

การปรับปรุงคุณภาพเถ้าลอยด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ
การกำจัดโลหะหนักและสารลดแรงตึงผิว ในน้ำเสียสังเคราะห์

**MODIFIED FLY ASH WITH TITANIUMDIOXIDE TO INCREASE
REMOVAL EFFICIENCY FOR HEAVY METAL AND SURFACTANT
IN SYNTHETIC WASTEWATER**

นางสาวเชิญขวัญ

ใจตรง

นายพีรชล

สุวรรณคำฉาย

นางสาวอำพรรัตน์

แก่นแก้ว

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การปรับปรุงคุณภาพเถ้าลอยด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ
การกำจัดโลหะหนักและสารลดแรงตึงผิว ในน้ำเสียสังเคราะห์

MODIFIED FLY ASH WITH TITANIUM DIOXIDE TO INCREASE
REMOVAL EFFICIENCY FOR HEAVY METAL AND SURFACTANT
IN SYNTHETIC WASTEWATER

นางสาวเชษฐาขวัญ ใจตรง

นายพีรชด สุวรรณกำจาย

นางสาวอำพรรัตน์ แก่นแก้ว

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตร์บัณฑิต

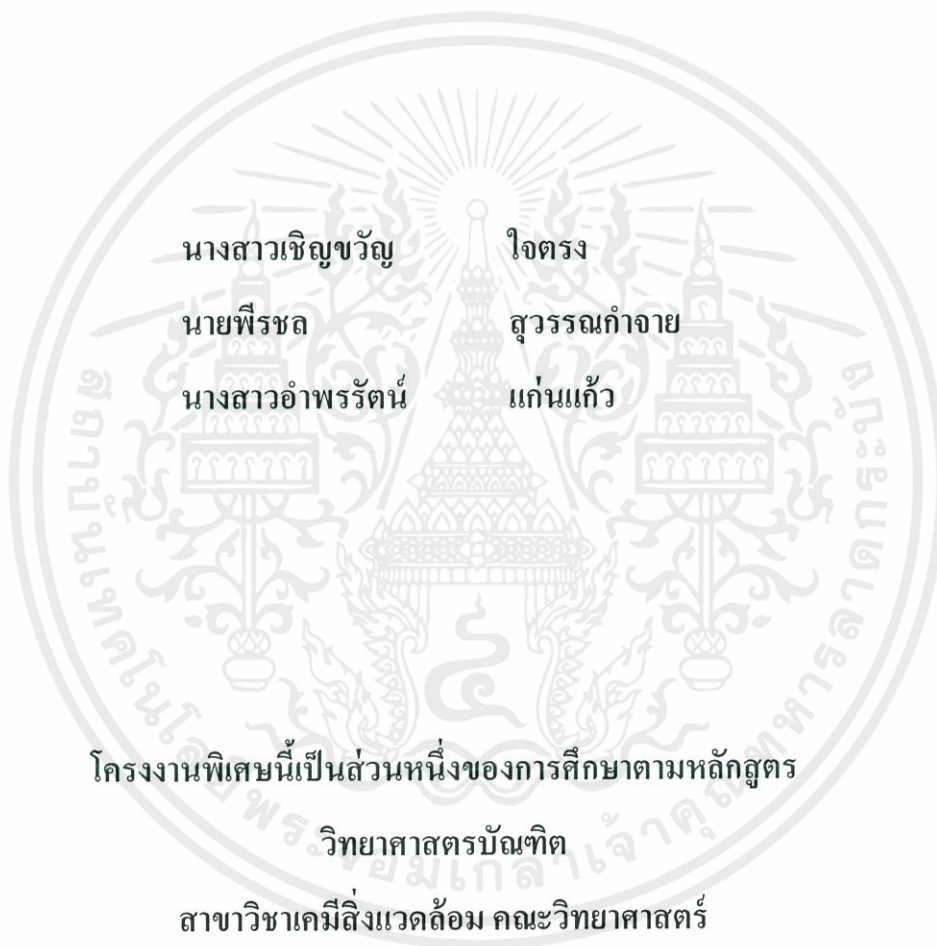
สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

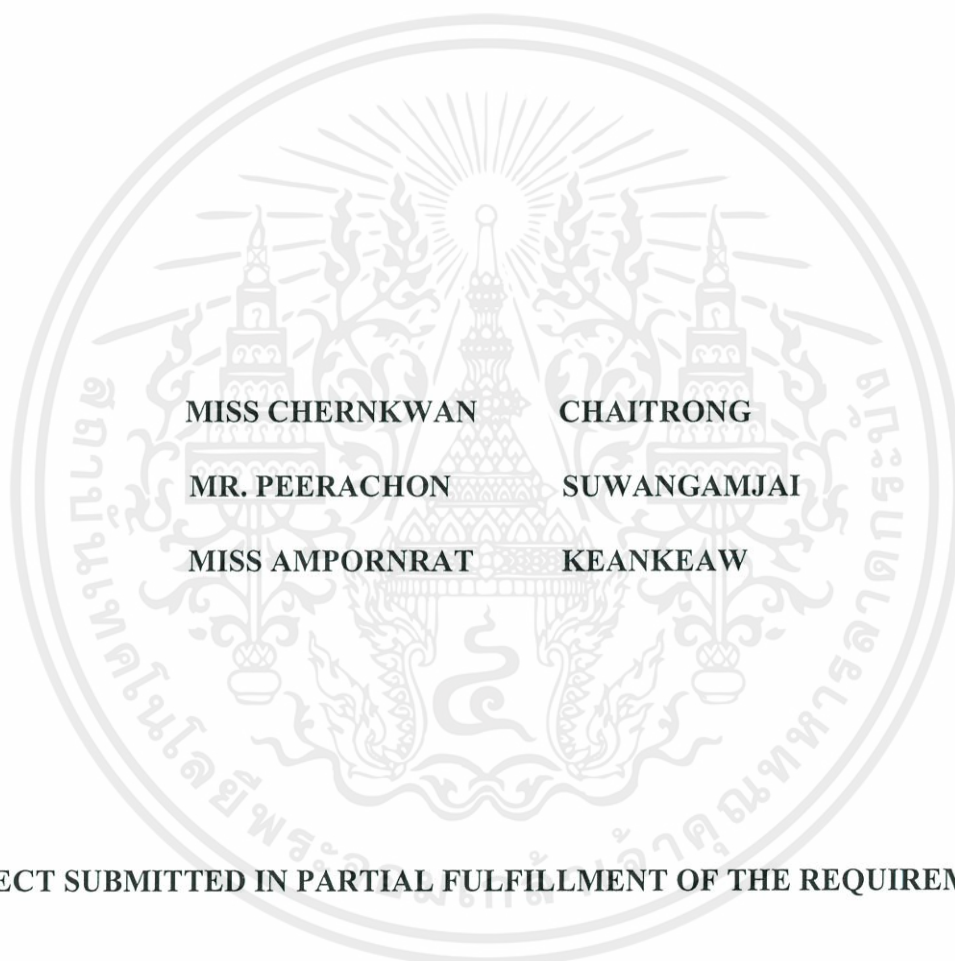
การปรับปรุงคุณภาพเ้าลอยด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ
การกำจัดโลหะหนักและสารลดแรงตึงผิวในน้ำเสียสังเคราะห์



ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**MODIFIED FLY ASH WITH TITANIUM DIOXIDE TO INCREASE
REMOVAL EFFICIENCY FOR HEAVY METALS AND SURFACTANT IN
SYNTHETIC WASTEWATER**



**MISS CHERNKWAN CHAITRONG
MR. PEERACHON SUWANGAMJAI
MISS AMPORN RAT KEANKEAW**

**A PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DGREE OF BACHELOR OF SCIENCE**

ENVIRONMENTAL CHEMISTRY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่เอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACADEMIC YEAR 2013

โครงการพิเศษ

การปรับปรุงคุณภาพเถ้าลอยด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักและสารลดแรงตึงผิวในน้ำเสียสังเคราะห์
Modified Fly Ash with Titanium dioxide to Increase Removal Efficiency for Heavy Metal and Surfactant in Synthetic Wastewater

ชื่อนักศึกษา

นางสาว เชิญขวัญ ใจตรง รหัส 53051175
นาย พีรชด สุวรรณกำจาย รหัส 53051225
นางสาว อำพรรัตน์ แก่นแก้ว รหัส 53051313

ปริญญา/ปีการศึกษา

วิทยาศาสตรบัณฑิต/2556

สาขาวิชา

เคมีสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ.ปัทมา ลีพหาวงศ์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ดร.สามารถ คงทวีเลิศ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
อ.กมลีนสุคนธ์ สุวรรณรัตน์	
ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์	
อ.ปัทมา ลีพหาวงศ์	
ดร.สามารถ คงทวีเลิศ	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การปรับปรุงคุณภาพเถ้าลอยด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ
การกำจัดโลหะหนัก และสารลดแรงตึงผิวในน้ำเสียสังเคราะห์

ชื่อนักศึกษา นางสาว เจริญขวัญ ใจตรง รหัส 53051175
นาย พีรชล สุวรรณกำจาย รหัส 53051225
นางสาว อัมพรรัตน์ แก่นแก้ว รหัส 53051313

สาขาวิชา/คณะ เคมีสิ่งแวดล้อม/วิทยาศาสตร์

ชื่อปริญญา/ปีการศึกษา วิทยาศาสตร์บัณฑิต/2556

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ปัทมา ลิฬหาวงศ์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. สามารถ กงทวีเลิศ

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพเถ้าลอย โดยนำเถ้าลอยประเภท C จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มาปรับปรุงคุณภาพด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มเพิ่มประสิทธิภาพ ด้วยวิธีการรีฟลักซ์กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ นำมาดูดซับโลหะหนักและสารลดแรงตึงผิวเพื่อให้สามารถบำบัดได้ในขั้นตอนเดียวกัน โดยการศึกษานี้ได้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีแอมโมเนียและโซเดียมโคเดคซิลเบนซีนซันโฟเนท (SDBS) ในการทดลองนั้นเปรียบเทียบระหว่างวิธีการบำบัดแบบ Adsorption และ Photodegradation และทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมโดยการหาปริมาณสารผสมเถ้าลอยกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการบำบัด ค่าพีเอชที่เหมาะสม และเวลาสัมผัสระหว่างสารผสมเถ้าลอยกับไทเทเนียมไดออกไซด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยปริมาณที่เหมาะสมของสารผสมเถ้าลอยด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการบำบัด คือ 0.4 กรัม พีเอชที่เหมาะสม คือ พีเอช 7 และเวลาสัมผัสระหว่างสารผสมเถ้าลอยด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์กับน้ำเสียสังเคราะห์ คือ เวลา 90 นาที การบำบัดแอมโมเนียด้วยวิธี Photodegradation ไม่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย เนื่องจากประสิทธิภาพการบำบัด ด้วยวิธีการบำบัดแบบไม่ฉายแสงและแบบฉายแสงยูวี มีประสิทธิภาพที่เหมือนกันอย่างมีนัยสำคัญ และการบำบัด SDBS ด้วยวิธีการบำบัดแบบไม่ฉายมีประสิทธิภาพการบำบัดที่น้อยกว่าการบำบัด ด้วยวิธีการบำบัดแบบฉายแสงยูวี ซึ่งประสิทธิภาพของการบำบัด SDBS ด้วยวิธีการบำบัดแบบไม่ฉายแสง เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ และด้วยวิธีการบำบัดแบบฉายแสงยูวี สูงสุดเท่ากับ 57.58 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ เถ้าลอย ไทเทเนียมไดออกไซด์ การดูดซับ การสลายได้โดยแสง

Project Title	Modified Fly Ash with Titanium dioxide to Increase Removal Efficiency for Heavy Metal and Surfactant in Synthetic Wastewater	
Students	Miss Chernkwan	Chaitrong
	Mr. Peerachon	Suwangamjai
	Miss Ampornrat	Keankeaw
Degree	Bachelor of Science	
Major Program	Environmental Resource Chemistry	
Academic Year	2013	
Advisor	Mrs. Patthama Leelahawong	
Co-Advisor	Dr.Samart	Kongtaweelert

Abstract

This special project is a study to improve the quality of fly ash by combined with titanium- dioxide by reflux with a solution of sodium hydroxide. In addition their treatment of heavy metals and surfactants. In this study using synthetic wastewater with cadmium and SDBS. In the comparison between the absorption method and UV irradiation method and experiment Optimum conditions the following. First the amount of (fly ash–titanium dioxide) substrate used in treat .Second appropriate pH and final Optimum conditions is contact time between (fly ash–titanium dioxide) substrate and synthetic wastewater. The result show that the amount of (fly ash–titanium dioxide) substrate used in treat as 0.4 g, appropriate pH as pH 7 and contact time between (fly ash–titanium dioxide) substrate and synthetic wastewater as 90 minute. In optimum condition can be treated with cadmium was 50 percent by the absorption method and 57.58 % by UV irradiation method. In addition can be treated with SDBS was % by the absorption method and % by UV irradiation method. The results show that UV irradiation method was effective in the treatment of higher adsorption method.

Keyword: Fly ash, Titanium dioxide, Adsorption, Photodegradation

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณา และการชี้แนะที่เป็นประโยชน์จากกรรมการโครงการทุกท่าน ขอขอบพระคุณอาจารย์ปัทมา ลีพหาวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ คร. สามารถ คงทวีเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม คร. ขวาลย์ ศรีวงษ์ และ อาจารย์ กลั่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ ที่ให้ความกรุณาตลอดเวลามาเป็นกรรมการและที่ปรึกษาโครงการ ที่คอยแนะนำ แก้ไข ชี้แนะข้อบกพร่องต่างๆ และแนะนำให้คำปรึกษา ผู้ศึกษาขอกราบขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูง มา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน และเพื่อนๆ พี่ๆ ที่แนะนำ ความรู้ ความเข้าใจ และคำแนะนำดีๆ ตลอดจนพี่ เจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ติวกิวิทย์เก่าและติ๊กจุฬารณ 1 ที่ให้ความช่วยเหลือต่างๆ ในทุกๆ ด้าน ทั้งการเบิกอุปกรณ์ ยืมเครื่องมือ แนะนำการใช้เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ การสอนการใช้เครื่องมือ ขอขอบคุณพี่ธันด์ธอร์ พรพัฒน์เดชอุดม ผู้ที่แนะนำแนวคิดในการทำแผนนำเสนอโครงการและแนะนำทฤษฎีที่เกี่ยวข้องท้ายที่สุดขอขอบพระคุณครอบครัวที่คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจ และที่ขาดมิได้ ขอขอบคุณเพื่อนๆ ร่วมกลุ่มการทำโครงการที่คอยให้ความช่วยเหลือซึ่งกันและกัน คอยช่วยกันทำให้โครงการประสบความสำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี

หากผลการศึกษานี้มีข้อบกพร่องประการใด ผู้ศึกษาขอน้อมรับไว้เพื่อปรับปรุง แก้ไขในการศึกษาครั้งต่อไป

นางสาวเชิญขวัญ ใจตรง
นายพีรชล สุวรรณกำกาย
นางสาวอำพรรัตน์ แก่นแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	IX
สารบัญรูป	XI
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ	XIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุผลเบื้องหน้า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง

หน้า

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

2.1.2 คุณสมบัติทางเคมี	5
2.1.3 ถ่านหินและการเผา	6
2.1.3.1 ถ่านหินสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า	6
2.1.3.2 การเผาถ่านหิน	6
(1) การเผาความร้อนสูง	6
(2) การเผาความร้อนปานกลาง	7
(3) การเผาความร้อนต่ำ	7
2.1.3.3 การเปลี่ยนแปลงของถ่านหินภายใต้การเผา	7
2.1.4 ชนิดของถ่านลอย	8
2.1.5 องค์ประกอบและข้อกำหนดทางเคมี	11
2.1.5.1 องค์ประกอบทางเคมี	11
2.1.5.2 ความชื้นและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา	11
2.1.6 คุณสมบัติทางกายภาพ	11
2.1.6.1 รูปร่างและลักษณะของผิวถ่านหิน	11
2.1.6.2 ขนาดและความละเอียด	12
2.1.6.3 ความถ่วงจำเพาะ	13
2.1.6.4 ดัชนีการพัฒนากำลัง	13
2.1.6.5 ความต้องการน้ำ	14
2.1.6.6 ความไม่คงตัว	14
2.1.6.7 ความสม่ำเสมอ	14
2.1.6.8 แฟกเตอร์ผลคูณ	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในองค์กรเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกข้อมูลไปเผยแพร่หรือใช้ข้อมูลนี้ในทางที่ผิดโดยไม่ได้รับอนุญาต

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง

หน้า

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

2.1.7 การวัดความเป็นปอลิโซลันโดยวิธีอื่น	16
2.1.8 การเก็บตัวอย่างได้ง่าย	16
2.2 โลหะหนักแคดเมียม	17
2.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี	17
2.2.2 แหล่งที่พบ	17
2.2.3 การนำไปใช้ประโยชน์	17
2.2.4 ความเป็นพิษของแคดเมียม	18
2.3 สารลดแรงตึงผิว (Surfactant)	20
2.3.1 คุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิว	23
2.3.2 การนำสารลดแรงตึงผิวไปใช้ประโยชน์	24
2.4 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide: TiO_2)	25
2.4.1 กระบวนการโฟโตแคตาไลซิสออกซิเดชัน	26
2.5 การดูดซับ (Adsorption)	28
2.6 ไอโซเทอมของการดูดซับ	28
2.6.1 Freundlich Isotherm	29
2.6.2 Langmuir Isotherm	30
2.7 เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด	31
2.8 X-ray diffractometry (XRD)	31
2.9 Fourier-transformed infrared spectrophotometer (FT-IR)	32

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลเปลี่ยนเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

33

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง

หน้า

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย (ต่อ)

3.2 การเตรียมตัวอย่างเถ้าลอยด้วยวิธีการล้างเถ้าลอย	34
3.3 การปรับปรุงคุณภาพเถ้าลอยด้วยไทเทเนียม ไดออกไซด์ ด้วยวิธีการรีฟลักซ์	34
3.4 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของสารผสม (FA-TiO ₂)	34
3.5 การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการบำบัดแบบไม่ฉายแสง (Adsorption) และการสลายสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการฉายแสงยูวี (Photodegradation)	34
3.5.1 ศึกษาปริมาณที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์	35
3.5.2 ศึกษาพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์	35
3.5.3 ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์	35
3.5.4 การศึกษาหาไอโซเทอมการบำบัดในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์	36
3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ	36

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมี	37
4.1.1 ศึกษาองค์ประกอบของสารด้วยเครื่อง XRD	37
4.1.2 ศึกษาโครงสร้างของสารด้วยเครื่อง FTIR	39
4.1.3 ศึกษาสัณฐานและลักษณะพื้นผิวด้วยเครื่อง SEM	40
4.2 ผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยสารผสม (FA-TiO ₂)	41
4.2.1 ผลของปริมาณ (สารผสม FA-TiO ₂) ในการบำบัดแคดเมียม	41
4.2.2 ผลของปริมาณ (สารผสม FA-TiO ₂) ในการบำบัด SDBS	42
4.2.3 ผลของ pH ในน้ำเสียสังเคราะห์สำหรับการบำบัดแคดเมียม	43
4.2.4 ผลของ pH ในน้ำเสียสังเคราะห์สำหรับการบำบัด SDBS	44
4.2.5 ผลการศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดแคดเมียมที่ pH 6 และ pH 7	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล (ต่อ)	
4.2.6 ผลการศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการบำบัด SDBS ที่ pH 6 และ pH 7	46
4.2.7 ผลการศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์	48
4.2.8 ผลการศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการบำบัด SDBS ในน้ำเสียสังเคราะห์	49
4.3 ไอโซเทอมของการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ (Isotherm Absorption)	50
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	52
5.1 สรุปผลการทดลอง	52
5.2 ข้อเสนอแนะ	53
เอกสารอ้างอิง	54
ภาคผนวก	56
ภาคผนวก ก	56
ภาคผนวก ข	57
ภาคผนวก ค	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ตาราง)

ตารางที่	หน้า	
2.1	ข้อกำหนดทางเคมีของเส้นลวดตามมาตรฐาน ASTM C618	8
2.2	ข้อกำหนดทางเคมีเพิ่มเติมตามมาตรฐาน ASTM C618	9
2.3	ข้อกำหนดทางกายภาพตามมาตรฐาน ASTM C618	9
2.4	ข้อกำหนดทางกายภาพเพิ่มเติมตามมาตรฐาน ASTM C618	10
2.5	เปรียบเทียบความสามารถของสารลดแรงตึงผิวทั้ง 4 ชนิด ในการทำให้เกิดฟอง การซักล้าง และการทำให้พื้นผิวเกิดความอ่อน	22
ค-1	แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมที่วัดด้วยเครื่อง AAS	59
ค-2	แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐาน SDBS ที่วัดด้วยเครื่อง UV-Vis	60
ค-3	แสดงประสิทธิภาพการบำบัดแคดเมียมของการหาปริมาณสารผสม (FA-TiO ₂) ที่เหมาะสม ด้วยวิธีการบำบัดแบบ Adsorption	61
ค-4	แสดงประสิทธิภาพการบำบัดแคดเมียมในการหาปริมาณสารผสม (FA-TiO ₂) ที่เหมาะสม ด้วยวิธีการบำบัดแบบ Photodegradation	62
ค-5	แสดงประสิทธิภาพการบำบัด SDBS ของการหาปริมาณสารผสม (FA-TiO ₂) ที่เหมาะสม ด้วยวิธีการบำบัดแบบ Adsorption	63
ค-6	แสดงประสิทธิภาพการบำบัด SDBS ในการหาปริมาณสารผสม (FA-TiO ₂) ที่เหมาะสม ด้วยวิธีการบำบัดแบบ Photodegradation	64
ค-7	แสดงประสิทธิภาพการบำบัดแคดเมียมในการหา pH ที่เหมาะสมของน้ำเสีย-สังเคราะห์	65
ค-8	แสดงประสิทธิภาพการบำบัด SDBS ในการหา pH ที่เหมาะสมของน้ำเสีย-สังเคราะห์	66
ค-9	แสดงประสิทธิภาพการบำบัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ pH 6 และ pH 7 ด้วยวิธีการบำบัดแบบ Adsorption	67
ค-10	แสดงประสิทธิภาพการบำบัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ pH 6 และ pH 7 ด้วยวิธีการบำบัดแบบ Photodegradation	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ตาราง)

ตารางที่		หน้า
ค-11	แสดงประสิทธิภาพการบำบัด SDBS ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ pH 6 และ pH 7 ด้วยวิธีการบำบัด Adsorption	69
ค-12	แสดงประสิทธิภาพการบำบัด SDBS ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ pH 6 และ pH 7 ด้วยวิธีการบำบัด แบบ Photodegradation	70
ค-13	แสดงประสิทธิภาพการบำบัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ สำหรับการหาเวลาที่เหมาะสม	71
ค-14	แสดงประสิทธิภาพการบำบัด SDBS ในน้ำเสียสังเคราะห์ สำหรับการหาเวลาที่เหมาะสม	72



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (รูป)

รูปที่	หน้า
2.1	4
2.2	5
2.3	12
2.4	20
2.5	23
2.6	24
2.7	25
2.8	27
2.9	29
2.10	30
4.1	37
4.2	38
4.3	39
4.4	40
4.5	41
4.6	42
4.7	43
4.8	44
4.9	45
4.10	46
4.11	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (รูป)

รูปที่	หน้า
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับประสิทธิภาพในการบำบัดแคดเมียม	48
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับประสิทธิภาพในการบำบัด SDBS	49
4.14 กราฟไอโซเทอมของการบำบัดแบบแลงเมียร์	50
4.15 กราฟไอโซเทอมของการบำบัดแบบฟรุนดี	51
ค-1 กราฟมาตรฐานแคดเมียม	59
ค-2 กราฟมาตรฐาน SDBS	60



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์/คำย่อ

คำจำกัดความ/คำเต็ม

SDBS

สารลดแรงตึงผิว

(Sodium Dodecylbenzene Sulfonate)

TiO₂

ไทเทเนียมไดออกไซด์

FA-TiO₂

สารผสมเข้ากับไทเทเนียมไดออกไซด์

LOI

ความชื้นและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา

(Loss on Ignition)

Adsorption

การบำบัดแบบไม่ฉายแสง UV

Photodegradation

การสลายสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการฉายแสงยูวี

SiO₂

ซิลิกา

Fe₂O₃

เฟอร์ริกออกไซด์

Al₂O₃

อลูมินา

CaO

แคลเซียมออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1. ที่มาและความสำคัญ

ปัญหามลพิษจากการปนเปื้อนโลหะหนักแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม เกิดจากการทิ้งของเสียที่มีแคดเมียมปนเปื้อนลงสู่สิ่งแวดล้อม เช่น การทิ้งของเสียจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี แบตเตอรี่ ปุ๋ยเคมี และเหมืองแร่ ลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะโดยไม่ผ่านกระบวนการบำบัดหรือได้รับการบำบัดไม่เพียงพอ ทำให้โลหะหนักแคดเมียมเกิดการสะสมในแหล่งน้ำ ดินตะกอน และสิ่งมีชีวิตในน้ำซึ่งจะถูกถ่ายทอดไปตามห่วงโซ่อาหาร ประกอบกับแคดเมียมไม่ย่อยสลายตามธรรมชาติจึงอาจก่อให้เกิดการสะสมแคดเมียมในร่างกายมนุษย์ ซึ่งทำให้เกิดอาการปวดกระดูก ความดันโลหิตสูง ไตพิการ และในที่สุดกระดูกจะกร่อนและเปราะเนื่องจากแคดเมียมเป็นสารอันตรายซึ่งปนเปื้อนมากับน้ำทิ้ง ดังนั้นกระทรวงอุตสาหกรรมจึงกำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม ให้มีปริมาณแคดเมียมได้ไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้โรงงานอุตสาหกรรมต้องมีการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำทิ้งด้วยวิธีการต่างๆ ได้แก่ การตกตะกอนทางเคมี กระบวนการกรองผ่านเยื่อกรอง (membrane) หรือกระบวนการดูดซับ (adsorption) ซึ่งในการบำบัดจะต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพการบำบัด และความเหมาะสมของเทคโนโลยีที่ใช้รวมทั้งต้องมีราคาถูกคุ้มค่าต่อการบำบัดการนำวัสดุเหลือทิ้งมาพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียจะเป็นการลดค่าใช้จ่าย และยังเพิ่มมูลค่าให้แก่ของเหลือทิ้ง อีกทั้งเป็นการช่วยจัดการของเสียและของเหลือทิ้งเหล่านี้อีกทางหนึ่งปัญหาสิ่งแวดล้อมจากอุตสาหกรรมที่มีผลมาจากการปล่อยก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์สู่บรรยากาศในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า และปัญหาการกำจัดของเสียจากกระบวนการอุตสาหกรรม โดยส่วนใหญ่จะเป็นปัญหาในเรื่องน้ำเสีย เช่น น้ำเสียจากกระบวนการอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น อากาศเสีย หรือ กากของเสียอุตสาหกรรม ปัญหาน้ำเสียเป็นเรื่องที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีผลกระทบเป็นวงกว้างโดยเฉพาะกับชุมชนที่อยู่รอบๆ โรงงาน การปล่อยน้ำเสียจากอุตสาหกรรมลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะโดยไม่มีการบำบัดก่อนทิ้ง จะก่อให้เกิดการปนเปื้อนของมลพิษในแหล่งน้ำ อาทิ เช่น โลหะหนัก สารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นสูงๆ ซึ่งมลพิษเหล่านี้ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำ การลดความเป็นพิษของน้ำเสียก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถลดความขัดแย้งระหว่างโรงงานและชุมชนโดยรอบ ทั้งยังช่วยรักษแหล่งน้ำสาธารณะให้สะอาดและสวยงาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถั่วลันเตาเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่สามารถนำ มาพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับได้ เนื่องจากถั่วลันเตามีโครงสร้างรูพรุนที่ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับ โดยถั่วลันเตาประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมาก และไอออนของโลหะหนักอาจเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับซิลิกา ในส่วน โครงสร้างอนินทรีย์สารที่เป็นซิลิกาซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ ร้อยละ 53.32 ของถั่วลันเตา ถั่วลันเตาเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าและมีปริมาณมาก ตามรายงานของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งถือว่าเป็นแหล่งที่มีปริมาณถั่วลันเตา ที่มีจำนวนมากที่สุดของประเทศไทย มีปริมาณถั่วลันเตาประมาณ 1.8 – 2.0 ล้านตันต่อปี ซึ่งปริมาณถั่วลันเตาบางส่วนนำไปใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีต

โลหะหนักแคดเมียม สามารถเข้าสู่ร่างกายโดยไม่รู้ตัวจากสิ่งแวดล้อม (ดิน น้ำ อากาศ) อาหาร เครื่องสำอาง หรือจากข้าวของเครื่องใช้ในครัวเรือน สาเหตุของการปนเปื้อนจากธรรมชาติ กระบวนการผลิต วัสดุคืบและสารเคมีถูกปล่อยเป็นของเสียออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เจ้าหน้าที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการก็เป็นอีกกลุ่มหนึ่งเช่นกันที่อยู่ในกลุ่มเสี่ยงของการนำสารพิษเหล่านี้เข้าสู่ร่างกายโดยไม่รู้ตัว เนื่องจากต้องทำหน้าที่วิเคราะห์ตัวอย่าง ไม่ว่าจะเป็นทางด้านเคมีหรือด้านชีวภาพที่ล้วนต้องทำงานหรือสัมผัสกับสารเคมี สารพิษ กากของเสียต่างๆ และสารโลหะหนักอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ถึงแม้จะป้องกันตัวเอง โดยการสวมหรือใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลแล้วก็ตาม แต่สารพิษโลหะหนักก็คือ สารที่ก่อให้เกิดโทษหรือความเป็นพิษต่อร่างกาย โดยอาจสร้างตั้งแต่ปัญหาเล็กๆ เช่น ผดผื่นคัน ไปจนถึงปัญหาใหญ่ เช่น โรคมะเร็ง แต่ไม่ว่าจะเป็นพิษขนาดไหน สารพิษก็อันตรายทั้งสิ้นและสารอีกชนิดหนึ่งที่ทำให้คุณและโทษ คือ สารลดแรงตึงผิว ซึ่งมีบทบาทที่สำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์ ในแต่ละวัน มนุษย์ใช้สารลดแรงตึงผิวแทบทุกกิจกรรม เช่น การทำความสะอาดร่างกายและของใช้ การใช้เครื่องสำอาง การย่อยอาหาร กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม เป็นต้น การเลือกประเภทของสารลดแรงตึงผิวปริมาณหรือความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว รวมถึงสภาวะอื่นๆ ให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ของการใช้งานต่างๆ เป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่ง ทั้งนี้เพื่อให้สารลดแรงตึงผิวทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดและไม่สร้างปัญหาเพิ่มให้กับสิ่งแวดล้อม สารลดแรงตึงผิวส่วนใหญ่จะสามารถย่อยสลายได้โดยธรรมชาติ ทั้งนี้ความสามารถในการถูกย่อยสลายจะขึ้นกับโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว รวมทั้งปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่เหลืออยู่จากการใช้ การใช้สารลดแรงตึงผิวในปริมาณที่เหมาะสม จะช่วยให้ประหยัดการที่ต้องบำบัดน้ำเสียอีกด้วย

ดังนั้นในโรงงานพิเศษนี้จึงได้เลือกศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดโลหะหนักและสารลดแรงตึงผิวของถั่วลันเตาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยมีมุ่งเน้นการบำบัดโลหะหนักและสารลดแรงตึงผิวให้อยู่ในขั้นตอนเดียวเพื่อลดขั้นตอนการบำบัดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มีอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในเชิงวิชาการได้โดยไม่ว่าผิดมิได้ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกไปเผยแพร่หรือแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2. วัตถุประสงค์งานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเถ้าลอยหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ในการบำบัดโลหะหนักและสารลดแรงตึงผิว (SDBS) ในน้ำเสียสังเคราะห์
- 1.2.2 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดแคดเมียมและสารลดแรงตึงผิว (SDBD) ในน้ำเสียสังเคราะห์ของเถ้าลอยที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์
- 1.2.3 เปรียบเทียบการใช้สารผสม (FA-TiO₂) ในการบำบัดแคดเมียมและสารลดแรงตึงผิว (SDBS) ด้วยวิธีการ Adsorption และ Photodegradation

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 นำเถ้าลอยมาทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ และรีฟลักซ์ด้วย
- 1.3.2 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดจากปัจจัยต่างๆ คือ ปริมาณ พีเอช และเวลาที่ เหมาะสมกับน้ำเสียสังเคราะห์
- 1.3.3 ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัด โลหะหนักและสารลดแรงตึงผิวของเถ้าลอยที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ในน้ำเสียสังเคราะห์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถนำไปใช้บำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากโรงงานอุตสาหกรรมได้จริง
- 1.4.2 เถ้าลอยที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถกำจัดโลหะหนักและสารลดแรงตึงผิวได้ในขั้นตอนเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 เถ้าลอย (ปริญญา, 2547, น.16-18)

เถ้าลอย (fly ash) เป็นผลพลอยได้ (by-product) จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดละเอียดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อน ถ่านหินที่มีขนาดใหญ่จะตกลงยังก้นเตา จึงเรียกกันว่าเถ้าก้นเตา (bottom ash) ส่วนเถ้าถ่านหินขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน (ไมโครเมตร) จนถึงประมาณ 200 ไมครอน จะลอยไปกับอากาศร้อน จึงเรียกว่าเถ้าลอย เถ้าลอยจะถูกดักจับไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic precipitator) เพื่อไม่ให้ออกไปกับร้อนและเป็นมลภาวะต่อพื้นที่รอบบริเวณ โรงไฟฟ้า เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานใช้ผสมปูนซีเมนต์ทำคอนกรีตได้ บทนี้จะกล่าวถึงเถ้าลอยโดยทั่วไปและพยายามกล่าวถึงคุณสมบัติของเถ้าลอยแม่เมาะ เนื่องจากมีปริมาณมากและใช้กันมากในประเทศไทย นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงเถ้าก้นเตาและเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าอื่น เนื่องจากปัจจุบันมีเถ้าถ่านหินมากขึ้น จึงจำเป็นต้องกำจัดหรือนำไปใช้เพื่อลดปัญหาด้านมลภาวะและลดการใช้พลังงานจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์



รูปที่ 2.1 เถ้าลอย (Fly ash)

(ที่มา: www.kutahyacimento.com)

ในปัจจุบันได้มีการนำเถ้าลอยมาใช้ประโยชน์ในการก่อสร้างต่างๆ ในหลายลักษณะ เช่น เป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตกำลังสูง หรือคอนกรีตทั่วไป ทำคอนกรีตบล็อก ก่อสร้างทางดิน โดยทั่วไป เถ้าลอยจะมีลักษณะทางกายภาพและทางเคมี ดังต่อไปนี้

2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

โดยทั่วไปเถ้าลอยจะมีสีเทาอ่อนจนถึงสีเทาเข้ม หรือบางครั้งมีสีน้ำตาล ตามแต่ชนิดของถ่านหินวิธีการเผาและอุณหภูมิในการเผา มีรูปร่างกลมเป็นส่วนใหญ่ และมีรูปร่างหลายเหลี่ยมเป็น ส่วน น้อย มีความละเอียดตั้งแต่ 0.001 มิลลิเมตร จนถึง 1 มิลลิเมตร ขึ้นอยู่กับกระบวนการเผาโดย ASTM C618 ยอมให้น้ำหนักถ่านหินค้างตะแกรงเบอร์ 325 ได้ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก ความ ละเอียด ในรูปของพื้นที่ผิวจำเพาะซึ่งวัดโดยวิธี Air Blaine Permeability อยู่ในช่วง 2,500 ถึง 4,000 ตารางเซนติเมตร/กรัม ในขณะที่ความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่า ไม่ต่ำกว่า 2,800 ตารางเซนติเมตร/กรัม

2.1.2 คุณสมบัติทางเคมี

โดยทั่วไปเถ้าลอยมักมีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ยังประกอบด้วยฟอสฟอรัสออกไซด์ (Fe_2O_3) ASTM C618 ได้แยกประเภทของเถ้าลอยไว้ 3 ชนิด คือประเภท F ประเภท C และ ประเภท N โดย ประเภท F มี $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าร้อยละ 70 และ ประเภท C มี $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ระหว่างร้อยละ 50 ถึง 70 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 2.2 (ก) เถ้าลอยประเภท F (ข) เถ้าลอยประเภท C

(ที่มา: www.caer.uky.edu)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ถ่านหินและการเผา (ปริญญญา, 2547, น.17-19)

2.1.3.1 ถ่านหินสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า

ถ่านหินที่ใช้ในการเผาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิด ได้แก่

1. แอนทราไซต์ (antracite)
2. บิทูมินัส (bituminous)
3. ซับบิทูมินัส (sub-bituminous)
4. ลิกไนต์ (lignite)

ถ่านหินคุณภาพดีที่สุด ได้แก่ แอนทราไซต์ สามารถให้ความร้อนสูงสุด และมีปริมาณความชื้นต่ำตามด้วยบิทูมินัสและลิกไนต์ตามลำดับ โดยลิกไนต์ให้ความร้อนต่ำและมีความชื้นสูง นอกจากถ่านทั้ง 4 ชนิดแล้วยังมีพีท (peat) ซึ่งเป็นถ่านหินคุณภาพต่ำที่สุดให้ความร้อนต่ำสุดและให้ความร้อนสูงสุด จึงไม่นิยมใช้เผาเป็นเชื้อเพลิงในโรงงานไฟฟ้า

ประเทศไทยมีแหล่งถ่านหินที่สำคัญอยู่หลายแห่ง ได้แก่ ที่แม่เมาะ อำเภอแม่เมาะและแม่ตึบ อำเภองาว จังหวัดลำปาง ที่บ้านปูละและบ้านป่าคา อำเภอลี้ จังหวัดลำพูน และที่เหมืองกระบี่ โดยเฉพาะที่แม่เมาะมีโรงผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่และเป็นแหล่งผลิตถ่านล้อยที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทยโดยผลิตได้ถึงประมาณ 3 ล้านตันต่อปี

2.1.3.2 การเผาถ่านหิน

การเผาถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกัน 3 ระบบ ได้แก่ การเผาความร้อนสูง การเผาความร้อนปานกลาง และการเผาความร้อนต่ำ

(1) การเผาความร้อนสูง

ในเตาเผาความร้อนสูง อุณหภูมิจะสูงถึง 1500 – 1700 องศาเซลเซียส เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้แรงลม (cyclone combustion) ที่อุณหภูมิสูง ถ่านหินส่วนใหญ่จะหลอมละลายและปะทะรวมกันเป็นเม็ดหรือก้อน ถ่านหินที่เหลือส่วนใหญ่จะเป็นเถ้าก้นเตา และตกลงในอ่างน้ำข้างล่าง ถ่านหินขนาดเล็กจะเป็นถ่านล้อยซึ่งในระบบการเผา นี้ จะมีปริมาณค่อนข้างน้อย ถ่านหินที่ได้จะมีลักษณะเป็นแก้วเม็ดออกใสๆ (vitreous particle)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) การเผาความร้อนปานกลาง

อุณหภูมิของการเผาถ่านหินบดในการเผาความร้อนปานกลางอยู่ในช่วงระหว่าง 1100 – 1400 องศาเซลเซียส เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้ถ่านหินบด (pulverized coal combustion) ถ่านหินส่วนใหญ่จะเป็นถ่านล้อย ที่เหลือจะเป็นถ่านหนักหรือถ่านก้นเตา ถ่านล้อยที่ได้จากการเผานี้มีปริมาณร้อยละ 70 – 90 มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน เป็นถ่านล้อยที่เหมาะสมสำหรับใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อใช้ในการทำคอนกรีต โรงไฟฟ้าแม่เมาะใช้ในการเผาในลักษณะนี้

(3) การเผาความร้อนต่ำ

การเผาความร้อนต่ำเป็นการเผาในเตาแบบฟลูอิด ไคซ์เบด (fluidized-bed combustion) อุณหภูมิของการเผาถ่านหินจะค่อนข้างต่ำคือไม่เกิน 900 องศาเซลเซียส ถ่านหินที่ได้มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน (irregular) และมีส่วนประกอบที่มีผลึกค่อนข้างสูง เนื่องจากถ่านหินที่ได้มาผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำ แม้จะสามารถใช้เป็นสารปอซโซลานได้ แต่ไม่ดีเท่ากับถ่านล้อยที่ได้จากการเผาความร้อนปานกลาง อย่างไรก็ตามมีวิธีการเผาแบบนี้เริ่มใช้มากขึ้นสำหรับการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กในโรงงานต่างๆ

2.1.3.3 การเปลี่ยนแปลงของถ่านหินภายใต้การเผา

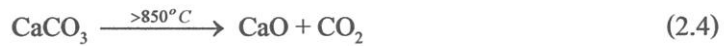
ถ่านหินมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ ควอตซ์ (quartz) เคาลินไนต์ (kaulinite) อิลไลต์ (illite) ไพไรต์ (pyrite) และแคลไซต์ (calcite) นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่นผสมอยู่เล็กน้อยซึ่งได้แก่ คลอไรต์ (chlorite) มาเคไซต์ (marcasite) และเฟลด์สปาร์ (feldspar) เมื่อผ่านการเผาในอุณหภูมิต่างๆ แร่ธาตุในถ่านหินจะเปลี่ยนสถานะ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ไพไรต์และมาเคไซต์ เปลี่ยนเป็นเฮมาไตต์ (Fe_2O_3) และแมกเนไตต์ ($\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) ในรูปของผลึกและเป็นเหล็กออกไซด์ในส่วนที่เป็นแก้ว (glassy phase) ของถ่านหินดังสมการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แคลไซต์เปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแอนไฮไดรต์ (CaSO₄) ดังสมการที่ (2.4) และ (2.5)



3. ดินเหนียวจะสูญเสียน้ำและเปลี่ยนเป็น แก้ว มุลไลต์ (mullite, 3Al₂O₃•2SiO₂) และควอตซ์ (SiO₂) ในรูปของผลึกของคริสโตบาไลต์ (cristobalite) ดังสมการ

2.1.4 ชนิดของเถ้าลอย (ปริญญา, 2547, น.19-22)

มาตรฐาน ASTM C618 แบ่งเถ้าลอยออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ (N, F, C)

(1) ชนิด F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัสมีปริมาณผลรวมของซิลิกา (silica, SiO₂) อลูมินา (alumina, Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (ferric oxide, Fe₂O₃) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ดังแสดงในตารางที่ 2.1-2.4 วิธีการเก็บตัวอย่างและทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C311 โดยทั่วไปเถ้าลอยชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide, CaO) ต่ำ

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด		
	N	F	C
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ อย่างต่ำ, ร้อยละ	70.0	70.0	50.0
SO ₃ อย่างสูง, ร้อยละ	4.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด, ร้อยละ	3.0	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI), สูงสุดร้อยละ	10.0	6.0	6.0

หมายเหตุ 1. สารปอซโซลานชนิด N (ประเภท N) เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ (natural pozzolan)

2. สามารถใช้เถ้าลอยชนิด F ที่มีการสูญเสียหนักเนื่องจากการเผาสูงถึงร้อยละ 12 ได้ ถ้ามีผลของการใช้งานหรือผลของการทดสอบที่เชื่อถือได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางเคมีเพิ่มเติมตามมาตรฐาน ASTM C618

ข้อกำหนดทางเคมีเพิ่มเติม	ชนิด		
	N	F	C
ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า Na_2O , ร้อยละ	1.5	1.5	1.5

หมายเหตุ ปริมาณนี้จะใช้ระบุสำหรับคอนกรีตที่มีมวลรวมที่ทำปฏิกิริยาและต้องใช้ซีเมนต์ที่มีอัลคาไลไม่เกินกำหนด

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางกายภาพตามมาตรฐาน ASTM C618

ข้อกำหนดทางกายภาพ	ชนิด		
	N	F	C
ความละเอียด			
- ปริมาณที่ค้ำแรงเบอร์ 325 ^A ร่อน โดยใช้น้ำ, สูงสุดร้อยละ	34	34	34
ดัชนีกำลัง เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์,			
- ที่อายุ 7 วัน อย่างต่ำร้อยละของส่วนผสมควบคุม	75 ^B	75 ^B	75 ^B
- ที่อายุ 28 วัน อย่างร้อยละของส่วนผสมควบคุม	75 ^B	75 ^B	75 ^B
- ความต้องการน้ำ, สูงสุดร้อยละของส่วนผสมควบคุม	115	115	115
ความคงตัว (soundness)^C			
- ขยายตัวหรือหดตัวของโทเคลฟ, สูงสุดร้อยละ	0.8	0.8	0.8
ข้อกำหนดด้านความสม่ำเสมอ^D			
- ความหนาแน่น, ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ	5	5	5
- ร้อยละที่ค้ำแรงเบอร์ 325 ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ	5	5	5

หมายเหตุ A ระวังไม่ให้มีผงละเอียดที่เกาะตัวกันเป็นก้อนค้ำบนแรง

B เป็นไปตามข้อกำหนดเมื่อดัชนีที่อายุ 7 หรือ 28 วัน เป็นไปตามข้อกำหนด

C ถ้ามีสารปอซโซลานผสมเกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์ในคอนกรีต ขึ้นส่วนสำหรับทดสอบการขยายตัวของโทเคลฟควรมีสารปอซโซลานผสมอยู่ร้อยละของสารซีเมนต์ตามนั้น

D ความหนาแน่น (density) และความละเอียดของตัวอย่างแต่ละอันต้องไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของสิบตัวอย่างที่ทดสอบก่อนหน้าหรือค่าเฉลี่ยของตัวอย่างก่อนหน้าทั้งหมด ถ้าทดสอบไม่ถึงสิบตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) ชนิด C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และจับบิโทมินัสเป็นส่วนใหญ่ที่มีปริมาณของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณ CaO สูง และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับ Al_2O_3 มาจากรีดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี Al_2O_3 ต่ำทำให้เถ้าลอยชนิด C นอกจากมี SiO_2 ต่ำแล้วยังมี Al_2O_3 ต่ำด้วย

ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดทางกายภาพเพิ่มเติมตามมาตรฐาน ASTM C618

ข้อกำหนดทางกายภาพเพิ่มเติม	ชนิด		
	N	F	C
แฟกเตอร์ผลคูณ (Multiple Factor) ที่กำลังแรงเบอร์ 325 เมื่อร่อนโดยใช้ น้ำ, สูงสุดร้อยละ		255	
การหดตัวแห้งที่ 28 วัน ของแท่งมอดอร์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับมอร์ต้าที่ควบคุม, สูงสุดร้อยละ	0.3	0.3	0.3
ข้อกำหนดด้านความสม่ำเสมอ เมื่อใช้สารกักกระจายอากาศ ปริมาณสารกักกระจายอากาศที่ทำให้มีปริมาณอากาศร้อยละ 18.0 จะไม่ต้องแตกต่างจากค่าเฉลี่ยของสิบตัวอย่างที่ทดสอบก่อนหน้านี้หรือค่าเฉลี่ยของตัวอย่างก่อนหน้านี้ทั้งหมด ถ้าทดสอบไม่ถึงสิบตัวอย่างไม่เกินร้อยละ	20	20	20
ประสิทธิภาพในการควบคุมปฏิกิริยาอัลคาไลมวลรวม การขยายตัวที่ 14 วันเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์ต่ำ, สูงสุดไม่เกินร้อยละ	100	100	100
ประสิทธิภาพในการช่วยต้านทานสารซัลเฟต วิธีที่ 1 การขยายตัวของส่วนผสมทดสอบ: - สภาวะซัลเฟตปานกลาง 6 เดือน, สูงสุดไม่เกินร้อยละ - สภาวะซัลเฟตสูง 6 เดือน, สูงสุดไม่เกินร้อยละ วิธีที่ 2 การขยายตัวของส่วนผสมทดสอบ: - เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่ทำจากปูนซีเมนต์ทนซัลเฟตในสภาวะ ซัลเฟต 6 เดือน, สูงสุดไม่เกินร้อยละ	0.1 0.05 100	0.1 0.05 100	0.1 0.05 100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เถ้าลอยทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานนอกจากนี้เถ้าลอยชนิด C ยังมีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเองเนื่องจากมีปริมาณ CaO สูง เถ้าลอยในแม่เมาะส่วนใหญ่เป็นเถ้าลอยที่มีแคลเซียมสูง โดยมีปริมาณ CaO สูงถึงร้อยละ 40 และมีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเอง ในปัจจุบันเถ้าลอยแม่เมาะมีปริมาณ CaO ต่ำลงมีเนื้อสารนี้อยู่ประมาณร้อยละ 10

2.1.5 องค์ประกอบและข้อกำหนดทางเคมี (ปริญญญา, 2547, น.23-25)

2.1.5.1 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน แต่โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลัก และ MgO , Na_2O , K_2O , SO_3 เป็นองค์ประกอบรอง ดังตารางที่ 2.5 นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้นและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LOI)

2.1.5.2 ความชื้นและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา

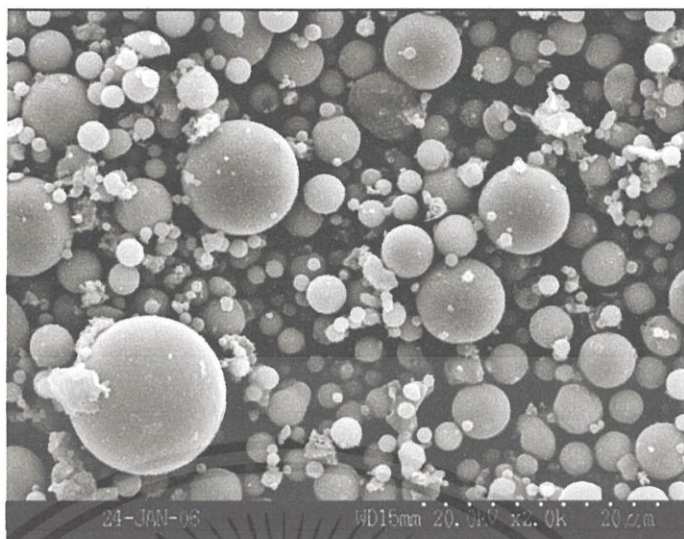
ความชื้นเนื่องจากการเผามีในปริมาณที่สูงจะทำให้คุณภาพของถ่านหินด้อยลง มาตรฐาน ASTM C311 กำหนดให้ทดสอบปริมาณความชื้น โดยการเผาน้ำหนักคงที่ที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส โดยการเผาตัวอย่างเดิมที่ใช้ทดสอบปริมาณความชื้นที่ 750 ± 50 องศาเซลเซียส โดยใช้ด้วยคินขาวเผา มาตรฐาน ASTM C618 ระบุปริมาณความชื้นให้ได้ไม่เกินร้อยละ 3

2.1.6 คุณสมบัติทางกายภาพ (ปริญญญา, 2547, น.24-27)

2.1.6.1 รูปร่างและลักษณะของผิวเถ้าถ่านหิน

เมื่อเถ้าถ่านหินบดละเอียดผ่านการเผาไหม้ถ่านหินจะสันดาปและหลอมละลายที่อุณหภูมิสูง เถ้าถ่านหินจะเริ่มเย็นลงหลังจากออกจากเตาเผาผลจากการที่หลอมละลายทำให้เถ้าลอยส่วนใหญ่มีลักษณะทรงกลมและอยู่ในสถานะแก้วเถ้าลอยส่วนหนึ่งเกิดจากปะทะกันของเถ้าลอยถ่านหินขนาดเล็กทำให้มีขนาดใหญ่อขึ้นแต่ขนาดยังคงไม่ใหญ่มากนักจึงสามารถลอยไปตามอากาศร้อนไปได้ ทั้งนี้เถ้าลอยขนาดใหญ่จะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวขรุขระมีรูเล็กๆ ที่ผิวเนื่องจากมีปริมาณของคาร์บอนสูง เถ้าลอยขนาดใหญ่จะผ่านการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าและจะมีทรงกลมผิวเรียบ ดังแสดงในรูป 2.3

เอกสารนี้เปิดเผยแก่สาธารณชนโดยไม่เสียค่าใช้จ่ายจากศูนย์ข้อมูลความรู้เพื่อประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 รูปร่างและลักษณะของผิวแคลอย

(ที่มา: www.caer.uky.edu)

แคลอยยังประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีโพรงข้างในที่เรียกกันว่าซีโนสเฟียซึ่งเกิดจากการที่ก๊าซจากการเผาไหม้ของถ่านหินถูกกักไว้ภายในแคลอยและยังมีแคลอยกลวงที่มีอนุภาคถ่านหินเล็กๆ อยู่ภายใน เรียกว่าพลิโรสเฟีย แคลอยมีตั้งแต่ขนาดไม่กี่ไมครอนจนถึงหลายร้อยไมครอนองค์ประกอบของแคลอยกลวงคือแก้วอูมิโนซิลิกาเกิดเนื่องจากแคลอยกลวงผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติด้านการทนไฟและมีน้ำหนักเบาจึงได้มีการศึกษาเพื่อนำแคลอยมาใช้ประโยชน์ในด้านคอนกรีตน้ำหนักเบาและคอนกรีตที่มีคุณสมบัติเก็บเสียง

ถ่านหินที่ได้จากการเผาในระบบฟลูอิดไดซ์เบดมีรูปร่างไม่แน่นอนและผิวขรุขระเนื่องจากอุณหภูมิในการเผาสูงไม่เพียงพอถ่านหินบดละเอียดจะเกิดการหลอมละลายเพียงบางส่วนส่วนถ่านหินที่เหลือเกิดจากการปะทะกันของอนุภาคถ่านหินจึงมีรูปร่างไม่แน่นอนและผิวขรุขระเช่นกัน

2.1.6.2 ขนาดและความละเอียด

อนุภาคแคลอยมีตั้งแต่เล็ก 1 ไมครอนจนถึง 200 ไมครอนโดยเฉลี่ยมีประมาณ 15-30

ไมครอน แคลอยแม่เมาะมีขนาดและความละเอียดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความละเอียดของถ่านหินนิยมคำนวณมาจากโดยใช้การวัดพื้นที่ผิว โดยแคลอยส่วนใหญ่จะมีพื้นที่ผิวระหว่าง 2500-5000

cm²/g เมื่อวัดวิธีของเบลม ความละเอียดจะอยู่ในช่วงระหว่าง 2500-3500 cm²/g เมื่อวัดโดยวิธี BET ซึ่งเป็นการวัดการบำบัดของก๊าซความละเอียดของถ้ำลอยเมื่อวัดด้วยวิธีนี้จะได้อัตราที่แตกต่างกันมาก เนื่องจากวิธีการนี้วัดพื้นที่ผิวได้ทั้งหมดที่ก๊าซสามารถเข้าถึงได้ทั้งผิวที่ขรุขระเป็นรูพรุนและที่เป็นโพรง ค่าที่วัดได้จะอยู่ระหว่าง 5000-8900 cm²/g โดยค่าเฉลี่ยประมาณ 3500 cm²/g

2.1.6.3 ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะของถ้ำลอยสามารถวัดได้โดยการทดสอบทดสอบเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน ASTM C618 ถ้ำลอยมีความถ่วงจำเพาะ ประมาณ 1.9-2.9 ซึ่งต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความถ่วงจำเพาะของถ้ำลอยที่สูงส่วนใหญ่มาจากการที่ถ้ำหินมีธาตุเหล็กและ CaO ผสมอยู่มาก ถ้ำลอยแม่เมาะในยุคปี 2555-2556 จะมีความถ่วงจำเพาะสูงประมาณ 2.8-2.9 และมี Fe₂O₃ อยู่สูง 19% และ CaO อยู่ร้อยละ 40 ความถ่วงจำเพาะของถ้ำลอยแม่เมาะในปัจจุบันมีค่าต่ำประมาณ 2-2.2 นอกจากนี้ยังพบความถ่วงจำเพาะของถ้ำลอยที่ได้จากการเผาครั้งเดียวกันยังขึ้นอยู่กับความละเอียด ถ้ำลอยส่วนละเอียดจะมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าถ้ำลอยส่วนที่หยาบถ้ำลอยแม่เมาะส่วนที่ละเอียดมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.44 และส่วนที่หยาบมีความถ่วงจำเพาะ ประมาณ 1.88 เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากถ้ำลอยหยาบจะมีผิวขรุขระเป็นโพรงและยังมีถ้ำลอยกลวงผสมอยู่มากกว่าถ้ำลอยละเอียด

2.1.6.4 ดัชนีการพัฒนากำลัง

การวัดความเป็นปอซโซลานของถ้ำลอยสามารถทำได้หลายวิธีมาตรฐาน ASTM C618 ให้การวัดการพัฒนากำลัง มาตรฐาน ASTM C618 ให้ทดสอบกำลังรับแรงที่อายุ 7 หรือ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C618 มอร์ต้าจะควบคุมทำจากการผสมปูนสปอร์ตแลนด์ 500 g ทรายมาตรฐานขนาดขนาดและน้ำ 242 mL และมอร์ต้าที่ใช้ทดสอบถ้ำลอย 100 g ปูนซีเมนต์สปอร์ตแลนด์ 400 g ทรายมาตรฐานขนาดขนาดมาตรฐาน 1375 g และน้ำที่ไหลผ่านเท่ากับ ± 5% มาตรฐาน ASTM C618 ระบุดัชนีการพัฒนากำลังที่อายุ 7 หรือ 28 วัน ของส่วนผสมทดสอบอย่างต่ำ 75% ของส่วนผสมควบคุม ความเป็นสารปอซโซลานของถ้ำลอยขึ้นอยู่กับความละเอียดของถ้ำลอยและปริมาณแก้วในถ้ำลอย ในการทดสอบถ้ำลอยแม่เมาะที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 3, 9, 21 ไมครอนและมีปริมาณแก้ว 325 เท่ากับ 0.1%, 10% พบว่าค่าการพัฒนากำลังที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 120%, 103% และ 97% ตามลำดับ

2.1.6.5 ความต้องการน้ำ

มาตรฐาน ASTM C618 ระบุความต้องการน้ำของส่วนผสมที่มีเถ้าลอยสูงสุดเท่ากับ 105% ของส่วนผสมควบคุม โดยมาตรฐาน ASTM C618 ให้ใช้สำหรับส่วนผสมเดียวกับดัชนีการพัฒนา กำลัง เถ้าลอยมีอนุภาคทรงกลมส่วนใหญ่ทำให้การผสมมีการลื่นไหลดีขึ้น ดังนั้นส่วนผสมที่มีเถ้าลอยจะมีความต้องการน้ำต่ำกว่าส่วนผสมควบคุม การที่ส่วนผสมมีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นแสดงว่าเถ้าลอยมีรูปร่างไม่กลม

2.1.6.6 ความไม่คงตัว

ความไม่คงตัวส่วนใหญ่เกิดจากปูนขาวอิสระและแมกนีเซียมออกไซด์อิสระรวมตัวกับน้ำอย่างช้าๆ ซึ่งเกิดขึ้นหลังจากที่ซีเมนต์ก่อตัวแล้ว การรวมตัวดังกล่าวจะทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีปริมาณมากขึ้น ถ้ามีมากพอจะทำให้ซีเมนต์ที่ก่อตัวแล้วขยายแตกร้าวได้ มาตรฐาน ASTM C618 ไม่ระบุปริมาณสูงสุดของสารประกอบที่ทำให้เกิดปัญหา แต่ระบุให้ทดสอบให้ทดสอบทางกายภาพโดยใช้วิธีอโตเคลฟ ตามมาตรฐาน ASTM C618 โดยใช้เพลสที่ประกอบไปด้วยเถ้าลอย 25 ส่วนและปูนซีเมนต์สปอร์แลนด์ 100 ส่วน มาตรฐาน ASTM C618 ระบุการขยายและการหดตัวของอโตเคลฟไว้สูงสุดร้อยละ 0.8

2.1.6.7 ความสม่ำเสมอ

ในเรื่องความสม่ำเสมอของเถ้าลอย มาตรฐาน ASTM C618 ได้กำหนดให้ตรวจสอบ 2 ส่วนความหนาแน่นและปริมาณร้อยละที่ค้ำแรงเบอร์ 325 มาตรฐาน ASTM C311 ให้ทดสอบความหนาแน่นของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C188 ให้ใช้เถ้าลอย 50 กรัม มาตรฐาน ASTM C618 ทั้งนี้ความหนาแน่นของตัวอย่างแต่ละตัวต้องไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยต้องไม่เกินร้อยละ 5

2.1.6.8 แฟกเตอร์ผลคูณ

นอกจากระบุจำนวนเถ้าลอยที่ค้ำแรงเบอร์ 325 ไม่เกิน 34% มาตรฐาน ASTM C618 ยังเปิดโอกาสให้สามารถระบุแฟกเตอร์ผลคูณ ซึ่งเป็นผลคูณระหว่างปริมาณค้ำแรงเบอร์ 325 กับค่า LOI ผลคูณดังกล่าวใช้กับเถ้าลอยชนิด F เท่านั้นเพราะเถ้าลอยชนิด C มีปริมาณ LOI สูงสุดไม่เกินร้อยละ 6 ซึ่งในกรณีดังกล่าวจำนวนเถ้าลอยที่ค้ำบนแรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 เป็นตัวกำหนดหลัก สำหรับเถ้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดยชนิด F กรณีที่มี LOI ในช่วงระหว่างร้อยละ 8-12 การระบุแฟลคเตอร์ผลคูณเท่ากับ 255 ตามมาตรฐาน เป็นการให้ใช้ค่าลดยที่ละเอียดเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าลดยที่ค้างบนแรงเบอร์ 325 ต้องลดลงจากร้อยละ 34 จึงทำให้แฟลคเตอร์ผลคูณต่ำกว่า 255

2.1.6.9 ประสิทธิภาพในการคุมปฏิกิริยาอัลคาไลน์-มวลรวม

การใส่สารปอซโซลานทดแทนปูนซีเมนต์จะช่วยลดปฏิกิริยาอัลคาไลน์มวลรวมได้นอกจากการระบุปริมาณอัลคาไลน์ในค่าลดย มาตรฐาน ASTM C618 ยังระบุข้อกำหนดทางกายภาพเพิ่มเติมเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการควบคุมปฏิกิริยาระหว่างอัลคาไลกับมวลรวมมาตรฐาน มาตรฐาน ASTM C311 ให้ทดสอบตาม มาตรฐาน ASTM C441 แต่ให้ใช้ปูนซีเมนต์ที่มีอัลคาไลน์เมื่อคิดว่าเป็นปริมาณเทียบเท่ากับ ส่วนผสมควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์อัลคาไลต่ำ

2.1.6.10 ประสิทธิภาพในการเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารซัลเฟต

การใส่สารปอซโซลานสามารถช่วยเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต มาตรฐาน ASTM C618 ระบุให้ทดสอบได้ 2 วิธี การทดสอบทำตาม ASTM C1012 โดยตัดแปลงส่วน ส่วนผสมตามที่ระบุใน ASTM C311

ก) วิธีที่ 1 การทดสอบการขยายตัวของส่วนผสม

วิธีนี้เป็นการวัดการขยายตัวของส่วนผสม มาตรฐาน ASTM C311 ระบุให้ทำการทดสอบ ASTM C1012 โดยใช้ค่าลดย 15 - 50% ของซีเมนต์มาตรฐาน ASTM C618 ระบุการขยายตัวที่เวลา 6 เดือนต้องไม่เกินร้อยละ 0.1 สำหรับสภาวะซัลเฟตปานกลางและถ้าเป็นสภาวะซัลเฟตรุนแรง การขยายตัว 6 เดือนต้องไม่เกินร้อยละ 0.05

ข) วิธีที่ 2 การทดสอบการขยายตัวของส่วนผสมเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุม

วิธีการนี้เป็นการเปรียบเทียบมาตรฐาน ASTM C311 ระบุให้ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1012 โดยใช้ค่าลดย 15 - 50% ของซีเมนต์สำหรับส่วนผสมทดสอบและส่วนผสมควบคุมให้ใช้ปูนซีเมนต์เหมาะสมกับสภาวะซัลเฟต โดยอาจเลือกใช้ปูนซีเมนต์สปอร์ตแลนด์ประเภท 5 สำหรับสภาวะรุนแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.7 การวัดความเป็นปอซโซลานโดยวิธีอื่น (ปริญา, 2547, น.28)

การวัดความเป็นปอซโซลานเป็นการวัดความสามารถการทำปฏิกิริยาของสารปอซโซลานและสามารถทำได้หลายวิธี มาตรฐาน ASTM C618 ให้ใช้การวัดค่าดัชนีการพัฒนากำลังซึ่งเป็นวิธีทางกล นอกจากนี้ยังมีวิธีทางเคมีและวิธีทางกายภาพ

2.1.7.1 วิธีทางเคมี

วิธีที่ 1 การวัดปริมาณของ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ที่ละลายในกรดหรือด่างเป็นการวัดความสามารถการทำปฏิกิริยาของ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ซึ่งเป็นตัวกำหนดความเป็นสารปอซโซลาน

วิธีที่ 2 วัดปริมาณไอออนของแคลเซียมที่ลดลงเมื่อผสมสารปอซโซลานกับน้ำปูนขาวอิมตัววิธีนี้วัดความสามารถในการทำปฏิกิริยาของเถ้าลอยกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์

วิธีที่ 3 วัดความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อผสมสารปอซโซลานกับกรดไฮโดรฟลูออริกหรือกรดไฮโดรฟลูออริกผสมกรดไนตริกความร้อนที่เกิดขึ้นแสดงถึงปริมาณและความสามารถในการทำปฏิกิริยากับเถ้าลอย วิธีทางกายภาพเป็นการใช้ XRD ปริมาณการลดลงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมมีความสัมพันธ์โดยตรงกับทำปฏิกิริยาของสารปอซโซลานและกำลังรับแรง

2.1.8 การเก็บตัวอย่างเถ้าลอย

เพื่อให้ได้เถ้าลอยที่มีคุณภาพดีสม่ำเสมอจึงต้องมีการเก็บตัวอย่างเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติ มาตรฐาน ASTM C311 ให้เก็บตัวอย่างเถ้าลอยที่ได้จากการเก็บเป็นจำนวนมากหรือจากถุงหรือจากสายพราวน โดยแบ่งการเก็บตัวอย่างเป็น 2 แบบ คือ แบบธรรมดาและแบบผสม

1. ตัวอย่างแบบธรรมดา เป็นตัวอย่างที่ได้จากการรวมตัวอย่างที่เก็บตามช่วงเวลาหรือตามจุดต่าง ๆ จากเถ้าลอยในปริมาณเท่ากันมาตรฐานให้เก็บแต่ละครั้งไม่น้อยกว่า 2 กิโลกรัม
2. ตัวอย่างแบบผสม เป็นตัวอย่างที่รวมจากตัวอย่างแบบธรรมดาเท่ากัน มาตรฐานให้เก็บแต่ละครั้งไม่น้อยกว่า 4 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 โลหะหนักแคดเมียม (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

2.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี

แคดเมียมเป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่ม IIb ของตารางพีริออดิก (periodic table of elements) มีเลขอะตอม (atomic number) 48 น้ำหนักอะตอม (atomic weight) 112.40 ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) 8.65 จุดหลอมละลาย (melting point) 320.9 องศาเซลเซียส จุดเดือด (boiling point) 767 องศาเซลเซียส มีสีเงินแกมขาว น้ำหนักเบา อ่อน ดัดงอได้ง่าย ทนต่อการกัดกร่อน และเป็นธาตุที่ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ในกรดอ่อน เช่น กรดไนตริก แคดเมียมตามแหล่งน้ำในธรรมชาติ มีอยู่ด้วยกันหลายรูป เช่น รูปของ divalency cadmium ion สารประกอบของโลหะอินทรีย์ หรือโลหะอินทรีย์ โดยปัจจัยที่ทำให้แคดเมียมมีหลายรูป ได้แก่ พีเอช อ่อนอื่นๆ ที่อยู่ในน้ำ และปริมาณสารอินทรีย์ แต่ในการศึกษาการดูดซับแคดเมียมนี้ ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของแคดเมียม คือ ค่า pH ของสารละลาย เมื่อค่า pH ของสารละลายเปลี่ยนแปลง โลหะหนักแคดเมียมก็จะเปลี่ยนรูปตาม เกิดเป็นรูป Cd^{2+} , $Cd(OH)^+$, $Cd(OH)_2$ และ $Cd(OH)_3$ โดยแคดเมียมที่ต้องการดูดซับอยู่ในรูป Cd^{2+} (pH อยู่ในช่วง 0-11) แต่ในช่วงที่ pH ประมาณ 8 แคดเมียมจะเริ่มตกตะกอนเป็น $Cd(OH)_2$ ในการทดลองจึงต้องควบคุมค่า pH ของสารละลายให้อยู่ระหว่าง 0-8

2.2.2 แหล่งที่พบ

แคดเมียมเป็นแร่ที่พบกระจายปนกับแร่ชนิดอื่นในธรรมชาติ ไม่ได้เป็นแร่ที่แยกเป็นอิสระและมักพบปนอยู่กับแร่สังกะสีในปริมาณร้อยละ 0.1 - 5 ซึ่งปริมาณแคดเมียมจะมีมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับปริมาณสังกะสีในแร่ กล่าวคือ ถ้าในแร่มีปริมาณสังกะสีสูงปริมาณแคดเมียมจะสูงตามไปด้วย ซึ่งอัตราส่วนระหว่างแคดเมียมและสังกะสีในแร่จะมีค่าตั้งแต่ 1:350 จนถึง 1:100 สำหรับแร่สังกะสีในประเทศไทยที่ขุดได้ในจังหวัดตาก มีปริมาณแคดเมียม ประกอบอยู่ร้อยละ 0.23 - 0.38 นอกจากนี้จะพบแร่แคดเมียมปนอยู่ในแร่สังกะสีแล้ว ยังพบอยู่ในแร่ตะกั่ว และทองแดงแต่พบในปริมาณน้อยกว่า

2.2.3 การนำไปใช้ประโยชน์ (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

โลหะแคดเมียมได้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ดังนี้

ก. ใช้ผสมกับโลหะชนิดอื่นเป็นโลหะผสม (alloy) เพื่อเพิ่มความเหนียวและการสึกกร่อน เช่น

1. Alloy ของทองแดงที่มีแคดเมียมร้อยละ 1 (Cadmium bronze) ใช้ในการผลิตเส้นลวดโทรเลขและโทรศัพท์
2. Alloy ของทองแดงและตะกั่วซึ่งมีแคดเมียมผสมอยู่ร้อยละ 20 ใช้ในการผลิตแบบพิมพ์ (printing plates)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Alloy ของทองแดง แคดเมียม และเซอร์โคเนียม ใช้ในอุปกรณ์การสื่อสารต่างๆ ที่มี Voltage สูงๆ ทั้งนี้ เพราะโลหะผสมประเภทนี้ จะมีความแข็ง และมีแรงดึงได้สูงกว่าโลหะผสมของทองแดงกับแคดเมียม
4. ใช้ผสมกับโลหะผสมอื่นในกิจการเครื่องประดับ เช่น ผสมกับโลหะอื่นชนิดเดียว (ผสมทอง) ผสมกับโลหะอื่น 2 ชนิด (ทองร้อยละ 75 เงินร้อยละ 16.6) ผสมกับโลหะอื่น 3 ชนิด (ทองแดง เงินและทอง)
5. ใช้แคดเมียมที่มีความบริสุทธิ์สูง ในการผสมกับโลหะอื่นให้มีคุณสมบัติกึ่งตัวนำ (semiconductor) เช่น cadmium arsenide, cadmium antimonide และ cadmium telluride

ข. ใช้เป็นวัสดุป้องกันการกัดกร่อนในอุตสาหกรรมชุบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยแผ่นเหล็กทองแดง อลูมิเนียม ที่ได้จากการชุบนำ ไปใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องบิน รถยนต์ อุปกรณ์ไฟฟ้า และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ค. ใช้เป็นเม็ดสีในอุตสาหกรรมเซรามิก ยาง แก้ว เส้นใย หมึกพิมพ์ พลาสติกและผ้า เช่น แคดเมียมออกไซด์ (CdO) ทำให้เซรามิกเป็นเงามัน และแคดเมียมคลอไรด์ (CdCl₂) ทำหมึกพิมพ์สี

ง. ใช้ในการผลิตแบตเตอรี่ร่วมกับโลหะนิกเกิลเป็น Cadmium-nickel battery ซึ่งนำมาใช้เป็นแบตเตอรี่ในเครื่องคิดเลข แฟลชถ่ายรูป เครื่องโกนหนวด เป็นต้น

จ. ใช้ในกิจการอื่นๆ เช่น ใช้ผสมในสารฆ่าเชื้อรา (Fungicides) ใช้ในเตาปฏิกรณ์ปรมาณู เป็นตัวควบคุมอัตราการแตกตัวของนิวเคลียส และใช้ในการผลิตหลอดฟลูออเรสเซนต์

2.2.4 ความเป็นพิษของแคดเมียม (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

แคดเมียมเป็นโลหะหนักที่มีความเป็นพิษร้ายแรง เป็นหนึ่งใน "สามผู้ยิ่งใหญ่" ร่วมกับปรอทและตะกั่ว ที่ร่างกายได้รับในปริมาณเพียงเล็กน้อย ก็สามารถเป็นอันตรายได้ ดังเช่นเหตุการณ์ระบาคของพิษแคดเมียมที่เมืองโตยามา ทางตอนเหนือของประเทศญี่ปุ่น ปี พ.ศ. 2463(ค.ศ. 1920) ผู้ที่ได้รับพิษของแคดเมียม จะเจ็บปวดและทรมาณ เพราะแคดเมียมทำให้กระดูกและไตพิการ ความดันโลหิตสูง ส่วนมากเป็นเอกสารนี้ในเทศาณญ์ที่ โดยเลพาะหญังตั้งครรรัก จะมีอากาศปรวดสะโปก แขนงและขา บริเวณพื้นที่ติดกับหญังอกมีสีไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

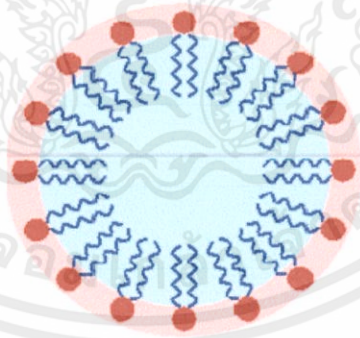
เหลือง เรียกว่า " วงแหวนแคดเมียม " กระจกเริ่มปวกร้าว เจ็บคล้ายมีวัตถุแหลมทิ่ม แคดเซียมจะละลายออกจากกระจก ระยะสุดท้าย กระจกจะกร่อนผุ เปราะง่าย น้ำหนักลด อ่อนเพลีย หมดแรงและเสียชีวิตในที่สุด สาเหตุของโรคมายังมาจากโรงงานถลุงแร่สังกะสีแห่งหนึ่ง ที่อยู่บริเวณต้นน้ำของแม่น้ำจินซู โรงงานผลิตแร่ ทองแดง ตะกั่วและสังกะสี ได้ทิ้งกากแร่ซึ่งมีแคดเมียมและโลหะอื่นๆปน น้ำเสียจากโรงงานได้ปะปนกับน้ำ ธรรมชาติเข้าสู่ไร่นา และสวนพืชผักต่างๆ แคดเมียมจะถูกดูดซึมเข้าสู่ต้นพืช ดังนั้นเมล็ดข้าวและอาหารจึง เป็นสื่อพาแคดเมียม เข้าสู่ร่างกาย ในขณะที่เกิดการระบาดของโรคนั้น พบว่าข้าวและน้ำมันถั่วเหลืองมี แคดเมียมเจือปนอยู่ 0.4 - 3.36 ส่วนต่อล้านส่วน เช่นเดียวกับในประเทศอเมริกามีผู้ล้มป่วยเนื่องจากได้รับพิษ แคดเมียมจากการดื่มน้ำมะนาวในภาชนะที่ฉาบด้วยแคดเมียม ความเป็นกรดของมะนาวสามารถละลาย แคดเมียมออกจากภาชนะจนทำให้น้ำมะนาว มีแคดเมียมปนอยู่ 100 - 250 ส่วนในล้านส่วนแคดเมียมเข้าสู่ ร่างกายได้ 3 ทางด้วยกัน คือ ทางปาก ทางจมูก และทางผิวหนัง โดยความเป็นพิษของแคดเมียมจะขึ้นอยู่กับ ปริมาณที่ร่างกายได้รับ มีอาการเฉียบพลันอย่างอ่อน คือ คอแห้งระคายคอ แน่นหน้าอก ปวดศีรษะ เมื่อได้รับ มากขึ้น จะหายใจไม่ออก อาเจียน ท้องร่วง และอาจตายได้ และความเป็นพิษแบบเรื้อรัง ทำให้ผู้ได้รับพิษ ทรมาณมาก เนื่องจากกระดูกและไตพิการ เมื่อแคดเมียมเข้าสู่ร่างกาย จะก่อให้เกิดอันตรายต่อระบบต่างๆใน ร่างกาย คือ

- เอนไซม์ แคดเมียม ไปแทนที่สังกะสีในเอนไซม์ ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถทำงานได้ปกติ
- ไต เป็นอวัยวะที่ได้รับอันตรายจากพิษของแคดเมียมอย่างรุนแรง โดยแคดเมียมจะรวมตัวกับ โปรตีนของเซลล์ ภายในไต ที่มีกลุ่มซัลไฮดริล (- SH) ทำให้หน่วยกรองและหลอดไต ที่ทำหน้าที่ กรองสารและดูดซึมสารกลับเข้าสู่ไตเสียหายและขาดการควบคุม เป็นสาเหตุทำให้เกิดการสูญเสีย โปรตีน กลูโคส และกรดอมิโน ออกมากับปัสสาวะ ผลที่ตามมาคือ ความดันโลหิตสูงซึ่ง กล้ามเนื้อจะขยายใหญ่ขึ้น เส้นเลือดแดงฝอยแข็งตัว และหัวใจวาย
- กระจก ทำให้กระจกเปราะ เนื่องจากแคดเซียมละลายออกมาจากกระจก
- ปอด ตับ หัวใจ และอวัยวะอื่นๆ เกิดอาการบวม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การสูดหายใจเอาแคดเมียมเข้าสู่ ปอดจะทำให้เกิดอันตรายต่อเนื้อเยื่อปอดอย่างรุนแรงจนอาจมีผลทำให้ถุงลมในปอดอุดตันลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) (กาญจนา, 2544)

สารลดแรงตึงผิวมีบทบาทที่สำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์ในแต่ละวันมนุษย์ใช้สารลดแรงตึงผิวแทบทุกกิจกรรม เช่น การทำความสะอาดร่างกายและของใช้ การใช้เครื่องสำอาง การย่อยอาหาร กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม เป็นต้น นอกจากนี้สารลดแรงตึงผิวก็มีบทบาทที่สำคัญในการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อม เช่น ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ในการกำจัดคราบน้ำมันและสิ่งสกปรก ในการกำจัดสารแขวนลอยหรือคอลลอยด์ในน้ำ การเลือกประเภทของสารลดแรงตึงผิว ปริมาณหรือความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว รวมถึงสภาวะอื่นๆให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ของการใช้งานต่างๆเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง ทั้งนี้เพื่อให้สารลดแรงตึงผิวทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดและไม่สร้างปัญหาเพิ่มให้กับสิ่งแวดล้อม สารลดแรงตึงผิวส่วนใหญ่จะสามารถย่อยสลายได้โดยธรรมชาติ ทั้งนี้ความสามารถในการถูกย่อยสลายจะขึ้นกับโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว รวมทั้งปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่เหลืออยู่จากการใช้ การใช้สารลดแรงตึงผิวในปริมาณที่เหมาะสม นอกจากจะช่วยลดต้นทุนการบำบัดแล้วยังมีส่วนช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม ในน้ำดื่มปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่สามารถเจือปนได้โดยไม่ก่อให้เกิดอันตรายเท่ากับ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร การศึกษาและการพัฒนาการนำสารลดแรงตึงผิวมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ให้มากขึ้น โดยเฉพาะทางด้านสิ่งแวดล้อมจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจอย่างยิ่ง



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว

(ที่มา: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Micelle.png>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 คุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิว (วิชาฯ, 2548)

สารลดแรงตึงผิว หรือ Surface Active Agent มีชื่อเรียกโดยทั่วไป ทางวิทยาศาสตร์ว่า “Surfactant” สารลดแรงตึงผิวเดิมทีเดิยมาจากภาษาเยอรมันว่า Tensid ซึ่งตั้งโดยนักเคมีชาวเยอรมันในปี ค.ศ. 1960 สารลดแรงตึงผิวส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอินทรีย์ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic group) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic group) ดังแสดงในภาพที่ 2.6 ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ มักจะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน คือมีธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนใหญ่จะมาจากไขมันและน้ำมันตามธรรมชาติ รวมทั้งผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม และ โพลีเมอร์สังเคราะห์ ลักษณะที่สำคัญของสารลดแรงตึงผิวคือเมื่อใส่สารลดแรงตึงผิวเพียงเล็กน้อยลงในน้ำ สารลดแรงตึงผิวจะไปลดแรงตึงผิวของน้ำเพื่อให้เกิดกระบวนการต่างๆ ง่ายขึ้น เช่น การเกิดฟอง การทำให้เปียก และกระบวนการทำความสะอาด เป็นต้น ส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะพยายามหนีน้ำโดยไปเกาะกับพื้นผิวที่ว่าง เช่น อากาศ ส่วนที่ชอบน้ำจะยังคงอยู่ในน้ำซึ่งแสดงในภาพที่ 2.6 สารลดแรงตึงผิวสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภทซึ่งแบ่งตามลักษณะหรือประจุของส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic group) ได้แก่

1. สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (Cationic surfactant) ได้แก่ Cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB) ซึ่งมีสูตร โมเลกุล คือ $C_{16}H_{33}N(CH_3)_3^+ Br^-$ สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวกมักพบในผลิตภัณฑ์ เช่น ยาสีฟัน ครีมนวดผม น้ำยาปรับผ้านุ่ม เป็นต้น
2. สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (Anionic surfactant) ได้แก่ Sodium dodecyl sulphate (SDS) ซึ่งมีสูตร โมเลกุล คือ $CH_3(CH_2)_{11}SO_4 Na^+$ มักจะเป็นส่วนประกอบในผงซักฟอกและสบู่ เป็นต้น
3. สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant) ได้แก่ Polyoxyethylene alcohol ซึ่งมีสูตร โมเลกุล คือ $(C_nH_{2n+1}(OCH_2CH_2)_m OH)$ สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุนี้นักจะนำไปผสมในสบู่เหลวสำหรับล้างหน้า
4. สารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบ (Zwitterionic surfactant) ได้แก่ b-N-Alkylaminopropionic Acids มีสูตร โมเลกุล คือ $RN^+H_2CH_2CH_2COO^-$ ซึ่งเป็นส่วนประกอบใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการขงนึ่งเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารลดแรงตึงผิวยังมีคุณสมบัติที่ทำให้เฟสสองเฟสที่ต่างกันมารวมตัวกันได้ คำว่าอยู่คนละเฟส คือ การไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน น้ำและน้ำมันไม่ละลายซึ่งกันและกันเพราะมีคุณสมบัติที่ต่างกัน โดยที่น้ำเป็นสารประกอบที่มีขั้ว ส่วนน้ำมันเป็นสารประกอบที่ไม่มีขั้ว เมื่อใส่สารลดแรงตึงผิวเข้าไปเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้สองเฟสมารวมกันเป็นเฟสเดียวกันได้ ตัวอย่างเช่น การใส่ไข่แดงซึ่งมี lecithin เป็นสารลดแรงตึงผิวประกอบอยู่ประมาณ 10% ลงไปในน้ำที่ผสมน้ำมันเพื่อทำน้ำสลัด ทำให้น้ำและน้ำมันรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบความสามารถของสารลดแรงตึงผิวทั้ง 4 ชนิด ในการทำให้เกิดฟอง การซักล้าง และการทำให้พื้นผิวเกิดความอ่อน

ประเภท / คุณสมบัติ สารลดแรงตึงผิว	การเกิดฟอง	ความสามารถในการซัก ล้าง	ความสามารถในการทำ ให้อ่อนนุ่ม
ประจุลบ	ดีที่สุด	ค่อนข้างดี	ไม่แน่นอน
ไม่มีประจุ	ดี	ดี	ดี
ประจุบวก	ไม่ดี	ปานกลาง	ไม่ดี
ประจุบวกและลบ	ค่อนข้างดี	ดี	ดีที่สุด

จาก ตารางที่ 2.5 แสดงการเปรียบเทียบสารลดแรงตึงผิวทั้ง 4 ชนิด ในการทำให้เกิดฟอง ความสามารถในการซักล้าง และการทำให้พื้นผิวอ่อนนุ่ม จะเห็นว่าสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบจะมีคุณสมบัติทำให้เกิดฟองดีที่สุด ส่วนสารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งประจุบวกและลบจะมีคุณสมบัติในการทำให้พื้นผิวอ่อนนุ่มดีที่สุด สารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิดมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ในปัจจุบันได้มีการนำสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิดมาผสมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การนำสารลดแรงตึงผิวไปใช้ประโยชน์ (วิชาฯ, 2548)

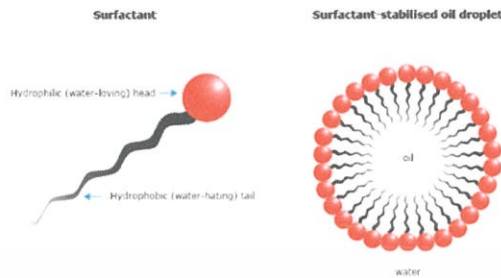
สารลดแรงตึงผิวมีบทบาทที่สำคัญอย่างยิ่งในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ในร่างกายมนุษย์ก็มีสารลดแรงตึงผิวประกอบอยู่ เช่น Gall Acid ซึ่งจะย่อยสารประเภทไขมันได้ สารลดแรงตึงผิวมีประโยชน์หลายด้าน โดยเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของผลิตภัณฑ์ต่างๆ และเป็นส่วนสำคัญในกระบวนการผลิตต่างๆ ได้แก่

1. สารลดแรงตึงผิวเป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด เช่น ผงซักฟอก ยาสีฟัน สบู่ ยาสระผม ครีมนวดผม และผลิตภัณฑ์ที่มีฟอง เป็นต้น
2. สารลดแรงตึงผิวเป็นส่วนประกอบในเครื่องสำอางและครีมกันแดด
3. สารลดแรงตึงผิวถูกนำมาใช้ในทางการแพทย์ ผลิตยา
4. สารลดแรงตึงผิว ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรม เช่น กระบวนการย้อมผ้า การเคลือบสีไม้ หรือโลหะ การผลิตพลาสติก การทำหนังสือ การผลิตเนยเทียม แก้วและไอศกรีม เป็นต้น
5. สารลดแรงตึงผิวถูกนำมาใช้ในการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อม เช่น บำบัดน้ำเสีย กำจัดมลพิษอื่นๆ
6. สารลดแรงตึงผิวถูกนำมาใช้ในกระบวนการสกัดแยก เช่น การสกัดแยกแร่ การแยกน้ำมันออกจากน้ำ

ตัวอย่าง โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวแสดงภาพที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบซึ่งมีสูตรโมเลกุล คือ $C_{12}H_{25}SO_4Na^+$ ภาพที่ 2.6 เป็นการแสดงโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวทั่วไปซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่ชอบน้ำและส่วนที่ไม่ชอบน้ำซึ่งสามารถเปรียบเทียบโครงสร้างได้กับภาพที่ 2.5 โดยที่ส่วนที่ไม่ชอบน้ำคือ $C_{12}H_{25}$ และส่วนที่ชอบน้ำ คือ SO_4^-



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษา **รูปที่ 2.5** โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวประจุลบไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น (ที่มา: <http://www.rsc.org/learn-chemistry/resources/chemistry-in-your-cupboard/vanish/9>)



รูปที่ 2.6 ส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำของสารลดแรงตึงผิว

(ที่มา: <http://www.sciencelearn.org.nz/Science-Stories/Where-Land-Meets-Sea/Sci-Media/Images/Surfactants>)

2.3.3 การย่อยสลายของสารลดแรงตึงผิว

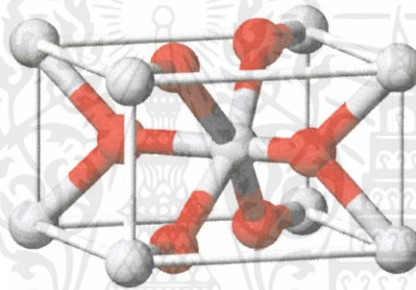
การย่อยสลายโดยธรรมชาติ คือ ความสามารถของแบคทีเรียในการเปลี่ยนโมเลกุลของสารจากขนาดใหญ่ให้เป็นขนาดเล็ก การย่อยสลายของสารลดแรงตึงผิวแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ

- 1) การย่อยสลายขั้นต้น ซึ่งทำให้สารลดแรงตึงผิวมีคุณสมบัติบางอย่างหายไป เช่น ความสามารถในการทำให้เกิดฟองหมดไป
- 2) การย่อยสลายขั้นสุดท้าย ซึ่งจะเกิดการย่อยสลายแบบสมบูรณ์ แบคทีเรียจะเปลี่ยนโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ สำหรับระยะเวลาของการย่อยสลายสารลดแรงตึงผิว จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว สารลดแรงตึงผิวที่มีโมเลกุลเป็นกิ่งก้านจะย่อยสลายได้ช้ากว่าประเภทที่มีโมเลกุลเป็นเส้นตรง โดยทั่วไปสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการทำ ความสะอาดจะสามารถถูกย่อยสลายได้โดยแบคทีเรีย

นอกจากสารลดแรงตึงผิวจะมีบทบาทในชีวิตประจำวันแล้ว เช่น ในกระบวนการทำความสะอาด สารลดแรงตึงผิวยังมีบทบาทที่สำคัญและนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ มากมาย รวมทั้งทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย อย่างไรก็ตามการนำสารลดแรงตึงผิวไปใช้ประโยชน์นั้นจะต้องพิจารณาอย่างรอบคอบ ทั้งนี้เพราะสารลดแรงตึงผิวก็สามารถทำลายสิ่งแวดล้อมได้เช่นกันถ้ามีการใช้ในปริมาณที่ไม่ถูกต้องและมีนำสารลดแรงตึงผิวผิดประเภทมาใช้ ตัวอย่างเช่น ในการปล่อยน้ำซักผ้าหรือน้ำยาล้างจานที่เข้มข้นซึ่งมีสารลดแรงตึงผิวเป็นส่วนประกอบลงในแม่น้ำลำคลอง จะทำให้เกิดฟองอย่างมาก นอกจากจะทำลายสุนทรียภาพของแม่น้ำลำคลองแล้ว ยังสร้างผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ และอาจต้องใช้เวลานานที่กระบวนการธรรมชาติโดยแบคทีเรียหรือจุลินทรีย์จะย่อยสลายสารลดแรงตึงผิวได้หมด US.EPA. ได้กำหนดความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในน้ำดื่มให้ไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.4 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide: TiO_2) (พิมพ์, 2549)

ไทเทเนียม (Ti) เป็นโลหะสีเทาในกลุ่มทรานซิชัน มีมวลอะตอมเท่ากับ 47.867 หนักต่อการกักตร้อนสูง ไม่เป็นสารไวไฟ มีเลขออกซิเดชัน +4, +3, +2 แต่สภาพทั่วไปพบเป็น +4 ไทเทเนียมไดออกไซด์จะเป็นผงสีขาวมวลโมเลกุล 79.9 เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ซึ่งมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ คือ บรูไคท์ (Brookite) อนาเทส (Anatase) และรูไทล์ (Rutile) โดยที่โครงสร้างผลึกที่นิยมนำมาใช้สำหรับกระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำ โดยวิธีการกระตุ้นด้วยแสงคือ โครงสร้างผลึกแบบอนาเทสและรูไทล์ ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของอะตอมไทเทเนียมเป็นแบบ Orthorhombic และที่อะตอมออกซิเจนเข้าไปเติมเต็มในช่องว่างแบบ Octahedron โดยที่มุมระหว่างแกนของ Octahedron ในรูไทล์มีค่าเท่ากับ 90 และ 81.21 องศา ในขณะที่อนาเทสมีก่ามุมระหว่างแกนเท่ากับ 78.12 และ 92.43 องศา



รูปที่ 2.7 โครงสร้างโมเลกุลของสารไทเทเนียมไดออกไซด์

(ที่มา: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Rutile-unit-cell-3D-balls.png>)

ไทเทเนียม ไดออกไซด์ (Titanium dioxide : TiO_2) เป็นสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงกึ่งตัวนำซึ่งมีแถบช่องว่างพลังงาน 3.2 eV โดยแถบช่องว่างนี้จะขยายกว้างมากขึ้นเมื่อมีอนุภาคแสง (photons) ตกกระทบ ซึ่งจะส่งผลให้อิเล็กตรอนย้ายตำแหน่งจากแถบวาเลนซ์ (Valence band) ไปยังแถบการนำไฟฟ้า (Conduction Band) ซึ่งจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ดังนี้

ไฮดรอกซิลประจุลบ + ไฮโดรเจนประจุบวก

⇓

ไฮดรอกซิลออกซิเจน + อิเล็กตรอนประจุลบ

⇓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ออกซิเจนประจุลบ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อรังสีอุลตราไวโอเล็ตจากแสงอาทิตย์ตกกระทบไปยังไทเทเนียมไดออกไซด์จะส่งผลให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล และซูเปอร์ออกไซด์ประจุลบซึ่งมีคุณภาพในการเปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์ (VOCs) ที่มาเกาะติดอยู่บนผิวหน้าของสารเร่งปฏิกิริยาคู่ด้วยแสง (Photocatalyst) ให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ อีกทั้งยังช่วยกำจัดเชื้อแบคทีเรีย ไวรัส เชื้อรา และเชื้อโรคชนิดอื่นๆ เทคโนโลยี PCO (Photocatalytic Oxidation) จะช่วยประหยัดพลังงาน ยืดอายุการใช้งาน และลดการซ่อมบำรุงรักษาเครื่องฟอกอากาศ

2.4.1 กระบวนการโฟโตแคตาไลซิสออกซิเดชันโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (UV/TiO₂)

กระบวนการโฟโตแคตาไลซิสออกซิเดชันโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแสดงได้ด้วยสมการ



เมื่อ $h\nu$ = อนุภาคของแสง (photon)

h^+ = หลุมประจุบวกที่แถบวาเลนส์

e^- = อิเล็กตรอนที่แถบตัวนำ

OH^\cdot = ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radicals)

O_2^\cdot = ซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (Superoxide ion radicals)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

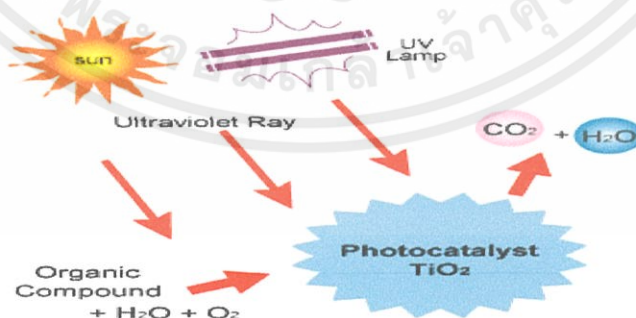
เมื่อสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับพลังงานโฟตอนจากแสงยูวีที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับแบนด์แก๊ป (~3.2 eV) ทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนส์เคลื่อนที่ไปยังแถบความนำเกิดเป็น e^- และ h^+ อิเล็กตรอนที่แถบความนำ (e^-) ทำปฏิกิริยากับ โมเลกุลออกซิเจนที่ดูดซับผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้โมเลกุลออกซิเจนเปลี่ยนเป็นซูเปอร์ออกไซด์อ็อกซิเจนเรดิคัล ส่วนโฮลที่แถบวาเลนส์สามารถรับอิเล็กตรอนจากโมเลกุลสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในสารละลายโดยตรงหรือไฮดรอกซิลอ็อกซิเจนทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล และยังทำให้โมเลกุลของน้ำที่ดูดซับผิวไทเทเนียมไดออกไซด์เปลี่ยนเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลด้วยเช่นกัน ซึ่งไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นสารที่มีอำนาจออกซิเดชันสูงมีความไวในการทำปฏิกิริยาสูงและทำหน้าที่สลายโมเลกุลสารอินทรีย์ในสารละลายที่ดูดซับผิวหรืออยู่ใกล้ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลสามารถที่จะทำปฏิกิริยาต่อไปได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังสมการ



ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้ โดยจะทำปฏิกิริยากับ e^- ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลตามสมการ



ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสบนสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสบนสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทซึ่งไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง (ที่มา: <http://bioecotech.com/product-mozztech%20Pro.html>)

2.5 การดูดซับ (Adsorption) (จิราภรณ์, 2556)

การดูดซับ เป็นการกระทำระหว่างตัวดูดซับ (adsorbent) และตัวถูกดูดซับ (adsorbate) หลักการของการดูดซับ จะทำให้เป็นพันธะระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ดังนั้นการจับยึดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับจะมีความแข็งแรงกว่าการจับยึดในแบบขง macro และ microencapsulation โดยทั่วไปถ้าตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับพบกันและดูดซับกันไว้แล้วที่สภาวะหนึ่งๆ ก็จะจับยึดกันต่อไปที่สภาวะนั้นๆ โดยการดูดซับ (adsorption) มีอยู่ด้วยกัน 3 ลักษณะ ดังนี้คือ

1) การดูดซับแบบแลกเปลี่ยนประจุ (Exchange adsorption) การดูดซับแบบนี้อาศัยการดูดซับด้วยไฟฟ้าสถิตบริเวณผิว

2) การดูดซับแบบเคมี (Chemical adsorption) การดูดซับแบบนี้อาศัยการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่อกันทำให้โมเลกุลของสารเคมีที่ถูกดูดซับไม่เกิดการเคลื่อนที่บริเวณผิว

3) การดูดซับแบบกายภาพ (Physical adsorption) การดูดซับแบบนี้อาศัยการเกิดการดูดซับด้วยแรงประเภท Van Der Waals ซึ่งไม่ยึดติดแน่นเหมือนกับสองแบบแรกมักจะเหมาะสมกับสภาวะอุณหภูมิต่างๆ

เมื่อกล่าวถึง การดูดซับทั้ง 3 แบบแล้ว ต่อไปจะกล่าวถึงการวิเคราะห์ระบบดูดซับโดยอาศัยไอโซเทอมของการดูดซับ ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจถึงการทำงานของ การดูดซับ ได้ดียิ่งขึ้นและเพื่อสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่างๆ ได้ รวมถึงอาจใช้เป็นแนวทางในการคำนวณออกแบบระบบดูดซับต่อไป

2.6 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) (จิราภรณ์, 2556)

ไอโซเทอมของการดูดซับ ก็คือ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักหรือปริมาณของสารที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารที่ยังคงเหลืออยู่ที่จุดสมดุลของการดูดซับ (D.P. Paritosh, 2002) โดยการศึกษาแล้วไอโซเทอมนั้น จะพิจารณาค่าคงที่ของการดูดซับควบคู่ กับสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination: R^2) ซึ่งมีค่าระหว่าง 0-1 โดยค่าเข้าใกล้ 0 หมายความว่ามีความน่าเชื่อถือต่ำที่สุด ส่วนค่าเข้าใกล้ 1 หมายความว่ามีความน่าเชื่อถือสูงที่สุดแบบจำลองที่นิยมนำมาใช้

ในการวิเคราะห์มีอยู่สองแบบคือ Freundlich Isotherm และ Langmuir Isotherm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1 Freundlich Isotherm

สมการของ Freundlich Isotherm เป็นสมการที่นิยมใช้กันมากในระบบดูดซับ โดยเฉพาะจะใช้อธิบายสำหรับสารละลายที่มีความเจือจางและความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ รวมถึงรูปแบบการดูดซับแบบ multilayer คือนอกจากโมเลกุลของสารดูดซับจะมี interaction กับผิวของตัวดูดซับแล้ว ยังมี interaction ระหว่างกันอีกด้วย และอาจเกิดการดูดซับแบบ monolayer ที่มาซ้อนทับกันอีกด้วย ซึ่งมีสมการและสามารถเขียนเป็นกราฟได้ดังนี้ คือ

$$q = x / m = KC_f^{1/n} \text{ หรือ } \text{Log}(q) = \text{Log}K + (1/n)\text{Log}C_f \dots\dots\dots(2.6)$$

เมื่อ

K = Adsorption Capacity (mg/g)

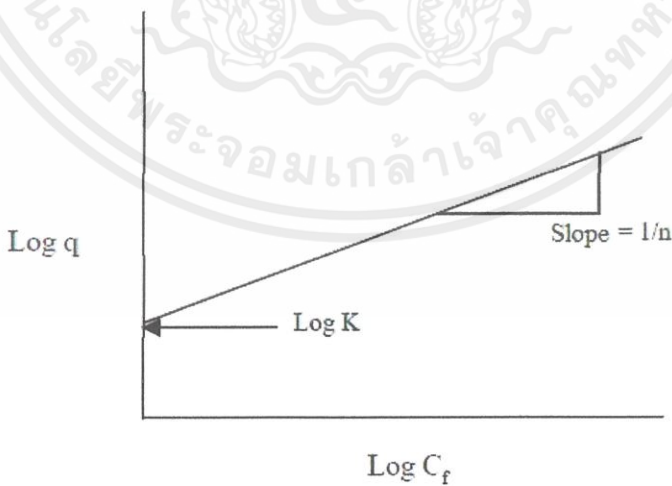
1 / n = Adsorption Intensity

X = น้ำหนักของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (mg)

M = น้ำหนักของตัวดูดซับ (g)

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย เมื่ออยู่ในสภาวะสมดุลย์ (mg/l)

q_e = จำนวน โมเลกุลของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับที่ความเข้มข้น C_e



เอกสารนี้เป็นเอกสาร **รูปที่ 2.9** กราฟของ Freundlich Isotherm เพื่อหาค่า K และ n (สุนทร, 2549) ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

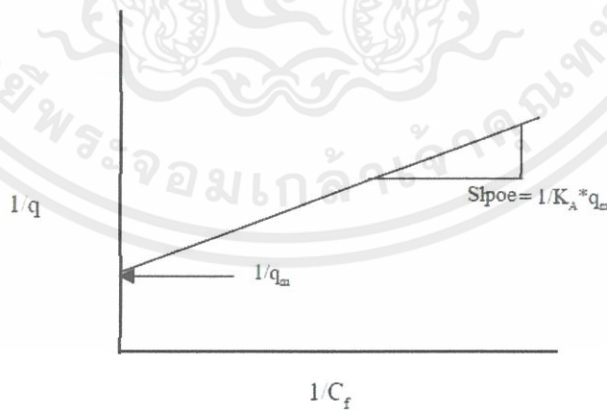
จากลักษณะของเส้นกราฟ Freundlich Isotherm ค่าคงที่ K จะบอกถึงความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ และ 1/n เป็นค่าความชันที่ได้จากสมการเส้นตรง ซึ่งบอกถึงความแข็งแรงของพันธะในการดูดซับได้ โดยหากค่า 1/n ต่ำจะทำให้พันธะของการดูดซับค่อนข้างแข็งแรงมากกว่า 1/n ที่มีค่าสูง (Romos, 1997) และกรณีเส้นความชันมีค่าสูง แสดงว่าการดูดซับเกิดขึ้นได้ดี เมื่อสารที่ต้องการดูดซับมีความเข้มข้นสูง (M.Visa, 2013)

2.6.2 Langmuir Isotherm

สมการ Langmuir Isotherm เป็นสมการที่ใช้อธิบายในกรณีที่การดูดซับจะเกิดเฉพาะชั้นเดียว (monolayer) และโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ (adsorbate) จะไม่มีการเคลื่อนที่อิสระบนผิวของตัวดูดซับ (adsorbent) ซึ่งมีสมการและสามารถเขียนสมการเป็นกราฟได้ดังนี้

$$q = (q_m K_A C_f) / (1 + K_A C_f) \text{ หรือ } 1/q = (1/C_f)(K_A q_m) + (1/q_m) \dots\dots\dots(2.7)$$

- เมื่อ
- Q = มวลของสารที่ถูกดูดซับต่อมวลของตัวดูดซับ
- C_f = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ ในสารละลาย เมื่ออยู่ในสภาวะสมดุลย์ (mg/l)
- q_m = ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง
- K_A = ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.10 กราฟของ Langmuir Isotherm เพื่อหาค่า K_A และ q_m (สุเนตร, 2549)
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) (ฉัฐพงศ์, 2554)

หลักการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความชัดจะปรับให้อิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยใช้เลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ และถูกนำไปสร้างเป็นภาพ

งานวิจัยนี้จะใช้ SEM ในการตรวจดูโครงสร้างจุลภาคของผงที่สังเคราะห์, พื้นที่ผิวของฟิล์มบาง และความหนาของฟิล์มที่เคลือบและวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์และสารเติมที่กระจายตัวอยู่บนฟิล์มวิธี X-ray mapping ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM; JEOL JSM-5800L V)

2.8 X-ray diffractometry (XRD) (ฉัฐพงศ์, 2554)

เทคนิค XRD อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอ็กซ์ที่ทราบความยาวคลื่น ไปกระทบชิ้นงานทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆกัน โดยมีหัววัดเป็นตัวรับข้อมูล เนื่องจากองศาในการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของสาร ที่มีอยู่ในตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆได้ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำมาหาปริมาณของสารประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก ความเค้น ของสารประกอบในสารตัวอย่าง อีกทั้งความหนาแน่นของฟิล์มที่ได้อีกด้วย ซึ่งมีสูตรคำนวณขนาดของผลึกแต่ละเฟสที่เกิดขึ้น ในผงและฟิล์มที่สังเคราะห์ได้โดยใช้สมการ Scherer ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$t = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta} \dots\dots\dots (2.9)$$

เมื่อ	t	คือ ขนาดของผลึก (นาโนเมตร)
	λ	คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
	β	คือ Line width at half maximum height (เรเดียน)
	θ	คือ มุมสะท้อน (องศา)

2.9 Fourier-transformed infrared spectrophotometer (FT-IR) (ณัฐพงศ์, 2554)

FT-IR เป็นเทคนิคอย่างหนึ่งที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ตรวจสอบและศึกษาเกี่ยวกับ โมเลกุลของสารที่อาศัยการดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรด นิยมใช้เป็นเทคนิคสำหรับหาเกี่ยวกับ โครงสร้างของสารอินทรีย์ เช่น หาฟังก์ชันลึกรูปต่างๆ การทำปริมาณวิเคราะห์ นิยมใช้เทียบกับสารมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนแล้ว สามารถวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันและหาสารที่มาปนเปื้อนอยู่ในตัวอย่างว่ามีอะไรบ้าง สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในสถานะที่เป็นของเหลวและของแข็ง ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นของเหลวก็สามารถนำมาใส่เซลล์สำหรับของเหลวได้เลย ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นของแข็ง โดยไม่มีสารอื่นผสมอยู่ จำเป็นต้องทำให้สารตัวอย่างมีลักษณะบางมากๆ เพื่อให้แสงผ่านได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

1. ถั่วลอจประเภท C จาก โรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอ แม่เมาะ จังหวัดลำปาง
2. ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO₂ Degussa P25)
3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH)
4. สารลดแรงตึงผิว (Sodium Dodecylbenzenesulfonate - SDBS)
5. สารประกอบโลหะหนัก CdCl₂·2.5H₂O
6. น้ำ Ultra - Pure
7. กรดไนตริก (Nitric acid, HNO₃)
8. เครื่องวัด UV-Vis Spectrophotometer รุ่น Genesys 10S ยี่ห้อ Thermo scientific
9. Atomic Absorption spectrophotometer ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น AAS-200
10. เครื่องวัดพีเอช รุ่น C860 ยี่ห้อ Consort
11. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งบริษัท SARTORIUS AG GERMANY รุ่น ED224S
12. เครื่องเขย่า ยี่ห้อ Gallenkamp
13. เครื่อง centrifuge ยี่ห้อ Sanyo
14. ตู้อบ ยี่ห้อ Fisher Scientific
15. ชุด Condenser
16. ขวดก้นกลม ขนาด 1000 มิลลิลิตร
17. เตาลูกม ยี่ห้อ Electromantle MX รุ่น Spillproof Mantle
18. หลอด Centrifuge ขนาด 50 มิลลิลิตร
19. กระดาษกรอง whatman No.43
20. Filter กรอง ขนาด 0.45 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 21. ตู้น้ำยแสงยูวีที่มีหลอดยูวีขนาดกำลังไฟ 8 วัตต์จำนวน 7 หลอดค ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การเตรียมตัวอย่างเถ้าลอยด้วยวิธีการล้างเถ้าลอย (Washed fly ash, FAw)

นำเถ้าลอยประเภท C จากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอ แม่เมาะ จังหวัดลำปาง จำนวน 100 กรัม ผสมกับน้ำ Ultra - pure ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร นำไปปั่นกวนที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 48 ชั่วโมง วัดค่า pH ค่าการนำไฟฟ้า เริ่มต้น และวัดค่า TDS เริ่มต้น ทุกๆ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ ให้มีค่า TDS เริ่มต้นที่ประมาณ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเวลาที่ 24 ชั่วโมง วัดค่า TDS ได้ประมาณ 850 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ 48 ชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อครบเวลา 48 ชั่วโมง นำไปกรองด้วยเครื่องกรองแบบลดความดันและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 - 120 องศาเซลเซียส

3.3 การปรับปรุงคุณภาพเถ้าลอยด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยวิธีการรีฟลักซ์

นำเถ้าลอยที่ผ่านการล้างแล้วที่มีคุณสมบัติเป็นตัวดูดซับมาผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่มีคุณสมบัติสลายสารอินทรีย์ที่ต้องผ่านการกระตุ้นด้วยแสง มาผสมรวมกัน (FAw: TiO_2) ในอัตราส่วน 5:1 โดยน้ำหนัก นำมารีฟลักซ์ด้วยสารละลาย NaOH เข้มข้น 2 นอมอลล์ ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 - 120 องศาเซลเซียส และนำมาร้อนด้วยตะแกรงขนาด 325 mesh

3.4 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของสารผสม (FA- TiO_2)

- 3.3.1 ศึกษาองค์ประกอบของสารผสม (FA- TiO_2) ด้วยเครื่อง XRD (X-ray Diffractometer)
- 3.3.2 ศึกษาสัณฐานและลักษณะพื้นผิวด้วยเครื่อง SEM (scanning electron microscopy)
- 3.3.3 ศึกษาโครงสร้างของสารด้วยเครื่อง FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrometer)

3.5 การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการบำบัดแบบไม่ฉายแสง (Adsorption) และการสลายสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการฉายแสงยูวี (Photodegradation)

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง เป็นการผสมสารละลาย 2 ชนิด คือ แคดเมียมคลอไรด์ (CdCl_2) ที่มีความเข้มข้นของ Cd^{2+} อยู่ในสารละลายเข้มข้น 600 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารลดแรงตึงผิว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Sodium Dodecylbenzenesulfonate, SDBS ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{C}_6\text{H}_4\text{SO}_3\text{Na}$) เข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร การทดลองนี้เป็นแบบแบตช์ (Batch) โดยทำทั้งหมด 2 ชุดการทดลอง

การทดลองชุดที่ 1 การบำบัดแบบไม่ฉายแสง UV (Absorption)

การทดลองชุดที่ 2 การบำบัดแบบฉายแสง UV (Photodegradation)

3.5.1 ศึกษาหาปริมาณที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์

ซังสารผสม (FA-TiO₂) จำนวน 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 กรัม ตามลำดับ นำไปดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงนาน 5 นาที กรองด้วย Syringe Filter ขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวัดค่า Cd²⁺ ที่เหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยเครื่อง AAS ที่ความยาวคลื่น 228.8 นาโนเมตร และวัดสารลดแรงตึงผิว (SDBS) ด้วยเครื่อง UV-Visible spectrometer ที่ความยาวคลื่น 224 นาโนเมตร

3.5.2 ศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์

ซังสารผสม (FA-TiO₂) จำนวน 0.4 กรัม นำไปดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่ปรับค่า pH เป็น 4, 5, 6, 7 และ 8 ตามลำดับ นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ตามลำดับ จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงนาน 5 นาที กรองด้วย Syringe Filter ขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวัดค่า Cd²⁺ ที่เหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS ที่ความยาวคลื่น 228.8 นาโนเมตร และวัดสารลดแรงตึงผิว (SDBS) ด้วยเครื่อง UV-Visible spectrometer ที่ความยาวคลื่น 224 นาโนเมตร

3.5.3 ศึกษาหาเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์

ซังสารผสม (FA-TiO₂) จำนวน 0.4 กรัม นำไปดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ในปริมาตร 50 มิลลิลิตร เขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30, 45, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที ตามลำดับ จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงนาน 5 นาที กรองด้วย Syringe Filter ขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวัดค่า Cd²⁺ ที่เหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS ที่ความยาวคลื่น 228.8 นาโนเมตร และวัดสารลดแรงตึงผิว (SDBS) ด้วยเครื่อง UV-Visible spectrometer ที่ความยาวคลื่น 224 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.4 การศึกษาหาไอโซเทอมการบำบัดในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์

ซังสารผสม (FA-TiO₂) จำนวน 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 กรัม ตามลำดับ นำไปบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่า pH 7 จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 90 นาที แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงนาน 5 นาที กรองด้วย Syringe Filter ขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวัดค่า Cd²⁺ ที่เหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS ที่ความยาวคลื่น 228.8 นาโนเมตร และวัดสารลดแรงตึงผิว (SDBS) ด้วยเครื่อง UV-Vis ที่ความยาวคลื่น 224 นาโนเมตร จากนั้นนำไปพล็อตกราฟ Langmiur isotherm และ กราฟ Freundlich isotherm

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้ ได้ทำ การทดลอง 3 ชั้นในแต่ละชั้น จึงต้องมีการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูล (mean) ดังนั้นจึงได้นำ การวัดการกระจายสัมบูรณ์ เป็นการวัดการกระจายของข้อมูลชุดเดียวโดยใช้ค่าสถิติ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation: S.D.) หาได้จากรากที่สองของค่าเฉลี่ยของค่าคะแนนแต่ละตัวห่างจากค่ากลางยกกำลังสอง (สมการที่ 2.6) ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะถูกนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ในรูปของสมการเส้นตรง และเปรียบเทียบข้อมูลโดยใช้ค่า R²

$$S.D. = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N X_i\right)^2}{N}} \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

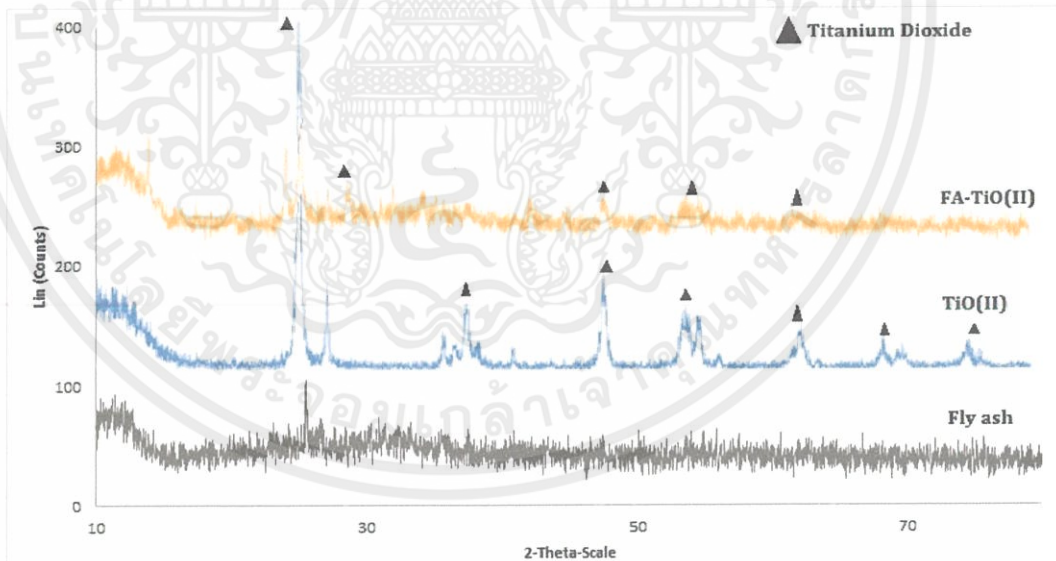
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมี

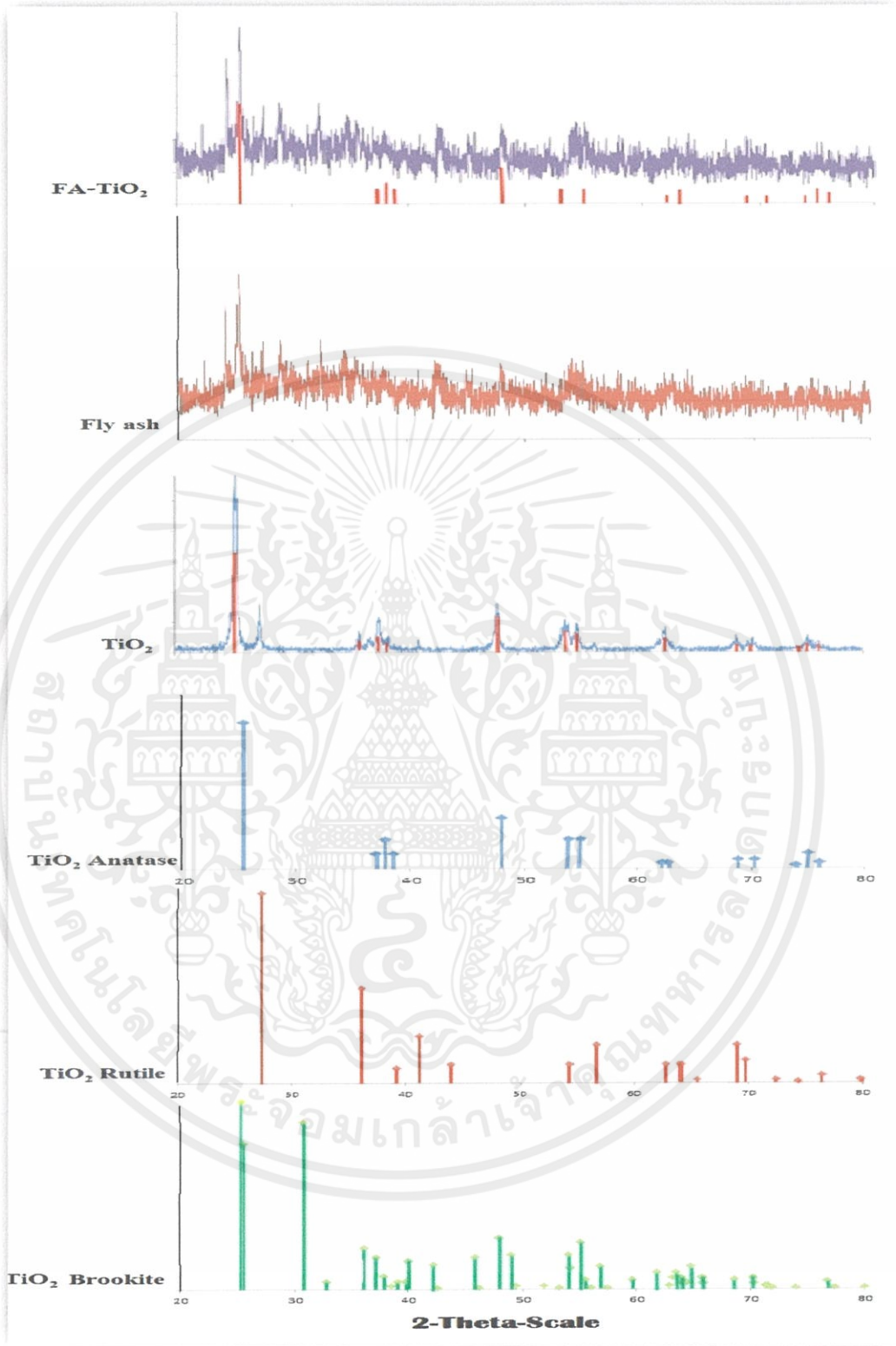
4.1.1 ศึกษาองค์ประกอบของสารด้วยเครื่อง XRD (X-ray Diffractometer)

เนื่องจากการปรับปรุงคุณภาพของเถ้าลอยด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์เกาะบนผิวของเถ้าลอยในระหว่างกระบวนการรีฟลักซ์จึงทำให้พบเฟสของอะนาเทสเกิดขึ้นบนสารผสมเถ้า FA-TiO₂ ดังรูปที่ 4.1 จากการวิเคราะห์เฟสของเถ้าลอยกับไทเทเนียมไดออกไซด์โดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่วิเคราะห์ได้มีเฟสของอะนาเทสเกิดขึ้นชัดเจนที่ 25.43 องศา 2 Theta และมีเฟสของบรูคไคต์เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยที่ 30.64 องศา 2 Theta ในส่วนของเถ้าลอยไม่มีเฟสของอะนาเทส บรูคไคต์และรูไทต์ และสารผสม FA-TiO₂ มีเฟสของอะนาเทสเกิดขึ้น ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ผล XRD ของ Fly ash, TiO₂ และ FA-TiO₂

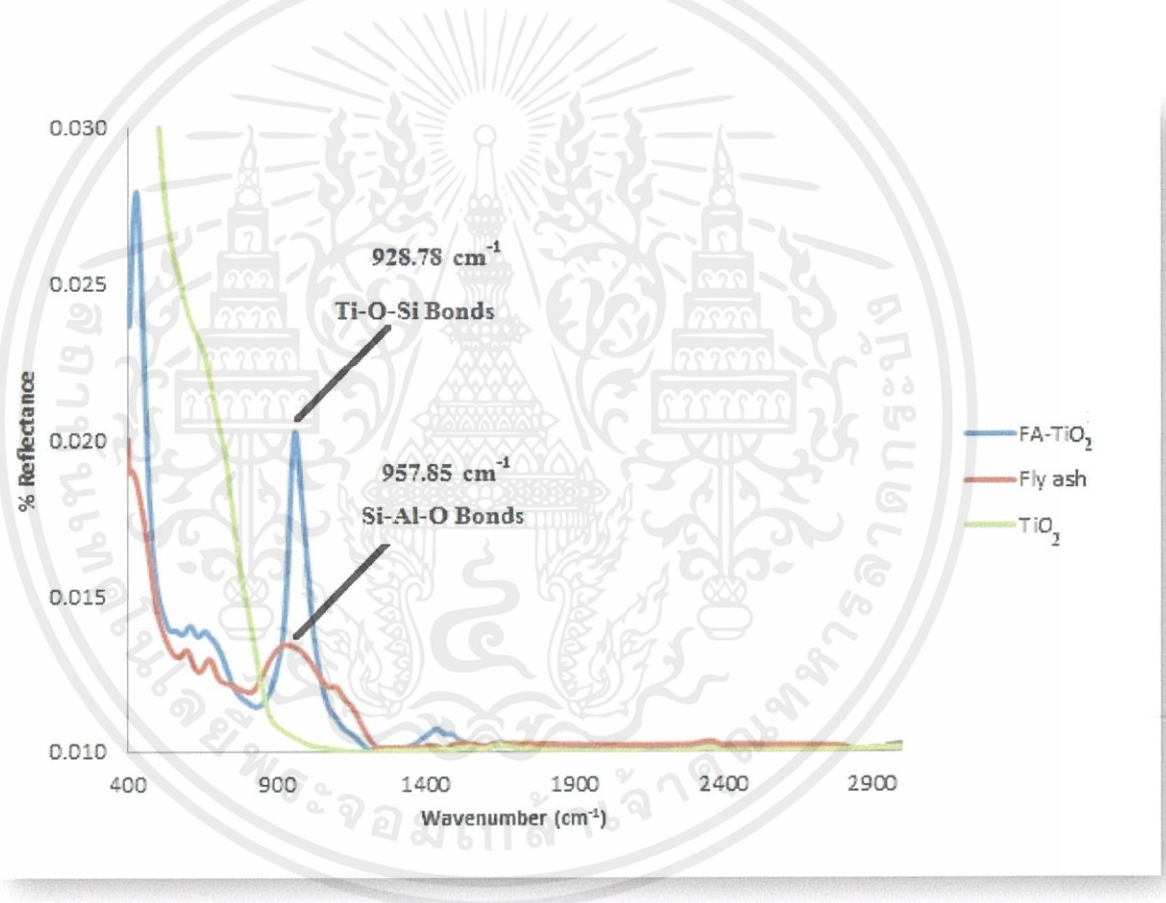
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ผล XRD เมื่อเทียบกับมาตรฐานผล XRD ของไทเทเนียม ไดออกไซด์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงชื่อผู้พิมพ์หรือผู้เผยแพร่ซึ่งไม่เหมือนกับที่อื่น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นว่าเป็นประโยชน์ เช่น ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrometer)

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ของเถ้าลอย ไทเทเนียมไดออกไซด์กับสารผสมเถ้าลอยกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าพีคของเถ้าลอยที่เลขคลื่นประมาณ $928.78\text{-}957.85\text{ cm}^{-1}$ จะมีพันธะ Si-Al-O ซึ่งจะสอดคล้องกับองค์ประกอบของเถ้าลอยที่มีซิลิกา อลูมินา เป็นองค์ประกอบ ในส่วนพีคของสารผสมเถ้าลอยกับไทเทเนียมไดออกไซด์มีเลขคลื่นประมาณ 928.78 cm^{-1} พบพันธะของ Ti-O-Si กล่าวคือ หลังกระบวนการรีฟลักซ์เพื่อปรับปรุงคุณภาพเถ้าลอยด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์พบว่าสารผสมมีพันธะ Ti-O-Si เกิดขึ้น

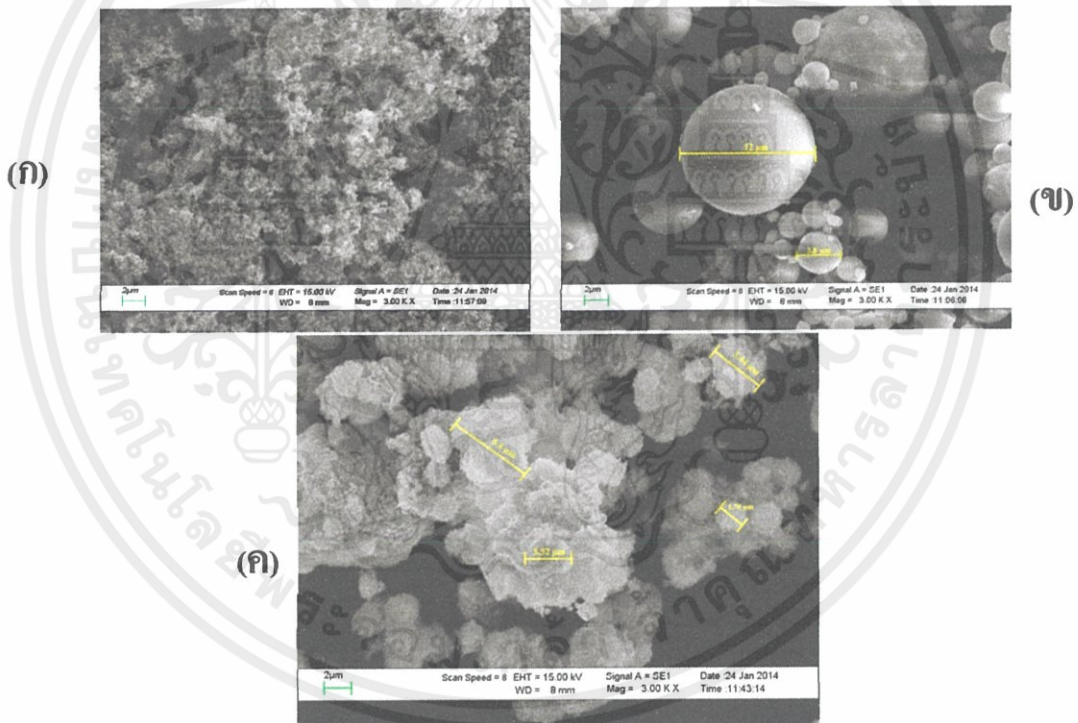


รูปที่ 4.3 ผล FT-IR เถ้าลอย TiO₂, และสารผสม FA-TiO₂

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ผลการวิเคราะห์ SEM (scanning electron microscopy)

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วย SEM พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์มีลักษณะเล็กมากในระดับอนุภาคนาโน เนื่องจาก SEM ที่ใช้วิเคราะห์ไม่สามารถใช้กำลังขยายจนมองเห็นลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้พบเพียงกลุ่มก้อนของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ก) ในส่วนของถ้ำลอยพบว่าลักษณะพื้นผิวมีลักษณะเป็นทรงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 12 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ข) และการวิเคราะห์สารผสมถ้ำลอยกับไทเทเนียมไดออกไซด์พบไทเทเนียมไดออกไซด์เกาะบนผิวของถ้ำลอยจนมองไม่เห็นลักษณะทรงกลมของถ้ำลอยเนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ไปปกคลุมบนผิวของถ้ำลอย ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ค)



รูปที่ 4.4 ผลวิเคราะห์ SEM ของถ้ำลอย ไทเทเนียมไดออกไซด์และสารผสม FA-TiO₂

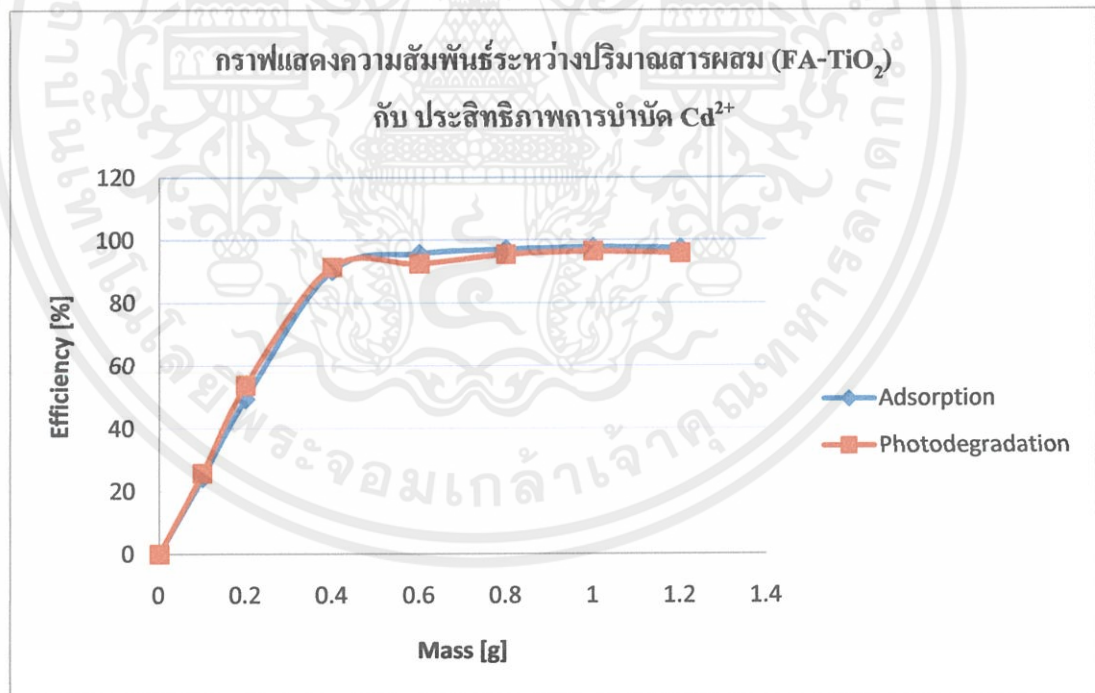
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยสารผสม FA-TiO₂

4.2.1 ผลของปริมาณ (สารผสม FA-TiO₂) ในการบำบัดแคะเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์

ผลการบำบัดแคะเมียม ด้วยวิธี Adsorption และ Photodegradation ความเข้มข้น 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลา 30 นาที เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณสารผสม FA-TiO₂ จำนวน 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 และ 1.2 กรัม แสดงในกราฟรูปที่ 4.5 พบว่า สมดุลการบำบัดด้วยวิธี Adsorption และ Photodegradation เกิดขึ้นที่ปริมาณ 0.4 กรัม สารผสม FA-TiO₂ มีประสิทธิภาพการบำบัดแคะเมียมด้วยวิธี Adsorption เท่ากับ 90.23 % และด้วยวิธี Photodegradation เท่ากับ 91.41 % ซึ่งการบำบัดทั้งสองวิธีมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกันทางสถิติ

การบำบัดแคะเมียมด้วยวิธี Photodegradation มีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับวิธี Adsorption แต่ต้องใช้แสง UV ทำให้ต้องเสียพลังงานในส่วนนี้ไป ดังนั้น การบำบัดแคะเมียมด้วยวิธี Adsorption เป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด



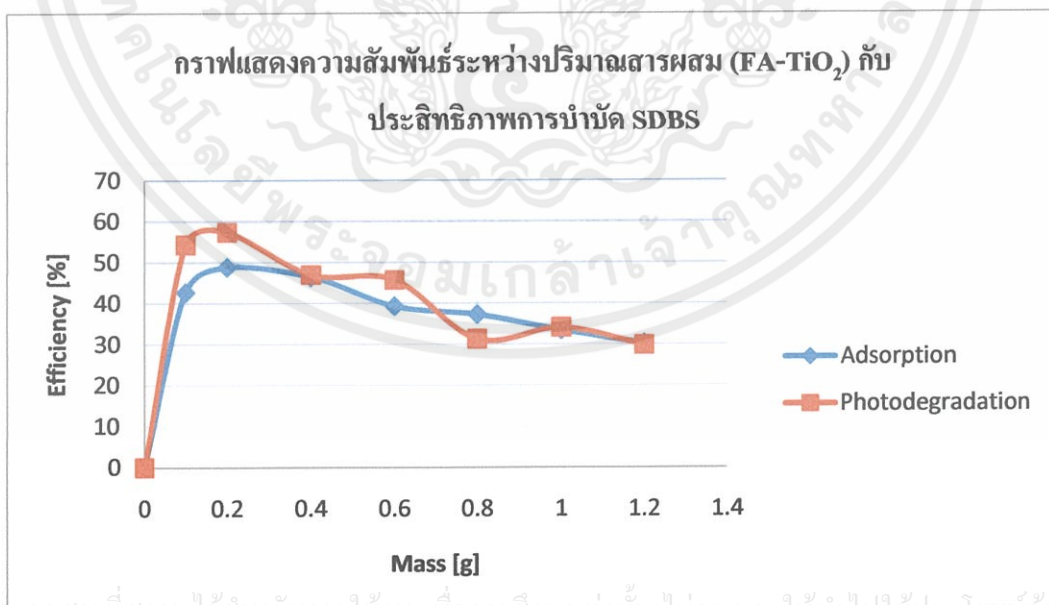
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ (FA-TiO₂) กับประสิทธิภาพในการบำบัด Cd²⁺

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลของปริมาณ (สารผสม FA-TiO₂) ในการบำบัด SDBS ในน้ำเสียสังเคราะห์

ผลการบำบัด SDBS ด้วยวิธี Adsorption และ Photodegradation ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลา 30 นาที เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณสารผสม FA-TiO₂ จำนวน 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 และ 1.2 กรัม แสดงในกราฟรูปที่ 4.6 พบว่า การบำบัดด้วยวิธี Adsorption ที่ปริมาณ 0.2 กรัม มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดเท่ากับ 48.8 % และ วิธี Photodegradation ที่ปริมาณ 0.2 กรัม มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดเท่ากับ 57.40% จากผลประสิทธิภาพการบำบัดด้วยวิธี Photodegradation มีประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงกว่าวิธี Adsorption

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า การเพิ่มปริมาณสารผสม FA-TiO₂ มีผลทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีมากขึ้นและบริเวณที่เกิดการบำบัดมีสูงขึ้น โดยพื้นที่ผิวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของสารผสม FA-TiO₂ ดังนั้นการเพิ่มปริมาณสารผสมจึงมีผลทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มสูงขึ้น สารผสม FA-TiO₂ ปริมาณ 0.4 กรัม มีประสิทธิภาพการบำบัดแคดเมียมด้วยวิธี Adsorption สูงสุด 90.23 % แต่สารผสม FA-TiO₂ ปริมาณ 0.2 กรัม มีประสิทธิภาพการบำบัด SDBS ด้วยวิธี Photodegradation สูงสุด 57.40% ดังนั้น จึงเลือกใช้สารผสม FA-TiO₂ ปริมาณ 0.4 กรัม ทำการศึกษาผลของพีเอชและเวลาของการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์

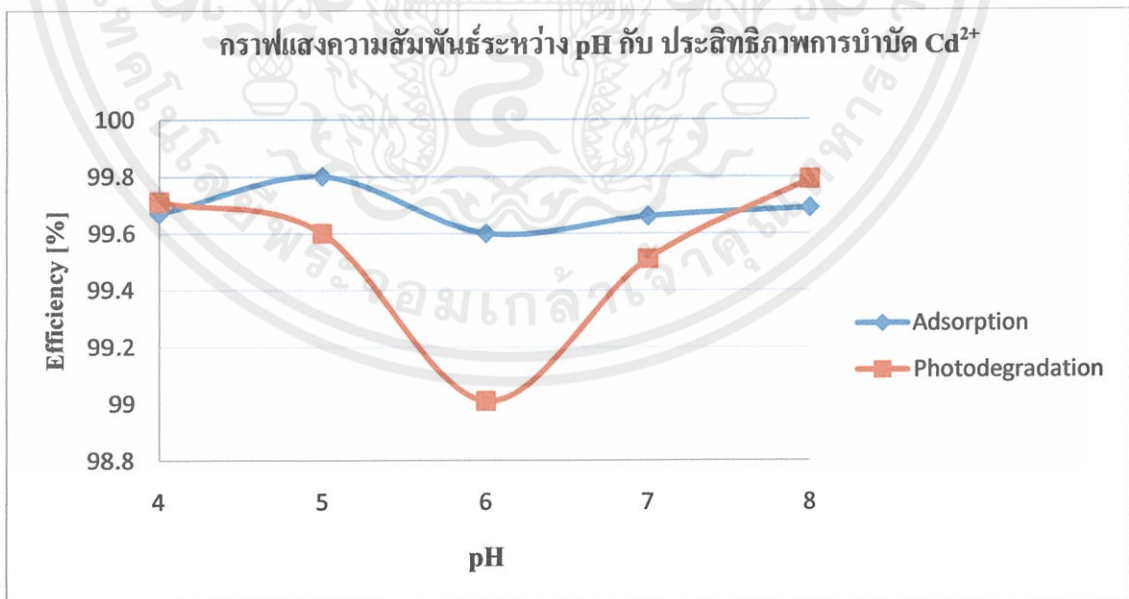


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ (FA-TiO₂) กับประสิทธิภาพการบำบัด SDBS
 ไม่ว่าจะฉีกดูทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุผลเบี่ยงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ผลของ pH ในน้ำเสียสังเคราะห์สำหรับการบำบัดแคดเมียม

ผลการใช้สารผสม FA-TiO₂ ปริมาณ 0.4 กรัม ความเข้มข้นแคดเมียม 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลา 30 นาที เปลี่ยนแปลงค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์ 4, 5, 6, 7 และ 8 ตามลำดับ แสดงในกราฟรูปที่ 4.7 พบว่า การบำบัดแคดเมียมด้วยวิธี Adsorption มีประสิทธิภาพการบำบัด เท่ากับ 99.67%, 99.8%, 99.6%, 99.66% และ 99.69% ตามลำดับ และการบำบัดด้วยวิธี Photodegradation มีประสิทธิภาพการบำบัด เท่ากับ 99.71%, 99.6%, 99.01%, 99.51% และ 99.79% ตามลำดับ

จากกราฟ รูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดแคดเมียมมีค่าลดลงต่ำสุดที่ pH 6 และเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ pH 8 เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์เกาะอยู่บนผิวของเถ้าลอยไม่สม่ำเสมอ จึงทำให้พื้นที่ผิวสำหรับการบำบัดแคดเมียมของเถ้าลอยลดลง และเมื่อค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์เปลี่ยนแปลงแคดเมียมก็จะเปลี่ยนรูปตามเกิดเป็นรูป Cd²⁺, Cd(OH)⁺, Cd(OH)₂ และ Cd(OH)₃ ในการทดลองจึงต้องควบคุมค่า pH ของสารละลายให้อยู่ระหว่าง 0-8 (Romos, 1997, PP.205-211) จากผลการทดลองการบำบัดแคดเมียมด้วยวิธี Adsorption และ วิธี Photodegradation มีประสิทธิภาพการบำบัดที่ใกล้เคียงกันทางสถิติประมาณ 99% ดังนั้น การบำบัดด้วยวิธี Adsorption จึงเหมาะสมที่สุดเนื่องจากไม่ต้องเสียพลังงานในการ Photodegradation

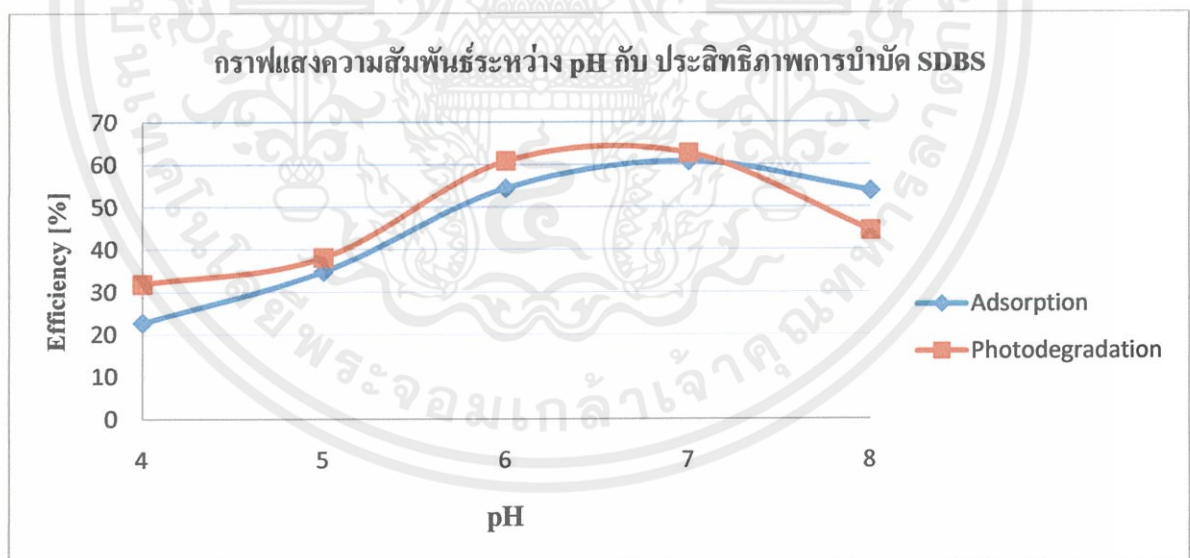


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับประสิทธิภาพในการบำบัดแคดเมียม
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ผลของ pH ในน้ำเสียสังเคราะห์สำหรับการบำบัดสารลดแรงตึงผิว SDBS

ผลการบำบัด SDBS ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น SDBS 150 มิลลิกรัมต่อลิตรโดยใช้สารผสม FA-TiO₂ ปริมาณ 0.4 กรัม เป็นเวลา 30 นาที เปลี่ยนแปลงค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์เป็น 4, 5, 6, 7 และ 8 ตามลำดับ แสดงในกราฟรูปที่ 4.8 พบว่า การบำบัด SDBS ด้วยวิธี Adsorption มีประสิทธิภาพการบำบัด เท่ากับ 22.67%, 34.75%, 54.42%, 60.77% และ 53.82% ตามลำดับ และการบำบัดด้วยวิธี Photodegradation มีประสิทธิภาพการบำบัด เท่ากับ 31.8%, 38.07%, 60.82%, 62.05% และ 44.38% ตามลำดับ

จากการทดลองการหาค่า pH ที่เหมาะสมของน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH 4-8 มีประสิทธิภาพในการบำบัดแคะเมียมประมาณ 99% ดังนั้นจึงเน้นการหา pH ที่เหมาะสมในการบำบัด SDBS แสดงในกราฟรูปที่ 4.8 ที่ pH 6 และ 7 มีประสิทธิภาพการบำบัด SDBS สูงสุดและใกล้เคียงกันคือ 60.82%, 62.65% ตามลำดับ ดังนั้นจึงนำ pH 6 และ pH 7 มาหาค่า pH ที่เหมาะสมที่สุดต่อไป



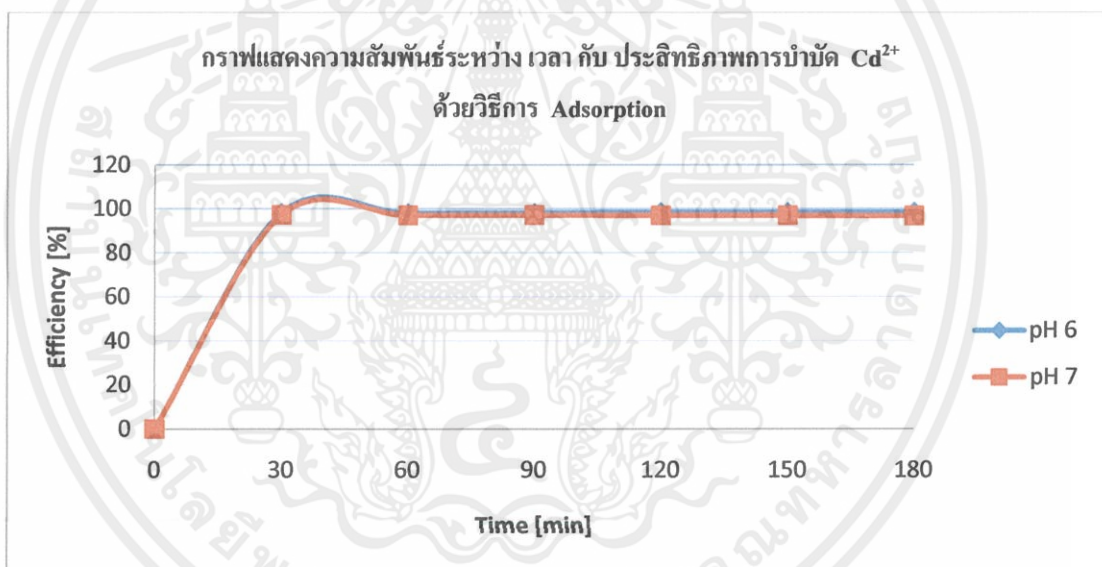
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับประสิทธิภาพในการบำบัด SDBS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 ผลการศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดแคดเมียมที่ pH 6 และ pH 7

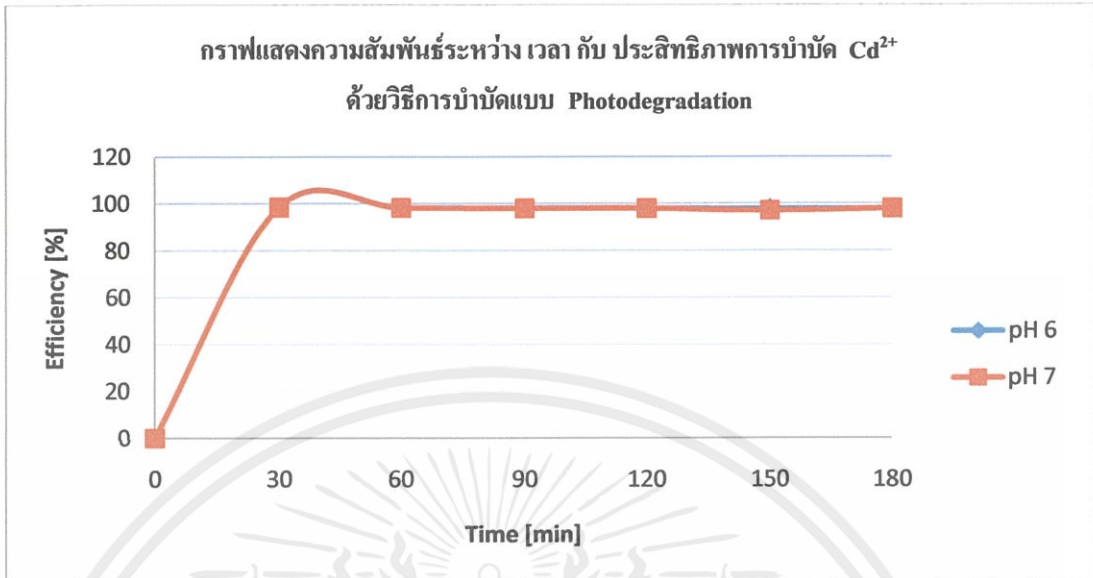
ผลการบำบัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 600 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ปริมาณสารผสม FA-TiO₂ จำนวน 0.4 กรัม เป็นเวลา 30 นาที เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาเป็น 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที ตามลำดับ แสดงในกราฟรูปที่ 4.9 และ 4.10 พบว่าที่ pH 6 ในช่วง 30 นาทีแรก ประสิทธิภาพในการบำบัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการบำบัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เข้าสู่สมดุล ซึ่งเกิดในเวลา 60 นาที มีประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 99% และที่ pH 7 ผลของประสิทธิภาพการบำบัดแคดเมียมเท่ากันในทางสถิติกับประสิทธิภาพการบำบัดแคดเมียมที่ pH 6

ดังนั้น การบำบัดแคดเมียมด้วยวิธี Adsorption ที่ pH 6 และ pH 7 มีประสิทธิภาพการบำบัดแคดเมียมเท่ากันประมาณ 99%



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับประสิทธิภาพในการบำบัดแคดเมียมด้วยวิธีการบำบัดแบบ Adsorption ที่ pH 6 และ pH 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับ ประสิทธิภาพในการบำบัดแคดเมียม

โดยวิธีการ Photodegradation ที่ pH 6 และ pH 7

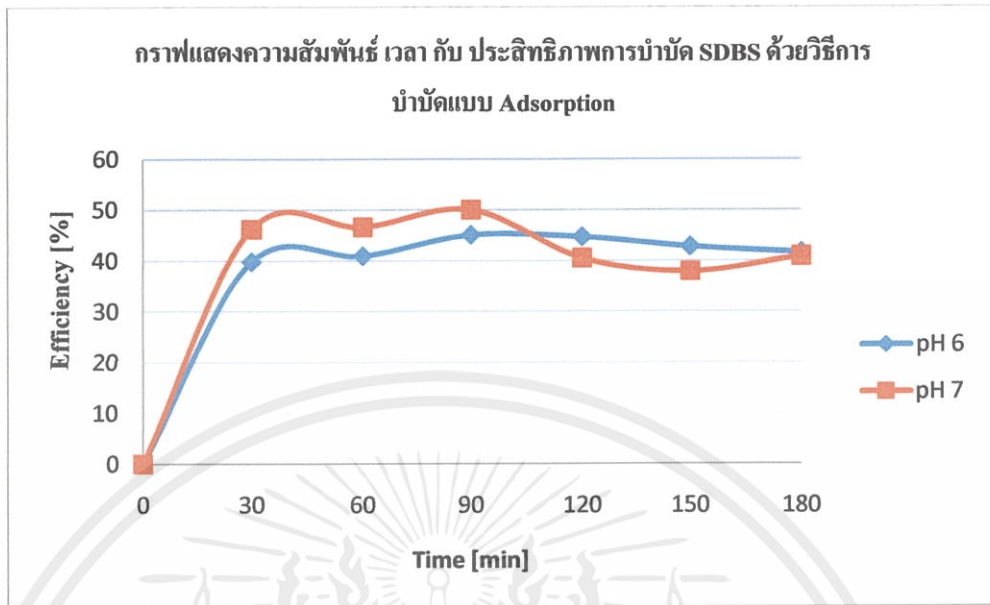
4.2.6 ผลการศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการบำบัด SDBS ที่ pH 6 และ pH 7

ผลการบำบัด SDBS ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ปริมาณสารผสม FA-TiO₂ จำนวน 0.4 กรัม เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาเป็น 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที ตามลำดับแสดงในกราฟรูปที่ 4.11 เป็นการบำบัดแบบ Adsorption พบว่าที่ pH 6 ในช่วง 30 นาทีแรก ประสิทธิภาพในการบำบัด SDBS ในน้ำเสียสังเคราะห์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการบำบัด SDBS ในน้ำเสียสังเคราะห์เข้าสู่สมดุล ซึ่งเกิดที่เวลา 90 นาที มีประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 45% และที่ pH 7 ในช่วง 30 นาทีแรก ประสิทธิภาพในการบำบัด SDBS ในน้ำเสียสังเคราะห์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการบำบัด SDBS ในน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มลดลง ซึ่งเกิดที่เวลา 90 นาที และมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดเท่ากับ 50%

ดังนั้น การบำบัด SDBS ด้วยวิธี Adsorption ที่ pH 7 มีประสิทธิภาพการบำบัด SDBS สูง

กว่าประสิทธิภาพการบำบัด SDBS ที่ pH 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับ ประสิทธิภาพในการบำบัด SDBS
โดยวิธีการบำบัดแบบ Adsorption**

จากกราฟรูปที่ 4.12 เป็นการบำบัดแบบ Photodegradation ซึ่งมีผลการบำบัด SDBS ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ปริมาณสารผสม FA-TiO₂ จำนวน 0.4 กรัม เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาเป็น 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที ตามลำดับ พบว่า ที่ pH 6 ในช่วง 30 นาทีแรก ประสิทธิภาพในการบำบัด SDBS ในน้ำเสียสังเคราะห์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการบำบัด SDBS ในน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มลดลง ซึ่งเกิดที่เวลา 90 นาที มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดเท่ากับ 52.65% และที่ pH 7 ในช่วง 30 นาทีแรก ประสิทธิภาพในการบำบัด SDBS ในน้ำเสียสังเคราะห์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการบำบัด SDBS ในน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มลดลง ซึ่งเกิดที่เวลา 90 นาที และมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดเท่ากับ 57.58%

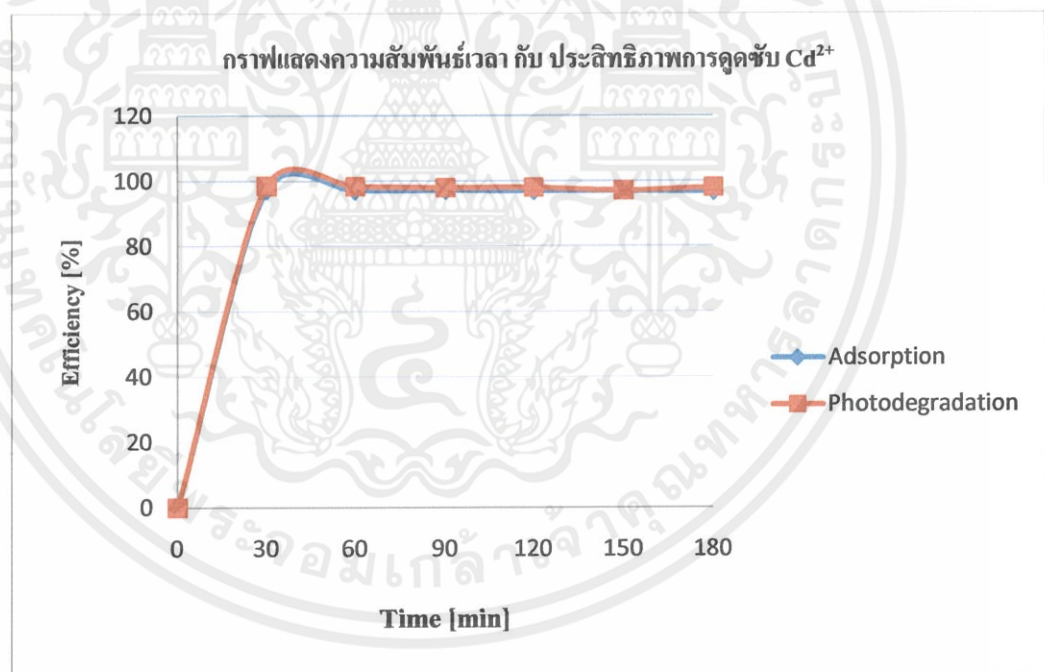
ประสิทธิภาพการบำบัด SDBS ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธี Photodegradation ที่ pH 6 เท่ากับ 52.65% และที่ pH 7 เท่ากับ 57.58% ดังนั้น pH 7 มีประสิทธิภาพการบำบัด SDBS ในน้ำเสียเคราะห์สูงกว่า pH 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.7 ผลการศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์

ผลการบำบัดแคดเมียม ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 600 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ปริมาณสารผสม FA-TiO₂ จำนวน 0.4 กรัม ที่ pH 7 เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาเป็น 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที ตามลำดับ แสดงในกราฟรูปที่ 4.13 การบำบัดแบบ Adsorption พบว่าที่ 30 นาทีแรก มีประสิทธิภาพในการบำบัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการบำบัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เข้าสู่สมดุล ซึ่งเกิดที่เวลา 30 นาที มีประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 99% และ การบำบัดแบบ Photodegradation มีผลของประสิทธิภาพการบำบัดแคดเมียมเท่ากันในทางสถิติกับประสิทธิภาพการบำบัดแบบ Adsorption

ดังนั้น การบำบัดแคดเมียมด้วยวิธี Adsorption จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมกว่าการบำบัดแบบ Photodegradation เนื่องจากไม่ต้องเสียพลังงานในส่วนการ Photodegradation



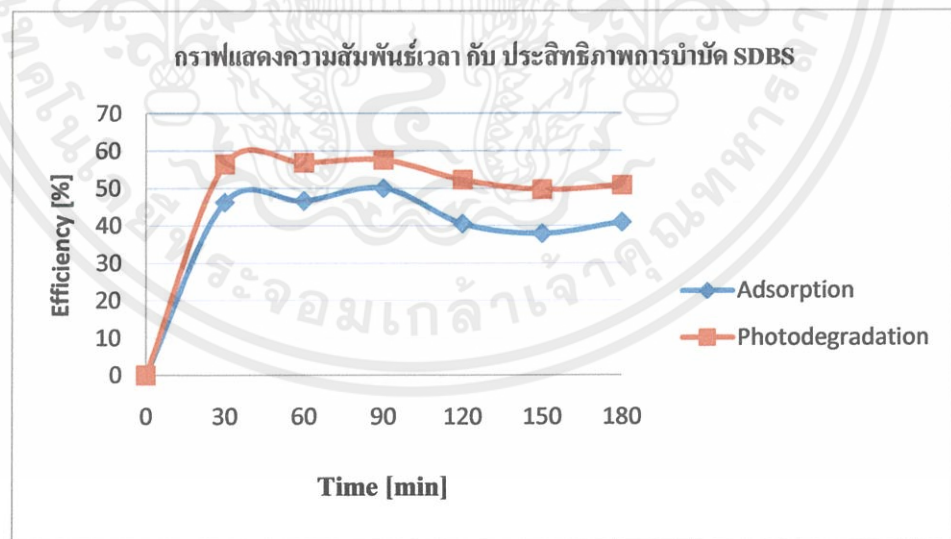
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับ ประสิทธิภาพในการบำบัดแคดเมียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.8 ผลการศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการบำบัด SDBS ในน้ำเสียสังเคราะห์

ผลการบำบัด SDBS ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ปริมาณสารผสม FA-TiO₂ จำนวน 0.4 กรัม ที่ pH 7 เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาเป็น 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที ตามลำดับ แสดงในกราฟรูปที่ 4.14 การบำบัดแบบ Adsorption พบว่าที่ 30 นาทีแรก มีประสิทธิภาพในการบำบัด SDBS ในน้ำเสียสังเคราะห์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการบำบัด SDBS ในน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มลดลง ที่เวลา 90 นาที มีประสิทธิภาพการบำบัด SDBS ในน้ำเสียสังเคราะห์สูงที่สุด เท่ากับ 50% และ การบำบัดแบบ Photodegradation พบว่าที่ 30 นาทีแรก มีประสิทธิภาพในการบำบัด SDBS ในน้ำเสียสังเคราะห์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการบำบัด SDBS ในน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มลดลง ที่เวลา 60 นาที มีประสิทธิภาพการบำบัด SDBS ในน้ำเสียสังเคราะห์สูงที่สุด เท่ากับ 57.58%

ประสิทธิภาพการบำบัด SDBS ในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยการบำบัดแบบ Photodegradation เท่ากับ 57.58% และการบำบัดแบบ Adsorption เท่ากับ 50% ดังนั้น การบำบัดแบบ Photodegradation ดีกว่าการบำบัดแบบ Adsorption เนื่องจากแสง UV เร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพในการสลาย SDBS



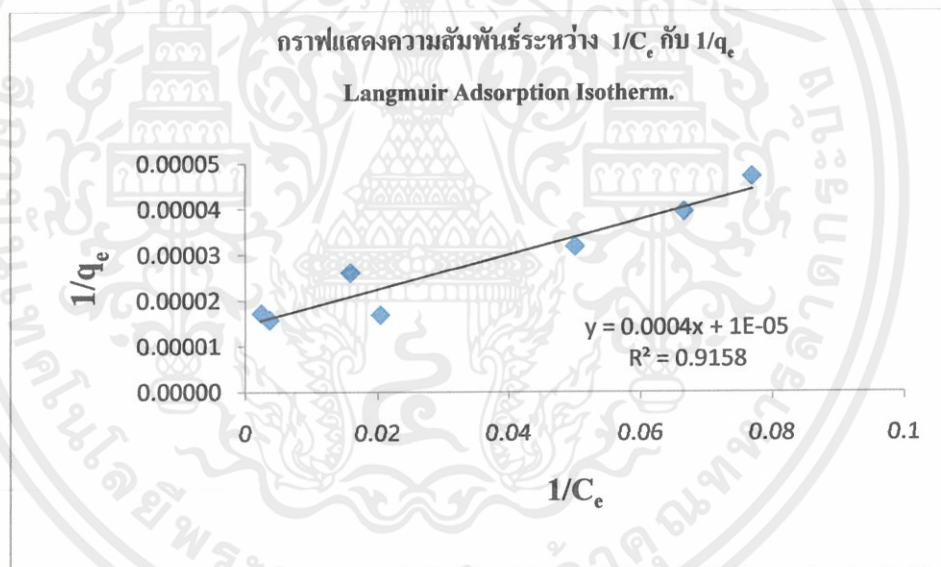
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับ ประสิทธิภาพในการบำบัด SDBS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ไอโซเทอมของการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ (Isotherm Absorption)

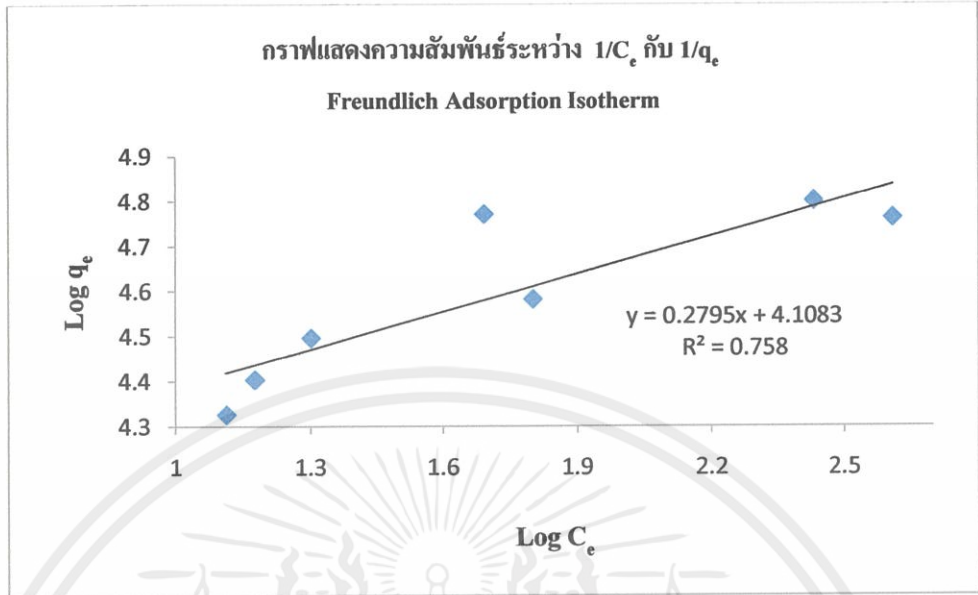
ไอโซเทอมของการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยสารผสม FA-TiO₂ เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารผสม FA-TiO₂ กับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหลืออยู่ ที่สภาวะสมดุลที่ pH 7 เป็นเวลา 90 นาที

ไอโซเทอมของการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สารผสม FA-TiO₂ จากสมการแลงเมียร์ และ ฟรุนดริช แสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ จากค่า R² เท่ากับ 0.9158 ของสมการแลงเมียร์ มีความเข้าใจ ใกล้เคียง 1 มากที่สุด อธิบายได้ว่าเป็นการบำบัดทางกายภาพและการยึดเหนี่ยวระหว่างตัวดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับ เป็นการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้ โมเลกุลที่ถูกดูดซับที่ผิวจัดเรียงตัวเป็นชั้นเดียว (monolayer)

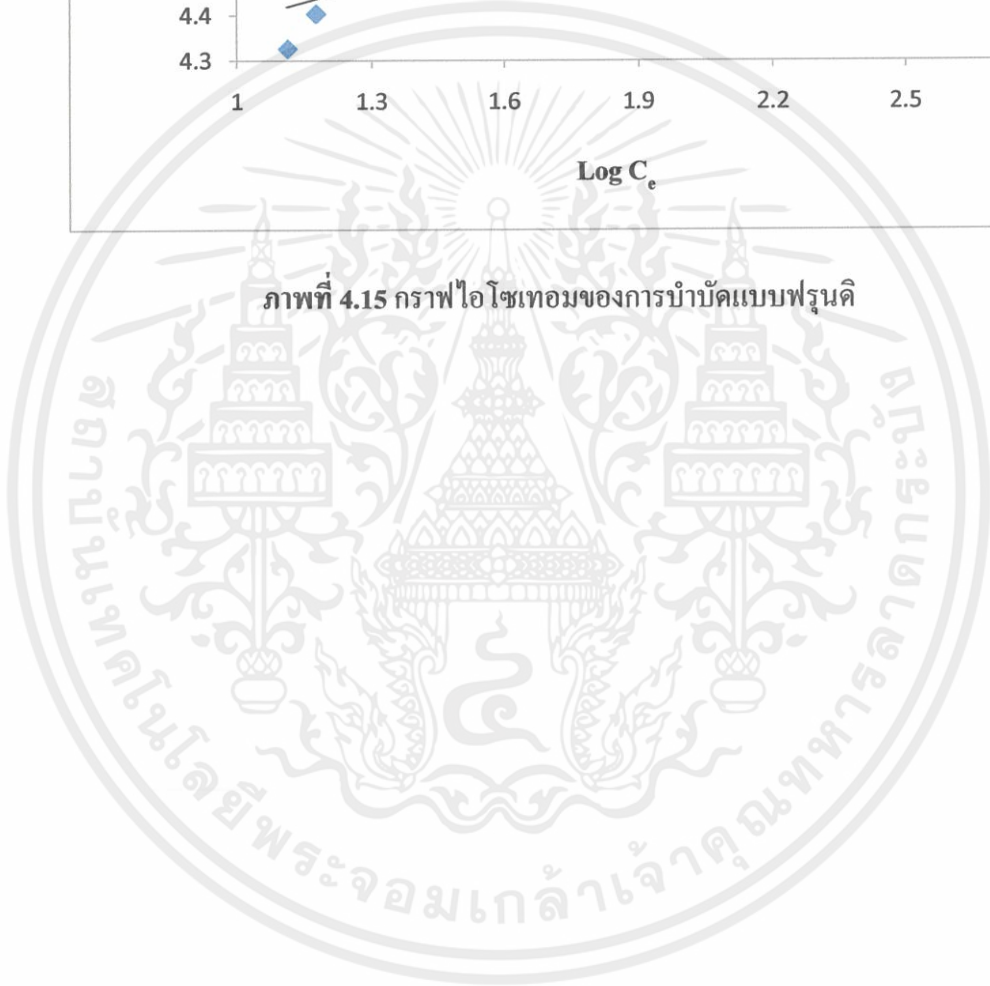


รูปที่ 4.14 กราฟไอโซเทอมของการบำบัดแบบแลงเมียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.15 กราฟไอโซเทอมของการบำบัดแบบฟรุนดิ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

วัสดุที่นำมาใช้เป็นวัสดุประเภท C จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เมื่อร้อนผ่านตะแกรงขนาด 325 mesh และเมื่อถ่ายภาพด้วยกล้อง scanning electron microscope (SEM) พบว่า พื้นผิวของอนุภาคจะเรียบ และมีรูพรุนเป็นองค์ประกอบ สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุจะอยู่ในรูปของออกไซด์ต่างๆ โดยส่วนใหญ่จะเป็น SiO_2 และเมื่อนำวัสดุนี้มาล้างด้วยน้ำ Ultra pure เพื่อกำจัด NaCl และ KCl (ภควัฒน์, 2546) หลังการปรับปรุงคุณภาพวัสดุโดยการนำมารวมกับไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการรีฟลักซ์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ได้สารผสม (FA-TiO_2) ที่มีคุณสมบัติดูดซับโลหะหนักและสลายสารอินทรีย์ได้ โดยการทำการทดลองหาความเหมาะสมในการทำการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ จะได้ปริมาณสารผสม (FA-TiO_2) 0.4 กรัม ที่ pH 7 และเวลา 90 นาที เป็นค่าความเหมาะสมในการทำการทดลองการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อหาไอโซเทอมการบำบัดพบว่า การบำบัดของสารผสม (FA-TiO_2) เป็นการบำบัดทางกายภาพเพราะสารที่ถูกดูดซับสามารถผันกลับได้ โดยเกิดการหลุดออกมาของอนุภาคที่ถูกดูดซับคือ desorption ของสาร และประสิทธิภาพการสาร SDBS ของไทเทเนียมไดออกไซด์พบว่าให้ประสิทธิภาพการบำบัดด้วยการบำบัดแบบไม่ฉายแสงสูงสุดถึง 48.81% และประสิทธิภาพการบำบัดด้วยการบำบัดแบบ Photodegradation สูงสุดถึง 57.39% แต่การบำบัดแคดเมียมทั้งแบบ Photodegradation และไม่ฉายแสงมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรหาค่าล้างของหลอด UV ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์
2. เมื่อครบเวลาที่เขย่าบนเครื่องเขย่าแล้วควรนำไปปั่นเหวี่ยงในทันที ถ้าทิ้งเกินเวลาที่กำหนดแล้วอาจเกิดการ desorption ของสารได้
3. ควรหาค่าตัวเปรียบเทียบของปริมาณที่เหมาะสม ค่า pH และเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์
4. หาอัตราส่วนของเถ้าลอยและไทเทเนียมไดออกไซด์ในการรีฟลักซ์สารผสม (FA-TiO₂)
5. ควรทำการทดลองในที่มืดในที่มืดเพื่อเป็นชุดควบคุม
6. ควรใช้เครื่องมือที่สามารถกำหนดอุณหภูมิที่แน่นอนได้
7. ควรทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพด้วยเครื่อง BET เพื่อวัดพื้นที่ผิวของอนุภาค และ AFM เพื่อบอกลักษณะความขรุขระ ความหยาบ ความสูงต่ำของพื้นผิว
8. ควรศึกษาในเรื่องการตกตะกอนร่วม ว่ามีส่วนเกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์นี้หรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- ปริญญา จินดาประเสริฐ. **เถ้าลอยในงานคอนกรีต**. กรุงเทพฯ : สมาคมคอนกรีตไทย, 2547.
- พิมพ์ ศรีจันทร์ภิมุข. **เครื่องสำอางค์เพื่อความสะอาดตำราเครื่องสำอางค์สำหรับผิวหนัง เล่ม 2**. ภาควิชาเภสัชอุตสาหกรรม คณะเภสัช. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2549.
- กาญจนา เขียวเนตรและคณะ. **ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่เอชไอดีของสารลดแรงตึงผิว**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิตภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544.
- รวินทร์ สุทธะนันท์ และ กุวิทย์ ปิยะมังคลา. **جلنศาสตร์และเทอร์โอดเคมีการบำบัดเมททีลินบลูโดยใช้เกลบคัดแปลง**, วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 21, ฉบับที่ 2, หน้า 337-348, 2554.
- ยุวรัตน์ ปรมีสนาภรณ์. **การพัฒนาวัสดุดูดซับจากเถ้าลอยเพื่อกำจัดแคดเมียม**, วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรชีวภาพ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2554.
- วิสาขา ภูจินดา. **การใช้ประโยชน์สารลดแรงตึงผิวในการบำบัดน้ำเสีย**. การจัดการสิ่งแวดล้อม 1, ฉ 1 34-37, 2548.
- ทำเอง – ทำได้, 2547, (กันยายน, 16), **แหล่งที่พบและหน้าที่ของสารลดแรงตึงผิว (Online)**, Available URL: www.tam-aeng.com/surfactant%20basic.asp, Hazardous Waste Clean Up Information. 2004. (September, 10)
- จิราภรณ์ วงศ์สุวรรณ, 2556, **การดูดซับและการแลกเปลี่ยนไอออน (Online)**, Available URL: www.kasetpibul.net, (August, 19) D.P. Paritosh, P. Anjali, B. Manas, “**Adsorption of anionic surfactant by a lowcost adsorbent**”, J. Environ. Sci. Health, Part A: Toxic/Hazard Subst. Environ. Eng. 37 (2002) 925–938.
- A. Adak, M. Bandyopadhyay, A. Pal, **Removal of anionic surfactant from wastewater by alumina: a case study**, Colloid. Surf, 254 (2005) 165–171.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

M.Visa , A. Duta, **TiO₂/fly ash novel substrate for simultaneous removal of heavy metals and surfactants**, Chemical Engineering Journal, 223 (2013) 860–868. Romos, L.R., Nendez, R.Jr., Borron, M.J., Rubio, F.L. and Coronado, G., 1997, **Adsorption of Cadmium from aqueous solution onto activated carbon**, Water science Technology, Vol. 35, On 7, pp. 205-211



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การเตรียมสาร

1. การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 N
 - 1.1 ชั่ง NaOH 80 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นในบีกเกอร์
 - 1.2 เทสารละลายลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 mL
 - 1.3 ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น
 - 1.4 ปิด NaOH ที่เตรียมไว้ มา 10 ml ใส่ขวดปริมาตร 100
 - 1.5 เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีด
 - 1.6 นำไปเทียบกับสารละลายมาตรฐานปรอทอมิโทแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลด(KHP)
2. การเตรียมสารละลายมาตรฐานปรอทอมิโทแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลด(KHP) 0.2 N
 - 2.1 ชั่ง สาร KHP มาจำนวน 4.0870 กรัม
 - 2.2 ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 mL
3. การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มี Cd^{2+} เข้มข้น 600 mg/L และ SDBS เข้มข้น 150 mg/L
 - 3.1 ชั่ง CdCl_2 มา 1.2186 g แล้วละลายด้วยน้ำกลั่น แล้วจึงเทใส่ขวดปรับปริมาตร 1000 ml
 - 3.2 ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น
 - 3.3 ชั่ง SDBS มา 0.15 g แล้วละลายด้วยน้ำกลั่น แล้วจึงเทใส่ขวดปรับปริมาตร 1 ลิตร (คนละขวดกับ CdCl_2)
 - 3.4 ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น
 - 3.5 นำ CdCl_2 และ SDBS เทใส่ภาชนะปิดฝาแล้วเขย่าให้เข้ากันเขียนฉลาก และวันที่เตรียมสาร
ติดข้างภาชนะให้ชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

1. การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 N

1.1. การหาน้ำหนักสาร

นอร์มอล (Normality, N) คือ จำนวนกรัมสมมูลของสารละลาย 1 ลิตร

จำนวนกรัมสมมูล = น้ำหนักสาร(กรัม)/น้ำหนักสมมูล (กรัมสมมูล)

น้ำหนักสมมูล (กรัมสมมูล) = น้ำหนักสูตรของสาร (กรัม/โมล) / n

สำหรับปฏิกิริยา กรด - เบส n คือ จำนวนไฮโดรเจนในโมเลกุลของกรดที่สามารถให้ หรือ

จำนวนไฮโดรเจนที่เบสสามารถทำปฏิกิริยาได้

น้ำหนักสมมูลของ NaOH = 40 (กรัม/โมล)/1

$$2 \text{ N} = \text{น้ำหนักสาร} / 40 \text{ กรัมสมมูล}$$

$$2 \text{ นอร์มอล} \times 40 \text{ กรัมสมมูล} = 80 \text{ กรัม}$$

เพราะฉะนั้นจะได้น้ำหนักของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 80 กรัม

1.2. การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของโซเดียมไฮดรอกไซด์

ไทเทรต NaOH 25 ml ด้วยสารละลายมาตรฐานปฐุมภูมิโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต 0.2 N

จากสูตร $C_1V_1 = C_2V_2$

C_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานปฐุมภูมิโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต

C_2 คือ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

V_1 คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานปฐุมภูมิโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต

V_2 คือ ปริมาตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการไทเทรต ใช้สารละลายมาตรฐานปฏุมภูมิโพแทสเซียมไฮโครเจนพทาเลตไป 25 มิลลิลิตร

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$0.2N \times 25mL = C_2 \times 25mL$$

$$\frac{0.2N \times 25mL}{25mL} = 0.2N$$

จากการคำนวณ NaOH ที่เจือจางเท่ากับ 0.2 N เพราะฉะนั้น NaOH ที่เตรียมจะเท่ากับ 2 N

2. การคำนวณประสิทธิภาพในการบำบัด

$$\% \text{ Efficiency} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100$$

จากการหาค่าปริมาณสารผสม(Fa-TiO₂) ที่ใช้ในการบำบัดครั้งแรกที่ปริมาณ 0.4 กรัม มีปริมาณแคดเมียมที่เหลือเท่ากับ 55 มิลลิกรัมต่อลิตร จากค่าเริ่มต้นที่ 522 มิลลิกรัมต่อลิตร จะได้เปอร์เซ็นต์ในการบำบัดเท่ากับ 89.46 เปอร์เซ็นต์

$$\% \text{ Efficiency} = \frac{(522 - 55)}{522} \times 100$$

$$= 89.46 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

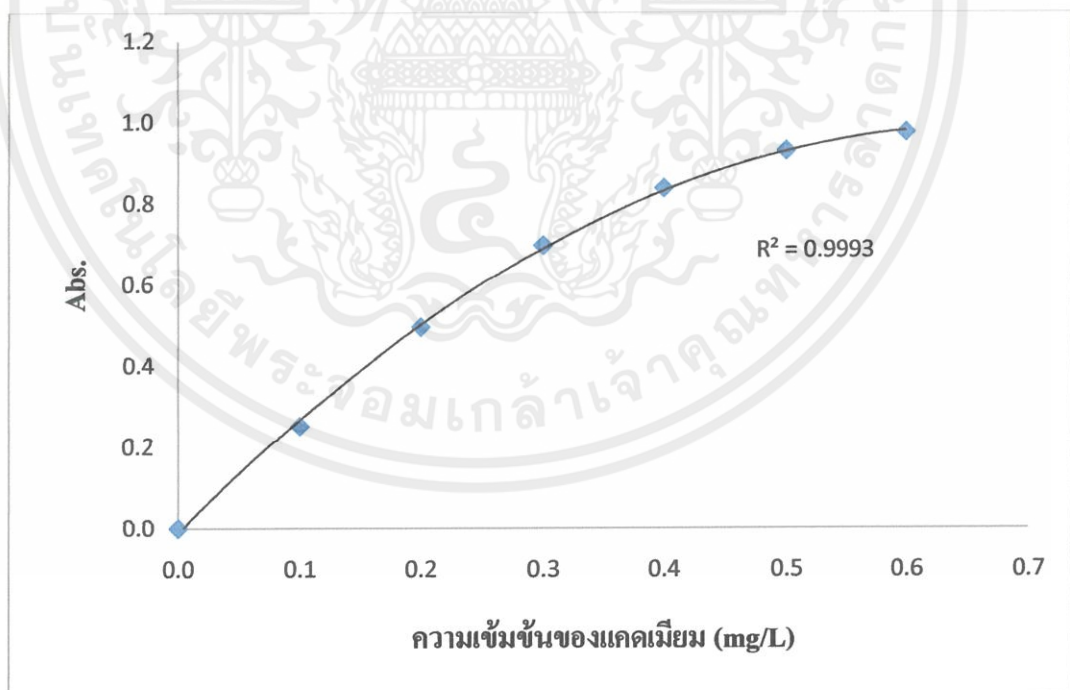
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ผลการทดลอง

ตารางที่ ค-1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมที่วัดด้วยเครื่อง AAS

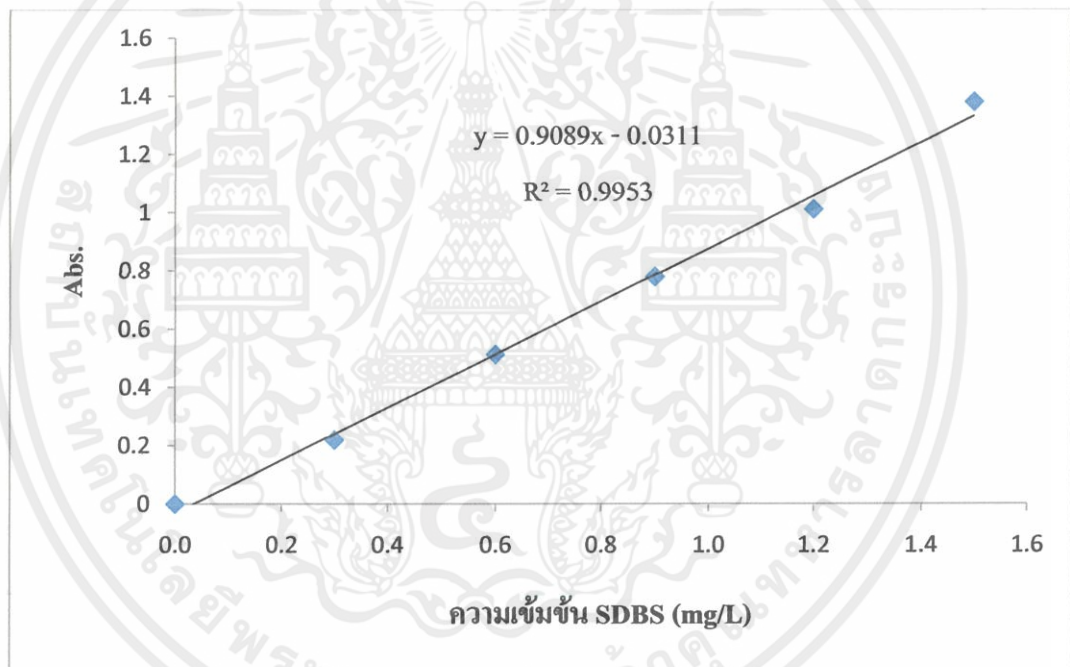
Standard ID	Entered Conc. (mg/L)	Calculated Conc.
H ₂ O	0.0	0.000
Cd1	0.1	0.095
Cd2	0.2	0.213
Cd3	0.3	0.342
Cd4	0.4	0.414
Cd5	0.5	0.474
Cd6	0.6	0.516



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ ค-1 กราฟมาตรฐานแคดเมียม
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-2 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานSDBSที่วัดด้วยเครื่อง UV-Vis

ค่าความเข้มข้น (mg/L)	ค่าการดูดกลืนแสง
0.3	0.219
0.6	0.513
0.9	0.780
1.2	1.011
1.5	1.380



รูปที่ ค-2 กราฟมาตรฐานSDBS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-3 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดแควมเมียมของการหาปริมาณสารผสม (FA-TiO₂) ที่เหมาะสม ด้วยวิธีการบำบัดแบบ Adsorption

MASS[g]	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		SUM Efficiency [%]	Average Efficiency [%]	SD
	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]			
0.10	391.00	92.51	397.00	82.28	398.00	84.24	1054.03	351.34	170.47
0.20	259.00	95.04	265.00	81.79	268.00	84.33	794.16	264.72	98.42
0.40	55.00	98.95	47.00	81.04	51.00	84.47	362.47	120.82	22.52
0.60	40.00	99.23	17.00	80.99	10.00	84.48	291.71	97.24	41.58
0.80	14.00	99.73	15.00	80.89	16.00	84.50	296.13	98.71	40.54
1.00	11.00	99.79	13.00	80.88	11.00	84.51	289.18	96.39	42.45
1.20	12.00	99.77	15.00	80.89	12.00	84.50	292.16	97.39	41.64

ตารางที่ ค-4 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดแคดเมียมในการหาปริมาณสารผสม (FA-TiO₂) ที่เหมาะสม ด้วยวิธีการบำบัด แบบ Photodegradation

MASS[g]	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		SUM Efficiency [%]	Average Efficiency [%]	S.D.
	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]			
0.10	395.00	92.43	406.00	92.22	308.00	93.06	991.72	330.57	148.92
0.20	262.00	94.98	269.00	94.85	165.00	96.28	720.11	240.04	76.09
0.40	55.00	98.95	49.00	99.06	26.00	99.41	372.42	124.14	34.73
0.60	32.00	99.39	63.00	98.79	19.00	99.57	379.75	126.58	35.50
0.80	26.00	99.50	20.00	99.62	21.00	99.53	339.65	113.22	43.30
1.00	16.00	99.69	15.00	99.71	21.00	99.53	334.93	111.64	44.77
1.20	28.00	99.46	13.00	99.75	21.00	99.53	332.74	110.91	45.32

ตารางที่ ค-5 แสดงประสิทธิภาพการบำบัด SDBS ของการหาปริมาณสารผสม (FA-TiO₂) ที่เหมาะสม ด้วยวิธีการบำบัดแบบ Adsorption

MASS [g]	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			SUM Efficiency [%]	Average Efficiency [%]	S.D.
	Abs.	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Abs.	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Abs.	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]			
0.10	1.57	94.50	42.90	1.628	49.50	24.47	1.496	45.25	60.65	222.77	74.26	13.14
0.20	1.44	86.50	47.73	1.510	45.50	28.70	1.141	34.50	70.00	226.43	75.48	15.88
0.40	1.37	82.50	50.15	1.272	38.50	28.70	1.505	45.50	60.43	223.29	74.43	11.96
0.60	1.85	112.00	32.33	1.874	56.50	31.72	1.752	53.00	53.91	227.46	75.82	12.36
0.80	1.89	114.50	30.82	1.925	58.25	29.91	0.236	56.25	51.09	226.31	75.44	13.85
1.00	0.05	135.50	18.13	0.260	68.75	38.97	0.236	65.25	43.26	234.36	78.12	20.73
1.20	0.05	145.50	12.08	0.247	67.00	40.18	0.298	70.75	38.48	228.49	76.16	23.95

ตารางที่ ค-6 แสดงประสิทธิภาพการบำบัด SDBS ในการหาปริมาณสารผสม (FA-TiO₂) ที่เหมาะสม ด้วยวิธีการบำบัด แบบ Photodegradation

MASS[g]	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			SUM Efficiency [%]	Average Efficiency [%]	S.D.
	Abs.	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Abs.	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Abs.	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]			
0.10	1.571	95.00	42.60	1.770	53.50	67.67	1.796	54.25	52.83	216.60	72.20	10.30
0.20	1.290	78.00	52.87	1.624	49.00	70.39	1.948	58.75	48.91	221.18	73.73	10.23
0.40	1.517	91.50	44.71	1.994	60.25	63.60	0.257	77.5	32.61	201.17	67.06	14.38
0.60	1.734	104.50	36.86	1.884	57.00	65.56	0.245	75	34.78	194.20	64.73	15.13
0.80	0.264	160.00	3.32	0.293	58.75	64.50	0.282	85	26.09	152.66	50.89	28.74
1.00	0.206	125.00	24.47	0.261	72.75	56.04	0.302	90	21.74	175.00	58.33	24.82
1.20	0.238	144.00	12.99	0.302	74.75	54.83	0.294	90	21.74	164.31	54.77	28.79

ตารางที่ ค-7 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดแคดเมียมในการหา pH ที่เหมาะสมของน้ำเสียสังเคราะห์

	pH	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		SUM Efficiency [%]	Average Efficiency [%]	S.D.
		Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]			
		Adsorption	4.00	0.70	99.86	0.60	99.88			
	5.00	0.40	99.92	0.30	99.94	2.00	99.55	301.71	60.34	54.04
	6.00	1.00	99.79	1.30	99.73	3.25	99.27	303.34	60.67	53.31
	7.00	1.90	99.96	2.10	99.57	2.50	99.44	303.56	60.71	53.32
	8.00	0.10	99.98	1.60	99.67	2.50	99.44	303.19	60.64	53.48
	pH	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		SUM Efficiency [%]	Average Efficiency [%]	S.D.
		Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]			
		Photo- degradation	4.00	1.80	99.63	2.00	99.96			
	5.00	1.40	99.71	1.40	99.71	2.75	99.38	302.95	60.59	53.42
	6.00	3.40	99.30	3.00	99.38	7.25	98.37	307.30	61.46	51.45
	7.00	2.50	99.48	1.80	99.63	2.50	99.44	302.85	60.57	53.33
	8.00	0.90	99.81	1.00	99.79	1.00	99.77	301.38	60.28	54.11

ตารางที่ 8-8 แสดงประสิทธิภาพการบำบัด SDBS ในการหา pH ที่เหมาะสมของน้ำเสียสังเคราะห์

	pH	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		SUM Efficiency [%]	Average Efficiency [%]	S.D.
		Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]			
		Adsorption	4.00	102.50	26.79	97.50	30.36			
	5.00	72.50	48.21	95.00	32.14	87.50	23.91	286.77	57.35	32.26
	6.00	72.50	48.21	67.50	51.79	42.25	63.26	273.01	54.60	10.52
	7.00	47.50	66.07	62.50	55.36	45.00	60.87	289.80	57.96	8.21
	8.00	55.00	60.71	56.75	59.46	67.50	41.30	285.73	57.15	9.70
	pH	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		SUM Efficiency [%]	Average Efficiency [%]	S.D.
		Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]			
		Photo- degradation	4.00	97.50	30.36	55.00	60.71			
	5.00	60.00	57.14	87.50	37.50	92.50	19.57	294.21	58.84	31.45
	6.00	62.50	55.36	62.50	55.36	32.50	71.74	277.45	55.49	14.51
	7.00	50.00	64.29	47.50	66.07	48.75	57.61	284.22	56.84	8.57
	8.00	85.00	39.29	72.50	48.21	62.50	45.65	268.15	53.63	13.54

ตารางที่ ๙-๑ แสดงประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ pH 6 และ pH 7 ด้วยวิธีการบำบัด แบบ Adsorption

	Time [min]	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		Average Efficiency [%]	S.D.
		Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]		
pH 6	30	2.00	98.18	2.00	98.18	2.00	98.18	98.18	0.26
	60	2.25	97.95	2.00	98.18	2.25	97.95	98.03	0.23
	90	2.00	98.18	2.00	98.18	2.00	98.18	98.18	0.00
	120	1.75	98.41	1.75	98.41	1.75	98.41	98.41	0.27
	150	1.75	98.41	1.75	98.41	1.75	98.41	98.41	0.39
	180	1.75	98.41	1.75	98.41	1.75	98.41	98.41	0.27
	Time [min]	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		Average Efficiency [%]	S.D.
		Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]		
pH 7	30.00	3.50	96.82	3.00	97.27	3.00	97.27	97.12	0.26
	60.00	3.75	96.59	3.00	97.27	3.25	97.05	96.97	0.35
	90.00	3.25	97.05	3.00	97.27	3.25	97.05	97.12	0.13
	120.00	3.25	97.05	3.25	97.05	3.50	96.82	96.97	0.13
	150.00	3.50	96.82	2.50	97.73	2.50	97.73	97.43	0.53
	180.00	3.75	96.59	3.25	97.05	3.75	96.59	96.74	0.26

ตารางที่ ค-10 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ pH 6 และ pH 7 ด้วยวิธีการบำบัด แบบ Photodegradation

	Time [min]	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		Average Efficiency [%]	S.D.
		Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]		
		pH 6							
	30.00	1.50	98.64	1.75	98.41	1.50	98.64	98.56	0.13
	60.00	1.75	98.41	1.75	98.41	1.75	98.41	98.41	0.00
	90.00	2.00	98.18	2.25	97.95	2.00	98.18	98.11	0.13
	120.00	2.25	97.95	2.00	98.18	2.25	97.95	98.03	0.13
	150.00	2.50	97.73	2.25	97.95	2.50	97.73	97.80	0.13
	180.00	2.50	97.73	2.25	97.95	2.25	97.95	97.88	0.13
pH 7									
	Time [min]	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		Average Efficiency [%]	S.D.
		Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]		
	30.00	1.75	98.41	1.75	98.41	1.75	98.41	98.41	0.00
	60.00	1.75	98.41	2.00	98.18	2.00	98.18	98.26	0.13
	90.00	2.75	97.50	2.00	98.18	2.25	97.95	97.88	0.35
	120.00	2.00	98.18	2.50	97.73	2.25	97.95	97.95	0.23
	150.00	3.50	96.82	3.00	97.27	3.25	97.05	97.05	0.23
	180.00	2.25	97.95	2.25	97.95	2.25	97.95	97.95	0.00

ตารางที่ ก-11 แสดงประสิทธิภาพการบำบัด SDBS ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ pH 6 และ pH 7 ด้วยวิธีการบำบัด Adsorption

	Time [min]	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		Average Efficiency [%]	S.D.
		Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]		
pH 6	30.00	100.00	39.39	97.50	40.91	100.00	39.39	39.90	0.88
	60.00	100.00	39.39	95.00	42.42	97.50	40.91	40.91	1.52
	90.00	85.00	48.48	92.50	43.94	92.50	43.94	45.45	2.62
	120.00	87.50	46.97	82.50	50.00	97.50	40.91	45.96	4.63
	150.00	95.00	42.42	97.50	40.91	92.50	43.94	42.42	1.52
	180.00	97.50	40.91	92.50	43.94	97.50	40.91	41.92	1.75
	Time [min]	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		Average Efficiency [%]	S.D.
		Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]		
pH 7	30.00	87.50	46.97	87.50	46.97	100.00	39.39	44.44	4.38
	60.00	90.00	45.45	87.50	46.97	97.50	40.91	44.44	3.15
	90.00	82.50	50.00	82.50	50.00	92.50	43.94	47.98	3.50
	120.00	95.00	42.42	105.00	36.36	97.50	40.91	39.90	3.15
	150.00	102.50	37.88	102.50	37.88	92.50	43.94	39.90	3.50
	180.00	90.00	45.45	100.00	39.39	97.50	40.91	41.92	3.15

ตารางที่ ค-12 แสดงประสิทธิภาพการบำบัด SDBS ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ pH 6 และ pH 7 ด้วยวิธีการบำบัด แบบ Photodegradation

	Time [min]	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		Average Efficiency [%]	S.D.	
		Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]			
		pH 6		30.00	87.50	46.97	85.00			48.48
		60.00	82.50	50.00	80.00	51.52	82.50	50.00	50.51	0.87
		90.00	87.50	46.97	75.00	54.55	75.00	54.55	52.02	4.38
		120.00	92.50	43.94	85.00	48.48	85.00	48.48	46.97	2.62
		150.00	85.00	48.48	85.00	48.48	85.00	48.48	48.48	0.00
		180.00	77.50	53.03	97.50	40.91	77.50	53.03	48.99	7.00
	Time [min]	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		Average Efficiency [%]	S.D.	
		Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]			
		pH 7		30.00	75.00	54.55	72.50			56.06
		60.00	80.00	51.52	70.00	57.58	82.50	50.00	53.03	4.01
		90.00	75.00	54.55	70.00	57.58	75.00	54.55	55.56	1.75
		120.00	75.00	54.55	80.00	51.52	85.00	48.48	51.51	3.03
		150.00	82.50	50.00	85.00	48.48	85.00	48.48	48.99	0.88
		180.00	85.00	48.48	80.00	51.52	77.50	53.03	51.01	2.31

ตารางที่ ค-13 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ สำหรับการหาเวลาที่เหมาะสม

	Time [min]	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		Average Efficiency [%]	S.D.
		Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]		
		Adsorption	30.00	5.50	98.76	5.75	98.70		
	60.00	5.00	98.87	5.75	98.70	2.75	99.38	98.99	0.35
	90.00	5.25	98.82	4.75	98.93	3.25	99.27	99.01	0.23
	120.00	20.25	95.44	5.00	98.87	3.25	99.27	97.86	2.11
	150.00	3.75	99.16	4.75	98.93	2.25	99.49	99.19	0.28
	180.00	5.25	98.82	4.75	98.93	3.25	99.27	99.01	0.23
	Time [min]	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		Average Efficiency [%]	S.D.
		Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]		
		Photo- degradation	30.00	2.75	99.43	3.50	99.21		
	60.00	0.75	99.85	3.00	99.32	2.75	99.38	99.52	0.29
	90.00	5.00	98.97	3.00	99.32	2.50	99.44	99.24	0.24
	120.00	3.50	99.28	2.50	99.44	2.25	99.49	99.40	0.11
	150.00	3.25	99.33	2.25	99.49	2.00	99.55	99.46	0.11
	180.00	3.25	99.33	2.50	99.44	2.75	99.38	99.38	0.05

ตารางที่ ค-14 แสดงประสิทธิภาพการบำบัด SDBS ในน้ำเสียสังเคราะห์สำหรับการหาเวลาที่เหมาะสม

	Time [min]	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		Average Efficiency [%]	S.D.
		Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]		
		Adsorption	30.00	96.00	16.52	98.00	14.78		
	60.00	97.50	15.22	102.50	10.87	95.00	32.14	19.41	11.24
	90.00	97.50	15.22	97.50	15.22	100.00	28.57	19.67	7.71
	120.00	90.00	21.74	100.00	13.04	102.50	26.79	20.52	6.95
	150.00	85.00	26.09	100.00	13.04	100.00	28.57	22.57	8.34
	180.00	90.00	21.74	92.00	20.00	112.50	19.64	20.46	1.12
	Time [min]	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		Average Efficiency [%]	S.D.
		Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]	Conc. [mg/l]	Efficiency [%]		
		Photo- degradation	30.00	99.50	28.93	101.50	27.50		
	60.00	70.00	50.00	82.50	41.07	90.00	35.71	42.26	7.22
	90.00	85.00	39.29	87.50	37.50	82.50	41.07	39.29	1.79
	120.00	80.00	42.86	95.00	32.14	82.50	41.07	38.69	5.74
	150.00	86.00	38.57	84.50	39.64	85.50	38.93	39.05	0.55
	180.00	87.50	37.50	86.00	38.57	86.50	38.21	38.10	0.55