200 มิลลิลิตร ใส่เม็ดแก้ว 3-4 เม็ด

↓

เติมสารละลายบอเรตบัฟเฟอร์ 25 มิลลิลิตร

↓

นำขวดเจลดาลห์ต่อเข้าเครื่องกลั่นโดยให้ปลายท่อกลั่นอยู่ใต้สารละลายกรดบอริคที่มีอินดิเคเตอร์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ในขวดชมพู่ กลั่นจนได้สารละลาย 200 มิลลิลิตร

↓

นำมาไตรเตรทกับ H_2SO_4 0.02 นอร์มัล จนถึงจุดยุติซึ่งสารละลายจะเป็นสีม่วง

3.3 การคำนวณค่าแอมโมเนีย

$$\text{แอมโมเนีย (มก./ล.)} = \frac{(A-B) \times N \times 14{,}000}{\text{มิลลิลิตรตัวอย่างน้ำ}}$$

A = มิลลิลิตร H_2SO_4 ที่ใช้ไตเตรทตัวอย่างน้ำ

B = มิลลิลิตร H_2SO_4 ที่ใช้ไตเตรทแบลงค์

N = ความเข้มข้นของ H_2SO_4 0.02 นอร์มัล

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. การวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทไนโตรเจน

4.1 การเตรียมสารเคมี

4.1.1 สารละลายโพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3) อบที่ 105 องศา เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งมา 0.7218 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 1 ลิตร โดย 1 มิลลิลิตร เท่ากับ 1 ไมโครกรัมไนเตรทไนโตรเจน

4.1.2 ปิเปตสต๊อกสารละลายโพแทสเซียมไนเตรท 100 มิลลิลิตร เจือจางให้ได้ 1,000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น โดย 1 มิลลิลิตร เท่ากับ 10 ไมโครกรัมไนเตรทไนโตรเจน เพื่อนำไปใช้ในการทำกราฟมาตรฐาน

4.1.3 ไฮโดรคลอริค 1 นอร์มัล

4.2 เครื่อง UV-Visible spectrophotometer ที่ 220 และ 275 นาโนเมตร

4.3 วิธีวิเคราะห์ไนเตรทไนโตรเจน

ตัวอย่างน้ำ 50 มิลลิลิตร ในขวดปรับปริมาตร

↓

เติมไฮโดรคลอริค 1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน

↓

นำไปตรวจวัดด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer ที่ 220 และ 275 นาโนเมตร

↓

บันทึกค่า Abs. นำไปเทียบกับกราฟมาตรฐาน เพื่อคำนวณหาปริมาณไนเตรท

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4.4 เครื่อง Ion exchange chromatography รุ่น 882 compact IC plus ยี่ห้อ Metrohm ตรวจวัดปริมาณไนเตรทในตัวอย่างที่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงไป โดยเตรียมโพแทสเซียมไนเตรทที่ความเข้มข้น 0.1, 0.2, 0.5, 2, 5 ppm เพื่อนำไปใช้ทำกราฟมาตรฐาน ทำการเจือจางน้ำตัวอย่างและกรองน้ำตัวอย่างด้วยตัวกรองขนาด 0.2 ไมครอน ทำการตรวจวัดและคำนวณปริมาณไนเตรท

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดลอง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1. ความเข้มข้น MDEA ก่อนและหลังกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า ที่ 20 โวลต์ ที่ 0 นาที และ 240 นาที

ตารางผนวกที่ ข1 ความเข้มข้น MDEA ก่อนและหลังกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า ที่ 20 โวลต์ ที่ 0 นาที และ 240 นาที

pH	ความเข้มข้นที่ 0 นาที (ppm)	ความเข้มข้นที่ 240 นาที (ppm)	ความแตกต่าง (ppm)	% Removal
pH 4	1,527.018	1,051.346	475.672	31.15
pH 7	1,015.919	876.017	139.902	13.77
pH 9	536.783	415.447	121.336	22.60

การคำนวณหาค่า MDEA removal percentage

$$\%\text{MDEA Removal} = \frac{(\text{MDEA}_{t=0} - \text{MDEA}_{t=t})}{\text{MDEA}_{t=0}} \times 100\%$$

เมื่อ $\text{MDEA}_{t=0}$ = ค่า MDEA ที่เวลา 0 นาที (mg/l)

$\text{MDEA}_{t=t}$ = ค่า MDEA ที่เวลา 240 นาที (mg/l)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. การคำนวณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ในการเตรียมความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ในการทดลองของงานวิจัยนี้ ไม่ได้คำนวณจากความหนาแน่น (Density) ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แต่ได้คำนวณจากความเข้มข้นของสต๊อกความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 50% โดยตรง ทำให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ได้เป็นความเข้มข้นโดยประมาณ ซึ่งวิธีการคำนวณดังนี้

2.1 การคำนวณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่100 มิลลิโมลาร์

การเตรียมความเข้มข้นของ H_2O_2 เตรียมจาก H_2O_2 50% โดยมี M.W. 34 โดยที่ 100 มิลลิโมลาร์ คิดเป็น 0.1 โมลาร์ คิดเป็น 3.4 กรัมต่อลิตร

สูตรคำนวณ $C_1V_1 = C_2V_2$

500 กรัมต่อลิตร (V_1) = 3.4 กรัมต่อลิตร (1000 มิลลิลิตร)

V_1 = 6.8 มิลลิลิตรต่อน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 1 ลิตร

ดังนั้น ความเข้มข้นของ H_2O_2 ที่ 100 มิลลิโมลาร์ เตรียมจาก H_2O_2 50% เท่ากับ 6.8 มิลลิลิตรต่อน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 1 ลิตร

2.2 การคำนวณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่300 มิลลิโมลาร์

การเตรียมความเข้มข้นของ H_2O_2 เตรียมจาก H_2O_2 50% โดยมี M.W. 34 โดยที่ 300 มิลลิโมลาร์ คิดเป็น 0.3 โมลาร์ คิดเป็น 10.2 กรัมต่อลิตร

สูตรคำนวณ $C_1V_1 = C_2V_2$

500 กรัมต่อลิตร (V_1) = 10.2 กรัมต่อลิตร (1000 มิลลิลิตร)

V_1 = 20.4 มิลลิลิตรต่อน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 1 ลิตร

ดังนั้น ความเข้มข้นของ H_2O_2 ที่ 300 มิลลิโมลาร์ เตรียมจาก H_2O_2 50% เท่ากับ 20.4 มิลลิลิตรต่อน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 1 ลิตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.3 การคำนวณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่500 มิลลิโมลาร์

การเตรียมความเข้มข้นของ H_2O_2 เตรียมจาก H_2O_2 50% โดยมี M.W. 34 โดยที่ 500 มิลลิโมลาร์ คิดเป็น 0.5 โมลาร์ คิดเป็น 17 กรัมต่อลิตร

สูตรคำนวณ $C_1V_1 = C_2V_2$

500 กรัมต่อลิตร (V_1) = 17 กรัมต่อลิตร (1000 มิลลิลิตร)

V_1 = 34 มิลลิลิตรต่อน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 1 ลิตร

ดังนั้น ความเข้มข้นของ H_2O_2 ที่ 500 มิลลิโมลาร์ เตรียมจาก H_2O_2 50% เท่ากับ 34 มิลลิลิตรต่อน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 1 ลิตร

3. Condition ของเครื่อง GC-FID

ตารางผนวกที่ ข2 Condition ของเครื่อง GC-FID

ยี่ห้อ	Perkin Elmer
Model	N610-0133
Column	HP Ultra 1 (25 m x 0.2 mmx 0.33 um) (Length x I.D. x Film thickness)
Injection port temperature	290 ºC
Oven temperature	120 ºC
Detector temperature	290 ºC
Flow rate of the Carrier gas	0.6 mL/min
Injection volume	1.0 µL

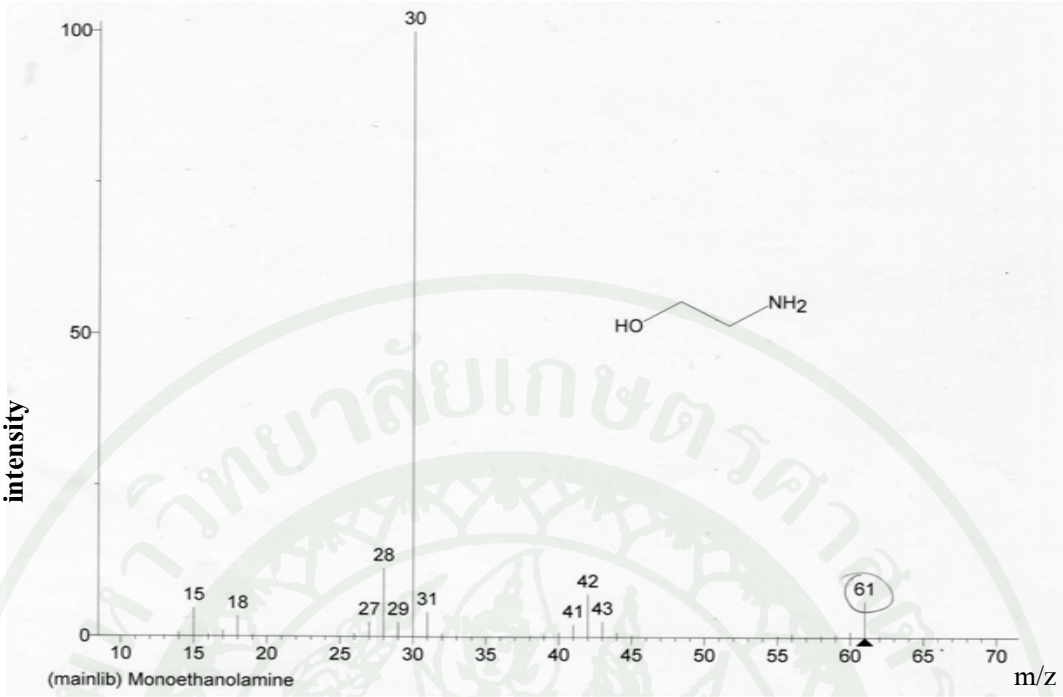
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. Condition ของเครื่อง LC-MS/MS

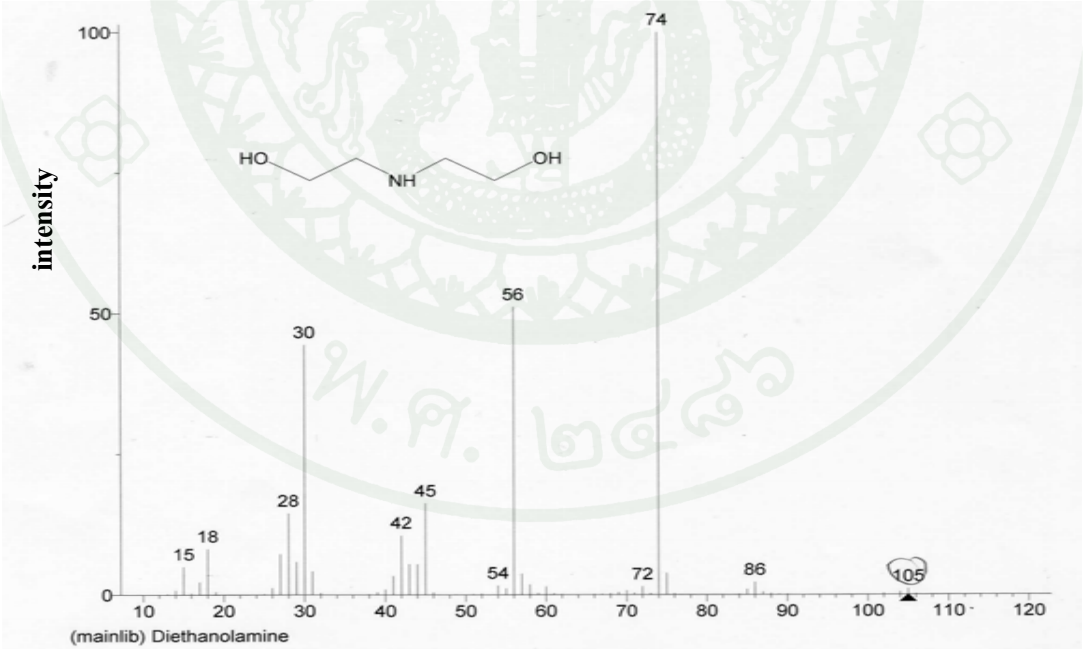
ตารางผนวกที่ ข3 Condition ของเครื่อง LC-MS/MS

ยี่ห้อ	Varian
Model	320 MS Quadrupole
Column	Pursuit XRs C18
Mobile phase	methanol : water = 80:20
Inject volume	5 μL
Ionization mode	ESI
Scan mass range	40 – 125 amu
Needle potential	5000 volts
Shield potential	500 volts
Housing temperature	50 ºC
Drying gas temperature	250 ºC
Drying gas pressure	20 psi
Nebulizing gas pressure	30 psi
Detector Voltage	1800 volts

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

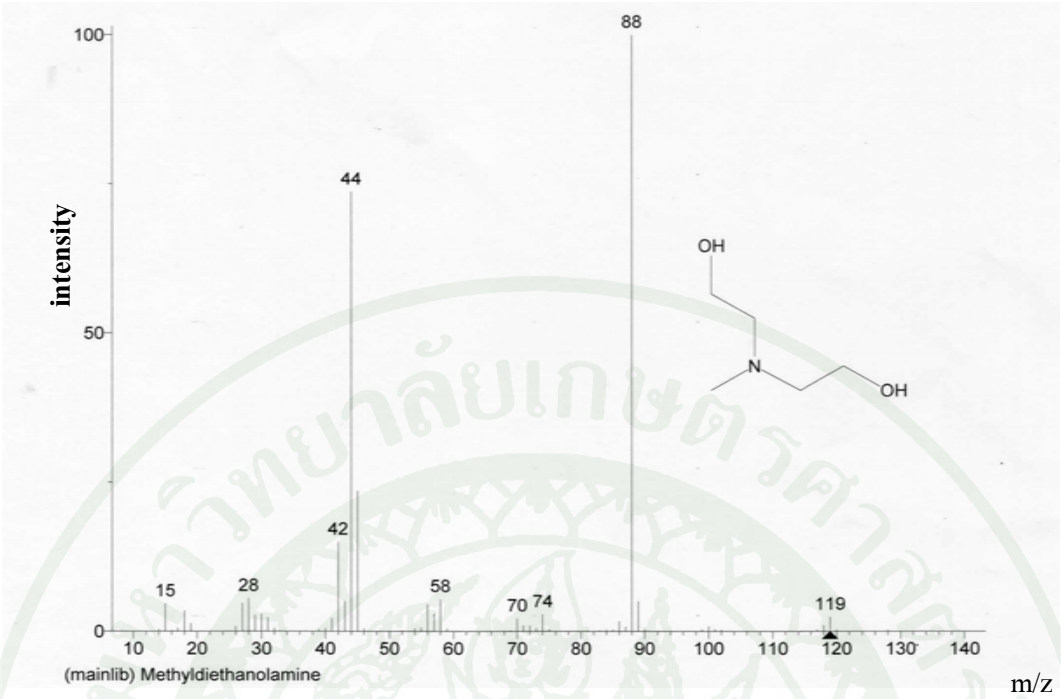


ภาพผนวกที่ ข1 Mass spectrum ของ Monoethanolamine

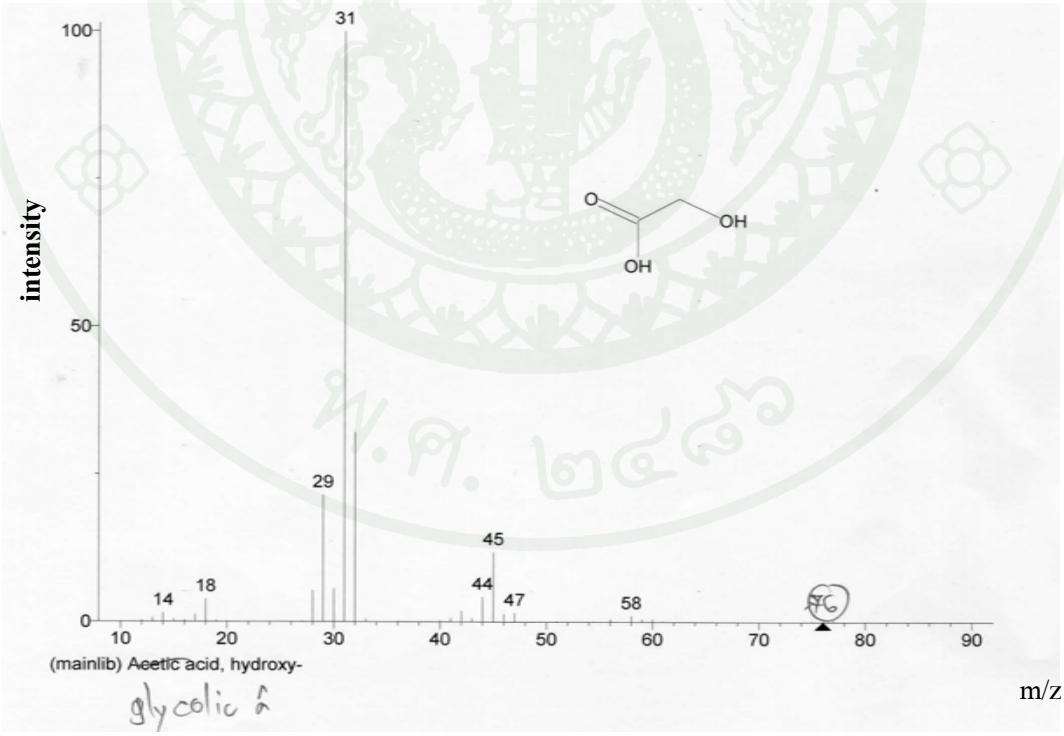


ภาพผนวกที่ ข2 Mass spectrum ของ Diethanolamine

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

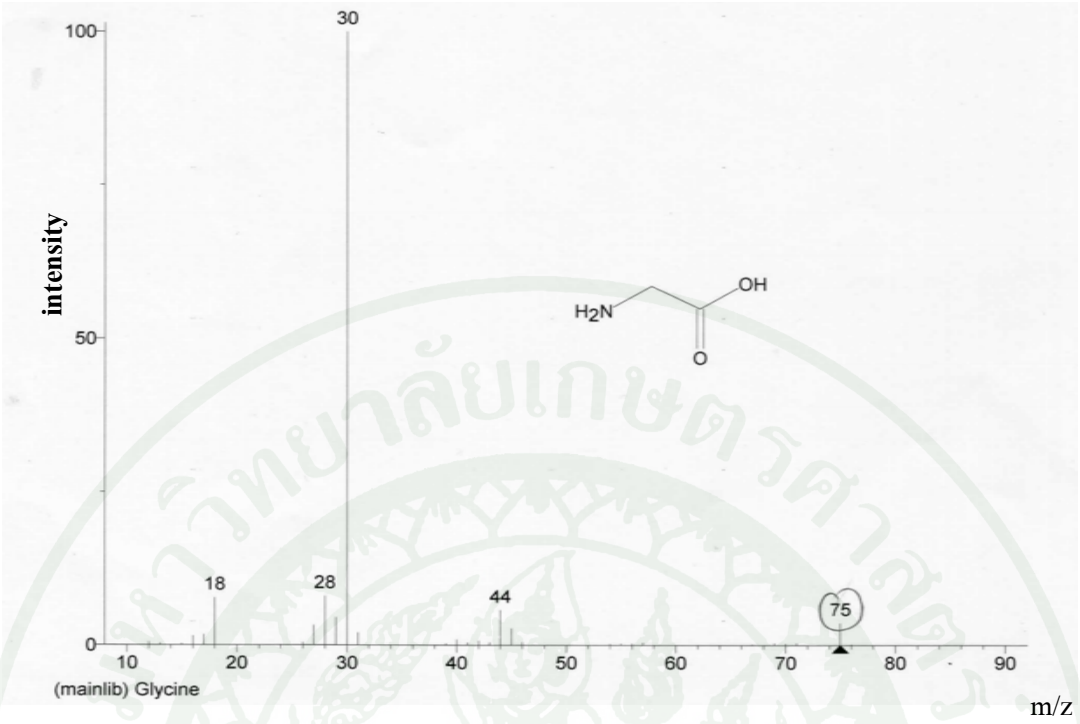


ภาพผนวกที่ ข3 Mass spectrum ของ Methyldiethanolamine

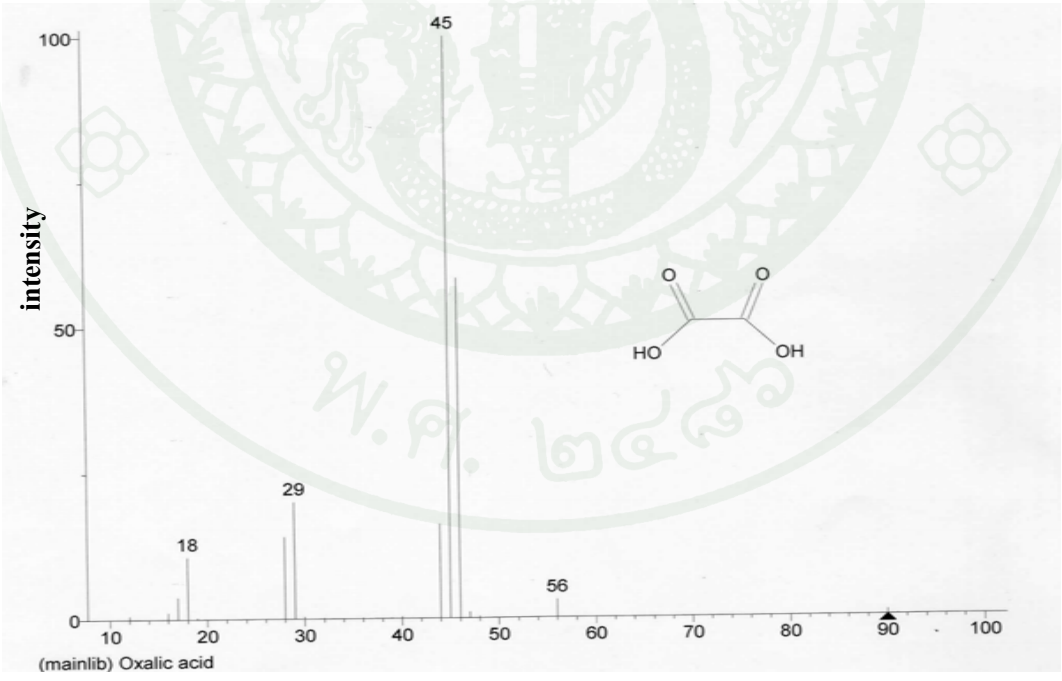


ภาพผนวกที่ ข4 Mass spectrum ของ Glycolic acid

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

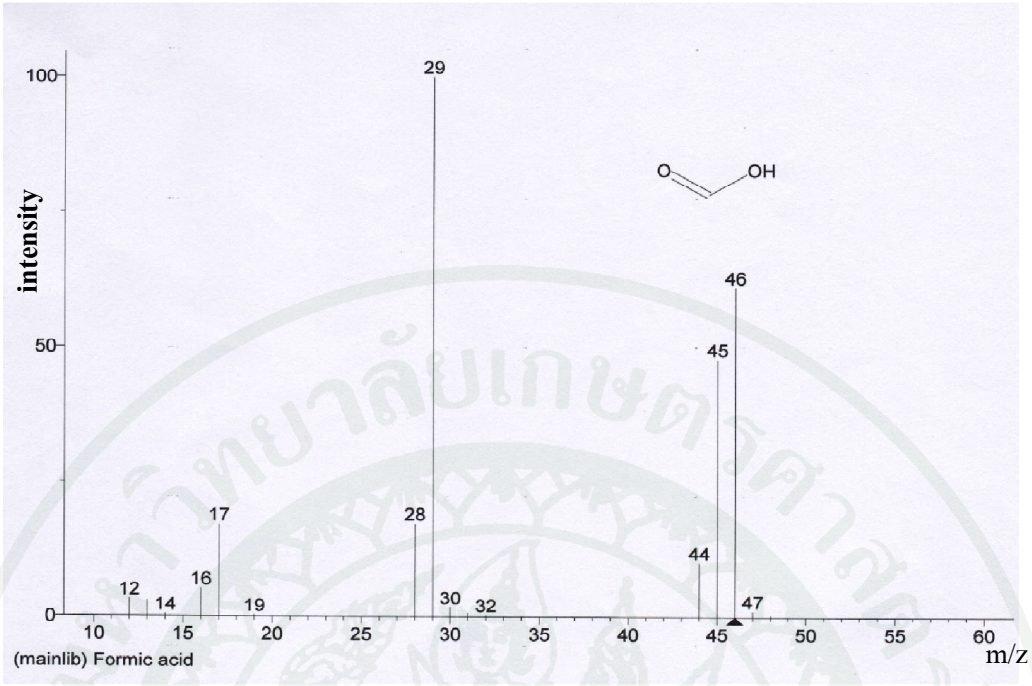


ภาพผนวกที่ ข5 Mass spectrum ของ Glycine

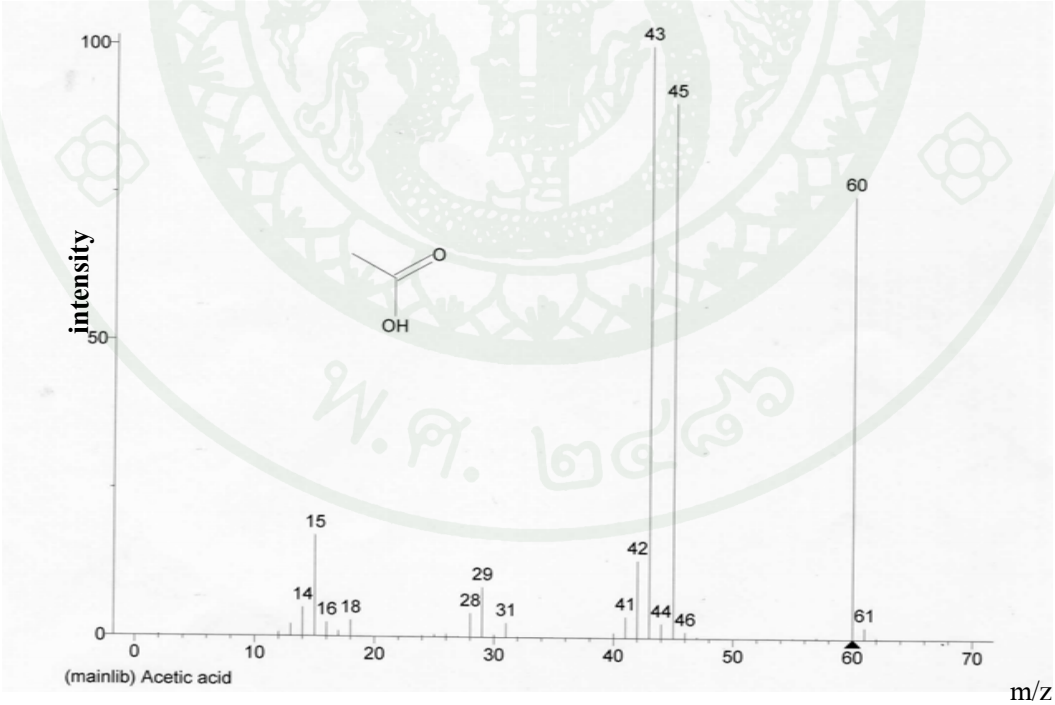


ภาพผนวกที่ ข6 Mass spectrum ของ Oxalic acid

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพผนวกที่ ข7 Mass spectrum ของ Formic acid



ภาพผนวกที่ ข8 Mass spectrum ของ Acetic acid

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	น.ส.พิมพ์ผกา สุวรรณมาลี
วัน เดือน ปี ที่เกิด	16 ตุลาคม 2531
สถานที่เกิด	สุราษฎร์ธานี
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (สาธารณสุขศาสตร์) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์