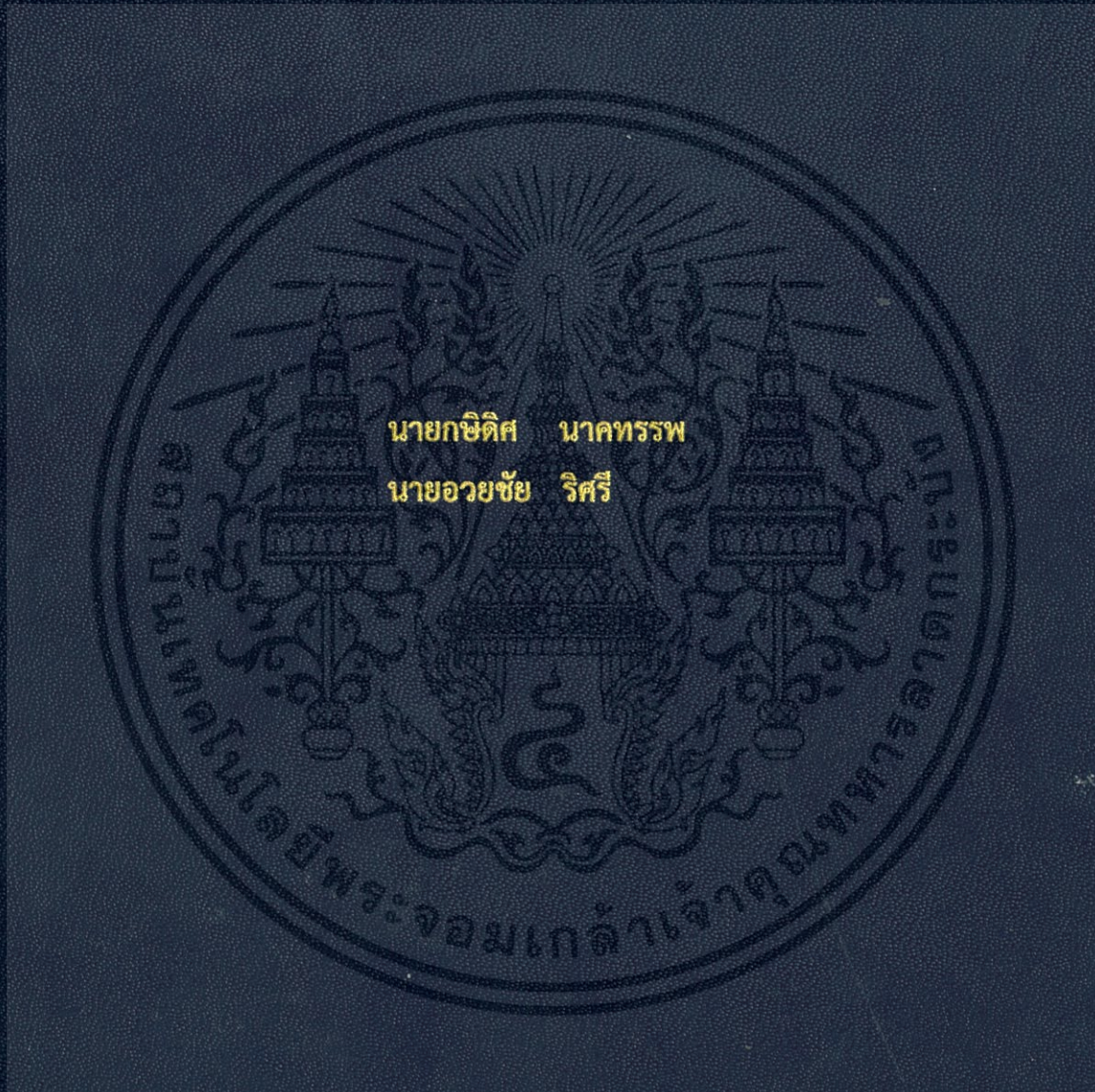


**กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงและประสิทธิภาพของการดูดซับสี้อมด้วยนาโนไททาเนต**



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2557

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

กระบวนการเร่งปฏิบัติการเชิงแสงและประสิทธิภาพของการดูดซับสีด้วยนาโนไททานต



T140344

ฉปพ  
๑ 329๗  
2๕5๗

นายกษิตศ  
นายอวยชัย

นาถรรพ  
ริศรี

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 140344  
วัน,เดือน,ปี 18 อ.ค. 2559

b. 1273844x  
i.....

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PHOTOCATALYTIC ACTIVITY OF TITANATE  
NANOSTRUCTURE AND ADSORPTION PAERFORMANCES



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงและประสิทธิภาพของการดูดซับสีด้วยนาโนไททาเนต  
โดย นายกษิตศ นาคทรพร  
นายอวยชัย ริศรี  
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์  
ปริญญาานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ดร. กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์)

  
..... กรรมการ  
(ผศ.ดร. สूरตัน อารีรัตน์)

  
..... กรรมการ  
(ดร. ณัฐพล ฤกษ์เกษมสันต์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงและประสิทธิภาพของการดูดซับสีย้อมด้วยนาโนไททาเนต
โดย	นายกษิตศ นาคทรพร นายอวยชัย ริศรี
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2557
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. กุลนันทน์ เกียรติกิตติพงษ์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับและการย่อยสลายสีย้อมโดยใช้สารประกอบท่อนาโนไททาเนตและริบบอนนาโนไททาเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง การสังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล ริบบอนนาโนไททาเนตที่มีความกว้าง 0.2 ไมโครเมตร ความยาว 2.5 ไมโครเมตร มีลักษณะพื้นที่ผิว 32 ตารางเมตรต่อกรัม ถูกสังเคราะห์ที่สภาวะอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และท่อนาโนไททาเนตที่มีความกว้าง 0.2 ไมโครเมตร ความยาว 6.4 ไมโครเมตร มีลักษณะพื้นที่ผิว 138 ตารางเมตรต่อกรัม ที่สภาวะอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จะได้ การล้างกรดไฮโดรคลอริกช่วยแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างโซเดียมกับไฮโดรเจน ในการหาประสิทธิภาพการดูดซับของสารประกอบนาโนไททาเนตในละลายเมทิลีนบลูพบว่าท่อโซเดียมนาโนไททาเนตมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากที่สุดเนื่องจากมีพื้นที่ผิวมากที่สุด ลักษณะแลงเมียร์ไอโซเทอม และค่าคงที่ของอัตราการดูดซับในรูปแบบของ pseudo second order โดยค่าของการดูดซับที่มากที่สุดเท่ากับ 178.57 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าคงที่อัตราการดูดซับมีค่าเท่ากับ 0.079 กรัมต่อมิลลิกรัมนาที ในส่วนการย่อยสลายเมทิลีนบลูโดยใช้แสงเป็นตัวกระตุ้นด้วยท่อโซเดียมนาโนไททาเนตพบว่าจะมีค่าอัตราในการย่อยสลายที่ 0.102 ต่ออนาที โดยที่ค่าความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเริ่มต้นที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

**Report Title** Photocatalytic activity of titanate nanostructure and adsorption performances  
**By** Mr. Kasidis Naktup  
Mr. Uaychai Risri  
**Degree** Bachelor of Engineering  
**Program** Chemical Engineering  
**Year** 2014  
**Advisor** Dr. Kunlanan Kiatkittipong

## ABSTRACT

The objective of this thesis is to study adsorption performances and degradation for organic dye pollutants through photocatalysis using titanates nanotubes and titanates nanoribbons. The titanate nanostructures were synthesized via hydrothermal reaction. Titanates nanoribbons width 0.2  $\mu\text{m}$  length 2.5  $\mu\text{m}$  and surface area of 38  $\text{m}^2/\text{g}$  was obtained under the condition at temperature 200 C for 24 hr, and titanates nanotubes width 0.2  $\mu\text{m}$  length 6.4  $\mu\text{m}$  and surface area of 138  $\text{m}^2/\text{g}$  was obtained at 150 C for 72 hr. Washing with HCl providing ion-exchange between sodium and hydrogen can produce hydrogen titanate. The adsorption performances of methylene blue onto nanotitanates compound was studied. The equilibrium adsorption data were analyzed with Langmuir isotherm models and adsorption kinetics was evaluated by the pseudo-second-order model. The sodium titanates nanotube shows the best performances for dark adsorption, corresponding to maximum adsorption capacity of 178.57  $\text{mg}/\text{g}$  and adsorption kinetics of 0.119  $\text{g}/\text{mg}\cdot\text{min}$ . For degradation onto methylene blue with sodium titanates nanotubes, This showed rate constant of 0.102  $\text{min}^{-1}$  by initial concentration of methylene blue at 10  $\text{mg}/\text{l}$

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร.กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโทที่มอบความรู้ให้ คำปรึกษา คำแนะนำเป็นอย่างดีมาโดยตลอดเวลาในการทำปริญญาโทนี้ ทำให้ปริญญาโทนี้ สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คณะอาจารย์สาขาวิศวกรรมเคมีทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษา ข้อคิด และวิธีการใช้อุปกรณ์ในห้องแล็บในการทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ ดิฟแฟรกชัน (XRD)

ขอขอบพระคุณ ศ.ดร. สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ขอขอบพระคุณศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์

ขอขอบคุณ พี่ป๋วย นุชจรินทร์ จุสิงห์ ที่คอยให้คำแนะนำ คำปรึกษาเกี่ยวกับงานวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายขอขอบพระคุณ ครอบครัวของคณะผู้จัดทำ และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องการจัดทำ และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องกับการจัดทำปริญญาโทนี้ ที่ให้การสนับสนุน ช่วยเหลือ และคอยเป็นกำลังใจที่ติดตลอดมา จนทำให้ปริญญาโทเล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

กษิตศ นาคทรพร  
อวยชัย ริศรี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	i
ABSTRACT .....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญตาราง.....	vi
สารบัญรูปภาพ.....	viii
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	3
2.1 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalytic Process).....	3
2.2 สารประกอบไททาเนียม-ออกไซด์ (Titanium-oxide compound).....	5
2.2.1 ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titaniumdioxide, TiO <sub>2</sub> ).....	5
2.2.2 การสังเคราะห์สารประกอบนาโนไททาเนียม-ออกไซด์ (Nanotitanium-Oxide Synthesis).....	6
2.3 กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process).....	7
2.3.1 กลไกของกระบวนการดูดซับ .....	7
2.3.2 ประเภทของการดูดซับ .....	8
2.3.2.1 การดูดซับทางกายภาพ.....	8
2.3.2.1 การดูดซับทางเคมี .....	8
2.3.3 ทฤษฎีแลงเมียร์ ไอโซเทอม (Langmuir Adsorption Isotherm).....	9
2.3.4 ทฤษฎีฟรุนดลิช ไอโซเทอม (Freundlich Adsorption Isotherm) .....	10
2.4 เมทิลีนบลู (Methylene blue).....	10
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	11
บทที่ 3 วิธีการทดลอง .....	13
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	13
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	13
3.3 การสังเคราะห์โครงสร้างริบบอนนาโนไททาเนตและท่อนาโนไททาเนตด้วย กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล .....	13
3.4 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมี.....	15
3.5 การดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา .....	15
3.6 การกำจัดสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา .....	15

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล .....	16
4.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานาโนเมตร .....	16
4.1.1 ไททาเนียมไดออกไซด์.....	16
4.1.2 ริงบอนนาโนไททาเนต.....	17
4.1.3 ท่อนาโนไททาเนต.....	20
4.2 ประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายเมทาลินบลู .....	21
4.2.1 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm).....	21
4.2.2 ค่าไคเนติกของการดูดซับ (Kinetic Adsorption).....	23
4.3 การย่อยสลายสารละลายเมทาลินบลู.....	25
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	28
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	28
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	29
บรรณานุกรม.....	30
ภาคผนวก.....	32
ภาคผนวก ก ข้อมูลดิบ .....	33
ภาคผนวก ข ผลการคำนวณ.....	45
ภาคผนวก ค การคำนวณ.....	48

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อดี-ข้อเสียกระบวนการต่างๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์สารประกอบนาโนไทเทเนียม ออกไซด์ .....	6
2.2 สมบัติของการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ.....	8
4.1 ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดเทียบแลงเมียร์ไอโซเทอมกับฟลูนดิซไอโซเทอม.....	22
4.2 ค่าความจุและค่าคงที่ของการดูดซับจากแลงเมียร์ไอโซเทอม.....	23
4.3 ผลการคำนวณการหาแบบจำลองและค่าไคเนติกการดูดซับ .....	25
ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อม.....	33
ก.2 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 10 mg/l.....	34
ก.3 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/l.....	34
ก.4 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 10 mg/l.....	35
ก.5 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/l.....	35
ก.6 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 30 mg/l.....	36
ก.7 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 40 mg/l.....	36
ก.8 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 10 mg/l.....	37
ก.9 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/l.....	37
ก.10 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 30 mg/l.....	38
ก.11 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 40 mg/l.....	38
ก.12 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 10 mg/l.....	39
ก.13 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/l.....	39
ก.14 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 30 mg/l.....	40
ก.15 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 10 mg/l.....	40
ก.16 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/l.....	41
ก.17 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 30 mg/l.....	41
ก.18 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 40 mg/l.....	42
ก.19 ผลการย่อยสลายเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 10 mg/l โดยท่อโซเดียมนาโนไททาเนต .....	43
ก.20 ผลการย่อยสลายเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/l โดยท่อโซเดียมนาโนไททาเนต .....	44
ข.1 ค่าการคำนวณ Langmuir Isotherm ไททาเนียมไดออกไซด์ .....	45
ข.2 ค่าการคำนวณ Langmuir Isotherm ของท่อโซเดียมนาโนไททาเนต .....	45
ข.3 ค่าการคำนวณ Langmuir Isotherm ของท่อไฮโดรเจนนาโนไททาเนต.....	45
ข.4 ค่าการคำนวณ Langmuir Isotherm ของริบบอนโซเดียมนาโนไททาเนต .....	45
ข.5 ค่าการคำนวณ Langmuir Isotherm ของริบบอนไฮโดรเจนนาโนไททาเนต .....	46
ข.6 ค่าการคำนวณ Freundlich isotherm ของไททาเนียมไดออกไซด์ .....	46
ข.7 ค่าการคำนวณ Freundlich isotherm ของท่อโซเดียมนาโนไททาเนต .....	46
ข.8 ค่าการคำนวณ Freundlich isotherm ของท่อไฮโดรเจนนาโนไททาเนต.....	46
ข.9 ค่าการคำนวณ Freundlich isotherm ของริบบอนโซเดียมนาโนไททาเนต .....	47
ข.10 ค่าการคำนวณ Freundlich isotherm ของริบบอนไฮโดรเจนนาโนไททาเนต.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.1 ปริมาตรที่ต้องการเจือจางในแต่ละความเข้มข้น.....	48
ค.2 ความเข้มข้นที่เวลาใดๆที่สมดุลในแต่ละความเข้มข้นของท่อโซเดียมนาโนไททาเนต.....	49
ค.3 ความสามารถในการดูดซับที่สมดุลในแต่ละความเข้มข้น.....	49
ค.4 ค่า $\ln Q$ และ $\ln C_{eq}$ ในแต่ละความเข้มข้น.....	50



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเกิดช่องว่างของอิเล็กตรอน และโฮล จากการกระตุ้นด้วยพลังงานจากแสง.....	3
2.2 กลไกการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalytic activity) .....	4
2.3 แสดงโครงสร้างโททานิยมไดออกไซด์แต่ละแบบ .....	5
3.1 ส่วนประกอบเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอล.....	14
4.1 ลักษณะทางกายภาพของโททานิยมไดออกไซด์แบบอนาเทส .....	16
4.2 ลักษณะพื้นฐานและพื้นผิวของโททานิยมออกไซด์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้น .....	17
4.3 โครงสร้างผลึกของโททานิยมไดออกไซด์แบบอนาเทส (XRD pattern: No.21-1272).....	17
4.4 ลักษณะทางกายภาพของริบบอนนาโนโททานิต.....	18
4.5 โครงสร้างผลึกของโซเดียมริบบอนนาโนโททานิต.....	18
4.6 โครงสร้างผลึกของไฮโดรเจนริบบอนนาโนโททานิต .....	18
4.7 พื้นฐานและลักษณะพื้นผิวของริบบอนโซเดียมนาโนโททานิต .....	19
4.8 พื้นฐานและลักษณะพื้นผิวของริบบอนไฮโดรเจนนาโนโททานิต.....	20
4.9 ลักษณะพื้นผิวของท่อนาโนโททานิต .....	20
4.10 กราฟความเข้มข้นสารละลายเมทิลีนบลูเทียบกับเวลา.....	21
4.11 ผลการคำนวณ Langmuir Isotherm .....	21
4.12 ผลการคำนวณ Freundlich Isotherm.....	22
4.13 กราฟเชิงเส้นหาความสัมพันธ์ pseudo first order .....	24
4.14 กราฟเชิงเส้นหาความสัมพันธ์ pseudo second order.....	25
4.15 การย่อยสลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 และ 20 mg/L.....	26
4.16 อัตราการย่อยสลายเมทิลีนบลูภายใต้แสงที่มองเห็น .....	26
ก.1 กราฟมาตรฐานของสีย้อม .....	33

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันมนุษย์มีความต้องการในด้านการบริโภคมากขึ้น อาทิ อาหาร เครื่องดื่ม เทคโนโลยี และอื่นๆอีกมากมาย ส่งผลให้ภาคอุตสาหกรรมเพิ่มกำลังการผลิตมากขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ ทำให้มีการปล่อยมลพิษออกสู่อากาศและแหล่งน้ำตามธรรมชาติมากขึ้น โดยน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมนับเป็นปัญหาหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สิ่งมีชีวิตรวมทั้งการดำรงชีวิตของมนุษย์ด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องตระหนักถึงปัญหาดังกล่าว และคำนึงถึงวิธีการบำบัดคุณภาพน้ำก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ โดยกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่น่าสนใจกระบวนการหนึ่งคือกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ถือเป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียเชิงเคมี ที่ประกอบไปด้วยกลไกของการเกิดปฏิกิริยาซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงไม่ใช้แสง (Dark adsorption) เป็นการดูดซับสารอินทรีย์บนตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อเตรียมพร้อมในการย่อยสลายโมเลกุล ช่วงที่สองคือช่วงของการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photodegradation) ในช่วงนี้โมเลกุลของสารอินทรีย์จะถูกย่อยสลายให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) กับน้ำ (H<sub>2</sub>O) ตัวเร่งที่นิยมใช้คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความเสถียร เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่ยังคงมีข้อจำกัดในด้านของพื้นที่ผิวและโครงสร้างที่ส่งผลต่อกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก ดังนั้นจึงได้มีหลายงานวิจัยที่ศึกษาหาวิธีในการปรับปรุงและแก้ไขเพื่อให้ได้มาซึ่งประสิทธิภาพสูงสุดของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการใช้เทคนิคต่างๆหลายวิธีในการสังเคราะห์ เช่น วิธีโซลเจล วิธีปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต และวิธีไฮโดรเทอร์มอล วิธีไฮโดรเทอร์มอลมีข้อดีที่แตกต่างจากวิธีอื่นๆ และเป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลายโดยมีข้อดี คือ มีความเป็นเนื้อเดียวกันของสารทางเคมีที่ดีสูงโดยไม่จำเป็นต้องมีการเผาหรืออบด้วยอีก สามารถควบคุมรูปร่างของผลึกได้ อนุภาคของสารมีขนาดเล็กระดับไมโครถึงนาโน และทำให้ประหยัดพลังงาน อีกทั้งยังสามารถสังเคราะห์สารประกอบที่มีลักษณะรูปร่างแบบต่างๆได้

ด้วยข้อดีของไฮโดรเทอร์มอล งานวิจัยนี้จึงได้ใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) เพื่อควบคุมโครงสร้างและพื้นที่ผิวให้เกิดการดูดซับให้มีประสิทธิภาพสูงสุด และยังมีอีกหลายงานวิจัยที่ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะของอนุภาคนาโนไททานต และสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ระหว่างริบบอนนาโนไททานต และท่อนาโนไททานต [1] ซึ่งงานวิจัยนี้มีจุดที่น่าสนใจคือ วิธีการสังเคราะห์ริบบอนนาโนไททานต และท่อนาโนไททานต และอีกหนึ่งงานวิจัยคือได้ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับและการย่อยสลายสี้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสของสารประกอบไททานตในสารละลายเมทิลีนบลู ซึ่งได้มีการสังเคราะห์โครงสร้างของสารประกอบไททานตโดยมีการปรับเปลี่ยนค่าอุณหภูมิในการสังเคราะห์ระหว่าง 100-200 องศาเซลเซียส โดยการหาประสิทธิภาพของการดูดซับนั้นจะใช้ทฤษฎีแลง-เมียร์ไอโซเทอมกับฟลูติกไอโซเทอมในการคำนวณ [2]

อย่างไรก็ตามในส่วนของการย่อยสลายสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสโดยใช้แสงเป็นตัวกระตุ้น นาโนไททาเนตที่มีลักษณะโครงสร้างแบบรีบอบและท่อที่มีสารประกอบระหว่างโซเดียมและไฮโดรเจนพร้อมทั้งหาค่าอัตราการย่อยสลายสีย้อมของตัวเร่งปฏิกิริยา ยังไม่มีงานวิจัยใดรายงาน

ดังนั้นงานวิจัยเล่มนี้ได้ทำการศึกษาวิธีการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาในลักษณะของอนุภาคนาโนไททาเนตซึ่งอยู่ในรูปรีบบอนนาโนไททาเนต และท่อนาโนไททาเนต และปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสในสารละลายเมทิลีนบลูโดยหาประสิทธิภาพของการดูดซับ จากทฤษฎีของแลงเมียร์-ไอโซเทอมกับพลุนดิชไอโซเทอมและประสิทธิภาพของการย่อยสลายสีย้อม ด้วยวิธีการหาค่าคงที่อัตราการทำปฏิกิริยา

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ควบคุมและสังเคราะห์โครงสร้างระดับนาโนของสารประกอบไททาเนียมไดออกไซด์
2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับของ และการกำจัดสีย้อม (Methylene Blue) ด้วยวิธีการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของสารประกอบไททาเนียมไดออกไซด์

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ให้อยู่ในรูปของรีบบอนนาโนไททาเนต และท่อนาโนไททาเนต โดยศึกษาปัจจัยและสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ให้ได้รูปร่างของโครงสร้างตามที่ต้องการ
2. ศึกษาโครงสร้างและประสิทธิภาพของรีบบอนนาโนไททาเนต และท่อนาโนไททาเนต ภายหลังจากการแลกเปลี่ยนไอออนกับกรดไฮโดรคลอริก (HCl)
3. ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดเมทิลีนบลู ด้วยวิธีการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง โดยเน้นศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับของตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปของรีบบอนนาโนไททาเนตและท่อนาโนไททาเนต ในสารละลายเมทิลีนบลู

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถควบคุมโครงสร้างระดับนาโนของสารประกอบไททาเนียมไดออกไซด์ เพื่อปรับปรุงให้มีความเหมาะสมต่อปฏิกิริยาเร่งเชิงแสง
2. ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลูของสารประกอบไททาเนียมไดออกไซด์

## บทที่ 2

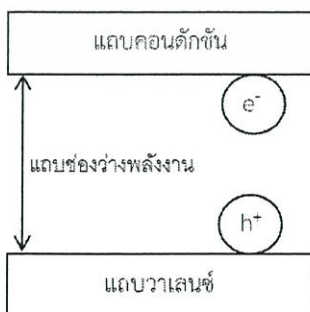
### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันการบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมนั้นมีการบำบัดน้ำเสียหลายวิธี ซึ่งสามารถแบ่งวิธีการบำบัดน้ำเสียออกเป็นวิธีหลักๆ ได้ 3 วิธี คือการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางกายภาพ เช่น การกรอง การทำให้ตกตะกอน ฯลฯ การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมี เช่น การใส่สารเคมีเพื่อให้ตกตะกอน การทำให้เป็นกลาง ฯลฯ และวิธีสุดท้ายเป็นการกำจัดน้ำเสียด้วยวิธีทางชีวภาพ เช่น การใช้สารจุลินทรีย์เป็นตัวย่อยสลายมลพิษในน้ำเสีย แต่วิธีที่นิยมกันมากในอุตสาหกรรมคือการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางกายภาพ-เคมี เช่น การดูดซับด้วยผงถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ซึ่งจะสามารถกำจัดได้ทั้ง กลิ่นและมลพิษในน้ำ วิธีเหล่านี้แม้จะลดสารที่เป็นมลพิษลงได้แล้วนั้นแต่ยังคงมีเหลือสารมลพิษตกค้างอยู่ ถือได้ว่าเป็นหนึ่งในข้อจำกัดของกระบวนการดังกล่าวนี้ หนึ่งในวิธีที่ได้รับความสนใจวิธีหนึ่งคือวิธีการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (photocatalytic) ซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษตกค้างเนื่องจากกระบวนการดังกล่าวเป็นการทำลายโครงสร้างที่มีความเป็นพิษของสารโดยหากสารพิษเป็นสารอินทรีย์ ก็จะทำลายพันธะของสารอินทรีย์ให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาวิธีการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ดังจะกล่าวต่อไป

#### 2.1 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalytic Process)

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalytic Process) เป็นปฏิกิริยาที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้แสงเป็นตัวกระตุ้น โดยที่ค่า  $E=hc/\lambda$  พลังงานของแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นสั้นหรือถี่ ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ดังนั้นชนิดของแสงถือเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง [3]

ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในน้ำ ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกกระตุ้นด้วยแสงซึ่งมีพลังงานโฟตอนที่สูงกว่าหรือเท่ากับค่าแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (Valence band, VB) ถูกกระตุ้นขึ้นไปยังแถบคอนดักชัน (Conduction band, CB) ทำให้เกิดช่องว่างอิเล็กตรอนหรือโฮล ( $e^-/h^+$  pair) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเกิดช่องว่างของอิเล็กตรอนและโฮล จากการกระตุ้นด้วยพลังงานจากแสง

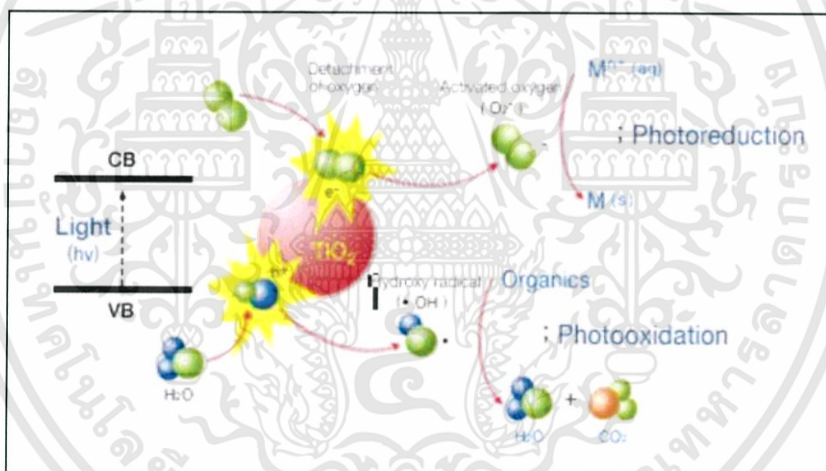
(ปรับปรุงจาก: อภิรัฐ, 2551)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อโฮลที่อยู่บนผิวของแถบวาเลนซ์สัมผัสกับโมเลกุลของน้ำจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ทำให้เกิด ไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\text{OH}\cdot$ ) ดังสมการที่ 2.1 และ ออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) ที่ละลายอยู่ในน้ำจะเป็นตัวรับอิเล็กตรอนเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล ( $\text{O}_2^-$ ) ดังสมการที่ 2.2



ตัวไฮดรอกซิลเรดิคัลจะสามารถย่อยสารประกอบอินทรีย์ได้เนื่องจากเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง เรียกกระบวนการนี้ว่าโฟโตออกซิเดชัน (Photooxidation) ในขณะที่ซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลนั้นเป็นตัวรีดิวซ์ที่แรงก็จะสามารถทำปฏิกิริยากับสารที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) ที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของสารได้ด้วยปฏิกิริยาโฟตรีดักชัน (Photoreduction) จากปฏิกิริยาทั้ง 2 จะทำให้สารอินทรีย์ที่อยู่ในสารละลายถูกกำจัดและสลายตัวกลายเป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะเรียกกระบวนการทั้งหมดนี้ว่า กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง [4] กลไกการเกิดกระบวนการแสดงดังรูป 2.2



รูปที่ 2.2 กลไกการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalytic activity) [19]

จากการศึกษากระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงจะพบว่า ไททาเนียมไดออกไซด์ ที่เป็นสารเร่งปฏิกิริยาและเป็นสารกึ่งตัวนำ (Semi-conductor) เนื่องจากสารกึ่งตัวนำจะมีชั้น แถบวาเลนซ์และแถบคอนดักชันที่ไม่ติดกันเกิดเป็นช่องว่างเรียกแบนด์แก๊ป (Band Gap) จะสามารถเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงได้ดี เนื่องจากอิเล็กตรอนที่อยู่บนแถบคอนดักชันไม่กลับลงมาที่แถบวาเลนซ์ ต่างจากสารโลหะตัวนำที่มีชั้นทั้ง 2 ชั้นติดกัน และพบว่า ไททาเนียมไดออกไซด์ มีราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษ ต่อสิ่งแวดล้อม ความเสถียรสูง ความสามารถในการละลายต่ำ [7] นอกจากนี้ได้มีการศึกษาเปรียบเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น พบว่าการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์แขวนลอย สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์มีค่าแบนด์แก๊ปอยู่ที่ 3.2 โวลต์ ทำให้

ต้องใช้พลังงานแสงในช่วงของแสงยูวี ( $\lambda \leq 400$  นาโนเมตร) จึงต้องใช้แสงจากหลอดยูวีเป็นแหล่งกำเนิดแสง [3]

## 2.2 สารประกอบไททาเนียม-ออกไซด์ (Titanium-oxide compound)

### 2.2.1 ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titaniumdioxide, $TiO_2$ )

ไททาเนียมไดออกไซด์ปัจจุบันนิยมนำมาใช้ประโยชน์ในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆหลายชนิด เช่น ใช้สำหรับสารให้สี ใช้เป็นสารเคลือบผลิตภัณฑ์ ใช้ในการบำบัดมลพิษ ฯลฯ โดยที่ไททาเนียมไดออกไซด์นี้จะประกอบไปด้วยไททาเนียม (Ti) เป็นโลหะสีเทา มีมวลอะตอมเท่ากับ 47.9 ไม่วิป และทนต่อการกัดกร่อน แต่โดยทั่วไปจะพบอยู่ในรูปของ ไททาเนียมไดออกไซด์ซึ่งมีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +4 คุณสมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์จะเป็นผลึกมีมวลอะตอมเท่ากับ 79.9 มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ (Semi-conductor) มีลักษณะทางเคมีที่ดีส่งผลให้มีผลข้างเคียงต่อสิ่งแวดล้อมน้อยซึ่งมีความปลอดภัยและใช้งานได้ง่าย โดยไททาเนียมไดออกไซด์จะมีโครงสร้างผลึกแบ่งออกเป็น 3 โครงสร้าง คือ บรูคไคท์ (Brookite) อนาเทส (Anatase) และรูไทล์ (Rutile) ดังรูปที่ 2.3 โดยโครงสร้างที่นิยมนำมาใช้ในการกำจัดสารละลายอินทรีย์ในน้ำโดยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysis) คือโครงสร้างแบบอนาเทสและรูไทล์ ซึ่งมีการจัดเรียงอะตอมไททาเนียมกันแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) โดยมีอะตอมออกซิเจนเข้าไปแทรกในช่องว่างแบบ ออกตะฮีดรอล (Octahedral) โดยโครงสร้างผลึกทั้งหมดที่แตกต่างนี้ส่งผลให้โครงสร้างผลึกมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไม่ว่าจะเป็นค่าความหนาแน่น พลังงานเสรี โดยคุณสมบัติที่แตกต่างส่งผลให้โครงสร้างต่างกันโดยโครงสร้างแบบอนาเทสจะเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่ารูไทล์ เนื่องจากการกลับมารวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนกับโฮล เกิดได้ยากกว่าโครงสร้างแบบรูไทล์ ส่วนโครงสร้างแบบบรูคไคท์ทำให้บริสุทธิ์นั้นค่อนข้างยาก ทำให้โครงสร้างผลึกแบบอนาเทสเป็นที่นิยมใช้มากที่สุด [4]



(ก.) อนาเทส

(ข.) รูไทล์

(ค.) บรูคไคท์

รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างไททาเนียมไดออกไซด์แต่ละแบบ (สยามเคมี)

## 2.2.2 การสังเคราะห์สารประกอบนาโนไททาเนียม-ออกไซด์ (Nanotitanium-Oxide Synthesis)

การสังเคราะห์สารประกอบนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เพื่อให้ได้โครงสร้างต่างๆตามที่ต้องการนั้น สามารถสังเคราะห์ได้โดยเทคนิคต่างๆหลายวิธี เช่น โซลเจล (sol-gel) ทางความร้อน (Hydrothermal) การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning) และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วไฟฟ้าแอโนด (Anodization) เป็นต้น เป็นเหตุให้โครงสร้างนาโนไททาเนียมไดออกไซด์มีหลายรูปแบบ

กระบวนการโซลเจล (Sol-Gel) เป็นกระบวนการในการสังเคราะห์วัสดุหลายชนิดโดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุที่มีความต้องการความบริสุทธิ์สูง โดยทั่วไปนั้นกระบวนการโซลเจลเป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่เรียกว่า โซล ซึ่งส่วนมากอยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาค 0.1-1 ไมครอนเป็นของแข็งที่เรียกว่า เจล ซึ่งกระบวนการนี้สามารถทำที่อุณหภูมิห้องได้ จากนั้นนำเจลมาระเหยแล้วนำไปเผา ซึ่งจากขั้นตอนที่กล่าวมามีหลายขั้นตอนมากจึงมีความยุ่งยากในการเตรียมวิธีการสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้ [9]

การสังเคราะห์สารประกอบนาโนไททาเนียมไดออกไซด์จากเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตจะใช้แรงที่เกิดจากความต่างศักย์ทางไฟฟ้าเพื่อขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถใช้พอลิเมอร์ที่อยู่ในรูปสารละลายหรือสภาวะหลอมเหลวในการขึ้นรูปเส้นใย คุณสมบัติของเส้นใยที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะทำให้มีขนาดของรูพรุนเล็ก และอัตราส่วนระหว่างพื้นผิวต่อปริมาตรสูง

กระบวนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วไฟฟ้าแอโนดสำหรับสังเคราะห์สารประกอบนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ อาศัยเทคนิคการทำให้เกิดออกไซด์บริเวณพื้นผิวของโลหะ ด้วยการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่โลหะ โดยผิวของโลหะจะต้องสัมผัสกับสารละลายนำไฟฟ้า เนื่องจากการกัดกร่อนด้วยสารละลายทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กระดับนาโนเมตรบนชั้นออกไซด์ รูพรุนจะขยายใหญ่ขึ้นและมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจนทั่วผิวโลหะทำให้เกิดสารประกอบนาโนไททาเนียมแบบท่อ [8]

กระบวนการทางความร้อนเป็นวิธีทางความร้อนที่ทำภายในสภาวะเบสของสาร โดยเตรียมสารตั้งต้นในสารละลายเบสแก่และนำสารละลายไปผ่านกระบวนการทางความร้อน จากนั้นจะนำสารตั้งต้นมาล้างด้วยน้ำจนมีค่า pH เป็นกลาง ซึ่งโครงสร้างของสารประกอบนาโนไททาเนียมไดออกไซด์จะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่และเวลา ภายใต้กระบวนการทางความร้อน ซึ่งจากทั้ง 4 กระบวนการสามารถสรุปข้อดี-ข้อเสียได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อดี-ข้อเสียกระบวนการต่างๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์สารประกอบนาโนไททาเนียม ออกไซด์

กระบวนการ	ข้อดี	ข้อเสีย
โซล-เจล (Sol gel)	อนุภาคที่ได้มีการกระจายรูพรุน พื้นผิว และปริมาตรรูพรุนสูง	อนุภาคที่ได้จากการสังเคราะห์ไม่สม่ำเสมอ
การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning)	ขนาดรูพรุนเล็ก อัตราส่วนระหว่างพื้นผิวต่อปริมาตรสูง	การใช้ระยะเวลาในการสังเคราะห์นาน

แอนโนไดเซชัน (Anodization)	พื้นผิวเรียบ รูพรุนเป็นระเบียบ สม่ำเสมอ	การดำเนินการยุ่งยาก ซับซ้อน และต้องควบคุมหลายปัจจัย
วิธีการทางความร้อน (Hydrothermal)	เป็นระบบปิด ทำให้มีความ บริสุทธิ์สูงและได้ปริมาณที่มาก	ดำเนินการภายใต้อุณหภูมิสูง

จากข้อดีของวิธีการทางความร้อนคือสามารถควบคุมโครงสร้างของอนุภาครวมถึงผลึกของสารประกอบนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ได้ จึงเป็นเหตุผลที่สำคัญที่ทำให้มีความสนใจที่จะศึกษากระบวนการดังกล่าวในการสังเคราะห์สารประกอบนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

## 2.3 กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process)

กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการที่เกิดการสะสมตัวของสารหรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นที่ผิวหรือระหว่างผิวหน้า (interface) กระบวนการดูดซับนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใดๆ ได้แก่ ก๊าซกับของเหลว ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือสารคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่าสารดูดซับ (adsorbent) โดยสารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวต่ำจะถูกดูดซับแต่สารที่มีพลังงานอิสระสูงจะไม่ถูกดูดซับ

### 2.3.1 กลไกของกระบวนการดูดซับ

การดูดซับ (adsorption) เป็นกระบวนการกักสารละลายหรือสารแขวนลอยที่มีขนาดเล็กซึ่งละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กนี้เรียกว่า สารดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดซับเรียกว่าสารดูดซับ (adsorbent) การดูดซับนี้จะเป็นการดูดซับแบบระหว่างสถานะ (phase) ต่างๆ ทั้งสามสถานะ คือ ก๊าซ ของเหลวและของแข็ง ซึ่งมีได้ทั้งแบบของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง และของเหลวกับของแข็ง

ปริมาณสารถูกดูดซับขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ ความดันและพลังงานศักย์ของอันตรกิริยา (interaction potential energy) ระหว่างสารถูกดูดซับ ซึ่งอาจเป็นของแข็ง ของเหลวหรือก๊าซ กับสารดูดซับซึ่งอาจเป็นของเหลวหรือของแข็ง ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดัน ความเข้มข้นและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้ปริมาณการดูดซับเปลี่ยนแปลง ในการดูดซับโมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยก็จะถูกกำจัดออกจากน้ำโดยไปเกาะอยู่บนตัวดูดซับโดยโมเลกุลส่วนใหญ่จะเกาะอยู่กับผิวภายในโพรงของตัวดูดซับ และมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงจุดสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อยเพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับตัวดูดซับโดยในการดูดซับจะมี Driving Force อยู่ 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และกาดูดซับทางเคมี

## 2.3.2 ประเภทของการดูดซับ

### 2.3.2.1 การดูดซับทางกายภาพ

เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อยและสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย สามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วย สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้านั้น โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

### 2.3.2.2 การดูดซับทางเคมี

การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูง หมายความว่า การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) เท่านั้น จะเลือกเฉพาะบริเวณที่สามารถเกิดพันธะเคมีได้เท่านั้น ซึ่งไม่เหมือนกับการดูดซับทางกายภาพที่ไม่จำกัดบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา

อย่างไรก็ตามการดูดซับจะเกิดขึ้นทั้ง 2 กรณีในเวลาเดียวกันและยากที่จะแยกได้ว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นอยู่ในลักษณะใดโดยจะเปรียบเทียบการดูดซับทั้ง 2 แบบดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติของการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ

การดูดซับทางเคมี	การดูดซับทางกายภาพ
ค่าความร้อนของการดูดซับ 100-500 kJ/mol	ค่าความร้อนของการดูดซับประมาณ 20 kJ.mol หรือน้อยกว่า
เกิดได้ที่อุณหภูมิสูง	เกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ
ไม่เกิดการผันกลับ	เกิดการผันกลับได้เป็นส่วนใหญ่
เกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียว	เกิดการดูดซับหลายชั้น
มีพลังงานก่อกัมมันต์เกี่ยวข้อง	ไม่มีพลังงานก่อกัมมันต์ในกระบวนการ
แรงถูกดูดระหว่างสารดูดซับกับสารถูกดูดซับ เป็นแรงดึงดูดอย่างแข็งแรง	แรงถูกดูดระหว่างสารดูดซับกับสารถูกดูดซับ เป็นแรงดึงดูดอย่างอ่อนๆ

กระบวนการการดูดซับได้ถูกวิเคราะห์และคิดค้นด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้อยู่ในรูปของสมการอย่างง่าย แล้วนำสมการมาวาดกราฟเพื่อที่จะสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่างๆ ของการดูดซับได้ ซึ่งค่าคงที่ต่างๆ เหล่านี้จะเป็นแนวทางเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณออกแบบระบบดูดซับ โดยมีผู้สร้างสมการ เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์และอธิบายลักษณะข้อมูลของการดูดซับไว้หลายสมการ แต่ที่นิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ แลงเมียร์ ไอโซเทอม (Langmuir Adsorption Isotherm) และ ฟรุนดลิช ไอโซเทอม (Freundlich Adsorption Isotherm)

### 2.3.3 ทฤษฎีแลงเมียร์ ไอโซเทอม (Langmuir Adsorption Isotherm) [5]

มีสมมติฐาน 4 ข้อ ดังนี้

1. แต่ละตำแหน่งที่ถูกดูดซับจะสามารถรับหรือถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น อาจกล่าวได้ว่ามีการดูดซับเพียงชั้นเดียว

2. โมเลกุลที่ถูกดูดซับที่ผิวของของแข็งอยู่ในตำแหน่งที่แน่นอนและมีพื้นที่ที่ถูกดูดซับที่แน่นอนหรือจำกัด

3. ตรงบริเวณดูดซับจะเกิดอัตราการติดและหลุดออก ซึ่งอัตราการติดจะมากกว่าอัตราการหลุดจนกระทั่งถึงจุดสมดุลจะทำให้อัตราการติดเท่ากับอัตราการหลุด

4. พลังงานในการดูดซับมีค่าเท่ากันในทุกๆตำแหน่ง โมเลกุลที่ถูกดูดซับที่พื้นผิวไม่สามารถเคลื่อนย้ายไปมาอย่างอิสระระหว่างพื้นผิวและไม่สามารถทำปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลใกล้เคียงได้

∴ สมการ Isotherm ของ Langmuir แสดงในรูปได้ดังนี้

$$Q = \frac{Q_m b C_{eq}}{1 + b C_{eq}} \quad (2.3)$$

และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\frac{C_{eq}}{Q} = \frac{1}{Q_m b} + \frac{C_{eq}}{Q_m} \quad (2.4)$$

โดยที่  $C_{eq}$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะจุดสมดุล (mg/L)

$Q$  คือ ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)

$Q_m$  คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุด (mg/g)

$b$  คือ ค่าคงที่ของการดูดซับแบบชั้นเดียว

โดยเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{C_{eq}}{Q}$  กับ  $C_{eq}$  ซึ่งจะเห็นว่า  $\frac{1}{Q_m}$  คือความชันของกราฟ และ  $\frac{1}{Q_m b}$

คือจุดตัดแกน y

### 2.3.4 ทฤษฎีฟลุนดิช ไอโซเทอม (Freundlich Adsorption Isotherm) [11]

สมการการดูดซับแบบฟลุนดิชใช้กันแพร่หลายที่สุดในการอธิบายการดูดซับในระบอบของเหลว สมการของฟลุนดิชตั้งอยู่บนสมมติฐานว่า

1. การดูดซับมีลักษณะเป็นแบบต่อเนื่อง
  2. ใช้กับกรณีการถ่ายเทพลังงานผ่านพื้นผิวแบบไม่เป็นเนื้อเดียว
  3. ใช้ได้ดีกับตัวดูดซับที่มีแนวโน้มถูกดูดได้ง่ายและมีความเข้มข้นต่ำถึงปานกลาง
- สมการฟลุนดิช เขียนได้ดังสมการ

$$q_e = K_F C_e^{n_F} \quad (2.5)$$

สามารถจัดรูปให้อยู่ในลักษณะของสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้าง เขียนได้ดังสมการ

$$\ln Q = \ln K_F + \frac{1}{n_F} \ln C_e \quad (2.6)$$

โดยที่  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลือหลังการดูดซับ (mg/L)

$Q$  คือ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (mg/g)

$K_F$  คือ ปริมาณความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ (adsorption capacity)

$n_F$  คือ บ่งบอกถึงความแรงของการดูดซับ (adsorption intensity) ของความเป็นพื้นผิวหลายชั้น

เมื่อนำมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log Q$  กับ  $\log C_e$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $1/n$  และมีจุดตัดแกนในแนวตั้งเท่ากับ  $\log K_F$

### 2.4 เมทิลีนบลู (Methylene blue) [11]

เมทิลีนบลูจัดอยู่ในสารประกอบประเภทเฮเทอโรไซคลิก อะโรมาติก สูตรโมเลกุลคือ  $C_{16}H_{18}N_3S$  นิยมใช้เป็นสีย้อมในอุตสาหกรรม ถูกนำมาใช้งานทั้งทางด้านชีววิทยาและทางเคมี เป็นสารเคมีที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา (Chemically) มีความเป็นพิษและเสถียร (stable) ในสิ่งแวดล้อม ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ที่อุณหภูมิห้องจะมีสถานะเป็นของแข็ง มีลักษณะเป็นผงสีเขียวเข้ม เมื่อนำมาละลายในน้ำจะเป็นสีฟ้า พบมากที่สุดในอุตสาหกรรมน้ำเสีย จึงเป็นเรื่องยากที่จะสามารถแยกเมทิลีนบลูออกจากน้ำเสียเพราะละลายน้ำได้ดี ในโครงสร้างจะประกอบด้วยผลึกน้ำ 3 โมเลกุลต่อโมล เมทิลีนบลูใช้เป็นส่วนผสมในสีย้อมผ้า ถ้ามนุษย์ได้รับเมทิลีนบลูเข้าสู่ร่างกายมากเกินไปจะมีอาการแสบร้อนในปากหรือท้อง คลื่นไส้ อาเจียน เจ็บหน้าอก แน่นหน้าอก หายใจเร็ว เกิดอาการวิตกกังวล ระคายเคืองต่อระบบทางเดินปัสสาวะ หรืออาจทำให้ผิวหนังมีสีน้ำเงินได้

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kunlanan Kiatkitipong et al. [1] ได้ศึกษาการสังเคราะห์นาโนไททาเนตด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่สภาวะอุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกันจะได้โครงสร้างของนาโนไททาเนตที่แตกต่างกันโดยที่สภาวะอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทำให้เย็นตัวลงทันทีจะได้โครงสร้างของนาโนไททาเนตในรูปโครงสร้างริบบอนที่สมบูรณ์ และที่สภาวะอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทำให้เย็นตัวลงทันทีจะได้โครงสร้างของนาโนไททาเนตในรูปโครงสร้างท่อที่สมบูรณ์ อีกทั้งยังนำสารประกอบนาโนไททาเนตไปแลกเปลี่ยนไอออนเพื่อให้ได้โครงสร้างของสารประกอบที่แตกต่างกัน โดยได้ไฮโดรเจนนาโนไททาเนตและโซเดียมนาโนไททาเนต

Kunlanan Kiatkitipong et al. [13] ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะของอนุภาคนาโนไททาเนต และสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ระหว่างริบบอนนาโนไททาเนต และท่อนาโนไททาเนต ในขณะที่แถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองลดลงให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเพื่อกำจัดออกซาลิก (Oxalic acid) นั้นขึ้นกับพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า เมื่อเทียบกับเมทานอล (Methanol)

Yu Hua Cheng et al. [2] ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับและปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสด้วยแสงของสารประกอบไททาเนตในสารละลายเมทิลีนบลู ซึ่งได้มีการสังเคราะห์โครงสร้างของสารประกอบไททาเนตโดยมีการปรับเปลี่ยนค่าอุณหภูมิในการสังเคราะห์ระหว่าง 100-200 องศาเซลเซียส ขึ้นมา จากนั้นจะนำมาเพิ่มความสามารถในการดูดซับโดยใช้การเพิ่มพื้นที่ผิวของสารและนำไปทำให้มีความไวต่อแสงด้วยไนโตรเจนและสารประกอบไนโตรเจน โดยการหาประสิทธิภาพของการดูดซับนั้นจะใช้ทฤษฎีแลงเมียร์ไอโซเทอมกับฟลูคิกไอโซเทอมในการคำนวณ โดยจากการทดลองพบว่าสารตัวอย่างที่ประกอบไปด้วย 2 เฟส ระหว่างไททาเนตกับไททาเนีย อัตราส่วน 50:50 โดยน้ำหนัก ที่การสังเคราะห์อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส (S160) มีพื้นที่ผิวที่ 179.7 m<sup>2</sup>/g โดยมีโครงสร้างเป็นไฮโดรเจนไททาเนต จะมีประสิทธิภาพมากที่สุดในการดูดซับภายใต้สภาวะที่ไม่มีแสงและกำจัดเมทิลีนบลูภายใต้สภาวะที่มีแสงโดยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสใช้แสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ในภายใต้สภาวะไม่มีแสงจะสามารถดูดซับเมทิลีนบลูที่ความจุ 163.66 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยใช้แลงเมียร์ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นสมการรูปแบบการคำนวณ ในการกำจัดโดยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสที่ใช้แสงช่วงตามองเห็นที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร และหาค่าอัตราการกำจัดสารละลายเมทิลีนบลูจากสมการโมเดล แลงเมียร์ อินเซลวูดต์ ได้อัตราการย่อยสลายที่ 0.63438 โดยเป็นอัตราที่มากที่สุดซึ่งเป็นสารตัวอย่าง S160 ในการทดลอง

Lin Xiong et al. [14] ได้ศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับบนท่อนาโนไททาเนตนาโนโดยการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการเผามีส่วนประกอบโครงสร้างที่เหมือนกับท่อไททาเนตนาโนที่ไม่ได้ผ่านการเผา โดยการเปรียบเทียบกับเครื่องมือ XRD เป็นสารประกอบไฮโดรเจนไททาเนต และ มีค่าพื้นที่ผิวที่ 130 m<sup>2</sup>/g ไปทำการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูเพื่อหาค่าไคเนติกของการดูดซับกับไอโซเทอมของ

การดูดซับ โดยพบว่าค่าไคเนติกของการดูดซับเท่ากับ  $0.0132 \text{ g/mg}\cdot\text{min}$  เป็นไปตามรูปแบบ Pseudo-second order โดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ  $0.9999$  ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสารละลายที่  $50 \text{ mg/L}$  และนำไปเปรียบเทียบกับไอโซเทอมของการดูดซับ พบว่าแลงเมียร์ไอโซเทอมมีค่า  $R^2$  เท่ากับ  $0.993$  ซึ่งมีความมากที่สุดใน 3 ไอโซเทอมของการดูดซับและมีค่าการดูดซับที่มากที่สุดที่  $133.33 \text{ mg/g}$  จึงสรุปว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว



## บทที่ 3

### วิธีการทดลอง

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>anatase 100%) บริษัท Carlo Erba
- 3.1.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Ajax Finechem Pty Ltd.
- 3.1.3 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 37 เปอเซ็นต์
- 3.1.4 สารละลายเมทิลีนบลู (Methylene blue)
- 3.1.5 น้ำปราศจากไอออน

#### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 ตู้อบ
- 3.2.2 เครื่องปั่นกวน
- 3.2.3 เครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอล
- 3.2.4 เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer)
- 3.2.5 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer: XRD)
- 3.2.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)
- 3.2.7 เครื่องวัดการดูดซับก๊าซ (BET)
- 3.2.8 เครื่องเหวี่ยงให้สารตกตะกอน (Centrifuge)
- 3.2.9 เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
- 3.2.10 แท่งแม่เหล็ก
- 3.2.11 ที่กรองสารสำหรับไซริงค์ (Syringe Filter)
- 3.2.12 หลอดเมอร์คิวรี 500 วัตต์ ความยาวคลื่น 380-800 นาโนเมตร

#### 3.3 การสังเคราะห์โครงสร้างริบบอนนาโนไททาเนตและท่อนาโนไททาเนตด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

3.3.1 เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ปริมาตร 40 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นผสมผงไททาเนียมไดออกไซด์ 1 กรัม ลงในบีกเกอร์ นำไปเข้าเครื่องปั่นกวน เป็นเวลา 30 นาที

3.3.2 เมื่อปั่นกวนครบ 30 นาที นำสารใส่เครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอล ดังรูปที่ 3.1 จากนั้นนำไปเข้าสู่กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ด้วยการเข้าตู้อบอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง (ในกรณีโครงสร้างริบบอนนาโน) และที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 72 ชั่วโมง (ในกรณีโครงสร้างท่อนาโน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 เมื่อครบกำหนด นำเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอลทิ้งไว้ให้เย็นตัวลง โดยสารจะแยกชั้นระหว่างชั้นสารประกอบที่เป็นสารละลายหนืดกับชั้นของเหลว ทำการเทชั้นของเหลวออก และเก็บสารประกอบที่ฝังไว้เพื่อนำไปล้างเอาโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาออกโดยนำไปล้าง ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยการวัดค่า pH ของน้ำที่เทออก

3.3.4 ทำการเตรียมกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และน้ำปราศจากไอออน เพื่อนำมาล้างเอาโซเดียมไฮดรอกไซด์ของสารประกอบที่เป็นสารละลายหนืดออกไป โดยจะแบ่งการล้างเป็น 2 รูปแบบ ส่วนแรกล้างโดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก ส่วนที่สองล้างโดยใช้น้ำปราศจากไอออน โดยการล้างจะใช้สารละลายปริมาณ 400 มิลลิลิตรต่อครั้ง จากนั้นนำไปผสมสารด้วยเครื่องปั่นกวนเป็นเวลา 20 นาที แล้วนำไปเข้าเครื่องเหวี่ยงให้สารตกตะกอนที่แรงเหวี่ยง 4000 rpm เป็นเวลา 15 นาที และวัดค่า pH ของสารละลาย

3.3.5 ทำซ้ำข้อ 3.3.4 จนกระทั่งให้แน่ใจว่า โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือกรดไฮโดรคลอริกออกหมดแล้ว โดยการวัดค่า pH ของน้ำทิ้งให้มีค่า pH อยู่ระหว่าง 6-7 แล้วนำไปเข้าตูอบ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำสารประกอบที่เป็นผง ไปวิเคราะห์โครงสร้างต่อไป



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอล

### 3.4 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมี

3.4.1 การศึกษาวิเคราะห์สัณฐานและรายละเอียดลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยจะแสดงข้อมูลออกมาในภาพลักษณะของ 3 มิติ สร้างภาพได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนจากผิวหน้าของตัวอย่าง [17]

3.4.2 การศึกษาวิเคราะห์สมบัติปริมาณธาตุสารประกอบ และโครงสร้างของสารตัวอย่างด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์โดยการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดเพื่อระบุโครงสร้างผลึกของสารประกอบตัวอย่าง [16]

3.4.3 การศึกษาวิเคราะห์การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนด้วยเครื่องวัดการดูดซับก๊าซ (BET) เป็นการวัดปริมาตรก๊าซที่ถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวของอนุภาคโดยทั่วไปก๊าซที่นิยมใช้คือก๊าซ

ไนโตรเจน ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิจุดเดือดของก๊าซไนโตรเจน (ประมาณ -196 องศาเซลเซียส) ในขั้นแรกต้องไล่ก๊าซที่ไม่ใช่ไนโตรเจนเหลวออกจากพื้นผิวของอนุภาคออกให้หมด จากนั้นจึงให้พื้นผิวดูดซับก๊าซ และวัดปริมาณการดูดซับจากปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่หายไปเมื่อป้อนสู่อุณหภูมิหรือวัดจากปริมาณก๊าซที่คายออกมาตอนไล่ก๊าซออกจากอนุภาค โดยการวิเคราะห์จะแสดงผลของพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนของสารตัวอย่าง [18]

3.4.4 การศึกษาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารละลายด้วยเครื่องมือยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรมิเตอร์ เป็นการวัดปริมาณการดูดกลืนแสงของสารละลาย โดยช่วงความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลู จะมีค่าอยู่ที่ 665 นาโนเมตร โดยทำการพล็อตกราฟสอบเทียบของค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลาย เพื่อนำค่าที่วัดการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างมาหาความเข้มข้นของสารละลาย [14]

### 3.5 การดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

3.5.1 ทำการเตรียมสารละลายเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 10 20 30 40 และ 50 mg/l ในน้ำ 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเจือจางสารละลายปริมาณ 10 เท่า เพื่อไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร เพื่อพล็อตกราฟสอบเทียบระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายกับค่าการดูดกลืนแสง

3.5.2 ทำการเตรียมสารละลายเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 10 20 30 และ 40 mg/l ในน้ำ 200 มิลลิลิตรในบีกเกอร์ จากนั้นนำไปปั่นกวนบนเครื่องปั่นกวนที่อยู่ภายในกล่องที่บับเบิ้ลด้วยรูปที่ 3.2 พร้อมใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.01 กรัม ลงในบีกเกอร์ จับเวลาพร้อมเก็บสารตัวอย่างทุกๆ 10 นาที ที่ปริมาตร 5 มิลลิลิตร โดยใช้ไมโครฟิลเตอร์กรองสารละลายเมทิลีนบลูก่อนนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง

3.5.3 ทำการเจือจางสารตัวอย่างโดยการเติมน้ำและสารละลายในอัตราส่วน 9 : 1 จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตรแล้วบันทึกผล

3.5.3 ทำซ้ำอีกครั้ง โดยเปลี่ยนโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาและชนิดไอออนตัวเร่งปฏิกิริยา

### 3.6 การกำจัดสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

3.6.1 จากการทดลองการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูสูงๆ ที่ทำการเปิดไฟด้วยหลอดเมอร์คิวรี 500 วัตต์ จับเวลาพร้อมเก็บสารตัวอย่างทุกๆ 10 นาที ที่ปริมาตร 5 มิลลิลิตร โดยใช้ไมโครฟิลเตอร์กรองสารละลายสีขุ่นก่อนนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง

3.6.2 ทำการเจือจางสารตัวอย่างโดยการเติมน้ำและสารละลายในอัตราส่วน 9 : 1 จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตรแล้วบันทึกผล

3.6.3 ทำซ้ำอีกครั้ง โดยเปลี่ยนโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา และชนิดไอออนตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

จากงานวิจัยครั้งนี้ได้ทดลองการสังเคราะห์สารประกอบนาโนไททาเนตที่มีโครงสร้างและสารประกอบที่ต่างกันเพื่อนำไปเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับและการย่อยสลายในสารละลายเมทิลีนบลู ในส่วนของทดลองการดูดซับของสารประกอบนาโนไททาเนตในสารละลายเมทิลีนบลู เพื่อนำไปหาค่าไอโซเทอมของการดูดซับและค่าการดูดซับที่มากที่สุดของสารประกอบนาโนไททาเนต เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับ ส่วนสุดท้ายทดลองการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลู เพื่อหาอัตราค่าคงที่ของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลู

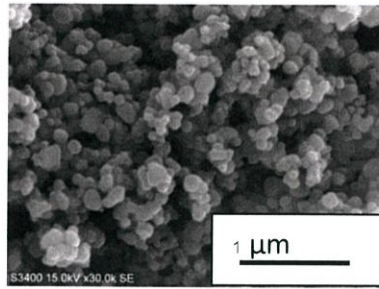
#### 4.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานาโนเมตร

##### 4.1.1 ไททาเนียมไดออกไซด์

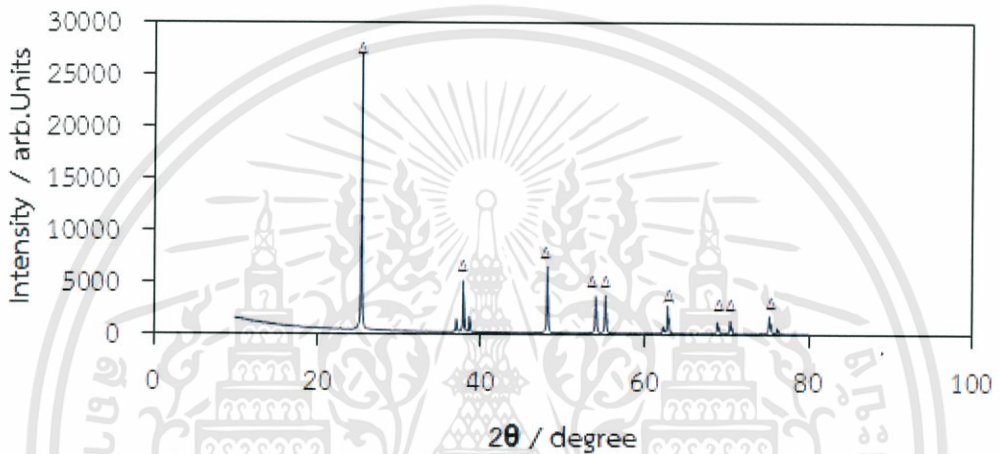
ไททาเนียมไดออกไซด์ที่นำมาเป็นสารตั้งต้นเพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลมีลักษณะเป็นของแข็งสีขาวที่มีความละเอียด ทึบแสง ไม่มีกลิ่นและมีน้ำหนักเบาต่อการฟุ้งกระจาย มีความบริสุทธิ์ 99.7% ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และเมื่อทำการวิเคราะห์ถึงลักษณะสัณฐานหรือลักษณะพื้นผิวของด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าไททาเนียมไดออกไซด์มีลักษณะสัณฐานที่ไม่สามารถระบุได้ (Random shape) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ประมาณ 197 นาโนเมตร พื้นที่ผิวที่ได้จากวัดด้วยเครื่องวัดการดูดซับก๊าซ (BET) มีพื้นที่ผิว 10 ตารางเมตรต่อกรัม และจากการวิเคราะห์โครงสร้างภายในด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer: XRD) พบว่าสารไททาเนียมไดออกไซด์ที่นำมาเป็นสารตั้งต้นเพื่อนำมาสังเคราะห์มีลักษณะโครงสร้างแบบอนาเทส ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของไททาเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทส



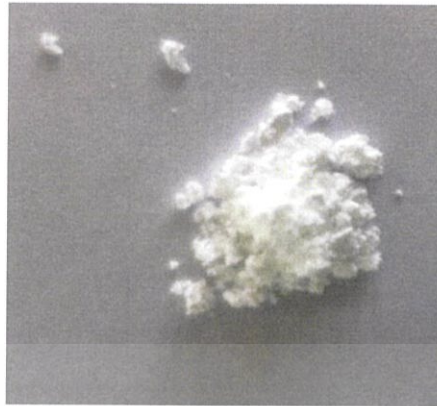
รูปที่ 4.2 ลักษณะสัณฐานและพื้นผิวของโพลีฟลูออไรด์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้น



รูปที่ 4.3 โครงสร้างผลึกของโพลีฟลูออไรด์แบบอนาเทส (XRD pattern: No.21-1272)

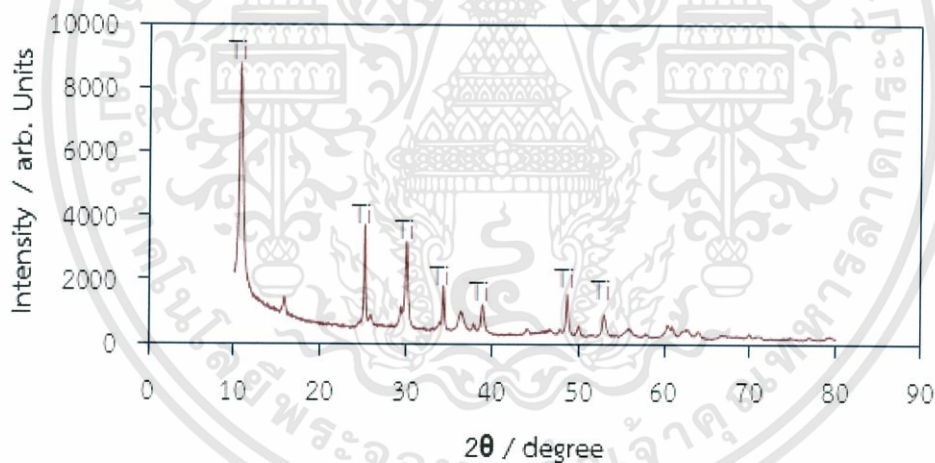
#### 4.1.2 ธิบอบนาโนโพลีฟลูออไรด์

ในการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลจะได้สารประกอบเปอร์เซ็นต์ค่าการได้ (%yield) อยู่ที่ 83 เปอร์เซ็นต์ โดยมีลักษณะที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างโพลีฟลูออไรด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล [1] ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพคือ เป็นของแข็งสีขาวซึ่งมีความละเอียด และมีน้ำหนักเบาทำให้ฟุ้งกระจายง่ายนอกเหนือจากนั้นเมื่อสัมผัสรู้สึกนุ่มมากกว่าโพลีฟลูออไรด์ ดังรูปที่ 4.4

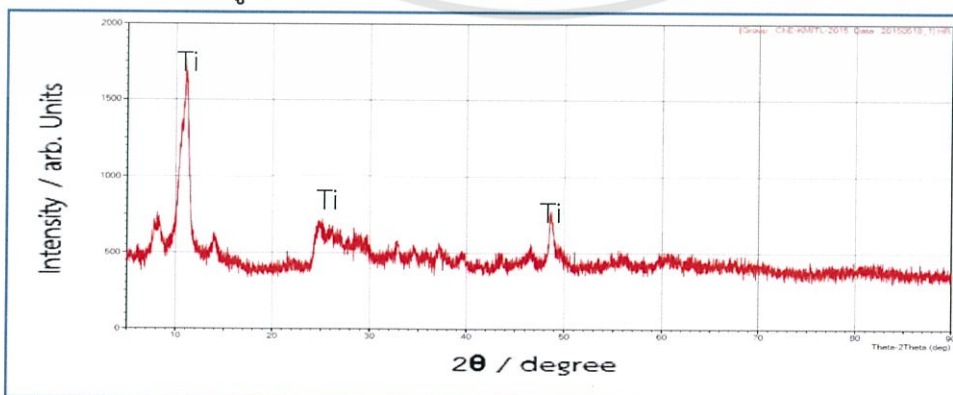


รูปที่ 4.4 ลักษณะทางกายภาพของริบบอนนาโนไททานेट

หลังการทำปฏิกิริยาระหว่างไททานเนียมไดออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลแล้ว ได้ทำการสุ่มตัวอย่างมาเพื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ (XRD) เมื่อพิจารณาการพิสูจน์โครงสร้างผลึกด้วย XRD ซึ่งแสดงโครงสร้างภายในของริบบอนนาโนไททานेट พบว่าเฟสที่ได้จากการพิจารณาเมื่อเทียบกับกราฟอ้างอิง ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าตรงกับเฟสของโซเดียมไททานेट  $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$  ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และหลังจากล้างด้วยกรด HCl พบว่าเฟสที่ได้ คือ ไฮโดรเจนไททานेट  $\text{H}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$  ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 โครงสร้างผลึกของโซเดียมริบบอนนาโนไททานेट

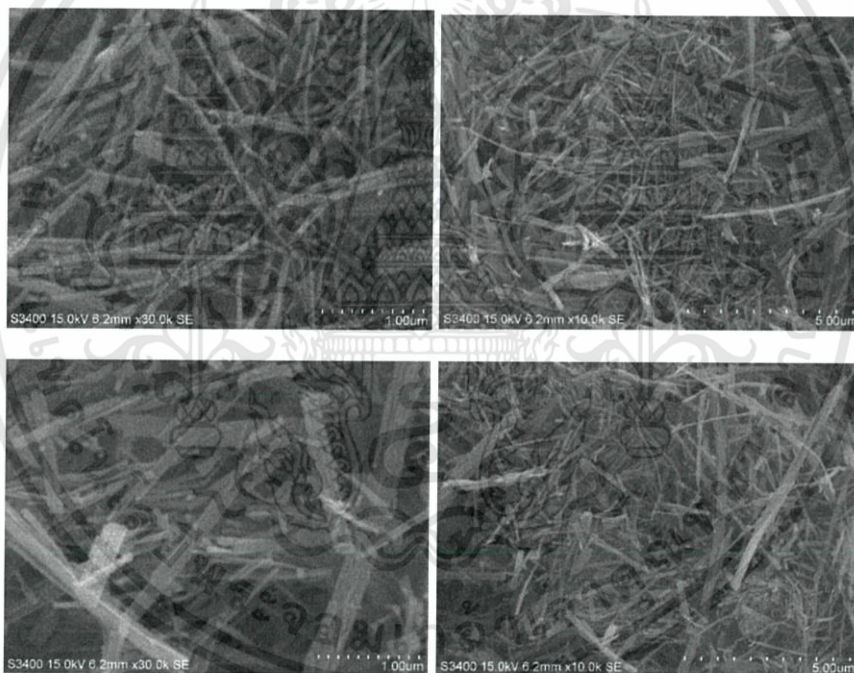


รูปที่ 4.6 โครงสร้างผลึกของไฮโดรเจนริบบอนนาโนไททานेट

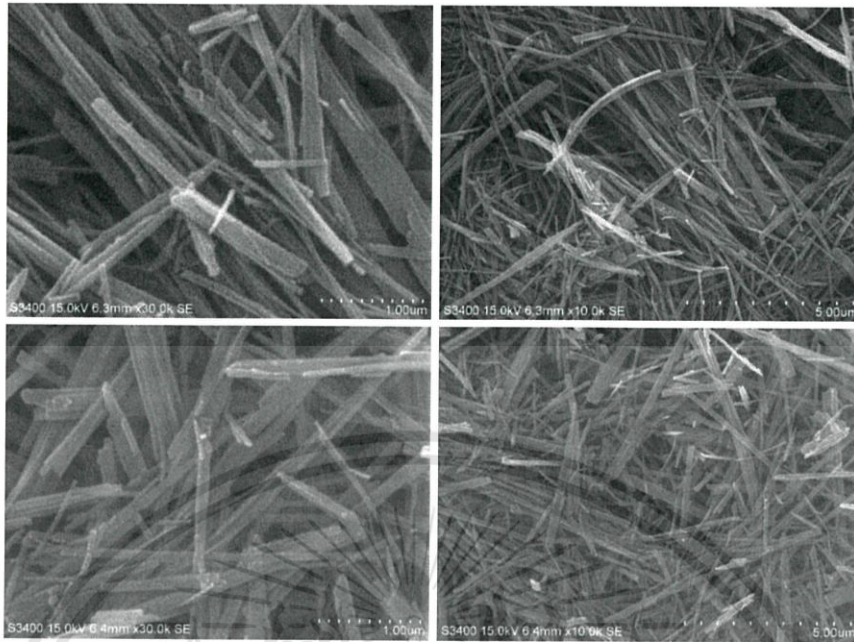
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 พบว่าโครงสร้างของริบบอนนาโนไททาเนต มีพีคที่  $2\theta$  เท่ากับ  $11^\circ$  ที่แสดงถึงโครงสร้างแบบชั้นของริบบอนนาโนไททาเนต ปริมาณสัดส่วนของธาตุภายในด้วยวิธีตรวจวัดพลังงานที่ถูกคายออกมาจากอิเล็กตรอน (EDX) ยืนยันการมีอยู่ของโซเดียม โดยสัดส่วนเชิงปริมาณของโซเดียมต่อไททาเนียมออกไซด์ มีค่าประมาณ 1 : 4 แสดงดังรูปที่ 4.5 และยืนยันการมีอยู่ของไฮโดรเจน แสดงดังรูปที่ 4.6

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานและลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าลักษณะพื้นฐานที่ได้มีลักษณะคล้ายริบบิน หรือไม้บรรทัด จึงสามารถเรียกได้อีกชื่อว่าริบบอนนาโนไททาเนต สำหรับริบบอนโซเดียมนาโนไททาเนต ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และริบบอนไฮโดรเจนนาโนไททาเนต ดังแสดงในรูปที่ 4.8 มีความกว้าง และความยาว โดยเฉลี่ยเป็น 0.2 และ 2.543 ไมโครเมตร ตามลำดับ และมีพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นเป็น 32 ตารางเมตรต่อกรัม [1] อ้างอิงจากการสังเคราะห์ที่สภาวะเดียวกัน โดยใช้เครื่องวัดการดูดซับก๊าซ (BET) เป็นอุปกรณ์ในการวัด



รูปที่ 4.7 พื้นฐานและลักษณะพื้นผิวของริบบอนโซเดียมนาโนไททาเนต



รูปที่ 4.8 สัณฐานและลักษณะพื้นผิวของริบบอนไฮโดรเจนนาโนไททาเนต

#### 4.1.3 ท่อนาโนไททาเนต

เมื่อนำไททาเนียมไดออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์มาทำปฏิกิริยาด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่สภาวะ อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง [1] ซึ่งต่างจากสภาวะของริบบอนนาโนไททาเนต ลักษณะทางกายภาพของท่อนาโนไททาเนตมีลักษณะเป็นของแข็งละเอียดสีขาวและมีน้ำหนักเบา เมื่อนำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาลักษณะสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ซึ่งมีลักษณะคล้ายท่อจึงเรียกว่าท่อนาโนไททาเนต มีความกว้าง และความยาวโดยเฉลี่ยเป็น 0.2 และ 6.469 ไมโครเมตร ตามลำดับแสดงดังรูปที่ 4.9 จากงานวิจัยของ (Kunlanan Kiatkittipong, et al (2011)) [1] ในส่วนของการวัดหาพื้นที่ผิวโดยใช้เครื่องวัดการดูดซับก๊าซ (BET) เป็นอุปกรณ์ในการวัด จะพบว่า ท่อนาโนไททาเนตมีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 138 ตารางเมตรต่อกรัม [1] อ้างอิงจากการสังเคราะห์ที่สภาวะเดียวกัน โดยใช้เครื่องวัดการดูดซับก๊าซ (BET) เป็นอุปกรณ์ในการวัด

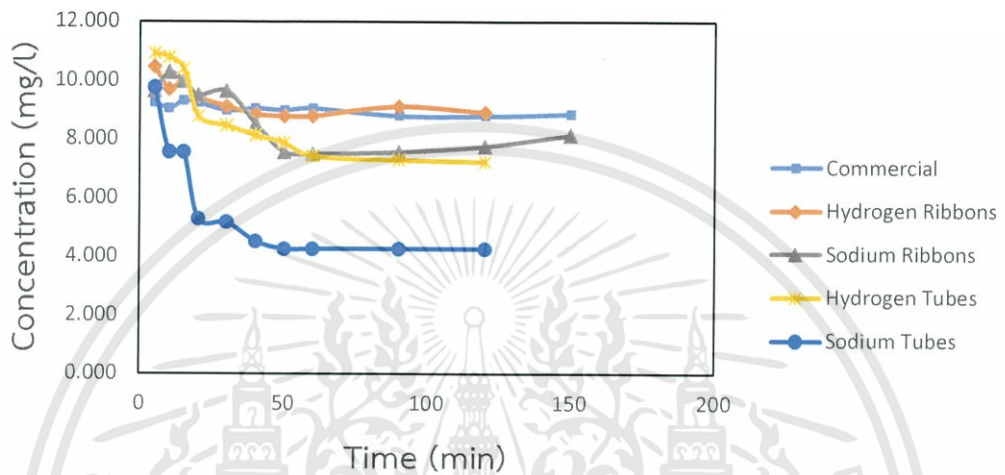


รูปที่ 4.9 ลักษณะพื้นผิวของท่อนาโนไททาเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

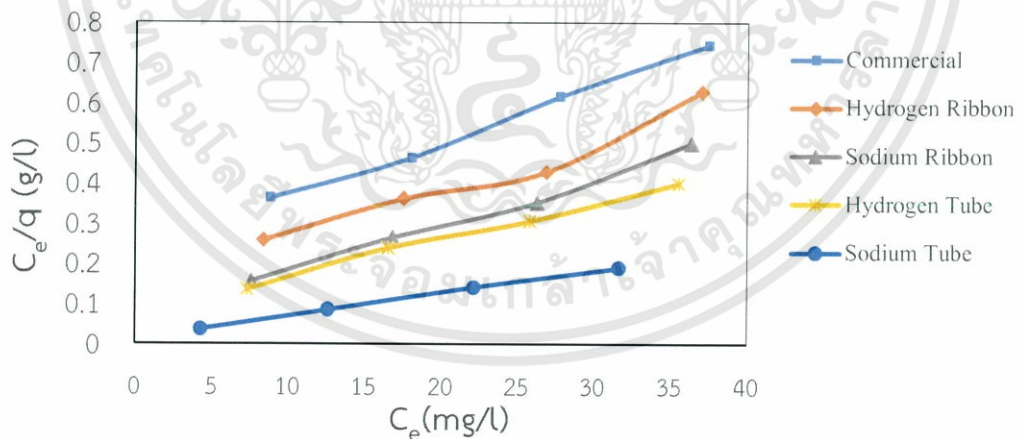
## 4.2 ประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู

ในการหาประสิทธิภาพของการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู สามารถหาได้จากไอโซเทอมของการดูดซับซึ่งสามารถเปรียบเทียบจากสมการของแลงเมียร์ไอโซเทอม และฟลูนดิชไอโซเทอม โดยนำค่าความเข้มข้นที่จุดสมดุลของการดูดซับมาคำนวณ จากรูปที่ 4.10 จะแสดงค่าความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่ลดลงเทียบกับเวลาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

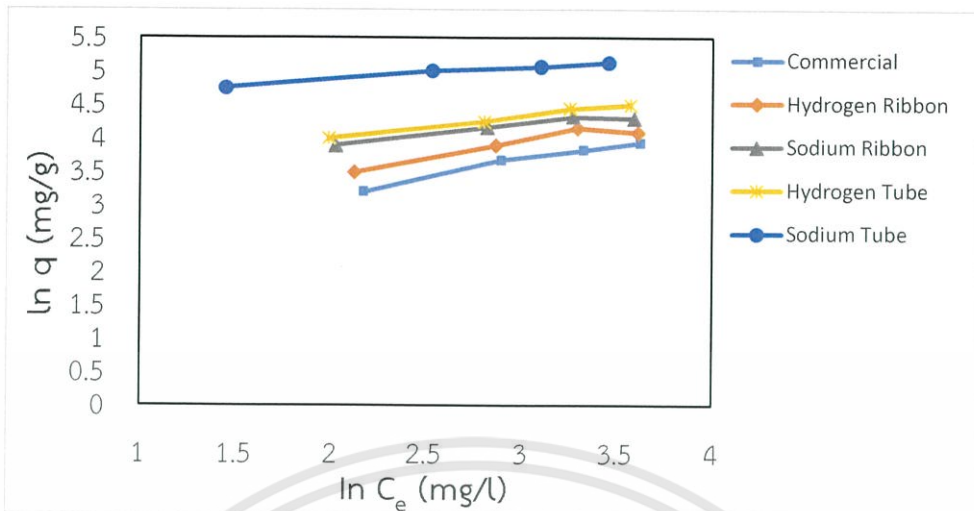


รูปที่ 4.10 กราฟความเข้มข้นสารละลายเมทิลีนบลูเทียบกับเวลา

### 4.2.1 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm)



รูปที่ 4.11 ผลการคำนวณ Langmuir Isotherm



รูปที่ 4.12 ผลการคำนวณ Freundlich Isotherm

การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ต่างๆ ด้วยสมการของ ไอโซเทอมแลงเมียร์ และไอโซเทอมฟลูนิช โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีลักษณะโครงสร้างและสารประกอบที่ต่างกัน ได้แก่ ไททาเนียมไดออกไซด์ ริปบอนไฮโดรเจนนาโนไททาเนต ริปบอนโซเดียมนาโนไททาเนต ท่อไฮโดรเจนนาโนไททาเนต และท่อโซเดียมนาโนไททาเนต แสดงดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 จากกราฟค่าความชันและจุดตัดแกน แสดงน้ำหนักของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวเกือบสมบูรณ์ ( $q_m$ ) และ ค่าคงที่ การดูดซับของไอโซเทอมแลงเมียร์  $b$  ดังสมการที่ 2.4

$$\frac{C_{eq}}{Q} = \frac{1}{Q_m b} + \frac{C_{eq}}{Q_m} \quad (2.4)$$

รวมถึงค่าคงที่ของการดูดซับ ( $K_F$ ) และ ค่า adsorption intensity ( $n_F$ ) ดังสมการที่ 2.6

$$\ln Q = \ln K_F + \frac{1}{n_F} \ln C_e \quad (2.6)$$

ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดเทียบแลงเมียร์ไอโซเทอมกับฟลูนิชไอโซเทอม

	Langmuir Isotherm	Freundlich Isotherm
Catalyst	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>
Commercial	0.999	0.985
Hydrogen Ribbons	0.957	0.910
Sodium Ribbons	0.992	0.933
Hydrogen Tubes	0.994	0.988
Sodium Tubes	0.999	0.977

จากตารางที่ 4.1 พบว่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด ( $R^2$ ) จากสมการของแลงเมียร์ไอโซเทอมมีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าสมการของ ฟลูนิชไอโซเทอม ซึ่งกล่าวได้ว่าสมการ แลงเมียร์ไอโซเทอม เหมาะสมที่จะใช้ในการอธิบายสมดุลการดูดซับสีย้อมมากกว่าสมการ ฟลูนิชไอโซเทอมที่สุด โดยสมการแลง

เมียร์ไอโซโทมจะมีข้อสมมติฐานกล่าวว่า เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว และจำนวนโมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนแน่นอน

ตารางที่ 4.2 ค่าความจุและค่าคงที่ของการดูดซับจากแลงเมียร์ไอโซโทม

Catalyst	ค่าความจุความดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	ค่าคงที่การดูดซับ
Commercial	74.07407	0.0576
Hydrogen Ribbons	80.64516	0.0884
Sodium Ribbons	86.2069	0.1815
Hydrogen Tubes	111.1111	0.1202
Sodium Tubes	178.5714	0.3889

จากตารางที่ 4.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดท่อโซเดียมไททาเนต (Sodium Tubes) มีการดูดซับพื้นผิวเกือบสมบูรณ์ ( $q_m$ ) มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นๆซึ่งมีค่าเท่ากับ 178.57 มิลลิกรัม/กรัม และค่าคงที่การดูดซับของไอโซเทอร์มแลงเมียร์ (b) มีค่าเท่ากับ 0.388 จึงกล่าวได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดท่อโซเดียมไททาเนต (Sodium Tube) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการดูดซับสีย้อมดีที่สุด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างแบบท่อโซเดียมไททาเนตกับริบนาโนไททาเนต พบว่าโครงสร้างแบบท่อโซเดียมไททาเนตที่มีพื้นที่ผิวมากกว่าแบบริบนาโนไททาเนต จะส่งผลให้มีค่าความจุในการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูมากกว่าโครงสร้างแบบริบนาโนไททาเนต

#### 4.2.2 ค่าไคเนติกของการดูดซับ (Kinetic Adsorption)

ในการศึกษาหาเวลาในการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ โดยศึกษาผลกระทบที่เกี่ยวข้องกับเวลาในการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู ด้วยท่อโซเดียมไททาเนตเนื่องด้วยจากการหาค่าความสามารถในการดูดซับ ( $Q_{max}$ ) มีค่ามากที่สุด ซึ่งจะนำผลการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 10 กับ 40 mg/l จากการศึกษาค่าไคเนติกของการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยนาโนไททาเนต (Lin Xiong et al., 2014) พบว่ามีรูปแบบจำลองในการหาค่าไคเนติก 2 รูปแบบจำลอง ได้แก่ Lagergren pseudo first order กับ pseudo second order โดยสมการ pseudo first order จะมีรูปแบบสมการเชิงเส้นดังสมการ 4.1

$$\ln(Q_e - Q_t) = \ln Q_e - k_1 t \quad (4.1)$$

และ สมการ pseudo second order จะมีรูปแบบสมการเชิงเส้นดังสมการ 4.2

$$\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{k_2 Q_e^2} + \frac{t}{Q_e} \quad (4.2)$$

โดย  $Q_e$  คือ จำนวนที่ดูดซับเมทิลีนบลูที่จุดสมดุล (mg/g)

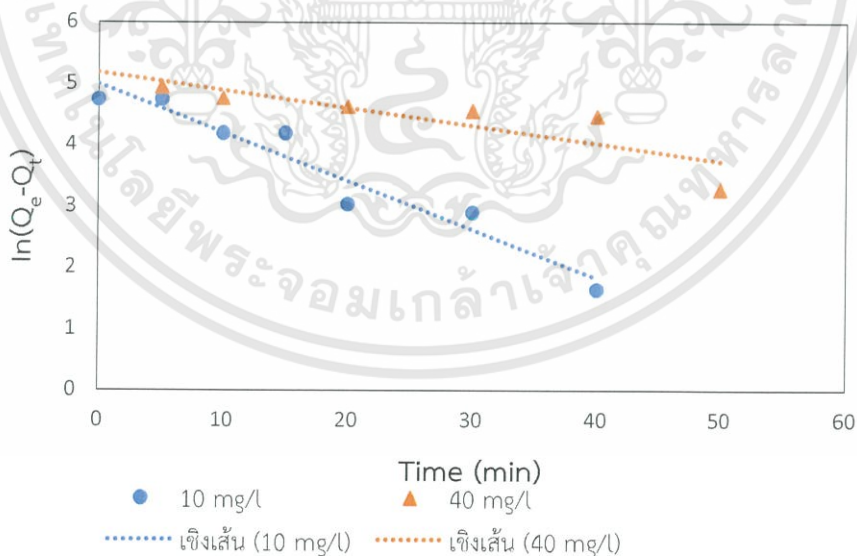
$Q_t$  คือ จำนวนที่ดูดซับเมทิลีนบลูที่เวลาใดๆ (mg/g)

$k_1$  คือ ค่าคงที่ของอัตรา pseudo first order (1/min)

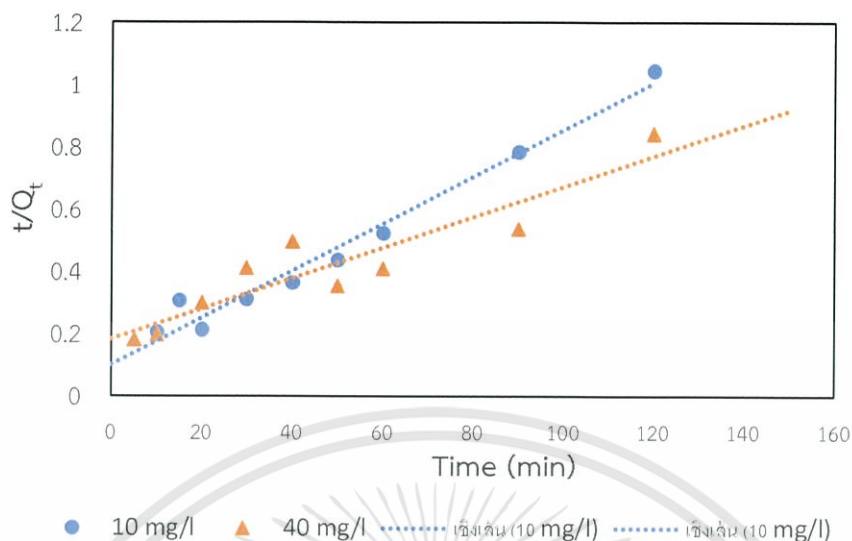
$k_2$  คือ ค่าคงที่ของอัตรา pseudo second order (g/mg•min)

จากกราฟรูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงกราฟเชิงเส้นของรูปแบบจำลองของ 2 แบบจำลอง pseudo first order และ pseudo second order สามารถหาค่าโคเนคติก ( $k_1, k_2$ ) และจำนวนการดูดซับ ( $Q_{e1}, Q_{e2}$ ) โดยสามารถเปรียบเทียบรูปแบบจำลองได้โดยค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยเชิงเส้น ( $R^2$ ) 0.938 และ 0.763 ของแบบจำลอง pseudo first order ที่ ที่ความเข้มข้นสารละลายเมทิลีนบลูที่ 10 mg/l และ 40 mg/l ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.3

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยเชิงเส้น ( $R^2$ ) พบว่าได้ค่า 0.962 และ 0.896 ของแบบจำลอง pseudo second order ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 และ 40 mg/l ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าในแบบจำลอง pseudo first order ในส่วนของการหาค่าความจุในการดูดซับจะได้ค่าความจุของการดูดซับ ( $Q_e$ ) ของแบบจำลอง pseudo first order อยู่ที่ 146.9 และ 121.5 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 และ 40 mg/l ตามลำดับ ส่วนในแบบจำลอง pseudo second order จะมีค่าที่ 133.33 และ 200 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อนำค่าของทั้ง 2 แบบจำลองมาเทียบกันจะพบว่า ค่าความจุในการดูดซับของ pseudo second order จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าความจุของการดูดซับ ( $Q_e$ ) ของการทดลองมากที่สุด จึงสรุปว่าการดูดซับนี้เป็นการดูดซับในรูปแบบของ pseudo second order ซึ่งพบว่าการดูดซับที่แบบจำลองนี้ จะมีค่าการดูดซับที่คงที่ช่วงหนึ่ง เมื่อเวลาผ่านไปค่าการดูดซับจะเริ่มปรับตัวเปลี่ยนไปจากแนวโน้ม ซึ่งอาจเกิดจากการคายซับของตัวดูดซับส่วนหนึ่ง โดยจะมีค่าคงที่ของอัตรา ( $k_2$ ) เท่ากับ 0.075 และ 0.028 g/(mg•min)



รูปที่ 4.13 กราฟเชิงเส้นหาความสัมพันธ์ pseudo first order



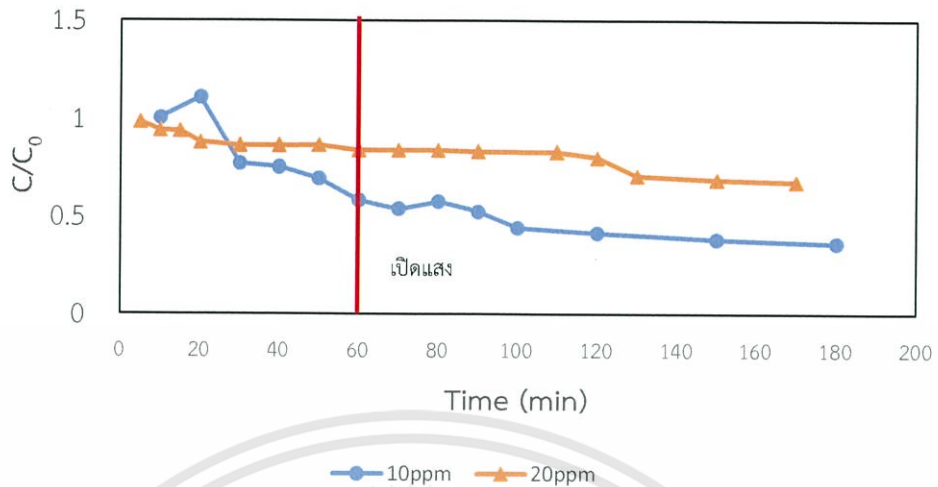
รูปที่ 4.14 กราฟเชิงเส้นหาความสัมพันธ์ pseudo second order

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณการหาแบบจำลองและค่าโคเนตการดูดซับ

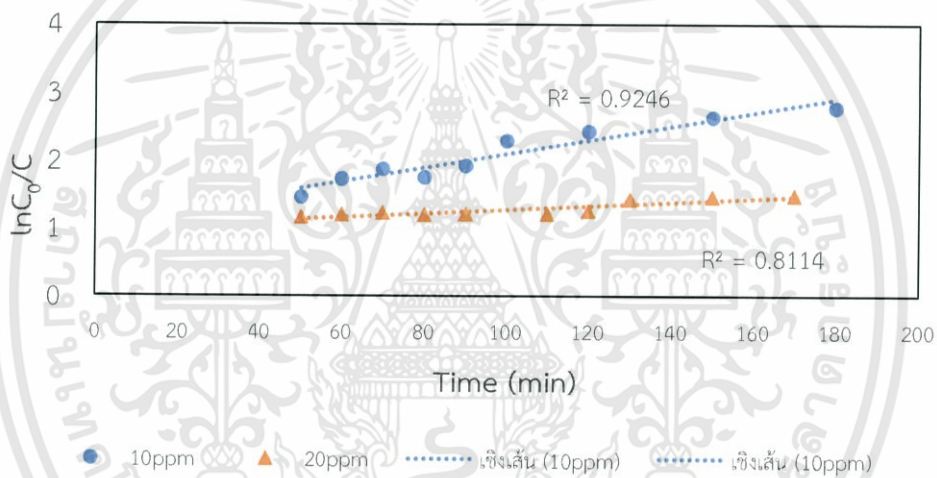
ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	Q <sub>e,exp</sub> (mg/g)	pseudo-first-order			pseudo-second-order		
		k <sub>1</sub> (min <sup>-1</sup> )	Q <sub>e1,cal</sub> (mg/g)	R <sup>2</sup>	k <sub>2</sub> (g/(mg min))	Q <sub>e2,cal</sub> (mg/g)	R <sup>2</sup>
10	114.843	0.079	146.907	0.938	0.075	133.333	0.973
40	167.914	0.029	121.510	0.720	0.028	200.000	0.858

#### 4.3 การย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลู

จากการทดลองการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูพบว่าโครงสร้างแบบท่อนานโน มีประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูมากกว่าโครงสร้างแบบริบบอนนาโน และสารประกอบแบบไฮโดรเจนไททาเนต มีค่าการดูดซับมากกว่าแบบไฮโดรเจนไททาเนต จึงได้นำท่อไฮโดรเจนนาโนไททาเนตมาทำการทดลองและที่ความเข้มข้นสารละลายเมทิลีนบลูที่ 10 และ 20 mg/l ซึ่งมีค่าการทดลองที่แม่นยำกว่าค่าความเข้มข้นอื่น จึงได้นำมาทำการทดลองการย่อยสลายเมทิลีนบลูโดยใช้แสงเป็นตัวกระตุ้นจากการทดลองการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูจะได้ค่าความเข้มข้นคงที่ (C<sub>e</sub>) ของแต่ละความเข้มข้นจะมีค่าความเข้มข้นคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 60 นาทีหลังเริ่มทดลอง ดังนั้นในส่วนของกรย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูโดยใช้แสงกระตุ้น หรือ กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก จะทำการเปิดแสงจากหลอดเมอร์คิวรี 500 วัตต์ ซึ่งเป็นแสงที่มองเห็นได้มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 360-800 นาโนเมตร หลังจากเวลาผ่านไป 60 นาทีและนำค่ามาพล็อตกราฟระหว่างค่าความเข้มข้นต่อความเข้มข้นเริ่มต้นกับ ซึ่งจะมีค่าความเข้มข้นลดลงเพิ่มขึ้นจากเดิมจนคงที่เมื่อผ่านไป 3 ชั่วโมงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 การย่อยสลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 และ 20 mg/l



รูปที่ 4.16 กราฟเชิงเส้นของอัตราการย่อยสลายเมทิลีนบลูภายใต้แสงที่มองเห็น

ในการหาค่าคงที่อัตราในการย่อยสลายด้วยวิธีการโฟโตแคตตาไลติก โดยใช้สมการรูปแบบจาก Modified Langmuir Hinshelwood (Yu Hua Ceng et al. 2014) ซึ่งอยู่ในรูปแบบ pseudo first order ในการหาค่าคงที่อัตราการย่อยสลายดังสมการที่ 4.3

$$-\frac{dC}{dt} = \frac{k_r K_e C}{1 + k_e C} \quad (4.3)$$

จากสมการข้างต้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมีค่าน้อยกว่า  $10^{-3}$  มิลลิกรัมต่อลิตร จะสามารถแปลงสมการได้เป็นสมการที่ 4.4

$$\ln \frac{C_0}{C} = k_r K_e t = k' t \quad (4.4)$$

โดยค่า  $C$  คือ ค่าความเข้มข้นสารละลายเมทิลีนบลูที่เวลาใดๆ (mg/l)

$C_0$  คือ ค่าความเข้มข้นสารละลายเมทิลีนบลูเริ่มต้น (mg/l)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$k_r$  คือ ค่าคงที่อัตราปฏิกิริยา

$K_e$  คือ ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับบนโฟโตแคตตาไลซิส

$k'$  คือ ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายโดยรวม ( $\text{min}^{-1}$ )

จากกราฟรูปที่ 4.16 เป็นการหาค่าคงที่อัตราโดยรวมของสารละลายเมทิลีนบลูในการย่อยสลายเมทิลีนบลูจะมีรูปแบบของ pseudo first order ตามความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 10 และ 20 mg/l ด้วยท่อโซเดียมนาโนไททานเตนจะพบว่ามีค่าคงที่อัตราการย่อยสลาย ( $k'$ ) อยู่ที่ 0.0102 และ 0.0028 ต่อ นาที ตามลำดับโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนัก ( $R^2$ ) ที่ 0.9246 และ 0.8114



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองในการสังเคราะห์สารประกอบนาโนไททาเนตด้วยไททาเนียมไดออกไซด์กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ภายใต้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เวลา 72 ชั่วโมง ได้ท่อนาโนไททาเนต ขนาดความกว้าง 0.2 ไมโครเมตร ความยาว 6.4 ไมโครเมตร มีลักษณะพื้นที่ผิว 138 ตารางเมตรต่อกรัม และที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง ได้รับท่อนาโนไททาเนต ขนาดความกว้าง 0.2 ไมโครเมตร ความยาว 2.5 ไมโครเมตร มีลักษณะพื้นที่ผิว 32 ตารางเมตรต่อกรัม และมีการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเพื่อให้ได้โครงสร้างไฮโดรเจนนาโนไททาเนต

ในการทดลองการดูดซับเมทิลีนบลูเพื่อเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมด 5 ชนิด คือ ท่อนาโนโซเดียมไททาเนต ท่อนาโนไฮโดรเจนไททาเนต ธิบอบนาโนโซเดียมไททาเนต ธิบอบไฮโดรเจนนาโนไททาเนตและไททาเนียมไดออกไซด์ ซึ่งจะเปรียบเทียบจากไอโซเทอมของการดูดซับเพื่อหาประสิทธิภาพของการดูดซับ จากการเปรียบเทียบการคำนวณจะพบว่า สารประกอบนาโนไททาเนต จะมีไอโซเทอมในรูปแบบของ แลงเมียร์ไอโซเทอม และจากตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 5 ชนิดนั้น จะพบว่าท่อโซเดียมนาโนไททาเนต สามารถดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูได้มากที่สุด จากการคำนวณสมการแลงเมียร์ไอโซเทอม โดยมีค่าการดูดซับมากที่สุดอยู่ที่ 178.57 มิลลิกรัม/กรัม ดังนั้นแล้ว ท่อโซเดียมนาโนไททาเนตจึงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู โดยพบว่าพื้นที่ผิวที่มากจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากขึ้น และได้นำมาหาค่าคงที่อัตราการดูดซับพบว่าค่าที่ใกล้เคียงในรูปแบบจำลองของ pseudo second order โดยมีค่าคงที่อัตราการดูดซับอยู่ที่ 0.075 และ 0.028 ต่อ มิลลิวินาที ที่สารละลายเริ่มต้นเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

การกำจัดสารละลายเมทิลีนบลูโดยเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาท่อโซเดียมนาโนไททาเนตจากการที่มีค่าการดูดซับมากที่สุด จะพบว่าค่าความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูจะมีค่าลดลงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการทดลองโดยไม่ใช้แสงกระตุ้นจนมีค่าคงที่คงหนึ่ง และสามารถนำไปหาค่าคงที่อัตราการย่อยสลายในรูปแบบ สมการ Modified Langmuir Hinshelwood จะมีค่าที่ 0.0102 และ 0.0028 ต่อ นาที ในสารละลายเริ่มต้นเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับระหว่างสารประกอบ โขเดียวกับไฮโดรเจน และสารประกอบตัวอื่นๆ
2. ควรเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของสารประกอบนาโนไททานเดตตัวอื่นในการกำจัดสารละลายเมทิลีนบลู
3. ควรศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับและกำจัดสารละลายเมทิลีนบลูนอกจากสารประกอบและโครงสร้าง เช่น อุณหภูมิ กระบวนการสังเคราะห์



## บรรณานุกรม

- [1] Kunlanun Kiatkitipong, 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.
- [2] Yu Hua Cheng, Danguo Gong, Yuxin Tang, Jeffery Weng Chye Ho, Yee Yan Tan, Wei Siew Lau, Olivai Wijaya, Jiexiang Lim, Zhong Chen (2014).  
 “One-pot solvothermal synthesis of dual-phase titanate/yiyania nanoparticles and their adsorption and photocatalytic performances.”  
 Journal of Solid state Chemistry 214: 67-73
- [3] ฉลาด บรรเทา และชูสิทธิ์ ศรีสุทธิกมล. “กระบวนการ Photocatalytic.” 2548.
- [4] กาญจนดา ลือพาว์ และนงนุช ศศิธร. “การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมด้วยเทคนิคโฟโตแคตตาไลติกร่วมกับกระบวนการดูดซับ.” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น. 2553
- [5] กัญยาพร ไชยวงศ์ และคณะ. “การใช้กระบวนการ แสงอาทิตย์ – โฟโตแคตตาไลติก สำหรับปฏิกรณ์แบบชั้นบันไดในการบำบัดสารเมทิลีนบลูในน้ำเสีย.” มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน.
- [6] สยามเคมี. “ไททาเนียมไดออกไซด์/ TiO<sub>2</sub>.” [Online]  
 Available: <http://www.siamchemi.com> (13/11/2557)
- [7] สรรค์ จิตรไคร์ครวญ. “การทำความสะอาดโดยตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงด้วยไททาเนียมไดออกไซด์.” วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ.
- [8] กมลมาศ จิวีสาย และกรรณิภา จันทรทรายมูล.  
 “การใช้วัสดุนาโนชั้นสูงเพื่อใช้งานในด้านสิ่งแวดล้อม.” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2256.
- [9] ชลดา อีรการุณวงศ์. “วัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์: การวิเคราะห์โครงสร้าง และการประยุกต์ใช้.” วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. 1 มกราคม – มีนาคม 2555.
- [10] ดร.นัดดา เวชชากุล. “การกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำด้วยตัวเร่ง ปฏิกิริยานาโนไททาเนียมไดออกไซด์.” ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2012.
- [11] อติพล สว่างอารมย์. “การศึกษาประสิทธิภาพของท่อนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบอนุภาคทองคำต่อเสื่อมสภาพของเมทิลีนบลูโดยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก.” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. 2557.
- [12] Kunlanun Kiatkitipong, Akihide Iwase, Jason Scott, Rose Amal (2013).  
 “Photocatalysis of heat treated sodium and hydrogen-titanate nanoribbon for water splitting, H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> generation and oxalic acid oxidation.” Journal of Chemical Engineering Science. 93: 341-349.

- [13] Kunlanun Kiatkitipong, Changhui Ye, Jason Scott, Rose Amal (2010).  
 “Understanding Hydrothermal Titanate Nanoribbon Formation.” Journal of American Chemical Society.
- [14] Lin Xiong, Ye Yang, Jiaying Mai, Weiling Sun, Chaoying Zhang, Dapeng Wei, Qing Chen, Jinren Ni (2010). “Adsorption behavior of methylene blue onto titanate nanotubes.” Chemical Engineering Journal. 156: 313-320
- [15] M.Vithal, S.RamaKrishna, G.Ravi, Suresh Palla, Radha Velchuri, Someshwar Pola (2013). “Synthesis of  $\text{Cu}^{2+}$  and  $\text{Ag}^+$  doped  $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$  by a facile ion-exchange method as visible-light-driven photocatalysts.” Ceramics International. 39: 8429-8439.
- [16] ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์เพื่อมาตรฐานและอุตสาหกรรม.  
 “การวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.” [Online]  
 Available: <http://science.kmutt.ac.th/sic/index.php/physics/16-x-ray-diffraction>
- [17] วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง.  
 “Scanning Electron Microscope.” [Online]  
 Available: <http://www.nano.kmitl.ac.th/index.php/tool/218-scanning-electron-microscopysem-.html>
- [18] MO Memoir. “การวัดพื้นที่ผิว BET.” [Online]  
 Available: <http://tamagozilla.blogspot.com/2010/11/bet-mo-memoir-saturday-27-november-2553.html>
- [19] TradeKorea. “TiO<sub>2</sub> Photocatalyst”. [Online]  
 Available: <http://www.tradekorea.com/product/detail/P291864/TiO2-Photocatalyst.html>

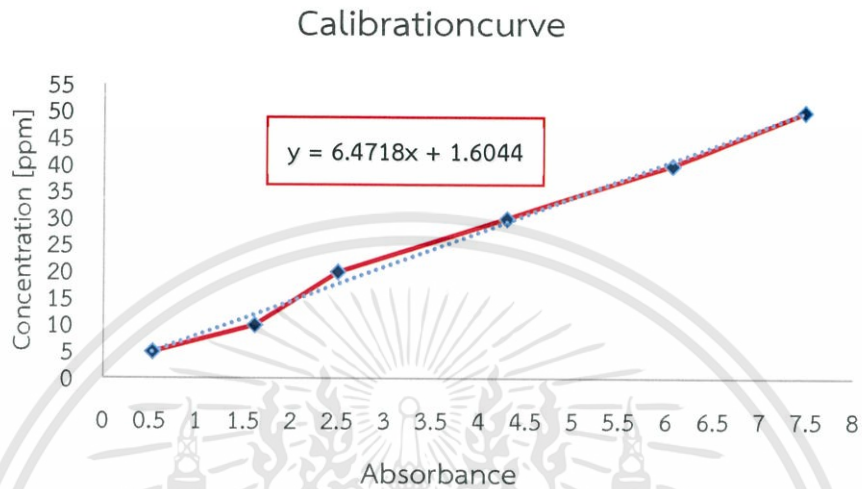


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## ข้อมูลดิบ

## ก.1 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นเมทิลีนบลู



ตาราง ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลู

Concentration [mg/L]	Absorbance
5	0.524
10	1.610
20	2.500
30	4.291
40	6.061
50	7.477

## ก.2 การดูดซับเมทิลีนบลู

การดูดซับโดยไททาเนียมไดออกไซด์

ตาราง ก.2 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 10 mg/l

Time [min]	Absorbance	X [mg/l]	Dilution Factor	Concentration [mg/l]
5	0.118	1.18	10	9.241
10	0.115	1.15	10	9.047
15	0.119	1.19	10	9.306
20	0.118	1.18	10	9.241
30	0.114	1.14	10	8.982
40	0.115	1.15	10	9.047
50	0.114	1.14	10	8.982
60	0.115	1.15	10	9.047
90	0.111	1.11	10	8.788
120	0.111	1.11	10	8.788
150	0.112	1.12	10	8.853

ตาราง ก.3 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/l

Time [min]	Absorbance	X [mg/l]	Dilution Factor	Concentration [mg/l]
5	0.244	2.44	10	20.373
10	0.292	2.92	10	20.502
15	0.318	3.18	10	19.920
20	0.281	2.81	10	20.114
30	0.316	3.16	10	19.208
40	0.300	3.00	10	18.496
50	0.378	3.78	10	18.043
60	0.343	3.43	10	17.978
90	0.326	3.26	10	17.978
120	0.341	3.41	10	18.366
150	0.375	3.75	10	18.237

## การดูดซับโดยท่อโซเดียมนาโนไททาเนต

ตาราง ก.4 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 10 mg/l

Time [min]	Absorbance	X [mg/l]	Dilution Factor	Concentration [mg/l]
5	0.126	1.26	10	9.759
10	0.092	0.92	10	7.558
15	0.092	0.92	10	7.558
20	0.057	0.57	10	5.293
30	0.055	0.55	10	5.164
40	0.045	0.45	10	4.517
50	0.041	0.41	10	4.258
60	0.041	0.41	10	4.258
90	0.041	0.41	10	4.258
120	0.041	0.41	10	4.258

ตาราง ก.5 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/l

Time [min]	Absorbance	X [mg/l]	Dilution Factor	Concentration [mg/l]
5	0.278	2.78	10	19.596
10	0.265	2.65	10	18.755
15	0.264	2.64	10	18.690
20	0.195	1.95	10	14.224
30	0.167	1.67	10	12.412
40	0.171	1.71	10	12.671
50	0.168	1.68	10	12.477
60	0.167	1.67	10	12.412
90	0.166	1.66	10	12.348
120	0.171	1.71	10	12.671
150	0.165	1.65	10	12.283

ตาราง ก.6 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 30 mg/l

Time [min]	Absorbance	X [mg/l]	Dilution Factor	Concentration [mg/l]
5	0.435	4.35	10	29.757
10	0.44	4.4	10	30.080
15	0.414	4.14	10	28.398
20	0.424	4.24	10	29.045
30	0.369	3.69	10	25.485
40	0.342	3.42	10	23.738
50	0.317	3.17	10	22.120
60	0.316	3.16	10	22.055
90	0.321	3.21	10	22.379
120	0.316	3.16	10	22.055
150	0.322	3.22	10	22.444

ตาราง ก.7 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 40 mg/l

Time [min]	Absorbance	X [mg/l]	Dilution Factor	Concentration [mg/l]
5	0.572	5.72	10	38.623
10	0.554	5.54	10	37.458
15	0.560	5.60	10	37.846
20	0.542	5.42	10	36.682
30	0.537	5.37	10	36.358
40	0.531	5.31	10	35.970
50	0.484	4.84	10	32.928
60	0.472	4.72	10	32.151
90	0.464	4.64	10	31.634
120	0.465	4.65	10	31.698
150	0.472	4.72	10	32.151

การดูดซับโดยท่อไฮโดรเจนนาโนไททาเนต

ตาราง ก.8 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 10 mg/l

Time [min]	Absorbance	X [mg/l]	Dilution Factor	Concentration [mg/l]
5	0.144	1.44	10	10.924
10	0.142	1.42	10	10.794
15	0.136	1.36	10	10.406
20	0.111	1.11	10	8.788
30	0.106	1.06	10	8.465
40	0.101	1.01	10	8.141
50	0.097	0.97	10	7.882
60	0.09	0.9	10	7.429
90	0.088	0.88	10	7.300
120	0.087	0.87	10	7.235

ตาราง ก.9 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/l

Time [min]	Absorbance	X [mg/l]	Dilution Factor	Concentration [mg/l]
5	0.287	2.87	10	20.178
10	0.278	2.78	10	19.596
15	0.275	2.75	10	19.402
20	0.27	2.7	10	19.078
30	0.245	2.45	10	17.460
40	0.253	2.53	10	17.978
50	0.249	2.49	10	17.719
60	0.239	2.39	10	17.072
90	0.238	2.38	10	17.007
120	0.242	2.42	10	17.266
150	0.287	2.87	10	20.178

ตาราง ก.10 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 30 mg/l

Time [min]	Absorbance	X [mg/l]	Dilution Factor	Concentration [mg/l]
5	0.442	4.42	10	30.210
10	0.436	4.36	10	29.821
15	0.429	4.29	10	29.368
20	0.396	4.35	11	29.796
30	0.389	3.89	10	26.780
40	0.356	3.91	11	26.948
50	0.357	3.57	10	24.709
60	0.359	3.59	10	24.838
90	0.362	3.62	10	25.032
120	0.358	3.58	10	24.773

ตาราง ก.11 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 40 mg/l

Time [min]	Absorbance	X [mg/l]	Dilution Factor	Concentration [mg/l]
5	0.627	6.27	10	42.183
10	0.523	5.75	11	38.837
15	0.601	6.01	10	40.500
20	0.522	5.74	11	38.765
30	0.573	5.73	10	38.688
40	0.544	5.44	10	36.811
50	0.542	5.42	10	36.682
60	0.547	5.47	10	37.005
90	0.554	5.54	10	37.458
120	0.561	5.61	10	37.911

## การดูดซับโดยริบบอนโซเดียมนาโนไททาเนต

ตาราง ก.12 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 10 mg/l

Time [min]	Absorbance	X [mg/l]	Dilution Factor	Concentration [mg/l]
5	0.124	1.24	10	9.629
10	0.134	1.34	10	10.277
15	0.129	1.29	10	9.953
20	0.122	1.22	10	9.500
30	0.124	1.24	10	9.629
40	0.107	1.07	10	8.529
50	0.092	0.92	10	7.558
60	0.091	0.91	10	7.494
90	0.092	0.92	10	7.558
120	0.095	0.95	10	7.753
150	0.101	1.01	10	8.141

ตาราง ก.13 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/l

Time [min]	Absorbance	X [mg/l]	Dilution Factor	Concentration [mg/l]
5	0.296	2.96	10	20.761
10	0.257	2.57	10	18.237
15	0.254	2.54	10	18.043
20	0.252	2.52	10	17.913
30	0.254	2.54	10	18.043
40	0.242	2.42	10	17.266
50	0.244	2.44	10	17.396
60	0.239	2.39	10	17.072
90	0.236	2.36	10	16.878
120	0.235	2.35	10	16.813
150	0.237	2.37	10	16.943

ตาราง ก.14 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 30 mg/l

Time [min]	Absorbance	X [mg/l]	Dilution Factor	Concentration [mg/l]
5	0.456	4.56	10	31.116
10	0.466	4.66	10	31.763
15	0.427	4.27	10	29.239
20	0.395	3.95	10	27.168
30	0.396	3.96	10	27.233
40	0.399	3.99	10	27.427
50	0.385	3.85	10	26.521
60	0.381	3.81	10	26.262
90	0.384	3.84	10	26.456
120	0.391	3.91	10	26.909
150	0.422	4.22	10	28.915

## การดูดซับโดยริบบอนไฮโดรเจนนาโนไททาเนต

ตาราง ก.15 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 10 mg/l

Time [min]	Absorbance	X [mg/l]	Dilution Factor	Concentration [mg/l]
5	0.137	1.37	10	10.471
10	0.125	1.25	10	9.694
15	0.129	1.29	10	9.953
20	0.121	1.21	10	9.435
30	0.116	1.16	10	9.112
40	0.112	1.12	10	8.853
50	0.111	1.11	10	8.788
60	0.111	1.11	10	8.788
90	0.116	1.16	10	9.112
120	0.113	1.13	10	8.918

ตาราง ก.16 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/l

Time [min]	Absorbance	X [mg/L]	Dilution Factor	Concentration [mg/L]
5	0.302	3.02	10	21.149
10	0.291	2.91	10	20.437
15	0.285	2.85	10	20.049
20	0.286	2.86	10	20.114
30	0.271	2.71	10	19.143
40	0.26	2.6	10	18.431
50	0.254	2.54	10	18.043
60	0.255	2.55	10	18.107
90	0.258	2.58	10	18.302
120	0.26	2.6	10	18.431

ตาราง ก.17 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 30 mg/l

Time [min]	Absorbance	X [mg/L]	Dilution Factor	Concentration [mg/L]
5	0.444	4.44	10	30.339
10	0.439	4.39	10	30.016
15	0.431	4.31	10	29.498
20	0.418	4.18	10	28.657
30	0.426	4.26	10	29.174
40	0.415	4.15	10	28.462
50	0.405	4.05	10	27.815
60	0.407	4.07	10	27.945
90	0.421	4.21	10	28.851
120	0.415	4.15	10	28.462

ตาราง ก.18 ผลการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 40 mg/l

Time [min]	Absorbance	X [mg/l]	Dilution Factor	Concentration [mg/l]
5	0.595	5.95	10	40.112
10	0.59	5.9	10	39.788
15	0.599	5.99	10	40.370
20	0.585	5.85	10	39.464
30	0.574	5.74	10	38.753
40	0.539	5.39	10	36.487
50	0.551	5.51	10	37.264
60	0.555	5.55	10	37.523
90	0.554	5.54	10	37.458
120	0.561	5.61	10	37.911

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ก.3 การย่อยสลายสีข้อม

ตาราง ก.19 ผลการย่อยสลายเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 10 mg/l โดยท่อโซเดียมนาโนไททาเนต

Time [min]	Absorbance	X [mg/l]	Dilution Factor	Concentration [mg/l]
10	0.13	1.3	10	10.017
20	0.146	1.46	10	11.053
30	0.094	0.94	10	7.687
40	0.091	0.91	10	7.493
50	0.082	0.82	10	6.911
60	0.065	0.65	10	5.811
70	0.058	0.58	10	5.358
80	0.064	0.64	10	5.746
90	0.056	0.56	10	5.228
100	0.043	0.43	10	4.387
120	0.039	0.39	10	4.128
150	0.034	0.34	10	3.804
180	0.031	0.31	10	3.610

ตาราง ก.20 ผลการย่อยสลายเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/l โดยท่อโซเดียมนาโนไททาเนต

Time [min]	Absorbance	X [mg/l]	Dilution Factor	Concentration [mg/l]
5	0.278	2.78	10	19.596
10	0.265	2.65	10	18.754
15	0.264	2.64	10	18.689
20	0.246	2.46	10	17.525
30	0.242	2.42	10	17.266
40	0.241	2.41	10	17.201
50	0.242	2.42	10	17.266
60	0.234	2.34	10	16.748
70	0.228	2.28	10	16.360
80	0.234	2.34	10	16.748
90	0.232	2.32	10	16.618
110	0.231	2.31	10	16.554
120	0.222	2.22	10	15.971
130	0.193	1.93	10	14.094
150	0.187	1.87	10	13.706
170	0.184	1.84	10	13.512

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### ผลการคำนวณ

#### ข.1 Langmuir Isotherm

ตารางที่ ข.1 ค่าการคำนวณ Langmuir isotherm ไททาเนียมไดออกไซด์

ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ค่าความเข้มข้นที่จุดสมดุล $C_e$ (mg/l)	ค่าความจุการดูดซับ $q$ (mg/g)	ค่าความเข้มข้นจุดสมดุลต่อความจุการดูดซับ $C_e/q$
10	8.788	24.24	0.3625
20	18.048	39.038	0.4623
30	27.743	45.136	0.6147
40	37.479	50.414	0.7434

ตารางที่ ข.2 ค่าการคำนวณ Langmuir isotherm ของท่อโซเดียมนาโนไททานเนต

ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ค่าความเข้มข้นที่จุดสมดุล $C_e$ (mg/l)	ค่าความจุการดูดซับ $q$ (mg/g)	ค่าความเข้มข้นจุดสมดุลต่อความจุการดูดซับ $C_e/q$
10	4.257	114.843	0.0370
20	12.576	148.467	0.0847
30	22.118	157.628	0.1403
40	31.634	167.313	0.1890

ตารางที่ ข.3 ค่าการคำนวณ Langmuir isotherm ของท่อไฮโดรเจนนาโนไททานเนต

ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ค่าความเข้มข้นที่จุดสมดุล $C_e$ (mg/l)	ค่าความจุการดูดซับ $q$ (mg/g)	ค่าความเข้มข้นจุดสมดุลต่อความจุการดูดซับ $C_e/q$
10	7.29	54.02	0.1351
20	17.05	58.910	0.2895
30	26.93	61.383	0.4387
40	36.68	66.216	0.5541

ตารางที่ ข.4 ค่าการคำนวณ Langmuir isotherm ของริบบอนโซเดียมนาโนไททานเนต

ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ค่าความเข้มข้นที่จุดสมดุล $C_e$ (mg/l)	ค่าความจุการดูดซับ $q$ (mg/g)	ค่าความเข้มข้นจุดสมดุลต่อความจุการดูดซับ $C_e/q$
10	8.37	32.48	0.2579
20	18.04	39.16	0.4607
30	27.81	43.8	0.6349
40	37.52	49.542	0.7574

ตารางที่ ข.5 ค่าการคำนวณ Langmuir isotherm ของริบบอนโซเดียมนาโนไทนาเนต

ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ค่าความเข้มข้นที่จุดสมดุล $C_e$ (mg/l)	ค่าความจุการดูดซับ $q$ (mg/g)	ค่าความเข้มข้นจุดสมดุลต่อความจุการดูดซับ $C_e/q$
10	7.57	48.538	0.1560
20	16.81	63.8	0.2635
30	26.26	74.736	0.3514
40	36.351	72.98	0.4981

## ข.2 Freundlich Isotherm

ตารางที่ ข.6 ค่าการคำนวณ Freundlich isotherm ของโททาเนียมไดออกไซด์

ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ค่าความเข้มข้นที่จุดสมดุล $C_e$ (mg/l)	$\ln q$ (mg/g)	$\ln C_e$ (mg/l)
10	8.788	3.1880	2.1734
20	18.048	3.6645	2.8930
30	27.743	3.8097	3.3230
40	37.479	3.9203	3.6238

ตารางที่ ข.7 ค่าการคำนวณ Freundlich isotherm ของท่อโซเดียมนาโนไทนาเนต

ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ค่าความเข้มข้นที่จุดสมดุล $C_e$ (mg/l)	$\ln q$ (mg/g)	$\ln C_e$ (mg/l)
10	4.257	4.7436	1.4488
20	12.576	5.0004	2.5318
30	22.118	5.0602	3.0964
40	31.634	5.1199	3.4542

ตารางที่ ข.8 ค่าการคำนวณ Freundlich isotherm ของท่อไฮโดรเจนนาโนไทนาเนต

ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ค่าความเข้มข้นที่จุดสมดุล $C_e$ (mg/l)	$\ln q$ (mg/g)	$\ln C_e$ (mg/l)
10	7.29	3.9894	1.9877
20	17.05	4.0760	2.8364
30	26.93	4.1171	3.2933
40	36.68	4.1929	3.6025

ตารางที่ ข.9 ค่าการคำนวณ Freundlich isotherm ของริบบอนโซเดียมนาโนไททาเนต

ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	ค่าความเข้มข้นที่จุดสมดุล $C_e$ (mg/L)	$\ln q$ (mg/g)	$\ln C_e$ (mg/L)
10	8.37	3.8823	2.0246
20	18.04	4.1558	2.8220
30	27.81	4.3140	3.2682
40	37.52	4.2902	3.5932

ตารางที่ ข.10 ค่าการคำนวณ Freundlich isotherm ของริบบอนไฮโดรเจนนาโนไททาเนต

ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	ค่าความเข้มข้นที่จุดสมดุล $C_e$ (mg/L)	$\ln q$ (mg/g)	$\ln C_e$ (mg/L)
10	7.57	3.4806	2.1254
20	16.81	3.6677	2.8927
30	26.26	3.7796	3.3254
40	36.351	3.9028	3.6250

## ภาคผนวก ค

### การคำนวณ

การใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเพื่อเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อใช้ในการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู โดยสารตั้งต้นที่ใช้ประกอบด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 16.02 กรัม น้ำ 40 มิลลิลิตร และ ไททาเนียมไดออกไซด์ 10 มิลลิกรัม เมื่อเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อใช้ในการทดลองในกระบวนการดูดซับเมทิลีนบลูแล้ว ดังนั้นการทดลองจำเป็นต้องใช้สารละลายเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้นที่แตกต่างกัน

#### ค.1 วิธีคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่ใช้ในกระบวนการดูดซับ (ตัวอย่าง 10 mg/L)

สารละลายเมทิลีนบลูที่เตรียมไว้มีความเข้มข้น 100 mg/L ซึ่งต้องการใช้สารละลายเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 10 mg/L ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ดังนั้น ใช้สมการ

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

เมื่อ C คือ ความเข้มข้น

V คือ ปริมาตรสารละลาย

แทนค่าลงในสมการ จะได้

$$(100 \text{ mg/L})(V_1) = (10 \text{ mg/L})(200 \text{ มิลลิลิตร})$$

$$V_1 = 20 \text{ มิลลิลิตร}$$

ตารางที่ ค.1 ปริมาตรที่ต้องการเจือจางในแต่ละความเข้มข้น

ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	ปริมาตร (มิลลิลิตร)
10	20
20	40
30	60
40	80

จากนั้นเมื่อได้ปริมาตรของเมทิลีนบลูตามที่ต้องการแล้วก็นำตัวเร่งปฏิกิริยามาผ่านกระบวนการดูดซับในสารละลายเมทิลีนบลู เก็บตัวอย่างทุกๆ 10 นาที เพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรมิเตอร์ นำค่าดูดกลืนแสงแทนลงในสมการ Calibration curve จะได้ค่าความเข้มข้นที่เวลาใดๆ ใช้ความเข้มข้นที่คงที่ในการหาประสิทธิภาพในการดูดซับด้วย Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm

## ค.2 วิธีการหาประสิทธิภาพการดูดซับด้วย Langmuir Isotherm ของท่อโซเดียมนาโนไททาเนต

ตารางที่ ค.2 ความเข้มข้นที่เวลาใดๆที่สมดุลในแต่ละความเข้มข้นของท่อโซเดียมนาโนไททาเนต

ความเข้มข้นเริ่มต้น ( C <sub>0</sub> )	ความเข้มข้นที่เวลาใดๆที่สมดุล (C <sub>eq</sub> )
10	4.26
20	12.58
30	21.84
40	32.60

สมการ Langmuir Isotherm

$$\frac{C_{eq}}{Q} = \frac{1}{Q_m b} + \frac{C_{eq}}{Q_m}$$

- เมื่อ C<sub>eq</sub> คือ ความเข้มข้นที่สมดุล  
 Q คือ ความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (mg/g)  
 Q<sub>m</sub> คือ ความสามารถมณการดูดซับสูงสุดของตัวดูดซับ (mg/g)  
 b คือ ค่าคงที่การดูดซับ Langmuir Isotherm

หา ความสามารถในการดูดซับที่สมดุล จากสมการ

$$Q = \frac{C_0 - C_t}{v} \times V$$

- เมื่อ C<sub>0</sub> คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)  
 C<sub>eq</sub> คือ ความเข้มข้นที่เวลาใดๆที่สมดุล (mg/l)  
 V คือ ปริมาตรของสารละลาย  
 v คือ ปริมาตรของตัวดูดซับ

ตัวอย่างการคำนวณที่ 10 mg/l ของท่อโซเดียมนาโนไททาเนต

$$Q = \frac{(10 - 4.26) \times 10^{-3} \frac{\text{mg}}{\text{g}}}{10 \times 10^{-3} \text{g}} \times 200 \text{ g}$$

$$Q = 114.84 \text{ mg/g}$$

ตารางที่ ค.3 ความสามารถในการดูดซับที่สมดุลในแต่ละความเข้มข้น

ความเข้มข้นเริ่มต้น ( C <sub>0</sub> )	ความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (Q) mg/g
10	114.84
20	148.47
30	163.23
40	147.91

นำค่าที่ได้พล็อตกราฟระหว่าง  $\frac{C_{eq}}{Q}$  และ C<sub>eq</sub> จะได้สมการเส้นตรง คือ  $y = 0.0056x + 0.014$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของตัวดูดซับหาได้จากความชันของสมการ ซึ่งมีค่า 178.57 mg/g และค่าคงที่การดูดซับ Langmuir Isotherm หาได้จากจุดตัดแกน y ซึ่งมีค่า 0.384

### ค.3 วิธีการหาประสิทธิภาพการดูดซับด้วย Freundlich Isotherm ของท่อโซเดียมนาโนไททาเนต

สมการ Freundlich Isotherm

$$\ln Q = \ln K_F + \frac{1}{n_F} \ln C_{eq}$$

เมื่อ  $K_F$  คือ ค่าคงที่การดูดซับของ Freundlich Isotherm

$n_F$  คือ adsorption intensity

ตารางที่ ค.4 ค่า  $\ln Q$  และ  $\ln C_{eq}$  ในแต่ละความเข้มข้น

ความเข้มข้นเริ่มต้น ( $C_0$ )	$\ln Q$	$\ln C_{eq}$
10	4.74	1.45
20	5.00	2.53
30	5.06	3.10
40	5.12	3.45

นำค่าที่ได้ที่ได้พล็อตกราฟระหว่าง  $\ln Q$  และ  $\ln C_{eq}$  จะได้สมการเส้นตรง คือ  $y = 0.1881x + 4.4866$  ค่าคงที่การดูดซับหาได้จากจุดตัดแกน y ซึ่งมีค่า 4.4866 และค่า adsorption intensity หาได้จากความชันซึ่งมีค่า 5.32

### ค.4 วิธีการอัตราการย่อยสลายด้วย Modified Langmuir Hinshelwood ของท่อโซเดียมนาโนไททาเนต

จากสมการที่ 4.4

$$\ln \frac{C_0}{C} = k_r K_e t = k' t \quad (4.4)$$

โดยค่า  $C$  คือ ค่าความเข้มข้นสารละลายเมทิลีนบลูที่เวลาใดๆ (mg/L)

$k'$  คือ ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายโดยรวม (1/นาที)

จากความเข้มข้นของสารละลายความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 10 และ 20 mg/L ด้วยท่อโซเดียมนาโนไททาเนตจะพบว่าจะได้สมการเป็น  $y = 0.0102x + 1.0717$  กับ  $y = 0.0028x + 0.992$  ตามลำดับ โดยค่าความชันของสมการมีค่าเท่ากับค่าคงที่อัตราการย่อยสลาย ( $k'$ ) จะได้เท่ากับ 0.0102 และ 0.0028 ต่อนาที ตามลำดับโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การทำนายเชิงเส้น ( $R^2$ ) ที่ 0.9246 และ 0.8114 ตามลำดับ