

อกิันนทนาการ



สำนักหอสมุด



การศึกษาประสิทธิภาพการเติมอากาศแบบฟองด้วยหัวทราย  
Study of aeration efficiency of stone bubble air diffuser

เขตติศักดิ์  
ภควัชร

อ๋อนปาน  
ส่งแสงธรรมชัย

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนเรศวร

วันลงทะเบียน... 5 มี.ค. 2560.....

เลขทะเบียน... 17192297.....

เลขเรียกหนังสือ... 915.....

2558

โครงการวิจัยเสนอเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม  
พฤษภาคม 2558  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

อาจารย์ที่ปรึกษาและหัวหน้าภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะ  
เกษตรศาสตร์ฯ ได้พิจารณาการศึกษาค้นคว้าด้วยตนเอง เรื่อง “การศึกษาประสิทธิภาพการเติม  
อากาศแบบฟองด้วยหัวทราย” เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ของมหาวิทยาลัยนเรศวร



(ดร. ชานยุทธ กฤตสุนันท์กุล)

อาจารย์ที่ปรึกษา



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปิรามัย อ่อนเสียง)

หัวหน้าภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

พฤษภาคม 2558



## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยฉบับนี้ สำเร็จลงได้ด้วยความสำเร็จอย่างยิ่งจาก ดร. ชาญยุทธ กฤตสุนันท์กุล อาจารย์ที่ปรึกษาและคณะกรรมการทุกท่าน ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำ ตลอดจนตรวจสอบแก้ไข ข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างยิ่ง จนการศึกษาค้นคว้าด้วยตนเองสำเร็จสมบูรณ์ได้ คณะผู้ศึกษาค้นคว้าขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภริมย์ อ่อนเส็ง หัวหน้าภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่กรุณาให้คำแนะนำ แก้ไข และตรวจสอบเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้า จนทำให้การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้สมบูรณ์ และมีคุณค่า

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่เป็นกำลังใจและสนับสนุน ด้านการศึกษามาโดยตลอด

ขอขอบคุณเป็นพิเศษต่อ คุณนฤมล สิงห์กวาง เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือแนะนำวิธีการวิเคราะห์ผลทางวิทยาศาสตร์ในห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยตลอดระยะเวลาการศึกษาค้นคว้า

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากการศึกษาค้นคว้าฉบับนี้ คณะผู้ศึกษาค้นคว้าขออุทิศแด่ผู้มีพระคุณทุกๆ ท่าน

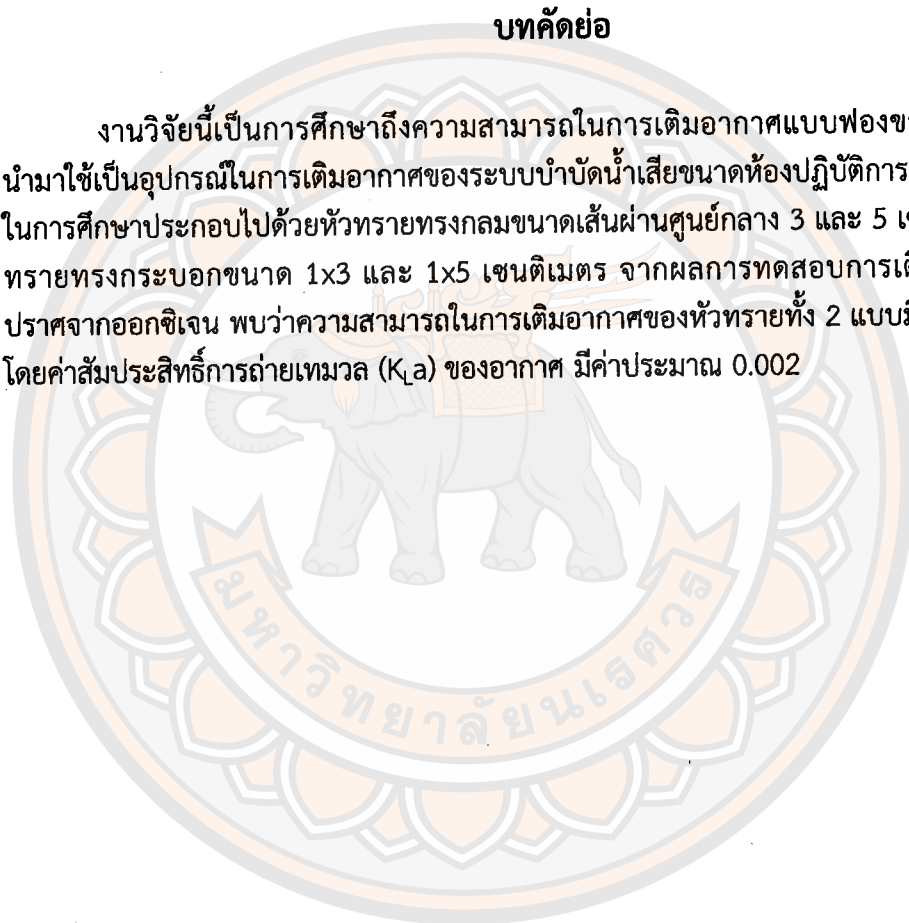
นายเขตติศักดิ์ อ่อนปาน

นายภควัชร ส่งแสงธรรมชัย

ชื่อเรื่อง	ประสิทธิภาพการเติมอากาศแบบฟองด้วยหัวทราย
ผู้ศึกษา	เขตติศักดิ์ อ่อนปาน และ ภควัชร ส่งแสงธรรมชัย
ที่ปรึกษา	ดร.ชาญยุทธ กฤตสุนันท์กุล
ประเภทสารนิพนธ์	โครงการวิจัย วท.บ. สาขาวิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร 2558
คำสำคัญ	การเติมอากาศ หัวทราย ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงความสามารถในการเติมอากาศแบบฟองของหัวทราย ที่ถูกนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ในการเติมอากาศของระบบบำบัดน้ำเสียขนาดห้องปฏิบัติการ โดยหัวทรายที่ใช้ในการศึกษาประกอบไปด้วยหัวทรายทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 และ 5 เซนติเมตร และหัวทรายทรงกระบอกขนาด 1x3 และ 1x5 เซนติเมตร จากผลการทดสอบการเติมอากาศในน้ำที่ปราศจากออกซิเจน พบว่าความสามารถในการเติมอากาศของหัวทรายทั้ง 2 แบบมีค่าไม่แตกต่างกัน โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ( $K_La$ ) ของอากาศ มีค่าประมาณ 0.002



## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	ง
สารบัญภาพ	จ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 จุดมุ่งหมายของการศึกษา	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 น้ำเสีย	2
2.2 การบำบัดน้ำเสีย	3
2.3 ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ	5
2.4 การเติมอากาศ	5
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ	9
3.2 วิธีการทดลอง	12
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและผลการทดลอง	15
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	32
5.2 อภิปรายผลการวิจัย	32
5.3 ข้อเสนอแนะ	33
บรรณานุกรม	34
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	37
ภาคผนวก ข	39
ภาคผนวก ค	49

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 แสดงอัตราการเกิดน้ำเสีย (ลิตร/คน/วัน)	3
2 ความสามารถของออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ณ สภาวะต่างๆ	5
3 แสดงประสิทธิภาพการเติมอากาศ	29
4 ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่า $K_La$ ของหัวทรายทรงกระบอกเล็กด้วยวิธี	30
5 ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่า $K_La$ ของหัวทรายทรงกระบอกใหญ่ด้วยวิธี	30
6 ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่า $K_La$ ของหัวทรายทรงกลมใหญ่ด้วยวิธี LSD	31
ก1 ข้อมูลจากการทดลองเพื่อหาค่า $K_La$	37
ข1 ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายในน้ำที่แปรผันต่ออุณหภูมิและความเค็ม	39
ข2 แสดงค่าออกซิเจนละลายในน้ำวินาทีที่ 0-400 ของหัวทรายทรงกระบอกเล็ก	40
ข3 แสดงค่าออกซิเจนละลายในน้ำวินาทีที่ 0-400 ของหัวทรายทรงกระบอกใหญ่	41
ข4 แสดงค่าออกซิเจนละลายในน้ำวินาทีที่ 0-400 ของหัวทรายทรงกลมเล็ก	42
ข5 แสดงค่าออกซิเจนละลายในน้ำวินาทีที่ 0-400 ของหัวทรายทรงกลมใหญ่	43
ข6 แสดงผลการเปรียบเทียบเชิงซ้อนค่า $K_La$ ของหัวทรายทรงกระบอกเล็กด้วยวิธี LSD	44
ข7 แสดงผลการเปรียบเทียบเชิงซ้อนค่า $K_La$ ของหัวทรายทรงกระบอกใหญ่ด้วยวิธี LSD	45
ข8 แสดงผลการเปรียบเทียบเชิงซ้อนค่า $K_La$ ของหัวทรายทรงกลมเล็กด้วยวิธี LSD	46
ข9 แสดงผลการเปรียบเทียบเชิงซ้อนค่า $K_La$ ของหัวทรายทรงกลมใหญ่ด้วยวิธี LSD	47
ข10 น้ำหนักของหัวทรายก่อนใช้งานและหลังใช้งาน	48

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 การเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นของก๊าซบริเวณชั้นผิวของเหลว	6
2 ประเภทของหัวทราย	9
3 เครื่องเติมอากาศ	10
4 สายยางเติมอากาศ	10
5 เครื่องวัดออกซิเจนในน้ำ	11
6 ถังพลาสติกขนาด 10 ลิตร และ 20 ลิตร	11
7 สารละลายโซเดียมซัลไฟด์	12
8 แบบจำลองการทดสอบประสิทธิภาพหัวทราย	13
9 แสดงการใช้งานของหัวทรายในน้ำเสีย	13
10 แสดงอัตราการเพิ่มขึ้นของออกซิเจนในน้ำจากหัวทรายทรงกระบอกเล็ก	15
11 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_La$ ) ก่อนการใช้งาน	16
12 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_La$ ) หลังการใช้งาน 1 สัปดาห์	16
13 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_La$ ) หลังการใช้งาน 3 สัปดาห์	17
14 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_La$ ) หลังการใช้งาน 5 สัปดาห์	17
15 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_La$ ) หลังการใช้งาน 6 สัปดาห์	18
16 แสดงอัตราการเพิ่มขึ้นของออกซิเจนในน้ำจากหัวทรายทรงกระบอกใหญ่	19
17 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_La$ ) ก่อนการใช้งาน	19
18 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_La$ ) หลังการใช้ 1 สัปดาห์	20
19 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_La$ ) หลังการใช้ 3 สัปดาห์	20
20 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_La$ ) หลังการใช้ 5 สัปดาห์	21
21 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_La$ ) หลังการใช้ 6 สัปดาห์	21
22 แสดงอัตราการเพิ่มขึ้นของออกซิเจนในน้ำจากหัวทรายทรงกลมเล็ก	22
23 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_La$ ) ก่อนการใช้งาน	22
24 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_La$ ) หลังการใช้งาน 1 สัปดาห์	23
25 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_La$ ) หลังการใช้งาน 3 สัปดาห์	23
26 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_La$ ) หลังการใช้งาน 5 สัปดาห์	24
27 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_La$ ) หลังการใช้งาน 6 สัปดาห์	24
28 แสดงอัตราการเพิ่มขึ้นของออกซิเจนในน้ำจากหัวทรายทรงกลมใหญ่	25
29 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_La$ ) ก่อนการใช้งาน	25
30 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_La$ ) หลังการใช้งาน 1 สัปดาห์	26
31 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_La$ ) หลังการใช้งาน 3 สัปดาห์	26
32 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_La$ ) หลังการใช้งาน 5 สัปดาห์	27

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
33 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_L a$ ) หลังการใช้งาน 6 สัปดาห์	27
ก1 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ	38
ค1 แสดงอากาศที่ออกจากหัวทราย (ก่อนการใช้งาน)	49
ค2 แสดงอากาศที่ออกจากหัวทรายก่อนใช้งานและหลังใช้งาน	50
ค3 แสดงสีของหัวทรายก่อนใช้งานและหลังใช้งาน	51



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาของปัญหา

น้ำเป็นทรัพยากรที่สำคัญต่อสิ่งมีชีวิต ไม่ว่าจะเป็นมนุษย์ สัตว์รวมถึงพืช มนุษย์ใช้น้ำในการทำกิจกรรมต่าง ๆ เช่น การทำการเกษตร การอุตสาหกรรม การอุปโภคบริโภคในครัวเรือน เป็นต้น น้ำเมื่อผ่านการใช้งานจากกิจกรรมต่าง ๆ เหล่านี้จะเกิดเป็นน้ำเสียขึ้น น้ำเสียเหล่านี้จำเป็นต้องผ่านกระบวนการบำบัดให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งก่อนที่จะปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม เพื่อป้องกันการเกิดปัญหาด้านมลพิษทางน้ำ ปัจจุบันระบบที่ใช้สำหรับทำการบำบัดน้ำเสียมีหลายรูปแบบ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบที่มีการเติมอากาศ (aerobic treatment) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่มีใช้งานกันเป็นจำนวนมาก การทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียดังกล่าว มีหลักการทำงานที่สำคัญคือ อาศัยการทำงานของของจุลินทรีย์ชนิดที่ต้องการออกซิเจนในการดำรงชีพ เป็นตัวช่วยในการย่อยสลายสารมลพิษในน้ำเสีย โดยในการทำงานจำเป็นต้องมีการเติมอากาศในปริมาณที่มากเพียงพอให้กับระบบบำบัด

สำหรับในการศึกษาถึงการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียแบบเติมอากาศ ภายในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นระบบบำบัดขนาดเล็ก ได้มีการประยุกต์นำหัวทรายมาเป็นอุปกรณ์สำหรับใช้ในการเติมอากาศให้กับระบบบำบัด ซึ่งข้อมูลเกี่ยวกับประสิทธิภาพหรือความสามารถในการเติมอากาศของหัวทรายถือเป็นข้อมูลสำคัญ

ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาประสิทธิภาพการเติมอากาศแบบฟองด้วยหัวทราย

#### 1.2 จุดมุ่งหมายของการศึกษา

เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการเติมอากาศแบบฟองด้วยหัวทราย

#### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 การศึกษาเป็นขนาดระดับห้องปฏิบัติการ (lab scale)

1.3.2 การใช้น้ำประปาในทดสอบประสิทธิภาพการเติมอากาศ

1.3.3 หัวทรายที่ใช้เป็นหัวทรายแบบเนื้อละเอียด

1.3.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการตรวจสอบประสิทธิภาพการเติมอากาศ ได้แก่

- ค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำ
- อุณหภูมิ

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาประสิทธิภาพการเติมอากาศแบบพองด้วยหัวทราย ผู้ศึกษาได้ดำเนินการศึกษาเอกสาร ตำราและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลในวิจัยดังหัวข้อต่อไปนี้

- 2.1 น้ำเสีย
- 2.2 การบำบัดน้ำเสีย
- 2.3 ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (Dissolved Oxygen; DO)
- 2.4 การเติมอากาศ
- 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 น้ำเสีย

##### 2.1.1 ความหมายของน้ำเสีย

น้ำเสีย หมายถึง น้ำที่ผ่านการใช้กิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ ซึ่งจะทำให้คุณลักษณะของน้ำเปลี่ยนไปจากเดิมเนื่องจากมีสิ่งสกปรกต่าง ๆ ทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ถ่ายเทเจือปนลงไปในน้ำนั้น ในปริมาณสูง จนกระทั่งกลายเป็นน้ำที่ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้อีก และมีลักษณะเป็นที่รังเกียจของคนทั่วไปหรือถ้าปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติก็จะทำให้เกิดการเน่าเสียของแหล่งน้ำได้

##### 2.1.2 แหล่งกำเนิดน้ำเสีย

โดยทั่วไปแล้วแหล่งกำเนิดของน้ำเสียสามารถแบ่งได้ 3 แหล่ง คือ น้ำเสียจากชุมชน น้ำเสียจากการเกษตร และ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

1) น้ำเสียจากชุมชน เป็นน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมต่าง ๆ ในชีวิตประจำวันของประชาชนในชุมชน โดยมีแหล่งกำเนิดมาจาก อาคารบ้านเรือน ร้านค้าพาณิชย์กรรม ตลาดสด ร้านอาหาร สถาบันการศึกษา สถานที่ราชการ โรงแรม โรงเรียน ห้างสรรพสินค้า เป็นต้น ความสกปรกในชุมชน ส่วนใหญ่เป็นอินทรีย์สารที่ย่อยสลายได้โดยกระบวนการธรรมชาติ

2) น้ำเสียจากการเกษตร เป็นน้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมทางการเกษตร เช่น น้ำเสียจากการล้างคอกสัตว์เลี้ยง เช่น คอกหมู คอกวัว เล้าไก่ น้ำเสียจากนาข้าว จากฟาร์มเลี้ยงกุ้ง เป็นต้น โดยน้ำเสียจากเกษตรกรรมส่วนใหญ่จะปนเปื้อนสารเคมี ยาฆ่าแมลง หรือปุ๋ย

3) น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นน้ำล้างในกระบวนการผลิตต่าง ๆ ซึ่งมีสมบัติแตกต่างกันตามประเภทของอุตสาหกรรม น้ำเสียอุตสาหกรรมบางแห่งอาจปนเปื้อนโลหะหนัก หรือสารประกอบที่ต้องอาศัยกระบวนการบำบัดที่ซับซ้อนกว่า น้ำเสียชุมชน

ตารางที่ 1 แสดงอัตราการเกิดน้ำเสีย (ลิตร/คน/วัน)

ภาค	อัตราการเกิดน้ำเสีย(ลิตร/คน/วัน)					
	2536	2540	2545	2550	2555	2560
กลาง	160-214	165-242	170-288	176-342	183-406	189-482
เหนือ	183	200	225	252	282	316
ตะวันออกเฉียงเหนือ	200-253	216-263	239-277	264-291	291-306	318-322
ใต้	171	195	204	226	249	275

ที่มา: โครงการศึกษาเพื่อจัดลำดับความสำคัญการจัดการน้ำเสียชุมชน, สำนักงานนโยบาย และแผนสิ่งแวดล้อม 2538

## 2.2 การบำบัดน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสีย หมายถึง การกำจัดหรือทำลายสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียให้หมดไป หรือเหลือน้อยที่สุดให้ได้มาตรฐานที่กำหนดและไม่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม น้ำเสียจากแหล่งต่างกันจะมีคุณสมบัติ ไม่เหมือนกันดังนั้นกระบวนการบำบัดน้ำจึงมีหลายวิธี โดยระบบบำบัดน้ำเสียทั่วไปมี 3 วิธีคือ

### 2.2.1 กระบวนการทางกายภาพ (physical process)

กระบวนการทางกายภาพ (physical process) เป็นการบำบัดน้ำเสียอย่างง่ายซึ่งจะแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออก วิธีนี้จะแยกตะกอนได้ประมาณ 50-65% ส่วนเรื่องการแยกความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ (BOD5) ประมาณ 20-30% เท่านั้น วิธีการต่าง ๆ ในกระบวนการนี้มีหลายวิธี เช่น การดักด้วยตะแกรง (screening) เป็นการแยกเศษขยะต่าง ๆ ที่มากับน้ำเสีย เช่น เศษไม้ ถูพลาสติก กระดาษ ตะแกรงมีหลายขนาด การดักด้วยตะแกรงจึงเป็นการแยกขั้นต้นแรกในการบำบัดน้ำเสีย การตัดย่อย (combination) คือ การใช้เครื่องตัดทำลายเศษขยะขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง การกวาด (skimming) เป็นการกำจัดน้ำมันและไขมันโดยทำการดักหรือกวาดออกจากน้ำเสีย การทำให้ลอย (floating) จะใช้กับตะกอนที่มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าน้ำ การตกตะกอน (sedimentation) เป็นการแยกตะกอนออกจากน้ำเสียโดยอาศัยหลักการเรื่องแรงโน้มถ่วง ซึ่งจะใช้กับตะกอนที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำ

### 2.2.2 กระบวนการทางเคมี (chemical process)

เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยการแยกสารต่างๆ หรือสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียที่บำบัด เช่น โลหะหนัก สารพิษ สภาพความเป็นกรด ต่างสูงๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ด้วยการเติมสารเคมีต่าง ๆ ลงไปเพื่อให้เข้าไปทำปฏิกิริยาซึ่งจะมีประโยชน์ในการแยกสาร แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ เมื่อเติมสารเคมีลงในน้ำเสียแล้ว ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและวิธีนี้จะมีค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีค่อนข้างสูง ดังนั้นกระบวนการทางเคมีจะเลือกใช้ก็ต่อเมื่อน้ำเสียไม่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการทางกายภาพหรือชีวภาพ

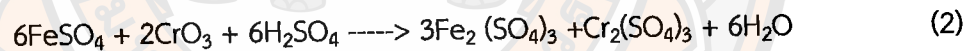
การทำให้เกิดตะกอน (precipitation) อาศัยหลักการเติมสารเคมีลงไปทำปฏิกิริยาทำให้เกิดกลุ่มตะกอนตกลงมา โดยทั่วไปสารแขวนลอยจะมีประจุลบ ดังนั้นสารเคมีที่เติมลงไปจึงเป็นประจุ

บวกเพื่อให้เป็นกลาง การแยกด้วยวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายสูงแต่ก็มีประสิทธิภาพสูงเช่นกัน ดังนั้นวิธีนี้จะเลือกใช้ต่อเมื่อไม่สามารถ แยกได้โดยกระบวนการทางชีวภาพหรือกายภาพโดยส่วนมากสารเคมีที่ทำให้เกิดตะกอนจะละลายน้ำ เช่น เกลือของสารประกอบต่างๆ เช่น เกลืออะลูมิเนียมซัลเฟต หรือ สารส้ม ( $Al_2(SO_4)_3$ ) เกลือเหล็ก ( $FeCl_3$ ,  $FeSO_4$ ) และเกลือของแคลเซียม ( $Ca(OH)_2$ ) ส่วนเกลือที่นำมาช่วยในการเกิดตะกอนได้ดียิ่งขึ้นนี้เป็นสารประกอบของ กลุ่ม Activated ของ Silica และ Polyelectrolytes โดยกระบวนการทางเคมีมีหลายวิธี

การเกิดออกซิเดชันทางเคมี (chemical oxidation) อาศัยหลักการเสียอิเล็กตรอนของอะตอม ให้แก่สารเคมีที่เติมลงไป ในน้ำเสียโดยสารเคมีนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ (oxidizing agent) ส่วนมากวิธีนี้จะนิยมใช้เปลี่ยนโมเลกุลของโลหะที่เป็นพิษ เช่น การเปลี่ยน  $Fe^{2+}$  ซึ่งมีพิษมากไปเป็นสาร  $Fe^{3+}$  ซึ่งมีพิษน้อย ด้วยคลอรีน ดังแสดงในสมการต่อไปนี้



การเกิดรีดักชันทางเคมี (chemical reduction) เป็นปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอน วิธีนี้เป็นการเปลี่ยนสภาพของสารพิษไปเป็นสารที่มีอันตรายน้อยลง อะตอมหรือไอออน ของสารพิษจะรับอิเล็กตรอนจากสารเคมีที่เติมลงไปซึ่งมีสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์ (reducing agent) เช่น การเปลี่ยน  $Cr^{6+}$  ซึ่งมีพิษมากไปเป็น  $Cr^{3+}$  ด้วยเฟอร์รัสซัลเฟต ( $FeSO_4$ ) ในสภาพที่เป็นกรด ดังแสดงในสมการต่อไปนี้



การสะเทิน (neutralization) เป็นการเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำเสียให้มีฤทธิ์เป็นกลาง (pH = 7) ถ้าต้องการปรับค่าน้ำเสียที่มีฤทธิ์เป็นกรด (pH < 7) ในน้ำเสียให้สูงขึ้นต้องเติมสารที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เช่น แคลเซียมคาร์บอเนตหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่วนกรณีถ้าต้องการปรับน้ำเสียที่มีฤทธิ์เป็นด่าง (pH > 7) ให้มีค่า pH ต่ำลงจะต้องเติมกรด เช่น กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก กรดเกลือและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น

### 2.2.3 กระบวนการทางชีววิทยา (Biological Process)

กระบวนการทางชีววิทยา (biological process) เป็นการอาศัยหลักการใช้จุลินทรีย์ต่างๆ มาทำการย่อยสลายเปลี่ยนอินทรีย์สารไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนีย เป็นการบำบัดน้ำเสียที่ดีที่สุดในแง่ของการลดปริมาณสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ แต่หลักการนี้จะต้องเลือกสภาวะแวดล้อมให้เหมาะกับการทำงานของจุลินทรีย์โดยสัมพันธ์กับปริมาณของจุลินทรีย์ และเวลาที่ใช้ในการย่อยสลาย แบคทีเรียที่เลือกใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์แยกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ แบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจนในการย่อยสลาย (aerobic bacteria) และแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนในการย่อยสลาย (anaerobic bacteria) (นิเวศวิทยาสิ่งแวดล้อม.การบำบัดน้ำเสีย)

ซึ่งในงานวิจัยนี้ศึกษา “การบำบัดน้ำเสียแบบเติมอากาศ” เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยการเติมออกซิเจนจากเครื่องเติมอากาศ (Aerator) เพื่อเพิ่มออกซิเจนในน้ำให้มีปริมาณมากเพียงพอ

สำหรับจุลินทรีย์ที่จะสามารถนำไปใช้ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้เร็วขึ้นกว่าการปล่อยให้ย่อยสลายตามธรรมชาติ ทำให้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเติมอากาศสามารถบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถลดปริมาณความสกปรกของน้ำเสียในรูปของค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand; BOD) ได้ร้อยละ 80-95 โดยอาศัยหลักการทำงานของจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน (Aerobic) โดยมีเครื่องเติมอากาศซึ่งนอกจากจะทำหน้าที่เพิ่มออกซิเจนในน้ำแล้วยังทำให้เกิดการกวนผสมของน้ำในบ่อด้วย ทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างทั่วถึงภายในบ่อ (สุรีย บัญญาอนุพงศ์ และณัฐพงศ์ วรณวิจิตร, 2551)

### 2.3 ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (Dissolved Oxygen; DO)

ออกซิเจนจัดเป็นก๊าซที่ละลายน้ำได้น้อยมากและไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับน้ำ ดังนั้นการละลายขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนในอากาศ (Partial Pressure) และอุณหภูมิ (กรรณิการ์, 2554; มั่นสินและไพพรรณ, 2526) การเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนในอากาศทำให้ออกซิเจนละลายน้ำได้มากขึ้น (ตามกฎของเฮนรี) เป็นผลทำให้มีการถ่ายเทออกซิเจนเพิ่มขึ้น (มั่นสินและไพพรรณ, 2526)

ปัจจัยที่มีผลต่อการละลายของออกซิเจนในน้ำ

ตารางที่ 2 ความสามารถของออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ณ สภาวะต่างๆ

สภาวะ	ความสามารถของออกซิเจนที่ละลายน้ำ (Solubility of Oxygen)
อุณหภูมิสูง	ลดน้อยลง
ความดันสูง (หรือที่ระดับต่ำ)	เพิ่มขึ้น
ความเข้มข้นของเกลือแร่สูง	ลดน้อยลง

ที่มา: เกรียงศักดิ์ (2539)

### 2.4 การเติมอากาศ

การเติมอากาศ (Aeration) เป็นหัวใจของการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจนจากอากาศ เพราะหากระบบบำบัดน้ำเสียขาดออกซิเจน จุลินทรีย์ทั้งหลายก็ไม่สามารถทำงานได้ ถ้ามีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำอยู่สูง ระบบก็สามารถบำบัดน้ำได้ดีหรือสามารถรับน้ำเสียได้มากขึ้น แต่เนื่องจากค่าการละลายน้ำของออกซิเจนที่ความดันบรรยากาศมีค่าต่ำย่อมจะทำให้มีแรงขับ (Driving Force) ต่ำตามไปด้วย (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2552)

#### ทฤษฎีการเติมอากาศ

ในปี คศ. 1924 ทฤษฎีของการเติมอากาศได้ถูกศึกษาวิจัยมาหลายลักษณะโดย Lewis และ Whitman จากเอกสารทางวิชาการ Ind. Eng. Chem. Principles of Gas Adsorption. ได้อธิบายทฤษฎีการถ่ายเทของก๊าซ โดยพิจารณาเป็น 2 ชั้นคือชั้นของเหลว และชั้นก๊าซ โดยก๊าซ (เช่น ออกซิเจน) จะซึมผ่านชั้นก๊าซและชั้นของเหลว จนกระทั่งเข้าถึงระดับลึกของของเหลว ซึ่งความเข้มข้นของก๊าซจะค่อย ๆ ลดลง ขณะที่ก๊าซได้ซึมผ่านชั้นก๊าซและชั้นของเหลว ภาพที่ 2.1 ได้แสดง

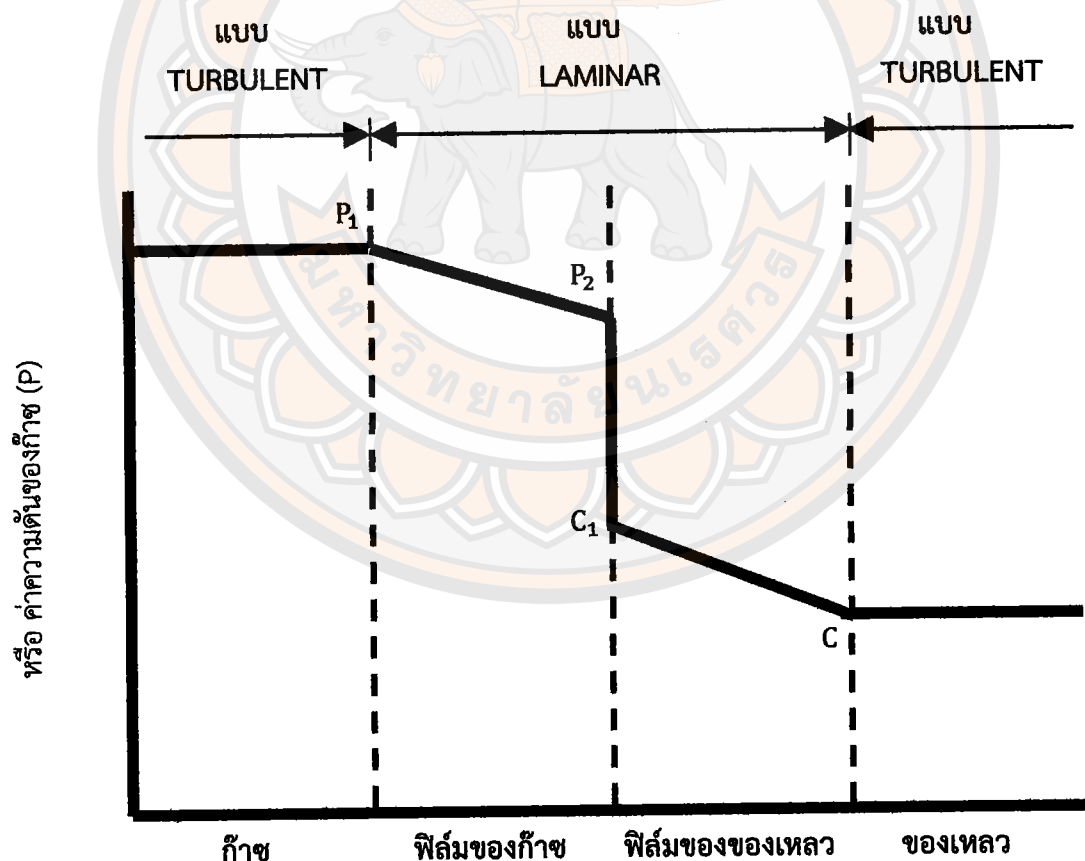
ภาพการถ่ายเทของก๊าซ (ออกซิเจน) ซึมผ่านชั้นของเหลว โดยแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นของก๊าซ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ

ขั้นตอนการถ่ายเทออกซิเจนจากบรรยากาศสู่ชั้นของเหลวมีอยู่ด้วยกัน 3 ขั้นตอน

**ขั้นที่หนึ่ง** การถ่ายเทของออกซิเจนจากบริเวณบรรยากาศเข้าสู่ฟิล์มของก๊าซ ซึ่งอัตราการถ่ายเทของออกซิเจนในบริเวณนี้มีอัตราเร็วมาก เนื่องจากความต้านทานในชั้นฟิล์มของก๊าซมีน้อยมาก ค่าความดันของก๊าซจะค่อย ๆ ลดลงแต่ในปริมาณที่น้อย ดังแสดงไว้ในภาพที่ 1

**ขั้นที่สอง** การถ่ายเทของออกซิเจนจากบริเวณฟิล์มของก๊าซเข้าสู่บริเวณฟิล์มของของเหลวโดยจะมีมากน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนของบริเวณผิวของของเหลว (ผิวน้ำ) ถ้ามีความปั่นป่วนบริเวณผิวน้ำมาก ชั้นฟิล์มของน้ำอาจแตกออก ทำให้อัตราการถ่ายเทของออกซิเจนเข้าสู่ผิวน้ำมีมากขึ้น บริเวณชั้นฟิล์มของน้ำค่าความเข้มข้นของออกซิเจนจะค่อย ๆ ลดลงจาก  $C_1$  ไปเป็น  $C$

**ขั้นที่สาม** การถ่ายเทออกซิเจนจากชั้นฟิล์มของของเหลวเข้าสู่ชั้นของเหลว ในขั้นนี้จะมีค่าความเข้มข้นของก๊าซ (ออกซิเจน) เท่ากับ  $C$  ถ้าน้ำมีการกวนผสมบูรณ์ ค่า  $C$  จะมีเท่า ๆ กันในทุกส่วนของน้ำ



ภาพที่ 1 การเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นของก๊าซบริเวณชั้นผิวของเหลว (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2537)

แต่ถ้าไม่มีค่า  $C$  อาจมีค่าแตกต่างกันตามระดับความลึกของน้ำ โดยทั่วไปยิ่งลึกลงไปเท่าใดค่า  $C$  จะมีค่าลดลงไปเรื่อย ๆ

จากการถ่ายเทของออกซิเจนลงในน้ำสามารถเขียนได้ในรูปแบบของสมการข้างล่าง

$$\text{เมื่อ : } r_m = K_g A (C_s - C) \quad (3)$$

$r_m$  = อัตราของการถ่ายเทมวลสาร , กก./วัน

$K_g$  = ค่าสัมประสิทธิ์ในการกระจายของก๊าซ , กก./(วัน.ม<sup>2</sup>.(มก/ลิตร))

$A$  = พื้นที่ผิวที่ก๊าซได้กระจาย , ตร.ม.

$C_s$  = ความเข้มข้นอิ่มตัวของก๊าซในสารละลาย , มก/ลิตร

$C$  = ความเข้มข้นของก๊าซในสารละลาย , มก/ลิตร

จากสมการ (3) สามารถเขียนใหม่ได้เป็นสมการ (4) และ (5)

$$r_m = V(dC/dt) = K_g A (C_s - C) \quad (4)$$

เมื่อ :  $V$  = ปริมาตรของสารละลาย , ลิตร

$$dC/dt = K_g (A/V) [(C_s - C)] \quad (5)$$

สำหรับในทางปฏิบัติค่า  $A$  เป็นค่าที่หาได้ยาก ดังนั้นจึงรวมตัวแปร  $A$  และ  $V$  มาเป็น  $a$  ซึ่ง  $a$  เท่ากับ  $A/V$  และพิจารณา  $K_g$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทก๊าซผ่านชั้นฟิล์มของของเหลว ซึ่งกำหนดให้เป็น  $K_L$  ดังนั้น ค่า  $K_g A V$  จึงสามารถเขียนใหม่เป็น  $K_L a$  ซึ่งคือค่าสัมประสิทธิ์ทั้งหมดในการถ่ายเทก๊าซ (ออกซิเจน) ค่า  $K_L a$  นี้จะขึ้นอยู่กับระบบเติมอากาศ รูปร่างของถังเติมอากาศลักษณะของน้ำ และอุณหภูมิ โดยทั่วไปค่า  $K_L a$  จะหาได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการหรือในสนามจริง และจะไม่นิยมคำนวณหาค่า  $K_L a$  โดยแยกออกเป็น  $K_L$  และ  $a$  เพราะค่า  $a$  เป็นค่าที่คำนวณหาได้ยากในทางปฏิบัติจากสมการ (5) สามารถเขียนใหม่เป็นสมการข้างล่าง(เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2537)

$$dC/dt = K_L a (C_s - C) \quad (6)$$

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นันทนกร จรรย์านุกูล. (2551) ทำการศึกษาการหาประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศแบบ หัวฟูที่ประดิษฐ์มาจากเซรามิก (Ceramic) เพราะหัวฟูเซรามิกมีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูง เนื่องจากมีฟองอากาศขนาดเล็ก และเกิดแรงดันสูญเสียน้อยในระบบต่ำเมื่อเทียบกับวัสดุอื่น ๆ รวมทั้ง เป็นวัสดุที่ทนต่อสารเคมีได้สูง เมื่อใช้เป็นเวลานานขนาดรูพรุนไม่เปลี่ยน และมีอายุการใช้งานนาน (Boyle et. al., 1990; Sanitaire, 2004; Tideflex Technologies, 2006; Water Engineering Ltd., 2004) โดยการศึกษาวิจัยนี้จะเปรียบเทียบตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเติมอากาศ คือ ขนาดรูพรุน, ระดับความลึกน้ำ และจำนวนหัวฟู ซึ่งจะแสดงในรูปของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน ( $K_L a_{20}$ ), อัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (SOTR) และประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (SOTE) ซึ่งการเติมอากาศที่มีประสิทธิภาพ

จะต้องมีอัตราการ ถ่ายเทออกซิเจนสูง ทำให้มีการเติมอากาศเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอในบ่อเติมอากาศ ส่งผลให้เกิดการประหยัดพลังงานของเครื่องเติมอากาศ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการศึกษาจะสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูล เบื้องต้นในการประยุกต์ใช้ เพื่อพัฒนาอุปกรณ์เติมอากาศแบบหัวฟู่ที่ประดิษฐ์มาจากเซรามิกไปใช้งานจริง



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

โครงการวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการเติมอากาศแบบพองด้วยหัวทราย โดยมีวิธีดำเนินการวิจัยดังนี้

#### 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

ทำการศึกษาประสิทธิภาพการเติมอากาศแบบพองด้วยหัวทรายโดยทำการศึกษาในห้องปฏิบัติการอาคารปฏิบัติการคณะเกษตรศาสตร์ฯ โดยมีวัสดุอุปกรณ์ดังนี้

##### 3.1.1 หัวทราย

หัวทรายที่นำมาใช้ในการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 รูปทรง ดังแสดงไว้ในภาพที่ 21

##### 1) ทรงกระบอก

ทรงกระบอกเล็กขนาด 1x3 เซนติเมตร 3 หัว

ทรงกระบอกใหญ่ขนาด 3x7 เซนติเมตร 3 หัว

##### 2) ทรงกลม

ทรงกลมเล็กขนาด 3 เซนติเมตร 3 หัว

ทรงกลมใหญ่ขนาด 5 เซนติเมตร 3 หัว



ภาพที่ 2 ประเภทของหัวทราย

### 3.1.2 เครื่องเติมอากาศ

เครื่องเติมอากาศยี่ห้อ BigBoy 8000 Aquarium Airpump Double outlet 3 speed control 220~240V/50HZ 4.5W ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 เครื่องเติมอากาศ

### 3.1.3 สายยางเติมอากาศ

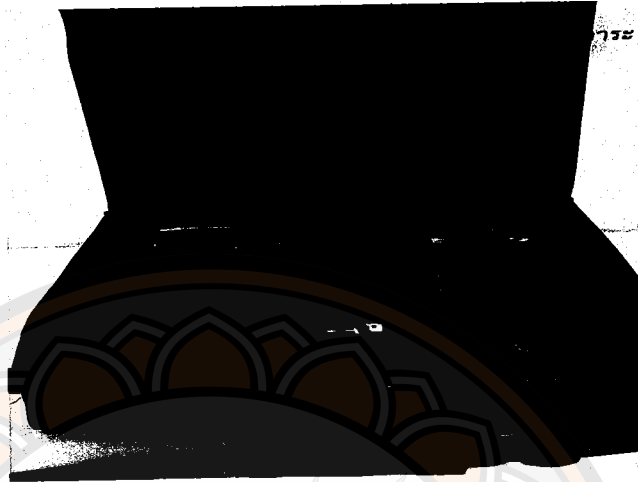
สายยางสูบน้ำทำจากซิลิโคนยาว 1 เมตร จำนวน 2 เส้น ยาว 5 เซนติเมตร จำนวน 16 เส้น ยี่ห้อ DURA ขนาด 4 มิลลิเมตร ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 สายยางเติมอากาศ

### 3.1.4 เครื่องวัดออกซิเจนในน้ำ

เครื่องวัดออกซิเจนในน้ำ ยี่ห้อ YSI รุ่น Model 556 ดังแสดงไว้ในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 เครื่องวัดออกซิเจนในน้ำ

### 3.1.5 ถังพลาสติก

ถังพลาสติกที่ขนาด 10 ลิตร 1 ถัง และถังพลาสติกขนาด 20 ลิตร 1 ถัง ดังแสดงไว้ในภาพ

ที่ 6



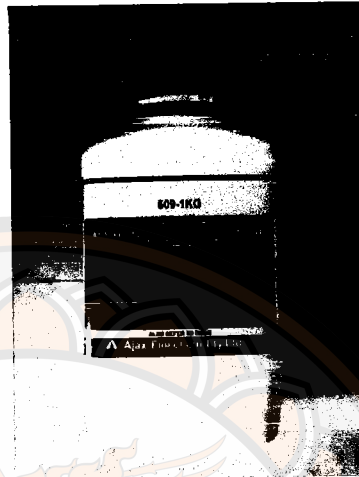
(ก) ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพหัวทราย

(ข) ใช้ในการแช่หัวทราย

ภาพที่ 6 ถังพลาสติกขนาด 10 ลิตร และ 20 ลิตร

### 3.1.6 สารเคมี

โซเดียมซัลไฟต์ (SODIUM SULPHITE) ผลิตโดย Ajax finechem Pty Ltd. ดังแสดงไว้ใน  
ภาพที่ 7



ภาพที่ 7 สารละลายโซเดียมซัลไฟต์

### 3.2 วิธีการทดลอง

ขั้นตอนที่ 1 นำหัวทรายทั้งหมดที่เตรียมไว้ คือ หัวทรายทรงกระบอกเล็ก 3 หัว หัวทรายทรงกระบอกใหญ่ 3 หัว หัวทรายทรงกลมเล็ก 3 หัว และหัวทรายทรงกลมใหญ่ 3 หัว มาชั่งน้ำหนักก่อนการใช้งาน

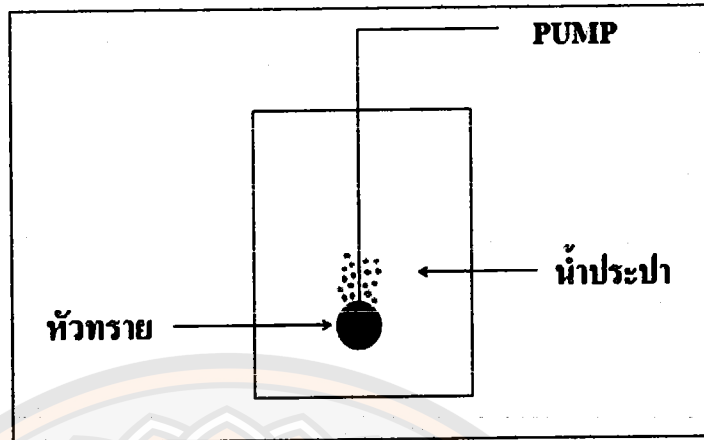
ขั้นตอนที่ 2 เตรียมน้ำประปา 5 ลิตรลงในถังพลาสติกดังแสดงในภาพที่ 6 (ก) เพื่อนำหัวทรายที่เตรียมไว้มาทดสอบประสิทธิภาพก่อนการใช้งาน

ขั้นตอนที่ 3 ทำการดึงออกซิเจนออกจากน้ำให้หมด โดยการเติมสารโซเดียมซัลไฟต์ (SODIUM SULPHITE) ประมาณ 0.3 มิลลิกรัม ลงไปในน้ำ โซเดียมซัลไฟต์จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในน้ำตามสมการ (7) หลังจากนั้นทำการกวนน้ำเพื่อให้สารละลายทำปฏิกิริยาได้ดียิ่งขึ้น จากนั้นทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2537)



ขั้นตอนที่ 4 หลังจากออกซิเจนในน้ำเข้าใกล้ 0 จึงเริ่มทำการทดสอบ

ขั้นตอนที่ 5 เริ่มเปิดเครื่องเติมอากาศ และทำการวัดปริมาณออกซิเจนทุก ๆ 20 วินาที เป็นเวลา 14 นาที แล้วบันทึกผล ดังแสดงไว้ในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 แบบจำลองการทดสอบประสิทธิภาพหัวทราย

ขั้นตอนที่ 6 นำข้อมูลที่ได้มาทำการคำนวณตามสมการ

$$K_L a = \ln[(C_s - C_0)/(C_s - C_t)]$$

เมื่อ :

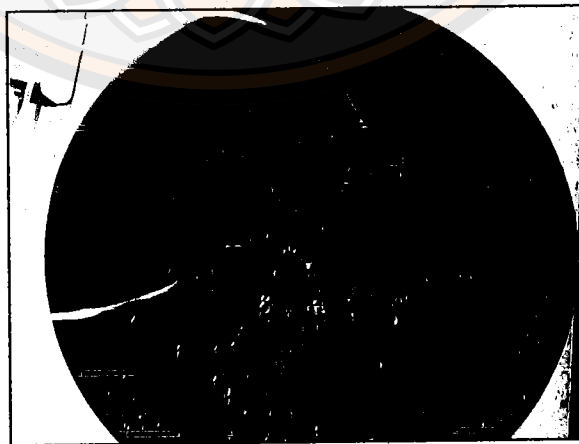
$K_L a$  = ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ

$C_s$  = ความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจน (ดังตารางที่ 1 ภาคผนวก ก)

$C_0$  = ความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำที่เวลา 0 (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$C_t$  = ความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ขั้นตอนที่ 7 หลังจากทดสอบประสิทธิภาพหัวทรายเสร็จแล้ว จะทำการนำเอาหัวทรายที่ผ่านการทดสอบประสิทธิภาพไปใช้งาน โดยใช้เป็นตัวเติมอากาศให้กับน้ำเสียที่เป็นน้ำทิ้งจากอาคารเรียนรวม คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมโดยจะทำการเติมอากาศตลอดเวลาและจะมีการเปลี่ยนน้ำเสียทุกสัปดาห์ เพื่อที่จะทำให้เสมือนว่าหัวทรายได้มีการใช้งานอยู่จริง ดังแสดงไว้ในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 แสดงการใช้งานของหัวทรายในน้ำเสีย

ขั้นตอนที่ 8 นำหัวทรายที่ผ่านการใช้งานจากขั้นตอนที่ 7 มาทดสอบประสิทธิภาพการเติมอากาศตามระยะเวลาที่กำหนด หลังจากทดสอบประสิทธิภาพเสร็จสิ้นลงตามขั้นตอนข้างต้นที่กล่าวไว้แล้วจะนำหัวทรายไปแช่ไว้ในน้ำเสียเหมือนเดิมเพื่อที่จะนำมาทดสอบในครั้งต่อไป



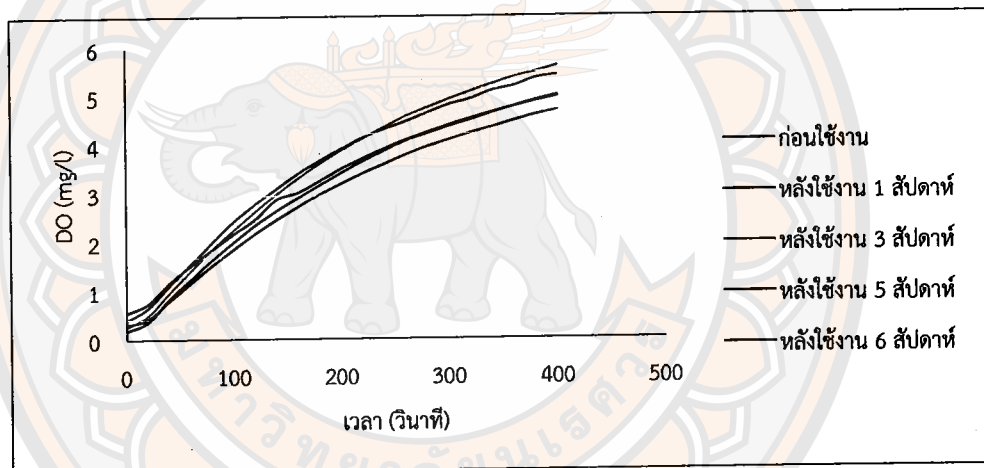
## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและผลการทดลอง

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการเติมอากาศโดยนำหัวทรายทรงกระบอกเล็ก ทรงกระบอกใหญ่ ทรงกลมเล็ก ทรงกลมใหญ่ มาทำการทดลองต่อเข้ากับเครื่องเติมอากาศแล้วทำการวัดค่าออกซิเจนละลายในน้ำและอุณหภูมิด้วยเครื่อง DO meter พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัดคือ DO (ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ) อุณหภูมิ (อุณหภูมิของน้ำมีผลในด้านการเร่งปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งจะส่งผลต่อ การลดปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ)

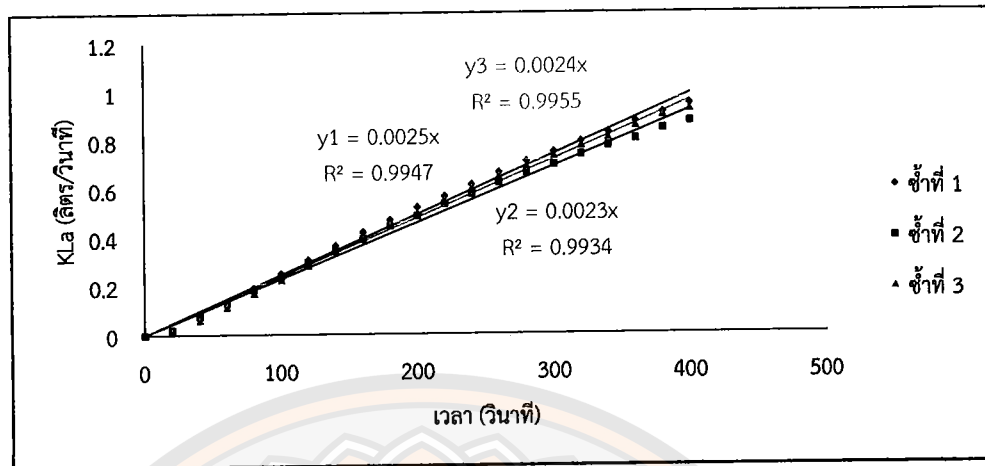
ผลการทดลองมีดังนี้

ในงานวิจัยนี้จะใช้ Airpump แบบ high ที่มีอัตราการเติมอากาศ 29 วินาทีต่อน้ำ 1 ลิตร หัวทรายทรงกระบอกเล็ก



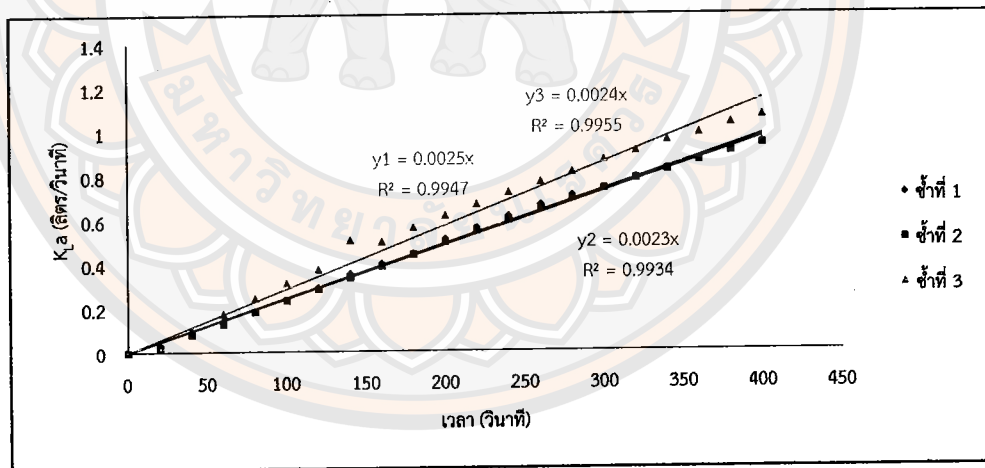
ภาพที่ 10 แสดงอัตราการเพิ่มขึ้นของออกซิเจนในน้ำจากหัวทรายทรงกระบอกเล็ก

จากภาพที่ 10 เป็นการแสดงอัตราการเพิ่มขึ้นของออกซิเจนในน้ำวินาทีที่ 0-400 โดยมีการจดบันทึกข้อมูลทุก ๆ 20 วินาที ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ข ตารางที่ 2 พบว่าหลังจากใช้งานหัวทราย 6 สัปดาห์ มีอัตราการเพิ่มขึ้นของออกซิเจนสูงขึ้น



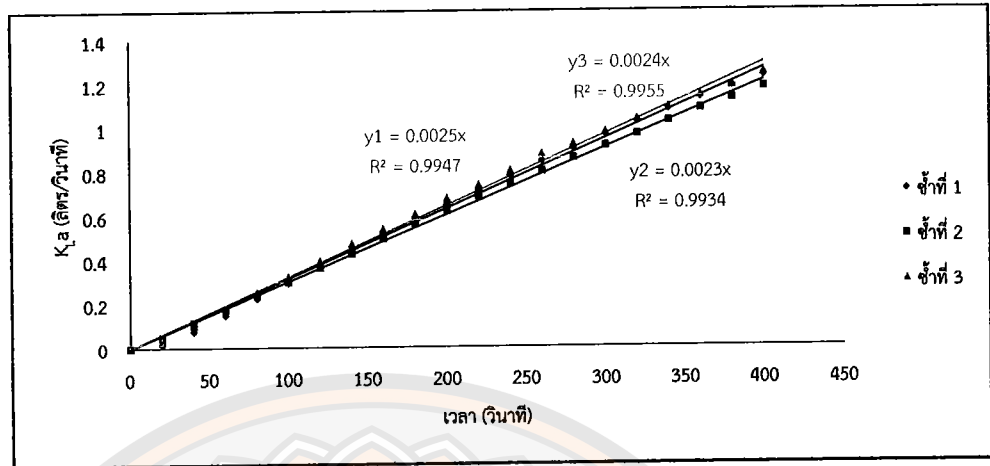
ภาพที่ 11 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_La$ ) ก่อนการใช้งาน

จากภาพที่ 11 พบว่า ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_La$ ) ของหัวทรายทรงกระบอกเล็ก ก่อนการใช้งานโดยมีการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง และได้ทำการนำค่าผลการทดสอบ DO จากตารางที่ 2 ในภาคผนวก ข ที่ตรวจวัดได้เข้าคำนวณตามสมการในภาคผนวก ก จะได้ค่า  $K_La$  เท่ากับ 0.0024 ลิตร/วินาที



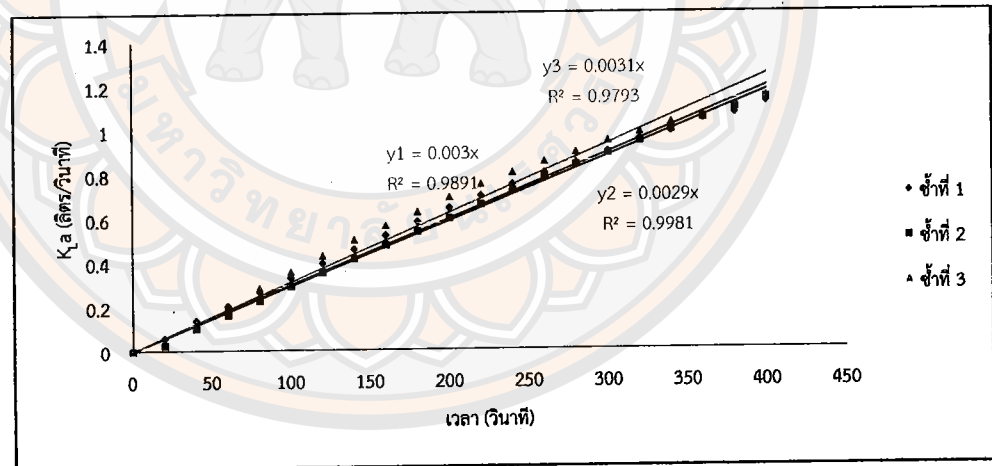
ภาพที่ 12 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_La$ ) หลังการใช้งาน 1 สัปดาห์

จากภาพที่ 12 พบว่า ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_La$ ) ของหัวทรายทรงกระบอกเล็ก หลังการใช้งาน 1 สัปดาห์โดยมีการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง และได้ทำการนำค่าผลการทดสอบ DO จากตารางที่ 2 ในภาคผนวก ข ที่ตรวจวัดได้เข้าคำนวณตามสมการในภาคผนวก ก จะได้ค่า  $K_La$  เท่ากับ 0.0024 ลิตร/วินาที



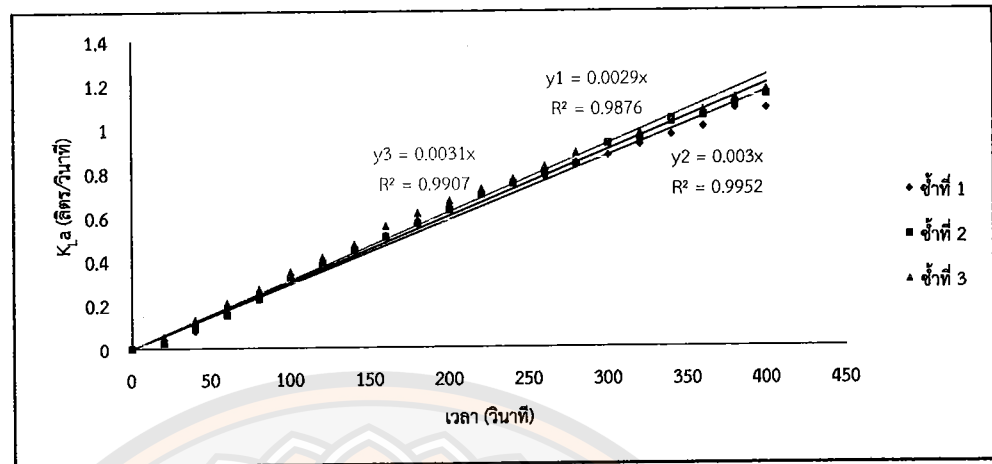
ภาพที่ 13 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_{La}$ ) หลังการใช้งาน 3 สัปดาห์

จากภาพที่ 13 พบว่า ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_{La}$ ) ของหัวทรายทรงกระบอกเล็ก หลังการใช้งาน 3 สัปดาห์โดยมีการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง และได้ทำการนำค่าผลการทดสอบ DO จากตารางที่ 2 ในภาคผนวก ข ที่ตรวจวัดได้เข้าคำนวณตามสมการในภาคผนวก ก จะได้ค่า  $K_{La}$  เท่ากับ 0.0024 ลิตร/วินาที



ภาพที่ 14 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_{La}$ ) หลังการใช้งาน 5 สัปดาห์

จากภาพที่ 14 พบว่า ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_{La}$ ) ของหัวทรายทรงกระบอกเล็ก หลังการใช้งาน 5 สัปดาห์โดยมีการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง และได้ทำการนำค่าผลการทดสอบ DO จากตารางที่ 2 ในภาคผนวก ข ที่ตรวจวัดได้เข้าคำนวณตามสมการในภาคผนวก ก จะได้ค่า  $K_{La}$  เท่ากับ 0.0030 ลิตร/วินาที

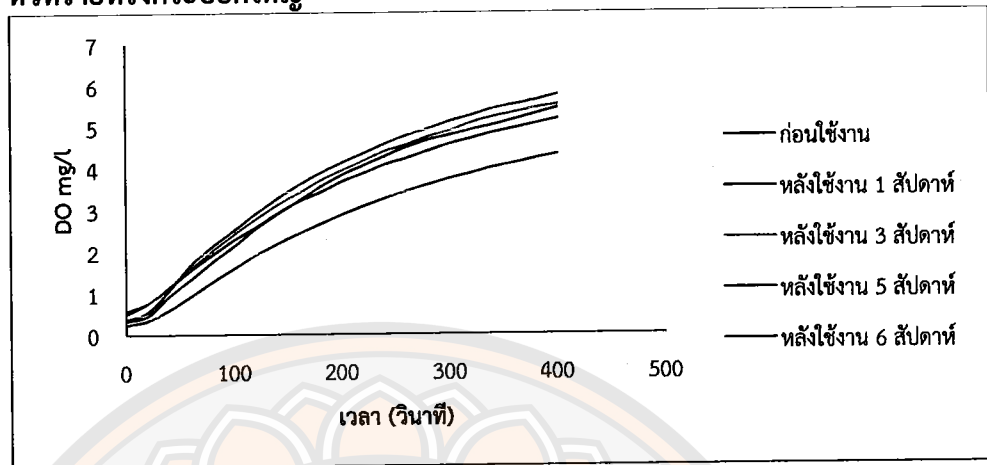


ภาพที่ 15 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_La$ ) หลังการใช้งาน 6 สัปดาห์

จากภาพที่ 15 พบว่า ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_La$ ) ของหัวทรายทรงกระบอกเล็ก หลังการใช้งาน 6 สัปดาห์โดยมีการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง และได้ทำการนำค่าผลการทดสอบ DO จากตารางที่ 2 ในภาคผนวก ข ที่ตรวจวัดได้เข้าคำนวณตามสมการในภาคผนวก ก จะได้ค่า  $K_La$  เท่ากับ 0.0030 ลิตร/วินาที

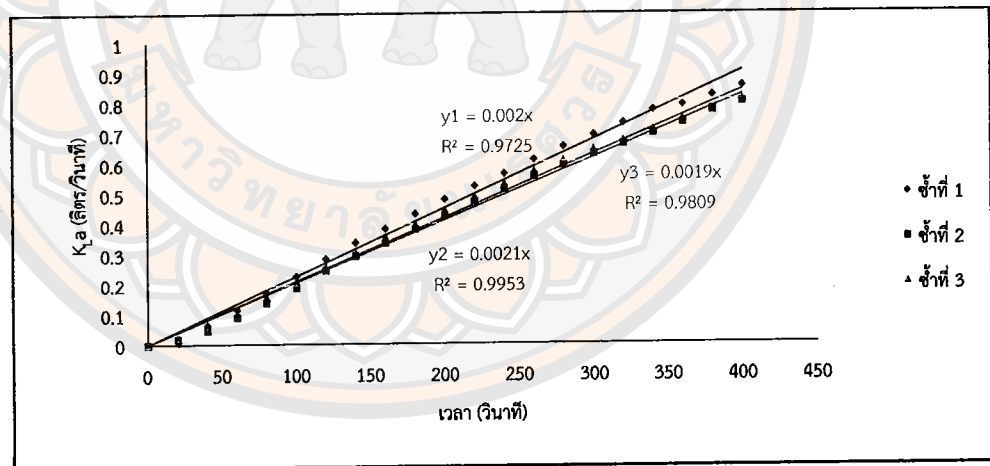
หัวทรายทรงกระบอกเล็กจากการใช้งานมาในระยะเวลา 6 สัปดาห์พบว่าค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจากเริ่มต้นการใช้งานเนื่องจากวัสดุที่ใช้เป็นตัวยึดเกาะ (Binder) ที่ทำหน้าที่ยึดเกาะระหว่างเม็ดทรายด้วยกันเองเกิดการยุบตัวลงส่งผลให้เกิดมีช่องว่างระหว่างเม็ดทรายมากขึ้นจึงทำให้อากาศสามารถแพร่กระจายออกจากหัวทรายนี้สามารถแพร่ผ่านได้ดีขึ้นและในปริมาณที่มากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำเพิ่มสูงขึ้น

### หัวทรายทรงกระบอกใหญ่



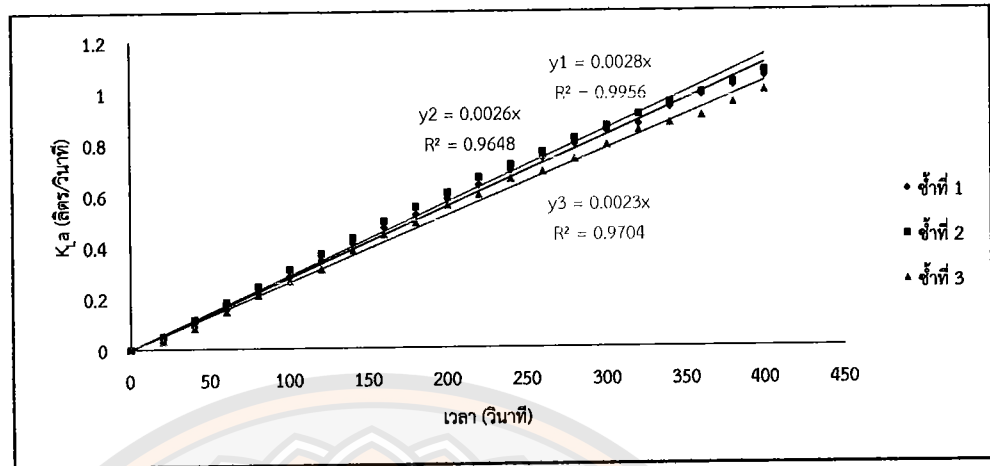
ภาพที่ 16 แสดงอัตราการเพิ่มขึ้นของออกซิเจนในน้ำจากหัวทรายทรงกระบอกใหญ่

จากภาพที่ 16 เป็นการแสดงอัตราการเพิ่มขึ้นของออกซิเจนในน้ำวินาทีที่ 0-400 โดยมีการจดบันทึกข้อมูลทุก ๆ 20 วินาที ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ข ตารางที่ 3 พบว่าหลังจากใช้งานหัวทราย 6 สัปดาห์ มีอัตราการเพิ่มขึ้นของออกซิเจนสูงขึ้น



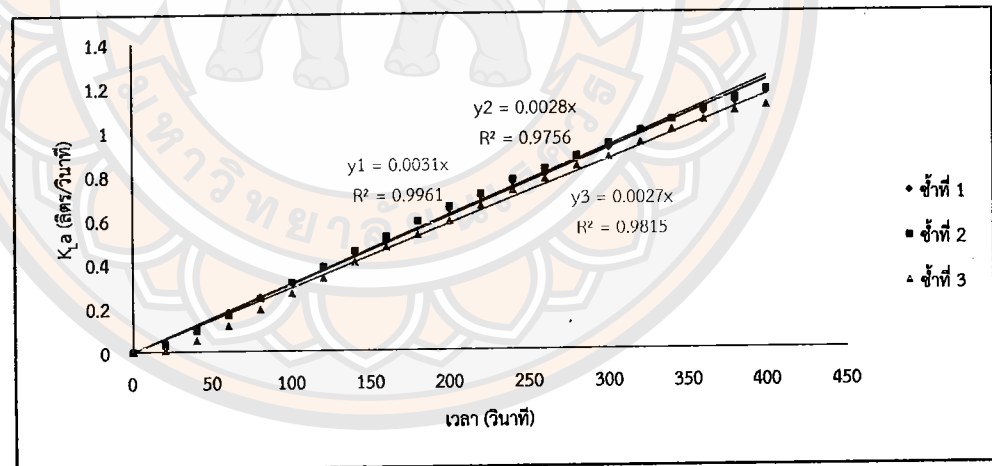
ภาพที่ 17 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_L a$ ) ก่อนการใช้งาน

จากภาพที่ 17 พบว่า ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_L a$ ) ของหัวทรายทรงกระบอกใหญ่ ก่อนการใช้งานโดยมีการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง และได้ทำการนำค่าผลการทดสอบ DO จากตารางที่ 3 ในภาคผนวก ข ที่ตรวจวัดได้เข้าคำนวณตามสมการภาคผนวก ก จะได้ค่า  $K_L a$  เท่ากับ 0.0020 ลิตร/วินาที



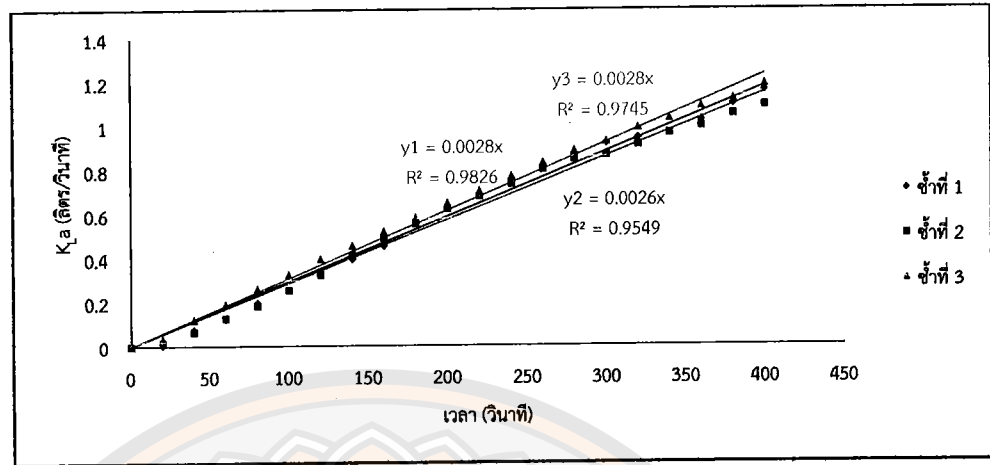
ภาพที่ 18 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_La$ ) หลังการใช้งาน 1 สัปดาห์

จากภาพที่ 18 พบว่า ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_La$ ) ของหัวทรายทรงกระบอกใหญ่ หลังการใช้งาน 1 สัปดาห์โดยมีการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง และได้ทำการนำค่าผลการทดสอบ DO จากตารางที่ 3 ในภาคผนวก ข ที่ตรวจวัดได้เข้าคำนวณตามสมการภาคผนวก ก จะได้ค่า  $K_La$  เท่ากับ 0.0026 ลิตร/วินาที



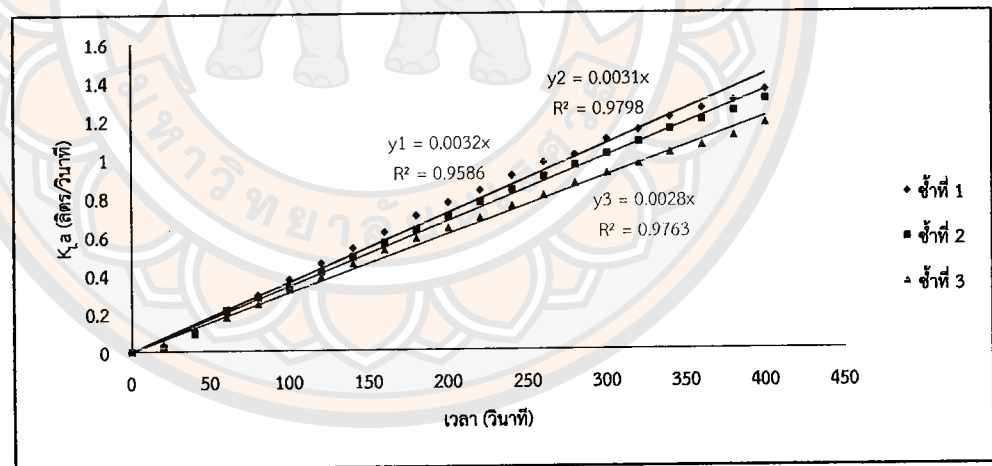
ภาพที่ 19 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_La$ ) หลังการใช้งาน 3 สัปดาห์

จากภาพที่ 19 พบว่า ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_La$ ) ของหัวทรายทรงกระบอกใหญ่ หลังการใช้งาน 3 สัปดาห์โดยมีการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง และได้ทำการนำค่าผลการทดสอบ DO จากตารางที่ 3 ในภาคผนวก ข ที่ตรวจวัดได้เข้าคำนวณตามสมการภาคผนวก ก จะได้ค่า  $K_La$  เท่ากับ 0.0029 ลิตร/วินาที



ภาพที่ 20 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_La$ ) หลังการใช้ 5 สัปดาห์

จากภาพที่ 20 พบว่า ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_La$ ) ของหัวทรายทรงกระบอกใหญ่ หลังการใช้งาน 5 สัปดาห์โดยมีการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง และได้ทำการนำค่าผลการทดสอบ DO จากตารางที่ 3 ในภาคผนวก ข ที่ตรวจวัดได้เข้าคำนวณตามสมการภาคผนวก ก จะได้ค่า  $K_La$  เท่ากับ 0.0027 ลิตร/วินาที

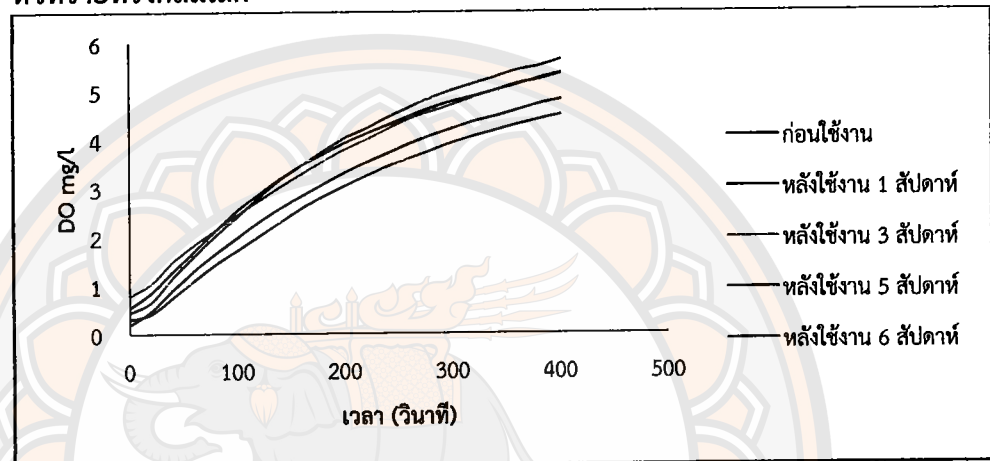


ภาพที่ 21 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_La$ ) หลังการใช้ 6 สัปดาห์

จากภาพที่ 21 พบว่า ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_La$ ) ของหัวทรายทรงกระบอกใหญ่ หลังการใช้งาน 6 สัปดาห์โดยมีการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง และได้ทำการนำค่าผลการทดสอบ DO จากตารางที่ 3 ในภาคผนวก ข ที่ตรวจวัดได้เข้าคำนวณตามสมการภาคผนวก ก จะได้ค่า  $K_La$  เท่ากับ 0.0030 ลิตร/วินาที

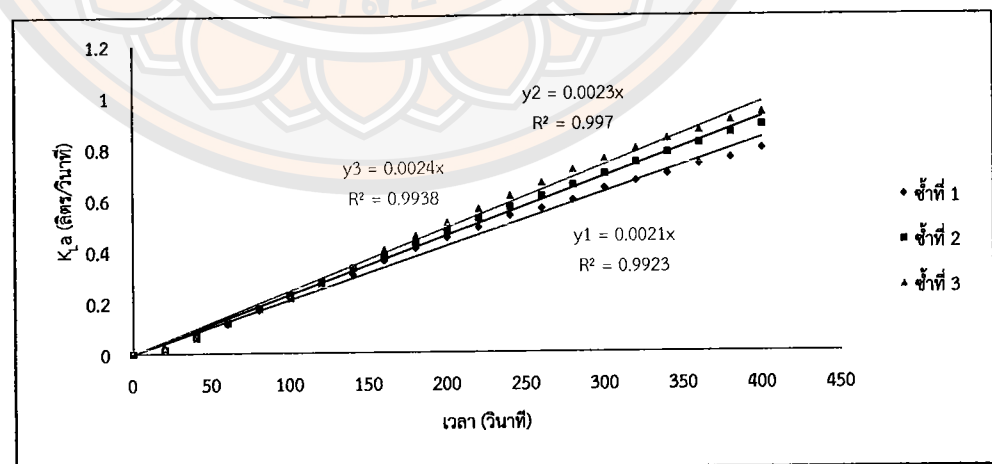
หัวทรายทรงกระบอกใหญ่ จากการใช้งานมาในระยะเวลา 6 สัปดาห์ พบว่าค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจากเริ่มต้นการใช้งาน เนื่องจากวัสดุที่ใช้เป็นตัวยึดเกาะ (Binder) ที่ทำหน้าที่ยึดเกาะระหว่างเม็ดทรายด้วยกันเองเกิดการยุบตัวลง ส่งผลให้เกิดมีช่องว่างระหว่างเม็ดทรายมากขึ้น จึงทำให้อากาศสามารถแพร่กระจายออกจากหัวทรายนี้ สามารถแพร่ผ่านได้ดีขึ้นและในปริมาณที่มากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำเพิ่มสูงขึ้น

หัวทรายทรงกลมเล็ก



ภาพที่ 22 แสดงอัตราการเพิ่มขึ้นของออกซิเจนในน้ำจากหัวทรายทรงกลมเล็ก

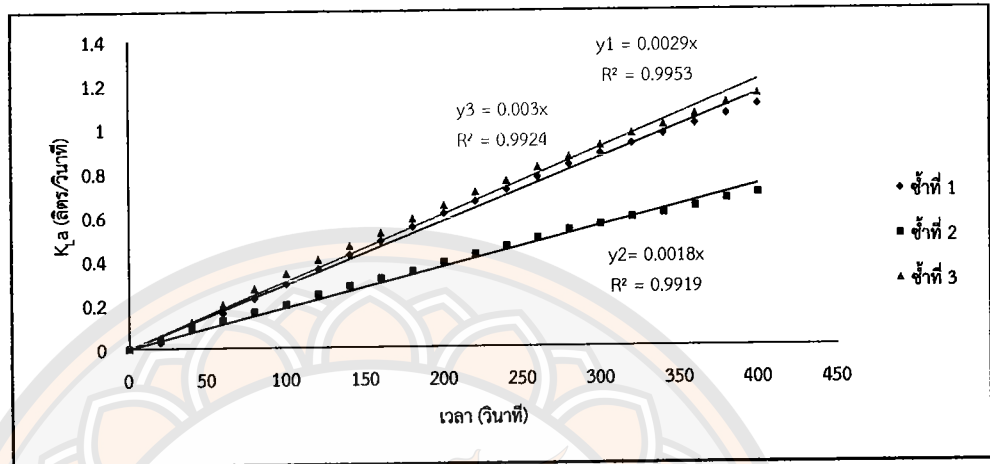
จากภาพที่ 22 เป็นการแสดงอัตราการเพิ่มขึ้นของออกซิเจนในน้ำวินาทีที่ 0-400 โดยมีการจดบันทึกข้อมูลทุก ๆ 20 วินาที ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ข ตารางที่ 4 พบว่าหลังจากใช้งานหัวทราย 6 สัปดาห์ มีอัตราการเพิ่มขึ้นของออกซิเจนสูงขึ้น



ภาพที่ 23 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_a$ ) ก่อนการใช้งาน

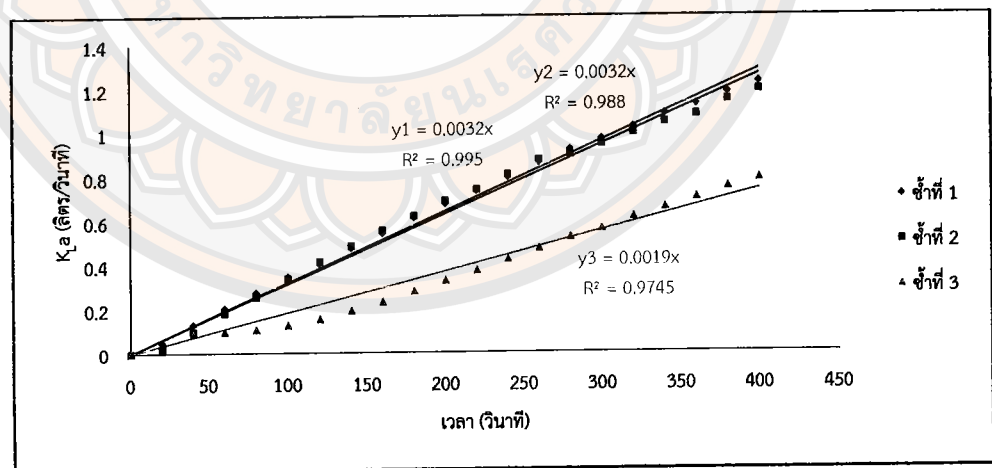
จากภาพที่ 23 พบว่า ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_a$ ) ของหัวทรายทรงกลมเล็กก่อนการใช้งาน โดยมีการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง และได้ทำการนำค่าผลการทดสอบ DO จากตารางที่ 4 ใน

ภาคผนวก ข ที่ตรวจวัดได้เข้าคำนวณตามสมการภาคผนวก ก จะได้ค่า  $K_{La}$  เท่ากับ 0.0023 ลิตร/วินาที



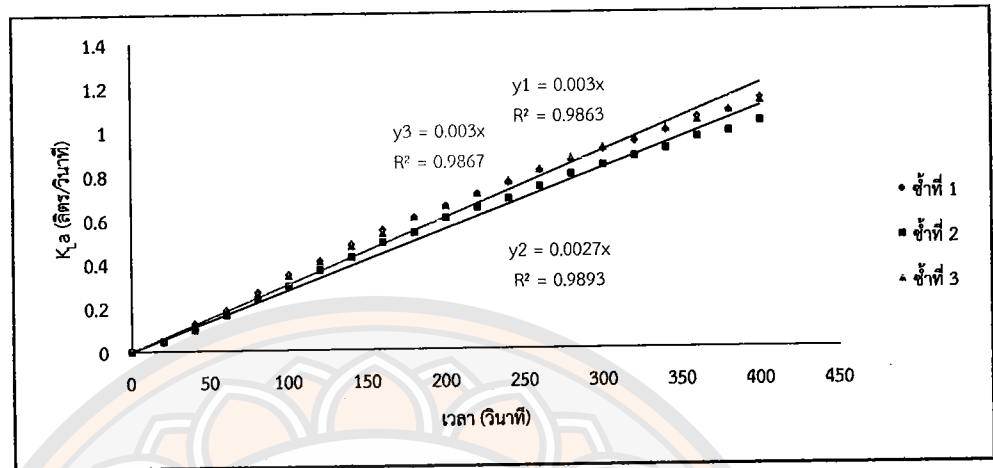
ภาพที่ 24 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_{La}$ ) หลังการใช้งาน 1 สัปดาห์

จากภาพที่ 24 พบว่า ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_{La}$ ) ของหัวทรายทรงกลมเล็กหลังการใช้งาน 1 สัปดาห์โดยมีการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง และได้ทำการนำค่าผลการทดสอบ DO จากตารางที่ 4 ในภาคผนวก ข ที่ตรวจวัดได้เข้าคำนวณตามสมการภาคผนวก ก จะได้ค่า  $K_{La}$  เท่ากับ 0.0026 ลิตร/วินาที



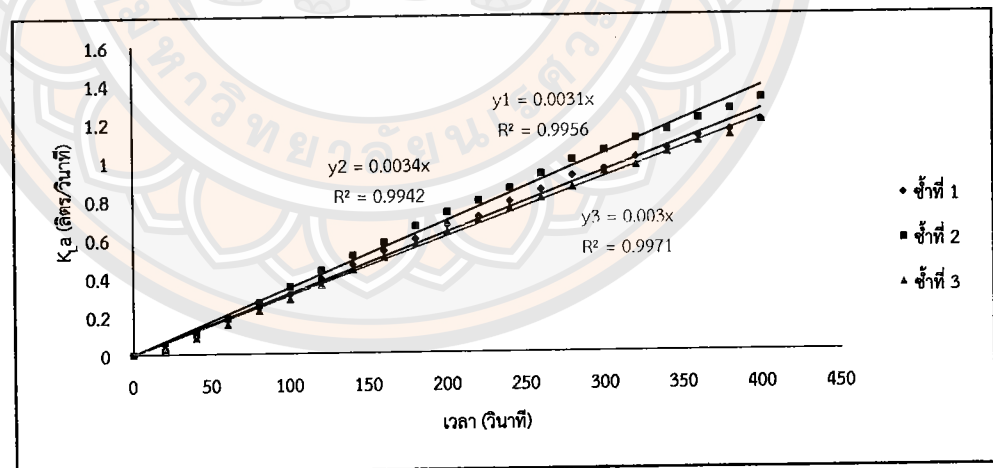
ภาพที่ 25 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_{La}$ ) หลังการใช้งาน 3 สัปดาห์

จากภาพที่ 25 พบว่า ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_{La}$ ) ของหัวทรายทรงกลมเล็กหลังการใช้งาน 3 สัปดาห์โดยมีการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง และได้ทำการนำค่าผลการทดสอบ DO จากตารางที่ 4 ในภาคผนวก ข ที่ตรวจวัดได้เข้าคำนวณตามสมการภาคผนวก ก จะได้ค่า  $K_{La}$  เท่ากับ 0.0028 ลิตร/วินาที



ภาพที่ 26 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_{La}$ ) หลังการใช้งาน 5 สัปดาห์

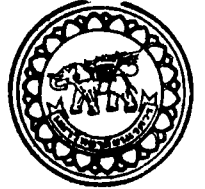
จากภาพที่ 26 พบว่า ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_{La}$ ) ของหัวทรายทรงกลมเล็กหลังการใช้งาน 5 สัปดาห์โดยมีการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง และได้ทำการนำค่าผลการทดสอบ DO จากตารางที่ 4 ในภาคผนวก ข ที่ตรวจวัดได้เข้าคำนวณตามสมการภาคผนวก ก จะได้ค่า  $K_{La}$  เท่ากับ 0.0029 ลิตร/วินาที



ภาพที่ 27 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_{La}$ ) หลังการใช้งาน 6 สัปดาห์

จากภาพที่ 27 พบว่า ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_{La}$ ) ของหัวทรายทรงกลมเล็กหลังการใช้งาน 6 สัปดาห์โดยมีการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง และได้ทำการนำค่าผลการทดสอบ DO จากตารางที่ 4 ในภาคผนวก ข ที่ตรวจวัดได้เข้าคำนวณตามสมการภาคผนวก ก จะได้ค่า  $K_{La}$  เท่ากับ 0.0032 ลิตร/วินาที

17192299



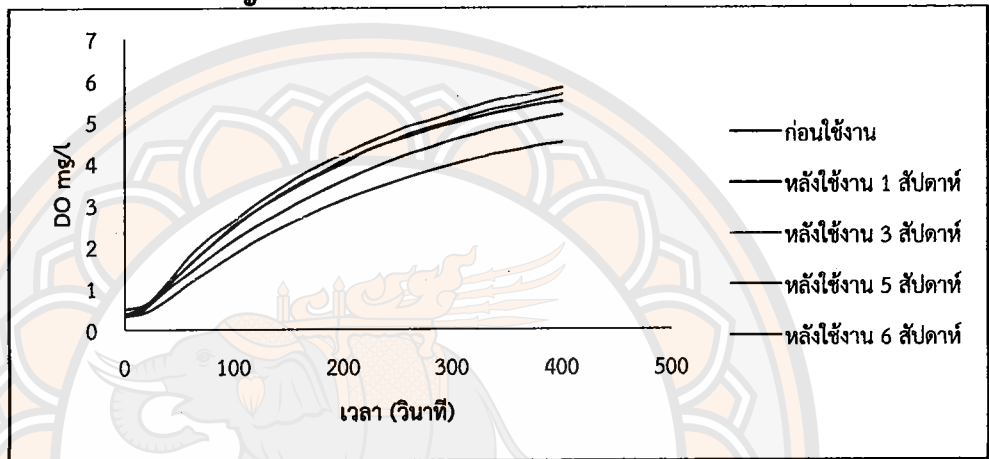
สำนักหอสมุด

2560

pls  
v615ก  
Q558

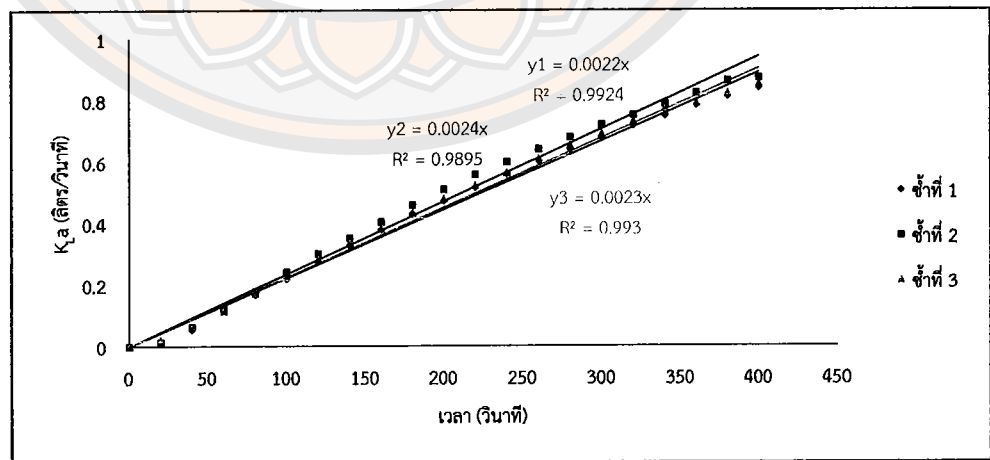
หัวทรายทรงกลมเล็ก จากการใช้งานมาในระยะเวลา 6 สัปดาห์ พบว่าค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจากเริ่มต้นการใช้งาน เนื่องจากวัสดุที่ใช้เป็นตัวยึดเกาะ (Binder) ที่ทำหน้าที่ยึดเกาะระหว่างเม็ดทรายด้วยกันเองเกิดการยุบตัวลง ส่งผลให้เกิดมีช่องว่างระหว่างเม็ดทรายมากขึ้น จึงทำให้อากาศสามารถแพร่กระจายออกจากหัวทรายนี้ สามารถแพร่ผ่านได้ดีขึ้นและในปริมาณที่มากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำเพิ่มสูงขึ้น

### หัวทรายทรงกลมใหญ่



ภาพที่ 28 แสดงอัตราการเพิ่มขึ้นของออกซิเจนในน้ำจากหัวทรายทรงกลมใหญ่

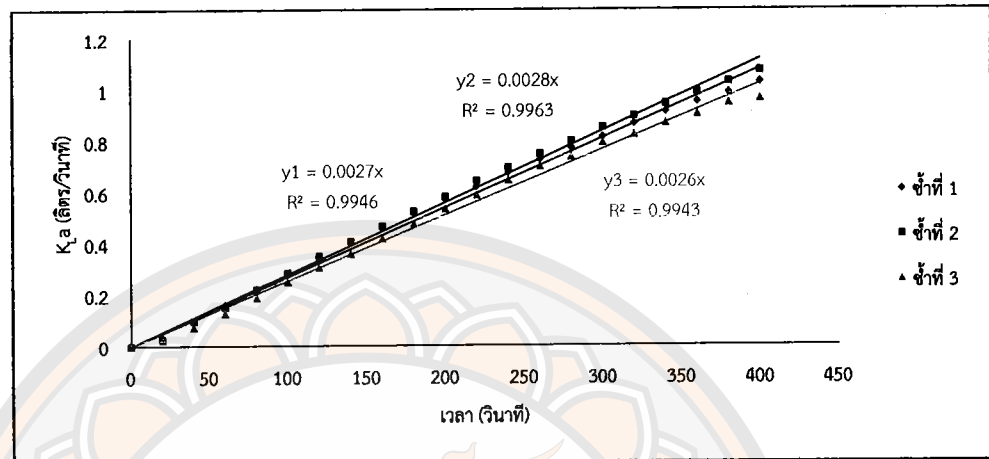
จากภาพที่ 28 เป็นการแสดงอัตราการเพิ่มขึ้นของออกซิเจนในน้ำวินาทีที่ 0-400 โดยมีการจับบันทึกข้อมูลทุก ๆ 20 วินาที ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ข ตารางที่ 5 พบว่าหลังจากใช้งานหัวทราย 6 สัปดาห์ มีอัตราการเพิ่มขึ้นของออกซิเจนสูงขึ้น



ภาพที่ 29 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_{La}$ ) ก่อนการใช้งาน

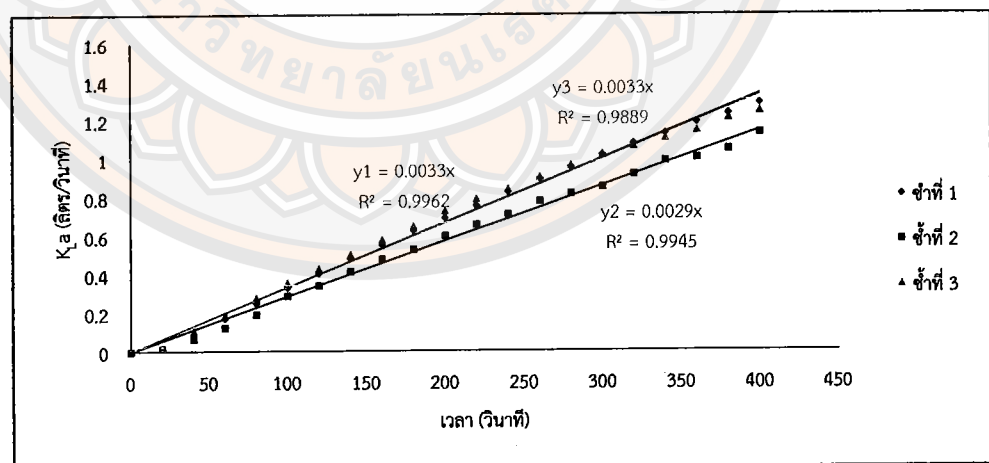
จากภาพที่ 29 พบว่า ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_{La}$ ) ของหัวทรายทรงกลมใหญ่ก่อนการใช้งานโดยมีการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง และได้ทำการนำค่าผลการทดสอบ DO จากตารางที่ 5 ใน

ภาคผนวก ข ที่ตรวจวัดได้เข้าคำนวณตามสมการภาคผนวก ก จะได้ค่า  $K_{La}$  เท่ากับ 0.0023 ลิตร/วินาที



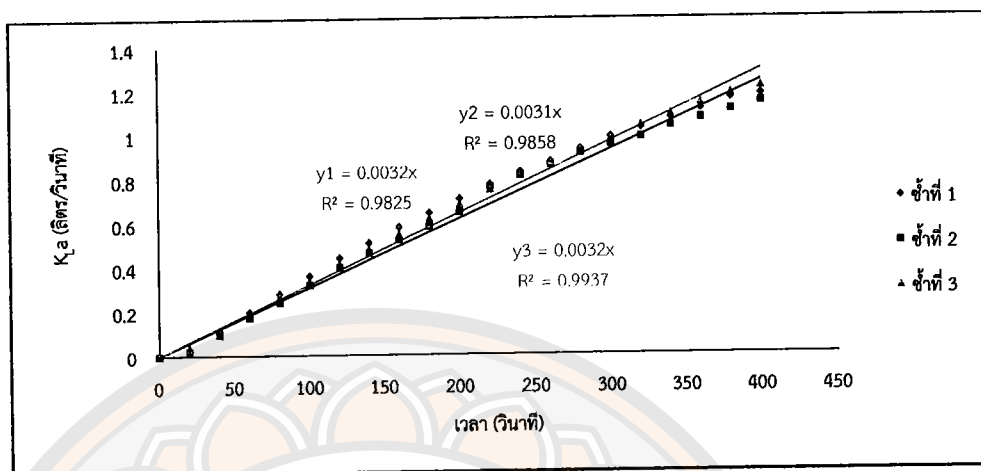
ภาพที่ 30 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_{La}$ ) หลังการใช้งาน 1 สัปดาห์

จากภาพที่ 30 พบว่า ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_{La}$ ) ของหัวทรายทรงกลมใหญ่หลังการใช้งาน 1 สัปดาห์งานโดยมีการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง และได้ทำการนำค่าผลการทดสอบ DO จากตารางที่ 5 ในภาคผนวก ข ที่ตรวจวัดได้เข้าคำนวณตามสมการภาคผนวก ก จะได้ค่า  $K_{La}$  เท่ากับ 0.0027 ลิตร/วินาที



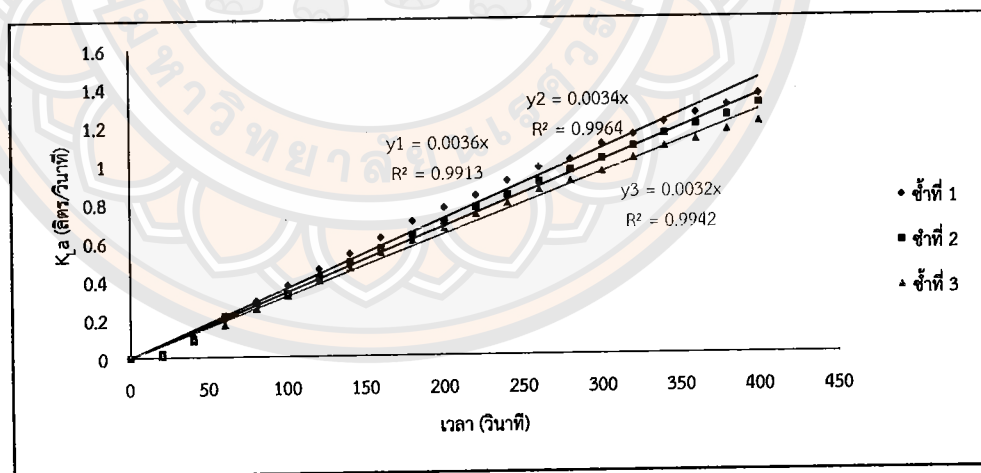
ภาพที่ 31 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_{La}$ ) หลังการใช้งาน 3 สัปดาห์

จากภาพที่ 31 พบว่า ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_{La}$ ) ของหัวทรายทรงกลมใหญ่หลังการใช้งาน 3 สัปดาห์งานโดยมีการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง และได้ทำการนำค่าผลการทดสอบ DO จากตารางที่ 5 ในภาคผนวก ข ที่ตรวจวัดได้เข้าคำนวณตามสมการภาคผนวก ก จะได้ค่า  $K_{La}$  เท่ากับ 0.0032 ลิตร/วินาที



ภาพที่ 32 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_{La}$ ) หลังการใช้งาน 5 สัปดาห์

จากภาพที่ 32 พบว่า ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_{La}$ ) ของหัวทรายทรงกลมใหญ่หลังการใช้งาน 5 สัปดาห์งานโดยมีการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง และได้ทำการนำค่าผลการทดสอบ DO จากตารางที่ 5 ในภาคผนวก ข ที่ตรวจวัดได้เข้าคำนวณตามสมการภาคผนวก ก จะได้ค่า  $K_{La}$  เท่ากับ 0.0032 ลิตร/วินาที



ภาพที่ 33 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_{La}$ ) หลังการใช้งาน 6 สัปดาห์

จากภาพที่ 33 พบว่า ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ ( $K_{La}$ ) ของหัวทรายทรงกลมใหญ่หลังการใช้งาน 6 สัปดาห์งานโดยมีการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง และได้ทำการนำค่าผลการทดสอบ DO จากตารางที่ 5 ในภาคผนวก ข ที่ตรวจวัดได้เข้าคำนวณตามสมการภาคผนวก ก จะได้ค่า  $K_{La}$  เท่ากับ 0.0034 ลิตร/วินาที

หัวทรายทรงกลมใหญ่ จากการใช้งานมาในระยะเวลา 6 สัปดาห์ พบว่าค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจากเริ่มต้นการใช้งาน เนื่องจากวัสดุที่ใช้เป็นตัวยึดเกาะ (Binder) ที่ทำหน้าที่ยึดเกาะระหว่างเม็ดทรายด้วยกันเองเกิดการยุบตัวลง ส่งผลให้เกิดมีช่องว่างระหว่างเม็ดทรายมากขึ้น จึงทำให้อากาศสามารถแพร่กระจายออกจากหัวทรายนี้ สามารถแพร่ผ่านได้ดีขึ้นและในปริมาณที่มากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำเพิ่มสูงขึ้น



ตารางที่ 3 แสดงประสิทธิภาพการเติมอากาศ

ประเภทหัวทราย	ทรงกลมเล็ก	ทรงกลมใหญ่	ทรงกระบอกเล็ก	ทรงกระบอกใหญ่
ก่อนใช้งานซ้ำ 1	0.0021	0.0022	0.0025	0.0020
ก่อนใช้งานซ้ำ 2	0.0023	0.0024	0.0023	0.0021
ก่อนใช้งานซ้ำ 3	0.0024	0.0023	0.0024	0.0019
อาทิตย์ที่ 1 ซ้ำ 1	0.0029	0.0027	0.0025	0.0028
อาทิตย์ที่ 1 ซ้ำ 2	0.0018	0.0028	0.0023	0.0026
อาทิตย์ที่ 1 ซ้ำ 3	0.0030	0.0026	0.0024	0.0023
อาทิตย์ที่ 3 ซ้ำ 1	0.0029	0.0033	0.0025	0.0031
อาทิตย์ที่ 3 ซ้ำ 2	0.0018	0.0029	0.0023	0.0028
อาทิตย์ที่ 3 ซ้ำ 3	0.0030	0.0033	0.0024	0.0027
อาทิตย์ที่ 5 ซ้ำ 1	0.0030	0.0032	0.0030	0.0028
อาทิตย์ที่ 5 ซ้ำ 2	0.0027	0.0031	0.0029	0.0026
อาทิตย์ที่ 5 ซ้ำ 3	0.0030	0.0032	0.0031	0.0028
อาทิตย์ที่ 6 ซ้ำ 1	0.0030	0.0036	0.0029	0.0032
อาทิตย์ที่ 6 ซ้ำ 2	0.0027	0.0034	0.0030	0.0031
อาทิตย์ที่ 6 ซ้ำ 3	0.0030	0.0032	0.0031	0.0028

จากตารางที่ 2 แสดงประสิทธิภาพการเติมอากาศของหัวทรายทรงกลมเล็ก หัวทรายทรงกลมใหญ่ หัวทรายทรงกระบอกเล็ก หัวทรายทรงกระบอกใหญ่ ทั้ง 6 สัปดาห์

การอ่านสถิติ one way anova แบบ Fisher's Least Significant Difference (LSD) คือเป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยหลายๆ คู่ในเวลาเดียวกัน

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่า  $K_{La}$  ของ หัวทรายทรงกระบอกเล็ก ด้วยวิธี LSD

สัปดาห์A	สัปดาห์B	Mean difference	P-value
ก่อนใช้	สัปดาห์ที่ 5	-0.0006000	0.000
ก่อนใช้	สัปดาห์ที่ 6	-0.0006000	0.000
สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 5	-0.0006000	0.000
สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 6	-0.0006000	0.000
สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 5	-0.0006000	0.000
สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 6	-0.0006000	0.000

\*P-value<0.05

จากตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบเชิงซ้อนค่า  $K_{La}$  ของหัวทรายทรงกระบอกเล็ก ด้วยวิธี LSD ดังตารางที่ 6 ในภาคผนวก ข พบค่า P-value ที่คำนวณได้มีค่า 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00 ซึ่งน้อยกว่าค่านัยสำคัญที่กำหนด(0.05) นั้นหมายความว่า ค่า  $K_{La}$  แตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่ ได้แก่ ก่อนใช้-สัปดาห์ที่ 5, ก่อนใช้-สัปดาห์ที่ 6, สัปดาห์ที่ 1-สัปดาห์ที่ 5, สัปดาห์ที่ 1-สัปดาห์ที่ 6, สัปดาห์ที่ 3-สัปดาห์ที่ 5, สัปดาห์ที่ 3-สัปดาห์ที่ 6

ตารางที่ 5 ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่า  $K_{La}$  ของ หัวทรายทรงกระบอกใหญ่ ด้วยวิธี LSD

สัปดาห์A	สัปดาห์B	Mean difference	P-value
ก่อนใช้	สัปดาห์ที่ 1	-0.0005667	0.004
ก่อนใช้	สัปดาห์ที่ 3	-0.0008667	0.000
ก่อนใช้	สัปดาห์ที่ 5	-0.0007333	0.001
ก่อนใช้	สัปดาห์ที่ 6	-0.0010333	0.000
สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 6	-0.0004667	0.012

\*P-value<0.05

จากตารางที่ 5 ผลการเปรียบเทียบเชิงซ้อนค่า  $K_{La}$  ของหัวทรายทรงกระบอกใหญ่ ด้วยวิธี LSD ดังตารางที่ 7 ในภาคผนวก ข พบค่า P-value ที่คำนวณได้มีค่า 0.04, 0.00,0.01 ,0.00 ,0.012 ซึ่งน้อยกว่าค่านัยสำคัญที่กำหนด(0.05) นั้นหมายความว่า ค่า  $K_{La}$  แตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่ ได้แก่ ก่อนใช้-สัปดาห์ที่ 1, ก่อนใช้-สัปดาห์ที่ 3, ก่อนใช้-สัปดาห์ที่ 5, ก่อนใช้-สัปดาห์ที่ 6, สัปดาห์ที่ 1-สัปดาห์ที่ 6

จากการทดสอบค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ  $K_La$  ของหัวทรายทรงกลมเล็ก ซึ่งนำมาคำนวณทางสถิติโดยวิธี LSD พบว่า ค่า  $K_La$  ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ดังตารางที่ 8 ในภาคผนวก ข

ตารางที่ 6 ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่า  $K_La$  ของ หัวทรายทรงกลมใหญ่ ด้วยวิธี LSD

สัปดาห์A	สัปดาห์B	Mean difference	P-value
ก่อนใช้	สัปดาห์ที่ 1	-0.0004000	0.009
ก่อนใช้	สัปดาห์ที่ 3	-0.0008661	0.000
ก่อนใช้	สัปดาห์ที่ 5	-0.0008667	0.000
ก่อนใช้	สัปดาห์ที่ 6	-0.0011000	0.000
สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 3	-0.0004667	0.004
สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 5	-0.0004667	0.004
สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 6	-0.0007000	0.000

\*P-value<0.05

จากตารางที่ 6 ผลการเปรียบเทียบเชิงซ้อนค่า  $K_La$  ของหัวทรายทรงกลมใหญ่ ด้วยวิธี LSD ดังตารางที่ 9 ในภาคผนวก ข พบค่า P-value ที่คำนวณได้มีค่า 0.09, 0.00,0.00 ,0.00 ,0.004, 0.004, 0.000 ซึ่งน้อยกว่าค่านัยสำคัญที่กำหนด(0.05) นั้นหมายความว่า ค่า  $K_La$  แตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่ ได้แก่ ก่อนใช้-สัปดาห์ที่ 1, ก่อนใช้-สัปดาห์ที่ 3, ก่อนใช้-สัปดาห์ที่ 5, ก่อนใช้-สัปดาห์ที่ 6, สัปดาห์ที่ 1-สัปดาห์ที่ 3, สัปดาห์ที่ 1-สัปดาห์ที่ 5, สัปดาห์ที่ 1-สัปดาห์ที่ 6

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

1) ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศเริ่มต้นมีค่าไม่แตกต่างกันมาก โดยหัวทรายทรงกระบอกเล็ก หัวทรายทรงกระบอกใหญ่ หัวทรายทรงกลมเล็ก หัวทรายทรงกลมใหญ่ จะอยู่ที่ 0.0024 (ค่า SD คือ 0.0001), 0.0020 (ค่า SD คือ 0.0001), 0.0022 (ค่า SD คือ 0.00015) และ 0.0023 (ค่า SD คือ 0.0001) ลิตร/วินาที ตามลำดับ

2) จากการใช้งานมาในระยะเวลา 6 สัปดาห์ พบว่าค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากเริ่มต้นการใช้งานโดยเรียงจากมากไปหาน้อย คือ หัวทรายทรงกระบอกใหญ่ หัวทรายทรงกลมใหญ่ หัวทรายทรงกลมเล็ก หัวทรายทรงกระบอกเล็ก จะอยู่ที่ ร้อยละ 50 ร้อยละ 47.82 ร้อยละ 31.81 และ ร้อยละ 25 ตามลำดับ

#### 5.2 อภิปรายผลการวิจัย

ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศของหัวทรายขนาดเล็กและขนาดใหญ่ มีค่าต่างกันไม่มาก เนื่องจากในการทดลองนั้นอัตราการไหลของอากาศ ที่ออกมาจากเครื่องเติมอากาศ (Air pump) ถูกควบคุมให้มีอัตราการไหลเท่ากัน ดังนั้นเมื่ออากาศในปริมาณที่เท่ากันไหลผ่านหัวทรายที่มี พื้นที่ผิวของรูพรุนต่างกัน (อันเนื่องมาจากขนาดของหัวทรายต่างกัน) ทำให้ความดันของอากาศที่ไหลผ่านหัวทรายขนาดเล็กมีแรงดันมากกว่าหัวทรายขนาดใหญ่ จึงส่งผลให้อากาศที่ไหลออกจากหัวทรายขนาดเล็กเกิดการกระจายตัวไปทั่วพื้นที่ผิวของหัวทราย ซึ่งต่างจากหัวทรายขนาดใหญ่ ที่ความดันของอากาศมีน้อยกว่า จึงทำให้อากาศค่อยๆ แพร่กระจายออกมา และการแพร่กระจายของอากาศที่ออกมานั้น จะไม่ได้เกิดทั่วพื้นที่ผิวทั้งหมด ดังแสดงในภาคผนวก ค ภาพที่ 1

ในส่วนของค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศของหัวทรายใหม่ที่ยังไม่ได้นำมาใช้งานนั้น พบว่าเมื่อเทียบกับหัวทรายที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว ประมาณ 6 สัปดาห์ จะมีค่าน้อยกว่า ที่เป็นเช่นนี้ อาจเกิดจากการที่หัวทรายถูกนำมาใช้งานโดยแช่อยู่ในน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ต่างๆ ปะปนอยู่ จึงทำให้วัสดุที่ใช้เป็นตัวยึดเกาะ (Binder) ที่ทำหน้าที่ยึดเกาะระหว่างเม็ดทรายด้วยตัวเองเกิดการยุบตัวลง ส่งผลให้เกิดมีช่องว่างระหว่างเม็ดทรายมากขึ้น จึงทำให้อากาศสามารถแพร่กระจายออกจากหัวทรายนี้ สามารถแพร่ผ่านได้ดีขึ้นและในปริมาณที่มากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศเพิ่มสูงขึ้นดังแสดงในภาคผนวก ค ภาพที่ 2

สีที่เปลี่ยนไปของหัวทรายจากสีน้ำเงินเป็นสีเทา ดังแสดงในภาคผนวก ค ภาพที่ 3 จะพบว่าในช่วง 6 สัปดาห์แรกจะมีคราบของสิ่งสกปรกที่ไปเกาะ แต่ในช่วงต้น 6 สัปดาห์ปริมาณของคราบสิ่งสกปรกจะยังมีไม่มากพอที่จะไปอุดหรือปิดรูระบายอากาศ ถ้ามีเวลาทำการทดลองต่อไปแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นที่จะเป็นไปได้นั่นค่าน่าประสิทธิภาพการเติมอากาศน่าจะลดลง

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการเพิ่มระยะเวลาในการแช่หัวทรายให้มากกว่า 6 สัปดาห์ เพื่อให้ได้ทราบถึงค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศของหัวทรายและยังช่วยให้ทราบถึงขีดจำกัดของประสิทธิภาพการเติมอากาศของหัวทราย





บรรณานุกรม

มหาวิทยาลัยรัตนโกสินทร์

### บรรณานุกรม

- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2537). วิศวกรรมกรรมการกำจัดน้ำเสีย เล่ม 3. มิตรนราการพิมพ์. กรุงเทพฯ.
- จิตาภา วชิรศักดิ์. (2552). การประยุกต์ใช้วัสดุยึดหยุ่นในกระบวนการเติมอากาศแบบฟองอากาศของระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจน. ปรินญามหาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- นันทนากร จரியานุกุล. (2551). การหาประสิทธิภาพการเติมอากาศแบบหัวฟู่ที่ทำมาจากเซรามิก. ปรินญามหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- นิเวศวิทยาสิ่งแวดล้อม. การบำบัดน้ำเสีย. สืบค้นเมื่อวันที่ 14 พฤษภาคม 2558. จาก [http://www.il.mahidol.ac.th.14/e-media/ecology/chapter3/chapter3\\_water13.htm](http://www.il.mahidol.ac.th.14/e-media/ecology/chapter3/chapter3_water13.htm).
- สุรีย์ บุญญาพงษ์ และณัฐพงศ์ วรรณวิจิตร. (2551). คู่มือการจัดการน้ำเสีย. สืบค้นเมื่อวันที่ 14 พฤษภาคม 2558. จาก [http://www.sri.cmu.ac.th/~srilocal/water/page\\_04c.htm](http://www.sri.cmu.ac.th/~srilocal/water/page_04c.htm).
- สำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม. (2538). โครงการศึกษาเพื่อจัดลำดับความสำคัญการจัดการน้ำเสียชุมชน. สืบค้นเมื่อวันที่ 14 พฤษภาคม 2558. จาก <http://www.reo11.net/download/news/polutionwather.pdf>.
- George Tchobanoglous. (2004). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*. Singapore. The McGraw-Hill”



ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

## การวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ

ตารางที่ 1 ข้อมูลจากการทดลองเพื่อหาค่า  $K_La$ 

เวลาของการเติมอากาศ(วินาที)	ค่า DO (มก./ลิตร)	$(C_s - C_0)/(C_s - C_t)$	$\ln[(C_s - C_0)/(C_s - C_t)]$
0	0.1	1	0
20	0.23	1.0172	0.0170
40	0.67	1.0798	0.0768
60	1.17	1.1612	0.1494
80	1.66	1.2537	0.2261

นำข้อมูลจากตารางที่ 1 มาคำนวณหาค่า  $K_La$  โดยเขียนกราฟ ซึ่งมาจากสมการดังนี้(โดยมีการคำนวณทุกค่าเวลาตั้งแต่วินาทีที่ 0 ถึงวินาทีสุดท้ายที่จดบันทึก)

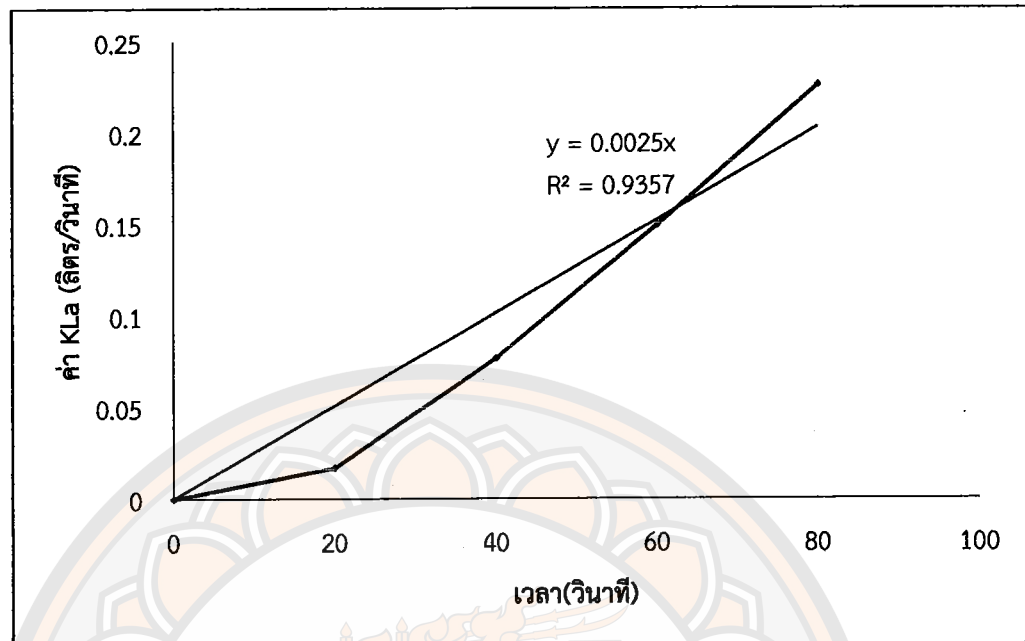
$$K_La = \ln[(C_s - C_0)/(C_s - C_t)]$$

เมื่อ :

 $K_La$  = ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ $C_s$  = ความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจน (ดังตารางที่ 1 ภาคผนวก ข) $C_0$  = ความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำที่เวลา 0 (มิลลิกรัมต่อลิตร) $C_t$  = ความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

โดยจะนำค่า  $\ln[(C_s - C_0)/(C_s - C_t)]$  ของแต่ละช่วงของเวลานำมาสร้างกราฟเพื่อคำนวณหาค่า

 $K_La$



ภาพที่ 1 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ

จากภาพที่ 1 จากการวิเคราะห์หาค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศตามสูตรข้างต้นจะได้ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศเท่ากับ 0.0025 ลิตร/วินาที

## ภาคผนวก ข

ตารางที่ 1 ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายในน้ำที่แปรผันต่ออุณหภูมิและความเค็ม(barometric pressure = 760 mm Hg)<sup>a</sup>

Dissolved-oxygen concentration, mg/L

Temp, °C	Salinity, parts per thousand				
	0	5	10	15	20
20	9.08	8.81	8.56	8.31	8.07
21	8.90	8.64	8.39	8.15	7.91
22	8.73	8.48	8.23	8.00	7.77
23	8.56	8.32	8.08	7.85	7.63
24	8.40	8.16	7.93	7.71	7.49
25	8.24	8.01	7.79	7.57	7.36
26	8.09	7.87	7.65	7.44	7.23
27	7.97	7.73	7.51	7.31	7.10
28	7.81	7.59	7.38	7.18	6.98
29	7.67	7.46	7.26	7.06	6.87
30	7.54	7.33	7.14	6.94	6.75
31	7.41	7.21	7.02	6.83	6.65
32	7.29	7.09	6.90	6.72	6.54
33	7.17	6.98	6.79	6.61	6.44
34	7.05	6.86	6.68	6.51	6.33
35	6.93	6.75	6.58	6.40	6.24
36	6.82	6.65	6.47	6.31	6.14
37	6.72	6.54	6.37	6.21	6.05
38	6.61	6.44	6.28	6.12	5.96
39	6.51	6.34	6.18	6.03	5.87
40	6.41	6.25	6.09	5.94	5.79

<sup>a</sup>ที่มา Waste water Engineering Treatment and Reuse (2004)

ตารางที่ 2 แสดงค่าออกซิเจนละลายในน้ำวินาทีที่ 0-400 ของหัวทรายทรงกระบอกเล็ก

เวลา	ปริมาณ DO ( Dissolved Oxygen)				
	ก่อนใช้ งาน	หลังใช้ งาน 1 สัปดาห์	หลังใช้ งาน 3 สัปดาห์	หลังใช้ งาน 5 สัปดาห์	หลังใช้ งาน 6 สัปดาห์
0	0.31	0.55	0.26	0.19	0.40
20	0.43	0.75	0.50	0.37	0.66
40	0.81	1.17	0.97	0.85	1.12
60	1.18	1.53	1.43	1.25	1.56
80	1.54	1.86	1.87	1.65	2.01
100	1.87	2.18	2.26	2.02	2.44
120	2.18	2.48	2.64	2.36	2.79
140	2.47	2.88	2.99	2.65	3.10
160	2.73	3.02	3.32	2.92	3.41
180	2.98	3.26	3.61	3.17	3.68
200	3.20	3.51	3.89	3.42	3.92
220	3.41	3.72	4.13	3.66	4.14
240	3.60	3.91	4.36	3.87	4.32
260	3.79	4.09	4.58	4.08	4.47
280	3.95	4.25	4.76	4.23	4.65
300	4.09	4.40	4.93	4.37	4.82
320	4.24	4.53	5.09	4.50	4.93
340	4.36	4.66	5.24	4.65	5.10
360	4.48	4.78	5.38	4.78	5.20
380	4.61	4.89	5.49	4.90	5.36
400	4.70	4.98	5.61	5.01	5.42
อุณหภูมิ °C	29	30	28	27	28

ตารางที่ 3 แสดงค่าออกซิเจนละลายในน้ำวินาทีที่ 0-400 ของหัวทรายทรงกระบอกใหญ่

เวลา	ปริมาณ DO ( Dissolved Oxygen)				
	ก่อนใช้ งาน	หลังใช้ งาน 1 สัปดาห์	หลังใช้ งาน 3 สัปดาห์	หลังใช้ งาน 5 สัปดาห์	หลังใช้ งาน 6 สัปดาห์
0	0.24	0.51	0.58	1.00	0.37
20	0.35	0.77	0.78	1.02	0.56
40	0.62	1.16	1.17	1.09	1.10
60	0.95	1.57	1.61	1.16	1.70
80	1.29	1.94	2.04	1.24	2.15
100	1.60	2.29	2.43	1.32	2.52
120	1.92	2.58	2.79	1.42	2.92
140	2.19	2.91	3.12	1.52	3.27
160	2.43	3.20	3.41	1.63	3.60
180	2.66	3.42	3.71	1.76	3.88
200	2.88	3.68	3.94	1.88	4.13
220	3.08	3.88	4.17	2.00	4.35
240	3.27	4.08	4.40	2.12	4.58
260	3.45	4.23	4.55	2.26	4.78
280	3.60	4.41	4.75	2.38	4.94
300	3.74	4.57	4.89	2.47	5.12
320	3.87	4.70	5.08	2.58	5.26
340	4.01	4.84	5.22	2.69	5.41
360	4.11	4.95	5.32	2.82	5.52
380	4.22	5.06	5.43	2.98	5.62
400	4.32	5.17	5.51	3.15	5.75
อุณหภูมิ °C	30	29	28	28	28

ตารางที่ 4 แสดงค่าออกซิเจนละลายในน้ำวินาทีที่ 0-400 ของหัวทรายทรงกลมเล็ก

เวลา	ปริมาณ DO ( Dissolved Oxygen)				
	ก่อนใช้ งาน	หลังใช้ งาน 1 สัปดาห์	หลังใช้ งาน 3 สัปดาห์	หลังใช้ งาน 5 สัปดาห์	หลังใช้ งาน 6 สัปดาห์
0	0.30	0.20	0.79	0.54	0.44
20	0.42	0.48	1.04	0.86	0.66
40	0.76	0.92	1.50	1.30	1.17
60	1.11	1.31	1.84	1.71	1.62
80	1.44	1.67	2.14	2.14	2.03
100	1.72	1.99	2.46	2.55	2.42
120	2.01	2.31	2.75	2.88	2.82
140	2.30	2.59	3.03	3.19	3.18
160	2.59	2.84	3.29	3.47	3.47
180	2.83	3.08	3.56	3.71	3.76
200	3.04	3.32	3.80	3.93	4.03
220	3.25	3.53	4.00	4.12	4.22
240	3.44	3.71	4.21	4.29	4.45
260	3.60	3.90	4.42	4.47	4.65
280	3.76	4.07	4.56	4.64	4.85
300	3.93	4.22	4.70	4.77	5.01
320	4.06	4.36	4.86	4.88	5.14
340	4.18	4.47	5.00	5.00	5.27
360	4.29	4.59	5.11	5.14	5.41
380	4.40	4.72	5.25	5.22	5.50
400	4.50	4.82	5.36	5.34	5.63
อุณหภูมิ °C	30	29	28	29	28

ตารางที่ 5 แสดงค่าออกซิเจนละลายในน้ำวินาทีที่ 0-400 ของหัวทรายทรงกลมใหญ่

เวลา	ปริมาณ DO ( Dissolved Oxygen)				
	ก่อนใช้	หลังใช้	หลังใช้	หลังใช้	หลังใช้
	งาน	งาน 1	งาน 3	งาน 5	งาน 6
		สัปดาห์	สัปดาห์	สัปดาห์	สัปดาห์
0	0.33	0.36	0.49	0.32	0.50
20	0.43	0.58	0.62	0.55	0.63
40	0.75	1.01	1.10	1.09	1.17
60	1.14	1.38	1.58	1.60	1.79
80	1.47	1.78	2.04	2.05	2.26
100	1.81	2.16	2.52	2.47	2.61
120	2.14	2.48	2.86	2.87	3.02
140	2.41	2.78	3.22	3.19	3.36
160	2.66	3.07	3.52	3.48	3.70
180	2.91	3.33	3.79	3.75	3.98
200	3.12	3.58	4.07	4.00	4.23
220	3.32	3.81	4.29	4.29	4.47
240	3.49	4.03	4.49	4.49	4.68
260	3.67	4.22	4.70	4.65	4.89
280	3.82	4.38	4.86	4.82	5.03
300	3.96	4.55	5.01	4.96	5.20
320	4.10	4.69	5.16	5.08	5.35
340	4.22	4.83	5.31	5.20	5.51
360	4.32	4.95	5.40	5.31	5.60
380	4.42	5.06	5.52	5.41	5.70
400	4.50	5.15	5.65	5.48	5.81
อุณหภูมิ °C	30	27	28	28	28

ค่าเปรียบเทียบทางสถิติของหัวทรายทรงกระบอกเล็ก

ตารางที่ 6 แสดงผลการเปรียบเทียบเชิงซ้อนค่า  $K_a$  ของหัวทรายทรงกระบอกเล็กด้วยวิธี LSD

Multiple Comparisons

$K_a$

LSD

(I) สัปดาห์	(J) สัปดาห์	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Pre	week 1	.0000000	.0000816	1.000	-.000182	.000182
	week 3	.0000000	.0000816	1.000	-.000182	.000182
	week 5	-.0006000*	.0000816	.000	-.000782	-.000418
	week 6	-.0006000*	.0000816	.000	-.000782	-.000418
week 1	Pre	.0000000	.0000816	1.000	-.000182	.000182
	week 3	.0000000	.0000816	1.000	-.000182	.000182
	week 5	-.0006000*	.0000816	.000	-.000782	-.000418
	week 6	-.0006000*	.0000816	.000	-.000782	-.000418
week 3	Pre	.0000000	.0000816	1.000	-.000182	.000182
	week 1	.0000000	.0000816	1.000	-.000182	.000182
	week 5	-.0006000*	.0000816	.000	-.000782	-.000418
	week 6	-.0006000*	.0000816	.000	-.000782	-.000418
week 5	Pre	.0006000*	.0000816	.000	.000418	.000782
	week 1	.0006000*	.0000816	.000	.000418	.000782
	week 3	.0006000*	.0000816	.000	.000418	.000782
	week 6	.0000000	.0000816	1.000	-.000182	.000182
week 6	Pre	.0006000*	.0000816	.000	.000418	.000782
	week 1	.0006000*	.0000816	.000	.000418	.000782
	week 3	.0006000*	.0000816	.000	.000418	.000782
	week 5	.0000000	.0000816	1.000	-.000182	.000182

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ค่าเปรียบเทียบทางสถิติของหัวทรายทรงกระบอกใหญ่

ตารางที่ 7 แสดงผลการเปรียบเทียบเชิงซ้อนค่า  $K_a$  ของหัวทรายทรงกระบอกใหญ่ด้วยวิธี LSD

Multiple Comparisons

$K_a$

LSD

(I) สัปดาห์	(J) สัปดาห์	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Pre	week 1	-.0005667*	.0001520	.004	-.000905	-.000228
	week 3	-.0008667*	.0001520	.000	-.001205	-.000528
	week 5	-.0007333*	.0001520	.001	-.001072	-.000395
	week 6	-.0010333*	.0001520	.000	-.001372	-.000695
week 1	Pre	.0005667*	.0001520	.004	.000228	.000905
	week 3	-.0003000	.0001520	.077	-.000639	.000039
	week 5	-.0001667	.0001520	.299	-.000505	.000172
	week 6	-.0004667*	.0001520	.012	-.000805	-.000128
week 3	Pre	.0008667*	.0001520	.000	.000528	.001205
	week 1	.0003000	.0001520	.077	-.000039	.000639
	week 5	.0001333	.0001520	.401	-.000205	.000472
	week 6	-.0001667	.0001520	.299	-.000505	.000172
week 5	Pre	.0007333*	.0001520	.001	.000395	.001072
	week 1	.0001667	.0001520	.299	-.000172	.000505
	week 3	-.0001333	.0001520	.401	-.000472	.000205
	week 6	-.0003000	.0001520	.077	-.000639	.000039
week 6	Pre	.0010333*	.0001520	.000	.000695	.001372
	week 1	.0004667*	.0001520	.012	.000128	.000805
	week 3	.0001667	.0001520	.299	-.000172	.000505
	week 5	.0003000	.0001520	.077	-.000039	.000639

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ค่าเปรียบเทียบทางสถิติของหัวทรายทรงกลมเล็ก

ตารางที่ 8 แสดงผลการเปรียบเทียบเชิงซ้อนค่า  $K_{1a}$  ของหัวทรายทรงกลมเล็กด้วยวิธี LSD

Multiple Comparisons

$K_{1a}$

LSD

(I) สัปดาห์	(J) สัปดาห์	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Pre	week 1	-.0003000	.0003596	.424	-.001101	.000501
	week 3	-.0003000	.0003596	.424	-.001101	.000501
	week 5	-.0006333	.0003596	.109	-.001435	.000168
	week 6	-.0006333	.0003596	.109	-.001435	.000168
week 1	Pre	.0003000	.0003596	.424	-.000501	.001101
	week 3	.0000000	.0003596	1.000	-.000801	.000801
	week 5	-.0003333	.0003596	.376	-.001135	.000468
	week 6	-.0003333	.0003596	.376	-.001135	.000468
week 3	Pre	.0003000	.0003596	.424	-.000501	.001101
	week 1	.0000000	.0003596	1.000	-.000801	.000801
	week 5	-.0003333	.0003596	.376	-.001135	.000468
	week 6	-.0003333	.0003596	.376	-.001135	.000468
week 5	Pre	.0006333	.0003596	.109	-.000168	.001435
	week 1	.0003333	.0003596	.376	-.000468	.001135
	week 3	.0003333	.0003596	.376	-.000468	.001135
	week 6	.0000000	.0003596	1.000	-.000801	.000801
week 6	Pre	.0006333	.0003596	.109	-.000168	.001435
	week 1	.0003333	.0003596	.376	-.000468	.001135
	week 3	.0003333	.0003596	.376	-.000468	.001135
	week 5	.0000000	.0003596	1.000	-.000801	.000801

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ค่าเปรียบเทียบทางสถิติของหัวทรายทรงกลมใหญ่

ตารางที่ 9 แสดงผลการเปรียบเทียบเชิงซ้อนค่า  $K_{La}$  ของหัวทรายทรงกลมใหญ่ด้วยวิธี LSD

Multiple Comparisons

$K_{La}$

LSD

(I) สัปดาห์	(J) สัปดาห์	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Pre	week 1	-.0004000*	.0001247	.009	-.000678	-.000122
	week 3	-.0008667*	.0001247	.000	-.001145	-.000589
	week 5	-.0008667*	.0001247	.000	-.001145	-.000589
	week 6	-.0011000*	.0001247	.000	-.001378	-.000822
week 1	Pre	.0004000*	.0001247	.009	.000122	.000678
	week 3	-.0004667*	.0001247	.004	-.000745	-.000189
	week 5	-.0004667*	.0001247	.004	-.000745	-.000189
	week 6	-.0007000*	.0001247	.000	-.000978	-.000422
week 3	Pre	.0008667*	.0001247	.000	.000589	.001145
	week 1	.0004667*	.0001247	.004	.000189	.000745
	week 5	.0000000	.0001247	1.000	-.000278	.000278
	week 6	-.0002333	.0001247	.091	-.000511	.000045
week 5	Pre	.0008667*	.0001247	.000	.000589	.001145
	week 1	.0004667*	.0001247	.004	.000189	.000745
	week 3	.0000000	.0001247	1.000	-.000278	.000278
	week 6	-.0002333	.0001247	.091	-.000511	.000045
week 6	Pre	.0011000*	.0001247	.000	.000822	.001378
	week 1	.0007000*	.0001247	.000	.000422	.000978
	week 3	.0002333	.0001247	.091	-.000045	.000511
	week 5	.0002333	.0001247	.091	-.000045	.000511

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ 10 น้ำหนักของหัวทรายก่อนใช้งานและหลังใช้งาน(มิลลิกรัม)

ประเภทหัวทราย	ก่อนใช้งาน	หลังใช้งาน
หัวทรายทรงกระบอกเล็ก	12.2232	12.1505
หัวทรายทรงกระบอกใหญ่	84.4418	84.2685
หัวทรายทรงกลมเล็ก	14.4321	14.4073
หัวทรายทรงกลมใหญ่	108.0600	107.7122



## ภาคผนวก ค



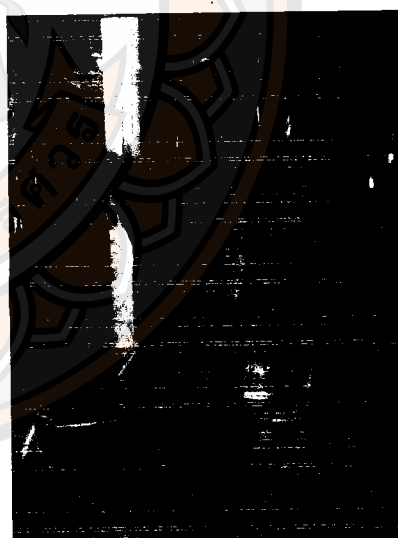
(ก) หัวทรายทรงกระบอกใหญ่



(ข) หัวทรายทรงกระบอกเล็ก



(ค) หัวทรายทรงกลมใหญ่



(ง) หัวทรายทรงกลมเล็ก

ภาพที่ 1 แสดงอากาศที่ออกจากหัวทราย(ก่อนการใช้งาน)



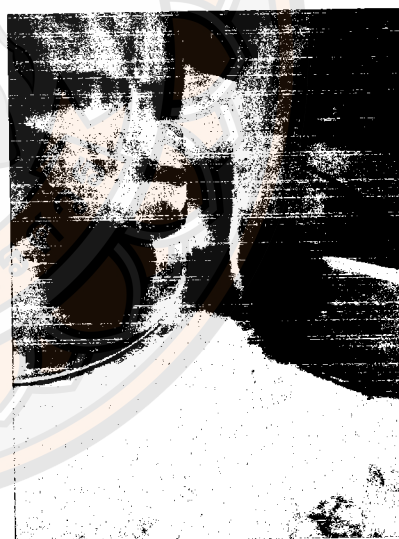
(ก) หัวทรายทรงกระบอกใหญ่



(ข) หัวทรายทรงกระบอกเล็ก

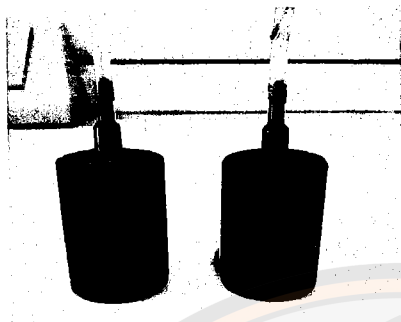


(ค) หัวทรายทรงกลมใหญ่

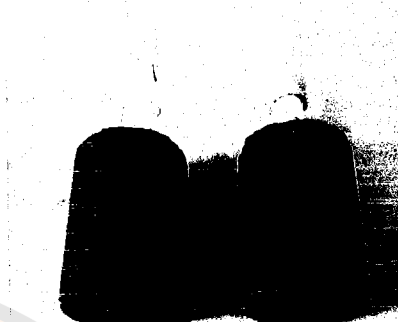


(ง) หัวทรายทรงกลมเล็ก

ภาพที่ 2 แสดงอากาศที่ออกจากหัวทรายก่อนใช้งานและหลังใช้ (ทางด้านซ้ายของภาพจะเป็นหัวทรายก่อนใช้งาน ทางด้านขวาจะเป็นหัวทรายที่ใช้งาน 6 สัปดาห์)



(ก) หัวทรายทรงกระบอกใหญ่



(ข) หัวทรายทรงกระบอกเล็ก



(ค) หัวทรายทรงกลมใหญ่



(ง) หัวทรายทรงกลมเล็ก

ภาพที่ 3 แสดงสีของหัวทรายก่อนใช้งานซ้ายมือของภาพและหลังใช้งานขวามือของภาพ