

การตกตะกอนของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงโครงสร้างนาโนไททานต

วงศ์กร อิศรพร
อารยา เชื้อบุปผา

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

การตกตะกอนของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงโครงสร้างนาโนไททานต

วงศ์กร อิศรพร
อารยา เชื้อบุปผา

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

Titanate nanostructures: Photocatalyst and Precipitation

Wongskorn

Itsaraporn

Araya

Chuebupa

THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF BACHERLOR IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2014

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การตกตะกอนของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงโครงสร้างนาโนไททานเนต
โดย นายวงศกร อิศรพร
นางสาวอารยา เชื้อบุปผา
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์
ปริญญาานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ

(ดร.กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์)


.....กรรมการ

(ผศ.ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์)


.....กรรมการ

(ดร.ณัฐนันท์ ไพบุลย์ศิลป์)

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การตกตะกอนของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงโครงสร้างนาโนไททาเนต
โดย	นายวงศกร อิศรพร นางสาวอารยา เชื้อบุปผา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์
ปริญญานิพนธ์	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการตกตะกอนของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในน้ำ โดยใช้โซเดียมริบบอนนาโนไททาเนต ไฮโดรเจนริบบอนนาโนไททาเนต และโซเดียมท่อนาโนไททาเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ซึ่งสังเคราะห์จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล โดยเมื่อนำไปวิเคราะห์สัณฐานและลักษณะพื้นผิวของสารประกอบริบบอนนาโนไททาเนต ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด มีลักษณะสัณฐานเป็นแผ่นยาวคล้ายริบบิ้นซ้อนทับกัน และมีความหนาแน่นมากกว่า สารประกอบท่อนาโนไททาเนต ซึ่งมีลักษณะสัณฐานรูปร่างคล้ายท่อ เมื่อนำไปศึกษาการตกตะกอนด้วยวิธี Jar test จากการทดลองพบว่า โซเดียมริบบอนนาโนไททาเนตจะตกตะกอนเร็วกว่าไฮโดรเจนริบบอนนาโนไททาเนตและโซเดียมท่อนาโนไททาเนต เนื่องจากความหนาแน่นรวมของโซเดียมริบบอนนาโนไททาเนตมากที่สุด นอกจากนี้โซเดียมริบบอนนาโนไททาเนตจะตกตะกอนได้ดีกว่าไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีความหนาแน่นมากกว่าโซเดียมริบบอนนาโนไททาเนต เนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์มีขนาดอนุภาคใหญ่จึงทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค และตกตะกอนช้ากว่าโซเดียมริบบอนนาโนไททาเนต

Report Title Titanate nanostructures : Photocatalyst and Precipitation

By Mr.Wongskorn Itsaraporn
Miss.Araya Chuebupa

Advisors Dr. Kunlanan Kiatkittipong

Report for Bachelor of Engineering (Chemical Engineering)
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

ABSTRACT

This research is studied effect on precipitation of photocatalyst by using Titanate nanoribbon sodium, Titanate nanoribbon hydrogen and Titanate nanotube sodium as photocatalyst was synthesized by a hydrothermal process. Structure of particle was analyzed by scanning electron microscope (SEM). Titanate nanoribbon, its alike long ribbon which continuously overlap and have density more than Titanate nanotube. For Titanate nanotube, it's alike tube. Beside synthesis, Jar Test is used to study precipitation of nanotitanate. In experimental result, sodium titanate nanoribbon precipitate faster than hydrogen titanate nanoribbon and sodium titanate nanotube because sodium titanate nanoribbon have the most density. However, titanate nanoribbon precipitate faster than titanium dioxide which have density more than titanate nanoribbon because of titanium dioxide's size that make friction force between particles and water. So, it's slowly precipitate.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร.กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท ที่มอบความรู้ให้ คำปรึกษาคำแนะนำโดยมาตลอดในการทำปริญญาโท ทำให้ปริญญาโทสำเร็จอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ดร.นริศรา ทองบุญชู อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำและอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือ Jar test

ขอขอบพระคุณ ศ.ดร. สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์ และดร.อัครวัต ศิริสุข อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำแนะนำและอนุเคราะห์การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ขอขอบพระคุณ ศูนย์เครื่องมือเพื่อการวิจัยทางวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตรมิเตอร์ (X-ray Diffractometer: XRD)

ขอขอบพระคุณ คณะอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความรู้ คำแนะนำและข้อคิดในการทำปริญญาโท

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ให้การช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ

วงศ์กร อิศรพร

อารยา เชื้อบุปผา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูปภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตโครงการ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 การสังเคราะห์สารประกอบนาโนไททาเนียมออกไซด์	3
2.1.1 ไททาเนียมไดออกไซด์	3
2.1.2 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง	4
2.1.3 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล	5
2.2 การตกตะกอน	5
2.2.1 การตกตะกอน	6
2.2.2 การตกตะกอนของอนุภาคคอลลอยด์	7
2.2.2.1 กระบวนการสร้างตะกอน	7
2.2.2.2 กระบวนการรวมตะกอน	9
2.2.2.3 สารช่วยในการตกตะกอน	9
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	12
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	12
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	12
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์	12
3.4 การสังเคราะห์ริบบอนนาโนไททาเนตด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล	13
3.5 การสังเคราะห์ท่อนาโนไททาเนตด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล	13
3.6 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมี	14
3.7 การศึกษาการตกตะกอนโดยวิธี Jar test	14
3.8 การทดสอบค่าของแข็งแขวนลอย	15

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.9 การศึกษาความหนาแน่นของริบบอนนาโนไททาเนต และท่อนาโนไททาเนต	15
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	16
4.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา	16
4.1.1 การสังเคราะห์ริบบอนนาโนไททาเนต	17
4.1.2 การสังเคราะห์ท่อนาโนไททาเนต	19
4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่ใช้ในการตกตะกอน	20
4.2.1 ความเข้มข้นของสารตั้งต้น	20
4.2.2 ปริมาตรของสารส้มที่ช่วยในการตกตะกอน	21
4.3 ผลการศึกษาปัจจัยภายนอกและภายในที่มีผลต่อการตกตะกอน	22
4.3.1 ลักษณะทางโครงสร้าง	22
4.3.1.1 ริบบอนโซเดียมไททาเนตกับท่อนาโนโซเดียมไททาเนต	22
4.3.1.2 โครงสร้างโซเดียมและไฮโดรเจนริบบอนนาโนไททาเนต	23
4.3.2 ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำ	24
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	26
5.1 สรุปผลการทดลอง	26
5.3 ข้อเสนอแนะ	27
เอกสารอ้างอิง	28
ภาคผนวก	30
ภาคผนวก ก ผลศึกษาสภาวะที่ใช้ในการตกตะกอน	31
ภาคผนวก ข ผลศึกษาปัจจัยภายนอกและภายในที่มีผลต่อการตกตะกอน	34

สารบัญตาราง

ชื่อตาราง	หน้า
2.1 ตัวอย่างสภาวะการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาของสารประกอบไททาเนียมไดออกไซด์	10
ก.1 ผลของแข็งแขวนลอยของไททาเนียมไดออกไซด์ในน้ำประปาที่ความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร	31
ก.2 ผลของแข็งแขวนลอยของไททาเนียมไดออกไซด์ในน้ำประปาที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร	31
ก.3 ผลของแข็งแขวนลอยของไททาเนียมไดออกไซด์ในน้ำประปาที่ความเข้มข้น 2 กรัมต่อลิตร	33
ก.4 ผลของแข็งแขวนลอยของไททาเนียมไดออกไซด์ในน้ำประปาที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร โดยใส่สารส้มที่ช่วยในการตกตะกอน 5 มิลลิลิตร	34
ก.5 ผลของแข็งแขวนลอยของไททาเนียมไดออกไซด์ในน้ำประปาที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร โดยใส่สารส้มที่ช่วยในการตกตะกอน 10 มิลลิลิตร	33
ก.6 ผลของแข็งแขวนลอยของไททาเนียมไดออกไซด์ในน้ำประปาที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร โดยใส่สารส้มที่ช่วยในการตกตะกอน 20 มิลลิลิตร	33
ข.1 ผลของแข็งแขวนลอยของไททาเนียมไดออกไซด์ในน้ำประปาที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร โดยใส่สารส้มที่ช่วยในการตกตะกอน 10 มิลลิลิตร	34
ข.2 ผลของแข็งแขวนลอยของริบบอนนาโนโซเดียมไททาเนตในน้ำประปาที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตรโดยใส่สารส้มที่ช่วยในการตกตะกอน 10 มิลลิลิตร	35
ข.3 ผลของแข็งแขวนลอยของท่อนาโนโซเดียมไททาเนตในน้ำประปาที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร โดยใส่สารส้มที่ช่วยในการตกตะกอน 10 มิลลิลิตร	36
ข.4 ผลของแข็งแขวนลอยของริบบอนนาโนไฮโดรเจนไททาเนตในน้ำประปาที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตรโดยใส่สารส้มที่ช่วยในการตกตะกอน 10 มิลลิลิตร	37
ข.5 ผลของแข็งแขวนลอยของริบบอนนาโนโซเดียมไททาเนตในน้ำประปาที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตรมีความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 10 มี โดยใส่สารส้มที่ช่วยในการตกตะกอน 10 มิลลิลิตร	38
ข.6 ผลของแข็งแขวนลอยของริบบอนนาโนโซเดียมไททาเนตในน้ำประปาที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตรมีความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 6 มี โดยใส่สารส้มที่ช่วยในการตกตะกอน 10 มิลลิลิตร	39
ข.7 ผลของแข็งแขวนลอยของริบบอนนาโนโซเดียมไททาเนตในน้ำประปาที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตรมีความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 3 มี โดยใส่สารส้มที่ช่วยในการตกตะกอน 10 มิลลิลิตร	40

สารบัญรูปร่างภาพ

ชื่อรูปภาพ	หน้า
2.1 โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์	3
2.2 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง	4
2.3 แรงที่กระทำต่ออนุภาคในการตกตะกอน	6
2.4 กระบวนการตกตะกอนอนุภาคคอลลอยด์	7
2.5 กลไกลดความหนาของชั้นกระจาย	8
2.6 กลไกดูดติดผิวและทำลายประจุของอนุภาคคอลลอยด์	8
2.7 กลไกการสร้างผลึกขึ้นมาเพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์มาเกาะจับกัน	9
4.1 ลักษณะสัญญาณและพื้นผิวของไททาเนียมออกไซด์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้น	16
4.2 XRD โครงสร้างผลึกของไททาเนียมออกไซด์แบบอะนาเทส	17
4.3 โครงสร้างโซเดียมริบบอนนาโนไททาเนต ($\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$)	18
4.4 XRD ของโครงสร้างผลึกของโซเดียมริบบอนนาโนไททาเนต	18
4.5 โครงสร้างไฮโดรเจนริบบอนนาโนไททาเนต ($\text{H}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$)	19
4.6 XRD ของโครงสร้างผลึกของไฮโดรเจนริบบอนนาโนไททาเนต	19
4.7 โครงสร้างโซเดียมท่อนาโนไททาเนต ($\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$)	20
4.8 แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำ (มิลลิกรัม ต่อ ลิตร) กับเวลา (นาที) โดยเปรียบเทียบจากความแตกต่างของความเข้มข้นของไททาเนียมออกไซด์ ในน้ำประปาที่ 0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร	21
4.9 แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำ (มิลลิกรัม ต่อ ลิตร) กับเวลา (นาที) โดยเปรียบเทียบจากความแตกต่างของสารส้มความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร ที่ปริมาตร 5 10 และ 20 มิลลิลิตร	22
4.10 แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำ (มิลลิกรัม ต่อ ลิตร) กับเวลา (นาที) โดยเปรียบเทียบจาก ความแตกต่างของโครงสร้างนาโนไททาเนียมไดออกไซด์	23
4.11 แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำ (มิลลิกรัม ต่อ ลิตร) กับเวลา (นาที) โดยเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างโครงสร้างโซเดียมและไฮโดรเจนของ ริบบอนนาโนไททาเนต	24
4.12 แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำ (มิลลิกรัม ต่อ ลิตร) กับเวลา (นาที) โดยเปรียบเทียบจากความแตกต่างของความเป็นกรด-เบสของน้ำ	25

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันวิธีในการกำจัดความเป็นพิษของสารประกอบอินทรีย์ในน้ำเสีย มีหลายวิธี เช่น การบำบัดด้วยวิธีทางกายภาพ การบำบัดด้วยวิธีทางเคมี หรือการบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพ เป็นต้น ในการเลือกใช่วิธีการบำบัดน้ำเสียนั้นจะต้องเลือกวิธีการให้เหมาะสมกับลักษณะการปนเปื้อนของสารที่อยู่ในน้ำเสียที่แตกต่างกันออกไป เช่น ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษจะประกอบไปด้วย ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะต้องเลือกใช่วิธีการบำบัดทางเคมีคือการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ เป็นต้น โดยวิธีการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพจะต้องคำนึงถึงสภาพแวดล้อมที่ต้องสอดคล้องกับการทำงานของจุลินทรีย์ที่ใช้บำบัด วิธีการบำบัดน้ำเสียทางกายภาพให้ประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำ ส่วนวิธีการบำบัดน้ำเสียทางเคมีจะพบว่าการเกิดการตกค้างของสารพิษที่ยังคงสภาพของความเป็นพิษอยู่ หรือเกิดเป็นกากของเสียขึ้น จึงทำให้มีการศึกษากระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalytic activity) ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีที่ได้รับความสนใจในการกำจัดความเป็นพิษของสารประกอบอินทรีย์ในน้ำเสีย และไม่ก่อให้เกิดสารพิษที่ตกค้างเนื่องจากกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันขั้นสูงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำในการกระตุ้นร่วมกับแสง เพื่อขจัดความเป็นพิษของสารประกอบอินทรีย์ด้วยการทำลายโครงสร้างโมเลกุลของสารให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ตัวเร่งที่ใช้ในปฏิกิริยา คือสารประกอบไททาเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความเสถียร

ในงานวิจัยอื่น ๆ ได้มีการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในน้ำเสียต่างๆ แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มียานวิจัยใดศึกษาการแขวนลอยของตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในน้ำ หลังการทำการทำปฏิกิริยา ซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญในการใช้ประโยชน์จากน้ำหลังการบำบัด โดยวิธีการที่น่าสนใจแก้ปัญหาดังกล่าวนั้นคือวิธีการตกตะกอนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านั้น ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อการตกตะกอนมีหลายอย่าง เช่น ความแตกต่างของโครงสร้างตัวตกตะกอน ความหนาแน่นของของเหลวที่ทำการตกตะกอน พื้นที่ผิวสัมผัสของสารที่ตกตะกอนและขนาดของสารที่ตกตะกอน ค่าความเป็นกรดเบสของของเหลว เป็นต้น

จากเหตุผลที่กล่าวในข้างต้น งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยการตกตะกอนของตัวเร่งที่ใช้ในปฏิกิริยาร่วมกับแสงของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ดังนี้

1. ผลของความแตกต่างของโครงสร้างของตัวเร่งที่ใช้คือโครงสร้างแบบบริบอมนาโนไททาเนตและท่อนาโนไททาเนต
2. ผลของความแตกต่างในองค์ประกอบของตัวเร่งระหว่างโซเดียมและไฮโดรเจน
3. ผลของความเป็นกรดเบสของสารละลาย

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการตกตะกอนของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในน้ำ

1.3 ขอบเขตโครงการ

1.3.1 ศึกษาการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงรูปร่างรีบบอนนาโนไททาเนต และท่อนาโนไททาเนตโดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล

1.3.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการตกตะกอนของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

บทที่ 2

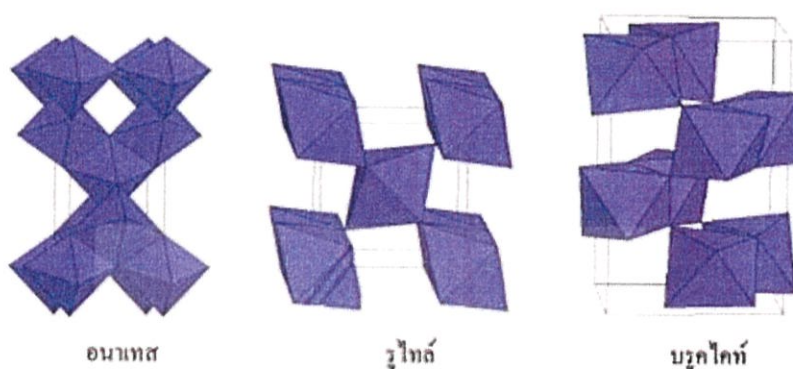
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการตกตะกอนของโครงสร้างระดับนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ นั้นจำเป็นต้องศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้ การสังเคราะห์สารประกอบไททาเนียมไดออกไซด์ กระบวนการสังเคราะห์สารด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล และกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง(Photocatalytic activity) และการตกตะกอนเพื่อแยกตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

2.1 การสังเคราะห์สารประกอบนาโนไททาเนียมออกไซด์ (Nanotitanium oxide synthesis)

2.1.1 ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide; TiO_2)

ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไททาเนียม มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ โครงสร้างผลึกมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบคือโครงสร้างแบบอะนาเทส (Anatase) รูไทล์ (Rutile) และบรูคไคท์ (Brookite) โดยโครงสร้างแบบอะนาเทสและรูไทล์ มีโครงสร้างผลึกเป็นเตตระโกนอล (Tetragonal) ส่วนโครงสร้างแบบบรูคไคท์มีผลึกเป็นออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) โครงสร้างผลึกทั้ง 3 แบบของไททาเนียมไดออกไซด์เกิดจากการเชื่อมต่อกันของอะตอมออกซิเจนของออกตะฮีดรอลที่มีลักษณะบิดเบี้ยวของไททาเนียมไดออกไซด์ โดยไอออนของ Ti_4^+ ถูกล้อมรอบด้วย 6 ไอออนของ O_2^- แต่การจัดเรียงตัวของสายโซ่ออกตะฮีดรอลของแต่ละโครงสร้างจะต่างกัน โดยโครงสร้างแบบรูไทล์ การเชื่อมต่อของออกตะฮีดรอลเกิดที่มุมและขอบ โครงสร้างแบบอะนาเทสเกิดการเชื่อมต่อกันของออกตะฮีดรอลเฉพาะที่ขอบ โดยที่แต่ละออกตะฮีดรอลถูกล้อมรอบด้วยออกตะฮีดรอลสี่ออกตะฮีดรอลและมีการใช้ขอบร่วมกัน ส่วนโครงสร้างแบบบรูคไคท์มีระบบผลึกเป็นออร์โธโรมบิก การเชื่อมต่อของออกตะฮีดรอลเกิดขึ้นที่บริเวณขอบและมุม ดังแสดงในรูปที่ 2.1



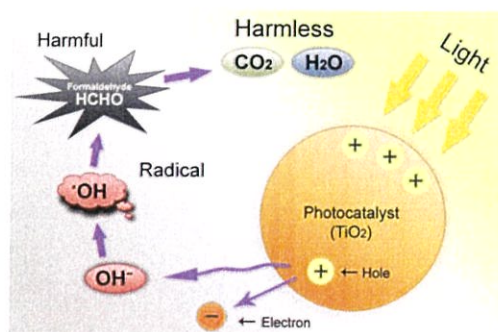
รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ [1]

2.1.2 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalytic activity)

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเป็นกระบวนการที่เกิดจากการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ตัวเร่งปฏิกิริยาจะดูดซับโฟตอนที่มีความถี่ที่มีพลังงานในการกระตุ้นซึ่งขึ้นกับแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap energy) ส่งผลให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (Valence band, VB) ถูกกระตุ้นขึ้นไปยังแถบคอนดักชัน (Conduction band, CB) อิเล็กตรอนในแถบคอนดักชันเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ทำให้แถบวาเลนซ์เกิดสถานะการขาดอิเล็กตรอน ลักษณะเช่นนี้ เรียกว่า เกิดช่องว่างอิเล็กตรอน หรือ โฮล (e^-/h^+ pair) ซึ่งมีประจุเป็นบวกและสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ เมื่อโฮลสัมผัสกับโมเลกุลของน้ำหรือออกซิเจน (O_2) จะก่อให้เกิดเรดิคัล (Radical) ที่มีความว่องไวสูง โดยโมเลกุลของน้ำจะถูกออกซิไดซ์ด้วยโฮลเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลดังสมการที่ 2.2 ส่วนอิเล็กตรอนในแถบคอนดักชัน จะรีดิวซ์โมเลกุลของออกซิเจนในน้ำ ก่อให้เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออน (O_2^-) ดังสมการที่ (2.2)



ทั้งนี้ไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เกิดขึ้นเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงสามารถย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของสาร เรียกรกระบวนการนี้ว่าโฟโตออกซิเดชัน (Photooxidation) ในขณะที่ซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออนเป็นตัวรีดิวซ์ที่แรงสามารถทำปฏิกิริยากับสารที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) ที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของสารได้ด้วยปฏิกิริยาโฟตรีดักชัน (Photoreduction) [2] จากสองกระบวนการที่กล่าวข้างต้นจึงเรียกรวมว่ากระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ลักษณะการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง [3]

ในการกระตุ้นอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ให้สามารถเคลื่อนที่ไปยังแถบคอนดักชันจะต้องอาศัยพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับค่าช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นๆ การคำนวณหาความยาวคลื่นของโฟตอนที่มีค่าพลังงานดังกล่าว สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ (2.3) (Goswami et al., 2000)[13]

$$\lambda = \frac{hc}{E} \quad (2.3)$$

เมื่อ h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (4.135×10^{-15} eV s)

E คือ ค่าพลังงานโฟตอน

λ คือ ค่าความยาวคลื่น

c คือ ค่าความเร็วแสง (3×10^8 m/s)

จากการศึกษากระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงข้างต้น พบว่ากระบวนการดังกล่าวจะต้องคำนึงถึงพื้นที่ผิวของตัวเร่งที่เป็นสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากพื้นที่ผิวมีผลกระทบต่อ การดูดซับสารที่ต้องการทำปฏิกิริยา และมีพื้นที่ในการสร้างไฮดรอกซิลเรดิคัลและซูเปอร์เรดิคัลแอนไอออนเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ (TAO Jie et al., 2012) [12] แต่สารไททานเนียมไดออกไซด์มีข้อจำกัดในเรื่องพื้นที่ จึงมีการศึกษาค้นคว้าจากงานวิจัยเพิ่มเติม พบว่าริบบอนนาโนไททานเนตและท่อนาโนไททานเนตมีลักษณะที่เหมาะสมกับการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากมีพื้นที่ผิวมากกว่าสารประกอบไททานเนียมไดออกไซด์ จึงเลือกการสังเคราะห์ริบบอนนาโนไททานเนตและท่อนาโนไททานเนตด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ซึ่งรายละเอียดต่างๆแสดงในหัวข้อ 2.1.3

2.1.3 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal synthesis)

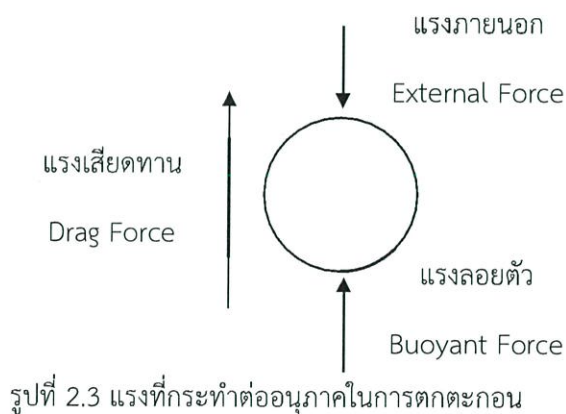
กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเป็นกระบวนการสังเคราะห์สารวิธีการหนึ่ง ซึ่งมีข้อดีคือ วิธีการเตรียมที่ง่าย สามารถควบคุมรูปร่างผลึกได้ เป็นระบบปิดผนึกที่ได้จะมีความบริสุทธิ์สูง อนุภาคของสารมีขนาดเล็ก มีความละเอียดสูง และยังสามารถใช้ในการสังเคราะห์สารประกอบที่มีลักษณะรูปร่างแบบต่างๆ และมีโครงสร้างในระดับนาโนเมตร (nanostructure) เช่น ท่อนาโน (nanotube) ริบบอนนาโน (nanoribbon) หรือเส้นใยนาโน (nanofiber) ความแตกต่างของโครงสร้างดังกล่าวเกิดจากสภาวะการสังเคราะห์ที่แตกต่างกันโดยที่มีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิและเวลา (Kunlanun et al, 2011) [4] ซึ่งการเกิดรูปโครงสร้างริบบอนนาโนเกิดจากการซ้อนทับกันจนเกิดเป็นชั้น ส่วนท่อนาโนเกิดการม้วนเข้าหากันเป็นท่อกลวงตรงกลาง

2.2 การตกตะกอน (Precipitation)

2.2.1 การตกตะกอน

การตกตะกอน คือการที่อนุภาคของแข็งซึ่งแขวนลอยอยู่ในของเหลวแยกตัวออกจากของเหลวตกลงสู่เบื้องล่างด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำต่ออนุภาคของแข็ง ทำให้เกิดชั้นของเหลวใส และชั้นตกตะกอนชั้นขึ้น ประเภทของการตกตะกอนแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ การตกตะกอนแบบอิสระ (Free Settling) และการตกตะกอนแบบอุปสรรค (Hindered Settling) โดยแบ่งตามความเข้มข้นของสเลอรี่ที่แตกต่างกัน ในกรณีที่ความเข้มข้นของสเลอรี่มีความเข้มข้นน้อยกว่า 0.2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรอนุภาคจะมีการกระจายตัวห่างจากอนุภาคอื่นๆ และมีระยะห่างเพียงพอจากผนังของภาชนะ จะทำให้ความเร็วของการตกตะกอนจะค่อนข้างคงที่ การตกตะกอนประเภทนี้เรียกว่า การตกตะกอนแบบอิสระ และในกรณีที่ความเข้มข้นของ สเลอรี่มีความเข้มข้นมากกว่า 0.2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรการตกตะกอนของแต่ละอนุภาคจะถูกกระทบโดยอนุภาคที่แวดล้อมด้วย เนื่องจากอนุภาคอยู่ติดกันทำให้เกิดแรงแต่ละอนุภาคที่กระทำต่อกัน อนุภาคที่จมลงจะแทนที่ของไหลซึ่งก่อให้เกิดความเร็วของของไหลเหล่านี้จะต้านให้อนุภาคตกตะกอนช้าลง การตกตะกอนประเภทนี้เรียกว่า การตกตะกอนแบบอุปสรรค

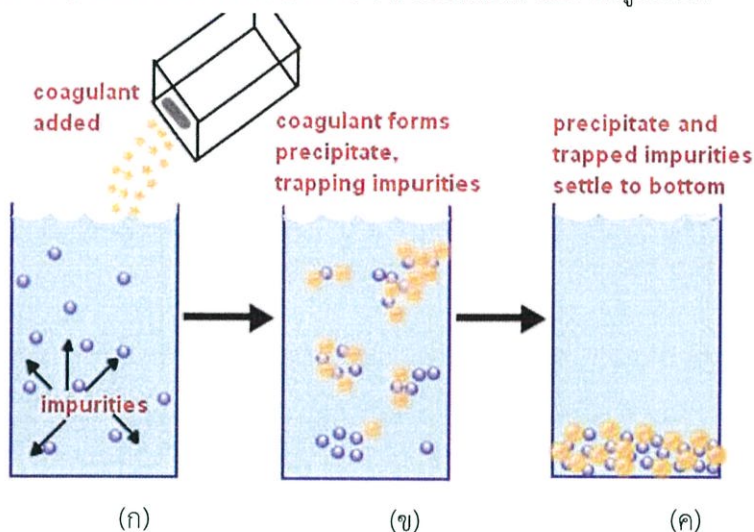
แรงที่กระทำต่ออนุภาคแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ แรงจากภายนอก (External Force) จำพวกแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity Force) หรือแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifuge force) เป็นต้น แรงเสียดทาน (Drag Force) เป็นแรงที่เกิดจากการสัมผัสของอนุภาคของไหลขณะที่มีการเคลื่อนที่และมีทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของอนุภาค และแรงลอยตัว (Buoyant Force) เป็นแรงที่ของไหลกระทำต่ออนุภาคเพื่อพยุงอนุภาคไว้ แรงนี้ขนานกับแรงภายนอกแต่มีทิศตรงกันข้ามแสดงดังรูปที่ 2.3



เนื่องจากงานวิจัยนี้ อนุภาคที่ใช้ในการทดลองมีโครงสร้างระดับนาโน ซึ่งมีขนาดเล็กและไม่สามารถตกตะกอนด้วยน้ำหนักของอนุภาคเองได้ ดังนั้นจึงต้องศึกษาวิธีการตกตะกอนของอนุภาคคอลลอยด์ ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อ 2.2.2

2.2.2 การตกตะกอนของอนุภาคคอลลอยด์ [5]

การตกตะกอนของอนุภาคคอลลอยด์ จะมีกลไกในการเกิด 2 กลไก ได้แก่ กระบวนการสร้างตะกอน (Coagulation) และกระบวนการรวมตะกอน (Flocculation) แสดงดังรูปที่ 2.4



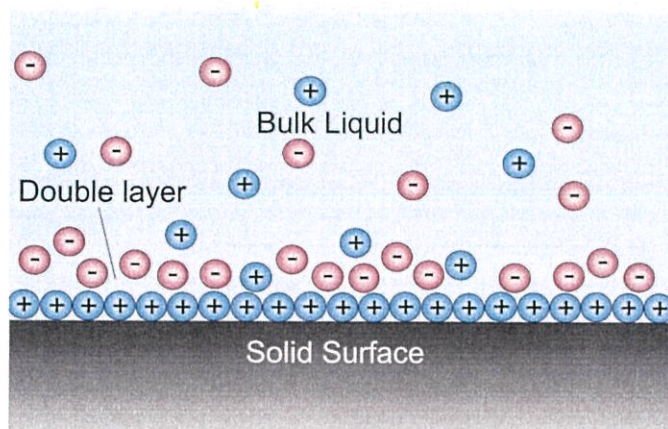
รูปที่ 2.4 กระบวนการตกตะกอนอนุภาคคอลลอยด์

(ก) กระบวนการสร้างตะกอน (ข) กระบวนการรวมตะกอน (ค) กระบวนการตกตะกอน [6]

2.2.2.1 กระบวนการสร้างตะกอน (Coagulation)

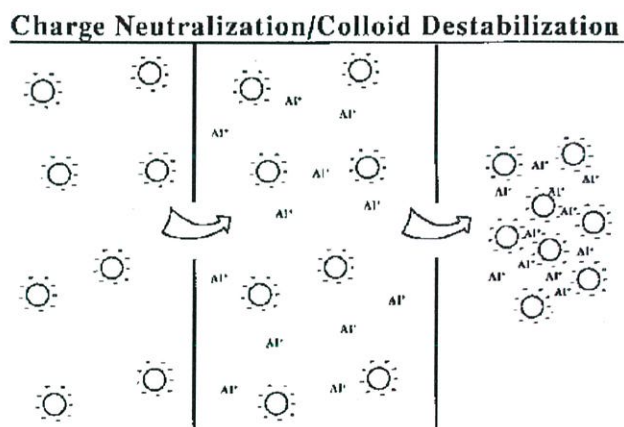
เป็นกลไกในการทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) ของอนุภาคขนาดเล็ก ซึ่งเรียกว่าอนุภาคคอลลอยด์ โดยทั่วไปมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 10^6 จนถึง 10^{-3} มิลลิเมตร เนื่องจากมีขนาดเล็กจึงไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักของตัวเองในเวลาจำกัด นอกจากนี้อนุภาคคอลลอยด์ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีประจุ โดยพวกที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) จะมีประจุบวก เช่น สารอินทรีย์ สบู่ หรือสารจำพวก Detergent ส่วนพวกที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มักจะมีประจุลบ เช่น อนุภาคของดินเหนียว สารไททาเนียมไดออกไซด์ และเนื่องจากอนุภาคดังกล่าวมีประจุทำให้อนุภาคที่มีประจุชนิดเดียวกับสารละลาย เกิดแรงผลักระหว่างอนุภาค ทำให้อนุภาคเหล่านั้นมีเสถียรภาพสูง ดังนั้น การทำให้อนุภาคต่างๆ รวมตัวกันและจับกันเป็นก้อนจะเรียกว่ากระบวนการทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) ของอนุภาคคอลลอยด์ โดยกลไกวิธีใดวิธีหนึ่งดังนี้

- 1.1 กลไกลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse Layer) โดยการเพิ่มประจุ ตรงกันข้ามกับประจุของคอลลอยด์ในชั้นกระจายให้มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งจะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้า (Zeta Potential) ที่ผิวนอกสุดของน้ำลดตามไปด้วย การทำลายเสถียรภาพโดยการลดความหนาของชั้นกระจายจะทำได้โดยการเติมสารละลายของเกลือต่างๆ



รูปที่ 2.5 กลไกลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse Layer) [7]

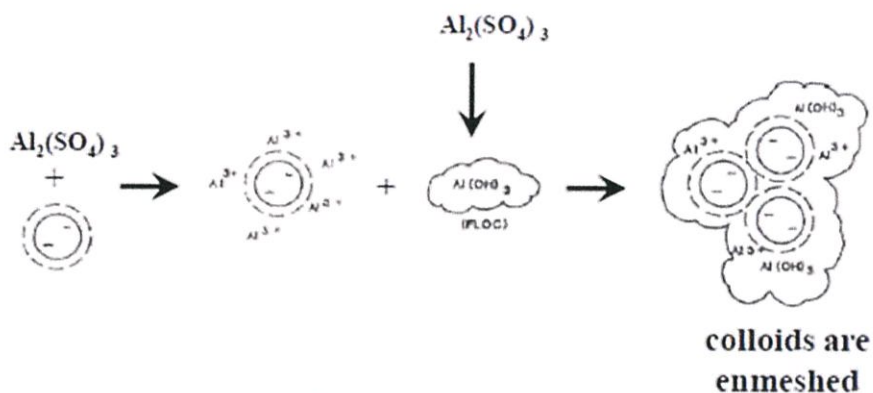
1.2 กลไกดูดติดผิวและทำลายประจุของอนุภาคคอลลอยด์ (Adsorption and Charge Neutralization) โดยใส่สารเคมีบางหมู่ที่มีประจุตรงกันข้ามกับอนุภาคคอลลอยด์และดูดติดผิวได้ ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการลดศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์ลง ดังแสดงในรูป 2.6



รูปที่ 2.6 กลไกดูดติดผิวและทำลายประจุของอนุภาคคอลลอยด์ (Adsorption and Charge Neutralization) [8]

1.3 กลไกการสร้างผลึกขึ้นมาเพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์มาเกาะจับกัน (Sweep Coagulation) เช่น การใส่สารส้มให้เกิดผลึก $\text{Al}(\text{OH})_3$ เหมือนวันสีขาว เพื่อให้อนุภาคมาเกาะแล้วรวมกันเป็นฟล็อกได้กลไกการใช้ผลึกสารอินทรีย์ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์มีลักษณะที่แตกต่างจากกลไก 2 แบบ แรกคือ ปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม (Optimum Dosage) จะแปรผกผันกับความเข้มข้นของคอลลอยด์ กล่าวคือ

น้ำที่มีความขุ่นน้อยต้องใช้โคแอกกูแลนทจำนวนมากจึงจะเกิดการสร้างตะกอนได้ดีดังแสดงในรูป 2.7



รูปที่ 2.7 กลไกการสร้างผลึกขึ้นมาเพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์มาเกาะจับกัน (Sweep Coagulation) [9]

2.2.2.2 กระบวนการรวมตะกอน (Flocultion)

จะเกิดขึ้นได้เมื่อทำให้อนุภาคคอลลอยด์ที่หมดความเสถียรภาพและเกิดการจับตัวกันเป็นก้อนตะกอนแล้ว ตะกอนเหล่านั้นจะเคลื่อนที่สัมผัสกันและจะเกิดการรวมตัวกันเกิดเป็นตะกอนที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งวิธีการสร้างสัมผัสมีด้วยกันหลายวิธี แต่วิธีที่ได้รับความนิยมคือ การกวนอย่างช้าๆ เพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่ไปมาในน้ำจนกว่าจะมีการสัมผัสเพื่อให้เกิดตะกอนเกิดขึ้น

2.2.2.3 สารช่วยในการตกตะกอน

การเติมสารเคมีบางชนิดลงไปก็เพื่อลดแรงผลักระหว่างอนุภาค เรียกว่า "สารเคมีช่วยเร่ง การตกตะกอน" ซึ่งเมื่อเติมลงไปแล้วมีการกวนเพียงเล็กน้อย อนุภาคจะแตะกันทำให้แรงดึงดูดของอนุภาคให้ติดกัน เกิดการจับตัวเป็นกลุ่มใหญ่ขึ้น เรียกว่า ฟล็อก (floc) ซึ่งเมื่อฟล็อกรวมตัวกัน ใหญ่ขึ้นก็จะตกตะกอนได้ น้ำจึงใส สารเคมีที่ช่วยเร่งการตกตะกอน มีหลายชนิด

1. สารส้ม (อลูมิเนียมซัลเฟต) เป็นสารช่วยในการตกตะกอนที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียมากที่สุด
2. พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ มีความสามารถในการทำให้ตะกอนต่างๆ เกิดการสัมผัสจับตัวเป็นก้อนได้ จึงมีคุณสมบัติที่ทำให้ความสามารถในการตกตะกอนได้เร็ว
3. เฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) เป็นสารช่วยในการตกตะกอน และจับตะกอนในระบบบำบัดน้ำมีประสิทธิภาพในการตะกอนสารประเภทโลหะดีมา

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 การสังเคราะห์ไททานิตด้วยไฮโดรเทอร์มอล

Kunlanan Kiatkitipong et al. [4] ได้ศึกษาการสังเคราะห์ไททานิตโครงสร้างนาโนริบบอนด้วยไฮโดรเทอร์มอลที่สภาวะแตกต่างกันและทำการแลกเปลี่ยนโซเดียมไอออนกับไฮโดรเจนไอออน จากการศึกษา การสังเคราะห์ริบบอนนาโนไททานิตด้วยไฮโดรเทอร์มอล และนำไปแลกเปลี่ยนไฮโดรเจนไอออน พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล จะใช้อุณหภูมิ 200 องศา เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทำให้เย็นตัวลงทันทีจะได้โครงสร้างรูปร่างของริบบอนนาโนไททานิตที่สมบูรณ์ที่สุด และการสังเคราะห์ริบบอนนาโนไททานิตด้วยไฮโดรเทอร์มอล และนำไปแลกเปลี่ยนโซเดียมไอออน พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล จะใช้อุณหภูมิ 200 องศา เป็นเวลา 40 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทำให้เย็นตัวลงทันทีจะได้โครงสร้างรูปร่างของริบบอนนาโนไททานิตที่สมบูรณ์ที่สุด ดังตารางที่ 2.1

ตาราง 2.1 ตัวอย่างสภาวะการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาของสารประกอบไททานิตไดออกไซด์ [4], [10]

ชนิดโครงสร้างตัวเร่งปฏิกิริยา	สภาวะการสังเคราะห์	
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)
ริบบอนนาโนไททานิต	200	24
ท่อนาโนไททานิต	150	72

Kunlanan Kiatkitipong et al. [11] ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะของอนุภาคนาโนไททานิต และสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ระหว่างริบบอนนาโนไททานิต และท่อนาโนไททานิต พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้นส่งผลให้โครงสร้างของอนุภาคนาโนไททานิตเปลี่ยนเฟสเป็นอะนาเทส โดยสมบูรณ์ และพื้นที่ผิวของท่อนาโนไททานิตเมื่อเทียบกับริบบอนนาโนไททานิตมีการลดลงอย่างชัดเจน ในขณะที่แถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองลดลงให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเพื่อกำจัดออกซาลิก (Oxalic acid) นั้นขึ้นกับพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า เมื่อเทียบกับเมทานอล (Methanol)

TAO Jie et al. [12] ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์สารด้วยผงไททานิตไดออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล โดยมีการปรับเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ เวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในการกำหนดรูปร่าง จากการศึกษาพบว่าโครงสร้างที่เกิดจากการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นคือโครงสร้างริบบอนนาโนไททานิต และเข็มนาโนไททานิต ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางของทั้ง 2 โครงสร้างจะมีขนาดเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของผงไททานิตไดออกไซด์ นอกจากนี้พบว่าปัจจัยที่ทำให้เกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงได้ดีคือ พื้นที่ผิว และความสามารถในการรับแสง การเรียงตัวของโมเลกุล

ในรีบอบนาโนไททาเนตและซีมนาโนไททาเนตที่มีความสามารถในการรับแสงมากที่สุดคือเรียงตัวโครงสร้างแบบอะนาเทส

2.3.2 การตกตะกอน

Sarunthorn Tantiwuttiwong et al. [5] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการตกตะกอนโดยใช้สารสกัดจากเมล็ดมะรุมในน้ำตัวอย่างที่สภาวะต่างๆโดยใช้กระบวนการตกตะกอน 2 กลไก คือ กระบวนการสร้างตะกอน(Coagulation) และกระบวนการรวมตะกอน (Flocculation) จากผลการทดลองพบว่าสารสกัดจากเมล็ดมะรุมจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดใกล้เคียงกับสารส้มโดยสามารถลดปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำตัวอย่างได้ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ โดยเมื่อศึกษาปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการตกตะกอน ที่ค่าความเป็นกรดเบสของน้ำที่มากขึ้นจะส่งผลน้อยต่อประสิทธิภาพในการกำจัดตะกอนแขวนลอยของสารสกัดเมล็ดมะรุม

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 ไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO₂ anatase 100%) บริษัท Carlo Erba
- 3.1.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Ajax Finechem Pty Ltd
- 3.1.3 กรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 37%
- 3.1.4 น้ำประปา
- 3.1.5 น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)
- 3.1.6 สารส้ม

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 ตู้อบ
- 3.2.2 เครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอล
- 3.2.3 เครื่องปั่นกวน
- 3.2.4 แท่งแม่เหล็ก
- 3.2.5 เครื่องเหวี่ยงสารให้ตกตะกอน (Centrifuge)
- 3.2.6 เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
- 3.2.7 Jar test apparatus
- 3.2.8 กรวยบุชเนอร์
- 3.2.9 ปิ๊มสุญญากาศ
- 3.2.10 ปีกเกอร์
- 3.2.11 กระดาษกรอง
- 3.2.12 ปีเปต
- 3.2.13 พิคโนมิเตอร์ขนาด 10 มิลลิลิตร

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

- 3.3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)
- 3.3.2 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer: XRD)

3.4 การสังเคราะห์รีบบอนนาโนไททาเนตด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

3.4.1 นำผงไททาเนียมไดออกไซด์ 1 กรัม ผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ปริมาตร 40 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.4.2 แบ่งเทสารที่ได้ลงเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอล 2 เครื่อง แล้วนำไปผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลด้วยการให้ความร้อนแก่สารที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ภายในตู้อบ

3.4.3 เมื่อให้ความร้อนครบ 24 ชั่วโมง นำเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอลทั้งสองเครื่องออกจากตู้อบและปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้องก่อนที่จะเปิดเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งภายในจะแยกชั้นระหว่างสารละลายและผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวชั้น ให้เทสารละลายออกมาก่อน

3.4.4 สำหรับการสังเคราะห์ โซเดียมไททาเนต นำผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวชั้น จากเครื่องปฏิกรณ์เครื่องแรก ออกมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนครั้งละ 400 มิลลิลิตร สลับกับการทำให้ตกตะกอนออกด้วยเครื่องเหวี่ยงสารตกตะกอน ทำซ้ำไปมาจนค่าของสารผลิตภัณฑ์แสดงความเป็นกรด-เบส ประมาณ 7

3.4.5 สำหรับการสังเคราะห์ ไฮโดรเจนไททาเนต นำผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งจากเครื่องปฏิกรณ์เครื่องที่สองออกมาล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น ครั้งละ 400 มิลลิลิตร สลับกับการทำให้ตกตะกอนออกด้วยเครื่องเหวี่ยงสารตกตะกอน ทำซ้ำไปมาจนค่าของสารผลิตภัณฑ์แสดงความเป็นกรด-เบส ประมาณ 1 นำไปล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนครั้งละ 400 มิลลิลิตร สลับกับการทำให้ตกตะกอนออกด้วยเครื่องเหวี่ยงสารตกตะกอน ทำซ้ำไปมาจนค่าของสารผลิตภัณฑ์แสดงความเป็นกรด-เบส ประมาณ 7

3.4.6 อบให้ตะกอนแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยารอบบอนนาโนไททาเนต

3.5 การสังเคราะห์ท่อนาโนไททาเนตด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

3.5.1 นำผงไททาเนียมไดออกไซด์ 1 กรัม ผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ปริมาตร 40 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.5.2 แบ่งเทสารที่ได้ลงเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอล 2 เครื่อง แล้วนำไปผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ด้วยการให้ความร้อนแก่สารที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ภายในตู้อบ

3.5.3 เมื่อให้ความร้อนครบ 72 ชั่วโมง นำเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอลทั้งสองเครื่องออกจากตู้อบและปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้องก่อนที่จะเปิดเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งภายในจะแยกชั้นระหว่างสารละลายและสารผลิตภัณฑ์ ให้เทสารละลายออกมาก่อน

3.5.4 สำหรับการสังเคราะห์ โซเดียมไททาเนต จากนั้นนำสารผลิตภัณฑ์จากเครื่องปฏิกรณ์เครื่องแรก ออกมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนครั้งละ 400 มิลลิลิตร สลับกับการทำให้ตกตะกอนออกด้วยเครื่องเหวี่ยงสารตกตะกอน ทำซ้ำไปมาจนค่าของสารผลิตภัณฑ์แสดงความเป็นกรด-เบส ประมาณ 7

3.5.5 สำหรับการสังเคราะห์ ไฮโดรเจนไททาเนต นำสารผลิตภัณฑ์จากเครื่องปฏิกรณ์เครื่องที่สองออกมาล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น ครั้งละ 400 มิลลิลิตร สลับกับการทำให้ตกตะกอนออกด้วยเครื่องเหวี่ยงสารตกตะกอน ทำซ้ำไปมาจนค่าของสารผลิตภัณฑ์แสดงความเป็นกรด-เบส ประมาณ 1 จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนครั้งละ 400 มิลลิลิตร สลับกับการทำให้ตกตะกอนออกด้วยเครื่องเหวี่ยงสารตกตะกอน ทำซ้ำไปมาจนค่าของสารผลิตภัณฑ์แสดงความเป็นกรด-เบส ประมาณ 7

3.5.6 อบให้ตะกอนแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อนาโนไททาเนต

3.6 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมี

3.6.1 การวิเคราะห์สัณฐานและลักษณะพื้นผิวของอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลที่แสดงออกมาในรูปของภาพสามมิติ สร้างภาพได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนจากผิวหน้าของตัวอย่าง เพื่อดูลักษณะโครงสร้างของสารตัวอย่าง

3.6.2 การวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกของสารประกอบนาโนไททาเนต (XRD) ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์โดยไม่ทำลายสารตัวอย่าง ใช้หลักการวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างในมุมต่างๆกัน จากนั้นจึงนำผลของการวิเคราะห์ไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน เพื่อระบุโครงสร้างผลึกของสารประกอบตัวอย่าง

3.7 การศึกษาการตกตะกอนโดยวิธี Jar test

3.7.1 เตรียมน้ำประปา 200 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ปริมาตร 250 มิลลิลิตร

3.7.2 เตรียมสารส้ม 0.5 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร จากนั้นเปิดมา 10 มิลลิลิตรใส่น้ำประปาที่เตรียมไว้ดังข้อ 3.7.1

3.7.3 นำผงริบบอนนาโนไททาเนต 0.2 กรัม ใส่ในน้ำประปาที่เตรียมไว้ในข้อ 3.6.1

3.7.4 ใช้เครื่อง Jar test ปั่นกวนสารด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที และปั่นต่อด้วยความเร็ว 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นปล่อยให้ตกตะกอนและเก็บตัวอย่างน้ำบริเวณส่วนบนของบีกเกอร์ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ที่เวลา 1 2 3 4 6 8 10 15 20 และ 30 นาที เพื่อนำไปทดสอบ

3.7.4 ทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนสารเป็นท่อนาโนไททาเนต

3.8 การทดสอบค่าของแข็งแขวนลอย

3.8.1 นำกระดาษกรองขนาด 47 มิลลิเมตร ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่งทศนิยม แล้วบันทึกผล

3.8.2 นำตัวอย่างน้ำปริมาตร 10 มิลลิลิตร ที่มีของแข็งแขวนลอยอยู่ มากรองด้วยกระดาษกรอง

3.8.3 นำกระดาษกรองที่ผ่านการกรองแล้ว ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำกระดาษกรองไปชั่งน้ำหนัก แล้วบันทึกผล

3.8.4 คำนวณค่าของแข็งแขวนลอย

$$\text{ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (มก./ล.)} = \frac{(A - B) \times 10^6}{\text{Volume (mL)}}$$

เมื่อ A = น้ำหนักของกระดาษกรองและของแข็งแขวนลอย (กรัม)

B = น้ำหนักของกระดาษกรอง (กรัม)

3.9 การศึกษาความหนาแน่นของริบบอนนาโนไททาเนต และท่อนาโนไททาเนต

3.9.1 นำพิคโนมิเตอร์และฝาไปชั่งน้ำหนักและบันทึกผล

3.9.2 นำผงริบบอนนาโนไททาเนตผสมกับน้ำปราศไอออน ให้ได้ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตรใส่ในพิคโนมิเตอร์ จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกผล

3.9.3 ทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนสารเป็นท่อนาโนไททาเนต

3.9.4 นำค่าที่บันทึกไปคำนวณหาความหนาแน่นของสาร

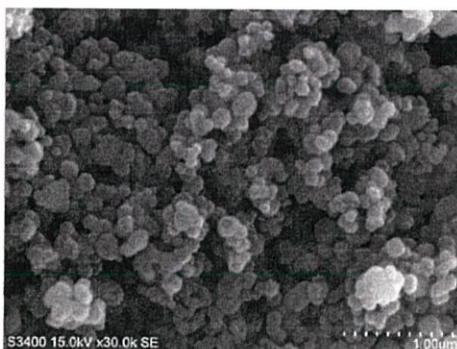
บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

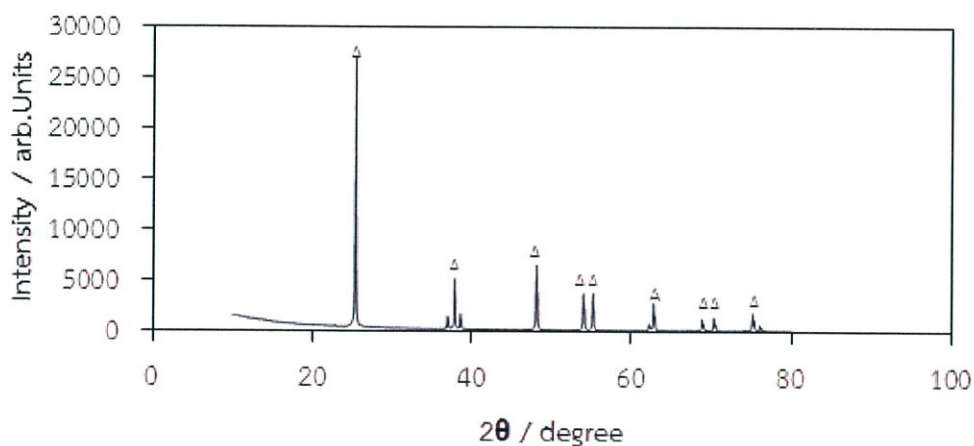
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาริบบอนนาโนไททาเนตและท่อนาโนไททาเนต และการตกตะกอนของสารประกอบนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ โดยศึกษาปัจจัยภายนอกและภายในที่มีผลต่อการตกตะกอน เช่น ปัจจัยภายในคือศึกษาลักษณะของโครงสร้างสารประกอบนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และปัจจัยภายนอกคือสภาวะความเป็นกรด-เบสของน้ำ ซึ่งจะแสดงและอภิปรายผลการทดลองดังนี้

4.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

ไททาเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทสมีลักษณะทางกายภาพเป็นผงสีขาวละเอียด มีความบริสุทธิ์ 99.7% ถูกนำมาใช้เป็นสารตั้งต้น เมื่อนำตัวอย่างไปวิเคราะห์สัณฐานและลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าสัณฐานที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.1 มีลักษณะคล้ายทรงกลม และบางส่วนไม่สามารถระบุรูปร่างได้ เมื่อทำการตรวจวัดโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ (X-ray Diffractometer: XRD) ดังรูป 4.2 จะพบว่าสารประกอบไททาเนียมไดออกไซด์เป็นเฟสอะนาเทส



รูปที่ 4.1 ลักษณะสัณฐานและพื้นผิวของไททาเนียมออกไซด์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้น



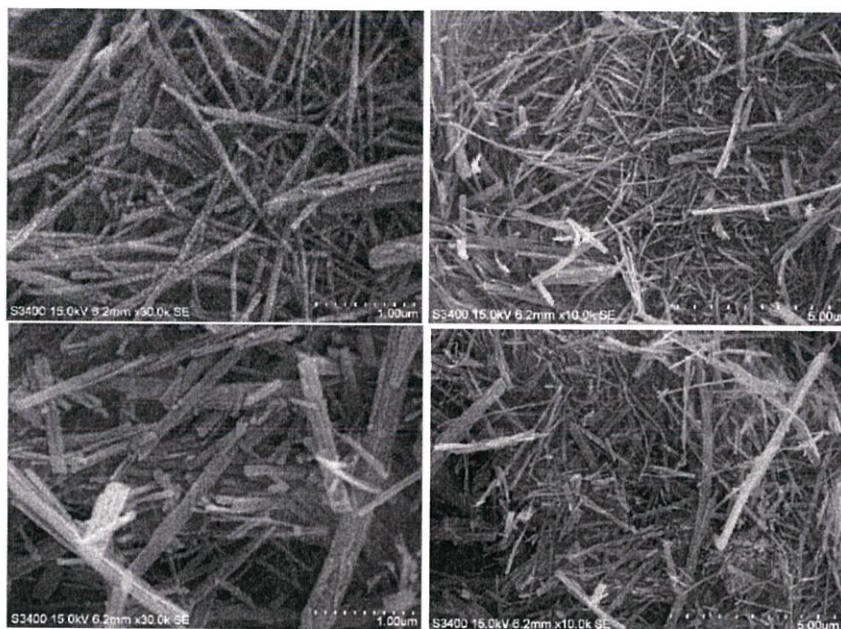
รูปที่ 4.2 XRD ของโครงสร้างผลึกของไททาเนียมออกไซด์แบบอะนาเทส

4.1.1 การสังเคราะห์รีบบอนนาโนไททาเนต

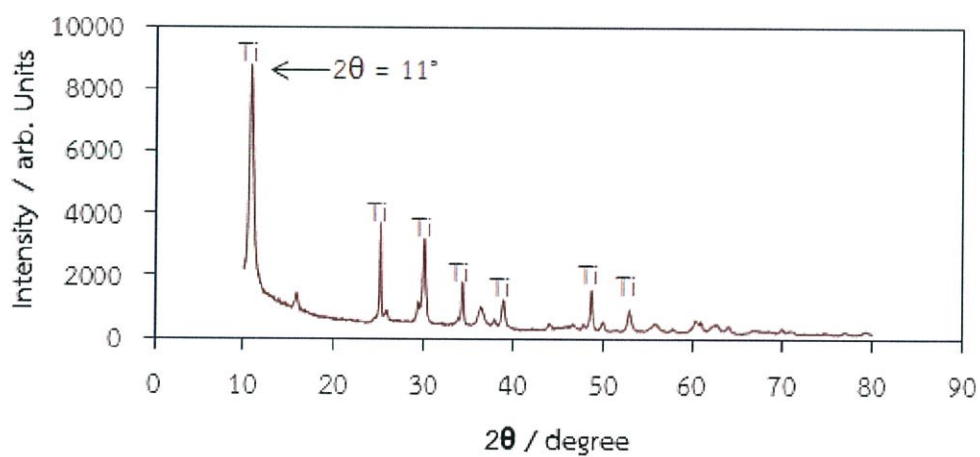
การสังเคราะห์สารโครงสร้างโซเดียมรีบบอนนาโนไททาเนต ($\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$) เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นไททาเนียมไดออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นดำเนินการที่สภาวะอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง (Kunlanun et al, 2011) พบว่าสารที่ได้มีลักษณะทางกายภาพเป็นผงสีขาวละเอียด ลักษณะผงมีขนาดใหญ่กว่า และแตกต่างจากผงไททาเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทส เมื่อนำตัวอย่างไปวิเคราะห์สัณฐานและลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าสัณฐานที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.3 มีลักษณะเป็นแผ่นบางยาว คล้ายริบบินหรือไม้บรรทัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจะมีความยาวเท่ากับ 6.469 ไมโครเมตร และความกว้างเท่ากับ 0.226 ไมโครเมตร จึงเรียกว่าโซเดียมรีบบอนนาโนไททาเนต และจากการทดลองด้วยพิคโนมิเตอร์ พบว่าความหนาแน่นรวมเท่ากับ 1.93 กรัมต่อมิลลิลิตร จากการตรวจวัดโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer: XRD) ดังรูป 4.4 โครงสร้างภายในของนาโนรีบบอนเทียบได้กับกราฟอ้างอิงของเฟสโซเดียมไททาเนต ($\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$)

การล้างรีบบอนนาโนโซเดียมไททาเนตด้วยกรด HCl สารที่ได้มีลักษณะทางกายภาพเป็นผงสีขาวละเอียด คล้ายกับรีบบอนนาโนโซเดียมไททาเนต ($\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$) เมื่อนำตัวอย่างไปวิเคราะห์สัณฐานและลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าสัณฐานที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.5 มีลักษณะเป็นแผ่นบางยาว ซึ่งโดยทั่วไปมีลักษณะคล้ายกับรีบบอนนาโนโซเดียมไททาเนต ($\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$) ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจะมีความยาวเท่ากับ 5.235 ไมโครเมตร และความกว้างเท่ากับ 0.218 ไมโครเมตร มีความหนาแน่นรวมเท่ากับ 1.15 กรัมต่อมิลลิลิตร เมื่อทำการตรวจวัดโครงสร้างผลึกด้วย

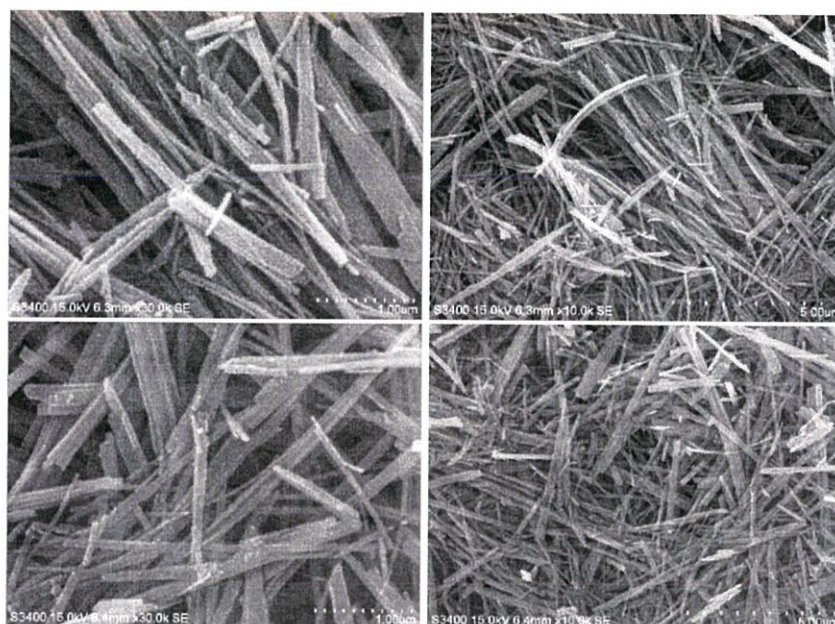
เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตรมิเตอร์ (X-ray Diffractometer: XRD) ดังรูป 4.6 โครงสร้างภายในของนาโนริบบอนเฟสเทียบได้กับกราฟอ้างอิงของเฟสไฮโดรเจนไททานेट ($\text{H}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$)



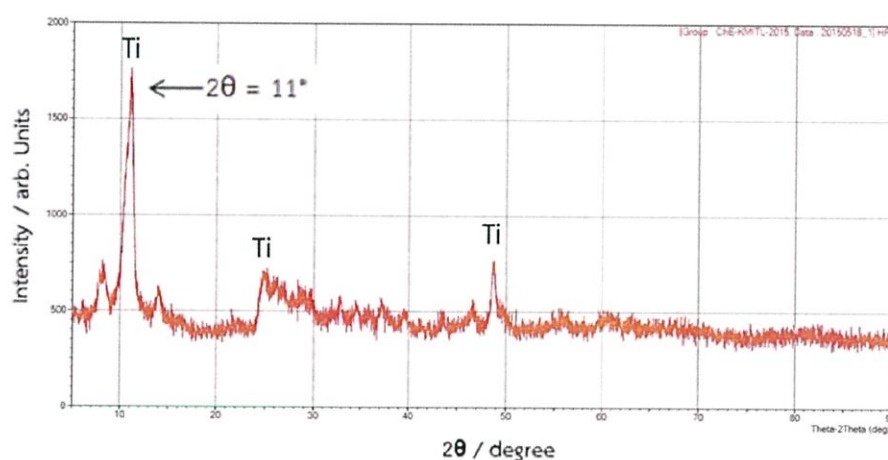
รูปที่ 4.3 โครงสร้างนาโนโซเดียมริบบอนไททานेट ($\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$)



รูปที่ 4.4 XRD ของโครงสร้างผลึกของโซเดียมริบบอนนาโนไททานेट



รูปที่ 4.5 โครงสร้างไฮโดรเจนริบบอนนาโนไททานेट ($H_2Ti_3O_7$)



รูปที่ 4.6 XRD ของโครงสร้างผลึกของไฮโดรเจนริบบอนนาโนไททานेट

4.1.2 การสังเคราะห์ท่อนาโนไททานेट

การสังเคราะห์สารโครงสร้างโซเดียมท่อนาโนไททานेट ($Na_2Ti_3O_7$) เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นไททานีเนียมไดออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นดำเนินการที่สภาวะ อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง (Kunlanun et al, 2011) สารที่ได้มีลักษณะทางกายภาพเป็นผงสีขาวละเอียด มีผงลักษณะใกล้เคียงผงไททานีเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทสมากกว่าสารโครงสร้างริบบอนนาโนไททานेट เมื่อนำตัวอย่างไปวิเคราะห์สัณฐานและลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าสัณฐานที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.7 มีลักษณะคล้ายท่อ หรือหลอด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

จะมีความยาวเท่ากับ 2.543 ไมโครเมตร และความกว้างเท่ากับ 0.215 ไมโครเมตร จึงเรียกว่าท่อนาโน มีความหนาแน่นรวมเท่ากับ 1.32 กรัมต่อมิลลิลิตร



รูปที่ 4.7 โครงสร้างโซเดียมท่อนาโนไททาเนต ($\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$)

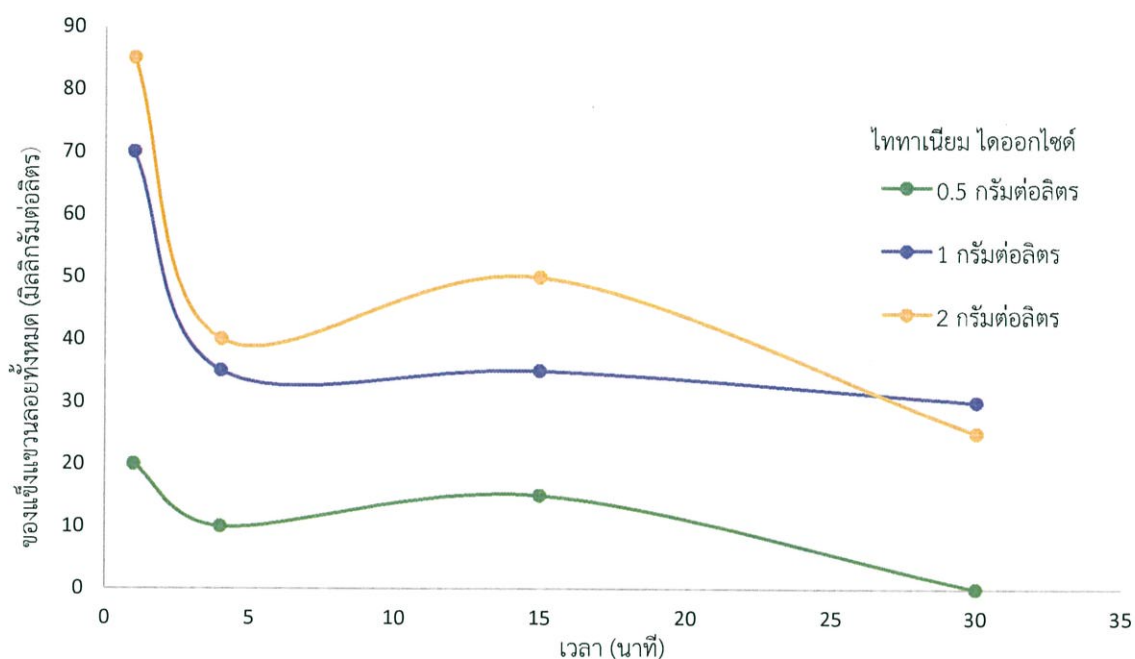
ดังนั้นจากผลการทดลองการสังเคราะห์สารตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง เพื่อศึกษาหาแนวโน้มของการตกตะกอนของสารประกอบนาโนไททาเนตพบว่า ธิบอบนาโนโซเดียมไททาเนตมีความหนาแน่นรวมที่มากกว่าธิบอบนาโนไฮโดรเจนไททาเนตและธิบอบนาโนโซเดียมไททาเนต

4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่ใช้ในการตกตะกอน

4.2.1 ความเข้มข้นของสารตั้งต้น

จากการทดลองโดยการเตรียมสารไททาเนียมไดออกไซด์ในน้ำประปา ที่ความเข้มข้น 0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร เพื่อศึกษาปริมาณน้ำหนักรของไททาเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสม โดยใส่สารส้มความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้วจึงกวนสารด้วยเครื่อง Jar Test ปล่อยให้ตกตะกอนและเก็บสารตัวอย่างที่เวลา 1 4 15 และ 30 นาที และทำการตรวจวัดปริมาณของแข็งแขวนลอย จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารไททาเนียมไดออกไซด์มากขึ้นก็จะได้ค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยที่สูงขึ้น ซึ่งที่ความเข้มข้นไททาเนียมไดออกไซด์ 0.5 กรัมต่อลิตร มีปริมาณของแข็งแขวนลอยที่ต่ำมาก ซึ่งทำให้การวิเคราะห์ผลจากการสังเกตแนวโน้มของปริมาณของแข็งแขวนลอยเป็นไปได้ยาก ส่วนที่ความเข้มข้นไททาเนียมไดออกไซด์ 1 และ 2 กรัมต่อลิตร มีแนวโน้มค่าของแข็งแขวนลอยใกล้เคียงกัน โดยที่ความเข้มข้นไททาเนียมไดออกไซด์ 1 กรัมต่อลิตร สามารถสังเกตการตกตะกอนได้ชัดเจน ซึ่งที่ความเข้มข้นไททาเนียมไดออกไซด์ 2 กรัมต่อลิตร มีปริมาณของแข็งแขวนลอยที่มาก ทำให้น้ำขุ่นและสังเกตการตกตะกอนได้ไม่ชัดเจน ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกสภาวะ

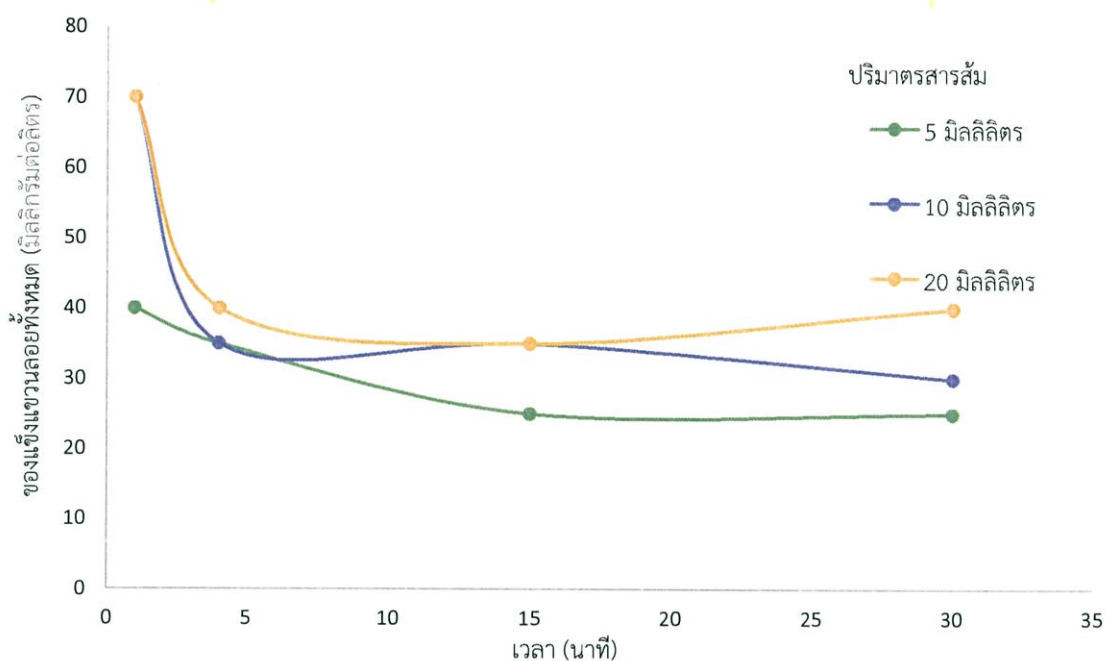
ในการทดลองที่ใช้ความเข้มข้นสารไททาเนียมออกไซด์ในน้ำประปาที่ 1 กรัมต่อลิตร เพราะมีแนวโน้มการตกตะกอนที่สามารถวิเคราะห์ผลได้ และสามารถสังเกตการตกตะกอนได้ชัดเจนที่สุด



รูปที่ 4.8 แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) กับเวลา (นาที) โดยเปรียบเทียบจากความแตกต่างของความเข้มข้นของไททาเนียมออกไซด์ในน้ำประปาที่ 0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร

4.2.2 ปริมาตรของสารส้มที่ช่วยในการตกตะกอน

จากการทดลองโดยการเตรียมสารไททาเนียมไดออกไซด์ในน้ำประปาที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร โดยศึกษาปริมาณสารส้มความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นสารที่ช่วยในการตกตะกอนที่ปริมาตร 5 10 และ 20 มิลลิลิตรตามลำดับ แล้วจึงกวนสารด้วยเครื่อง Jar Test ปล่อยให้ตกตะกอนและเก็บสารตัวอย่างที่เวลา 1 4 15 และ 30 นาที และทำการตรวจวัดปริมาณของแข็งแขวนลอย จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่า ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่ปริมาตรสารส้มต่างๆมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ที่การทดลองปริมาตรสารส้ม 5 มิลลิลิตร มีแนวโน้มของของแข็งแขวนลอยค่อนข้างคงที่ ซึ่งยากต่อการวิเคราะห์ ในส่วนที่การทดลองปริมาตรสารส้ม 10 และ 20 มิลลิลิตร มีแนวโน้มของค่าของแข็งแขวนลอยที่ใกล้เคียงกัน แต่ในระหว่างทำการทดลองพบว่า การทดลองที่ปริมาตรสารส้ม 20 มิลลิลิตรมีความขุ่นกว่าปริมาตรสารส้มที่ 10 มิลลิลิตร ทำให้สังเกตการตกตะกอนได้ยาก ดังนั้นเราจึงเลือกสภาวะที่ในการทดลองที่ 10 มิลลิลิตร



รูปที่ 4.9 แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) กับเวลา (นาที) โดยเปรียบเทียบจากความแตกต่างของสารส้มความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตรที่ปริมาตร 5 10 และ 20 มิลลิลิตร

ดังนั้นจากการทำการทดลองเพื่อหาสภาวะในการทดลองหาแนวโน้มของการตกตะกอนของสารประกอบนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นสารไททาเนียมไดออกไซด์ในน้ำประปาที่ 1 กรัมต่อลิตร โดยใช้สารส้มความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตรที่ปริมาตร 10 มิลลิลิตร

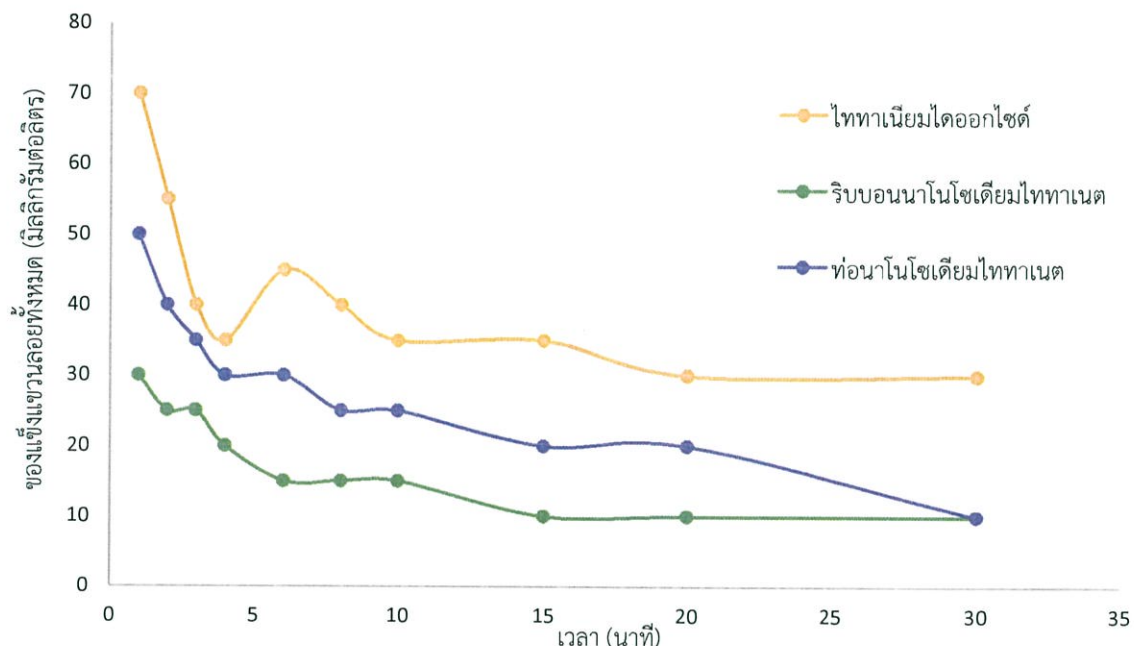
4.3 ผลการศึกษาปัจจัยภายนอกและภายในที่มีผลต่อการตกตะกอน

4.3.1 ลักษณะโครงสร้าง

4.3.1.1 ريبอนนาโนโซเดียมไททาเนตกับท่อนาโนโซเดียมไททาเนต

จากการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างของสารที่มีผลต่อการตกตะกอน โดยการเตรียมสารไททาเนียมไดออกไซด์ ريبอนนาโนโซเดียมไททาเนต และท่อนาโนโซเดียมไททาเนตที่ความเข้มข้นในน้ำประปาที่ 1 กรัมต่อลิตร โดยใช้สารส้มความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร ซึ่งช่วยในการตกตะกอน 10 มิลลิลิตร แล้วจึงกวนสารด้วยเครื่อง Jar Test ปลอ่ยให้ตกตะกอนและเก็บสารตัวอย่างที่เวลา 1 2 3 4 6 8 10 15 20 และ 30 นาที และทำการตรวจวัดปริมาณของแข็งแขวนลอย จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่า แนวโน้มของปริมาณของแข็งแขวนลอยของريبอนนาโนโซเดียมไททาเนตมีค่าต่ำที่สุด ส่วนสารที่มีแนวโน้มของปริมาณของแข็งแขวนลอยสูงที่สุด คือ ไททาเนียมไดออกไซด์ รองลงมาคือ

ท่อนานโซเดียมไททาเนต เนื่องจากริบบอนนาโนโซเดียมไททาเนตมีความหนาแน่นรวมมากกว่า ท่อนานโซเดียมไททาเนต จึงทำให้ริบบอนนาโนโซเดียมไททาเนตตกตะกอนได้ดีกว่าโซเดียมท่อนานไททาเนต



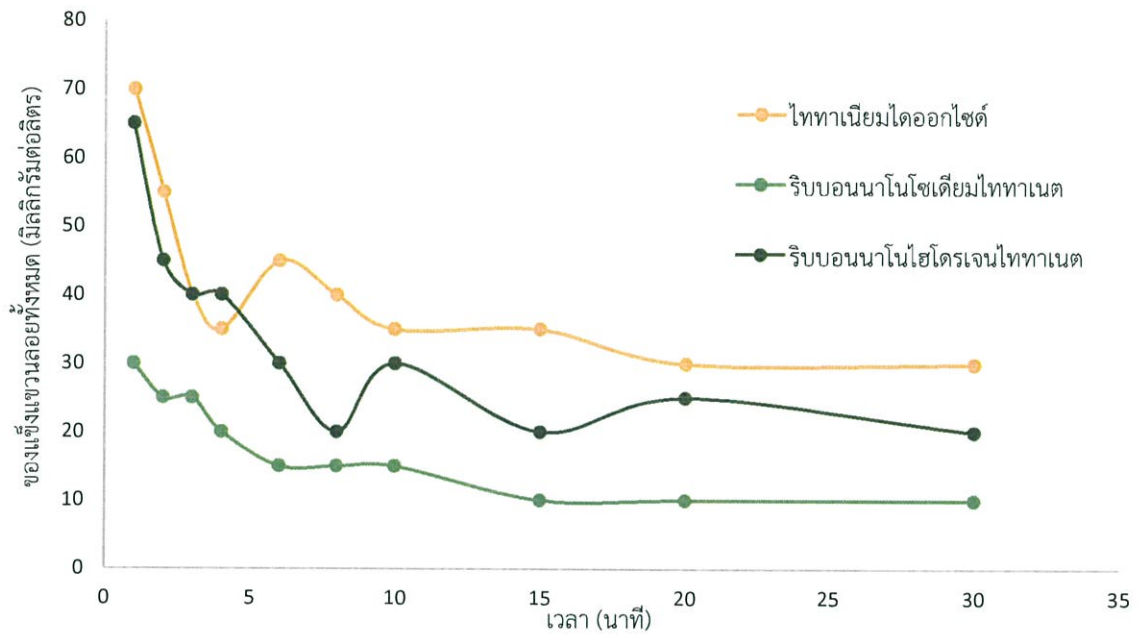
รูปที่ 4.10 แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) กับเวลา (นาที) โดยเปรียบเทียบจากความแตกต่างของโครงสร้างนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ดังนั้นจากการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างของสารที่มีผลต่อการตกตะกอน พบว่าลักษณะของโครงสร้างที่มีแนวโน้มในการตกตะกอนดีที่สุดคือ ริบบอนนาโนโซเดียมไททาเนต ริบบอนนาโนโซเดียมไททาเนตจึงถูกเลือกไปทำการทดลอง เพื่อศึกษาความแตกต่างระหว่างโครงสร้างโซเดียมริบบอนนาโนไททาเนต และไฮโดรเจนริบบอนนาโนไททาเนต ที่มีผลต่อการตกตะกอน

4.3.1.2 โครงสร้างโซเดียมและไฮโดรเจนริบบอนไททาเนต

จากการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างระหว่างโซเดียมและไฮโดรเจนของริบบอนนาโนไททาเนตที่มีผลต่อการตกตะกอน โดยการเตรียมสารไททาเนียมไดออกไซด์ ริบบอนนาโนโซเดียมไททาเนต และริบบอนนาโนไฮโดรเจนไททาเนต ที่ความเข้มข้นในน้ำประปาที่ 1 กรัมต่อลิตร โดยใส่สารส้มความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร ซึ่งช่วยในการตกตะกอน 10 มิลลิตรตามลำดับ แล้วจึงกวนสารด้วยเครื่อง Jar Test ปลอ่ยให้ตกตะกอนและเก็บสารตัวอย่างที่เวลา 1 2 3 4 6 8 10 15 20 และ 30 นาที จากนั้นทำการตรวจวัดปริมาณของแข็งแขวนลอย จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่า แนวโน้มของปริมาณของแข็งแขวนลอยของริบบอนนาโนโซเดียมไททาเนตมีค่าต่ำที่สุด ส่วนสารที่มีแนวโน้มของปริมาณของแข็งแขวนลอยสูงที่สุด คือ ไททาเนียมไดออกไซด์ รองลงมาคือริบบอนนาโนไฮโดรเจน

ไททานิต เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากความหนาแน่นรวมของโซเดียมริบบอนไททานิตและไฮโดรเจนริบบอนไททานิต พบว่าโซเดียมริบบอนไททานิตมีความหนาแน่นรวมมากกว่าไฮโดรเจนริบบอนไททานิต จึงทำให้ริบบอนโซเดียมไททานิตตกตะกอนเร็วกว่าไฮโดรเจนริบบอนไททานิต



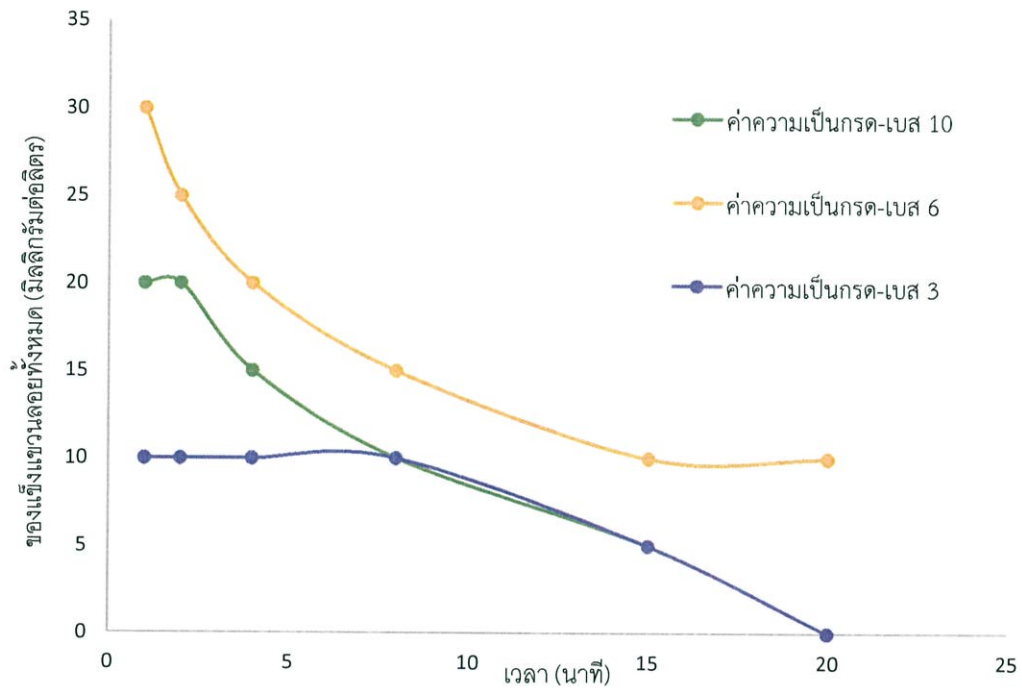
รูปที่ 4.11 แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) กับเวลา (นาที) โดยเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างโครงสร้างโซเดียมและไฮโดรเจน ของริบบอนนาโนไททานิต

ดังนั้นจากการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างของสารทั้ง 2 ประเภท คือความแตกต่างระหว่างริบบอนนาโนไททานิตและท่อนาโนไททานิต และความแตกต่างระหว่างโครงสร้างโซเดียมและไฮโดรเจนของริบบอนนาโนไททานิตที่มีผลต่อการตกตะกอน พบว่าลักษณะของโครงสร้างที่มีแนวโน้มในการตกตะกอนดีที่สุดคือ โซเดียมริบบอนนาโนไททานิต เราจึงเลือกโซเดียมริบบอนนาโนไททานิตไปทำการทดลองเพื่อหาปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการตกตะกอนคือสภาวะความเป็นกรด-เบสของน้ำ

4.3.2 ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำ

ทำการทดลองโดยการเตรียมริบบอนนาโนไททานิต ความเข้มข้นในน้ำประปาที่ 1 กรัมต่อลิตร ใส่สารส้มความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร ซึ่งช่วยในการตกตะกอน 10 มิลลิเมตร โดยมีค่าความเป็นกรด-เบสเป็น 3, 6 และ 10 จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่าที่สภาวะค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 10 มีปริมาณของแข็งแขวนลอยที่สูงกว่าค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 6 และ 3 ส่วนที่ค่าความเป็นกรด-เบสที่ 6 และ 3 มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน แต่ในช่วงแรกที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 จะมีปริมาณของแข็งต่ำกว่าค่าความเป็นกรด-เบสที่ 6 ดังนั้นค่าความเป็นกรด-เบสจึงมีผลต่อการตกตะกอน และโซเดียมริบบอนนาโน

ไททานเนียมมีการตกตะกอนที่ดีเมื่ออยู่ในสภาวะกรด เนื่องจากในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 3 มีประจุบวกแตกตัวอยู่ และสารประกอบไททานเนียมมีประจุลบ ประจุบวกจากสารละลายจะเป็นตัวทำให้สารประกอบไททานเนียมรวมตะกอนได้มากขึ้น จึงตกตะกอนได้ดี



รูปที่ 4.12 แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) กับเวลา (นาที) โดยเปรียบเทียบจากความแตกต่างของค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้ ส่วนแรก คือ การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีโครงสร้างริบบอนนาโนไททาเนต และท่อนาโนไททาเนต ส่วนที่สอง คือ การศึกษาปัจจัยภายในและภายนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มีผลต่อการตกตะกอน ซึ่งปัจจัยภายในที่มีผลต่อการตกตะกอน คือ การศึกษาโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มีโครงสร้างแบบริบบอนนาโนไททาเนต ท่อนาโนไททาเนต โซเดียมริบบอนนาโนไททาเนต และไฮโดรเจนริบบอนนาโนไททาเนต และปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการตกตะกอน คือ ค่าความเป็นกรดเบสของสารละลาย โดยสามารถสรุปผลการทดลองในแต่ละส่วนได้ดังนี้

5.1.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าลักษณะทางกายภาพแตกต่างกันโดยที่ริบบอนนาโนไททาเนตจะมีลักษณะเป็นแผ่นบางยาว คล้ายริบบิน หรือไม้บรรทัด ส่วนท่อนาโนไททาเนตมีลักษณะคล้ายท่อ หรือหลอด เมื่อพิจารณาความหนาแน่นรวมจะพบว่าริบบอนนาโนโซเดียมไททาเนตมีความหนาแน่นรวมที่มากกว่าไฮโดรเจนริบบอนนาโนไททาเนตและโซเดียมท่อนาโนไททาเนต

5.1.2 การศึกษาปัจจัยภายในที่มีผลต่อการตกตะกอนพบว่า ความหนาแน่นรวมมีผลต่อการตกตะกอน โดยที่สารที่มีความหนาแน่นรวมมากจะตกตะกอนได้เร็วกว่าสารที่มีความหนาแน่นรวมน้อย

5.1.3 ผลจากการศึกษาปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการตกตะกอน คือ ประจุของตัวเร่งปฏิกิริยา และประจุของสารละลาย พบว่าสามารถตกตะกอนได้ดี เมื่อมีประจุของตัวเร่งปฏิกิริยาและประจุของสารละลายที่แตกต่างกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการตกตะกอนของสารตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในน้ำ ประกอบด้วย ความหนาแน่น และขนาดของอนุภาคที่มีผลต่อแรงเสียดทาน นอกจากนี้ยังพบว่าประจุของสารละลาย ที่ต่างจากประจุของตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้การตกตะกอนมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า จึงต้องทำการศึกษาผลกระทบของความถ่วงจำเพาะในน้ำเพิ่มเติม เพื่อดูประสิทธิภาพในการตกตะกอนต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] siamchemi. “ไททาเนียมไดออกไซด์/TiO₂.”
Available : <http://www.siamchemi.com/>
- [2] ณัฐวดี เทียนผ่องใส และคณะ. “การบำบัดน้ำเสียที่มีฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยกระบวนการเร่งเชิงแสงในสถานะที่มีไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิตสาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2551.
- [3] Len Rosen (2013). “Headlines at 21st Century Tech”
Available : <http://www.21stcentech.com/headlines-21st-century-tech-august2013/>
- [4] Kunlanan Kiatkittipong, Changhui Ye, Jason Scott, and Rose Amal “Understanding Hydrothermal Titanate Nanoribbon Formation” Crystal Growth and Design, 2010, Vol 10, 3618-3625.
- [5] Sarunthorn Tantiwuttiwong, Attaphon Thongkam and Onuma Inkaew “The study approach to utilize Moringa oleifera seed extract as a coagulant” Chemical Engineering Department King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
- [6] Tutorvista. “Flocculation.”
Available <http://chemistry.tutorvista.com/physical-chemistry/flocculation.html>
- [7] Wikipedia. “Double layer (interfacial).”
Available : [http://en.wikipedia.org/wiki/Double_layer_\(interfacial\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Double_layer_(interfacial))
- [8] Tramfloc. “Flocculants : Precipitation and Dewatering. ”
Available : <http://tramfloc.com/flocculants-precipitation-and-dewatering/>
- [9] Mountain Empire. “Flocculation.”
Available : http://water.me.vccs.edu/exam_prep/flocculation.html
- [10] Yongnan Zhao, Jun Jin, Xiaoqin Yang (2007). “Hydrothermal synthesis of titanate nanowire arrays.” Materials Letters. 61: 384-388.
- [11] Kunlanun Kiatkittipong, Akihide Iwase, Jason Scott, Rose Amal (2011). “Hydrothermally Synthesized Titanate Nanostructures: Impact of Heat Treatment on Particle Characteristics and Photocatalytic Properties.” Journal of Chemical Engineering Science 3: 3988-3996.

- [12] TAO Jie, DENG Jie, DONG Xiang, ZHU Hong, TAO Hai-Jun (2012) "Enhanced photocatalytic properties of hierarchical nanostructured TiO₂ spheres synthesized with titanium powders" *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 22:2049-2056
- [13] D. Yogi Goswami., Frank Kreith., and Jan F. Kreider. (1999). "Principles of solar engineering", 2nd ed. Philadelphia : Taylor & Francis.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการศึกษาสภาวะที่ใช้ในการตกตะกอน

1. ผลการศึกษาสภาวะที่ใช้ในการตกตะกอน

1.1 น้ำหนักของสารตั้งต้น

ตารางที่ ก.1 ผลของแข็งแขวนลอยของไททาเนียมไดออกไซด์ในน้ำประปาที่ความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาท)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2		
	น้ำหนัก กระดาษ กรองก่อน กรอง (กรัม)	น้ำหนัก กระดาษ กรองหลัง กรอง (กรัม)	ค่าของแข็ง แขวนลอย ทั้งหมด (มิลลิกรัม ต่อ ลิตร)	น้ำหนัก กระดาษ กรองก่อน กรอง (กรัม)	น้ำหนัก กระดาษ กรองหลัง กรอง (กรัม)	ค่าของแข็ง แขวนลอย ทั้งหมด (มิลลิกรัม ต่อ ลิตร)
1	0.1099	0.1102	30	0.1050	0.1051	10
4	0.0993	0.0994	10	0.1088	0.1089	10
15	0.1009	0.1010	10	0.1030	0.1032	20
30	0.1078	0.1078	0	0.1019	0.1019	0

ตารางที่ ก.2 ผลของแข็งแขวนลอยของไททาเนียมไดออกไซด์ในน้ำประปาที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาท)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2		
	น้ำหนัก กระดาษ กรองก่อน กรอง (กรัม)	น้ำหนัก กระดาษ กรองหลัง กรอง (กรัม)	ค่าของแข็ง แขวนลอย ทั้งหมด (มิลลิกรัม ต่อ ลิตร)	น้ำหนัก กระดาษ กรองก่อน กรอง (กรัม)	น้ำหนัก กระดาษ กรองหลัง กรอง (กรัม)	ค่าของแข็ง แขวนลอย ทั้งหมด (มิลลิกรัม ต่อ ลิตร)
1	0.1090	0.1098	80	0.1071	0.1077	60
4	0.1089	0.1093	40	0.1064	0.1067	30
15	0.1058	0.1062	40	0.1080	0.1083	30
30	0.1006	0.1009	30	0.1074	0.1077	30

ตารางที่ ก.3 ผลของแข็งแขวนลอยของโททาเนียมไดออกไซด์ในน้ำประปาที่ความเข้มข้น 2 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2		
	น้ำหนัก กระดาษ กรองก่อน กรอง (กรัม)	น้ำหนัก กระดาษ กรองหลัง กรอง (กรัม)	ค่าของแข็ง แขวนลอย ทั้งหมด (มิลลิกรัม ต่อ ลิตร)	น้ำหนัก กระดาษ กรองก่อน กรอง (กรัม)	น้ำหนัก กระดาษ กรองหลัง กรอง (กรัม)	ค่าของแข็ง แขวนลอย ทั้งหมด (มิลลิกรัม ต่อ ลิตร)
1	0.0995	0.1004	90	0.1098	0.1106	80
4	0.1102	0.1107	50	0.1029	0.1032	30
15	0.1011	0.1016	50	0.1036	0.1041	50
30	0.1	0.1003	30	0.1023	0.1025	20

1.2 ปริมาตรของสารส้มที่ช่วยในการตกตะกอน

ตารางที่ ก.4 ผลของแข็งแขวนลอยของโททาเนียมไดออกไซด์ในน้ำประปาที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร โดยใส่สารส้มที่ช่วยในการตกตะกอน 5 มิลลิลิตร

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2		
	น้ำหนัก กระดาษ กรองก่อน กรอง (กรัม)	น้ำหนัก กระดาษ กรองหลัง กรอง (กรัม)	ค่าของแข็ง แขวนลอย ทั้งหมด (มิลลิกรัม ต่อ ลิตร)	น้ำหนัก กระดาษ กรองก่อน กรอง (กรัม)	น้ำหนัก กระดาษ กรองหลัง กรอง (กรัม)	ค่าของแข็ง แขวนลอย ทั้งหมด (มิลลิกรัม ต่อ ลิตร)
1	0.1178	0.1182	40	0.1136	0.1140	40
4	0.1139	0.1142	30	0.1067	0.1071	40
15	0.1146	0.1148	20	0.1132	0.1135	30
30	0.1113	0.1115	20	0.1003	0.1006	30

ตารางที่ ก.5 ผลของแข็งแขวนลอยของโททานิยมไดออกไซด์ในน้ำประปาที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร โดยใส่สารส้มที่ช่วยในการตกตะกอน 10 มิลลิลิตร

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2		
	น้ำหนัก กระดาษ กรองก่อน กรอง (กรัม)	น้ำหนัก กระดาษ กรองหลัง กรอง (กรัม)	ค่าของแข็ง แขวนลอย ทั้งหมด (มิลลิกรัม ต่อ ลิตร)	น้ำหนัก กระดาษ กรองก่อน กรอง (กรัม)	น้ำหนัก กระดาษ กรองหลัง กรอง (กรัม)	ค่าของแข็ง แขวนลอย ทั้งหมด (มิลลิกรัม ต่อ ลิตร)
1	0.1090	0.1098	80	0.1071	0.1077	60
4	0.1089	0.1093	40	0.1064	0.1067	30
15	0.1058	0.1062	40	0.1080	0.1083	30
30	0.1006	0.1009	30	0.1074	0.1077	30

ตารางที่ ก.6 ผลของแข็งแขวนลอยของโททานิยมไดออกไซด์ในน้ำประปาที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ที่ โดยใส่สารส้มที่ช่วยในการตกตะกอน 20 มิลลิลิตร

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2		
	น้ำหนัก กระดาษ กรองก่อน กรอง (กรัม)	น้ำหนัก กระดาษ กรองหลัง กรอง (กรัม)	ค่าของแข็ง แขวนลอย ทั้งหมด (มิลลิกรัม ต่อ ลิตร)	น้ำหนัก กระดาษ กรองก่อน กรอง (กรัม)	น้ำหนัก กระดาษ กรองหลัง กรอง (กรัม)	ค่าของแข็ง แขวนลอย ทั้งหมด (มิลลิกรัม ต่อ ลิตร)
1	0.1207	0.1214	70	0.1003	0.1010	70
4	0.1150	0.1155	50	0.1132	0.1135	30
15	0.1187	0.1190	30	0.1003	0.1007	40
30	0.1085	0.1089	40	0.1203	0.1207	40

ภาคผนวก ข

ผลการศึกษาปัจจัยภายนอกและภายในที่มีผลต่อการตกตะกอน

1. ผลการศึกษาปัจจัยภายนอกและภายในที่มีผลต่อการตกตะกอน

1.1 ลักษณะโครงสร้าง

ตารางที่ ข.1 ผลของแข็งแขวนลอยของโททาเนียมไดออกไซด์ในน้ำประปาที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร โดยใส่สารส้มที่ช่วยในการตกตะกอน 10 มิลลิตร

เวลา (นาท)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2		
	น้ำหนัก กระดาษ กรองก่อน กรอง (กรัม)	น้ำหนัก กระดาษ กรองหลัง กรอง (กรัม)	ค่าของแข็ง แขวนลอย ทั้งหมด (มิลลิกรัม ต่อ ลิตร)	น้ำหนัก กระดาษ กรองก่อน กรอง (กรัม)	น้ำหนัก กระดาษ กรองหลัง กรอง (กรัม)	ค่าของแข็ง แขวนลอย ทั้งหมด (มิลลิกรัม ต่อ ลิตร)
1	0.1090	0.1098	80	0.1071	0.1077	60
2	0.1078	0.1084	60	0.1063	0.1068	50
3	0.1074	0.1078	40	0.1058	0.1062	40
4	0.1089	0.1093	40	0.1064	0.1067	30
6	0.1077	0.1082	50	0.1048	0.1052	40
8	0.1065	0.1068	30	0.1052	0.1057	50
10	0.1027	0.1031	40	0.1055	0.1058	30
15	0.1058	0.1062	40	0.108	0.1083	30
20	0.1010	0.1013	30	0.1071	0.1074	30
30	0.1006	0.1009	30	0.1074	0.1077	30

ตารางที่ ข.2 ผลของแข็งแขวนลอยของริบบอนนาโนโซเดียมไททาเนตในน้ำประปาที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร โดยใส่สารส้มที่ช่วยในการตกตะกอน 10 มิลลิลิตร

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2		
	น้ำหนัก กระดาษ กรองก่อน กรอง (กรัม)	น้ำหนัก กระดาษ กรองหลัง กรอง (กรัม)	ค่าของแข็ง แขวนลอย ทั้งหมด (มิลลิกรัม ต่อ ลิตร)	น้ำหนัก กระดาษ กรองก่อน กรอง (กรัม)	น้ำหนัก กระดาษ กรองหลัง กรอง (กรัม)	ค่าของแข็ง แขวนลอย ทั้งหมด (มิลลิกรัม ต่อ ลิตร)
1	0.1023	0.1026	30	0.1022	0.1025	30
2	0.1027	0.1029	20	0.1020	0.1023	30
3	0.1113	0.1115	20	0.1026	0.1029	30
4	0.1003	0.1004	10	0.1035	0.1038	30
6	0.1011	0.1012	10	0.1099	0.1101	20
8	0.1024	0.1025	10	0.1100	0.1102	20
10	0.1026	0.1027	10	0.1010	0.1012	20
15	0.1028	0.1029	10	0.1086	0.1087	10
20	0.1033	0.1034	10	0.1096	0.1097	10
30	0.1026	0.1027	10	0.1100	0.1101	10

ตารางที่ ข.3 ผลของแข็งแขวนลอยของท่อนาโนโซเดียมไททานเนตในน้ำประปาที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร โดยใส่สารส้มที่ช่วยในการตกตะกอน 10 มิลลิกรัม

เวลา (นาท)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2		
	น้ำหนัก กระดาษ กรองก่อน กรอง (กรัม)	น้ำหนัก กระดาษ กรองหลัง กรอง (กรัม)	ค่าของแข็ง แขวนลอย ทั้งหมด (มิลลิกรัม ต่อ ลิตร)	น้ำหนัก กระดาษ กรองก่อน กรอง (กรัม)	น้ำหนัก กระดาษ กรองหลัง กรอง (กรัม)	ค่าของแข็ง แขวนลอย ทั้งหมด (มิลลิกรัม ต่อ ลิตร)
1	0.1012	0.1017	50	0.1097	0.1102	50
2	0.1057	0.1061	40	0.1041	0.1045	40
3	0.1079	0.1082	30	0.1013	0.1017	40
4	0.1017	0.1019	20	0.1088	0.1092	40
6	0.1018	0.1020	20	0.1089	0.1093	40
8	0.1090	0.1092	20	0.1027	0.1030	30
10	0.1094	0.1096	20	0.1035	0.1038	30
15	0.1100	0.1102	20	0.1085	0.1087	20
20	0.1032	0.1034	20	0.1047	0.1049	20
30	0.1023	0.1024	10	0.1038	0.1039	10

ตารางที่ ข.4 ผลของแข็งแขวนลอยของริบบอนนาโนไฮโดรเจนไททาเนตในน้ำประปาที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร โดยใส่สารส้มที่ช่วยในการตกตะกอน 10 มิลลิกรัม

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2		
	น้ำหนัก กระดาษ กรองก่อน กรอง (กรัม)	น้ำหนัก กระดาษ กรองหลัง กรอง (กรัม)	ค่าของแข็ง แขวนลอย ทั้งหมด (มิลลิกรัม ต่อ ลิตร)	น้ำหนัก กระดาษ กรองก่อน กรอง (กรัม)	น้ำหนัก กระดาษ กรองหลัง กรอง (กรัม)	ค่าของแข็ง แขวนลอย ทั้งหมด (มิลลิกรัม ต่อ ลิตร)
1	0.1093	0.1103	100	0.1018	0.1021	30
2	0.1012	0.1020	80	0.0999	0.1000	10
3	0.1013	0.1019	60	0.1055	0.1057	20
4	0.1065	0.1070	50	0.1021	0.1024	30
6	0.1026	0.1029	30	0.1022	0.1025	30
8	0.1001	0.1004	30	0.1023	0.1024	10
10	0.1046	0.1050	40	0.1013	0.1015	20
15	0.1005	0.1008	30	0.1062	0.1063	10
20	0.1062	0.1064	20	0.1072	0.1075	30
30	0.1070	0.1072	20	0.1021	0.1023	20

2.2 ความเป็นกรด-เบส

ตารางที่ ข.5 ผลของแข็งแขวนลอยของริบบอนนาโนโซเดียมไททาเนตในน้ำประปาที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร มีความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 10 มี ใส่สารส้มที่ช่วยในการตกตะกอน 10 มิลลิตร

เวลา (นาท)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2		
	น้ำหนัก กระดาษ กรองก่อน กรอง (กรัม)	น้ำหนัก กระดาษ กรองหลัง กรอง (กรัม)	ค่าของแข็ง แขวนลอย ทั้งหมด (มิลลิกรัม ต่อ ลิตร)	น้ำหนัก กระดาษ กรองก่อน กรอง (กรัม)	น้ำหนัก กระดาษ กรองหลัง กรอง (กรัม)	ค่าของแข็ง แขวนลอย ทั้งหมด (มิลลิกรัม ต่อ ลิตร)
1	0.1061	0.1063	20	0.1021	0.1023	20
2	0.1072	0.1074	20	0.1041	0.1043	20
4	0.1068	0.1069	10	0.1012	0.1014	20
8	0.1084	0.1085	10	0.1014	0.1015	10
15	0.1013	0.1014	10	0.1091	0.1091	0
20	0.1019	0.1019	0	0.1037	0.1037	0

ตารางที่ ข.6 ผลของแข็งแขวนลอยของริบบอนนาโนโซเดียมไททาเนตในน้ำประปาที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร มีความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 6 มีโดยใส่สารส้มที่ช่วยในการตกตะกอน 10 มิลลิตร

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2		
	น้ำหนัก กระดาศ กรองก่อน กรอง (กรัม)	น้ำหนัก กระดาศ กรองหลัง กรอง (กรัม)	ค่าของแข็ง แขวนลอย ทั้งหมด (มิลลิกรัม ต่อ ลิตร)	น้ำหนัก กระดาศ กรองก่อน กรอง (กรัม)	น้ำหนัก กระดาศ กรองหลัง กรอง (กรัม)	ค่าของแข็ง แขวนลอย ทั้งหมด (มิลลิกรัม ต่อ ลิตร)
1	0.1023	0.1026	30	0.1022	0.1025	30
2	0.1027	0.1029	20	0.1020	0.1023	30
4	0.1003	0.1004	10	0.1035	0.1038	30
8	0.1024	0.1025	10	0.1100	0.1102	20
15	0.1028	0.1029	10	0.1086	0.1087	10
20	0.1033	0.1034	10	0.1096	0.1097	10

ตารางที่ ข.7 ผลของแข็งแขวนลอยของริบบอนนาโนโซเดียมไททาเนตในน้ำประปาที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 3 โดยใช้สารส้มที่ช่วยในการตกตะกอน 10 มิลลิตร

เวลา (นาท)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2		
	น้ำหนัก กระดาษ กรองก่อน กรอง (กรัม)	น้ำหนัก กระดาษ กรองหลัง กรอง (กรัม)	ค่าของแข็ง แขวนลอย ทั้งหมด (มิลลิกรัม ต่อ ลิตร)	น้ำหนัก กระดาษ กรองก่อน กรอง (กรัม)	น้ำหนัก กระดาษ กรองหลัง กรอง (กรัม)	ค่าของแข็ง แขวนลอย ทั้งหมด (มิลลิกรัม ต่อ ลิตร)
1	0.1038	0.1039	10	0.1007	0.1008	10
2	0.1081	0.1082	10	0.1053	0.1054	10
4	0.1086	0.1088	20	0.1013	0.1013	0
8	0.1005	0.1007	20	0.1012	0.1012	0
15	0.1039	0.104	10	0.1103	0.1103	0
20	0.1021	0.1021	0	0.1063	0.1063	0