

การกำจัดสารละลายลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตและออร์โธฟอสเฟต
ด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะลิสต์

REMOVAL OF LINEAR ALKYL BENZENESULFONATE
AND ORTHOPHOSPHATE SOLUTIONS
BY TITANIUM DIOXIDE PHOTOCATALYST



วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาดำเนินการ
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560
KMITL-2017-SC-M-016-022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

REMOVAL OF LINEAR ALKYL BENZENESULFONATE
AND ORTHOPHOSPHATE SOLUTIONS BY
TITANIUM DIOXIDE PHOTOCATALYST



A THESIS SUBMITTED IN FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF SCIENCE IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY
DEPARTMENT OF CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017
KMITL-2017-SC-M-016-022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดสารละลายลิเทียมแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตและออร์โธ-ฟอสเฟตด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะลิสต์
ชื่อนักศึกษา	นายอานนท์ จรรย์นรเศรษฐ์
รหัสประจำตัว	57605041
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณี จรรยาพูน

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการกำจัดสารละลายลิเทียมแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต (LAS) และออร์โธ-ฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะลิสต์ โดยใช้ตัวปฏิกรณ์ที่บรรจุหลอดยูวีซี (254 นาโนเมตร) 18 วัตต์ จำนวน 4 หลอด ศึกษาที่สภาวะอุณหภูมิห้อง เปรียบเทียบกับวิธีดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์ และวิธีโฟโตไลซิสด้วยรังสียูวีซี โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสาร LAS ด้วยวิธีไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะลิสต์ ได้แก่ พีเอช (2, 4, 7 และไม่ปรับพีเอช) ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ (100, 300 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร) ระยะเวลาสัมผัสรังสียูวีซี (5, 10, 15, 30 และ 60 นาที) และความเข้มข้นเริ่มต้นของ LAS (10, 20, 40, 60 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร) วิเคราะห์หาปริมาณ LAS ด้วยวิธีหาความเข้มข้นของสารที่ไวต่อเมทิลีนบลู และวิเคราะห์ปริมาณออร์โธฟอสเฟตโดยวิธีกรดแอสคอร์บิก วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของสาร LAS หลังจากผ่านการกำจัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะลิสต์ที่สภาวะเหมาะสมด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ ศึกษาจลนศาสตร์ทางเคมีในการกำจัดสาร LAS ศึกษาผลของออร์โธ-ฟอสเฟตต่อประสิทธิภาพการกำจัด LAS รวมทั้งศึกษาประสิทธิภาพการกำจัด LAS ออร์โธฟอสเฟตและซีไอดีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมซักล้างโดยใช้สภาวะเหมาะสมที่ได้จากการทดลอง จากผลการทดลองพบว่า วิธีไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะลิสต์สามารถกำจัด LAS ได้ดีที่สุด โดยสภาวะเหมาะสมในการกำจัด LAS คือ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น LAS 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 5.5 (ไม่ปรับพีเอช) ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลา 60 นาที สามารถกำจัด LAS ได้ 83.20 ± 2.700 เปอร์เซ็นต์ ผลิตภัณฑ์หลังจากกำจัด LAS ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์จะได้สายโซ่ไฮโดรคาร์บอน กรดคาร์บอกซิลิก วงอะโรมาติก และซัลเฟต โดยจลนศาสตร์ทางเคมีของการกำจัดสาร LAS เป็นปฏิกิริยาอันดับสอง มีค่าคงที่เท่ากับ $0.0031 \text{ mg}^{-1} \text{ L min}^{-1}$ ค่าครึ่งชีวิต 16.13 นาที ส่วนวิธีดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถกำจัด LAS ได้ 13.31 ± 1.034 เปอร์เซ็นต์ และวิธีโฟโตไลซิสด้วยรังสียูวีซีสามารถกำจัด LAS ได้เพียงเล็กน้อย การกำจัดออร์โธฟอสเฟตที่ความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้มข้น 1 มิลลิกรัมฟอสเฟตต่อลิตร ที่พีเอช 5.82 โดยใช้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และเวลาสัมผัส 120 นาที พบว่า วิธีกำจัดออร์โธฟอสเฟตด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะลิสต์สามารถกำจัดได้ 53.92 ± 5.348 เปอร์เซ็นต์ ส่วนวิธีดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถกำจัดออร์โธฟอสเฟตได้ 56.59 ± 7.788 เปอร์เซ็นต์ และวิธีโฟโตไลซิสด้วยรังสียูวีซีสามารถกำจัดออร์โธฟอสเฟตได้เพียงเล็กน้อย โดยพบว่าออร์โธฟอสเฟตจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัด LAS จากผลการกำจัดสาร LAS ออร์โธเฟต และซีไอดีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมซักล้างด้วยวิธีไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะลิสต์พบว่า สามารถกำจัดได้ 51.99 ± 7.363 . เปอร์เซ็นต์, 45.98 ± 4.847 เปอร์เซ็นต์ และ 16.00 ± 0.000 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

คำสำคัญ : ปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิส ไทเทเนียมไดออกไซด์ ลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต ออร์โธฟอสเฟต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Removal of Linear Alkylbenzenesulfonate and Orthophosphate Solutions by Titanium Dioxide Photocatalyst
Student Name	Mr. Anon Jariyanorasade
Student ID	57605041
Degree	Master of Science (Environmental Chemistry)
Department	Chemistry
Year	2017
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Suwannee Junyapoon

Abstract

Degradations of linear alkylbenzenesulfonate (LAS) and orthophosphate in synthetic solutions by titanium dioxide photocatalyst were studied. Its removal efficiency was compared with those of adsorption on TiO_2 and photolysis with UV-C methods. A batch experiment was carried out in a homemade photocatalytic reactor containing 4x18 watt UV-C lamps (254 nm) under room temperature. Factors influencing the photocatalytic degradation of LAS were investigated including pH of the solution (2, 4, 7, non-adjust), TiO_2 concentrations ($100, 300, 500 \text{ mg L}^{-1}$), irradiation times (5, 10, 15, 30, 60 mins), initial concentrations of LAS ($10, 20, 40, 60, 100 \text{ mg L}^{-1}$). Concentrations of LAS and orthophosphate were measured using Methylene Blue Active Substances and Ascorbic Acid Methods, respectively. Intermediate products after photocatalysis under the optimum conditions of degradation were analyzed using GC-MS. The chemical kinetic on LAS removal was studied. The effect of orthophosphate on the degradation of LAS was examined. The removal efficiencies of LAS, orthophosphate and COD in industrial laundry wastewater were also examined under the optimum conditions. The experimental results showed that titanium dioxide photocatalyst was the suitable method for LAS degradation. The removal efficiency of LAS in the synthetic solution by titanium dioxide photocatalyst reached $83.20 \pm 2.700 \%$ at initial LAS concentration 20 mg L^{-1} , non-adjust pH (pH 5.5), TiO_2 concentration 100 mg L^{-1} with irradiation time 60 mins. Intermediate products detected were alkyl long chains, carboxylic acids, aromatic rings and sulfate. The

removal of LAS follows the second order kinetic with rate constant (K) $0.0031 \text{ mg}^{-1} \text{ L min}^{-1}$ and half-life 16.13 mins. $13.31 \pm 1.034 \%$ of LAS was adsorbed on TiO_2 whereas only small amount of LAS was removed by photolysis with UV-C. For orthophosphate removal, 1 mg L^{-1} of orthophosphate solution at pH 5.82 was studied using $500 \text{ mg L}^{-1} \text{ TiO}_2$ with contact time of 120 mins. The amount of $56.59 \pm 7.788 \%$ orthophosphate was degraded by titanium dioxide photocatalyst while $53.92 \pm 5.348 \%$ of orthophosphate was adsorbed on TiO_2 . Only small amount of orthophosphate was degraded by photolysis with UV-C. It was found that orthophosphate affected the degradation of LAS by titanium dioxide photocatalyst. The removal efficiencies of LAS, orthophosphates and COD in industrial laundry wastewater were $51.99 \pm 7.363 \%$, $45.98 \pm 4.847 \%$ and $16.00 \pm 0.000 \%$, respectively.

Keywords: Linear alkylbenzenesulfonate, Orthophosphate, Photocatalysis, TiO_2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบคุณพระคุณ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่สนับสนุนทุนการศึกษาในการเรียน

ขอขอบคุณพระคุณ ผศ.ดร. สุวรรณีย์ จรรยาพูน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษาในด้านต่าง ๆ ได้แก่ การวางแผนการทดลอง การเขียนบทความวิจัย การเขียนเล่มวิทยานิพนธ์ การแก้ไขปัญหาในด้านต่าง ๆ ตลอดจนสนใจในการเรียนระดับบัณฑิตศึกษา

ขอขอบคุณพระคุณ ผศ.ดร. อูสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ ผศ. กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ และ ดร. ชวาลย์ ศรีวงษ์ ที่ให้คำปรึกษา และแนะนำการแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ดร. เสาวภาค สุขตระกูลเวช อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้คำปรึกษา และแนะนำการแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี เจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ภาควิชาเคมี ที่ช่วยเหลือในการเบิกอุปกรณ์ และอำนวยความสะดวกในการติดต่อด้านเอกสาร

ขอขอบพระคุณ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อนุเคราะห์อนุญาตให้ใช้ห้องปฏิบัติการนาโนเทคโนโลยี

ขอขอบพระคุณ บริษัท ซินโอดีวูดสาหกรรม จำกัด ที่เอื้อเฟื้อตัวอย่างน้ำเสีย

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่ ๆ เพื่อน ๆ ที่ให้การสนับสนุน และให้ความช่วยเหลือ ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

นายอานนท์ จรรย์นเรศสรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 นิยามของน้ำเสีย.....	4
2.2 ประเภทของน้ำเสีย.....	4
2.2.1 การแบ่งประเภทของน้ำเสียตามแหล่งกำเนิด.....	4
2.2.2 การแบ่งประเภทของน้ำเสียตามลักษณะสมบัติของสิ่งสกปรก.....	6
2.3 น้ำเสียชุมชน.....	5
2.3.1 ลักษณะน้ำเสียชุมชน.....	5
2.3.2 การบำบัดน้ำเสียชุมชน.....	6
2.3.3 วิธีการบำบัดน้ำเสียชุมชน.....	7
2.4 สารลดแรงตึงผิว.....	7
2.5 สารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต.....	9
2.5.1 ผลกระทบของสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตในน้ำเสีย.....	10
2.6 ฟอสฟอรัส.....	11
2.6.1 ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน.....	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 วิธีการบำบัดสารลิเนียร์แอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตในน้ำเสียชุมชน.....	15
2.7.1 วิธีการบำบัดสารลิเนียร์แอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต.....	15
2.7.2 วิธีการกำจัดสารประกอบฟอสเฟต.....	16
2.8 ปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิส.....	16
2.8.1 ชนิดของโฟโตคะตะไลซิส.....	17
2.8.2 โทเทเนียมไดออกไซด์.....	17
2.8.3 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิส.....	19
2.8.4 กลไกการเกิดปฏิกริยา.....	19
2.8.5 การประยุกต์ใช้ปฏิกริยาโทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะไลซิส.....	20
2.9 จลนพลศาสตร์เคมี.....	21
2.9.1 อัตราการเกิดปฏิกริยา.....	21
2.9.2 กฎอัตรา.....	22
2.9.3 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกริยา.....	26
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	31
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์.....	31
3.1.1 สารเคมี.....	31
3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	33
3.1.3 น้ำเสียอุตสาหกรรมซักล้าง.....	34
3.2 วิธีการทดลอง.....	34
3.2.1 การสร้างตู้ปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส.....	34
3.2.2 วิเคราะห์สมบัติของอนุภาคนาโนโทเทเนียมไดออกไซด์.....	34
3.2.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์.....	35
3.2.4 การวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมซักล้าง.....	35
3.2.5 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายลิเนียร์แอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต (LAS) โดยวิธีดูดซับบนโทเทเนียมไดออกไซด์ (Adsorption on TiO ₂), โฟโตไลซิสด้วยรังสียูวีซี (Photolysis with UV-C) และวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยโทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี (TiO ₂ /UV-C).....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.6 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต (LAS) โดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี ($\text{TiO}_2/\text{UV-C}$).....	37
3.2.7 จลนพลศาสตร์ทางเคมีของการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต โดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี ($\text{TiO}_2/\text{UV-C}$).....	39
3.2.8 ศึกษาผลิตภัณฑ์ของสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตหลังจากผ่านการกำจัดโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี ($\text{TiO}_2/\text{UV-C}$).....	40
3.2.9 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารออร์โธฟอสเฟต โดยวิธีดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์ (Adsorption on TiO_2), โฟโตไลซิสด้วยรังสียูวีซี (Photolysis with UV-C) และวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี ($\text{TiO}_2/\text{UV-C}$).....	41
3.2.10 การกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตและออร์โธฟอสเฟตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี ($\text{TiO}_2/\text{UV-C}$).....	43
3.3 การกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต และสารออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมซักล้างโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี ($\text{TiO}_2/\text{UV-C}$).....	43
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	44
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	45
4.1 คุณลักษณะของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	45
4.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต โดยวิธีดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์ วิธีสลายตัวด้วยรังสียูวีซี และวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี.....	47
4.3 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี.....	48

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.1 ผลของค่าพีเอชที่เหมาะสม.....	48
4.3.2 ผลของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสม.....	49
4.3.3 ผลของระยะเวลาในการกำจัดที่เหมาะสม.....	50
4.3.4 ผลของความเข้มข้นของสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตในการกำจัดที่ เหมาะสม.....	52
4.4 จลนพลศาสตร์ทางเคมีของการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตโดยวิธี โฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี.....	53
4.5 ศึกษาผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากผ่านการกำจัดโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียม ไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซีของสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตโดยวิเคราะห์ ด้วยเครื่อง GC-MS.....	55
4.6 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายออร์โธพอสเฟตโดยวิธีดูดซับบน ไทเทเนียมไดออกไซด์ วิธีสลายตัวด้วยรังสียูวีซี และวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วย ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี.....	57
4.7 ผลของความเข้มข้นของออร์โธพอสเฟตต่อการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีน ซัลโฟเนตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี.....	58
4.8 การกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต และออร์โธพอสเฟตในน้ำเสียจาก โรงงานอุตสาหกรรมซักล้างโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ร่วมกับรังสียูวีซี.....	59
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	61
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	61
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	61
เอกสารอ้างอิง.....	63
ภาคผนวก.....	70
ภาคผนวก ก การสร้างกราฟมาตรฐาน.....	71
ภาคผนวก ข การคำนวณ.....	76
ภาคผนวก ค. ข้อมูลผลการทดลอง.....	78
ภาคผนวก ง. สถิติ.....	94
ประวัติผู้เขียน.....	99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณการใช้สารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต.....	9
2.2 คุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต.....	10
2.3 ปริมาณสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตที่สะสมในสิ่งแวดล้อม.....	11
2.4 ค่าเฉลี่ยความพิษของสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตต่อสัตว์น้ำ.....	11
2.5 ค่ามาตรฐานปริมาณฟอสฟอรัส และฟอสเฟตจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ.....	13
2.6 คุณภาพน้ำของแหล่งน้ำนึ่งที่สำคัญในประเทศไทย.....	15
2.7 ลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	18
3.1 วิธีวิเคราะห์คุณลักษณะเบื้องต้นของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมซักล้าง.....	35
3.2 สภาวะของการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซีด้วยเครื่อง GC-MS.....	40
4.1 ข้อมูลทั่วไปของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	45
4.2 จลนพลศาสตร์ทางเคมีของการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะไลซิส.....	55
4.3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากผ่านการกำจัดโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซีของสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต (LAS).....	56
4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต และออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมซักล้างโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี.....	59
ก 1 ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน LAS	72
ก 2 ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต.....	73
ก 3 ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานซัลเฟต.....	75
ค 1.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต (LAS) โดยวิธีดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์.....	78
ค 1.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตโดยวิธีสลายตัวด้วยรังสียูวีซี (Photolysis with UV-C).....	79
ค 1.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี (Photocatalysis with TiO ₂ /UV).....	80
ค 2.1 ผลของค่าพีเอชต่อการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี.....	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค 2.2 ผลของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี.....	83
ค 2.3 ผลของระยะเวลาต่อการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี.....	84
ค 2.4 ผลของความเข้มข้นของสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตในการกำจัดโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี.....	86
ค 3.1 ผลของจลนพลศาสตร์ทางเคมีของการบำบัดอันดับศูนย์ หนึ่ง และสอง.....	88
ค 4.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตโดยวิธีดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์ (Adsorption on TiO_2)	89
ค 4.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตโดยวิธีโฟโตไลซิสด้วยรังสียูวีซี (Photolysis with UV-C)	90
ค 4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี(Photocatalysis with $TiO_2/UV-C$).....	91
ค 5.1 ผลของประสิทธิภาพการกำจัด LAS โดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี.....	92
ค 5.2 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดออร์โธฟอสเฟตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี.....	92
ค 6.1 ผลของการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตในน้ำเสียจากการซักล้างโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี.....	92
ค 6.2 ผลของการกำจัดสารออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียจากการซักล้างโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี.....	93
ง 1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต (LAS) โดยวิธีดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์ วิธีสลายตัวด้วยรังสียูวีซี และวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี.....	94
ง 2.1 ผลทดสอบสอบทางสถิติของค่าพีเอชที่เหมาะสม.....	95
ง 2.2 ผลทดสอบสอบทางสถิติของค่าปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสม.....	96
ง 2.3 ผลทดสอบสอบทางสถิติของเวลาที่เหมาะสม (60 และ 120 นาที).....	96
ง 2.4 ผลทดสอบสอบทางสถิติของความเข้มข้นของ LAS ที่เหมาะสม.....	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง 3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟต โดยวิธีดูดซับบน ไทเทเนียมไดออกไซด์ วิธีสลายตัวด้วยรังสียูวีซี และวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วย ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี.....	97
ง 4 ประสิทธิภาพการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต และออร์โธฟอสเฟตในน้ำ เสียจากอุตสาหกรรมซักล้างโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับ รังสียูวีซี.....	98



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต.....	9
2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน.....	14
2.3 ปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิส.....	17
2.4 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบรูโพล์ บรัคคิโอต์ และอนาเทส.....	18
2.5 การเปลี่ยนความเข้มข้นของสารตั้งต้น และผลิตภัณฑ์ในปฏิกิริยา.....	21
2.6 กราฟแสดงปฏิกิริยาอันดับศูนย์.....	24
2.7 กราฟปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง.....	25
2.8 กราฟปฏิกิริยาอันดับสอง.....	26
3.1 ตู้ปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส.....	34
4.1 โครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD.....	45
4.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Autosorb-1 (BET).....	46
4.3 การกำจัดสาร LAS ด้วยการดูดซับด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ การสลายตัวด้วยรังสียูวีซี และโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี.....	47
4.4 ผลของค่าพีเอชต่อการกำจัดสาร LAS โดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วย $TiO_2/UV-C$	49
4.5 ผลของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อการกำจัดสาร LAS โดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วย $TiO_2/UV-C$	50
4.6 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการกำจัดสารละลายลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วย $TiO_2/UV-C$ (ก) เปรียบเทียบกับการกำจัด LAS (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ LAS และ SO_4^{2-} ที่ระยะเวลาต่าง ๆ	51
4.7 ผลของความเข้มข้นของ LAS ต่อการกำจัดสารละลายลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วย $TiO_2/UV-C$	52
4.8 จลนพลศาสตร์ทางเคมีของการกำจัด LAS โดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วย $TiO_2/UV-C$	54
4.9 โคโรมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ของ LAS โดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วย $TiO_2/UV-C$ (ก) และโคโรมาโทแกรมของแบลงค์ (ข).....	56
4.10 การกำจัดสารออร์โธฟอสเฟต ด้วยการดูดซับด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ การสลายตัวด้วยรังสียูวีซี และวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี.....	57
4.11 ผลของออร์โธฟอสเฟตต่อการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี.....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก 1 กราฟมาตรฐานลิเนียแอลคิลเบนซีนซิลโฟเนต.....	72
ก 2 กราฟมาตรฐานฟอสเฟต.....	74
ก 3 กราฟมาตรฐานซิลเฟต.....	75



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

LAS	สารลิเควียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต
GC-MS	Gas-Chromatograph/Mass Spectrophotometer
TiO ₂	Titanium dioxide
XRD	X - ray Diffraction
pzc	Point of zero charge
BOD	Biological oxygen demand
COD	Chemical oxygen demand
TOC	Total organic carbon
HPLC	High-performance liquid chromatograph
NMR	Nuclear magnetic resonance spectroscope



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยมีปริมาณน้ำเสียจากแหล่งชุมชนประมาณ 14 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยเฉพาะกรุงเทพมหานครมีปริมาณน้ำเสียประมาณ 2.5 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน ส่วนใหญ่เป็นน้ำเสียจากแหล่งชุมชน 70 เปอร์เซ็นต์ และเป็นน้ำเสียจากพาณิชยกรรม เกษตรกรรม และอุตสาหกรรม 30 เปอร์เซ็นต์ (กรมควบคุมมลพิษ, 2552) ปัจจุบันแหล่งน้ำธรรมชาติได้เป็นแหล่งรองรับน้ำเสียที่มีสารปนเปื้อนต่าง ๆ จำนวนมาก ทำให้ระบบนิเวศแหล่งน้ำเปลี่ยนแปลง และขาดความอุดมสมบูรณ์ ซึ่งสารลดแรงตึงผิวและออร์โธฟอสเฟตเป็นสารที่ก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำที่สำคัญ โดยมีแหล่งกำเนิด ได้แก่ โรงงานอุตสาหกรรมซักล้าง ภาคเกษตรกรรม และภาคครัวเรือน จากการศึกษาพบว่า ในสารซักล้าง ได้แก่ ผงซักฟอก น้ำยาทำความสะอาด มีสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต (LAS) หรือสารลดแรงตึงผิว และออร์โธฟอสเฟตเป็นส่วนประกอบสำคัญ ทำให้น้ำเสียชุมชนมีปริมาณสาร LAS ประมาณ 1 - 18 มิลลิกรัมต่อลิตร (Mungray and Kumar, 2009) และปริมาณออร์โธฟอสเฟตประมาณ 45.28 มิลลิกรัมต่อลิตร (Korsak, 2008; Madigan and Martinko, 2005) น้ำเสียที่มีสาร LAS ปนเปื้อนจะส่งผลให้ระบบนิเวศแหล่งน้ำเสียสมดุล ซึ่งสาร LAS จะสะสมในสิ่งมีชีวิตจำพวกปลา มากที่สุด พบว่าปริมาณสาร LAS 0.02 - 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถทำให้สิ่งมีชีวิตจำพวกปลา สัตว์น้ำ พืชน้ำ แบคทีเรีย และสาหร่าย เกิดอันตรายได้ (Abd El-Gawad, 2014) โดยสิ่งมีชีวิตจำพวก สัตว์น้ำเมื่อได้รับสารดังกล่าวจะเกิดการสูญเสียการควบคุมปริมาณเกลือ และทำลายคลอโรฟิลล์ หรือ เนื้อเยื่อของพืชน้ำ ส่งผลให้เกิดการเจริญเติบโตช้าลง (Savas and Onder, 2006) และแหล่งน้ำ ธรรมชาติที่มีปริมาณไนโตรเจน และฟอสฟอรัสสูงทำให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Dodds and Smith, 2016) ส่งผลให้แพลงก์ตอนพืช และสาหร่ายเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็ว เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Algae bloom การเพิ่มจำนวนของแพลงก์ตอนพืชและสาหร่ายทำให้ความต้องการใช้ออกซิเจนสูงขึ้น นอกจากนี้ แพลงก์ตอนพืชที่ลอยบนผิวน้ำจะบดบังการละลายของออกซิเจนจากอากาศลงสู่แหล่งน้ำ ลดลง ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำลดลง (Lee *et al.*, 2012) การกำจัดสาร LAS ในระบบบำบัดน้ำเสียส่วนมากใช้กระบวนการทางชีวภาพ (Activated sludge) สามารถกำจัดสาร LAS ได้ 99 เปอร์เซ็นต์ภายในระยะเวลา 20 วัน (León *et al.*, 2006) วิธีนี้ต้องใช้ความเข้มข้นของสาร ต่ำๆ และใช้ระยะเวลาานาน และการกำจัดฟอสเฟตจะใช้กระบวนการทางกายภาพ กระบวนการทาง เคมี และกระบวนการทางชีวภาพ (Strom, 2006) ซึ่งการตกตะกอนทางเคมีเป็นวิธีที่นิยมใช้ แต่วิธีนี้มี ค่าใช้จ่ายสูง และมีตะกอนร่วมเกิดขึ้น ส่วนวิธีการบำบัดทางชีวภาพมีค่าใช้จ่ายต่ำ แต่ประสิทธิภาพ การกำจัดประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการตกตะกอนทางเคมี และการบำบัดทางชีวภาพไม่เหมาะสม ในการกำจัดสารที่ความเข้มข้นต่ำ (Alshameri *et al.*, 2014) ดังนั้น กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Advance oxidation processes) จึงเป็นทางเลือกในการกำจัดสาร LAS และออร์โธพอสเฟต โดยวิธีนี้จะใช้ตัวออกซิไดซ์ แสงอัลตราไวโอเล็ต และตัวเร่งปฏิกิริยา ในการสร้างอนุมูลอิสระ ได้แก่ ไฮดรอกซิล และซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน ซึ่งอนุมูลอิสระจะสลายสารอินทรีย์เกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (Xie *et al.*, 2013) วิธีการนี้สามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่ความเข้มข้นต่ำได้ โดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจัดเป็นกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงวิธีหนึ่งที่ใช้อย่างแพร่หลาย โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เนื่องจากมีราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษ ความสามารถในการละลายต่ำ และมีความเสถียรสูง แต่ไทเทเนียมไดออกไซด์ มีค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (band gap) ประมาณ 3.2 โวลต์ จึงต้องใช้พลังงานแสงในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ต จากกลไกปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจะเกิดที่ผิวของสารกึ่งตัวนำที่มี h^+ (Positive hole) จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) และน้ำ เกิดเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH^\bullet) ส่วนที่ผิวสารกึ่งตัวนำที่มีอิเล็กตรอนจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนที่ดูดติดบนผิวสารกึ่งตัวนำ เกิดเป็นอนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน (O_2^\bullet) ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ได้ทุกชนิด เช่น สารประกอบพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน สารประกอบพอลิคลอรีเนตเตตไบฟีนิล และสารอินทรีย์ระเหยง่าย เป็นต้น (Sima and Hasal, 2013)

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสม ประสิทธิภาพ และจลนศาสตร์ทางเคมีในการกำจัดสารละลายลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต (LAS) และออร์โธพอสเฟตด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะลิสต์ โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัด ได้แก่ พีเอช ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ ระยะเวลาการกำจัด และความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร LAS ศึกษาผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังจากการกำจัด รวมทั้งศึกษาจลนศาสตร์ทางเคมีเพื่อใช้เป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาน้ำเสียที่มีสาร LAS และออร์โธพอสเฟตปนเปื้อนในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสม และประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต และออร์โธพอสเฟตด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะลิสต์
2. เพื่อศึกษาจลนศาสตร์ทางเคมีในการกำจัดสารละลายลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะลิสต์
3. เพื่อศึกษาผลิตภัณฑ์ของสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตหลังจากกำจัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะลิสต์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. วิเคราะห์สมบัติทั่วไปของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้แก่ โครงสร้างผลึกทางเคมีด้วยเครื่อง X-ray Diffraction (XRD) พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุน ด้วยเครื่อง Autosorp-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วิเคราะห์คุณลักษณะเบื้องต้นของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมซักล้าง ได้แก่ ค่าพีเอช ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) ด้วยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด สารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต (LAS) ด้วยวิธีหาความเข้มข้นของสารที่ไวต่อเมทิลีนบลู และออร์โธฟอสเฟตด้วยวิธีกรดแอสคอร์บิก

3. เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต โดยวิธีดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์ โฟโตไลซิสด้วยรังสียูวีซี และไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะลิสต์

4. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสารละลายลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะลิสต์

4.1 ศึกษาผลของพีเอชต่อการกำจัด โดยแปรค่าพีเอช เป็น 2, 4, 7 และไม่ปรับพีเอช

4.2 ศึกษาผลของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยแปรค่าปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 100, 300 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.3 ศึกษาระยะเวลาสัมผัสแสงยูวีซี โดยแปรค่าระยะเวลา เป็น 5, 10, 15, 30, 60 และ 120 นาที

4.4 ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตที่ความเข้มข้น 10, 20, 40, 60 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

5. ศึกษาจลนศาสตร์ทางเคมีในการกำจัดสารละลายลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต ที่สภาวะที่ได้จากการทดลองโดยแปรค่าระยะเวลาสัมผัสแสงยูวีซีที่ 1, 3, 5, 10, 15, 30 และ 60 นาที

6. วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตหลังจากผ่านการกำจัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะลิสต์ ด้วยเครื่อง GC-MS

7. เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารออร์โธฟอสเฟต โดยวิธีดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์ โฟโตไลซิสด้วยรังสียูวีซี และไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะลิสต์

8. ศึกษาผลของสารออร์โธฟอสเฟตต่อการกำจัดสาร LAS ด้วยวิธีไทเทเนียมไดออกไซด์-โฟโตคะตะลิสต์ โดยแปรค่าความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต 1 และ 10 มิลลิกรัมฟอสเฟตต่อลิตร

9. นำสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองมาประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมซักล้าง เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต ออร์โธฟอสเฟต และค่าซีโอดี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับองค์ความรู้ในการกำจัดสารละลายลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต และสารออร์โธฟอสเฟตด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะลิสต์

2. ลดมลพิษทางน้ำ

3. สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจริง

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 นิยามของน้ำเสีย

น้ำเสีย (Wastewater) หมายถึง น้ำที่มีสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ จนกระทั่งเป็นน้ำที่ไม่เป็นที่ต้องการ และน่ารังเกียจ ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ หรือ ถ้าปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติก็ทำให้คุณภาพน้ำเปลี่ยนแปลงไป (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

2.2 ประเภทของน้ำเสีย

ประเภทของน้ำเสียสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

2.2.1 การแบ่งประเภทตามแหล่งกำเนิดของน้ำเสีย

วิธีนี้เป็นที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากทำให้ทราบถึงแหล่งที่มาของน้ำเสีย รวมทั้งสิ่งที่ปนเปื้อนในน้ำเสียด้วย (สภาวิศวกร, 2559) สามารถแบ่งน้ำเสียได้เป็น 3 ประเภท คือ

1) น้ำเสียชุมชน (Domestic wastewater) หรือน้ำโสโครก (Sewage) เป็นน้ำที่มาจากชุมชน บ้านเรือน ที่พักอาศัย อาคาร ร้านค้า ภัตตาคาร และโรงแรม เป็นต้น ประกอบด้วยสารอินทรีย์ และสารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่ละลายน้ำ และไม่ละลายน้ำ นอกจากนี้ ยังมีสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กมากปะปนอยู่ ได้แก่ แบคทีเรีย ไวรัส และโปรโตซัว

2) น้ำเสียเกษตรกรรม (Agricultural wastewater) คือ น้ำเสียที่ปล่อยมาจากกิจกรรมทางการเกษตร หรือปศุสัตว์ น้ำเสียจากปศุสัตว์ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ มาจากเศษอาหารสัตว์ และสิ่งปฏิกูล ซึ่งน้ำเสียส่วนใหญ่จะมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง และมีค่าของแข็งแขวนลอย (Total suspended solids) สูง ส่วนน้ำเสียที่มาจากเกษตรกรรม มีการปนเปื้อนสารเคมี ปุ๋ย ยาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืช เป็นต้น

3) น้ำเสียอุตสาหกรรม (Industrial wastewater) คือ น้ำเสียที่มีการปนเปื้อนสารต่าง ๆ และมีปริมาณของสิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม วัตถุประสงค์ตั้งต้นของกระบวนการผลิต โดยสิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนอาจเป็นสารอินทรีย์ หรือสารอินทรีย์ น้ำเสียอุตสาหกรรมส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการผลิต

2.2.2 การแบ่งประเภทตามชนิดของสิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย

สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ดังนี้

1) น้ำเสียอินทรีย์ (Organic wastewater) คือ น้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ปนเปื้อน ซึ่งจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ ได้แก่ น้ำเสียชุมชน น้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหาร การแปรรูปอาหาร น้ำเสียจากปศุสัตว์ และน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) น้ำเสียอนินทรีย์ (Inorganic wastewater) คือ น้ำเสียที่มีสารอนินทรีย์ปนเปื้อน ซึ่งจุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายได้ ได้แก่ น้ำเสียจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมผลิตสารเคมี อุตสาหกรรมซูปโลหะ และอุตสาหกรรมฟอกย้อม เป็นต้น

2.3 น้ำเสียชุมชน

น้ำเสียชุมชน (Domestic wastewater) หมายถึง น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมการใช้น้ำของผู้ที่อยู่อาศัย ได้แก่ อุปโภค บริโภค การประกอบอาหาร การล้างภาชนะ และการชักล้าง โดยมีแหล่งกำเนิดมาจากอาคาร บ้านเรือน ร้านค้า ตลาดสด ร้านอาหาร และโรงแรม เป็นต้น ซึ่งอัตราการไหลของน้ำเสีย ปริมาณ และลักษณะน้ำเสียที่แตกต่างกันตามกิจกรรมต่าง ๆ โดยปริมาณน้ำเสียที่ปล่อยทิ้งจากบ้านเรือนมีประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณน้ำที่ใช้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

2.3.1 คุณลักษณะน้ำเสียชุมชน

น้ำเสียชุมชนมีองค์ประกอบต่าง ๆ (กรมควบคุมมลพิษ, 2545) ดังนี้

1) สารอินทรีย์ (Organic compounds) ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมันที่ได้จากเศษอาหารต่าง ๆ ซึ่งสามารถย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจน ทำให้ออกซิเจนละลายน้ำ (dissolved oxygen) ลดลง จึงเกิดสภาพเน่าเหม็น

2) สารอนินทรีย์ (Inorganic compounds) ได้แก่ แร่ธาตุต่าง ๆ ที่อาจไม่ทำให้เกิดน้ำเน่าเหม็น แต่อาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ได้แก่ คลอไรด์ และซัลเฟต เป็นต้น

3) โลหะหนัก (Heavy metals) เป็นสารพิษที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์ หรืออนินทรีย์ สามารถสะสมอยู่ในห่วงโซ่อาหาร หรือสายใยอาหาร โลหะหนักที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ได้แก่ ปรอท แคดเมียม แมงกานีส โครเมียม และทองแดง เป็นต้น โดยทั่วไป จะพบโลหะหนักในน้ำเสียอุตสาหกรรม และสารเคมีที่ใช้ในเกษตรกรรมที่ปนมากับน้ำทิ้ง และแหล่งชุมชน อาจมีโลหะหนักมาจากร้านซูปโลหะ ตู้ซ่มรถ เป็นต้น

4) น้ำมัน และไขมัน (Oil and greases) เมื่อน้ำมัน และไขมันลอยบนผิวน้ำ น้ำทำให้เกิดขวางการกระจายของออกซิเจนจากอากาศลงสู่แหล่งน้ำ และลดการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำ

5) ของแข็งทั้งหมด (Total solids) เมื่อของแข็งจมตัวลงสู่ก้นแหล่งน้ำ ทำให้เกิดสภาพไร้ออกซิเจนที่ท้องน้ำ ทำให้แหล่งน้ำตื้น มีความขุ่นสูง และส่งผลกระทบต่อ การดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ

6) สารซักฟอก (Detergents) ได้แก่ ผงซักฟอก สบู่ และสารลดแรงตึงผิว จะขัดขวางการละลายของออกซิเจนในอากาศสู่น้ำ และเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ โดยสารลดแรงตึงผิวจะสะสมในสิ่งมีชีวิตจำพวกปลามากที่สุด ทำให้ปลาสูญเสียการควบคุมปริมาณเกลือ

7) จุลินทรีย์ (Microorganisms) พบได้ในน้ำเสียจากโรงฟอกหนัง โรงฆ่าสัตว์ หรือ โรงงานอาหารกระป๋อง มีจุลินทรีย์เป็นจำนวนมาก จุลินทรีย์เหล่านี้ใช้ออกซิเจนในการดำรงชีวิต ทำให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำลดลง ทำให้เกิดสภาพเน่าเหม็น นอกจากนี้ จุลินทรีย์บางชนิด อาจเป็นเชื้อโรคที่เป็นอันตรายต่อประชาชน เช่น จุลินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงพยาบาล เป็นต้น

8) ธาตุอาหาร (Nutrients) ได้แก่ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส เมื่อมีปริมาณสูง จะทำให้เกิดการเจริญเติบโต และเพิ่มปริมาณสาหร่ายอย่างรวดเร็ว (Algae bloom) เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำลดต่ำมากในช่วงกลางคืน และทำให้การส่องผ่านของแสงลดลง

9) กลิ่น (Odor) เกิดจากแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน หรือกลิ่นอื่น ๆ จากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น โรงงานทำปลาป่น และโรงฆ่าสัตว์ เป็นต้น

2.3.2 การบำบัดน้ำเสียชุมชน

การบำบัดน้ำเสีย หมายถึง การกำจัด สิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียให้หมด หรือเหลือน้อยที่สุด ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ และไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม การบำบัดน้ำเสียชุมชนแบ่งออกเป็น 4 ประเภท (กรมควบคุมมลพิษ, 2545) ดังนี้

1) กระบวนการทางชีววิทยา (Biological process) เป็นการบำบัดน้ำเสียโดยใช้จุลินทรีย์ในน้ำเสีย เปลี่ยนสารอินทรีย์ในน้ำเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแอมโมเนีย การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีนี้ดีที่สุด ในการลดปริมาณสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ หลักการนี้ต้องเลือกสภาวะแวดล้อมให้เหมาะสมกับการทำงานของจุลินทรีย์ โดยสัมพันธ์กับปริมาณของจุลินทรีย์ และเวลา แบคทีเรียที่ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ แบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจน และแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจน

2) กระบวนการทางกายภาพ (Physical process) เป็นการบำบัดน้ำเสียขั้นแรก ซึ่งจะแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ (Total suspended solids) วิธีนี้จะแยกตะกอนได้ประมาณ 50-65 เปอร์เซ็นต์ กระบวนการนี้มีหลายวิธี เช่น 1) การดักด้วยตะแกรง เป็นการแยกเศษขยะต่าง ๆ ที่มากับน้ำเสีย เช่น เศษไม้ ถูพลาสติก กระดาษ 2) การตัดย่อย คือ การใช้เครื่องตัดทำลายเศษขยะขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง 3) การกวาด เป็นการกำจัดน้ำมัน และไขมันโดยทำการดัก หรือกวาดออกจากน้ำเสีย 4) การทำให้ลอยจะใช้กับตะกอนที่มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าน้ำ 5) การตกตะกอนเป็นการแยกตะกอนออกจากน้ำเสียโดยอาศัยหลักการแรงโน้มถ่วง ซึ่งจะใช้กับตะกอนที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำ

3) กระบวนการทางเคมี (Chemical process) เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสีย โดยเติมสารเคมีลงไป เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ เพอริกคลอไรด์ เป็นต้น เพื่อให้ทำปฏิกิริยากับสารปนเปื้อน เช่น การแยกโลหะหนัก แต่วิธีนี้มีข้อเสีย เมื่อเติมสารเคมีลงในน้ำเสียจะทำให้เกิดตะกอนของไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นกากของเสียอันตราย ยากต่อการกำจัด และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม วิธีนี้

จะมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง ดังนั้นกระบวนการทางเคมีจะใช้ก็ต่อเมื่อน้ำเสียไม่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการทางกายภาพ หรือ ชีวภาพ

4) กระบวนการทางกายภาพ-เคมี (Physical - chemical process) เป็นกระบวนการที่ใช้ในขั้นตอนสุดท้ายในการบำบัดน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการในขั้นตอนอื่นแล้ว เช่น

4.1) การดูดซับด้วยถ่าน (Adsorption) วิธีการนี้ใช้ผงถ่าน หรือ คาร์บอนเป็นตัวดูดซับสารที่ปนเปื้อนที่ละลายอยู่ในน้ำทิ้ง

4.2) การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange) อาศัยหลักการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างสารปนเปื้อนในน้ำเสียดกับตัวกลางที่บรรจุซึ่งมีทั้งประจุบวกและประจุลบ

2.3.3 วิธีการบำบัดน้ำเสียชุมชน

โดยทั่วไป การบำบัดน้ำทิ้งแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนดังนี้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

1) การบำบัดขั้นเตรียมการ (Preliminary treatment) เป็นขั้นตอนการแยกสิ่งสกปรกที่มีขนาดใหญ่ และไม่ละลายน้ำโดยใช้ตะแกรง

2) การบำบัดขั้นต้น (Primary treatment) น้ำเสียที่ผ่านขั้นเตรียมการจะถูกนำมาตกตะกอนในถังตกตะกอน ซึ่งเรียกว่า Primary sludge การบำบัดในขั้นนี้จะลดค่า BOD ได้ประมาณ 25-40 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของน้ำทิ้งและประสิทธิภาพของถังตกตะกอน

3) การบำบัดขั้นที่สอง (Secondary treatment) น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น จะถูกนำไปสู่ถังเติมอากาศซึ่งจะมีการเติมอากาศให้แก่แบคทีเรียโดยใช้เครื่องเติมอากาศแบคทีเรีย ช่วยย่อยสลายและกำจัดสารอินทรีย์ หรือ BOD ซึ่งอยู่ในรูปของสารละลายหรืออนุภาคคอลลอยด์ออกจากน้ำ กลายเป็นตะกอนตกลงไปที่ก้นถัง กากตะกอนในส่วนนี้จะถูกนำไปกำจัดต่อไป น้ำในส่วนบนของถังตกตะกอนจะใสขึ้น ในขั้นตอนนี้จะช่วยลดค่า BOD ลงได้ประมาณ 75 - 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่า BOD ของน้ำส่วนนี้จะต่ำกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถปล่อยทิ้งลงสู่แม่น้ำได้ แต่ถ้าต้องการความสะอาดเหมาะแก่การนำกลับมาใช้ใหม่เข้าสู่การบำบัดขั้นที่ 3 ต่อไป

4) การบำบัดขั้นที่สาม (Tertiary Treatment) ต้องการความบริสุทธิ์สะอาดสามารถนำกลับมาใช้อุปโภค และบริโภคได้ กระบวนการบำบัดนี้จึงเป็นกระบวนการเคมีรวมกับกายภาพ น้ำทิ้งจากการบำบัดขั้นที่สอง จะถูกนำมาตกตะกอนด้วยวิธีทางเคมี และแยกสารประกอบฟอสเฟตออกด้วยปูนขาว จากนั้นจึงนำมากำจัดสารอินทรีย์ที่เหลืออยู่ด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ และผ่านการฆ่าเชื้อโรคแล้วจะได้น้ำที่สะอาด

2.4 สารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) หมายถึง สารที่รวมตัวที่รอยต่อระหว่างผิว (Interface) ทำให้สมบัติเชิงผิวของสารนั้นเปลี่ยนไป ในทางเคมีโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนหัว (Hydrophilic head group) ซึ่งเป็นส่วนที่มีขั้ว สามารถรวมตัวกับน้ำ และส่วนหาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Hydrophobic tail) เป็นส่วนที่ไม่มีขั้ว สามารถรวมตัวกับไขมันหรือสิ่งสกปรก โครงสร้างนี้จึงทำให้ สารลดแรงตึงผิวมีสมบัติที่สำคัญ คือ สารลดแรงตึงผิวจะไปจัดเรียงตัวอยู่ที่บริเวณรอยต่อระหว่างผิว โดยหันส่วนหัวเข้าไปยังเฟสที่มีขั้ว และหันส่วนหางไปยังเฟสที่ไม่มีขั้ว และเมื่อโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจัดเรียงตัวอยู่บริเวณรอยต่อระหว่างผิวจนเต็ม จะทำให้ส่วนที่เหลือนัดรวมตัวกันเป็นไมเซลล์ (Micelle) โดยหันส่วนของโมเลกุลที่เหมือนกันเข้าหากัน เช่น เมื่อละลายอยู่ในน้ำก็จะหันส่วนหางที่ไม่มีขั้วเข้าหากัน และหันส่วนที่มีขั้วออกสู่น้ำ นอกจากจะช่วยในกระบวนการทำความสะอาดแล้ว สารลดแรงตึงผิวยังทำหน้าที่เป็นตัวกลางทำให้ของเหลวสองชนิดซึ่งไม่ละลายซึ่งกันและกันสามารถรวมตัวกันได้ (รติกร, 2548)

สารลดแรงตึงผิวสามารถแบ่งประเภทตามชนิดของโครงสร้างเป็น 4 ประเภท (รติกร, 2548) ดังนี้

1) สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (Anionic surfactants) ได้แก่ แอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต (Alkylbenzenesulphonate, LAS) อัลเคนซัลโฟเนต (Alkanesulphonate, SAS) เมื่อละลายน้ำแล้วส่วนหัวจะมีประจุลบ มีคุณสมบัติการชำระล้างที่ดี ถูกนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ใช้ชำระล้างทั่ว ๆ ไป เช่น สบู่ แชมพู ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดเสื้อผ้า และน้ำยาล้างจาน เป็นต้น

2) สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (Nonionic surfactants) ได้แก่ แอลคิลฟีนอลพอลิเอทิลีนไกลคอลอีเทอร์ (Alkylphenol polyethyleneglycol ether, APEO) แอลคิลแอลกอฮอล์พอลิเอทิลีนไกลคอลอีเทอร์ (Alkylalcohol polyethyleneglycol ether) สารลดแรงตึงผิวชนิดนี้เมื่อละลายน้ำจะไม่มีประจุ ปัจจุบันมีการนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์ชำระล้างต่าง ๆ โดยเฉพาะใช้ทำความสะอาดพื้นผิว เนื่องจากให้ฟองน้อย และมีสมบัติในการรวมตัวเป็นไมเซลล์ที่ความเข้มข้นต่ำ จึงป้องกันสิ่งสกปรกกลับมาเกาะพื้นได้ดี

3) สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก (Cationic surfactants) เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวให้ส่วนหัวที่มีประจุบวก ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบของควอเทอร์นารีแอมโมเนียม (Quaternary ammonium) หรือไพริดีเนียม (Pyridinium) ซึ่งมีฤทธิ์ฆ่าเชื้อแบคทีเรีย ส่วนใหญ่ใช้ในน้ำยาปรับผ้านุ่ม และน้ำยาทำความสะอาดที่มีฤทธิ์ฆ่าเชื้อโรค

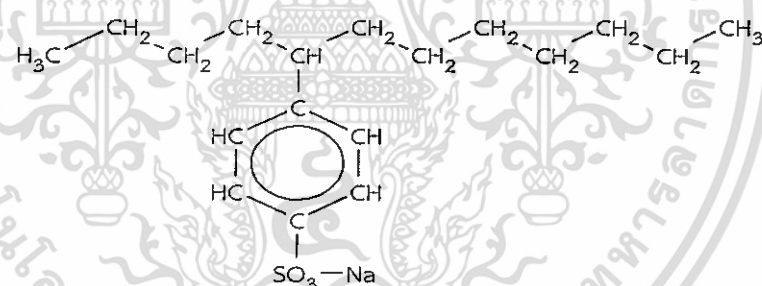
4) สารลดแรงตึงผิวที่เป็นทั้งประจุลบและประจุบวก ได้แก่ แอลคิลบีเทน (Alkylbetaines) แอลคิลซัลโฟบีเทน (Alkylsulphobetaines) สารลดแรงตึงผิวชนิดนี้มีโครงสร้างทางเคมีที่มีทั้งขั้วบวกและลบในโมเลกุลอย่างน้อยอย่างละ 1 กลุ่ม ทำให้มีสมบัติการชำระล้างของชนิดประจุลบ และมีสมบัติฆ่าเชื้อโรคของชนิดประจุบวก สารลดแรงตึงผิวชนิดนี้มีสมบัติที่ไม่ก่อให้เกิดความระคายเคืองต่อตา และผิวหนังจึงมักใช้ในผลิตภัณฑ์ชำระล้างสำหรับเด็ก หรือน้ำยาทำความสะอาดที่ไม่ต้องการความรุนแรง เช่น น้ำยาล้างจาน

กลไกการชำระล้างที่เกิดจากการทำงานของสารลดแรงตึงผิว เริ่มจากการแยกสิ่งสกปรกออกจากพื้นผิวโดยเข้าไปเกาะกับสิ่งสกปรก ส่วนมากเป็นคราบไขมันที่ไม่มีขั้ว โดยหันส่วนหางเข้าหาสิ่งสกปรกแล้วทำให้สิ่งสกปรกหลุดออกจากพื้นผิว เนื่องจากแรงยึดเกาะระหว่างสารลดแรงตึงผิวกับสิ่ง

สกปรกมีมากกว่าแรงยึดเกาะระหว่างพื้นผิวกับสิ่งสกปรก สิ่งสกปรกที่หลุดออกมา จะกระจายอยู่ในตัวกลางซึ่งโดยมากเป็นน้ำ ดังนั้น การทำให้คราบสกปรกหลุดออกจากพื้นผิวคือ การป้องกันไม่ให้สิ่งสกปรกที่กระจายอยู่ในน้ำกลับมาเกาะพื้นผิวอีกครั้ง โดยล้อมรอบสิ่งสกปรกไว้ด้านในของสารลดแรงตึงผิวที่จัดเรียงตัวเป็นไมเซลล์

2.5 สารลิเนียร์แอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต

สารลิเนียร์แอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต (Linear alkylbenzenesulfonate, LAS) ถูกนำมาใช้ในปี ค.ศ. 1964 เป็นสารลดแรงตึงผิวประจุลบ (Anionic surfactant) ซึ่งสารลิเนียร์แอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ได้แก่ เนเธอร์แลนด์ ยุโรปตะวันตก อเมริกาเหนือ สหรัฐอเมริกา และประเทศอื่น ๆ เป็นต้น แสดงดังในตารางที่ 2.1 (Venhuis and Mehrvar, 2004) การใช้ปริมาณสาร LAS ได้รับความนิยมน้อยมาก เพราะเป็นสารที่มีราคาไม่แพง มีความเป็นพิษต่ำ ไม่สะสมในสิ่งมีชีวิต จุลินทรีย์ในแหล่งน้ำสามารถย่อยสลายได้อย่างรวดเร็ว แต่ในกรณีที่สาร LAS มีความเข้มข้นสูงมาก จุลินทรีย์ในแหล่งน้ำจะย่อยสลายได้ช้าลง (Vives-Rego *et al.*, 2000) และสาร LAS ยังเป็นสารทดแทนสารแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต (ABS) ซึ่งสาร LAS มีโครงสร้างหลักเป็นวงแหวนเบนซีน มีหมู่ซัลโฟเนต (SO_3^-) เกาะอยู่บนวงแหวนเบนซีน และมีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนยาวประมาณ 10 ถึง 13 อะตอม ดังรูปที่ 2.1 และมีคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมี แสดงดังในตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.1 สารลิเนียร์แอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต (LAS) (Gong *et al.*, 2016)

ตารางที่ 2.1 ปริมาณการใช้สารลิเนียร์แอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต (LAS)

พื้นที่	ปริมาณการใช้ (ตัน/ปี)
เนเธอร์แลนด์	13,550
ยุโรปตะวันตก	320,000
อเมริกาเหนือ	400,000
สหรัฐอเมริกา	415,000
ทั่วโลก	1,500,000 - 2,000,000

ที่มา : Venhuis and Mehrvar (2004)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต

คุณสมบัติ	ค่าที่ได้
ชื่อทั่วไป	ลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต
ชื่อทางเคมี	โซเดียมโดเดคซิลเบนซีนซัลโฟเนต
สูตรโมเลกุล	$C_{18}H_{29}NaO_3S$
ลักษณะ	ของแข็ง
สี	ขาวเหลือง
พีเอช	10
pKa	<1
มวลโมเลกุล (g/mole)	348.48
จุดเดือด (°C)	654
จุดหลอมเหลว (°C)	284
การละลาย (g/L)	250
ความดันไอ (ที่ 25 °C) (Pa)	3×10^{-13}
ความหนาแน่นรวม (kg/m ³)	450-550
สัมประสิทธิ์การกระจายตัว (ออกทานอล/น้ำ)	2.92
ความเข้มข้นวิกฤตของไมเซลล์ (CMC) (g/L)	0.1
ค่าคงที่ของเฮนรี (Pa m ³ /mole)	6.35×10^{-3}

ที่มา : OECD (2005)

2.5.1 ผลกระทบของสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตในน้ำเสีย

สารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต (LAS) พบมากในน้ำเสียชุมชน น้ำทิ้งอุตสาหกรรม และภาคตะกอน ได้แก่ อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมหนัง อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมกระดาษ เป็นต้น แสดงดังในตารางที่ 2.3 (Savas and Onder, 2006; Dehghani *et al.*, 2007) สาร LAS มีความเป็นพิษต่อระบบนิเวศแหล่งน้ำ โดยสะสมในสิ่งมีชีวิต และแพร่กระจายสู่ระบบนิเวศ ทำให้สมดุลของแหล่งน้ำธรรมชาติเปลี่ยนแปลง ซึ่งสาร LAS จะทำลายคลอโรฟิลล์ และเนื้อเยื่อของพืช น้ำ ส่งผลให้เกิดการเจริญเติบโตช้าลง (Savas and Onder, 2006) การสะสม LAS ในสิ่งมีชีวิต พบว่า สิ่งมีชีวิตจำพวกปลาสะสมมากที่สุดแสดงดังในตารางที่ 2.4 ทำให้ความสามารถในการควบคุมปริมาณเกลือสูญเสียไป จากการศึกษาด้านพิษวิทยาของสาร LAS พบว่า ความเข้มข้นต่ำสุดที่ทำให้เกิดความ เป็นพิษต่อเซลล์ หรือ ส่งผลต่อการเจริญเติบโต คือ 0.02 – 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถทำให้ สิ่งมีชีวิตจำพวกปลา สัตว์น้ำ พืชน้ำ รวมถึงแบคทีเรีย และสาหร่าย เกิดอันตรายได้ ด้วยเหตุผลนี้ ทำให้การใช้สาร LAS ถูกจำกัด และห้ามใช้ในบางประเทศ ในแถบยุโรป สหรัฐอเมริกา แคนาดา และ

ญี่ปุ่น อย่างไรก็ตามการใช้สาร LAS ยังคงใช้กันอย่างแพร่หลายในแถบประเทศที่กำลังพัฒนา รวมทั้งประเทศไทยด้วย (Venhuis and Mehrvar, 2004)

ตารางที่ 2.3 ปริมาณสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตที่สะสมในสิ่งแวดล้อม

แหล่งกำเนิด	ความเข้มข้น
น้ำเสียชุมชนก่อนเข้าระบบแอคติเวตเตดสลัดจ์	5.20 mg/L
กากตะกอน	3.70 mg/L
น้ำเสียชุมชนหลังออกระบบแอคติเวตเตดสลัดจ์	39.10 µg/L

ที่มา : Tabor and Barber (1996)

ตารางที่ 2.4 ค่าเฉลี่ยความพิษของสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตต่อสัตว์น้ำ

สายโซ่แอลคิล	ไรน้ำ (<i>Daphnia magna</i>)		ปลา (<i>Pimephales promelas</i>)	
	EC ₅₀ (mg/L)	NOEC (mg/L)	LC ₅₀ (mg/L)	NOEC (mg/L)
C ₁₀	16.70	9.80	39.60	14.00
C ₁₁	9.20	-	19.80	6.40
C ₁₂	4.80	0.58	3.20	0.67
C ₁₃	2.35	0.57	1.04	0.10
C ₁₄	1.50	0.10	0.50	0.05

ที่มา : BKH (1993)

หมายเหตุ : EC₅₀ : Effective concentration คือ ความเข้มข้นของสารที่ออกฤทธิ์กระตุ้นได้ 50 %

NOEC : No observe effective concentration คือ ความเข้มข้นของสารเคมีที่มากที่สุดซึ่งได้รับทุกวันแล้วไม่เกิด

อันตราย

2.6 ฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่สำคัญสำหรับพืช สัตว์ และมนุษย์ ถ้าในแหล่งน้ำธรรมชาติมีฟอสฟอรัสในปริมาณมาก จะส่งผลทำให้พืชน้ำ สาหร่าย และแพลงก์ตอนพืช เจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ค่ามาตรฐานคุณภาพของฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำธรรมชาติ คือ ไม่เกิน 10 ส่วนในพันล้านส่วน ถ้าแหล่งน้ำธรรมชาติมีปริมาณฟอสฟอรัสรวมมากกว่า 100 ส่วนในพันล้านส่วน (Dodds and Smith, 2016) ทำให้แหล่งน้ำเกิดสภาวะ Eutrophic condition คือ แหล่งน้ำมีปริมาณออกซิเจนต่ำกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่เหมาะสมในการดำรงชีพของสิ่งมีชีวิตโดยทั่วไป ฟอสฟอรัสที่พบในแหล่งน้ำธรรมชาติ และน้ำที่ส่วนใหญ่อยู่ในรูปออร์โธฟอสเฟต คอนเดนส์ฟอสเฟต (pyro, meta, ortho) หรืออินทรีย์ฟอสเฟต ฟอสเฟตจะในรูปที่ละลายน้ำ สารแขวนลอย หรืออยู่ในร่างกายสิ่งมีชีวิตได้ จากการศึกษา พบว่าน้ำที่มาจาก การซักผ้า การอุปโภค การควบคุมการตกตะกอนในหม้อต้ม และน้ำจากเกษตรกรรม มีปริมาณฟอสเฟตสูงมาก ดังนั้นเมื่อน้ำที่จากแหล่งต่าง ๆ ลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจึงเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัญหาการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ของสาหร่าย (Algal bloom) เนื่องจากแหล่งน้ำมีปริมาณฟอสเฟตมาก เรียกว่า ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญในแหล่งน้ำธรรมชาติ

สารประกอบฟอสเฟตในน้ำทั้ง มีรูปแบบต่าง ๆ ดังนี้

1) ออร์โธฟอสเฟต หรือฟอสฟอรัสละลายน้ำ (Soluble reactive phosphorus) เป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้ดี และแพลงก์ตอนพืชสามารถใช้ในการเจริญเติบโต ได้แก่

- Trisodium phosphate (Na_3PO_4)
- Disodium phosphate (Na_2HPO_4)
- Sodium dihydrogen phosphate (NaH_2PO_4)
- Diammonium hydrogenphosphate ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$)

2) โพลีฟอสเฟต (Polyphosphate) เป็นสารประกอบที่พบได้มากในน้ำเสียที่มาจากบ้านเรือน หรือโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นส่วนผสมของน้ำยาทำความสะอาด เมื่อแตกตัวจะให้ออร์โธฟอสเฟตออกมา ซึ่งสารประกอบประเภทนี้ที่พบมาก ได้แก่

- Sodium hexametaphosphate $\text{Na}_3(\text{PO}_3)_6$
- Sodium tripolyphosphate ($\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$)
- Sodium pyrophosphate ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$)

สารพวกนี้จัดเป็น Dehydrated phosphate เมื่อถูกไฮโดรไลซิสในน้ำจะกลายเป็น Ortho phosphate ดังเดิม อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น pH, อุณหภูมิ และองค์ประกอบที่อยู่ในน้ำ

3) อินทรีย์ฟอสเฟต (Organic phosphate) ได้จากกระบวนการทางชีวภาพ สารฟอสฟอรัสเหล่านี้พบได้ในสารละลาย สารแขวนลอย หรืออินทรีย์วัตถุที่กำลังเน่าสลาย หรือ เป็นองค์ประกอบในร่างกายสิ่งมีชีวิต ซึ่งสารประกอบประเภทนี้ที่พบมาก คือ

- Nucleic acid
- Phospholipids
- Sugar phosphate

ค่ามาตรฐานฟอสฟอรัส และฟอสเฟตในน้ำทั้งจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ค่ามาตรฐานปริมาณฟอสฟอรัส และฟอสเฟตจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ

แหล่งกำเนิด	ค่ามาตรฐาน (mg P/L)	หมายเหตุ
มาตรฐานการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง ¹	ไม่เกิน 0.4	ฟอสฟอรัสทั้งหมด
มาตรฐานการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำกร่อย ²	ไม่เกิน 0.4	ฟอสฟอรัสทั้งหมด
มาตรฐานการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด ³	ไม่เกิน 0.5	ฟอสฟอรัสทั้งหมด
มาตรฐานการระบายน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ⁴	ไม่เกิน 2.0	ฟอสฟอรัสทั้งหมด
มาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลประเภท 1-2 ⁵	ไม่เกิน 15	ออร์โธฟอสเฟต
มาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลประเภท 3 ⁵	ไม่เกิน 45	ออร์โธฟอสเฟต
มาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลประเภท 4 ⁵	ไม่เกิน 15	ออร์โธฟอสเฟต
มาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลประเภท 5-6 ⁵	ไม่เกิน 45	ออร์โธฟอสเฟต

ที่มา : ¹ ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง ประกาศในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่มที่ 121 ตอนที่ 49 ง ลงวันที่ 1 พฤษภาคม 2547

² ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำกร่อย ประกาศในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่มที่ 124 ตอนที่ 84 ง ลงวันที่ 13 กรกฎาคม 2550

³ ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด ลงวันที่ 23 พฤศจิกายน พ.ศ. 2550 ประกาศ ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 125 ตอนที่ 21 ง วันที่ 30 มกราคม 2551

⁴ ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมของชุมชน ลงวันที่ 7 เมษายน 2553 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่มที่ 127 ตอนที่ 69 ง วันที่ 2 มิถุนายน 2553

⁵ ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 27 (พ.ศ.2549) เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำทะเล ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่มที่ 124 ตอนที่ 11 ง วันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2550

2.6.1 ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน

ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันเกิดจากการที่แหล่งน้ำธรรมชาติ มีปริมาณธาตุอาหาร คือ สารประกอบไนโตรเจน และฟอสฟอรัสสูง ซึ่งธาตุไนโตรเจน และฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายเซลล์เดียว และพืชน้ำ ทำให้เกิดการสังเคราะห์แสง และมีการแพร่พันธุ์ของพืชน้ำอย่างรวดเร็ว ส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำ และสิ่งมีชีวิต ปรากฏการณ์นี้เกิดกับแหล่งน้ำปิดที่มีเวลากักน้ำมากกว่า 20 วัน การปนเปื้อนของธาตุอาหารมีสาเหตุมาจากการใช้ผงซักฟอก และผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดที่มีส่วนผสมของฟอสเฟต และการใช้ปุ๋ยทางเกษตรกรรม (Lee *et al.*, 2012) แสดงดังรูปที่ 2.2 จากการศึกษา พบว่า ประเทศไทยมีปัญหาปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน 8 แหล่งที่สำคัญ แสดงดังตารางที่ 2.6 ซึ่งเป็นสาเหตุการตายของสัตว์น้ำที่อาศัยอยู่ตามธรรมชาติ และที่เลี้ยงสัตว์น้ำในกระชัง เนื่องจากทำให้ความต้องการใช้ออกซิเจนสูงขึ้น และแหล่งกักตุนพืชน้ำที่ลอยบนผิวน้ำจะบดบังการส่องผ่านของแสงอาทิตย์ และลดการละลายของออกซิเจนจากอากาศลงสู่แหล่งน้ำ ทำให้สัตว์น้ำตายเนื่องจากขาดออกซิเจนในการหายใจ (Lee *et al.*, 2012)

การเกิดปรากฏการณ์ Eutrophication สามารถแบ่งตามสภาพของแหล่งน้ำ และสถานะของออกซิเจนในน้ำออก เป็น 3 ระดับ (สุวัจน์, 2557) คือ

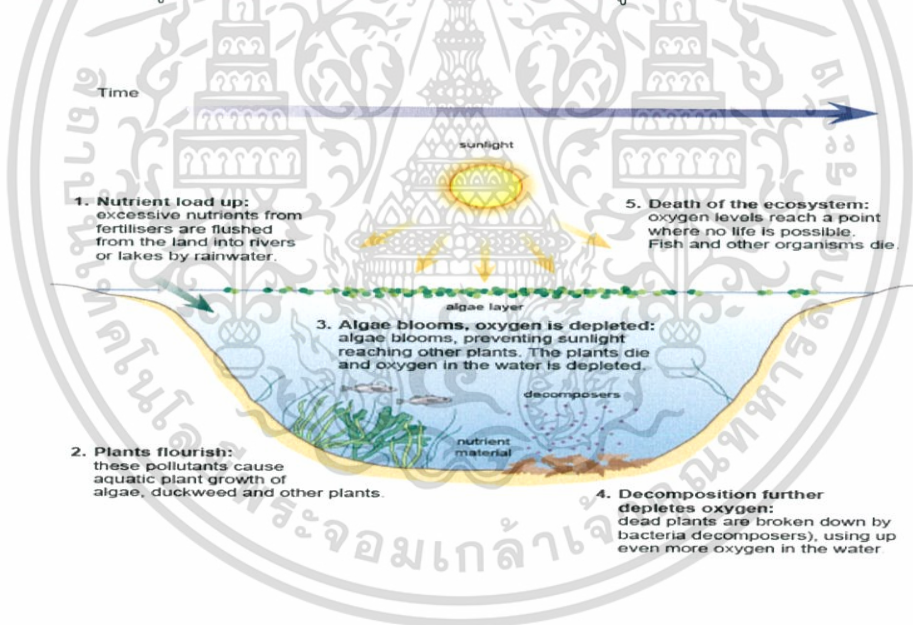
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) Hyper eutrophication เป็นแหล่งน้ำที่มีปริมาณของแพลงก์ตอนพืชมากทำให้แหล่งน้ำอยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจน (Anoxic condition) มีปริมาณออกซิเจนลดลงต่ำ 25 ถึง 0 มิลลิกรัมต่อลิตร สิ่งมีชีวิตที่ใช้ออกซิเจนในการหายใจไม่สามารถดำรงชีพอยู่ได้

2) Eutrophication เป็นลักษณะการเพิ่มปริมาณของแพลงก์ตอนพืชมากทำให้แหล่งน้ำอยู่ในสภาวะปริมาณออกซิเจนต่ำกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่เหมาะสมในการดำรงชีพของสิ่งมีชีวิตอย่างใดก็ตาม มีสิ่งมีชีวิตบางชนิดที่สามารถดำรงชีพได้

3) Noneutrophication เป็นลักษณะแหล่งน้ำที่สิ่งมีชีวิตสามารถอยู่ในสภาพปกติมีปริมาณออกซิเจนสูงและพอเพียงต่อการดำรงชีพของสัตว์น้ำ

ปัจจุบันการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน ไม่ได้มีสาเหตุที่เกิดจากการชะล้างธาตุอาหารจากพื้นดินลงสู่แหล่งน้ำ แต่ยังคงเกิดจากธาตุอาหารที่เปลี่ยนรูปจากตะกอนใต้พื้นทะเล พบว่าน้ำทะเล ในบริเวณพื้นที่ท้องทะเลเป็นดินโคลน จะเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน บ่อยกว่าทะเลที่มีพื้นที่ท้องทะเลเป็นโคลนปนทราย หิน หรือทราย เป็นต้น เมื่อเกิดปรากฏการณ์ ยูโทรฟิเคชัน ทำให้แพลงค์ตอนพืช ทั้งที่เป็นพืช และไม่เป็นพืชเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว (Toxin) แล้วเคลื่อนย้ายเข้าสู่ระบบสายใยอาหารซึ่งสารพิษที่ถูกสร้างขึ้นเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในระดับสูงขึ้น



รูปที่ 2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (BBC, 2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 คุณภาพน้ำของแหล่งน้ำนึ่งที่สำคัญในประเทศไทย

แหล่งน้ำ	DO (mg/L)	คลอโรฟิลล์ เอ ($\mu\text{g/L}$)	ฟอสฟอรัสรวม (mg/L)	ความโปร่งใส (cm)
ทะเลน้อย	2.3 - 10.6	4 - 127.5	0.13-2.64	-
บึงแก่นนคร	9.82	238.6	0.20	17.0
บึงโคตร	10.41	81.8	0.20	31.0
หนองซอแง	11.5	90.7	0.22	40
กว๊านพะเยา	6.3-9.7	66.90	0.02-0.24	41-106
บึงบอระเพ็ด	7.7	13.32	0.11	47
หนองหาน	6.6-9.2	3.11	0.05-0.51	2,900
ทะเลสาบสงขลา	3.8	150-300	0.31-0.78	-

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ (2552)

2.7 วิธีการบำบัดสารลิเนียแอลคิลเบนซินซัลโฟเนตในน้ำเสียชุมชน

2.7.1 วิธีการบำบัดสารลิเนียแอลคิลเบนซินซัลโฟเนต

การบำบัดสารลดแรงตึงผิวในน้ำเสียสามารถแบ่งวิธีการบำบัดออกเป็น 7 วิธี ดังนี้

1) การตกตะกอนทางเคมี เป็นการใส่สารเคมีตกตะกอนสารลดแรงตึงผิวในระบบบำบัดน้ำเสีย เรียกว่า กระบวนการสร้างและรวมตะกอน (Coagulation - Flocculation) โดยใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ มีประสิทธิภาพการบำบัด 79 เปอร์เซ็นต์

2) กระบวนการดูดซับ เป็นกระบวนการต่อเนื่องจากกระบวนการสร้างและรวมตะกอน เนื่องจากไม่สามารถบำบัดสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบได้อย่างสมบูรณ์ จึงต้องใช้กระบวนการดูดซับ โดยใช้แอกติเวเตดคาร์บอนเป็นตัวดูดซับ มีประสิทธิภาพการบำบัด 90 เปอร์เซ็นต์

3) กระบวนการทางชีวภาพ เป็นกระบวนการทางชีวภาพ โดยใช้จุลินทรีย์ย่อยสลาย ซึ่งใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอทีเวเตดสลัดจ์ (Activated Sludge) สามารถกำจัดสาร LAS ได้มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ ส่วนระบบบำบัดน้ำเสียแบบโปรยกรอง (Trickling Filters) สามารถกำจัดสาร LAS ได้ 72.2 - 98.6 เปอร์เซ็นต์ (Venhuis and Mehrvar, 2004; McAvoy *et al.*, 1998)

4) กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวออกซิไดซ์แสงอัลตราไวโอเล็ต และตัวคะตะลิสต์ในการสร้างอนุมูลไฮดรอกซิล โดยอนุมูลไฮดรอกซิลจะสลายสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์เกิดเป็นอนุมูลอิสระ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ (Xie *et al.*, 2013) กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง มีข้อดี คือ สามารถบำบัดสารมลพิษที่มีความเข้มข้นต่ำ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2 วิธีการกำจัดสารประกอบฟอสเฟต

การกำจัดฟอสเฟตส่วนใหญ่มีหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้กันส่วนมากเป็นการตกตะกอนทางเคมี และกระบวนการชีวภาพ ซึ่งทั้งสองวิธีนี้เป็นการกำจัดฟอสเฟตที่มีความเข้มข้นสูง ส่วนกระบวนการดูดซับสามารถกำจัดฟอสเฟตที่มีความเข้มข้นต่ำ

1) การตกตะกอนทางเคมี เป็นการใส่สารเคมีตกตะกอนฟอสเฟต สารเคมีที่นิยมใช้คือ อะลูมิเนียมซัลเฟต เพอริกคลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์ ซึ่งทำปฏิกิริยากับฟอสเฟตเกิดเป็นตะกอนโลหะของฟอสเฟตเกิดขึ้น จากนั้นสามารถแยกออกด้วยวิธีการกรอง ซึ่งข้อเสียของวิธีนี้คือ ค่าใช้จ่ายสูง และมีตะกอนฟอสเฟตเกิดขึ้นซึ่งเป็นปัญหาในการกำจัดตะกอน (Minnesota Pollution Control Agency, 2006)

2) กระบวนการชีวภาพ เป็นการใช้อุสินทรีย์ในการกำจัด อุสินทรีย์จะใช้ฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบในการสร้างเซลล์ และพลังงาน เมื่อกำจัดอุสินทรีย์ออกจากระบบ ปริมาณฟอสเฟตก็จะลดต่ำลง ข้อดีของวิธีนี้คือ ค่าใช้จ่ายต่ำ และไม่มีตะกอนของฟอสเฟต แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือ การกำจัดฟอสเฟตมีประสิทธิภาพไม่ดี

3) กระบวนการดูดซับ เป็นการใช้อัตว์ดูดซับในการกำจัดฟอสเฟต ซึ่งตัวดูดซับที่นำมาใช้ได้แก่ Activated alumina นอกจากนี้ยังมีการใช้ตัวดูดซับอื่น ๆ ได้แก่ Activated carbon ตัวดูดซับชีวภาพ เรซิน และไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟต 99 เปอร์เซ็นต์

2.8 ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

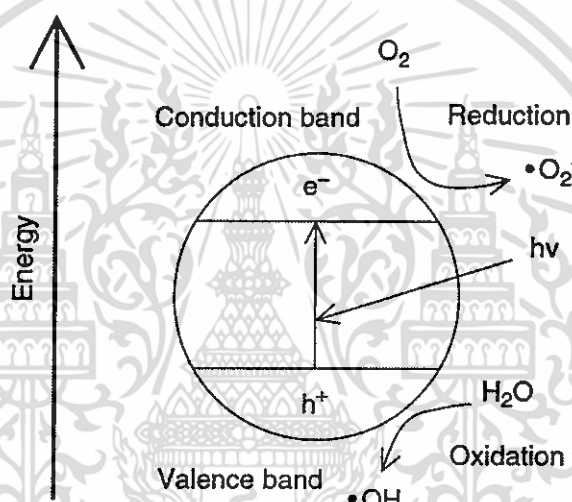
ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส เป็นกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง ซึ่งเป็นการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวคะตะลิสต์ หรือตัวเร่ง ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ช่วยลดพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยา (E_a) ตัวคะตะลิสต์ที่นิยมคือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจาก มีราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษ ความสามารถในการละลายต่ำ ความเสถียรสูง แต่เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ มีค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (band gap) ประมาณ 3.2 โวลต์ จึงต้องใช้พลังงานแสงในช่วงของรังสียูวี เมื่อพื้นผิวของตัวคะตะลิสต์ถูกกระตุ้นด้วยรังสียูวี ทำให้พื้นผิวของตัวคะตะลิสต์เกิดเป็น h^+ จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) และน้ำ เกิดเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ส่วนพื้นผิวที่มีอิเล็กตรอน จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนที่ดูดติดบนผิวตัวคะตะลิสต์ เกิดเป็นอนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน แสดงดังรูปที่ 2.3 (เสาวลักษณ์, 2554) ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ได้ทุกชนิด เช่น สารประกอบพีเอเอช สารประกอบพีซีบี สารอินทรีย์ระเหยง่าย โลหะหนัก เป็นต้น (Nakata and Fujishima, 2012)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.1 ชนิดของโฟโตคะตะไลซิส

ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส สามารถแยกได้ 2 ประเภท ตามสถานะของตัวคะตะไลสต์ ดังนี้ (กาญจนา และนนุช, 2553)

- 1) โฟโตคะตะไลซิสแบบสถานะเดียว (Homogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ catalyst ซึ่งมีสถานะเดียวกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด (โดยทั่วไปแล้วจะเป็นของเหลว) เช่น การย่อยสลาย 2, 4 -Dinitrotoluene โดยใช้ UV/H₂O₂
- 2) โฟโตคะตะไลซิสแบบสถานะต่าง (Heterogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัว catalyst ซึ่งมีสถานะต่างกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด เช่น การย่อยสลาย 2-Chlorophenol โดยใช้ UV/TiO₂

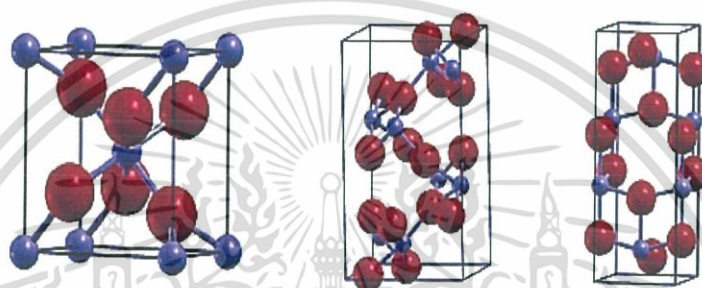


รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (Ohama and Gemert, 2011)

2.8.2 ไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่มีสูตรโมเลกุล คือ TiO₂ ซึ่งมีลักษณะเป็นผงสีขาว มีจุดหลอมเหลว 1,870 °C และมีจุดเดือด 2,972 °C มีลักษณะทางกายภาพและทางเคมี ดังตารางที่ 2.7 TiO₂ มีโครงสร้างทั้งหมด 3 แบบ คือ โครงสร้างแบบบรูกไคท์ (Brookite) โครงสร้างแบบอนาเทส (Anatase) และโครงสร้างแบบรูไทล์ (Rutile) ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของอะตอมไทเทเนียมเป็นแบบ Orthorhombic และที่อะตอมออกซิเจนเข้าไปเติมเต็มในช่องว่างแบบ Octahedron โดยที่มุมระหว่างแกนของ Octahedron ในรูไทล์มีค่าเท่ากับ 90 และ 81.21 องศา ในขณะที่อนาเทสมีค่ามุมระหว่างแกนเท่ากับ 78.12 และ 92.43 องศา จากการศึกษาพบว่า โครงสร้างแบบอนาเทส มีค่า band gap เท่ากับ 3.23 โวลต์ ขณะที่รูไทล์มีค่าเท่ากับ 3.02 โวลต์ จึงทำให้โครงสร้าง TiO₂ แบบอนาเทสมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้าง

แบบรูไทล์ และโครงสร้างแบบบรูกไซต์ (Tanaka *et al.*, 1991) การแสดงประจุบนพื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้นอยู่กับค่า pzc (Point of zero charge) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ และค่าพีเอชของสารละลาย โดยค่า pzc ของ TiO_2 เท่ากับ 6.8 เมื่อ TiO_2 อยู่ในสถานะที่เป็นต่างจะถูกเหนี่ยวนำให้พื้นที่ผิวของ TiO_2 เป็นประจุลบ แต่ถ้าอยู่ในสถานะที่เป็นกรดพื้นที่ผิวของ TiO_2 จะเป็นประจุบวกสามารถจับกับสารอินทรีย์ที่เป็นประจุลบบนพื้นที่ผิวได้ ดังสมการที่ 2.1-2.2 (Boyjoo *et al.*, 2012)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบรูไทล์ บรูกไซต์ และอนาเทส (Esch *et al.*, 2014)

ตารางที่ 2.7 ลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์

คุณสมบัติ	ค่าที่ได้
ลักษณะ	ของแข็งสีขาว
พื้นที่ผิว ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	50
ขนาดอนุภาค (nm)	20
น้ำหนักโมเลกุล (g mol^{-1})	79.87
ความหนาแน่น (g cm^{-3})	4.23
จุดหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)	1,870
จุดเดือด ($^{\circ}\text{C}$)	2,972
การละลาย	ไม่ละลายน้ำ
ความเป็นพิษ	ไม่เป็นพิษ

ที่มา : นวพันธ์, 2557

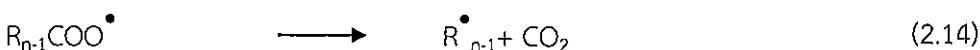
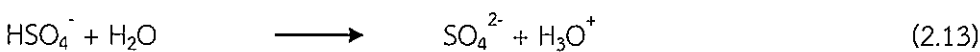
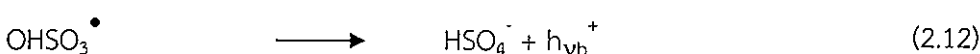
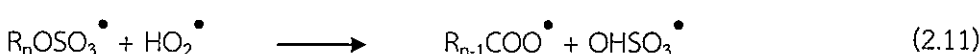
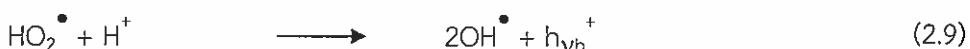
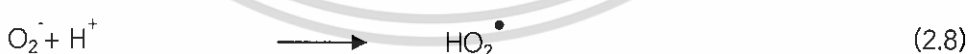
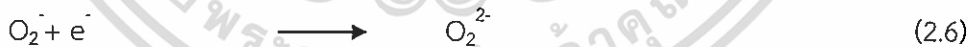
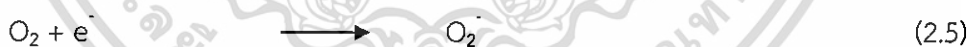
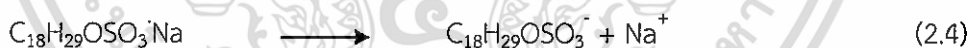
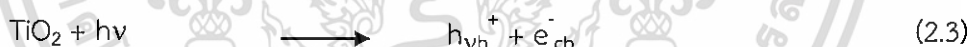
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.3 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

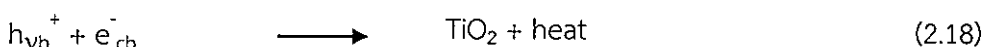
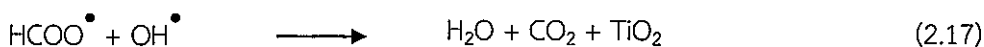
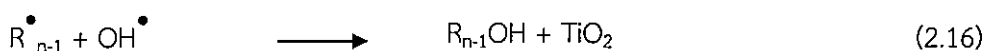
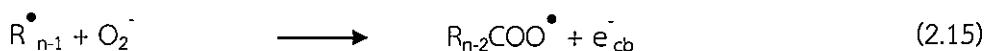
- 1) ความเข้มแสง การเพิ่มความเข้มแสงจะทำให้โฟตอนเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้น
- 2) ปริมาณคะตะลิสต์ เนื่องจากตัวคะตะลิสต์ทำหน้าที่การดูดซับบนพื้นผิว ดังนั้นการเพิ่มปริมาณคะตะลิสต์จะทำให้พื้นที่ผิวของการดูดซับเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้น
- 3) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย มีผลต่อปฏิกิริยา ถ้าความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มสูงขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลง เนื่องจากในขณะเกิดปฏิกิริยาเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นตัวกลางของสารก็จะเพิ่มขึ้น ทำให้ยับยั้งการย่อยสลายสารอินทรีย์ และทำให้การส่องผ่านของแสงไปยังสารละลายไม่ทั่วถึงทำให้ปฏิกิริยาลดลง

2.8.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยา

การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเกิดจากภายในตัวคะตะลิสต์ประกอบด้วยวาเลนซ์แบนด์ (Valence band) และคอนดักชันแบนด์ (Conduction band) โดยมีแบนด์แก๊ป (Band gap) คั่นอยู่ระหว่างแบนด์ทั้งสอง เมื่อตัวคะตะลิสต์ได้รับพลังงานแสงมากกว่าแบนด์แก๊ป ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจากวาเลนซ์แบนด์ ไปยังคอนดักชันแบนด์ ทำให้เกิดโฮล (h^+) ขึ้นที่วาเลนซ์แบนด์ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะมีสองแบบ คือ อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังตัวรับอิเล็กตรอนในสารละลายจะเกิดเป็นปฏิกิริยารีดักชัน ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนจากตัวให้อิเล็กตรอนในสารละลายไปยังโฮลในวาเลนซ์แบนด์จะเกิดเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน และอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลจะเข้าทำปฏิกิริยาสารอินทรีย์ (Lea and Adesina, 1998) ดังสมการที่ 2.3-2.18



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2.8.5 การประยุกต์ใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์

ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากแสงหรือพลังงานกระตุ้นที่ใช้นั้นสามารถใช้ได้ทั้งแสงฟลูออเรสเซนต์ หรือแสงอาทิตย์ ทำให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่าย และได้มีการนำไปประยุกต์การใช้งานในด้านต่าง ๆ อีกด้วย เช่น การลดกลิ่น การทำให้อากาศบริสุทธิ์ การลดความเป็นพิษของสารอินทรีย์ เป็นต้น

1) การต่อต้านเชื้อจุลินทรีย์ สามารถใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำลายเชื้อแบคทีเรีย รวมทั้งเชื้อราได้อีกด้วย พบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์ มีประสิทธิภาพในการต่อต้านเชื้อได้สูงกว่าสารต่อต้านเชื้อราประเภทอื่น ๆ เนื่องจากสามารถออกฤทธิ์ได้ แม้มีเชื้อแบคทีเรียในปริมาณที่ต่ำมากที่เข้ามาอยู่บนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ นอกจากนี้ ในระหว่างการแบ่งเซลล์แบคทีเรียจะผลิตสารพิษ เมื่อแบคทีเรียถูกทำลายด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานี้ ก็ยังสามารถสลายสารพิษได้เช่นกัน

2) การลดกลิ่น การประยุกต์ใช้ในด้าน การลดกลิ่นไม่พึงประสงค์ อนุโมลอิสระไฮดรอกซิลจะเข้าทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยได้ (VOCs) โดยทำลายพันธะภายในโมเลกุลสารอินทรีย์นี้ซึ่งจะทำให้โมเลกุลเกิดสลายไปเป็นแก๊สชนิดอื่น ๆ ที่มีขนาดเล็กกว่า และไม่ทำให้เกิดกลิ่น

3) การทำให้อากาศบริสุทธิ์ สามารถนำไทเทเนียมไดออกไซด์ไปใช้ในการกำจัดหรือลดปริมาณของสารประกอบที่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ เช่น NOx สารประกอบซีเอฟซี (CFCs) หรือสารที่เป็นสาเหตุของสภาวะเรือนกระจก หรือลดการเกิดเขม่าดำ

4) การป้องกันหมอกควัน และปฏิกิริยาเซลฟี่คลีนนิ่ง (Self-cleaning) ผงนึ่งภายนอกของอาคารบ้านเรือนที่เกิดการฝุ่นร่อน ส่งผลให้เกิดฝุ่นละออง สาเหตุของปรากฏการณ์นี้เนื่องจากแก๊สที่เกิดการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ โดยฝุ่นที่เกิดขึ้นจะมีส่วนของน้ำมันปะปนอยู่ โดยปรากฏการณ์นี้สามารถลด หรือป้องกันได้โดยเคลือบผนังของอาคารด้วยชั้นบาง ๆ ของไทเทเนียมออกไซด์ เมื่อแก๊สของควันรถยนต์เข้ามา ชั้นตัวเร่งจะเกิดปฏิกิริยาย่อยสลาย ทำให้เกิดเพียงคราบติดอยู่ และถูกชะออกเมื่อมีฝนตก

5) การทำให้น้ำบริสุทธิ์ การนำตัวเร่งปฏิกิริยา ร่วมกับการฉายแสงยูวี ได้นำมาใช้ในกระบวนการทำให้น้ำบริสุทธิ์อย่างแพร่หลาย โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำลายโมเลกุลสารอินทรีย์ที่เป็นพิษที่ปะปนอยู่ในน้ำปริมาณต่ำ ๆ ให้ได้สารผลิตภัณฑ์อื่น ๆ และได้น้ำที่สะอาด นอกจากนี้ ยังสามารถทำลายเชื้อโรคที่ปนเปื้อนได้

2.9 จลนพลศาสตร์เคมี (Mack, 2006)

2.9.1 อัตราการเกิดปฏิกิริยา (reaction rate)

อัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้น หรือ สารผลิตภัณฑ์ต่อเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถใช้บอกความเร็วของปฏิกิริยา ดังสมการที่ 2.17 และ 2.18

$$\text{อัตราเร็วของปฏิกิริยา} = \frac{-d[A]}{dt}, \frac{d[B]}{dt} \quad (2.17)$$

[A] คือ ความเข้มข้นของสาร A

t คือ เวลาที่ใช้การทำปฏิกิริยา

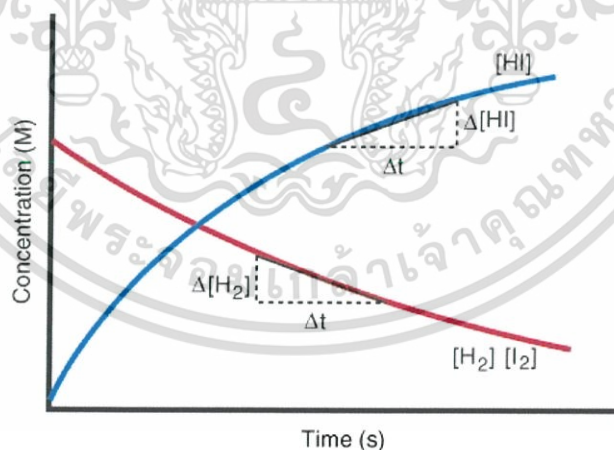
ดังนั้น $\frac{d[A]}{dt}$ คือ ปริมาณความเข้มข้นของสาร A ที่เปลี่ยนแปลงไปต่อการเปลี่ยนแปลงเวลา

$$\text{โดย } d[A] = [A]_{\text{final}} - [A]_{\text{initial}} \quad (2.18)$$

เมื่อ $[A]_{\text{final}}$ คือ ความเข้มข้นของสาร A ณ สภาวะเริ่มต้น

$[A]_{\text{initial}}$ คือ ความเข้มข้นของสาร A ณ สภาวะสุดท้าย

ซึ่งจะเห็นว่า $d[A]$ จะลดลง ดังนั้นเมื่อเขียนสมการอัตราตามสมการที่ 2.17 $d[A]$ จึงมีเครื่องหมายลบ และปริมาณสารผลิตภัณฑ์ B จะเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาการทำปฏิกิริยาดำเนินไป เครื่องหมาย $d[B]$ จึงเป็นบวก ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนความเข้มข้นของสารตั้งต้น และผลิตภัณฑ์ในปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.2 กฎอัตรา (Mack, 2006)

กฎอัตราเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารตั้งต้นเท่านั้น โดยจะมีตัวแปรเพิ่มขึ้นมาในสมการ 2 ตัวแปร คืออันดับปฏิกิริยา และค่าคงที่อัตรา ดังสมการที่ 2.19

จากสมการที่ 2.17

$$\text{rate} = \frac{-d[A]}{dt} = \frac{d[B]}{dt} \propto [A]^n$$

หรือ
$$\text{rate} = k [A]^n \quad (2.19)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่อัตรา

n คือ อันดับของปฏิกิริยาที่ขึ้นกับสาร A

ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้หากลไกของปฏิกิริยานั้น ๆ ได้โดยค่าคงที่อัตราจะเป็นค่าคงที่ที่ขึ้นกับชนิดของปฏิกิริยา และอุณหภูมิ ซึ่งอัตราเร็วของปฏิกิริยาจะแปรผันตรงกับค่าคงที่อัตรา สำหรับปฏิกิริยาต่อไปนี้



สามารถเขียนกฎอัตราในเทอมของผลคูณของความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังด้วยเลขบางตัวดังสมการที่ 2.20

$$-\frac{1}{3} \frac{d[A]}{dt} = -\frac{1}{2} \frac{d[B]}{dt} = \frac{d[C]}{dt} = \frac{d[D]}{dt} = k[A]^m[B]^n \quad (2.20)$$

สำหรับเลขยกกำลัง m และ n อาจมีค่าเท่าใดก็ได้ จะเป็นบวก หรือลบก็ได้

โดย

m คือ อันดับ (order) ของปฏิกิริยา เมื่อถือ A เป็นหลัก

n คือ อันดับ (order) ของปฏิกิริยา เมื่อถือ B เป็นหลัก

$m + n$ คือ อันดับรวมของปฏิกิริยา (overall order of reaction)

ค่า m และ n ไม่จำเป็นต้องเท่ากับสัมประสิทธิ์ในสมการปริมาณสัมพันธ์ ดังนั้นค่าของ m และ n จะต้องหาจากการทดลองเท่านั้น

$m + n$ เท่ากับ 0 เรียกว่า ปฏิกิริยาอันดับศูนย์

$m + n$ เท่ากับ 1 เรียกว่า ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

$m + n$ เท่ากับ 2 เรียกว่า ปฏิกิริยาอันดับสอง

$m + n$ เท่ากับ 3 เรียกว่า ปฏิกิริยาอันดับสาม

$m + n$ เท่ากับ $3/2$ เรียกว่า ปฏิกิริยาอันดับสามส่วนสอง

1. กฎอัตราแบบอนุพันธ์ คือ สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของปฏิกิริยาในรูปการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นหรือสารผลิตภัณฑ์ต่อเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป อัตราการเกิดปฏิกิริยาในทางปฏิบัติหาค่าจริงได้ยาก เพราะบางปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้รวดเร็ว จึงมีกฎอัตราในรูปกฎอัตราแบบอินทิเกรต

2. กฎอัตราแบบอินทิเกรต คือ การเกิดปฏิกิริยาเคมี และหากกฎอัตราได้โดยติดตามปริมาณสารที่เปลี่ยนไปกับเวลา ซึ่งสามารถนำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นกับเวลาที่ติดตาม โดยสามารถติดตามปฏิกิริยา และหาอันดับของปฏิกิริยาได้ดังนี้

1) ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้น ดังสมการ 2.19 และรูปที่ 2.6

เขียนสมการการเปลี่ยนแปลงอัตราการลดลงของสารตั้งต้น A ได้

$$r = \frac{-d[A]}{dt}$$

จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกฎอัตราและอัตราการลดลงของสาร A ดังนี้

$$\frac{-d[A]}{dt} = k$$

จัดรูปใหม่ได้

$$d[A] = -kdt$$

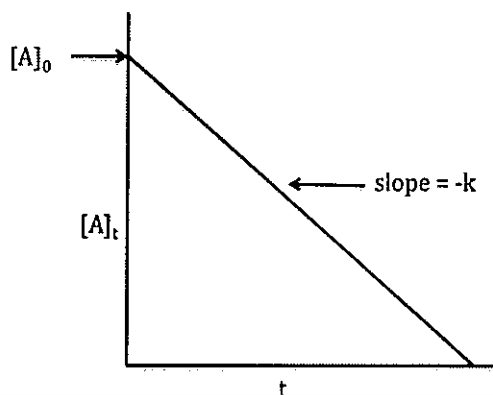
เมื่ออินทิเกรตกฎอัตราดังกล่าวจะได้สมการที่ 2.21

$$\int_{[A]_0}^{[A]_t} d[A] = -k \int_0^t dt$$

$$[A]_t - [A]_0 = -kt$$

$$[A]_t = [A]_0 - k \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (Mack, 2006)

ครึ่งชีวิต (half-life) ของปฏิกิริยา หมายถึงเวลาที่ใช้ในการทำให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นลดลงครึ่งหนึ่งของความเข้มข้นเริ่มต้น โดยเราจะใช้สัญลักษณ์แทนครึ่งชีวิตคือ $t_{1/2}$ สามารถหาครึ่งชีวิตได้จากสมการ 2.22

$$\frac{[A]_0}{2} = [A]_0 - kt_{\frac{1}{2}}$$

$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{[A]_0}{2k} \quad (2.22)$$

2) ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพียงชนิดเดียวเท่านั้น ได้สมการ 2.23 และรูปที่ 2.7 ดังนี้

เขียนสมการการเปลี่ยนแปลงอัตราการลดลงของสารตั้งต้น A ได้

$$r = \frac{-d[A]}{dt}$$

จะได้รับความสัมพันธ์ระหว่างกฎอัตราและอัตราการลดลงของสาร A ดังนี้

$$\frac{-d[A]}{dt} = k$$

จัดรูปใหม่ได้

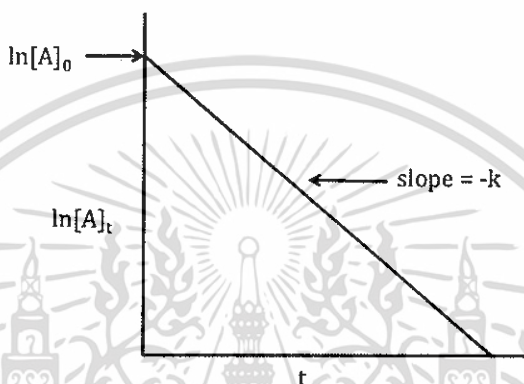
$$-d \frac{[A]}{[A]} = k dt$$

เมื่ออินทิเกรตกฎอัตราดังกล่าวจะได้สมการที่ 2.23

$$\int_{[A]_0}^{[A]_t} d \frac{[A]}{[A]} = -k \int_0^t dt$$

$$\ln \frac{[A]}{[A]_0} = -kdt$$

$$\ln[A]_t = \ln[A]_0 - kt \quad (2.23)$$



รูปที่ 2.7 กราฟปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Mack, 2006)

ดังนั้นสามารถหาค่าครึ่งชีวิตได้จากสมการ 2.24

$$\ln \frac{[A]_0}{2} = \ln[A]_0 - kt_{\frac{1}{2}}$$

$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{k}$$

(2.24)

3) ปฏิกิริยาอันดับสอง

อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพียงชนิดเดียวเท่านั้น ได้สมการ 2.25 และรูปที่ 2.8 ดังนี้

เขียนสมการการเปลี่ยนแปลงอัตราการลดลงของสารตั้งต้น A ได้

$$r = \frac{-d[A]}{dt}$$

จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกฎอัตราและอัตราการลดลงของสาร A ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{-d[A]}{dt} = k[A]^2$$

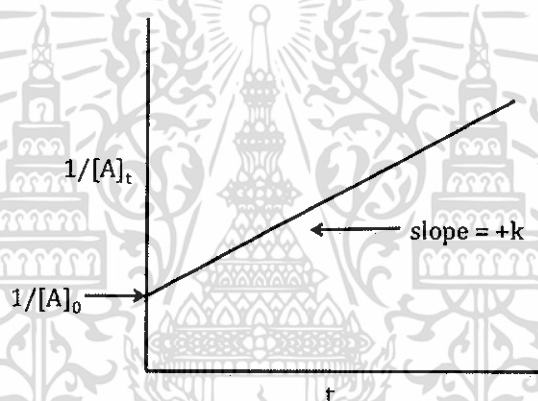
จัดรูปใหม่ได้

$$-d \frac{[A]}{[A]^2} = k dt$$

เมื่ออินทิเกรตกฎอัตราดังกล่าวจะได้สมการที่ 2.25

$$\int_{[A]_0}^{[A]_t} d \frac{[A]}{[A]^2} = -k \int_0^t dt$$

$$\frac{1}{[A]_t} = \frac{1}{[A]_0} + kt \quad (2.25)$$



รูปที่ 2.8 กราฟปฏิกิริยาอันดับสอง (Mack, 2006)

ดังนั้น สามารถหาครึ่งชีวิตได้จากสมการที่ 2.26

$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{1}{k[A]_0} \quad (2.26)$$

2.9.3 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา

1. ธรรมชาติของสารตั้งต้น (reactant) และผลิตภัณฑ์ (product)

ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นช้า หรือเร็วขึ้นอยู่กับธรรมชาติของสาร เช่น สารที่ทำปฏิกิริยาเป็นแก๊สทั้งคู่จะทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่าปฏิกิริยาที่สารอยู่ในสถานะต่างกัน สารแต่ละชนิดมีพันธะที่ยึดเหนี่ยวระหว่างกันแตกต่างกันไป ซึ่งอาจเป็นพันธะโลหะที่มีความแข็งแรงมาก พันธะโคเวเลนต์ที่เกิดจากระหว่างโลหะ และอโลหะมีความแข็งแรงปานกลาง และพันธะแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเป็นพันธะที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุด ดังนั้น สารตั้งต้นมีพันธะที่แข็งแรงก็จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดยาก (อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีช้า) ในทางตรงกันข้ามถ้ามีพันธะที่ไม่แข็งแรงมาก ก็จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้ง่าย (อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดได้เร็ว)

2. ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์

การเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะช่วยทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีสามารถเกิดได้เร็วขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นมากขึ้นปริมาณเนื้อสารก็จะมากตาม จะทำให้การชนกันของอนุภาคของสารเกิดขึ้นได้มากขึ้น แต่ถ้าทำการเพิ่มปริมาตรของสารโดยที่ปริมาณของเนื้อสารยังคงเท่าเดิม (หรือการเจือจาง) จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีช้าลง

3. อุณหภูมิ

ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นปฏิกิริยาจะเกิดได้เร็วขึ้นไม่ว่าปฏิกิริยานั้นจะเป็นชนิดดูดชนิดความร้อน หรือชนิดคายร้อนก็ตาม สามารถอธิบายได้จากการกระจายตัวของพลังงานตามแนวคิดแบบแมกซ์เวลล์-โบลต์ซมันน์ เมื่อการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่อัตรา กับอุณหภูมิ พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าคงที่อัตราที่เพิ่มขึ้น

4. สารเร่งปฏิกิริยา

บางปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เร็วมากจนไม่สามารถวัดอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ หรือเป็นปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการให้เกิดปฏิกิริยาเร็ว จึงจำเป็นต้องเติมสารหน่วง เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาช้าลง ส่วนปฏิกิริยาที่เกิดช้าเกินไปจำเป็นต้องเติมสารเร่งเพื่อให้ปฏิกิริยานั้นเกิดเร็วขึ้น

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Oyama *et al.* (2004) ศึกษาการกำจัดสารลดแรงตึงผิวประเภทประจุลบ และสารฟอกขาวด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวคะตะลิสต์ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัด ได้แก่ ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ พีเอช และอัตราการไหล จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์จาก 2 กรัมต่อลิตร เป็น 6 กรัมต่อลิตร ทำให้ค่าคงที่ปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แสดงว่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดมากขึ้น แต่การเพิ่มไทเทเนียมไดออกไซด์มากเกินไป ทำให้แสงอัลตราไวโอเล็ต เกิดการกระเจิงแสง จนประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสลดลง และการเพิ่มอัตราการไหลจะทำให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสทำงานได้ดีขึ้น แต่ถ้าใช้อัตราการไหลมากเกินไปจะทำให้แสงอัลตราไวโอเล็ตไม่สามารถส่องผ่านได้ ซึ่งอัตราการไหลที่เหมาะสมคือ 4.9 ลิตรต่อนาที และพีเอชของสารละลายมีความสำคัญต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส เนื่องจากค่า pzc ของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 6.8 ดังนั้น ถ้าปรับพีเอชให้มากกว่าค่า pzc ทำให้พื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นประจุลบ ถ้าปรับพีเอชให้ต่ำกว่า ค่า pzc ทำให้พื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นประจุบวก ซึ่งพีเอชที่เหมาะสมเท่า 4.9 เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวเป็นประเภทประจุลบทำให้เกิดการดูดซับได้ดี ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสสามารถกำจัดลดค่า COD และความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวได้ภายในระยะเวลา 25 นาที จากจลนศาสตร์ทางเคมีการกำจัดสารลดแรงตึงผิวเป็นแบบอันดับศูนย์ ซึ่งไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Perkcwski *et al.* (2005) ศึกษาการกำจัดสารลดแรงตึงผิวจากน้ำเสียล้างรถยนต์โดยวิธีโฟโตคะตะไลซิส ด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวคะตะลิสต์ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัด ได้แก่ ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ พีเอช และกำลังไฟ อัลตราไวโอเลต โดยวิเคราะห์ค่า COD BOD และ TOC พบว่าสารลดแรงตึงผิวสามารถดูดซับบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ จึงทำให้ค่า COD ลดลงประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลา 8 ชั่วโมง จากผลการทดลอง ถ้าใช้แสงอัลตราไวโอเลตอย่างเดียวทำให้ค่า COD และ TOC ลดลงประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลา 5 ชั่วโมง ถ้าใช้แสงอัลตราไวโอเลตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ 1.5 กรัม สามารถกำจัด COD และ TOC ได้ 99 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่พีเอช 8.9 และกำลังไฟของรังสีอัลตราไวโอเลต 150 วัตต์

Doan and Saidi (2008) ศึกษาการกำจัดโลหะ และสารอินทรีย์แอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีปริมาณสังกะสี นิกเกิลอย่างละ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณสารอินทรีย์แอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้วิธีไฟฟ้าเคมีร่วมกับปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัด ได้แก่ ความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้า อัตราการไหล และพีเอช จากการทดลองพบว่า วิธีไฟฟ้าเคมีสามารถกำจัดสังกะสี นิกเกิล และสารอินทรีย์แอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตได้ แต่การเพิ่มกระแสไฟฟ้าจาก 0.166 ถึง 1.1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้น 23 เปอร์เซ็นต์ และการเพิ่มอัตราการไหลจาก 0.00212 ถึง 0.0172 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตรต่อวินาที สามารถกำจัดสังกะสีได้ 28 เปอร์เซ็นต์ ส่วนปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสสามารถกำจัดสารอินทรีย์แอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตได้ 60 เปอร์เซ็นต์ ที่พีเอช 6 ระยะเวลา 60 นาที เมื่อนำทั้งสองวิธีดังกล่าวมารวมกันโดยทดลองที่พีเอช 5 และไม่ปรับพีเอช สามารถกำจัดสารอินทรีย์แอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตเพิ่มขึ้น 12 และ 18 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และกำจัดสังกะสี นิกเกิลได้ 81 และ 48 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Boyjoo *et al.* (2012) ศึกษาการกำจัดสารลดแรงตึงผิวจากน้ำเสียซักล้างโดยวิธีโฟโตคะตะไลติก ด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวคะตะลิสต์ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัด ได้แก่ ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ พีเอช อัตราการไหล และอัตราการไหลเวียน จากการทดลองพบว่า ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสสามารถลดค่า TOC 57 เปอร์เซ็นต์ ในระยะเวลา 6 ชั่วโมง ในช่วงแรกค่า TOC มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนยังไม่ถูกสลาย แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปสายโซ่จะถูกสลายให้เล็กลงกลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ จากการศึกษามูลของพีเอชสารละลาย พบว่า การลดค่าพีเอชจาก 7.4 เป็น พีเอช 5 อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเร็วขึ้น เนื่องจากค่า pzc ของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 6.8 แต่การปรับพีเอชให้ต่ำกว่า pzc พื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์จะเป็นประจุบวก ดังนั้น สารลดแรงตึงผิวประจุลบสามารถถูกซับบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ ถ้าน้ำเสียมีคาร์บอเนต และคลอไรด์ ซึ่งเป็นตัวรบกวนปฏิกิริยาจึงต้องเป็นค่าพีเอชให้เป็นกรดก่อน คาร์บอเนตจะกลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ถ้าปรับพีเอชเป็น 2.2 จะทำให้ปริมาณคลอไรด์จะ

เพิ่มขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพลดต่ำลง และปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสม 0.07 กรัมต่อลิตร สามารถลดค่า TOC ได้ดีที่สุดในที่สุด แต่ถ้าเพิ่มไทเทเนียมไดออกไซด์มากเกินไป แสงอัลตราไวโอเลตจะเกิดการกระเจิงแสง ทำให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสลดลง อัตราการไหล และอัตราการไหลเวียนมีผลต่อการกำจัดสารลดแรงตึงผิว เนื่องจากการใช้อัตราการไหลที่สูง ทำให้เกิดฟองขึ้น โดยบดบังแสงอัลตราไวโอเลตส่องผ่านในสารละลาย อัตราการไหล และอัตราการไหลเวียนที่เหมาะสมเท่ากับ 1.8 และ 4.4 ลิตรต่อนาที

Ghanbarian *et al.* (2013) ศึกษาการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต (LAS) โดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวคะตะลิสต์ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัด ได้แก่ ความเข้มข้น LAS ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ พีเอช และกำลังไฟของรังสีอัลตราไวโอเลต จากการศึกษาพบว่า ถ้าใช้แสงอัลตราไวโอเลตอย่างเดียวไม่สามารถกำจัดสาร LAS แต่การใช้แสงอัลตราไวโอเลตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ประสิทธิภาพการกำจัดสาร LAS 99.5 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 7 ผลของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าคงที่ปฏิกิริยาสูงสุด และพีเอชที่อยู่ในช่วงกรดจะทำให้พื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นประจุบวก ดังนั้น ซัลโฟเนตสามารถดูดซับบนพื้นที่ผิวได้ และความเข้มข้น LAS ถ้าใช้ความเข้มข้นสูงทำให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสลดลง เนื่องจาก LAS จะถูกดูดซับบนโฟตอน ทำให้โฟตอนไม่สามารถทำปฏิกิริยากับไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ ส่วนค่า COD ของ LAS ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถลดค่า COD ได้ 90 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลา 80 นาที

Xie *et al.* (2013) ศึกษาการกำจัดฟอสเฟตด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ในแม่น้ำ Chaunsha โดยปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัด ได้แก่ ปริมาณไทเทเนียม ระยะเวลา และกำลังไฟของรังสีอัลตราไวโอเลต จากการศึกษาพบว่า แม่น้ำ Chaunsha มีปริมาณฟอสฟอรัสรวม และออร์โธฟอสเฟต เท่ากับ 0.4 และ 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเกินค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินของประเทศจีน การกำจัดฟอสเฟตด้วยวิธีการดูดซับสามารถลดปริมาณฟอสฟอรัสรวม และออร์โธฟอสเฟต 30 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อใช้แสงอัลตราไวโอเลตร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสรวม และออร์โธฟอสเฟต ลดลง 95 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากพื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเลต ทำให้ฟอสเฟตถูกดูดซับบนรูพรุนบนพื้นผิว และที่พีเอช 2 ถึง 10.5 ปริมาณฟอสฟอรัสรวม และออร์โธฟอสเฟตที่ถูกดูดซับไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.05 และ 0.1 กรัมต่อลิตร โดยใช้ความเข้มแสงอัลตราไวโอเลต 20, 36 และ 74 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่าความเข้มแสงอัลตราไวโอเลต 36 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.05 กรัมต่อลิตร สามารถลดปริมาณฟอสฟอรัสรวมได้มากกว่า 95

เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าใช้ความเข้มข้น 20 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร สามารถลดปริมาณฟอสฟอรัสรวมได้ 0.07 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินได้

Alshameri *et al.* (2014) ศึกษาการดูดซับฟอสเฟตโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์กับซีโอไลต์ (TZ) โดยปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัด ได้แก่ ระยะเวลา ปริมาณตัวดูดซับ พีเอช ความเข้มข้น อุณหภูมิ และตัวรบกวน จากการทดลองพบว่า ตัวดูดซับ TZ สามารถดูดซับฟอสเฟตได้ถึง 98.5 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลา 5 นาที และปริมาณตัวดูดซับ 0.1 - 1 กรัม ประสิทธิภาพการดูดซับจะเพิ่มขึ้น 98.5 เปอร์เซ็นต์ และถ้าพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง เนื่องจากการเพิ่มพีเอชสูงขึ้นจะทำให้พื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นประจุลบจึงทำให้ประสิทธิภาพต่ำลง แต่พีเอช 2 - 4 สามารถดูดซับได้ 98.6 เปอร์เซ็นต์ จากการศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 35 องศาเซลเซียส การดูดซับฟอสเฟตจะดีขึ้น อธิบายได้จากเอนทัลปีของไอโซเทอมแบบพลูลิซด์ และมีค่าการดูดซับ 37.6 มิลลิกรัมต่อกรัม และตัวรบกวนต่าง ๆ ได้แก่ อาซิเนต และซิลิเกต ทำให้การดูดซับลดลง เนื่องจากการเกิดแข่งขันดูดซับบนพื้นที่ผิว

Sugiharto *et al.* (2014) ศึกษาการกำจัดสารลดแรงตึงผิว และฟอสเฟตในน้ำเสียจากการซักล้างด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส และการตกตะกอนทางเคมี โดยปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัด ได้แก่ ชนิดของสารเคมีตกตะกอน ปริมาณไทเทเนียม และระยะเวลา พบว่า ตัวอย่างน้ำเสียมีปริมาณฟอสเฟต และสารลดแรงตึงผิว 52 และ 198 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลองพบว่า ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกสามารถลดปริมาณสารลดแรงตึงผิวได้อย่างมีประสิทธิภาพถึง 90 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้ปริมาณไทเทเนียม 30 มิลลิกรัม ที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง และการกำจัดสารฟอสเฟตสามารถกำจัดได้ 10 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเปอร์เซ็นต์การกำจัดขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมีตกตะกอน โดยเฟอริกมีประสิทธิภาพการตกตะกอนที่ดีที่สุด รองมาเป็น อะลูมิเนียม และแคลเซียม ตามลำดับ

Maryani and Kustiningsih (2015) ศึกษาผลิตภัณฑ์ของสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต หลังผ่านปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ด้วยเครื่อง High performance liquid chromatograph (HPLC) และเครื่อง Nuclear Magnetic resonance (NMR) ความเข้มข้นของสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัมต่อลิตร โดยแปรค่าระยะเวลา เป็น 1, 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง พบว่า ปริมาณสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตถูกกำจัดได้ 69.9 เปอร์เซ็นต์ ในระยะเวลา 5 ชั่วโมง และมีปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 65.1 เปอร์เซ็นต์ จากการทดลองหาผลิตภัณฑ์โดยใช้เครื่อง HPLC และ NMR พบว่า โครงสร้างหลักของสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่ความเข้มข้นของสาร LAS ลดลง ซึ่งสารอินทรีย์จะถูกสลายจะกลายเป็น แอลกอฮอล์ คาร์บอกซิลิก อัลดีไฮด์ และเปอร์ออกไซด์ แต่สารประกอบพวกนี้สลายตัวอย่างรวดเร็วจึงไม่สามารถตรวจวัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

3.1.1 สารเคมี

1. อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้รับความอนุเคราะห์จากวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. โซเดียมโดเดซิลเบนซีนซัลโฟเนต (Sodium dodecylbenzenesulfonate, $C_{18}H_{29}NaO_3S$) เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา
3. คลอโรฟอร์ม (Chloroform, $CHCl_3$) เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba ประเทศอิตาลี
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba ประเทศอิตาลี
5. กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid, H_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba ประเทศอิตาลี
6. เมทิลีนบลู (Methylene blue) เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba ประเทศอิตาลี
7. โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตไดไฮเดรต (Sodium dihydrogen phosphate dihydrate, $NaH_2PO_4 \cdot 2H_2O$) เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Fluka ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
8. ฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein, $C_{20}H_{14}O_4$) เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba ประเทศอิตาลี
9. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl) เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba ประเทศอิตาลี
10. แอมโมเนียมเฟอร์รัสซัลเฟต (Diammonium Iron (II) sulphate) เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Lobachemie ประเทศอินเดีย
11. โพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate, $K_2Cr_2O_7$) เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba ประเทศอิตาลี
12. เมอคิวรีซัลเฟต (Mercury (II) sulphate, $HgSO_4$) เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba ประเทศอิตาลี
13. ซิลเวอร์ซัลเฟต (Silver sulphate, Ag_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba ประเทศอิตาลี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. 1,10-ฟีแนนโทรีน (1,10-Phenanthroline, $C_{12}H_{10}N_2O$) เกรตวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba ประเทศอิตาลี
15. เฟอร์รัสซัลเฟต (Iron (II) sulphate, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$) เกรตวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba ประเทศอิตาลี
16. เมทานอล (Methanol, CH_3OH) เกรตวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba ประเทศอิตาลี
17. โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate, Na_2CO_3) เกรตวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba ประเทศอิตาลี
18. โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (Sodium hydrogen carbonate, $NaHCO_3$) เกรตวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba ประเทศอิตาลี
19. อะซีโตน (Acetone, CH_3COCH_3) เกรตวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba ประเทศอิตาลี
20. กรดแอสคอร์บิก (Ascorbic acid, $C_6H_8O_6$) เกรตวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba ประเทศอิตาลี
21. แอมโมเนียมโมลิบเดต tetrahydrate, (NH_4)₆Mo₇O₂₄·4H₂O เกรตวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba ประเทศอิตาลี
22. แอนติโมนีโพแทสเซียมทาเตรต (Antimony potassium tartrate, $K(SbO)C_4H_4O_6 \cdot 0.5H_2O$) เกรตวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba ประเทศอิตาลี
23. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Potassium dihydrogen phosphate, KH_2PO_4) เกรตวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba ประเทศอิตาลี
24. แบเรียมคลอไรด์ (Barium chloride, $BaCl_2$) เกรตวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba ประเทศอิตาลี
25. โซเดียมซัลเฟตแอนไฮดรัส (Sodium sulfate anhydrous, Na_2SO_4) เกรตวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba ประเทศอิตาลี
26. แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต (Magnesium chloride hexahydrate, $MgCl_2 \cdot 6H_2O$)
27. โซเดียมแอซิเตตไตรไฮเดรต (Sodium acetate trihydrate, $CH_3COONa \cdot 3H_2O$) เกรตวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba ประเทศอิตาลี
28. โพแทสเซียมไนเตรต (Potassium nitrate, KNO_3) เกรตวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba ประเทศอิตาลี
29. กรดแอซีติก (Acetic acid, CH_3COOH) เกรตวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo Erba ประเทศอิตาลี
30. น้ำกลั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องอัลตราไวโอเล็ต - วิสเปิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) รุ่น UH 5300 บริษัท Hitachi ประเทศญี่ปุ่น
2. เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ (Gas chromatograph) รุ่น 6830 N และแมสสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Mass spectrophotometer) รุ่น 5973N บริษัท Agilent Technologies ประเทศสหรัฐอเมริกา
3. เครื่องออสโตรบ (Autosorb) รุ่น Autosorb-1 บริษัท Quantachrome ประเทศสหรัฐอเมริกา
4. เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction) รุ่น D8 Advance บริษัท Bruker ประเทศเยอรมนี
5. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น TR403 บริษัท Denver Instrument Company ประเทศสหรัฐอเมริกา
6. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) รุ่น C860 บริษัท Consort ประเทศเบลเยียม
7. ตู้อบความร้อน (Hot air oven) บริษัท Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
8. เครื่องปั่นเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifuge) รุ่น Centaur 2 บริษัท Sanyo ประเทศญี่ปุ่น
9. แผ่นให้ความร้อน (Hot plate) รุ่น Fisher Stirring and Hotplate บริษัท Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
10. ไมโครปิเปตขนาด 100 – 1,000 ไมโครลิตร รุ่น Pipet-Lite XLS+ บริษัท Mettler Toledo ประเทศสหรัฐอเมริกา
11. กระจาดชกรอง รุ่น Ashless บริษัท Machery-Nagel เบอร์ 41
12. กระจาดชกรองเมมเบรน รุ่น Nylon 0.45 ไมครอน บริษัท CWN Technologies ประเทศจีน
13. โถดูดความชื้น (Dessicator)
14. หลอดรังสียูวีซี (254 nm) รุ่น T8 18W บริษัท Narwar ประเทศอินเดีย
15. ขวดพลาสติกสำหรับเก็บตัวอย่างชนิดโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE)
16. Solid phase extraction (SPE) รุ่น Strata C18-E ยี่ห้อ Phenomenex ประเทศสหรัฐอเมริกา
17. เครื่องวัดความขุ่น (Turbidimeter) รุ่น AL250T-IR ยี่ห้อ Aqua Lytic ประเทศเยอรมัน
18. เครื่องแก้วต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

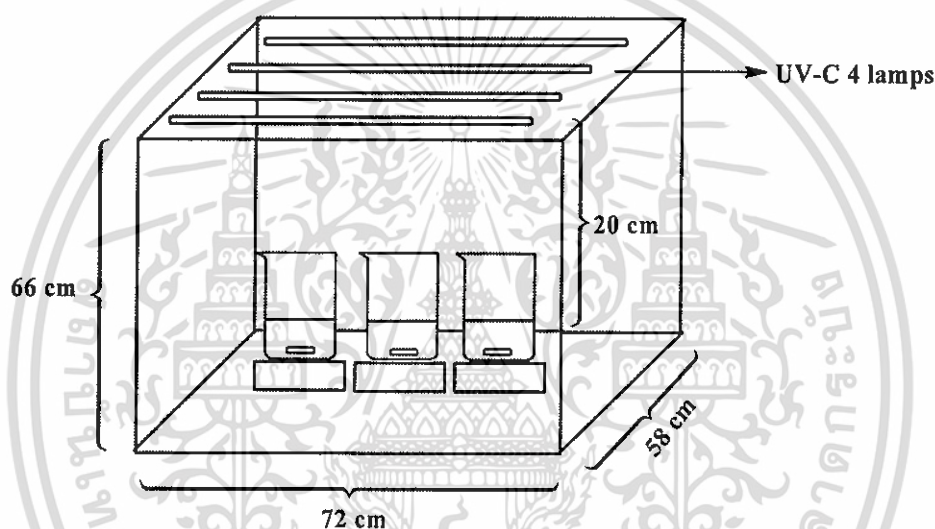
3.1.3 น้ำเสียอุตสาหกรรมซักล้าง

น้ำเสียอุตสาหกรรมซักล้างได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ชินไฉ้อุตสาหกรรม จำกัด เป็นน้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัดแบบ Activated sludge

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การสร้างตู้ปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส

ตู้ปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสทำจากแผ่นไม้ ขนาดตู้ 58 x 72 x 66 เซนติเมตร (กว้าง x ยาว x สูง) ใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดรังสียูวีซี (254 nm) กำลังไฟหลอดละ 18 วัตต์ จำนวน 4 หลอด แสดงดังรูปที่ 3.1 ภายใต้อุปกรณ์จะใช้กระดาษขาวปิดทับเพื่อป้องกันรังสียูวีดูดซับบนผนัง



รูปที่ 3.1 ตู้ปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส

3.2.2 วิเคราะห์ลักษณะของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

3.2.2.1 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกทางเคมี

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกทางเคมีของ TiO_2 ด้วยเครื่อง X-ray Diffraction (XRD) โดยใช้รังสี Cu-K α ที่ความยาวคลื่น 1.5406 Å ตรวจวัดแบบ 2 θ - scan ด้วยมุมตกกระทบเฉียงคงที่เท่ากับ 5° สแกน 2 θ จาก 10° - 70° ด้วยอัตราสแกน 0.04° ต่อนาที

3.2.2.2 วิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุน

การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยเครื่อง Autosorp - 1 (BET) ใช้หลักการดูดซับของแก๊สไนโตรเจนบนพื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ (BET) โดยใช้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.0372 กรัม ทำการไล่แก๊ส และ

ความชื้นออกจากตัวอย่างที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 16.60 ชั่วโมง จากนั้นให้พื้นผิวดูดซับแก๊สไนโตรเจนเป็นระยะเวลา 348 นาที

3.2.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

3.2.3.1 การเตรียมสารละลายลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต

1. ชั่งโซเดียมโดเดคซิลเบนซีนซัลโฟเนต ซึ่งเป็นตัวแทนของสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตมา 1.000 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตร จะให้ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. ปิเปตสต็อกโซเดียมโดเดคซิลเบนซีนซัลโฟเนตมา 20 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตร จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น จะให้ความเข้มข้นเป็น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.2.3.2 การเตรียมสารละลายออร์โธฟอสเฟต

1. ชั่งโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่อบที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ซึ่งเป็นตัวแทนของสารออร์โธฟอสเฟตมา 1.4329 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะให้ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมฟอสเฟตต่อลิตร

2. ปิเปตสต็อกโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมฟอสเฟตต่อลิตร มา 1 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตร จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น จะให้ความเข้มข้นเป็น 1 มิลลิกรัมฟอสเฟตต่อลิตร

3.2.4 การวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมซักล้าง

วิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมซักล้าง โดยใช้วิธีมาตรฐาน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater และ US. EPA ดังแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วิธีวิเคราะห์คุณลักษณะเบื้องต้นของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมซักล้าง

คุณลักษณะ	วิธีมาตรฐาน
1. ค่าพีเอช	4500-H ⁺ B (1998)
2. ปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Chemical oxygen demand, COD)	APHA 5220 A (1998)
3. สารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต	APHA 5540.C (1998)
4. ปริมาณออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphate contents)	US. EPA 365.3 (1978)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต (LAS) โดยวิธีดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์ (Adsorption on TiO_2), โฟโตไลซิสด้วยรังสียูวีซี (Photolysis with UV-C) และวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี (TiO_2 /UV-C)

3.2.5.1 การกำจัดสารละลาย LAS โดยวิธีดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์

1. นำสารละลาย LAS ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เตรียมจากข้อ 3.2.3.1 จำนวน 100 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร เติม TiO_2 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. นำไปใส่ในเครื่องอัลตราโซนิก 10 นาที เพื่อให้อนุภาคของ TiO_2 กระจายตัว และนำไปปั่นกวน เป็นระยะเวลา 60 นาที
3. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเมมเบรน 0.45 ไมครอนเพื่อแยก TiO_2 ออกจากสารละลาย
4. นำสารละลาย 10 มิลลิลิตร มาสกัดสาร LAS ด้วยวิธี Methylene blue active substances (APHA 5540.C, 1998) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก)
5. นำไปวัดค่าการดูดกลืนด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 651 นาโนเมตร
6. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 อีก 2 ชั่วโมง แต่ใช้ระยะเวลา 0 และ 30 นาที
7. ทำชุดควบคุมเช่นเดียวกับข้อ 1-6 โดยไม่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์

3.2.5.2 การกำจัดสารละลาย LAS โดยวิธีโฟโตไลซิสด้วยรังสียูวีซี

1. นำสารละลาย LAS ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เตรียมจากข้อ 3.2.3.1 จำนวน 100 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร
2. นำเข้าตู้ปฏิบัติการโฟโตคะตะไลซิส ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร กำลังไฟ 4X18 วัตต์ โดยมีการปั่นกวนตลอดระยะเวลา 60 นาที แสดงดังรูปที่ 3.1
3. นำสารละลาย 10 มิลลิลิตร มาสกัดสาร LAS ด้วยวิธี Methylene blue active substances (APHA 5540.C, 1998) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก)
4. นำไปวัดค่าการดูดกลืนด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 651 นาโนเมตร
5. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 อีก 2 ชั่วโมง แต่ใช้ระยะเวลา 0 และ 30 นาที
6. ทำชุดควบคุมเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่ไม่ใช้รังสียูวีซี

3.2.5.3 การกำจัดสารละลาย LAS โดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี ($\text{TiO}_2/\text{UV-C}$)

1. นำสารละลาย LAS ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เตรียมจากข้อ 3.2.3.1 จำนวน 100 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร เติม TiO_2 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. นำไปใส่ในเครื่องอัลตราโซนิก 10 นาที เพื่อให้อนุภาคของ TiO_2 กระจายตัว และนำเข้าสู่ตู้ปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร กำลังไฟ 4X18 วัตต์ โดยมีการปั่นกววนตลอดระยะเวลา 60 นาที

3. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเมมเบรน 0.45 ไมครอนเพื่อแยก TiO_2 ออกจากสารละลาย

4. นำสารละลาย 10 มิลลิลิตร มาสกัดสาร LAS ด้วยวิธี Methylene blue active substances (APHA 5540.C, 1998) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก)

5. นำไปวัดค่าการดูดกลืนด้วยเครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 651 นาโนเมตร

6. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 อีก 2 ซ้ำ แต่ใช้ระยะเวลา 0 และ 30 นาที

7. ทำชุดควบคุมเช่นเดียวกับข้อ 1-6 โดยไม่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ และไม่ใช้รังสียูวีซี

3.2.6 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต (LAS) โดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี ($\text{TiO}_2/\text{UV-C}$)

3.2.6.1 การหาค่าพีเอชที่เหมาะสม

1. นำสารละลาย LAS ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เตรียมได้จากข้อ 3.2.3.1 จำนวน 100 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร วัดพีเอชเริ่มต้น เติม TiO_2 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. นำไปใส่ในเครื่องอัลตราโซนิก 10 นาที เพื่อให้อนุภาคของ TiO_2 กระจายตัว และนำเข้าสู่ตู้ปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร กำลังไฟ 4X18 วัตต์ โดยมีการปั่นกววนตลอดระยะเวลา 30 นาที

3. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเมมเบรน 0.45 ไมครอนเพื่อแยก TiO_2 ออกจากสารละลาย

4. นำสารละลาย 10 มิลลิลิตร มาสกัดสาร LAS ด้วยวิธี Methylene blue active substances (APHA 5540.C, 1998) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก)

5. นำไปวัดค่าการดูดกลืนด้วยเครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 651 นาโนเมตร

6. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 - 5 อีก 2 ซ้ำ
7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 - 6 แต่แปรค่าพีเอช เป็น 2, 4 และ 7
8. ทำชุดควบคุมเช่นเดียวกับข้อ 1 - 6 โดยไม่เติม TiO_2 และไม่ใช้รังสียูวีซี

3.2.6.2 การหาปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสม

1. นำสารละลาย LAS ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เตรียมได้จากข้อ 3.2.3.1 จำนวน 100 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร เติม TiO_2 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และปรับพีเอชเหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.6.1
2. นำไปใส่ในเครื่องอัลตราโซนิก 10 นาที เพื่อให้อนุภาคของ TiO_2 กระจายตัว และนำเข้าสู่ปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร กำลังไฟ 4X18 วัตต์ โดยมีการปั่นกวาดตลอดระยะเวลา 30 นาที
3. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเมมเบรน 0.45 ไมครอนเพื่อแยก TiO_2 ออกจากสารละลาย
4. นำสารละลาย 10 มิลลิลิตร มาสกัดสาร LAS ด้วยวิธี Methylene blue active substances (APHA 5540.C, 1998) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก)
5. นำไปวัดค่าการดูดกลืนด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 651 นาโนเมตร
6. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 - 5 อีก 2 ซ้ำ
7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 - 6 แต่แปรค่า TiO_2 เป็น 300 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร
8. ทำชุดควบคุมเช่นเดียวกับข้อ 1 - 6 โดยไม่เติม TiO_2 และไม่ใช้รังสียูวีซี

3.2.6.3 การหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม

1. นำสารละลาย LAS ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เตรียมได้จากข้อ 3.2.3.1 จำนวน 100 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร เติม TiO_2 เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.6.2 และปรับพีเอชเหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.6.1
2. นำไปใส่ในเครื่องอัลตราโซนิก 10 นาที เพื่อให้อนุภาคของ TiO_2 กระจายตัว และนำเข้าสู่ปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร กำลังไฟ 4X18 วัตต์ โดยมีการปั่นกวาดตลอดระยะเวลา 30 นาที
3. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเมมเบรน 0.45 ไมครอนเพื่อแยก TiO_2 ออกจากสารละลาย
4. นำสารละลาย 10 มิลลิลิตร มาสกัดสาร LAS ด้วยวิธี Methylene blue active substances (APHA 5540.C, 1998) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก) และวิเคราะห์หาปริมาณซัลเฟตด้วยวิธีวัดความขุ่น (US. EPA. 9038, 1986) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำไปวัดค่าการดูดกลืนด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 651 นาโนเมตร ส่วนซัลเฟตวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดความขุ่น
6. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 - 5 อีก 2 ชั่วโมง
7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 - 6 แต่แปรค่าระยะเวลา เป็น 5, 10, 15, 60 และ 120 นาที
8. ทำชุดควบคุมเช่นเดียวกับข้อ 1 - 6 โดยไม่เติม TiO_2 และไม่ใช้รังสียูวีซี

3.2.6.4. การหาความเข้มข้นของสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตที่เหมาะสม

1. นำสารละลาย LAS ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เตรียมได้จากข้อ 3.2.3.1 จำนวน 100 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร เติม TiO_2 เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.6.2 และปรับพีเอชเหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.6.1
2. นำไปใส่ในเครื่องอัลตราโซนิก 10 นาที เพื่อให้อนุภาคของ TiO_2 กระจายตัว และนำเข้าสู่ปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร กำลังไฟ 4X18 วัตต์ โดยมีการปั่นกวนตลอดโดยใช้ระยะเวลาเหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.6.3
3. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเมมเบรน 0.45 ไมครอนเพื่อแยก TiO_2 ออกจากสารละลาย
4. นำสารละลาย 10 มิลลิลิตร มาสกัดสาร LAS ด้วยวิธี Methylene blue active substances (APHA 5540.C, 1998) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก)
5. นำไปวัดค่าการดูดกลืนด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 651 นาโนเมตร
6. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 - 5 อีก 2 ชั่วโมง
7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 - 6 แต่แปรค่าความเข้มข้น เป็น 10, 40, 60 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
8. ทำชุดควบคุมเช่นเดียวกับข้อ 1 - 6 โดยไม่เติม TiO_2 และไม่ใช้รังสียูวีซี

3.2.7 จลนพลศาสตร์ทางเคมีของการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี ($\text{TiO}_2/\text{UV-C}$)

1. นำสารละลาย LAS ความเข้มข้นเหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.6.4 จำนวน 100 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร เติม TiO_2 เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.2.6.2 และปรับพีเอชเหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.6.1
2. นำไปใส่ในเครื่องอัลตราโซนิก 10 นาที เพื่อให้อนุภาคของ TiO_2 กระจายตัว และนำเข้าสู่ปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร กำลังไฟ 4X18 วัตต์ โดยมีการปั่นกวนตลอดระยะเวลา 1 นาที

3. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเมมเบรน 0.45 ไมครอนเพื่อแยก TiO_2 ออกจากสารละลาย
4. นำสารละลาย 10 มิลลิลิตร มาสกัดสาร LAS ด้วยวิธี Methylene blue active substances (APHA 5540.C, 1998) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก)
5. นำไปวัดค่าการดูดกลืนด้วยเครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 651 นาโนเมตร
6. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 - 5 อีก 2 ซ้ำ
7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 - 6 แต่แปรค่าระยะเวลา เป็น 0, 3, 5, 10, 15, 30, 60 และ 120 นาที
8. ทำชุดควบคุมเช่นเดียวกับข้อ 1 - 6 โดยไม่เติม TiO_2 และไม่ใช้รังสียูวีซี

3.2.8 ศึกษาผลิตภัณฑ์ของสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตหลังจากผ่านการกำจัดโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี ($\text{TiO}_2/\text{UV-C}$)

1. ทำการปรับสภาพ Solid phase extraction (SPE) โดยเติมเมทานอล 6 มิลลิลิตร และน้ำเกรด HPLC 6 มิลลิลิตร
2. นำสารละลาย LAS หลังจากผ่านการกำจัดโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวี 100 มิลลิลิตร ผ่าน SPE โดยใช้ปั๊ม
3. ล้าง SPE ด้วยน้ำ Ultra pure 1 มิลลิลิตร และทิ้งไว้ให้แห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศเป็นระยะเวลา 50 นาที
4. ชะสารที่จับอยู่กับ SPE ด้วยเมทานอล 2.5 มิลลิลิตร
5. นำสารละลายที่ผ่านการสกัดมาวิเคราะห์หาผลิตภัณฑ์ของสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตด้วยเครื่อง GC-MS โดยใช้สภาวะดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สภาวะของการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซีด้วยเครื่อง GC-MS

โปรแกรม	สภาวะการทดลอง
Gas Chromatograph	6830 N (Agilent Technologies, USA)
Carrier gas	Helium, Flow rate 1 ml/min
Column	HP-5 MS ขนาด 30 m x 0.25 mm I.D. x 0.25 μm (film thickness) capillary column (J&WScientific, USA)
Injector temperature	250 $^{\circ}\text{C}$
Purge flow split vent	2 μl

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 (ต่อ) สภาวะของการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากการกำจัดสารอินทรีย์แอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซีด้วยเครื่อง GC-MS

โปรแกรม	สภาวะการทดลอง
Final temperature	315°C
Final hold time	12 mins
Detector	Mass Spectrometer 5973 N (Agilent Technologies, USA) TIC mode
Electron energy	70 eV
Hardware	Total Ion Chromatogram (TIC) mode

3.2.9 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารออร์โธพอสเฟต โดยวิธีดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์ (Adsorption on TiO_2), โฟโตไลซิสด้วยรังสียูวีซี (Photolysis with UV-C) และวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี ($TiO_2/UV-C$)

3.2.9.1 การกำจัดสารออร์โธพอสเฟตโดยวิธีดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์

- นำสารละลายออร์โธพอสเฟต ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เตรียมจากข้อ 3.2.3.2 จำนวน 100 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร เติม TiO_2 500 มิลลิกรัมต่อลิตร
- นำไปใส่ในเครื่องอัลตราโซนิก 10 นาที เพื่อให้อนุภาคของ TiO_2 กระจายตัว และนำไปปั่นกวน เป็นระยะเวลา 60 นาที
- กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเมมเบรน 0.45 ไมครอนเพื่อแยก TiO_2 ออกจากสารละลาย
- นำสารละลายมาวิเคราะห์หาปริมาณออร์โธพอสเฟต ด้วยวิธีกรดแอสคอร์บิก (US. EPA 365.3, 1978) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก)
- นำไปวัดค่าการดูดกลืนด้วยเครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร
- ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 อีก 2 ซ้ำ แต่แปรค่าระยะเวลาเป็น 0, 5, 10, 15, 30 และ 120 นาที
- ทำชุดควบคุมเช่นเดียวกับข้อ 1-6 โดยไม่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์

3.2.9.2 การกำจัดสารออร์โธฟอสเฟตโดยวิธีโฟโตไลซิสด้วยรังสียูวีซี

1. นำสารละลายออร์โธฟอสเฟต ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เตรียมจากข้อ 3.2.3.2 จำนวน 100 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร
2. นำเข้าสู่ปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร กำลังไฟ 4X18 วัตต์ โดยมีการปั่นกวนตลอดระยะเวลา 60 นาที
3. นำสารละลายมาวิเคราะห์หาปริมาณออร์โธฟอสเฟต ด้วยวิธีกรดแอสคอร์บิก (US. EPA 365.3, 1978) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก)
4. นำไปวัดค่าการดูดกลืนด้วยเครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร
5. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 อีก 2 ซ้ำ แต่แปรค่าระยะเวลาเป็น 0, 5, 10, 15, 30 และ 120 นาที
6. ทำชุดควบคุมเช่นเดียวกับข้อ 1-5 โดยไม่ใช้รังสียูวีซี

3.2.9.3 การกำจัดสารออร์โธฟอสเฟตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี (TiO₂/UV-C)

1. นำสารละลายออร์โธฟอสเฟต ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เตรียมจากข้อ 3.2.3.2 จำนวน 100 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร เติม TiO₂ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. นำไปใส่ในเครื่องอัลตราโซนิก 10 นาที เพื่อให้อนุภาคของ TiO₂ กระจายตัว และนำเข้าสู่ปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร กำลังไฟ 4X18 วัตต์ โดยมีการปั่นกวนตลอดระยะเวลา 60 นาที
3. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเมมเบรน 0.45 ไมครอนเพื่อแยก TiO₂ ออกจากสารละลาย
4. นำสารละลายมาวิเคราะห์หาปริมาณออร์โธฟอสเฟต ด้วยวิธีกรดแอสคอร์บิก (US. EPA 365.3, 1978) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก)
5. นำไปวัดค่าการดูดกลืนด้วยเครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร
6. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 อีก 2 ซ้ำ แต่แปรค่าระยะเวลาเป็น 0, 5, 10, 15, 30 และ 120 นาที
7. ทำชุดควบคุมเช่นเดียวกับข้อ 1-6 โดยไม่เติม TiO₂ และไม่ใช้รังสียูวีซี

3.2.10 การกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตและออร์โทฟอสเฟตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี ($\text{TiO}_2/\text{UV-C}$)

1. นำน้ำเสียสังเคราะห์ผสมระหว่าง LAS 20 มิลลิกรัมต่อลิตร กับออร์โทฟอสเฟต 1 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 100 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร เติม TiO_2 เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.6.2 และปรับพีเอชเหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.6.1

2. นำไปใส่ในเครื่องอัลตราโซนิก 10 นาที เพื่อให้อนุภาคของ TiO_2 กระจายตัว และนำเข้าสู่ปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร กำลังไฟ 4X18 วัตต์ โดยมีการปั่นกวตลอกโดยใช้ระยะเวลาเหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.6.3

3. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเมมเบรน 0.45 ไมครอนเพื่อแยก TiO_2 ออกจากสารละลาย

4. นำสารละลาย 10 มิลลิลิตร มาสกัดสาร LAS ด้วยวิธี Methylene blue active substances (APHA 5540.C, 1998) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก) และนำสารละลาย 15 มิลลิลิตร มาวิเคราะห์หาปริมาณออร์โทฟอสเฟต ด้วยวิธีกรดแอสคอร์บิก (US. EPA 365.3, 1978) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก)

5. นำไปวัดค่าการดูดกลืนด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 651 นาโนเมตร สำหรับการวิเคราะห์ LAS และ 880 นาโนเมตร สำหรับการวิเคราะห์ออร์โทฟอสเฟต

6. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 - 5 อีก 2 ข้อ

7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 - 6 แต่แปรค่าความเข้มข้นของออร์โทฟอสเฟต เป็น 10 มิลลิกรัมฟอสเฟตต่อลิตร

8. ทำชุดควบคุมเช่นเดียวกับข้อ 1 - 6 โดยไม่เติม TiO_2 และไม่ใช้รังสียูวีซี

3.3 การกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต และสารออร์โทฟอสเฟตในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมซักล้างโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี ($\text{TiO}_2/\text{UV-C}$)

1. นำน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมซักล้าง จำนวน 100 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร เติม TiO_2 เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.6.2 และปรับพีเอชเหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.6.1

2. นำไปใส่ในเครื่องอัลตราโซนิก 10 นาที เพื่อให้อนุภาคของ TiO_2 กระจายตัว และนำเข้าสู่ปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร กำลังไฟ 4X18 วัตต์ โดยมีการปั่นกวตลอกโดยใช้ระยะเวลาเหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.2.6.3

3. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเมมเบรน 0.45 ไมครอนเพื่อแยก TiO_2 ออกจากสารละลาย

4. นำสารละลาย 10 มิลลิลิตร มาสกัดสาร LAS ด้วยวิธี Methylene blue active substances (APHA 5540.C, 1998) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก) และนำสารละลาย 15 มิลลิลิตร มาวิเคราะห์หาปริมาณออร์โธฟอสเฟต ด้วยวิธีกรดแอสคอร์บิก (US. EPA 365.3, 1978) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก) หาความต้องการออกซิเจนทางเคมี ด้วยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด (APHA 5520.A, 1998) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก)

5. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 - 4 อีก 2 ซ้ำ

6. ทำชุดควบคุมเช่นเดียวกับข้อ 1 - 5 โดยไม่เติม TiO_2 และไม่ใช้รังสียูวีซี

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ข้อมูลผลการทดลองจะวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรม SPSS รุ่น 23.0 ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA) และวิธีทดสอบของ Post hoc Turkey ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



บทที่ 4

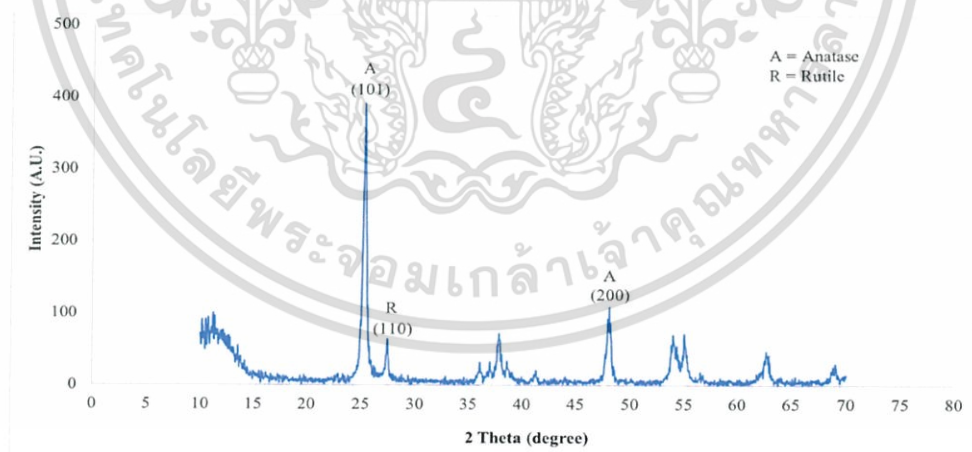
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 คุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์

การวิเคราะห์คุณสมบัติของ TiO_2 ได้แก่ โครงสร้างผลึกทางเคมี อัตราส่วนปริมาณอนาเทสกับรูไทล์ ด้วยเครื่อง X-ray Diffraction (XRD) และการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนด้วยเครื่อง Autosorb-1 (BET) โดยใช้หลักการดูดซับของก๊าซไนโตรเจนบนพื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 - 4.2

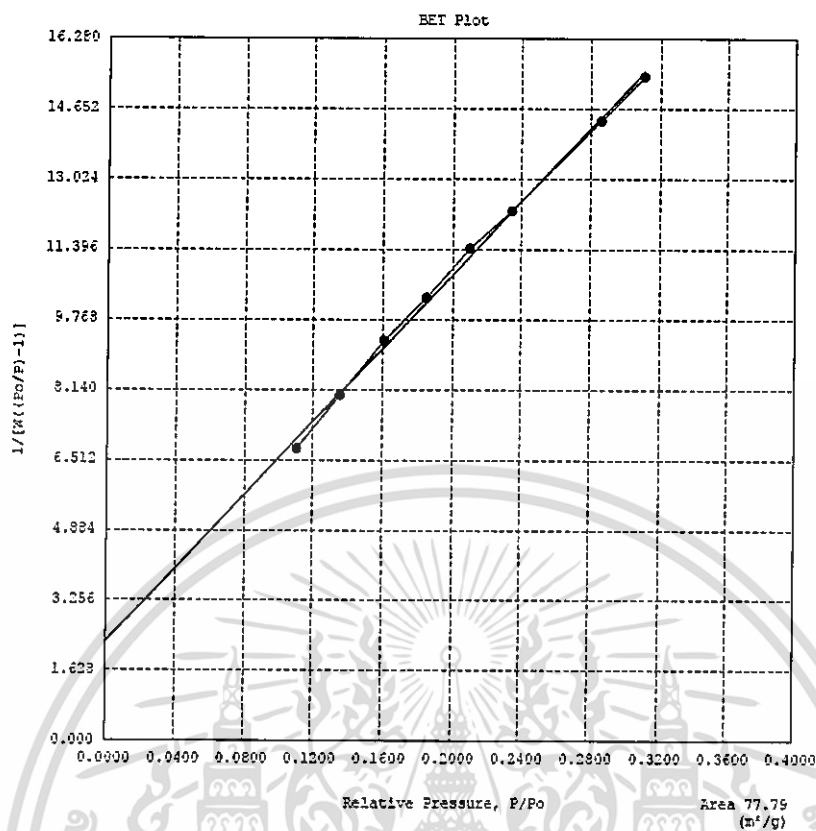
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลทั่วไปของไทเทเนียมไดออกไซด์

คุณลักษณะ	ผลการทดลอง
ปริมาณอนาเทส (%)	82.58
ปริมาณรูไทล์ (%)	17.42
โครงสร้างผลึก	Tetragonal
พื้นที่ผิว ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	77.79
ปริมาตรรูพรุน (cc g^{-1})	0.2796
ขนาดรูพรุน (nm)	14.38



รูปที่ 4.1 โครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



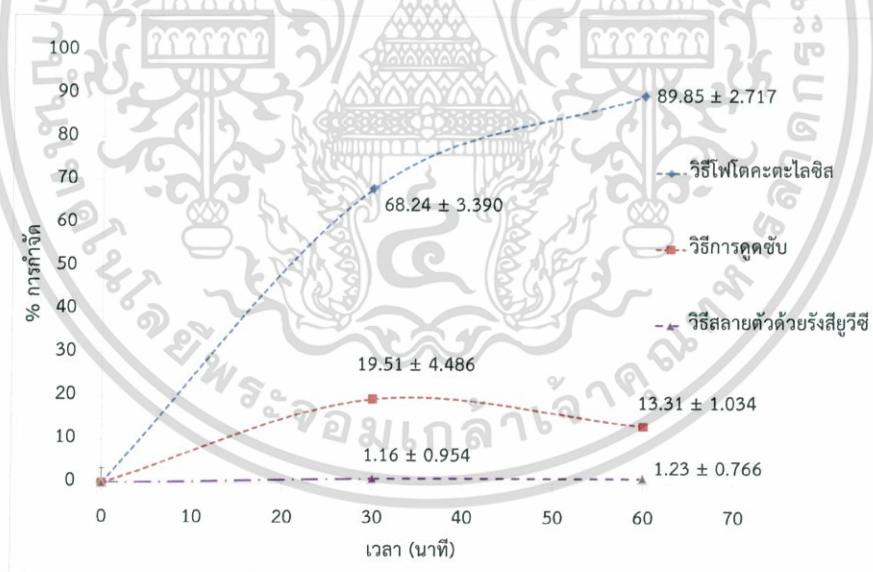
รูปที่ 4.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Autosorb-1 (BET)

จากรูปที่ 4.1 แสดงรูปแบบโครงสร้างผลึกของ TiO₂ โดยเทียบกับข้อมูลมาตรฐานขององค์กร Joint Committee on Powder Diffraction Standard (JCPDS) โดยใช้ข้อมูลมาตรฐาน JCPDS 71-1166 สำหรับโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส (Kavei *et al.*, 2011) และ JCPDS 75-1757 สำหรับโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ (da Silva *et al.*, 2015) พบว่า กราฟแสดงตำแหน่งพีคหลัก (2θ) ของโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส ที่ 25.40° (101) และรูไทล์ ที่ 27.36° (110) จากการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟของพีคหลัก (2θ) พบว่า มีอัตราส่วนปริมาณอนาเทส และปริมาณรูไทล์ ในโครงสร้างของ TiO₂ เท่ากับ 82.58 และ 17.42 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ตารางที่ 4.1 ดูรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ข) แสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เหมาะสมที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการทดลอง เนื่องจากโครงสร้างผลึกอนาเทสจะมีความต่างศักย์ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical potential for electrons) สูงกว่าผลึกแบบรูไทล์ส่งผลให้มี photocatalytic activity สูง และมีค่าครึ่งชีวิตของ TiO₂ ที่ยาวขึ้น เนื่องจากลดการเกิด recombination ของ TiO₂ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ He *et al.* (2013) ที่พบว่าปริมาณอนาเทส และปริมาณรูไทล์ 80:20 เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส จากรูปที่ 4.2 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับ (BET) ของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้หลักการดูดซับของก๊าซไนโตรเจนบนพื้นที่ผิว พบว่า พื้นที่ผิวของ

ไทเทเนียมไดออกไซด์มีพื้นที่ผิว 77.79 ตารางเมตรต่อกรัม มีปริมาตรรูพรุน 0.2796 cc g^{-1} และขนาดรูพรุน 14.38 นาโนเมตร ซึ่งพื้นที่ผิวมีค่าน้อยกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดอื่น ๆ เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์อสัณฐาน (Amorphous) มีพื้นที่ผิว 624 ตารางเมตรต่อกรัม (Ota *et al.*, 2016)

4.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต โดยวิธีดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์ วิธีสลายตัวด้วยรังสียูวีซี และวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี

จากผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสาร LAS โดยวิธีดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์ (Adsorption on TiO_2) โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร วิธีสลายตัวด้วยรังสียูวีซี (Photolysis with UV-C) โดยใช้รังสียูวีซี (254 nm) กำลังไฟ 4X18 วัตต์ และโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี (Photocatalysis with $\text{TiO}_2/\text{UV-C}$) โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรร่วมกับรังสียูวีซี (254 nm) กำลังไฟ 4X18 วัตต์ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ LAS ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณ LAS ที่เหลืออยู่ที่เวลา 30 และ 60 นาที ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ดูรายละเอียดในตาราง ค 1.1-1.3 ภาคผนวก ค.)



รูปที่ 4.3 การกำจัดสาร LAS ด้วยการดูดซับด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ การสลายตัวด้วยรังสียูวีซี และโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 แสดงการกำจัดสาร LAS โดยวิธีโฟโตคะตะไลซิส มีประสิทธิภาพในการกำจัด LAS สูงกว่าวิธีการดูดซับด้วย TiO_2 และการสลายตัวด้วยรังสียูวีซี จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย One-way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % พบว่า วิธีการกำจัดทั้งสามวิธีมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ดูรายละเอียดในตาราง ง 1 ภาคผนวก ง) จากผลการทดลองการกำจัด LAS ด้วยวิธีโฟโตคะตะไลซิส ที่ระยะเวลา 60 นาที พบว่า LAS ถูกกำจัด 89.85 ± 2.717 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเมื่ออนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยรังสียูวีซี จะเกิดอิเล็กตรอน และโฮลซึ่งทั้งสองสามารถสร้างอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล และซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน ตามลำดับ ซึ่งอนุมูลอิสระดังกล่าวเป็นตัวออกซิไดส์ที่รุนแรงในการสลายตัวของสารอินทรีย์จนกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซัลเฟต และน้ำ (Etacheri *et al.*, 2015; Szabo-Bardos *et al.*, 2011; Lea and Adesina, 1998) ดังสมการที่ 2.1 - 2.16 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Daneshvar *et al.* (2002) การกำจัดสาร LAS โดยสลายตัวด้วยรังสียูวีซีสามารถกำจัดสาร LAS ได้เพียงเล็กน้อย (1.16 ± 0.954 เปอร์เซ็นต์ และ 1.23 ± 0.766 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลา 30 นาที และ 60 นาที ตามลำดับ) เนื่องจากโครงสร้าง LAS เป็นพอลิเมอร์สายโซ่ยาว ทำให้ถูกสลายตัวด้วยแสงยูวีได้ยากซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Samadi *et al.* (2014) ส่วนการกำจัดสาร LAS โดยการดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์ สามารถกำจัดสาร LAS เท่ากับ 19.51 ± 4.486 เปอร์เซ็นต์ และ 13.31 ± 1.034 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลา 30 นาที และ 60 นาที ตามลำดับ ซึ่งแนวโน้มการดูดซับ LAS บน TiO_2 จะลดลงเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น อาจเกิดจากสาร LAS ถูกคายซับจากพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ การที่ประสิทธิภาพการกำจัด LAS ด้วยการดูดซับบน TiO_2 มีค่าน้อย เนื่องจากพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของ TiO_2 ค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์อสัณฐาน (Titanium dioxide amorphous) นอกจากนี้ โครงสร้างทางเคมีของ LAS ไม่เหมาะกับการเกิดพันธะคีเลตกับ TiO_2 จึงไม่เกิดการดูดซับทางเคมี (Ghanbarian *et al.*, 2013) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการกำจัด LAS โดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัด LAS สูงกว่าการดูดซับบนพื้นผิวของ TiO_2 เพียงอย่างเดียว ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการกำจัด LAS โดยใช้วิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซีในการศึกษาต่อไป

4.3 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี

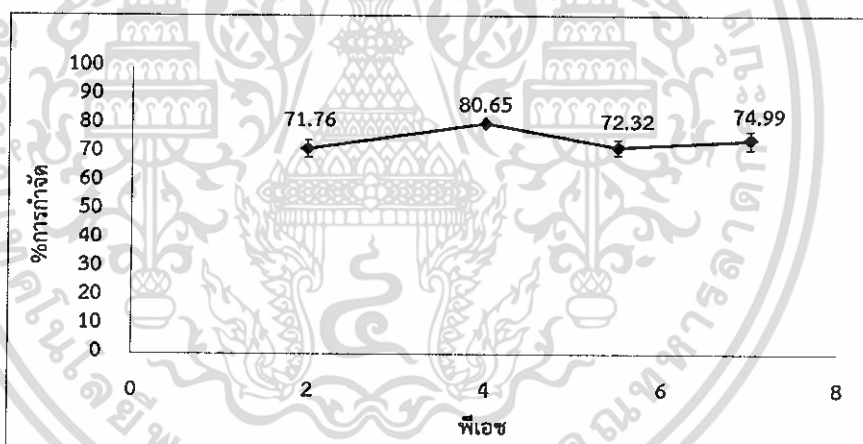
การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัด LAS โดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี ($TiO_2/UV-C$) ได้ผลดังนี้

4.3.1 ผลของค่าพีเอชที่เหมาะสม

จากผลการศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสาร LAS โดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วย $TiO_2/UV-C$ ในน้ำเสียสังเคราะห์ LAS ที่ระดับความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100

มิลลิลิตร ใช้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรร่วมกับรังสียูวีซี (254 nm) กำลังไฟ 4x18 วัตต์ เป็นเวลา 30 นาที โดยแปรค่าพีเอช 2, 4, 7 และไม่ปรับพีเอช (พีเอช 5.5) โดยงานวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาการกำจัดสาร LAS ที่สภาวะต่าง เนื่องจากที่สภาวะต่าง พื้นผิวของ TiO_2 จะเป็นประจุลบ จึงเกิดการผลักกันกับประจุลบของ LAS เนื่องจากแรงคูลอมบ์ (coulombic repulsion force)

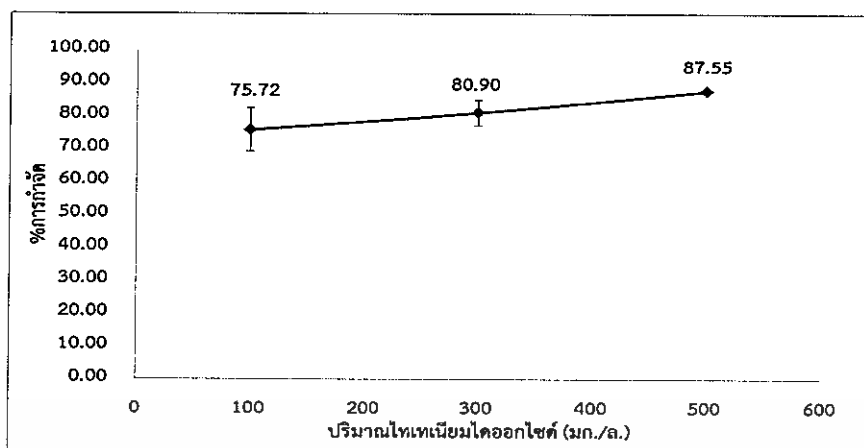
จากรูปที่ 4.4 (ดูรายละเอียดในตาราง ค 2.1 ภาคผนวก ค) แสดงให้เห็นว่าในการกำจัดสาร LAS ที่ค่าพีเอชในช่วง 2–7 และไม่ปรับพีเอช มีประสิทธิภาพการกำจัดในช่วง 71.76 ถึง 80.65 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากที่ค่าพีเอชต่ำกว่า 6.8 ซึ่งเป็นค่า pzc ของไทเทเนียมไดออกไซด์ จะทำให้พื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นประจุบวก จึงสามารถจับกับ LAS ที่เป็นประจุลบบนพื้นที่ผิวได้ ดังสมการที่ 2.1-2.2 (Boyjoo *et al.*, 2012) จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิธี One-way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัด LAS ที่พีเอช 2–7 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ดูรายละเอียดในตาราง ง 2.1 ภาคผนวก ง) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Oyama *et al.* (2004) ในงานวิจัยนี้จึงใช้สภาวะที่พีเอช 5.5 (ไม่ปรับพีเอช) ในการกำจัด LAS โดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วย $\text{TiO}_2/\text{UV-C}$ ในการศึกษาต่อไป



รูปที่ 4.4 ผลของค่าพีเอชต่อการกำจัดสาร LAS โดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วย $\text{TiO}_2/\text{UV-C}$

4.3.2 ผลของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสม

จากผลการศึกษาปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการกำจัดสาร LAS โดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วย $\text{TiO}_2/\text{UV-C}$ ในน้ำเสียสังเคราะห์ LAS ที่ระดับความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยแปรค่าปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 100, 300 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตรร่วมกับรังสียูวีซี (254 nm) กำลังไฟ 4x18 วัตต์ เป็นระยะเวลา 30 นาที จากนั้น วิเคราะห์หาปริมาณ LAS ที่เหลืออยู่ ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.5 (ดูรายละเอียดในตาราง ค 2.2 ภาคผนวก ค)

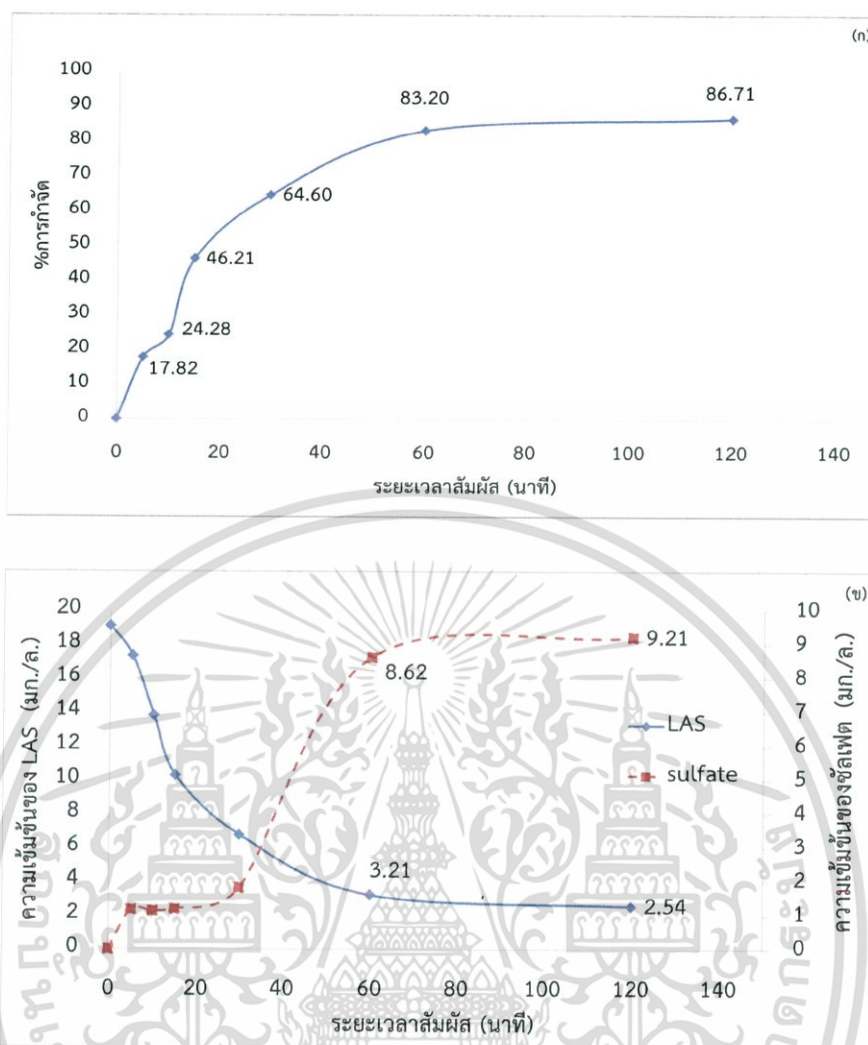


รูปที่ 4.5 ผลของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อการกำจัดสาร LAS โดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วย $\text{TiO}_2/\text{UV-C}$

จากรูปที่ 4.5 แสดงปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 100 – 500 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัด LAS ได้ในช่วง 75.72 – 87.55 เปอร์เซ็นต์ โดยประสิทธิภาพการกำจัด LAS มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้พื้นที่ผิวของ TiO_2 เพิ่มขึ้น ดังนั้น การแตกตัวของอิเล็กตรอน และโฮลด้วยแสง ทำให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล และโฟตอนเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม Sugiharto *et al.* (2014) พบว่า ถ้าเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์มากกว่า 800 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง เนื่องจากรังสียูวีจะเกิดการกระเจิงแสงเมื่อกระทบกับไทเทเนียมไดออกไซด์ จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิธี One – way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัด LAS โดยใช้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 100 - 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่แตกต่างกันมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ดูรายละเอียดในตาราง ง 2.2 ภาคผนวก ง) ในงานวิจัยนี้จึงใช้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการกำจัด LAS ในการศึกษาต่อไป

4.3.3 ผลของระยะเวลาในการกำจัดที่เหมาะสม

จากผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดสาร LAS โดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วย $\text{TiO}_2/\text{UV-C}$ ในน้ำเสียสังเคราะห์ LAS ที่ระดับความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิตร ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรร่วมกับรังสียูวีซี (254 nm) กำลังไฟ 4X18 วัตต์ โดยแปรค่าระยะเวลาสัมผัสรังสียูวีซี 5, 10, 15, 30, 60 และ 120 นาที จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณ LAS ที่เหลืออยู่ และหาปริมาณซัลเฟตที่เกิดขึ้น ได้ผลดังรูปที่ 4.6 (ดูรายละเอียดในตาราง ค 2.3 ภาคผนวก ค)



รูปที่ 4.6 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการกำจัดสารละลายลิเนียแอลคิลเบนซินซัลโฟเนตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วย $\text{TiO}_2/\text{UV-C}$ (ก) เปอร์เซ็นต์การกำจัด LAS (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ LAS และ SO_4^{2-} ที่ระยะเวลาต่าง ๆ

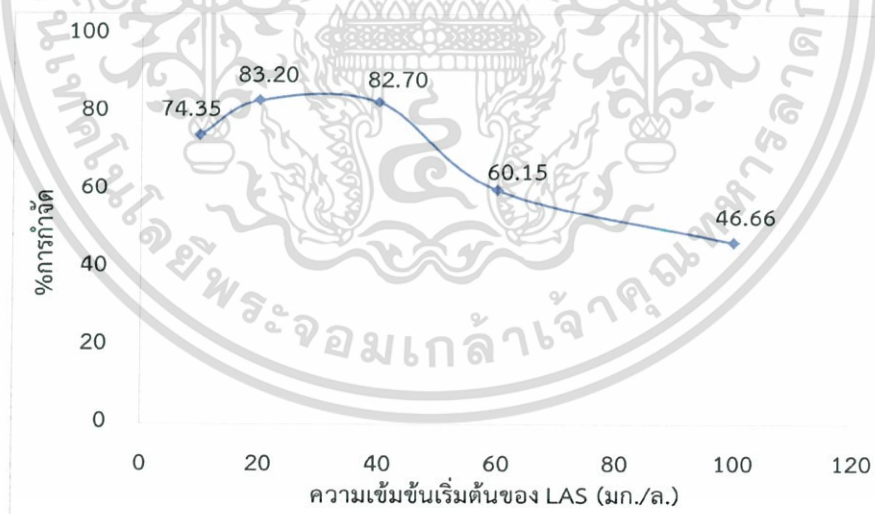
จากรูปที่ 4.6 (ก) แสดงประสิทธิภาพการกำจัด LAS มีแนวโน้มที่สูงขึ้น เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น โดยในช่วง 30 นาทีแรกจะมีอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสูง แต่หลังจาก 30 นาทีไปแล้ว อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลง และเริ่มเข้าสู่สมดุลเมื่อระยะเวลาผ่านไป 60 นาที ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัด LAS ที่ระยะเวลา 60 และ 120 นาที มีค่า 83.20 ± 2.700 เปอร์เซ็นต์ และ 86.71 ± 0.412 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย One-way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัด LAS ที่ระยะเวลา 60 และ 120 นาที ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ดูรายละเอียดในตาราง ง 2.3 ภาคผนวก ง) ในงานวิจัยนี้จึงใช้ระยะเวลาสัมผัสสร้างสียูวีซี 60 นาที ในการศึกษาต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ LAS และ SO_4^{2-} ที่ระยะเวลาต่าง ๆ พบว่า ปริมาณสาร LAS มีแนวโน้มลดลง แต่ปริมาณซัลเฟตมีแนวโน้มที่สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากซัลโฟเนตใน LAS จะถูกแตกตัวเป็นซัลเฟต ดังแสดงในสมการที่ 2.1 – 2.16 (Lea and Adesina, 1998) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fernández *et al.* (2004) จากผลการทดลองพบว่า เมื่อสัมผัสรังสียูวีซีเป็นเวลา 120 นาที ปริมาณสาร LAS ลดลงจาก 19.08 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 2.54 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณซัลเฟตเพิ่มขึ้นจาก 0 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 9.21 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยพบปริมาณซัลเฟต 8.62 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลา 60 นาที และ 9.21 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลา 120 นาที จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย One – way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % พบว่าปริมาณซัลเฟตที่ระยะเวลา 60 และ 120 นาที ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ซัลโฟเนตใน LAS ถูกแตกตัวเป็นซัลเฟตโดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

4.3.4 ผลของความเข้มข้นของสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตในการกำจัดที่เหมาะสม

จากผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของ LAS ที่เหมาะสมในการกำจัด โดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วย $\text{TiO}_2/\text{UV-C}$ โดยแปรค่า LAS ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้น 10, 20, 40, 60 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิตร ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับรังสียูวีซี (254 nm) ที่กำลังไฟ 4X18 วัตต์ เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณ LAS เหลืออยู่ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ดูรายละเอียดในตาราง ค 2.4 ภาคผนวก ค)



รูปที่ 4.7 ผลของความเข้มข้นของ LAS ต่อการกำจัดสารละลายลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วย $\text{TiO}_2/\text{UV-C}$

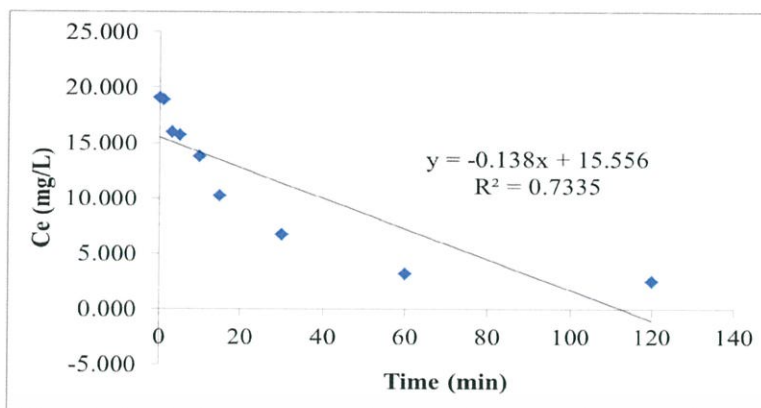
จากรูปที่ 4.7 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัด LAS ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร LAS ช่วง 10 - 40 มิลลิกรัมต่อลิตร มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร LAS ในช่วง 60 - 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Samadi *et al.* (2014) พบว่า ที่ความเข้มข้นของสาร LAS มากกว่า 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้สาร LAS เกิดการดูดซับบนพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้การแตกตัวของอิเล็กตรอน และโฮลด้วยแสงที่ทำให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล และโฟตอนลดลง ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด LAS ลดลง (Ghanbarian *et al.*, 2013) จากการวิเคราะห์ทางสถิติโดย One - way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด LAS ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ LAS 20 - 40 มิลลิกรัมต่อลิตรไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ดูรายละเอียดในตาราง ง 2.4 ภาคผนวก ง)

4.4 จลนพลศาสตร์ทางเคมีของการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี

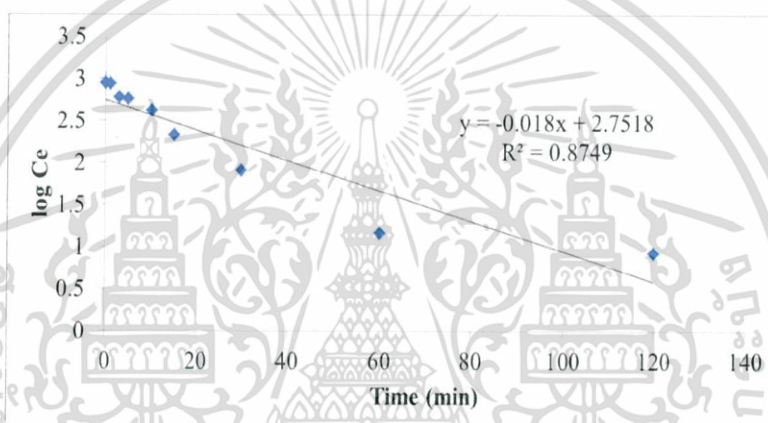
จากผลการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ทางเคมีของการกำจัดสาร LAS โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ LAS ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของ LAS 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิตร ใช้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรร่วมกับรังสียูวีซี (254 nm) กำลังไฟ 4X18 วัตต์ โดยแปรค่าระยะเวลาสัมผัสรังสียูวีซีที่ 1, 3, 5, 10, 15, 30 และ 60 นาที แล้วนำข้อมูลที่ได้เขียนกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้น เพื่อหาอันดับปฏิกิริยาศูนย์ หนึ่ง และสอง ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.8 (ดูรายละเอียดในตาราง ค 3.1 ภาคผนวก ค)

จากรูปที่ 4.8 จลนพลศาสตร์ทางเคมีของการกำจัดสาร LAS โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะไลสต์ เป็นปฏิกิริยาอันดับสอง โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9501 นั่นคือ ที่ความเข้มข้นของ TiO_2 คงที่ จะทำให้ความเข้มข้นของ LAS ลดลงเป็นสองเท่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sanchez *et al.* (2011) พบว่า จลนพลศาสตร์ทางเคมีของการกำจัดสาร LAS เป็นปฏิกิริยาอันดับสองต่อเมื่อความเข้มข้นของสาร LAS มากกว่า 15 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของ TiO_2 ที่ใช้ไม่ควรเกิน 800 มิลลิกรัมต่อลิตร เพราะจะทำให้รังสียูวีซีเกิดการกระเจิงแสง (Sugiharto *et al.*, 2014)

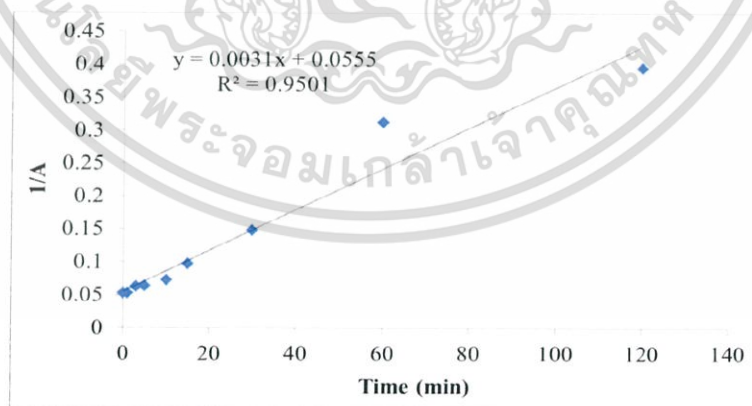
จากผลการทดลอง พบว่า ค่าคงที่อัตรา (K) เท่ากับ $0.0031 \text{ mg}^{-1} \text{ L min}^{-1}$ และมีค่าครึ่งชีวิตเท่ากับ 16.13 นาที (ตารางที่ 4.2) แสดงว่าการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสใช้เวลา 16.13 นาที จะทำให้ความเข้มข้นของสาร LAS เหลือ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จากความเข้มข้นเริ่มต้นของ LAS 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งได้ผลใกล้เคียงกับผลการศึกษาที่ใช้เวลาในการกำจัด 15 นาที ทำให้ความเข้มข้นของ LAS เหลือ 10.26 มิลลิกรัมต่อลิตร



ก. ปฏิกริยาอันดับศูนย์



ข. ปฏิกริยาอันดับหนึ่ง



ค. ปฏิกริยาอันดับสอง

รูปที่ 4.8 จลนพลศาสตร์ทางเคมีของการกำจัด LAS โดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วย $\text{TiO}_2/\text{UV-C}$

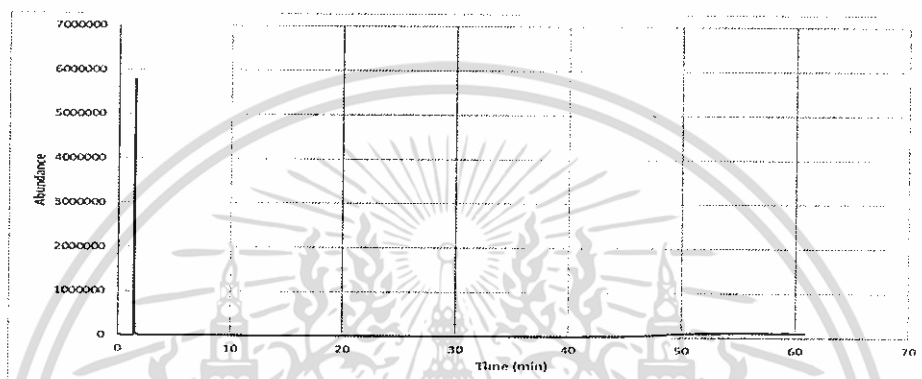
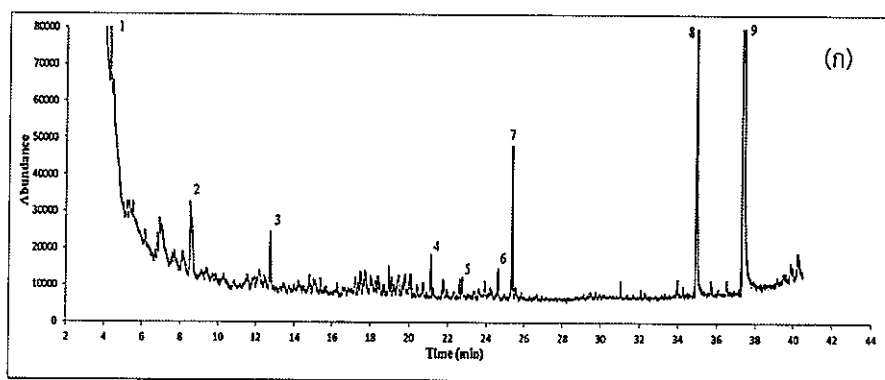
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 จลนพลศาสตร์ทางเคมีของการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะลิสต์

อันดับปฏิกิริยา			
	ศูนย์	หนึ่ง	สอง
สมการ	$Y = -0.138X + 15.556$	$Y = -0.0078x + 1.1951$	$Y = 0.0031x + 0.0555$
R^2	0.7335	0.8749	0.9501
ค่าคงที่อัตรา	0.138	0.0078 min^{-1}	$0.0031 \text{ mg}^{-1} \text{ L min}^{-1}$
ค่าครึ่งชีวิต	72.46 นาที	38.50 นาที	16.13 นาที

4.5 ศึกษาผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากผ่านการกำจัดโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซีของสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS

จากการวิเคราะห์สารผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากผ่านการกำจัด LAS โดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วย $\text{TiO}_2/\text{UV-C}$ ด้วยเครื่อง GC-MS โดยเทียบจากค่า m/z ของสาร พบ Hydroxyacetic acid, 1,2,3 Propanetrioltriacetate, 2,4-Di-tert-butylphenol, Heneicosane, Diisobutyl Phthalate, Methyl hexadecanoate, Dibutyl Phthalate, Bis(2-ethylhexyl) adipate และ Diisooctyl phthalate ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.3 เนื่องจากสาร LAS จะถูกออกซิไดส์กลายเป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน กรดคาร์บอกซิลิก วงอะโรมาติก จากงานวิจัยของ Ding *et al.* (1998) และ Moldovan *et al.* (2011) พบว่า สาร LAS ที่ผ่านการกำจัด LAS โดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซีจะเกิดสารผลิตภัณฑ์ในกลุ่ม sulfophenylcarboxylates ในงานวิจัยนี้ ไม่พบแอลกอฮอล์ อัลดีไฮด์ และเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากสารดังกล่าวเกิดขึ้น และถูกสลายตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้วิเคราะห์ได้ยาก (Maryani and Kustiningsih, 2015) ส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และซัลเฟตไม่สามารถวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง GC-MS แต่จากผลการวิเคราะห์ซัลเฟตโดยวิธีวัดความขุ่นพบ ปริมาณซัลเฟตเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพิ่มขึ้น แสดงว่าซัลโฟเนตใน LAS อาจถูกสลายตัวเป็นซัลเฟต จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าสารกลุ่มพาทาเลต (phthalate) เป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากการแตกตัวโดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ซึ่งสารในกลุ่มนี้จะมีความเป็นพิษน้อยกว่า LAS โดยเทียบจากค่า LD_{50} โดยสารกลุ่มพาทาเลต มีค่า LD_{50} เท่ากับ 30,600 mg/kg-rat และ LAS 1,980 mg/kg-rat อย่างไรก็ตาม สารกลุ่มพาทาเลตอาจรบกวนการทำงานของต่อมไร้ท่อของสัตว์เลี้ยงด้วยนม จึงเสนอแนะให้ศึกษาความเป็นพิษของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากผ่านการกำจัดโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซีในการศึกษาในอนาคต



รูปที่ 4.9 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ของ LAS โดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วย $\text{TiO}_2/\text{UV-C}$ (ก) และโครมาโทแกรมของแบลงค์ (ข)

ตารางที่ 4.3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากผ่านการกำจัดโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ร่วมกับรังสียูวีซีของสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต (LAS)

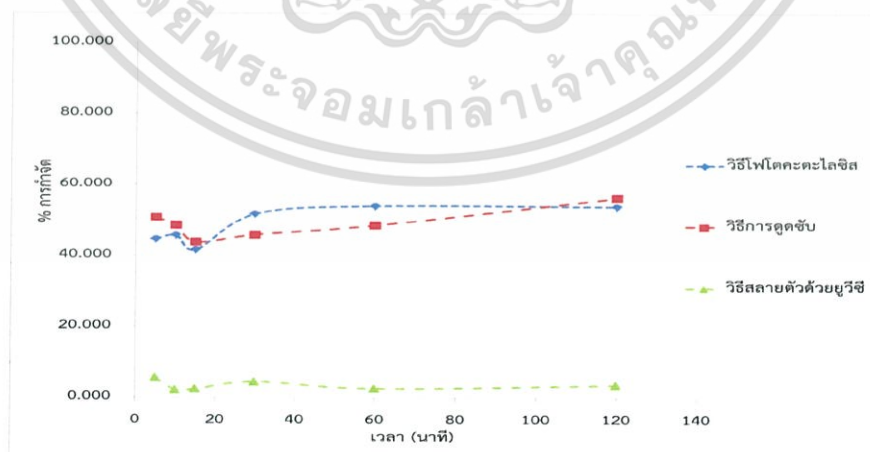
Peak No.	Compound name	Formula	RT (min)	m/z	% Total area	Quality
1	Hydroxyacetic acid	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_3$	4.26	31, 29, 45	0.322	45
2	1,2,3 Propanetrioltriacetate	$\text{C}_9\text{H}_{14}\text{O}_6$	8.49	43, 103, 145	0.958	83
3	2,4-Di-tert-butylphenol	$\text{C}_{14}\text{H}_{22}\text{O}$	12.73	191, 57, 206	0.412	86
4	Heneicosane	$\text{C}_{21}\text{H}_{44}$	21.12	57, 43, 71	0.175	90
5	Diisobutyl Phthalate	$\text{C}_{16}\text{H}_{22}\text{O}_4$	22.74	149, 57, 29	0.092	72
6	Methyl hexadecanoate	$\text{C}_{17}\text{H}_{34}\text{O}_2$	24.63	74, 87, 43	0.132	93
7	Dibutyl Phthalate	$\text{C}_{16}\text{H}_{22}\text{O}_4$	25.35	145, 205, 167	0.758	90
8	Bis(2-ethylhexyl) adipate	$\text{C}_{22}\text{H}_{42}\text{O}_4$	34.93	129, 57, 112	7.956	95
9	Diisooctyl phthalate	$\text{C}_{24}\text{H}_{38}\text{O}_4$	37.35	149, 167, 279	89.197	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟต โดยวิธีดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์ วิธีสลายตัวด้วยรังสียูวีซี และวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี

จากผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารออร์โธฟอสเฟต โดยวิธีดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร วิธีสลายตัวด้วยรังสียูวีซีโดยใช้รังสียูวีซี (254 nm) กำลังไฟ 4X18 วัตต์ และวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซีโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 500 มิลลิกรัมต่อลิตรร่วมกับรังสียูวีซี (254 nm) กำลังไฟ 4X18 วัตต์ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ออร์โธฟอสเฟตความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณออร์โธฟอสเฟตที่เหลืออยู่ ที่ระยะเวลาเริ่มต้น 5, 10, 15, 30, 60 และ 120 นาที ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ดูรายละเอียดในตาราง ค 4.1-4.3 ภาคผนวก ค)

จากรูปที่ 4.10 แสดงการกำจัดสารออร์โธฟอสเฟตโดยใช้วิธีดูดซับด้วย TiO_2 และวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วย $\text{TiO}_2/\text{UV-C}$ ที่ระยะเวลา 120 นาที การกำจัดออร์โธฟอสเฟตด้วยวิธีดูดซับบน TiO_2 และวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วย $\text{TiO}_2/\text{UV-C}$ สามารถกำจัดได้ 56.59 ± 7.788 และ 53.92 ± 5.348 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย One-way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดออร์โธฟอสเฟตด้วยวิธีทั้งสองไม่แตกต่างกันอย่างนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ดูรายละเอียดในตาราง ง 3 ภาคผนวก ง) แสดงให้เห็นว่าออร์โธฟอสเฟตถูกกำจัดโดยการดูดซับบนพื้นที่ผิวของ TiO_2 เนื่องจากออร์โธฟอสเฟตซึ่งเป็นประจุลบจะสร้างพันธะเคมีกับพื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งมีประจุบวกในสภาวะกรด ดังสมการที่ 2.1 -2.2 (Boyjoo *et al.*, 2012) ส่วนการสลายตัวโดยใช้รังสียูวีซีเพียงอย่างเดียวสามารถกำจัดออร์โธฟอสเฟตได้เพียงเล็กน้อย (3.526 ± 0.453 เปอร์เซ็นต์) เนื่องจากออร์โธฟอสเฟตเป็นสารอนินทรีย์จึงสลายได้ด้วยรังสียูวีซีได้ยาก (Kang *et al.*, 2011)

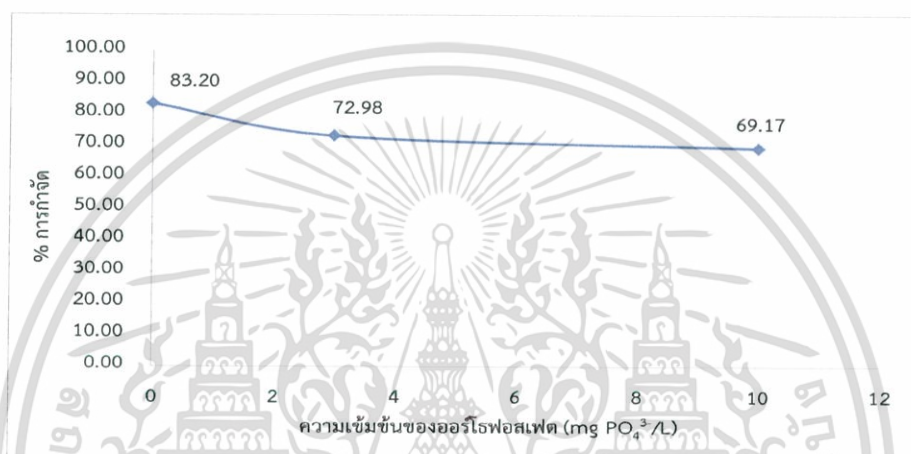


รูปที่ 4.10 การกำจัดสารออร์โธฟอสเฟต ด้วยการดูดซับด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ การสลายตัวด้วยรังสียูวีซี และวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 ผลของความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตต่อการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี

จากผลการศึกษาความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตต่อการกำจัดสาร LAS โดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี โดยแปรค่าออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 3 และ 10 มิลลิกรัมฟอสเฟตต่อลิตร ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับรังสียูวีซี (254 nm) ที่กำลังไฟ 4X18 วัตต์ เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณ LAS เหลืออยู่ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ดูรายละเอียดในตาราง ค 5.1 ภาคผนวก ค)



รูปที่ 4.11 ผลของออร์โธฟอสเฟตต่อการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี

จากรูปที่ 4.11 แสดงผลความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตต่อการกำจัดสาร LAS โดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วย TiO₂/UV-C พบว่า ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่มีฟอสเฟต และมีฟอสเฟต 2.85 และ 9.99 มิลลิกรัมฟอสเฟตต่อลิตร สามารถกำจัด LAS ได้ 83.20±2.700 เปอร์เซ็นต์ 72.98±2.482 เปอร์เซ็นต์ และ 69.17±0.894 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย One-way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % พบว่า การกำจัด LAS ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีฟอสเฟต และไม่มีฟอสเฟตแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ง 4) ในขณะที่การกำจัด LAS ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต 2.85 และ 9.99 มิลลิกรัมฟอสเฟตต่อลิตร ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) (ดูรายละเอียดในตาราง ง 4 ภาคผนวก ง) จากผลการทดลองพบว่า ในน้ำเสียสังเคราะห์ LAS ที่มีออร์โธฟอสเฟตปนอยู่ 9.99 มิลลิกรัมฟอสเฟตต่อลิตร จะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด LAS ลดลงจาก 83.20 ± 2.700 เปอร์เซ็นต์ เป็น 69.17 ± 0.894 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากออร์โธฟอสเฟตเป็นประจุลบจึงถูกดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์ได้บางส่วน ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด LAS ของ TiO₂ ลดลง (Ghanbarian *et al.*, 2013) จะเห็นได้จากปริมาณ

ออร์โธฟอสเฟตที่ลดลงจาก 2.85 มิลลิกรัมฟอสเฟตต่อลิตร เป็น 1.75 มิลลิกรัมฟอสเฟตต่อลิตร และ 9.99 เป็น 9.65 มิลลิกรัมฟอสเฟตต่อลิตร ซึ่งออร์โธฟอสเฟตจะถูกดูดซับไว้ 1.11 ± 0.103 และ 0.34 ± 0.086 มิลลิกรัมฟอสเฟตต่อลิตร ตามลำดับ กล่าวคือ ออร์โธฟอสเฟตจะมีผลต่อการกำจัด LAS โดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส แต่ถ้าความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตมากเกินไปเกินกว่าการดูดซับของออร์โธฟอสเฟตบนพื้นผิวของ TiO_2 จะไม่มีผลต่อการกำจัด LAS

4.8 การกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต และออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมซักล้างโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี

จากผลการศึกษาการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต และออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมซักล้างโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี โดยนำน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดแบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) และใช้สภาวะเหมาะสมที่ได้จากการทดลอง คือ ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 5.5 ระยะเวลา 60 นาที ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.4 (ดูรายละเอียดในตาราง ค 6.1 - 6.2 ภาคผนวก ค)

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต และออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมซักล้างโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี

ลักษณะ	ผลการทดลอง		เปอร์เซ็นต์การกำจัด
	ก่อนการกำจัด	หลังการกำจัด	
พีเอช	7.38 (ปรับพีเอชเป็น5.5)	6.82	
ปริมาณ LAS (mg /L)	2.88 ± 0.094	1.38 ± 0.212	$51.99 \pm 7.36 \%$
ปริมาณสารออร์โธฟอสเฟต (mg PO_4^{3-}/L)	10.61 ± 2.946	5.73 ± 0.514	$45.98 \pm 4.85 \%$
COD (mg O_2/L)	131.55 ± 2.813	110.50 ± 0.000	$16.00 \pm 0.00 \%$

โดยทั่วไปน้ำเสียจากอุตสาหกรรมซักล้าง จะมีองค์ประกอบของสารเคมีหลายชนิด ขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดชนิดต่าง ๆ อย่างไรก็ตาม องค์ประกอบหลักของน้ำเสียจากการซักล้างคือ สารลดแรงตึงผิว สารลดความกระด้าง สารฟอกสี และสารตัวเติม โดยสารแต่ละชนิดมีความจำเพาะเจาะจงต่อการซักล้างแตกต่างกัน ซึ่งน้ำเสียจากอุตสาหกรรมซักล้างที่ใช้ในการศึกษามีค่าพีเอชเริ่มต้น 7.38 จากนั้น ปรับพีเอชเป็น 5.5 ปริมาณ LAS เท่ากับ 2.88 ± 0.094 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณสารออร์โธฟอสเฟต 10.61 ± 2.946 มิลลิกรัมฟอสเฟตต่อลิตร และ COD $131.55 \pm$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.813 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร จากคุณลักษณะเบื้องต้นของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมซักรีดจะมี ปริมาณ LAS 2.88 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษานี้ผ่านระบบบำบัด Activated Sludge มาก่อน จึงอาจทำให้ปริมาณ LAS ลดลงได้ แต่ปริมาณ LAS ที่เหลืออยู่นั้นยังคงเกินค่า มาตรฐาน จากตารางที่ 4.5 พบว่า หลังจากการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส 60 นาที ค่าพีเอชมีการ เปลี่ยนแปลงจาก 5.5 เป็น 6.82 โดยปริมาณสาร LAS ลดลงจาก 2.88 ± 0.094 เหลือ 1.38 ± 0.212 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัด 51.99 ± 7.36 % ส่วนปริมาณสารออร์โธฟอสเฟตลดลงจาก 10.61 ± 2.946 เหลือ 5.73 ± 0.514 มิลลิกรัมฟอสเฟตต่อลิตร สามารถกำจัด 45.98 ± 4.85 % และปริมาณ COD ลดลงจาก 131.55 ± 2.813 เป็น 110.50 ± 0.000 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร สามารถกำจัด 16.00 ± 0.000 % จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดสาร LAS ในน้ำเสียจริง มี ค่าต่ำกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์ เนื่องจากในน้ำเสียอุตสาหกรรมซักรีดมีสารรบกวน ได้แก่ ฟอสเฟต และสารอื่น ๆ ซึ่งฟอสเฟตมีประจุลบจึงเป็นตัวรบกวนที่สำคัญในการแข่งขัน และยับยั้งอนุมูลอิสระ กลุ่มไฮดรอกซิล และซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนในการเข้าทำปฏิกิริยากับสาร LAS (Ghanbarian *et al.*, 2013) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ที่พบว่าออร์โธฟอสเฟตมีผลต่อการกำจัด LAS และงานวิจัยของ Chen and Liu (2007) ที่พบว่าสารที่เป็นประจุลบ เช่น คลอไรด์ โบรไมด์ ซัลเฟต และฟอสเฟต มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของสาร LAS สำหรับค่า COD ลดลง เพียงเล็กน้อย อาจเกิดเนื่องจากสาร LAS ถูกแตกตัวเป็นสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลเล็กลง จึงทำให้ค่า COD ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก (Sanchez *et al.* 1997; Borio *et al.*, 1998) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย ของ Ghanbarian *et al.* (2013) ที่พบว่ากำจัด LAS โดยวิธีโฟโตคะตะไลซิส ในภายในระยะเวลา 1 ชั่วโมง ไม่สามารถลด COD ได้ เนื่องจาก สาร LAS จะถูกสลายเป็น Transient products ดังนั้น วิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซีจึงเหมาะที่จะใช้เป็น Tertiary Treatment ในการกำจัดสาร LAS

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาการกำจัดสารละลายลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต และออร์โทฟอสเฟตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี เปรียบเทียบกับวิธีดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์ และวิธีสลายด้วยรังสียูวีซี พบว่าการกำจัด LAS ด้วยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซีมีประสิทธิภาพสูงสุด ($89.85 \pm 2.717\%$) รองมาคือการดูดซับด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ($13.31 \pm 1.034\%$) ส่วนวิธีสลายด้วยรังสียูวีซีสามารถกำจัด LAS ได้เพียงเล็กน้อย ($1.23 \pm 0.766\%$) จากผลการกำจัดสาร LAS โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี พบว่า ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร LAS 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 5.5 ใช้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาสัมผัสรังสียูวีซี 60 นาที สามารถกำจัด LAS ได้ 83.20 ± 2.700 เปอร์เซ็นต์ สารผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ได้แก่ hydroxyacetic acid, 1,2,3 propanetriol triacetate, 2,4-di-tert-butylphenol, heneicosane, diisobutyl phthalate, methyl hexadecanoate, dibutyl phthalate, bis(2-ethylhexyl) adipate และ diisooctyl phthalate จลนพลศาสตร์ทางเคมีในการกำจัดสาร LAS เป็นปฏิกิริยาอันดับสอง มีค่าคงที่อัตรา (K) เท่ากับ $0.0031 \text{ mg}^{-1} \text{ L min}^{-1}$ และมีค่าครึ่งชีวิตเท่ากับ 16.13 นาที

การกำจัดสารออร์โทฟอสเฟตด้วยวิธีดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์ มีประสิทธิภาพสูงสุด ($56.59 \pm 7.788 \%$) รองมาคือ วิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี ($53.92 \pm 5.348 \%$) ส่วนวิธีสลายด้วยรังสียูวีซีสามารถกำจัดออร์โทฟอสเฟตได้เพียงเล็กน้อย ($3.526 \pm 0.453 \%$) ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดออร์โทฟอสเฟตด้วยวิธีดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์ และวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยออร์โทฟอสเฟตจะมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด LAS ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลงจาก 83.20 ± 2.700 เหลือ 69.17 ± 0.894 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการกำจัด LAS ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นออร์โทฟอสเฟต 2.85 และ 9.99 มิลลิกรัมฟอสเฟตต่อลิตร ไม่ต่างแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ การกำจัดสาร LAS ในน้ำเสียอุตสาหกรรมซักล้างสามารถกำจัด LAS ได้ 51.99 ± 7.36 เปอร์เซ็นต์ ออร์โทฟอสเฟต 45.98 ± 4.85 เปอร์เซ็นต์ และกำจัด COD 16.00 ± 0.00 เปอร์เซ็นต์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาความเป็นพิษ (Toxicity) ของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากผ่านการจัด LAS โดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. คว้าศีกษาชนิดของตัวคะตะลิสต์ในการกำจัต LAS โดยวิธีโฟโตะคะตะไลซิส ได้แก่ ZnO และ NiO
3. คว้าศีกษาการนำตัวคะตะลิสต์กลับมาใช้ซ้ำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. 2545. น้ำเสียชุมชน และระบบบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์
คุรุสภา.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2552. รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทยปี 2552. [Online].
Available : http://infofile.pcd.go.th/mgt/Draftpollution2552_4mgt.pdf?CFID=31442&CFTOKEN=86355486.
- กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2547. กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้ง
จากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง. ราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่มที่ 121 ตอนที่
49ง ลงวันที่ 1 พฤษภาคม 2547.
- กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2550. กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้ง
จากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำกร่อย. ราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่มที่ 124 ตอนที่
84ง ลงวันที่ 13 กรกฎาคม 2550.
- กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2551. กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้ง
จากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด. ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 125 ตอนที่ 21 ง วันที่ 30
มกราคม 2551.
- กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2553. กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้ง
จากระบบบำบัดน้ำเสียรวมของชุมชน. ราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่มที่ 127
ตอนที่ 69ง วันที่ 2 มิถุนายน 2553.
- กาญจนา ลือพงษ์ และนางนุช ศศิธร. 2553. “การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนฟอกย้อมด้วยเทคนิคโฟ
โตแคตตาไลติกร่วมกับกระบวนกรดดูดซับ.” คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอ และออกแบบแฟชั่น
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 27. 2549. กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำทะเล ราช
กิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่มที่ 124 ตอนที่ 11 ง วันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2550.
- นวนพันธ์ ชัยนิจ. 2557. อนุภาคนาโนไททานเนียมไดออกไซด์และการประยุกต์ใช้งาน. วิทยาลัยนา
โนเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- รติกร อลงกรณ์โชติกุล. 2548. สารชำระล้าง (Detergent). [Online]. Available. :
http://siweb.dss.go.th/dss_doc/fulltext/radio/T56.pdf.
- สภาวิศวกร. 2559. ระบบน้ำเสีย. [Online]. Available : <http://www.coe.or.th/coe-2/Download/Articles/ENV/CH3.pdf>
- สุวัจน์ ธีธรรส. 2557. มลพิษทางทะเล และชายฝั่ง. กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทาง
ทะเลคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย.

- เสาวลักษณ์ บุญยอด. 2554. ปฏิกริยาโฟโตแคตะไลติก และพฤติกรรมการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนพอลิเมอร์. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- Abd El-Gawad, H.S. 2014. "Aquatic Environmental Monitoring and Removal Efficiency of Detergents." *Water Science*. 28 : 51–64.
- Alshameri, A. Yan, C. and Lei, X. 2014. "Enhancement of Phosphate Removal from Water by TiO_2 /Yemeni Natural Zeolite: Preparation, Characterization and Thermodynamic." *Microporous and Mesoporous Materials*. 196 : 145-157.
- American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. 1998. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20th Ed. Washington DC, USA.
- BBC, 2014. Eutrophication. [Online]. Available. : http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/science/edexcel/problems_in_environment/pollutionrev4.shtml.
- BKH, Consulting Engineers. 1993. "The Use of Existing Toxicity Data for Estimation of the Maximum Tolerable Environmental Concentration of Linear Alkyl Benzene Sulfonate, part I: Main report." Delft, Netherland.
- Borio, O. Gawlik, B.M. Bellobono, I.R. and Muntau, H. 1998. "Photooxidation of Prometryn and Prometon in Aqueous Solution by Hydrogen Peroxide on Photocatalytic Membranes Immobilising Titanium Dioxide." *Chemosphere*. 37 : 975-989.
- Boyjoo, Y. Ang, M. and Pareek, V. 2012. "Photocatalytic Treatment of Shower Water Using a Pilot Scale Reactor." *International Journal of Photoenergy*. 8 : 1696-1705.
- Chen, S.F. and Liu, Y.Z. 2007. "Study on the Photocatalytic Degradation of Glyphosate by TiO_2 Photocatalyst." *Chemosphere*. 67(5) : 1010–1017.
- Daneshvar, N. Salari, D. and Behnasuady, M.A. 2002. "Decomposition of Anionic Sodium Dodecylbenzene Sulfonate by UV/ TiO_2 and UV/ H_2O_2 Processes a-Comparison of Reaction Rates." *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*. 21(1) : 55-62.
- da Silva, A.N. Pinto, R.C.F. Freire, P.T.C. Junior, J.A.L. Oliveira, A.C. and Filho, J.M. 2015. "Temperature and High Pressure Effects on the Structural Features of Catalytic Nanocomposites Oxides by Raman Spectroscopy." *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 138 : 763-773.

- Dehghani, M.H. Mahvi, A.H. Najafpoor, A.A. and Azam, K. 2007. "Investigating the Potential of using Acoustic Frequency on the Degradation of Linear Alkylbenzene Sulfonates from Aqueous Solution." *Journal of Zhejiang University-Science A*. 8 : 1462-1468.
- Ding, W.H. Lo, J.H. and Tzing, S.H. 1998. "Determination of Linear Alkyl Benzene Sulfonates and their Degradation Products in Water Samples by Gas Chromatography with Ion-Trap Mass Spectrometry." *Journal of Chromatography A*. 818(2) : 270-279.
- Doan, H.D. and Saidi, M. 2008. "Simultaneous Removal of Metal Iron and Linear Alkylbenzene sulfonate by Combined Electrochemical and Photocatalytic Process." *Journal of Hazardous Materail*. 158 : 557-567.
- Dodds, W.K. and Smith, V.H. 2016 "Nitrogen, Phosphorus, and Eutrophication in Streams." *Inland Waters*. 6 : 155-164.
- Etacheri, V. Valentin, C.D. Schneider, J. Bahnemann, D. and Pillai, S.C. 2015. "Visible-Light Activation of TiO₂ Photocatalysts: Advances in Theory and Experiments." *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*. 25 : 1-29.
- Esch, T.R. Gadaczek, I. and Bredow, T. 2014. "Surface Structures and Thermodynamics of Low-Index of Rutile, Brookite and Anatase – A Comparative DFT Study." *Applied Surface Science*. 288 : 275–287.
- Fernández, J. Riu, J. Garica-Calvo, E. Rodríguez, A. Fernández-Alba, A.R. and Barceló, D. 2004. "Determination of Photodegradation and Ozonation by Products of Linear Alkylbenzene Sulfonates by Liquid Chromatography and Ion Chromatography under Controlled Laboratory Experiments." *Talanta*. 64(1) : 69-79.
- Ghanbarian, M.N. Nabizadeh, R. Mahv, i.H. Nasser, S. and Naddafi, K. 2013. "Photocatalytic Degradation of Linear Alkyl Benzene Sulfonate from Aqueous Solution by TiO₂ Nanoparticles." *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 8(4) : 309-316.
- Gong, T. Zhang, X. Li, Y. and Xian, Q. 2016. "Formation and Toxicity of Halogenated Disinfection Byproducts Resulting from Linear Alkyl Benzene Sulfonates." *Chemosphere*. 149 : 70-75.

- He, Z. Cai, Q. Fang, H. Situ, G. Qiu, J. Song, S. and Chen, J. 2013. "Photocatalytic Activity of TiO₂ Containing Anatase Nanoparticles and Rutile Nanoflower Structure Consisting of Nanorods." *Journal of Environmental Science*. 25(12) : 2460-2468.
- Kang, S.A. Li, W. Lee, H.E. Phillips, B.L. and Lee, Y.J. 2011. "Phosphate Uptake by TiO₂ : Batch Studies and NMR Spectroscopic Evidence for Multisite Adsorption." *Journal of Colloid and Interface Science*. 364(2) : 455-461.
- Kavei, G. Nakaruk, A. and Chris, C. 2011. "Equilibrium State of Anatase to Rutile Transformation for Titanium Dioxide Film Prepared by Ultrasonic Spray Pyrolysis Technique." *Materials Sciences and Applications*. 2 : 700-705.
- Korsak, L. 2008. "Anaerobic Treatment of Wastewater in a UASB Reactor." Licentiate Thesis in Chemical Engineering Department of Chemical Engineering and Technology, Royal Institute of Technology, Sweden.
- Lea, J. and Adesina, A.A. 1998. "The Photo-Oxidative Degradation of Sodium Dodecyl Sulphate in Aerated Aqueous TiO₂ Suspension." *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 118(2) : 111-122.
- Lee, H. Suh, H. and Chang, T. 2012. "Rapid Removal of Green Algae by the Magnetic Method." *Environmental Engineering. Research*. 17(3) : 151-156.
- León, V.M. López, C. Lara-Martín, P.A. Prats, D. Varó, P. and González-Mazo, E. 2006. "Removal of Linear Alkylbenzene Sulfonates and their Degradation Intermediates at Low Temperatures during Activated Sludge Treatment." *Chemosphere*. 64 : 1157-1166.
- Mack, J.A. 2006. Chemical Kinetics. [Online]. Available. : <http://www.csus.edu/indiv/m/mackj/chem142/kinetics.pdf>.
- Madigan, M. and Martinko, J. 2005. Brock. Biology of Microorganisms. 11th Ed. New Jersey : Prentice Hall.
- Maryani, Y. and Kustiningsih, I. 2015. "Determination and Characterization of Photocatalytic Products of Linear alkyl Sulphonate by High Performance Liquid Chromatography and Nuclear Magnetic Resonance." *Procedia Chemistry*. 17 : 216-223.
- McAvoy, D.C. Dyer, S.D. Fendinger, N.J. Eckhoff, W.S. Lawrence, D.L. and Begley, W.M. 1998. "Removal of Alcohol Ethoxylates, Alkyl Ethoxylate Sulfates, and Linear

- Alkylbenzene Sulfonates in Wastewater Treatment.” *Environmental Toxicology and Chemistry*. 17(9) : 1705–1711.
- Minnesota pollution control agency. 2006. Phosphorus Treatment and Removal Technologies [Online]. Available : <https://www.pca.state.mn.us/sites/default/files/wq-wwtp9-02.pdf>.
- Moldovan, Z. Avram, V. Marincas, O. Petrov, P. and Ternes, T. 2011. “The Determination of the Linear Alkyl Benzene Sulfonate Isomer in Water Samples by Gas-Chromatography/Mass Spectrometry.” *Journal of Chromatography A*. 1218(2) : 343-349.
- Mungray, A.K. and Kumar, P. 2009. “Fate of Linear Alkylbenzene Sulfonates in the Environment: a Review.” *International Biodeterioration and Biodegradation*. 63(8) : 981-987.
- Nakata, K. and Fujishima, A. “TiO₂ photocatalysis: Design and Applications.” *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*. 13(3) : 169-189.
- OECD, 2005. “Linear alkyl benzene sulfonates (LAS), SIDE Initial Assessment Report for 20th SIAM.” Paris, France.
- Ohama, Y. and Gemert, D.V. editor. 2011. Applications of Titanium Dioxide Photocatalysis to Construction Materials. Berlin : Springer.
- Oyama, T. Aoshima, A. Horikoshi, S. Hidaka, H. Zhao, J. and Serpone, N. 2004. “Solar Photocatalysis, Photodegradation of a Commercial Detergent in Aqueous TiO₂ Dispersions under Sunlight Irradiation.” *Solar Energy*. 77 : 525–532.
- Perkowski, J. Bzdon, S. Bulska, A. and Jozwiak, W.K. 2006. “Decomposition of Detergents Present in Car-Wash Sewage by Titania Photo-Assisted Oxidation.” *Polish Journal of Environmental Studies*. 15(3) : 457-465.
- Samadi, M.T. Dorraji, M.S.S. Atashi, Z. and Rahmani, A.R. 2014. “Photo Catalytic Removal of Sodium Dodecyl Sulfate from Aquatic Solutions with Prepared ZnO Nano Crystals and UV Irradiation.” *Avicenna Journal Environmental Health Engineering*. 1(1) : 17-23.
- Sanchez, M. Rivero, M.J. and Ortiz, I. 2011. “Kinetics of Dodecylbenzenesulphonate Mineralization by TiO₂ Photolysis.” *Applied Catalysis B: Environmental*. 101 : 515-521.

- Savas, K. A. and Onder, E. 2006. "Removal of Linear Alkylbenzene Sulfonate from a Model Solution by Continuous Electrochemical Oxidation." *Desalination*. 197 : 262-272.
- Sima, J. and Hasal, P. 2013. "Photocatalytic Degradation of Textile Dyes in a TiO₂/UV System." *Chemical Engineering Transactions*. 32 : 79-84.
- Strom, P. F. 2006. Technologies to Remove Phosphorus from Wastewater. [Online]. Available : <http://www.water.rutgers.edu/Projects/trading/p-trt-lit-rev-2a.pdf>.
- Sugiharto, E. Suratman, A. Natsir, T.A. and Wahyuni, E.T. 2014. "Distribution of Detergent Waste in the Environment and the Removal by Using Photocatalytic Degradation and Coagulation Methods." *American Chemical Science Journal*. 4(6) : 715-725.
- Szabo-Bardos, E. Markovics, O. Horvath, O. Toro, N. and Kiss, G. 2011. "Photocatalytic Degradation of Benzenesulfonate on Colloidal Titanium Dioxide." *Water Research*. 45 : 1617-1628.
- Tabor, C.F. and Barber, L.B. 1996. "Fate of Linear Alkylbenzene Sulfonate in the Mississippi River." *Environmental Science and Technology*. 30(1) : 161-171.
- Tanaka, K. Capule, M.F.V. and Hisanaga, T. 1991. "Effect of crystallinity of TiO₂ on its Photocatalytic Action." *Chemical Physics Letters*. 187: 73-76.
- United States Environmental Protection Agency (US. EPA). 1978. Method 365.3 Phosphorous, all forms (colorimetric, ascorbic acid, two reagents), Monitoring and support laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.
- United States Environmental Protection Agency (US. EPA). 1986. Method 9038 Sulfate (Turbidimetric), Monitoring and support laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.
- Venhuis, S.H. and Mehrvar, M. 2004 "Health Effect, Environmental Impacts and Photochemical Degradation of Selected Surfactants in Water." *International Journal of Photoenergy*. 6(3) : 115-125.
- Vives-Rego, J. López-Amorós, R. García, M.T. Comas, J. and Sánchez-Leal, J. 2000. "Microbial Aspects of Linear Alkylbenzene Sulfonate Degradation in Coastal Water." *Journal of Surfactants and Detergents*. 3 : 303-308.

Xie, H. Zheng, Q. Wang, S. Ma, C. Gao, G. Bing, N. and Sun, Z. "Capture of Phosphates in Surface Water by TiO₂ Nanoparticles under UV Irradiation." *Particuolc* 14 : 98-102.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

กราฟมาตรฐาน

ก 1. การสร้างกราฟมาตรฐานลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต (LAS)

ก 1.1 การเตรียมสต็อก LAS ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ซึ่งสารโซเดียมโดเดคซิลเบนซีนซัลโฟเนตซัลโฟเนต มา 1 g ละลายด้วยน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 1,000 ml ด้วยน้ำกลั่น จะให้ความเข้มข้น 1,000 mg/L

ก 1.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน LAS เข้มข้น 10 mg/L

ปิเปตสต็อก LAS ความเข้มข้น 1,000 mg/L มา 10 mL ลงในขวดปรับขนาด 1000 mL จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะให้ความเข้มข้น 10 mg/L (1 mL=10 µg)

ก 1.3 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน LAS เข้มข้น 0, 20, 40, 60, 80, 100, 150 และ 200 µg

1.3.1 ปิเปตสารละลายมาตรฐาน LAS 10 mg/L จำนวน 0, 2, 4, 6, 8, 10, 15 และ 20 ml ลงในกรวยแยกขนาด 250 ml จำนวน 8 ใบ ตามลำดับ เติมน้ำกลั่นลงในกรวยแยกแต่ละใบ จนมีปริมาตร 100 ml จะให้ความเข้มข้นเป็น 0, 20, 40, 60, 80, 100, 150 และ 200 µg ตามลำดับ

1.3.2 นำกรวยแยกแต่ละใบมาหยดฟีนอล์ฟทาลีน 2 -3 หยด และเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จนได้สารละลายสีชมพู เติมสารละลายกรดซัลฟิวริกจนสารละลายใส

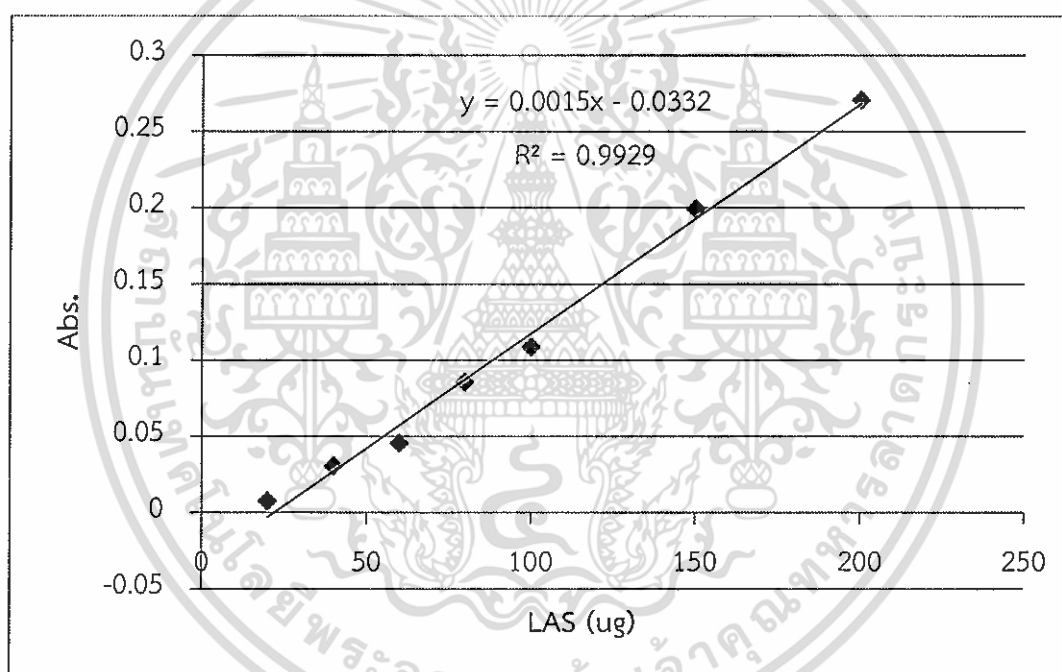
1.3.3 เติมสารละลายเมทิลีนบลู 25 mL ผสมให้เข้ากัน เติมคลอโรฟอร์ม 25 mL เขย่าให้เข้ากัน ตั้งไว้ให้สารละลายแยกชั้น ถ่ายชั้นคลอโรฟอร์มลงในกรวยแยกอีกใบหนึ่ง จากนั้นนำชั้นน้ำมาสกัดซ้ำอีก 2 ซ้ำ โดยใช้คลอโรฟอร์ม 25 mL

1.3.4 เติมสารละลายโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 50 mL ลงในชั้นคลอโรฟอร์มที่รวมไว้ เขย่าให้เข้ากัน และตั้งทิ้งไว้ กรองชั้นคลอโรฟอร์ม โดยผ่านกระดาษกรองใยแก้วลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 mL

1.3.5 สกัดด้วยคลอโรฟอร์ม 10 mL อีก 2 ซ้ำ และปรับปริมาตรด้วยคลอโรฟอร์มจนมีปริมาตร 100 ml นำสารละลายที่สกัดได้ไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วย เครื่องอัลตราไวโอเลต วิสปีเบลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ โดยทำการแสกนหาความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) ให้ความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) 651 นาโนเมตร

ตารางที่ ก 1 ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน LAS

สารมาตรฐาน	ความเข้มข้นที่เตรียม (μg)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นที่ได้ (μg)
แบลงค์	0.00	0.000	0.000
1	20	0.0075	27.13
2	40	0.0305	42.46
3	60	0.0455	52.46
4	80	0.0855	79.13
5	100	0.1085	94.46
6	150	0.1991	154.86
7	200	0.2705	202.46



รูปที่ ก 1 กราฟมาตรฐานลิเนียร์แอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก 2. การสร้างกราฟมาตรฐานฟอสเฟตด้วยวิธีแอสคอบิกแอซิด

ก 2.1 การเตรียมสต็อกฟอสเฟตความเข้มข้น 100 mg PO₄³⁻/L

2.1.1 ชั่งโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต มา 143.2 mg ละลายด้วยน้ำกลั่น ปริมาตรเป็น 1,000 ml ด้วยน้ำกลั่น จะได้ความเข้มข้น 100 mg PO₄³⁻/L

2.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตเข้มข้น 10 mg/L

2.2.2 ปิเปตสต็อกฟอสเฟตเข้มข้น 100 mg PO₄³⁻/L มา 10 mL ลงในขวดปรับขนาด 100 mL จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้ความเข้มข้น 10 mg PO₄³⁻/L

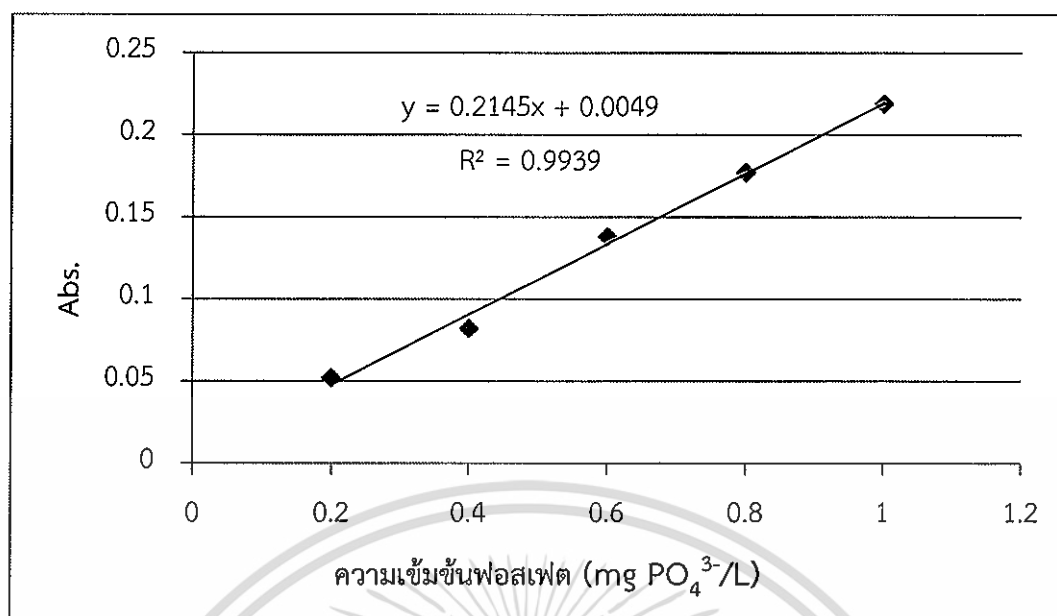
2.3 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน ฟอสเฟตเข้มข้น 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 mg PO₄³⁻/L

2.3.1 ปิเปตสารละลายฟอสเฟต มา 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 mL ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 mL ตามลำดับ เติมน้ำยารวม (กรดแอสคอบิก, กรดซัลฟิวริก, แอมโมเนียมโมลิบเดต และแอนติโมนีโพแทสเซียมทาเทรต) 8 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้ความเข้มข้น 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 mg PO₄³⁻/L เขย่าให้เข้ากัน และตั้งทิ้งไว้ 10 นาที

2.3.2 นำสารละลายไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วย เครื่องอัลตราไวโอเลต วิธีเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร

ตารางที่ ก 2 ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต

สารมาตรฐาน	ความเข้มข้นที่เตรียม (mg PO ₄ ³⁻ /L)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นที่ได้ (mg PO ₄ ³⁻ /L)
Blank	0.0	0.000	0.000
1	0.2	0.052	0.219
2	0.4	0.082	0.359
3	0.6	0.138	0.620
4	0.8	0.177	0.802
5	1.0	0.219	0.998



รูปที่ ก 2 กราฟมาตรฐานฟอสเฟต

ก 3. การสร้างกราฟมาตรฐานซีลเฟตด้วยวิธีวัดความขุ่น

ก 3.1 การเตรียมสต็อกซีลเฟตความเข้มข้น 1,000 mg/L

3.1.1 ชั่งสารโซเดียมซีลเฟตปราศจากน้ำจำนวน 147.9 mg ละลายด้วยน้ำกลั่นใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้ความเข้มข้น 1,000 mg/L

ก 3.2 การเตรียมสารมาตรฐานซีลเฟตความเข้มข้น 100 mg/L

3.2.1 ปิเปตสต็อกซีลเฟตจากข้อ 3.1.1 มา 25 mL ใส่ขวดวัดปริมาตร 250 mL ปรับด้วยน้ำกลั่น จะได้ความเข้มข้น 100 mg/L

ก 3.3 การสร้างกราฟมาตรฐาน

3.3.1 ปิเปตสารมาตรฐานซีลเฟตจากข้อ 3.2.1 มา 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 mL ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้ความเข้มข้น 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 mg/L

3.3.2 เทสารละลายมาตรฐานที่เตรียมไว้จากข้อ 3.3.1 ลงในขวดรูปชมพู่ ปิเปตสารละลายบัฟเฟอร์ผสมลงไป 20 mL ปั่นกวนด้วยอัตราคางที่

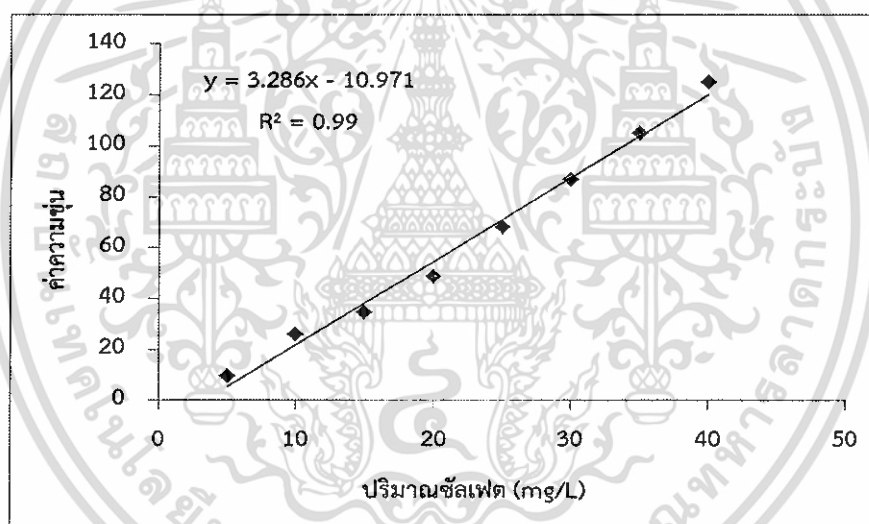
3.3.3 เติมผลึกแบเรียมคลอไรด์ 0.2 mg กวนจนครบ 1 นาที

3.3.4 เทสารละลายลงในหลอดเพื่อวัดความขุ่นทุก 30 วินาที จนครบ 4 นาที

3.3.5 บันทึกค่าความขุ่นสูงสุด

ตารางที่ ก 3 ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานซีลเฟต

สารมาตรฐาน	ความเข้มข้นที่เตรียม (mg /L)	ค่าความขุ่น	ความเข้มข้นที่ได้ (mg /L)
Blank	0.0	0.0	0.0
1	5	9.4	6.20
2	10	26	11.25
3	15	34.7	13.90
4	20	48.7	18.16
5	25	68	24.03
6	30	86.9	29.78
7	35	105	35.29
8	40	125	41.38



รูปที่ ก 3 กราฟมาตรฐานซีลเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข การคำนวณ

1. การคำนวณอัตราส่วนปริมาณอะนาเทสกับรูไทล์

$$\frac{\text{ปริมาณรูไทล์}}{\text{ปริมาณอะนาเทส}} = \frac{58}{339}$$

$$= 0.1742$$

อัตราส่วนปริมาณอะนาเทสกับรูไทล์เท่ากับ 0.8258 : 0.1742 หรือ 82.58 : 17.42

2. การคำนวณความเข้มข้นของสารละลายลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต (LAS)

$$\text{ความเข้มข้นของสารละลาย LAS (mg/L)} = \frac{m (\mu\text{g})}{V (\text{ml})}$$

เมื่อ m คือ ค่าที่อ่านได้จากกราฟ (μg)

V คือ ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (ml)

$$\text{ความเข้มข้นของสารละลาย LAS (mg/L)} = \frac{156.80 (\mu\text{g})}{10 (\text{ml})}$$

$$= 15.68 \text{ mg/L}$$

3. การคำนวณความเข้มข้นของสารละลายออร์โทฟอสเฟต

$$\text{ความเข้มข้นของสารละลายออร์โทฟอสเฟต (mg/L)} = \frac{m (\text{mg})}{V (\text{ml})}$$

เมื่อ m คือ ค่าที่อ่านได้จากกราฟ (mg)

V คือ ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (mL)

$$\text{ความเข้มข้นของสารละลายออร์โทฟอสเฟต } \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) = \frac{0.155 (\text{mg})}{15 (\text{ml})} \times 50 (\text{ปริมาตรทั้งหมด})$$

$$= 0.517 \text{ mg/L}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสารละลายลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต (LAS) และออร์โทฟอสเฟต

$$\text{เปอร์เซ็นต์การกำจัด (\%)} = \left(\frac{C_i - C_f}{C_i} \right) \times 100$$

- เมื่อ C_i คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของ LAS และออร์โทฟอสเฟต (mg/L)
 C_f คือ ความเข้มข้นที่เหลือของ LAS และออร์โทฟอสเฟต (mg/L)

$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซ็นต์การกำจัด LAS (\%)} &= \left(\frac{19.08 - 3.28}{19.08} \right) \times 100 \\ &= 82.81 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซ็นต์การกำจัดออร์โทฟอสเฟต (\%)} &= \left(\frac{0.987 - 0.517}{0.987} \right) \times 100 \\ &= 47.63 \% \end{aligned}$$

5. การคำนวณค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี

$$\text{ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (mg/L)} = \frac{(A - B)}{V} N \times 8000$$

- เมื่อ A คือ ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไทเทรตเบลงค์ (ml)
 B คือ ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง (ml)
 N คือ ความเข้มข้นของ FAS (Normality)
 V คือ ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (ml)

$$\text{ความต้องการออกซิเจนทางเคมี} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{(2.65 - 2.15)}{2.5} \times 0.0462 \times 8000$$

$$\text{ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (mg/L)} = 71.40 \text{ mg/L}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ข้อมูลผลการทดลอง

ค 1. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายลิเทียมแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต (LAS) โดยวิธีดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์ (Adsorption on TiO_2) วิธีสลายตัวด้วยรังสียูวีซี (Photolysis with UV-C) และวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี (Photocatalysis with $TiO_2/UV-C$)

ตารางที่ ค 1.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายลิเทียมแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต (LAS) โดยวิธีดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์

เวลา	ครั้งที่	Abs.	ค่าจากกราฟ (μg)	ความเข้มข้น (ppm)	ค่าเฉลี่ย	% removal	ค่าเฉลี่ย	SD
30 นาที	1	0.44	315.467	15.773	15.818	19.94	19.51	4.486
		0.44	315.467	15.773				
		0.444	318.133	15.907				
	2	0.415	298.800	14.940	15.062	23.77		
		0.42	302.133	15.107				
		0.421	302.800	15.140				
	3	0.474	338.133	16.907	16.829	14.82		
		0.472	336.800	16.840				
		0.469	334.800	16.740				
60 นาที	1	0.483	344.133	17.207	17.273	12.58	13.31	1.034
		0.486	346.133	17.307				
		0.486	346.133	17.307				
	2	0.475	338.800	16.940	16.984	14.04		
		0.48	342.133	17.107				
		0.474	338.133	16.907				
	3*	0.56	395.467	19.773	19.818	-0.30		
		0.563	397.467	19.873				
		0.561	396.133	19.807				

หมายเหตุ : ตัดค่า outlier ทิ้ง

ตารางที่ ค 1.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายลิเนียร์แอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต โดยวิธี
สลายตัวด้วยรังสียูวีซี (Photolysis with UV-C)

เวลา	ครั้งที่	Abs.	ค่าจากกราฟ (μg)	ความเข้มข้น (ppm)	ค่าเฉลี่ย	% removal	ค่าเฉลี่ย	SD
30 นาที	1*	0:573	404.133	20.207	20.162	-2.05	1.16	0.954
		0:576	406.133	20.307				
		0:566	399.467	19.973				
	2	0.547	386.800	19.340	19.396	1.83		
		0.551	389.467	19.473				
		0.548	387.467	19.373				
	3	0.56	395.467	19.773	19.662	0.48		
		0.56	395.467	19.773				
		0.55	388.800	19.440				
60 นาที	1	0.549	388.133	19.407	19.396	1.83	1.23	0.766
		0.549	388.133	19.407				
		0.548	387.467	19.373				
	2	0.55	388.800	19.440	19.462	1.50		
		0.551	389.467	19.473				
		0.551	389.467	19.473				
	3	0.559	394.800	19.740	19.684	0.37		
		0.558	394.133	19.707				
		0.555	392.133	19.607				

หมายเหตุ : * ตัดค่า outlier ทิ้ง

ตารางที่ ค 1.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต โดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี (Photocatalysis with $\text{TiO}_2/\text{UV-C}$)

เวลา	ครั้งที่	Abs.	ค่าจากกราฟ (μg)	ความเข้มข้น (ppm)	ค่าเฉลี่ย	% removal	ค่าเฉลี่ย	SD
30 นาที	1	0.148	120.800	6.040	6.062	67.52	68.24	3.390
		0.149	121.467	6.073				
		0.149	121.467	6.073				
	2	0.162	130.133	6.507	6.484	65.26		
		0.161	129.467	6.473				
		0.161	129.467	6.473				
	3	0.123	104.133	5.207	5.240	71.93		
		0.123	104.133	5.207				
		0.126	106.133	5.307				
60 นาที	1	0.013	30.800	1.540	1.484	92.05	89.85	2.717
		0.01	28.800	1.440				
		0.011	29.467	1.473				
	2	0.02	35.467	1.773	1.740	90.68		
		0.018	34.133	1.707				
		0.019	34.800	1.740				
	3	0.041	49.467	2.473	2.462	86.81		
		0.041	49.467	2.473				
		0.04	48.800	2.440				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค 2. ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี

ค 2.1 ผลของค่าพีเอชที่เหมาะสม

ตารางที่ ค 2.1 ผลของค่าพีเอชต่อการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี

pH	ครั้งที่	Abs.	ค่าจากกราฟ (μg)	ความเข้มข้น (ppm)	ค่าเฉลี่ย	% removal	ค่าเฉลี่ย	SD
2	1	0.060	62.133	6.213	6.213	70.525	71.76	2.990
		0.061	62.800	6.280				
		0.059	61.467	6.147				
	2	0.047	53.467	5.347	5.236	75.163		
		0.043	50.800	5.080				
		0.046	52.800	5.280				
	3	0.064	64.800	6.480	6.413	69.576		
		0.062	63.467	6.347				
		0.063	64.133	6.413				
4	1	0.028	40.800	4.080	3.991	81.067	80.65	0.596
		0.025	38.800	3.880				
		0.027	40.133	4.013				
	2	0.031	42.800	4.280	4.169	80.223		
		0.027	40.133	4.013				
		0.030	42.133	4.213				
	3*	0.056	59.467	5.947	5.947	71.790		
		0.052	56.800	5.680				
		0.060	62.133	6.213				

หมายเหตุ : * ตัดค่า outlier ที่

ตารางที่ ค 2.1 (ต่อ) ผลของค่าพีเอชต่อการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี

pH	ครั้งที่	Abs.	ค่าจากกราฟ (μg)	ความเข้มข้น (ppm)	ค่าเฉลี่ย	% removal	ค่าเฉลี่ย	SD
5.5 (พีเอชตั้งต้น)	1	0.054	58.133	3.876	3.890	81.545	75.39	2.684
		0.055	58.800	3.920				
		0.054	58.133	3.876				
	2	0.059	61.467	6.147	6.236	70.420		
		0.061	62.800	6.280				
		0.061	62.800	6.280				
	3	0.049	54.800	5.480	5.436	74.215		
		0.049	54.800	5.480				
		0.047	53.467	5.347				
7	1	0.048	54.133	5.413	5.524	73.793	74.99	3.128
		0.057	60.133	6.013				
		0.044	51.467	5.147				
	2	0.051	56.133	5.613	5.769	72.633		
		0.056	59.467	5.947				
		0.053	57.467	5.747				
	3	0.035	45.467	4.547	4.524	78.537		
		0.031	42.800	4.280				
		0.038	47.467	4.747				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค 2.2 ผลของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสม

ตารางที่ ค 2.2 ผลของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี

ปริมาณ TiO ₂ (mg/L)	ครั้งที่	Abs.	ค่าจากกราฟ (μg)	ความเข้มข้น (ppm)	ค่าเฉลี่ย	% removal	ค่าเฉลี่ย	SD
100	1	0.057	60.133	6.013	6.147	69.691	75.72	6.576
		0.061	62.800	6.280				
		0.059	61.467	6.147				
	2	0.019	34.800	3.480	3.502	82.731		
		0.020	35.467	3.547				
		0.019	34.800	3.480				
	3	0.043	50.800	5.080	5.124	74.732		
		0.041	49.467	4.947				
		0.047	53.467	5.347				
300	1	0.011	29.467	2.947	2.947	85.470	80.90	3.954
		0.011	29.467	2.947				
		0.011	29.467	2.947				
	2	0.031	42.800	4.280	4.347	78.567		
		0.033	44.133	4.413				
		0.032	43.467	4.347				
	3	0.031	42.800	4.280	4.324	78.676		
		0.031	42.800	4.280				
		0.033	44.133	4.413				
500	1*	0.034	44.800	4.480	4.436	78.128	87.55	0.155
		0.033	44.133	4.413				
		0.033	44.133	4.413				
	2	0.005	25.467	2.547	2.547	87.442		
		0.004	24.800	2.480				
		0.006	26.133	2.613				
	3	0.005	25.467	2.547	2.502	87.662		
		0.004	24.800	2.480				
		0.004	24.800	2.480				

หมายเหตุ : * ตัดค่า outlier ทิ้ง

ค 2.3 ผลของระยะเวลาในการกำจัดที่เหมาะสม

ตารางที่ ค 2.3 ผลของระยะเวลาต่อการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี

เวลาสัมผัส(นาที)	ครั้งที่	Abs.	ค่าจากกราฟ (μg)	ความเข้มข้น (ppm)	ค่าเฉลี่ย	% removal	ค่าเฉลี่ย	SD
5	1	0.202	156.800	15.680	15.680	17.82	17.82	0.000
		0.202	156.800	15.680				
		0.202	156.800	15.680				
	2*	0.276	206.133	20.613	20.613	-8.04		
		0.276	206.133	20.613				
		0.276	206.133	20.613				
	3	0.202	156.800	15.680	15.680	17.82		
		0.202	156.800	15.680				
		0.202	156.800	15.680				
10	1	0.182	143.467	14.347	14.347	24.81	24.28	0.741
		0.182	143.467	14.347				
		0.182	143.467	14.347				
	2*	0.156	124.800	12.480	12.524	34.36		
		0.154	124.800	12.480				
		0.154	124.800	12.480				
	3	0.185	145.467	14.547	14.547	23.76		
		0.185	145.467	14.547				
		0.185	145.467	14.547				
15	1	0.135	112.133	11.213	11.227	41.16	46.21	7.711
		0.136	112.533	11.253				
		0.135	112.133	11.213				
	2	0.095	85.467	8.547	8.569	55.09		
		0.095	85.467	8.547				
		0.096	86.133	8.613				
	3	0.131	109.467	10.947	10.991	42.39		
		0.131	109.467	10.947				
		0.133	110.800	11.080				
30	1	0.046	52.800	5.280	5.302	72.21	64.60	7.302
		0.046	52.800	5.280				
		0.047	53.467	5.347				
	2	0.088	80.800	8.080	8.080	57.65		
		0.088	80.800	8.080				
		0.088	80.800	8.080				
	3	0.070	68.800	6.880	6.880	63.94		
		0.070	68.800	6.880				
		0.070	68.800	6.880				

หมายเหตุ : * ตัดค่า outlier ทิ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค 2.3 (ต่อ) ผลของระยะเวลาต่อการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี

เวลาดำเนินการ(นาที)	ครั้งที่	Abs.	ค่าจากกราฟ (µg)	ความเข้มข้น (ppm)	ค่าเฉลี่ย	% removal	ค่าเฉลี่ย	SD
60	1	0.016	32.800	3.280	3.280	82.81	83.20	2.700
		0.016	32.800	3.280				
		0.016	32.800	3.280				
	2	0.007	26.800	2.680	2.658	86.07		
		0.007	26.800	2.680				
		0.006	26.133	2.613				
	3	0.022	36.800	3.680	3.680	80.71		
		0.022	36.800	3.680				
		0.022	36.800	3.680				
120	1*	0.054	58.133	5.813	5.813	69.53	86.71	0.412
		0.054	58.133	5.813				
		0.054	58.133	5.813				
	2	0.004	24.800	2.480	2.480	87.00		
		0.004	24.800	2.480				
		0.004	24.800	2.480				
	3	0.006	26.133	2.613	2.591	86.42		
		0.006	26.133	2.613				
		0.005	25.467	2.547				

หมายเหตุ : *ตัดค่า outlier ทิ้ง

ค 2.4 ผลของความเข้มข้นของสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตในการกำจัดโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี

ตารางที่ ค 2.4 ผลของความเข้มข้นของสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตในการกำจัดโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี

ความเข้มข้น LAS (mg/L)	ครั้งที่	Abs.	ค่าจากกราฟ (μg)	ความเข้มข้น (ppm)	ค่าเฉลี่ย	% removal	ค่าเฉลี่ย	SD
10	1*	0.034	44.800	4.480	4.458	62.85	74.35	0.000
		0.033	44.133	4.413				
		0.034	44.800	4.480				
	2	0.012	30.133	3.013	3.013	74.35		
		0.012	30.133	3.013				
		0.012	30.133	3.013				
3	0.012	30.133	3.013	3.013	74.35			
	0.012	30.133	3.013					
	0.012	30.133	3.013					
20	1	0.016	32.800	3.280	3.280	82.81	83.20	2.700
		0.016	32.800	3.280				
		0.016	32.800	3.280				
	2	0.007	26.800	2.680	2.658	86.07		
		0.007	26.800	2.680				
		0.006	26.133	2.613				
3	0.022	36.800	3.680	3.680	80.71			
	0.022	36.800	3.680					
	0.022	36.800	3.680					
40	1	0.080	75.467	7.547	7.524	80.69	82.70	1.745
		0.080	75.467	7.547				
		0.079	74.800	7.480				
	2	0.062	63.467	6.347	6.347	83.71		
		0.062	63.467	6.347				
		0.062	63.467	6.347				
3	0.062	63.467	6.347	6.347	83.71			
	0.062	63.467	6.347					
	0.062	63.467	6.347					

หมายเหตุ : ตัดค่า outlier ที่

ตารางที่ ค 2.4 (ต่อ) ผลของความเข้มข้นของสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตในการกำจัดโดยวิธี
โฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี

ความเข้มข้น LAS (mg/L)	ครั้งที่	Abs.	ค่าจากกราฟ (μg)	ความเข้มข้น (ppm)	ค่าเฉลี่ย	% removal	ค่าเฉลี่ย	SD
60	1	0.354	258.133	25.813	25.836	59.56	60.15	0.836
		0.355	258.800	25.880				
		0.354	258.133	25.813				
	2	0.343	250.800	25.080	25.080	60.75		
		0.343	250.800	25.080				
		0.343	250.800	25.080				
	3*	0.229	174.800	17.480	17.480	72.64		
		0.229	174.800	17.480				
		0.229	174.800	17.480				
100	1	0.346	252.800	50.560	50.560	48.56	46.66	2.686
		0.346	252.800	50.560				
		0.346	252.800	50.560				
	2*	0.417	300.133	60.027	60.027	38.93		
		0.417	300.133	60.027				
		0.417	300.133	60.027				
	3	0.374	271.467	54.293	54.293	44.76		
		0.374	271.467	54.293				
		0.374	271.467	54.293				

หมายเหตุ : * ตัดค่า outlier ทิ้ง

ค 3. จลนพลศาสตร์ทางเคมีของการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี

ตารางที่ ค 3.1 ผลของจลนพลศาสตร์ทางเคมีของการบำบัดอันดับศูนย์ หนึ่ง และสอง

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้น (ppm)	A อันดับศูนย์	log A อันดับหนึ่ง	1/A อันดับสอง
0	19.080	19.080	1.2805	0.0524
1	18.913	18.913	1.2767	0.0528
3	16.013	16.013	1.2044	0.0624
5	15.754	15.754	1.1973	0.0634
10	13.806	13.806	1.1400	0.0724
15	10.262	10.262	1.0112	0.0974
30	6.754	6.754	0.8295	0.1480
60	3.206	3.206	0.5059	0.3119
120	2.536	2.536	0.4040	0.3943

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค 4. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟต โดยวิธีดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์ (Adsorption on TiO_2) โฟโตไลซิสด้วยรังสียูวีซี (Photolysis with UV-C) และวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี (Photocatalysis with TiO_2 /UV-C)

ตารางที่ ค 4.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟตโดยวิธีดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์ (Adsorption on TiO_2)

เวลา (นาที)	ครั้งที่	Abs	ค่าจากกราฟ (mg/L)	ความเข้มข้น (mg/L)	ค่าเฉลี่ย	%removal	ค่าเฉลี่ย	SD
5	1	0.042	0.173	0.577	0.551	48.512	50.79	3.210
	2	0.041	0.170	0.567		49.405		
	3	0.038	0.153	0.510		54.464		
10	1	0.020	0.072	0.240	0.303	59.322	48.59	10.216
	2	0.025	0.093	0.310		47.458		
	3	0.028	0.108	0.360		38.983		
15	1	0.026	0.100	0.333	0.331	43.503	43.88	3.968
	2	0.025	0.092	0.307		48.023		
	3	0.028	0.106	0.353		40.113		
30	1	0.044	0.180	0.600	0.606	46.429	45.93	1.406
	2	0.043	0.178	0.593		47.024		
	3	0.045	0.187	0.623		44.345		
60	1	0.042	0.173	0.577	0.576	48.512	48.61	1.936
	2	0.041	0.166	0.553		50.595		
	3	0.043	0.179	0.597		46.726		
120	1	0.031	0.124	0.413	0.419	57.168	56.59	7.788
	2	0.037	0.149	0.497		48.532		
	3	0.027	0.104	0.347		64.076		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค 4.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายออร์โทฟอสเฟตโดยวิธีโฟโตไลซิสด้วยรังสียูวีซี (Photolysis with UV-C)

เวลา (นาที)	ครั้งที่	Abs	ค่าจากกราฟ (mg/L)	ความเข้มข้น (mg/L)	ค่าเฉลี่ย	%removal	ค่าเฉลี่ย	SD
5	1	0.069	0.299	0.997	0.990	4.167	5.609	2.040
	2	0.067	0.290	0.967		7.051		
	3	0.070	0.302	1.007		3.205		
10	1	0.070	0.305	1.017	1.017	2.244	2.244	1.282
	2	0.071	0.309	1.030		0.962		
	3	0.069	0.301	1.003		3.526		
15	1	0.072	0.312	1.040	1.023	0.000	0.481	2.002
	2	0.071	0.309	1.030		0.962		
	3*	0.069	0.300	1.000		3.846		
30	1	0.069	0.298	0.993	0.993	4.487	4.49	2.885
	2	0.071	0.307	1.023		1.603		
	3*	0.067	0.289	0.963		7.372		
60	1	0.069	0.300	1.000	1.013	3.846	2.564	1.156
	2	0.070	0.305	1.017		2.244		
	3	0.071	0.307	1.023		1.603		
120	1*	0.059	0.254	0.847	0.951	18.590	3.526	0.453
	2	0.069	0.300	1.000		3.846		
	3	0.070	0.302	1.007		3.205		

หมายเหตุ : * ตัดค่า outlier ทิ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค 4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายออร์โทฟอสเฟตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี (Photocatalysis with $\text{TiO}_2/\text{UV-C}$)

เวลา (นาท)	ครั้งที่	Abs	ค่าจากกราฟ (mg/L)	ความเข้มข้น (mg/L)	ค่าเฉลี่ย	%removal	ค่าเฉลี่ย	SD
5	1*	0.096	0.221	0.737	0.547	25.36	44.61	4.299
	2	0.082	0.155	0.517		47.65		
	3	0.086	0.173	0.577		41.57		
10	1	0.083	0.157	0.523	0.536	46.98	45.74	2.443
	2	0.082	0.156	0.520		47.32		
	3	0.085	0.169	0.563		42.92		
15	1	0.074	0.115	0.560	0.562	41.97	41.73	0.21572
	2	0.064	0.070	0.563		41.66		
	3	0.066	0.081	0.564		41.55		
30	1*	0.094	0.197	0.657	0.465	31.95	51.81	1.221
	2	0.079	0.142	0.473		50.95		
	3	0.078	0.137	0.457		52.68		
60	1	0.071	0.103	0.343	0.493	64.42	54.06	9.294
	2	0.082	0.155	0.517		46.46		
	3	0.079	0.141	0.470		51.30		
120	1*	0.070	0.097	0.323	0.548	72.83	53.92	5.348
	2	0.087	0.178	0.593		50.14		
	3	0.081	0.151	0.503		57.70		

หมายเหตุ : * ตัดค่า outlier ทิ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค 5 ผลของความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตต่อการกำจัด LAS โดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี

ค 5.1 ผลของประสิทธิภาพการกำจัด LAS โดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี

ความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต (mg PO ₄ ³⁻ /L)	ครั้งที่	Abs	ค่าจากกราฟ (mg/L)	ความเข้มข้น (ppm)	ค่าเฉลี่ย	% removal	ค่าเฉลี่ย	SD
3	1	0.056	59.467	5.947	5.480	70.68	72.98	2.482
	2	0.041	49.467	4.947		75.61		
	3	0.05	55.467	5.547		72.65		
10	1	0.059	61.467	6.147	6.080	68.83	69.17	0.894
	2	0.055	58.800	5.880		70.18		
	3	0.06	62.133	6.213		68.49		

ค 5.2 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดออร์โธฟอสเฟตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี

ความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต (mg PO ₄ ³⁻ /L)	ครั้งที่	Abs	ค่าจากกราฟ (mg/L)	ความเข้มข้น (ppm)	ค่าเฉลี่ย	ปริมาณที่ถูกดูดซับ (mg PO ₄ ³⁻ /L)	ค่าเฉลี่ย	SD
3	1	0.116	0.518	1.726	1.752	1.13	1.11	0.103
	2	0.112	0.499	1.664		1.20		
	3	0.125	0.560	1.866		0.99		
10	1	0.626	2.896	9.652	9.647	0.34	0.34	0.086
	2	0.631	2.919	9.730		0.26		
	3	0.62	2.868	9.559		0.43		

ค 6. การกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต และออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมซักล้างด้วยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี

ค 6.1 ผลของการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต

ตารางที่ ค 6.1 ผลของการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตในน้ำเสียจากการซักล้างโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี

ครั้งที่	Abs.	ค่าจากกราฟ (μg)	ความเข้มข้น (ppm)	ค่าเฉลี่ย	% removal	ค่าเฉลี่ย	SD
1	0.038	47.467	1.582	1.582	45.043	51.99	7.363
	0.038	47.467	1.582				
	0.038	47.467	1.582				
2	0.030	42.133	1.404	1.404	51.218	51.99	7.363
	0.030	42.133	1.404				
	0.030	42.133	1.404				
3	0.019	34.800	1.160	1.160	59.708	51.99	7.363
	0.019	34.800	1.160				
	0.019	34.800	1.160				

ค 6.2 ผลของการกำจัดสารออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียจากการชักล้างด้วยวิธีไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะลิสต์

ตารางที่ ค 6.2 ผลของการกำจัดสารออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียจากการชักล้างด้วยวิธีโฟโตคะตะลิสต์ด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี

ครั้งที่	Abs	ค่าจากกราฟ (mg/L)	ความเข้มข้น (mg/L)	ค่าเฉลี่ย	%removal	ค่าเฉลี่ย	SD
1	0.227	1.083	5.415	5.732	48.963	45.98	4.847
2	0.266	1.265	6.325		40.386		
3	0.229	1.091	5.455		48.586		



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

สถิติ

ตารางที่ ง 1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนต (LAS) โดยวิธีดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์ วิธีสลายตัวด้วยรังสียูวีซี และวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี

ANOVA

Removal	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	13336.644	2	6668.322	1960.264	.000
Within Groups	17.009	5	3.402		
Total	13353.652	7			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง 2 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสารลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตโดยวิธี
โฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี

ตารางที่ ง 2.1 ผลทดสอบทางสถิติของค่าพีเอชที่เหมาะสม

ANOVA

Removal

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	63.222	3	21.074	1.516	.292
Within Groups	97.276	7	13.897		
Total	160.498	10			

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Removal

Tukey HSD

(I) method	(J) method	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
2.00	4.00	-5.93867	3.04375	.290	-16.0140	4.1366
	5.50	-.56283	3.40301	.998	-11.8273	10.7017
	7.00	-3.23300	3.04375	.721	-13.3083	6.8423
4.00	2.00	5.93867	3.04375	.290	-4.1366	16.0140
	5.50	5.37583	3.40301	.446	-5.8887	16.6403
	7.00	2.70567	3.04375	.811	-7.3696	12.7810
5.50	2.00	.56283	3.40301	.998	-10.7017	11.8273
	4.00	-5.37583	3.40301	.446	-16.6403	5.8887
	7.00	-2.67017	3.40301	.859	-13.9347	8.5943
7.00	2.00	3.23300	3.04375	.721	-6.8423	13.3083
	4.00	-2.70567	3.04375	.811	-12.7810	7.3696
	5.50	2.67017	3.40301	.859	-8.5943	13.9347

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ผลทดสอบสอบทางสถิติของค่าปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสม

ANOVA

Removal

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	114.755	2	57.377	1.945	.223
Within Groups	176.985	6	29.498		
Total	291.740	8			

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Removal

Tukey HSD

(I) dosage	(J) dosage	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
100.00	300.00	-5.18633	4.43452	.511	-18.7927	8.4200
	500.00	-8.69267	4.43452	.203	-22.2990	4.9137
300.00	100.00	5.18633	4.43452	.511	-8.4200	18.7927
	500.00	-3.50633	4.43452	.722	-17.1127	10.1000
500.00	100.00	8.69267	4.43452	.203	-4.9137	22.2990
	300.00	3.50633	4.43452	.722	-10.1000	17.1127

ตารางที่ 2.3 ผลทดสอบสอบทางสถิติของเวลาที่เหมาะสม (60 และ 120 นาที)

ANOVA

Removal

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	7.348	1	7.348	.139	.728
Within Groups	211.526	4	52.881		
Total	218.874	5			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง 2.4 ผลทดสอบสอบทางสถิติของความเข้มข้นของ LAS ที่เหมาะสม (20 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ANOVA

Removal

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	322.945	2	161.473	7.972	.020
Within Groups	121.529	6	20.255		
Total	444.474	8			

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Removal

Tukey HSD

(I) Conc	(J) Conc	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
10.00	20.00	-12.94667 [*]	3.67468	.029	-24.2216	-1.6717
	40.00	-12.45333 [*]	3.67468	.034	-23.7283	-1.1784
20.00	10.00	12.94667 [*]	3.67468	.029	1.6717	24.2216
	40.00	.49333	3.67468	.990	-10.7816	11.7683
40.00	10.00	12.45333 [*]	3.67468	.034	1.1784	23.7283
	20.00	-.49333	3.67468	.990	-11.7683	10.7816

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

ตารางที่ ง 3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายออร์โธฟอสเฟต โดยวิธีดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์ วิธีสลายตัวด้วยรังสียูวีซี และวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี

ANOVA

Removal

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	8.568	1	8.568	.171	.707
Within Groups	149.882	3	49.961		
Total	158.450	4			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 ผลของความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตต่อการกำจัดสารลิเนียร์แอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตโดยวิธีโฟโตคะตะไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีซี

ANOVA

Removal

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	315.763	2	157.881	33.235	.001
Within Groups	28.503	6	4.750		
Total	344.266	8			

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Removal

Tukey HSD

(I) Conc	(J) Conc	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
.00	3.00	10.21667*	1.77960	.003	4.7564	15.6770
	10.00	14.03000*	1.77960	.001	8.5697	19.4903
3.00	.00	-10.21667*	1.77960	.003	-15.6770	-4.7564
	10.00	3.81333	1.77960	.161	-1.6470	9.2736
10.00	.00	-14.03000*	1.77960	.001	-19.4903	-8.5697
	3.00	-3.81333	1.77960	.161	-9.2736	1.6470

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายอานนท์ จรรย์นรเศรษฐ์

วัน เดือน ปีเกิด 7 กรกฎาคม 2535

ที่อยู่ปัจจุบัน

512 ซ. แสนสบาย ถ. พระราม 4 แขวงพระโขนง เขตคลองเตย กรุงเทพฯ 10110

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2557 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขา เคมีสิ่งแวดล้อม เกรดเฉลี่ย 3.26 (เกียรตินิยม
อันดับสอง) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ทุนการศึกษาที่ได้รับ

ทุนการศึกษาของคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผลงานทางวิชาการ

อานนท์ จรรย์นรเศรษฐ์, รุจา สุวรรณสุข, วชิระ พิมพ์ปราโมทย์, กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ และ
พันธวิศ สัมพันธ์พานิช. 2559. การกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเรซินประ
จุวคที่ผ่านการใช้งาน. การประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 54 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2560 ตำแหน่งพนักงานปฏิบัติการทดสอบ บริษัทบิสซิเนส เซอร์วิส เซส อัลโลแอนซ์
จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้