



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงและประสิทธิภาพของการดูดซับสารอินทรีย์ที่ทนต่อการย่อย
สลายทางชีวภาพด้วยท่อและริบบอนนาโนไททาเนต

**Photocatalytic Activity and Adsorption of Bio-recalcitrant Organic Compound with
Titanate Nanoribbons/Nanotubes**

ผศ.ดร.กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์

600270495
RC00183

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงและประสิทธิภาพของการดูดซับสารอินทรีย์
 ที่ทนต่อการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยท่อและริบบอนนาโนไททานเด.....
 แหล่งเงิน ทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน.....
 ประจำปีงบประมาณ 2560..... จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน..... 400,000..... บาท
 ระยะเวลาทำการวิจัย..... 1..... ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2559 ถึง กันยายน 2560.....
 ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด
 ผศ.ดร.กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับและการย่อยสลายสีย้อมโดยใช้สารประกอบท่อนาโนไททานเดและริบบอนนาโนไททานเดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง การสังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล ริบบอนนาโนไททานเดที่มีความกว้าง 0.2 ไมโครเมตร ความยาว 2.5 ไมโครเมตร มีลักษณะพื้นที่ผิว 32 ตารางเมตรต่อกรัม ถูกสังเคราะห์ที่สภาวะอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และท่อนาโนไททานเดที่มีความกว้าง 0.2 ไมโครเมตร ความยาว 6.4 ไมโครเมตร มีลักษณะพื้นที่ผิว 138 ตารางเมตรต่อกรัม ที่สภาวะอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จะได้ การล้างกรดไฮโดรคลอริกช่วยแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างโซเดียมกับไฮโดรเจนในการหาประสิทธิภาพการดูดซับของสารประกอบนาโนไททานเดในละลายเมทิลีนบลู พบว่าท่อโซเดียมนาโนไททานเดมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากที่สุดเนื่องจากมีพื้นที่ผิวมากที่สุด ลักษณะแสงเมียร์ไอโซเทอม และค่าคงที่ของอัตราการดูดซับในรูปแบบของ pseudo second order โดยค่าของการดูดซับที่มากที่สุดเท่ากับ 178.57 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าคงที่อัตราการดูดซับมีค่าเท่ากับ 0.079 ต่อมิลินาที ในส่วนการย่อยสลายเมทิลีนบลูโดยใช้แสงเป็นตัวกระตุ้นด้วยท่อโซเดียมนาโนไททานเดพบว่าจะมีค่าอัตราในการย่อยสลายที่ 0.102 ต่อนาที โดยที่ค่าความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเริ่มต้นที่ 10 mg/l

คำสำคัญ: ไททานีนา ไททานเด ริบบอนนาโน กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก

Research Title: Photocatalytic Activity and Adsorption of Bio-recalcitrant Organic Compound with Titanate Nanoribbons/Nanotubes

Researcher: Asst.Prof.Dr. Kunlanun Kiatkitipong

Faculty: Engineering **Department:** Chemical Engineering

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 μm length 2.5 μm and surface area of 38 m^2/g was obtained under the condition at temperature 200 C for 24 hr, and titanates nanotubes width 0.2 μm length 6.4 μm and surface area of 138 m^2/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 mg/g and adsorption kinetics of 0.119 min^{-1} . For degradation onto methylene blue with sodium titanates nanotubes, this showed rate constant of 0.102 min^{-1} by initial concentration of methylene blue at 10 mg/l

Keywords: Titania Titanate Nanoribbon Photocatalytic reaction

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก ประเภท เงินอุดหนุนทั่วไป (งบประมาณแผ่นดิน) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลขที่สัญญา A118-0260-044 และ ขอขอบคุณ นายกษิตศ นาคทรพร และ นายอวยชัย ธิศรี ที่ให้ความช่วยเหลือในการทดลอง



ผศ.ดร.กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก (Photocatalytic activity).....	3
2.2 สารประกอบไททาเนียม-ออกไซด์ (Titanium-oxide compound).....	5
2.3 กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process).....	7
2.4 เมทิลีนบลู (Methylene blue).....	11
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	13
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	13
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	13
3.3 การสังเคราะห์รีบอนนาโนไททาเนตและท่อนาโนไททาเนตด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล.....	13
3.4 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมี.....	14
3.5 การดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา.....	15
3.6 การกำจัดสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา.....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 ผลการวิจัย	
4.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานาโนเมตร.....	17
4.2 ประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู.....	22
4.3 การย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลู.....	27
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	30
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	31
บทที่ 6 สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย	32
บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง	33
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย.....	35
ประวัตินักวิจัย	36



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อดี-ข้อเสียกระบวนการต่างๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์สารประกอบนาโนไทเทเนียมออกไซด์.....	7
2.2 สมบัติของการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ.....	9
4.1 ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดเทียบแลงเมียร์ไอโซเทอมกับฟลุนดิชไอโซเทอม.....	24
4.2 ค่าความจุและค่าคงที่ของการดูดซับจากแลงเมียร์ไอโซเทอม.....	24
4.3 ผลการคำนวณการหาแบบจำลองและค่าไคเนติกการดูดซับ.....	27



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VII

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 การเกิดช่องว่างของอิเล็กตรอน และ โฮล จากการกระตุ้นด้วยพลังงานจากแสง	4
2.2 กลไกการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง	4
2.3 โครงสร้างผลึกของไททาเนียม ไดออกไซด์	6
3.1 ส่วนประกอบเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอล	14
4.1 ลักษณะทางกายภาพของไททาเนียม ไดออกไซด์แบบอะนาเทส	17
4.2 ลักษณะพื้นฐานและพื้นผิวของไททาเนียมออกไซด์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้น	18
4.3 โครงสร้างผลึกของไททาเนียมออกไซด์แบบอะนาเทส	18
4.4 ลักษณะทางกายภาพของริบบอนนาโนไททาเนต	19
4.5 โครงสร้างผลึกของโซเดียมริบบอนนาโนไททาเนต	19
4.6 โครงสร้างผลึกของไฮโดรเจนริบบอนนาโนไททาเนต	20
4.7 พื้นผิวและลักษณะพื้นผิวของริบบอนโซเดียมนาโนไททาเนต	21
4.8 พื้นผิวและลักษณะพื้นผิวของริบบอนไฮโดรเจนนาโนไททาเนต	21
4.9 ลักษณะพื้นผิวของท่อนาโนไททาเนต	22
4.10 กราฟความเข้มข้นสารละลายเมทิลีนบลูเทียบกับเวลา	22
4.11 ผลการคำนวณ Langmuir Isotherm	23
4.12 ผลการคำนวณ Freundlich Isotherm	23
4.13 กราฟเชิงเส้นหาความสัมพัทธ์ pseudo first order	26
4.14 กราฟเชิงเส้นหาความสัมพัทธ์ pseudo second order	26
4.15 การย่อยสลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 และ 20 mg/l	28
4.16 กราฟเชิงเส้นของอัตราการย่อยสลายเมทิลีนบลูภายใต้แสงที่มองเห็น	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันมนุษย์มีความต้องการในด้านการบริโภคมากขึ้น อาทิ อาหาร เครื่องดื่ม เทคโนโลยี และอื่นๆอีกมากมาย ส่งผลให้ภาคอุตสาหกรรมเพิ่มกำลังการผลิตมากขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ ทำให้มีการปล่อยมลพิษออกสู่อากาศและแหล่งน้ำตามธรรมชาติมากขึ้น โดยน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมนับเป็นปัญหาหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สิ่งมีชีวิตรวมทั้งการดำรงชีวิตของมนุษย์ด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องตระหนักถึงปัญหาดังกล่าว และคำนึงถึงวิธีการบำบัดคุณภาพน้ำก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ โดยกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่นำสนใจกระบวนการหนึ่งคือ กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ถือเป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียเชิงเคมี ที่ประกอบไปด้วยกลไกของการเกิดปฏิกิริยาซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงไม่ใช้แสง (Dark adsorption) เป็นการดูดซับสารอินทรีย์บนตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อเตรียมพร้อมในการย่อยสลายโมเลกุล ช่วงที่สองคือช่วงของการเร่งปฏิกิริยา เชิงแสง (Photodegradation) ในช่วงนี้โมเลกุลของสารอินทรีย์จะถูกย่อยสลายให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) กับน้ำ (H_2O) ตัวเร่งที่นิยมใช้คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความเสถียร เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่ยังคงมีข้อจำกัดในด้านของพื้นที่ผิวและโครงสร้างที่ส่งผลต่อกระบวนการ โฟโตแคตาไลติก ดังนั้นจึงได้มีหลายงานวิจัยที่ศึกษาหาวิธีในการปรับปรุงและแก้ไขเพื่อให้ได้มาซึ่งประสิทธิภาพสูงสุดของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการใช้เทคนิคต่างๆหลายวิธีในการสังเคราะห์ เช่น วิธีโซลเจล วิธีปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต และวิธีไฮโดร-เทอร์มอล วิธีไฮโดรเทอร์มอลมีข้อดีที่แตกต่างจากวิธีอื่นๆ และเป็นที่ยอมรับแพร่หลายโดยมีข้อดี คือ มีความเป็นเนื้อเดียวกันของสารทางเคมีที่ดีสูงโดยไม่จำเป็นต้องมีการเผาหรืออบย่อยอีก สามารถควบคุมรูปร่างของผลึกได้อุณหภูมิของสารมีขนาดเล็กระดับไมโครถึงนาโน และทำให้ประหยัดพลังงาน อีกทั้งยังสามารถสังเคราะห์สารประกอบที่มีลักษณะรูปร่างแบบต่างๆได้ ด้วยข้อดีของไฮโดรเทอร์มอล งานวิจัยนี้จึงได้ใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) เพื่อควบคุมโครงสร้างและพื้นที่ผิวให้เกิดการดูดซับให้มีประสิทธิภาพสูงสุด และยังมีอีกหลายงานวิจัยที่ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะของอนุภาคนาโนไททานเนต และสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ระหว่างริบบอนนาโนไททานเนต และท่อนาโนไททานเนต [1] ซึ่งงานวิจัยนี้มีจุดที่น่าสนใจคือ วิธีการสังเคราะห์ริบบอนนาโนไททานเนต และท่อนาโนไททานเนต และอีกหนึ่งงานวิจัยคือได้ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับและการย่อยสลายสีข้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสของสารประกอบไททานเนตในสารละลายเมทิลีนบลู ซึ่งได้มีการสังเคราะห์

โครงสร้างของสารประกอบไททานเนตโดยมีการปรับเปลี่ยนค่าอุณหภูมิในการสังเคราะห์ระหว่าง 100-200 องศาเซลเซียส โดยการหาประสิทธิภาพของการดูดซับนั้นจะใช้ทฤษฎีแลง-เมียร์ไอโซเทอมกับฟลูคิกไอโซเทอมในการคำนวณ [2] อย่างไรก็ตามในส่วนของกรวยสลวยสี่เหลี่ยมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสโดยการใช้แสงเป็นตัวกระตุ้น นาโนไททานเนตที่มีลักษณะโครงสร้างแบบริบบอนและท่อที่มีสารประกอบระหว่างโซเดียม และไฮโดรเจนพร้อมทั้งหาค่าอัตราการย่อยสลวยสี่เหลี่ยมของตัวเร่งปฏิกิริยา ยังไม่มีงานวิจัยใดรายงาน

ดังนั้นงานวิจัยเล่มนี้ได้ทำการศึกษาวิธีการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาในลักษณะของอนุภาคนาโนไททานเนตซึ่งอยู่ในรูปริบบอนนาโนไททานเนต และท่อนาโนไททานเนต และปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสในสารละลายเมทิลีนบลูโดยหาประสิทธิภาพของการดูดซับ จากทฤษฎีของแลงเมียร์ไอโซเทอมกับ ฟลูคิกไอโซเทอมและประสิทธิภาพของการย่อยสลวยสี่เหลี่ยม ด้วยวิธีการหาค่าคงที่อัตราการทำปฏิกิริยา

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ควบคุมและสังเคราะห์โครงสร้างระดับนาโนของสารประกอบไททานเนตแบบไดออกไซด์

1.2.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับของ และการกำจัดสี้อม (Methylene Blue) ด้วยวิธีการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของสารประกอบไททานเนตไดออกไซด์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 สังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ให้อยู่ในรูปของริบบอนนาโนไททานเนต และท่อนาโนไททานเนตโดยศึกษาปัจจัยและสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ให้ได้รูปร่างของโครงสร้างตามที่ต้องการ

1.3.2 ศึกษาโครงสร้างและประสิทธิภาพของริบบอนนาโนไททานเนต และท่อนาโนไททานเนต ภายหลังจากแลกเปลี่ยนไอออนกับกรดไฮโดรคลอริก (HCl)

1.3.3 ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดเมทิลีนบลู ด้วยวิธีการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง โดยเน้นศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับของตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปของริบบอนนาโนไททานเนตและท่อนาโนไททานเนตในสารละลายเมทิลีนบลู

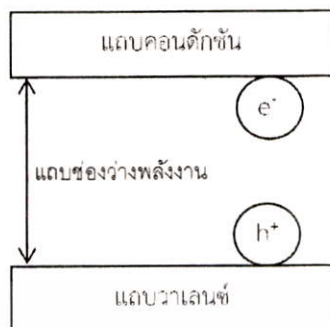
บทที่ 2

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 กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก (Photocatalytic activity)

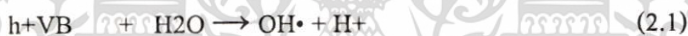
กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalytic Process) เป็นปฏิกิริยาที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้แสงเป็นตัวกระตุ้น โดยที่ค่า $E = h\nu = hc/\lambda$ พลังงานของแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นสั้นหรือถี่ ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ดังนั้นชนิดของแสงถือเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง [3] ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในน้ำ ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกกระตุ้นด้วยแสงซึ่งมีพลังงานโฟตอนที่สูงกว่าหรือเท่ากับค่าแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (Valence band, VB) ถูกกระตุ้นขึ้นไปยังแถบคอนดักชัน (Conduction band, CB) ทำให้เกิดช่องว่างอิเล็กตรอนหรือโฮล (e^-/h^+ pair) ดังแสดงในภาพที่ 2.1



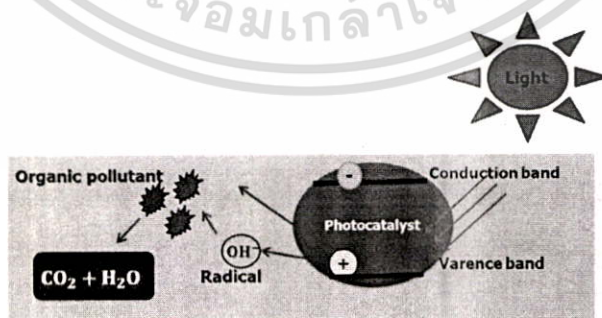
ภาพที่ 2.1 การเกิดช่องว่างของอิเล็กตรอน และโฮล จากการกระตุ้นด้วยพลังงานจากแสง

(ปรับปรุงจาก: อภิรัฐ, 2551)

ซึ่งเมื่อผิวหน้าของสารในสภาวะที่มีคู่อิเล็กตรอน-โฮลสัมผัสกับโมเลกุลของน้ำหรือออกซิเจน(O₂) ที่มีอยู่ในอากาศจะทำให้เกิดเรดิคัล (Radical) ที่มีความว่องไวสูง โดยโมเลกุลของน้ำจะถูกออกซิไดซ์ด้วยโฮลเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH•) ดังสมการที่ (2.1) ส่วน โมเลกุลของออกซิเจนจะถูกรีดิวซ์ด้วยอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบการนำพลังงาน เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออน(O₂⁻) ดังสมการที่ (2.2)



ตัวไฮดรอกซิลเรดิคัลจะสามารถย่อยสารประกอบอินทรีย์ได้เนื่องจากเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงเรียกกระบวนการนี้ว่าโฟโตออกซิเดชัน (Photooxidation) ในขณะที่ซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลนั้นเป็นตัวรีดิวซ์ที่แรงก็จะสามารถทำปฏิกิริยากับสารที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) ที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของสารได้ด้วยปฏิกิริยาโฟตรีดักชัน (Photoreduction) จากปฏิกิริยาทั้ง 2 จะทำให้สารอินทรีย์ที่อยู่ในสารละลายถูกกำจัดและสลายตัวกลายเป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะเรียกกระบวนการทั้งหมดนี้ว่า กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง [4] กลไกการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงดังรูป 2.2



ภาพที่ 2.2 กลไกการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalytic activity) [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

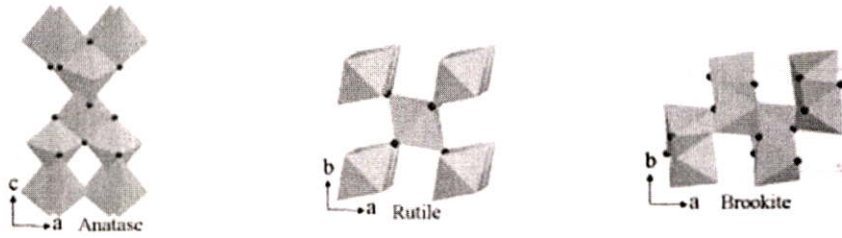
จากการศึกษากระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงจะพบว่า ไททาเนียมไดออกไซด์ ที่เป็นสารเร่ง-ปฏิกิริยา และเป็นสารกึ่งตัวนำ (Semi-conductor) เนื่องจากสารกึ่งตัวนำจะมีชั้น แถบวาเลนซ์และแถบคอนดักชันที่ไม่ติดกันเกิดเป็นช่องว่างเรียกแบนด์แก๊ป (Band Gap) จะสามารถเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงได้ดี เนื่องจากอิเล็กตรอนที่อยู่บนแถบคอนดักชันไม่กลับลงมาที่แถบเวเลนซ์ ต่างจากสาร โลหะตัวนำที่มีชั้นทั้ง 2 ชั้นติดกัน และพบว่า ไททาเนียมไดออกไซด์ มีราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ความเสถียรสูง ความสามารถในการละลายต่ำ [7] นอกจากนี้ได้มีการศึกษาเปรียบเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น พบว่าการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์แขวนลอย สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์มีค่าแบนด์แก๊ปอยู่ที่ 3.2 โวลต์ ทำให้ต้องใช้พลังงานแสงในช่วงของแสงยูวี ($\lambda \leq 400$ นาโนเมตร) จึงต้องใช้แสงจากหลอดยูวีเป็นแหล่งกำเนิดแสง [3]

2.2 สารประกอบไททาเนียม-ออกไซด์ (Titanium-oxide compound)

2.2.1 ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide; TiO₂)

ไททาเนียมไดออกไซด์ปัจจุบันนิยมนำมาใช้ประโยชน์ในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆหลายชนิด เช่น ใช้สำหรับสารให้สี ใช้เป็นสารเคลือบผลิตภัณฑ์ ใช้ในการบำบัดมลพิษ ฯลฯ โดยที่ไททาเนียมได-ออกไซด์นี้จะประกอบไปด้วยไททาเนียม (Ti) เป็นโลหะสีเทา มีมวลอะตอมเท่ากับ 47.9 ไม่วิวไฟ และทนต่อการกัดกร่อน แต่โดยทั่วไปจะพบอยู่ในรูปของ ไททาเนียม ไดออกไซด์ซึ่งมีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +4 คุณสมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์จะเป็นผลึกขาวมีมวลอะตอมเท่ากับ 79.9 มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ (Semi-conductor) มีลักษณะทางเคมีที่ดีส่งผลให้มีผลข้างเคียงต่อสิ่งแวดล้อมน้อยซึ่งมีความปลอดภัยและใช้งานได้ง่าย โดยไททาเนียมไดออกไซด์จะมีโครงสร้างผลึกแบ่งออกเป็น 3 โครงสร้าง คือ บรูคไคท์ (Brookite) อนาเทส (Anatase) และรูไทล์ (Rutile) ดังภาพที่ 2.3 โดยโครงสร้างที่นิยมนำมาใช้ในการกำจัดสารละลายอินทรีย์ในน้ำโดยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysis) คือ โครงสร้างแบบอนาเทสและรูไทล์ ซึ่งมีการจัดเรียงอะตอมไททาเนียมกันแบบ ออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) โดยมีอะตอมออกซิเจนเข้าไปแทรกในช่องว่างแบบ ออกตะฮีดรอล (Octahedral) โดยโครงสร้างผลึกทั้งหมดที่แตกต่างนี้ส่งผลให้ โครงสร้างผลึกมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นค่าความหนาแน่น พลังงานเสรี โดยคุณสมบัติที่แตกต่างส่งผลให้โครงสร้างต่างกัน โดยโครงสร้างแบบอนาเทสจะเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่ารูไทล์ เนื่องจากการกลับมารวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนกับโฮล เกิดได้ยากกว่าโครงสร้างแบบรูไทล์ ส่วนโครงสร้างแบบบรูคไคท์การทำให้อิทธิพลที่น้อยข้างยาก ทำให้โครงสร้างผลึกแบบอนาเทสเป็นที่นิยมใช้มากที่สุด [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ (ก)อะนาทาส (ข) รูไทล์และ(ค) บรูคไคท์
(อุยา, 2551)

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]

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 ที่ใช้ในการสังเคราะห์สารประกอบนาโนไทเทเนียม ออกไซด์

กระบวนการ	ข้อดี	ข้อเสีย
โซล-เจล (Sol gel)	อนุภาคที่ได้มีการกระจาย รู-พรม พื้นที่ผิว และปริ มาตร-พรมสูง	อนุภาคที่ได้จากการ สังเคราะห์ไม่สม่ำเสมอ
การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์ (Electrospinning)	ขนาดรูพรมเล็ก อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ ผิวต่อปริมาตรสูง	การใช้ระยะเวลาในการ สังเคราะห์นาน
แอนโนไดเซชัน (Anodization)	พื้นผิวเรียบ รูพรมเป็น ระเบียบสม่ำเสมอ	การดำเนินการยุ่งยาก ซับซ้อน และต้องควบคุม หลายปัจจัย
วิธีการทางความร้อน (Hydrothermal)	เป็นระบบปิด ทำให้มี ความบริสุทธิ์สูงและได้ ปริมาณที่มาก	ดำเนินการภายใต้อุณหภูมิสูง

จากข้อดีของวิธีการทางความร้อนคือสามารถควบคุม โครงสร้างของอนุภาครวมถึงผลึกของ สารประกอบนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ได้ จึงเป็นเหตุผลที่สำคัญที่ทำให้มีความสนใจที่จะศึกษากระบวนการ ดังกล่าวในการสังเคราะห์สารประกอบนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

2.3 กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process)

กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการที่เกิดการสะสมตัวของสารหรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสาร ที่บริเวณพื้นที่ผิวหรือระหว่างผิวน้ำ (interface) กระบวนการดูดซับนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใดๆ ได้แก่ ก๊าซกับของเหลว ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดย โมเลกุลหรือสารคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่าสาร ดูดซับ (adsorbent) โดยสารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวต่ำจะถูกดูดซับแต่สารที่มีพลังงานอิสระสูงจะไม่ถูกดูดซับ

2.3.1 กลไกของกระบวนการดูดซับ

การดูดซับ (adsorption) เป็นกระบวนการกักสารละลายหรือสารแขวนลอยที่มีขนาดเล็กซึ่งละลายอยู่ใน น้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กนี้เรียกว่า สารดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดซับเรียกว่าสารถูกดูดซับ (adsorbent) การดูดซับนี้ จะเป็นการดูดซับแบบระหว่างสถานะ (phase) ต่างๆ ทั้งสามสถานะ คือ ก๊าซ ของเหลวและของแข็ง ซึ่งมีได้ทั้ง แบบของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็งและของเหลวกับของแข็ง

ปริมาณสารถูกดูดซับขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ ความดันและพลังงานศักย์ของอันตรกิริยา (interaction potential energy) ระหว่างสารถูกดูดซับ ซึ่งอาจเป็นของแข็ง ของเหลวหรือก๊าซ กับสารดูดซับซึ่งอาจเป็นของเหลวหรือของแข็ง ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดัน ความเข้มข้นและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จะทำให้ปริมาณการดูดซับเปลี่ยนแปลง ในการดูดซับ โมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยก็จะถูกกำจัดออกจากน้ำโดยไปเกาะอยู่บนตัวดูดซับ โดยโมเลกุลส่วนใหญ่จะเกาะอยู่กับผิวภายในโพรงของตัวดูดซับ และมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเท-โมเลกุลจากน้ำไปหาตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงจุดสมดุล จึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อยเพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับตัวดูดซับ โดยในการดูดซับจะมี Driving Force อยู่ 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

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) หรือในแต่ละชั้นของ โมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของ โมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

2.3.2.2 การดูดซับทางเคมี

การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิม แล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูง หมายความว่า การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับ จะทำได้ยาก คือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) เท่านั้น จะเลือกเฉพาะบริเวณที่สามารถเกิดพันธะเคมีได้เท่านั้น ซึ่งไม่เหมือนกับการดูดซับทางกายภาพที่ไม่จำกัดบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา

อย่างไรก็ตามการดูดซับจะเกิดขึ้นทั้ง 2 กรณีในเวลาเดียวกันและยากที่จะแยกได้ว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นอยู่ในลักษณะใด โดยจะเปรียบเทียบการดูดซับทั้ง 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
แรงดูดระหว่างสารดูดซับกับสารถูกดูดซับ เป็นแรงดึงดูดอย่างแข็งแรง	แรงดูดระหว่างสารดูดซับกับสารถูกดูดซับ เป็นแรงดึงดูดอย่างอ่อนๆ

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

2.3.3 ทฤษฎีแลงเมียร์ ไอโซเทอม (Langmuir Adsorption Isotherm) [5]

มีสมมุติฐาน 4 ข้อ ดังนี้

1. แต่ละตำแหน่งที่ถูกดูดซับจะสามารถรับหรือถูกดูดซับได้เพียงหนึ่ง โมเลกุลเท่านั้น อาจกล่าวได้ว่ามีการดูดซับเพียงชั้นเดียว
 2. โมเลกุลที่ถูกดูดซับที่ผิวของของแข็งอยู่ในตำแหน่งที่แน่นอนและมีพื้นที่ที่ถูกดูดซับที่แน่นอนหรือจำกัด
 3. ตรงบริเวณดูดซับจะเกิดอัตราการติดและหลุดออก ซึ่งอัตราการติดจะมากกว่าอัตราการหลุดจนกระทั่ง ถึงจุดสมดุลจะทำให้อัตราการติดเท่ากับอัตราการหลุด
 4. พลังงานในการดูดซับมีค่าเท่ากันในทุกๆตำแหน่ง โมเลกุลที่ถูกดูดซับที่พื้นผิวไม่สามารถเคลื่อนย้ายไปมาอย่างอิสระระหว่างพื้นผิวและไม่สารรบกวนทำปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลใกล้เคียงได้
- สมการ Isotherm ของ Langmuir แสดงในรูปได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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 ทฤษฎีฟลูนิช ไอโซเทอม (Freundlich Adsorption Isotherm) [11]

สมการการดูดซับแบบฟลูนิชใช้กันแพร่หลายที่สุดในการอธิบายการดูดซับในระบบของเหลว สมการของฟลูนิชตั้งอยู่บนสมมติฐานว่า

1. การดูดซับมีลักษณะเป็นแบบต่อเนื่อง
2. ใช้กับกรณีการถ่ายเทพลังงานผ่านพื้นผิวแบบไม่เป็นเนื้อเดียว
3. ใช้ได้ดีกับตัวดูดซับที่มีแนวโน้มถูกดูดได้ง่ายและมีความเข้มข้นต่ำถึงปานกลาง

สมการฟลูนิช 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 $C_{16}H_{18}N_3SCl$ นิยมใช้เป็นสีย้อมในอุตสาหกรรม ถูกนำมาใช้งานทั้งทางด้านชีววิทยาและทางเคมี เป็นสารเคมีที่ไวต่อการทำปฏิกิริยา (Chemically) มีความเป็นพิษและเสถียร (stable) ในสิ่งแวดล้อม ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ที่อุณหภูมิห้องจะมีสถานะเป็นของแข็ง มีลักษณะเป็นผงสีเขียวเข้ม เมื่อนำมาละลายในน้ำจะเป็นสีฟ้า พบมากที่สุดในอุตสาหกรรมน้ำเสีย จึงเป็นเรื่องยากที่จะสามารถแยกเมทิลีนบลูออกจากน้ำเสียเพราะละลายน้ำได้ดี ในโครงสร้างจะประกอบด้วยผลึกน้ำ 3 โมเลกุลต่อโมล เมทิลีนบลูใช้เป็นส่วนผสมในสีย้อมผ้า ถ้ามนุษย์ได้รับเมทิลีนบลูเข้าสู่ร่างกายมากเกินไปจะมีอาการแสบร้อนในปากหรือท้อง คลื่นไส้ อาเจียน เจ็บหน้าอก แน่นหน้าอก หายใจเร็ว เกิดอาการวิตกกังวล ระบายท้องต่อระบบทางเดินปัสสาวะ หรืออาจทำให้ผิวหนังมีสีน้ำเงินได้

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kunlanan Kiatkitipong et al. [1] ได้ศึกษาการสังเคราะห์นาโนไททานเนตด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่สภาวะอุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกันจะได้โครงสร้างของนาโนไททานเนตที่แตกต่างกันโดยที่สภาวะอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทำให้เย็นตัวลงทันทีจะได้โครงสร้างของนาโนไททานเนตในรูปโครงสร้างริบบอนที่สมบูรณ์ และที่สภาวะอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทำให้เย็นตัวลงทันทีจะได้โครงสร้างของนาโนไททานเนตในรูปโครงสร้างท่อที่สมบูรณ์ อีกทั้งยังนำสารประกอบนาโนไททานเนตไปแลกเปลี่ยนไอออนเพื่อให้ได้โครงสร้างของสารประกอบที่แตกต่างกัน โดยได้ไฮโดรเจนนาโนไททานเนตและโซเดียมนาโนไททานเนต

Kunlanan Kiatkitipong et al. [13] ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะของอนุภาคนาโนไททานเนตและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ระหว่างริบบอนนาโนไททานเนต และท่อนาโนไททานเนต ในขณะที่แถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองลดลงให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเพื่อกำจัดออกซาลิก (Oxalic acid) นั้นขึ้นกับพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า เมื่อเทียบกับเมทานอล (Methanol)

Yu Hua Cheng et al. [2] ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับและปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสด้วยแสงของสารประกอบไททานเนตในสารละลายเมทิลีนบลู ซึ่งได้มีการสังเคราะห์โครงสร้างของสารประกอบไททานเนตโดยมีการปรับเปลี่ยนค่าอุณหภูมิในการสังเคราะห์ระหว่าง 100-200 องศาเซลเซียส ขึ้นมา จากนั้นจะนำมาเพิ่มความสามารถในการดูดซับโดยใช้การเพิ่มพื้นที่ผิวของสารและนำไปทำให้มีความไวต่อแสงด้วยไนโตรเจนและสารประกอบไนโตรเจน โดยการหาประสิทธิภาพของการดูดซับนั้นจะใช้ทฤษฎีแลงเมียร์-ไอโซเทอมกับฟลูคิกไอโซเทอมในการคำนวณ โดยจากการทดลองพบว่าสารตัวอย่างที่ประกอบไปด้วย 2 เฟส ระหว่างไททานเนตกับไททานเนีย อัตราส่วน 50:50 โดยน้ำหนัก ที่การสังเคราะห์อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส (S160) มีพื้นที่ผิวที่

179.7 m^2/g โดยมีโครงสร้างเป็นไฮโดรเจนไททานเนต จะมีประสิทธิภาพมากที่สุดในการดูดซับภายใต้สภาวะที่ไม่มีแสงและกำจัดเมทิลีนบลูภายใต้สภาวะที่มีแสงโดยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสใช้แสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ ในภายใต้สภาวะไม่มีแสงจะสามารถดูดซับเมทิลีนบลูที่ความจุ 163.66 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยใช้แสงเมียร์ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นสมการรูปแบบการคำนวณ ในการกำจัดโดยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสที่ใช้แสงช่วงตามองเห็นที่มีความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร และหาค่าอัตราการกำจัดสารละลายเมทิลีนบลูจากสมการโมเดลแสงเมียร์ อินเซลวูด ได้้อตราการย่อยสลายที่ 0.63438 โดยเป็นอัตราที่มากที่สุดซึ่งเป็นสารตัวอย่าง S160 ในการทดลอง

Lin Xiong et al. [14] ได้ศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับบนท่อนาโนไททานเนตนาโนโดยการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการเผามีส่วนประกอบโครงสร้างที่เหมือนกับท่อไททานเนตนาโนที่ไม่ได้ผ่านการเผา โดยการเปรียบเทียบกับเครื่องมือ XRD เป็นสารประกอบไฮโดรเจนไททานเนต และมีค่าพื้นที่ผิวที่ $130 \text{ m}^2/\text{g}$ ไปทำการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูเพื่อหาค่าไคเนติกของการดูดซับกับไอโซเทอมของการดูดซับ โดยพบว่าค่าไคเนติกของการดูดซับเท่ากับ $0.0132 \text{ g}/\text{mg}\cdot\text{min}$ เป็นไปตามรูปแบบ Pseudo-second order โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9999 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสารละลายที่ $50 \text{ mg}/\text{L}$ และนำไปเปรียบเทียบหาไอโซเทอมของการดูดซับ พบว่าแสงเมียร์ไอโซเทอมมีค่า R^2 เท่ากับ 0.993 ซึ่งมีค่ามากที่สุด ใน 3 ไอโซเทอมของการดูดซับและมีค่าการดูดซับที่มากที่สุดที่ $133.33 \text{ mg}/\text{g}$ จึงสรุปว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂anatase 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 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟกโตรมิเตอร์ (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 การสังเคราะห์ริบบอนนาโนไททาเนตและท่อนาโนไททาเนตด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

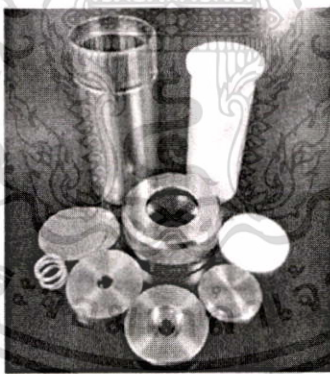
3.3.1 เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ปริมาตร 40 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นผสมผงไททาเนียมไดออกไซด์ 1 กรัม ลงในบีกเกอร์ นำไปเข้าเครื่องปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที

3.3.2 เมื่อปั่นจนครบ 30 นาที นำสารใส่เครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอล ดังภาพที่ 3.1 จากนั้นนำไปเข้าสู่กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ด้วยการเข้าสู่อุณหภูมิตั้งที่ 200 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง (ในกรณีโครงสร้างริบบอนนาโน) และที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 72 ชั่วโมง (ในกรณีโครงสร้างท่อนาโน)

3.3.3 เมื่อครบกำหนด นำเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอลทิ้งไว้ให้เย็นตัวลง โดยสารจะแยกชั้นระหว่างชั้นสารประกอบที่เป็นสารละลายหนืดกับชั้นของเหลว ทำการเทชั้นของเหลวออก และเก็บสารประกอบที่ผงไว้เพื่อนำไปล้างเอาโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาออกโดยนำไปล้าง ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยการวัดค่า pH ของน้ำที่เทออก

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

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



ภาพที่ 3.1 ส่วนประกอบเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอล

3.4 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมี

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การศึกษาวิเคราะห์สมบัติปริมาณธาตุสารประกอบ และโครงสร้างของสารตัวอย่างด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์โดยการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัด เพื่อระบุโครงสร้างผลึกของสารประกอบตัวอย่าง [16]

3.4.3 การศึกษาวิเคราะห์การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนด้วยเครื่องวัดการดูดซับก๊าซ (BET) เป็นการวัดปริมาตรก๊าซที่ถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวของอนุภาคโดยทั่วไปก๊าซที่นิยมใช้คือก๊าซไนโตรเจน ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์ที่อุณหภูมิจุดเดือดของก๊าซไนโตรเจน (ประมาณ -196 องศาเซลเซียส) ในขั้นแรกต้องไล่ก๊าซที่ไม่ใช่ไนโตรเจนเหลวออกจากพื้นผิวของอนุภาคออกให้หมด จากนั้นจึงให้พื้นผิวดูดซับก๊าซ และวัดปริมาณการดูดซับจากปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่หายไปเมื่อป้อนสู่อุณหภูมิ หรือวัดจากปริมาณก๊าซที่คายออกมาตอนไล่ก๊าซออกจากอนุภาค 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 จากนั้นนำไปปั่นกวนบนเครื่องปั่นกวนที่อยู่ภายในกล่องที่บดแสงดังภาพที่ 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 จากการทดลองการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีน-บลูคงที่ทำการเปิดไฟด้วยหลอดเมอร์คิวรี 500 วัตต์ จับเวลาพร้อมเก็บสารตัวอย่างทุกๆ 10 นาที ที่ปริมาตร 5 มิลลิลิตร โดยใช้ไมโครฟิลเตอร์กรองสารละลายสีข้อมก่อนนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง

3.6.2 ทำการเจือจางสารตัวอย่างโดยการเติมน้ำและสารละลายในอัตราส่วน 9 : 1 จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตรแล้วบันทึกผล

3.6.3 ทำซ้ำอีกครั้ง โดยเปลี่ยนโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา และชนิดไอออนตัวเร่งปฏิกิริยา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

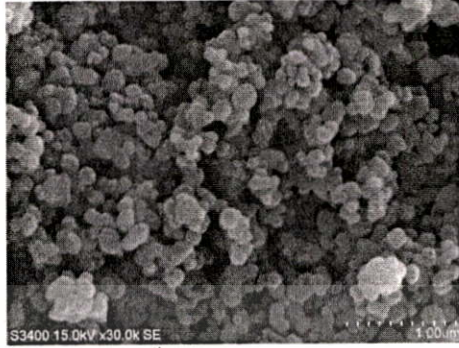
4.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานาโนเมตร

4.1.1 ไททาเนียมไดออกไซด์

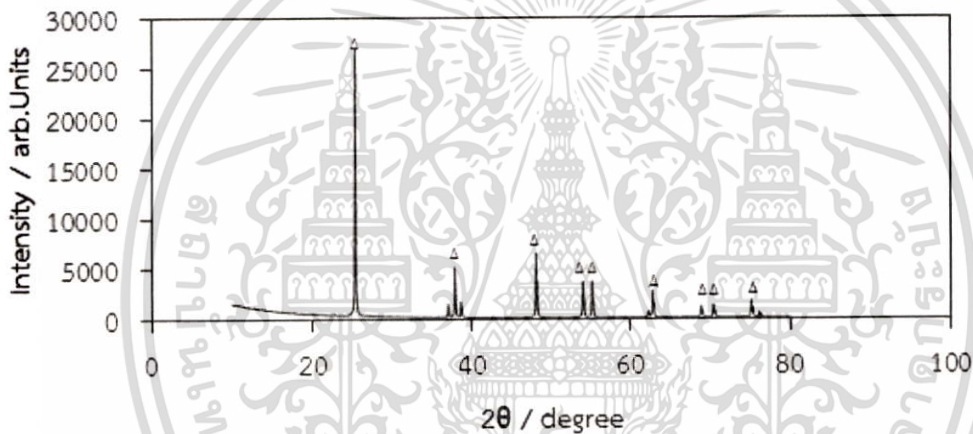
ไททาเนียมไดออกไซด์ที่นำมาเป็นสารตั้งต้นเพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลมีลักษณะเป็นของแข็งสีขาวที่มีความละเอียด ทึบแสง ไม่มีกลิ่นและมีน้ำหนักเบา ง่ายต่อการฟุ้งกระจาย มีความบริสุทธิ์ 99.7% ดังแสดงในภาพที่ 4.1 และเมื่อทำการวิเคราะห์ถึงลักษณะพื้นฐานหรือลักษณะพื้นผิวของด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงดังภาพที่ 4.2 พบว่าไททาเนียมไดออกไซด์มีลักษณะพื้นฐานที่ไม่สามารถระบุได้ (Random shape) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ประมาณ 197 นาโนเมตร พื้นที่ผิวที่ได้จากวัดด้วยเครื่องวัดการดูดซับก๊าซ (BET) มีพื้นที่ผิว 10 ตารางเมตรต่อกรัม และจากการวิเคราะห์โครงสร้างภายในด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer: XRD) พบว่าสารไททาเนียมไดออกไซด์ที่นำมาเป็นสารตั้งต้นเพื่อนำมาสังเคราะห์มีลักษณะโครงสร้างแบบอนาเทส ดังแสดงในภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของไททาเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทส



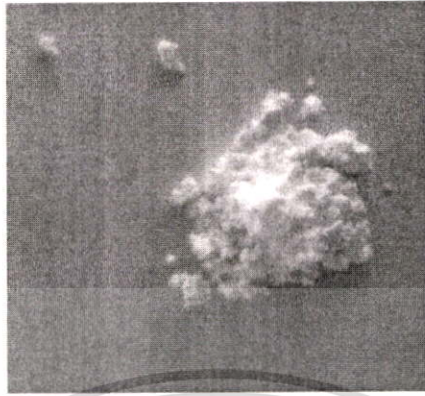
ภาพที่ 4.2 ลักษณะพื้นฐานและพื้นผิวของโททานียมออกไซด์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้น



ภาพที่ 4.3 โครงสร้างผลึกของโททานียมออกไซด์แบบอะนาเทส (XRD pattern: No.21-1272)

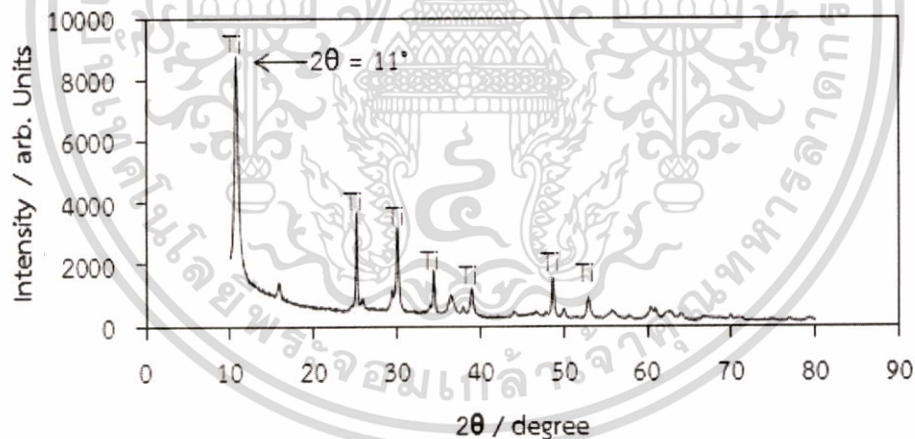
4.1.2 รีบบอนนาโนโททานต์

ในการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลจะได้สารประกอบเปอร์เซ็นต์ค่าการได้ (%yield) อยู่ที่ 83 เปอร์เซ็นต์ โดยมีลักษณะที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างโททานีมไดออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล [1] ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพคือ เป็นของแข็งสีขาวซึ่งมีความละเอียดและมีน้ำหนักเบาทำให้ฟุ้งกระจายง่ายนอกเหนือจากนั้นเมื่อสัมผัสรู้สึกนุ่มมากกว่าโททานีมไดออกไซด์ ดังภาพที่ 4.4

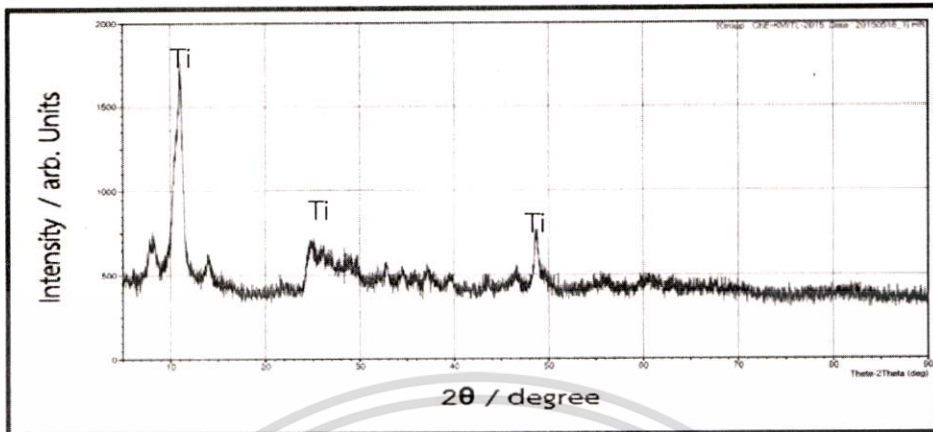


ภาพที่ 4.4 ลักษณะทางกายภาพของริบบอนนาโนไททานเนต

หลังการทำปฏิกิริยาระหว่างไททานเนียมไดออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลแล้ว ได้ทำการสุ่มตัวอย่างมาเพื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (XRD) เมื่อพิจารณาการพิสูจน์โครงสร้างผลึกด้วย XRD ซึ่งแสดงโครงสร้างภายในของริบบอนนาโนไททานเนต พบว่าเฟสที่ได้จากการพิจารณาเมื่อเทียบกับกราฟอ้างอิง ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าตรงกับเฟสของโซเดียมไททานเนต $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ ดังแสดงในภาพที่ 4.5 และหลังจากล้างด้วยกรด HCl พบว่าเฟสที่ได้ คือ ไฮโดรเจนไททานเนต $\text{H}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ ดังแสดงในภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.5 โครงสร้างผลึกของโซเดียมริบบอนนาโนไททานเนต



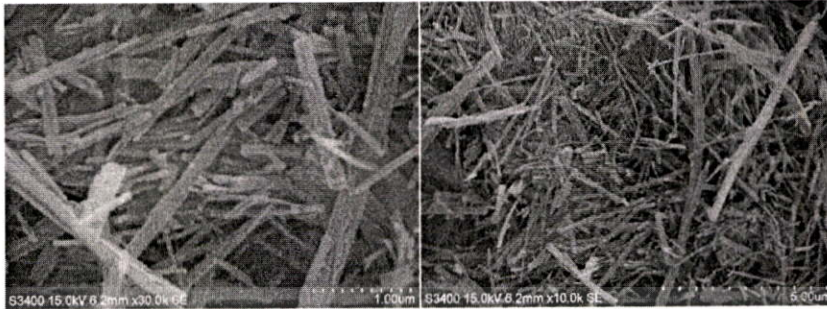
ภาพที่ 4.6 โครงสร้างผลึกของไฮโดรเจนริบบอนนาโนไททาเนต

จากภาพที่ 4.5 พบว่าโครงสร้างของริบบอนนาโนไททาเนต มีพีคที่ 2θ เท่ากับ 11° ที่แสดงถึงโครงสร้างแบบชั้นของริบบอนนาโนไททาเนต ปริมาณสัดส่วนของธาตุภายในด้วยวิธีตรวจวัดพลังงานที่ถูกคายออกมาจากอิเล็กตรอน (EDX) ยืนยันการมีอยู่ของโซเดียม โดยสัดส่วนเชิงปริมาณของโซเดียมต่อไททาเนียมออกไซด์ มีค่าประมาณ 1 : 4 แสดงดังภาพที่ 4.5 และยืนยันการมีอยู่ของไฮโดรเจน แสดงดังภาพที่ 4.6

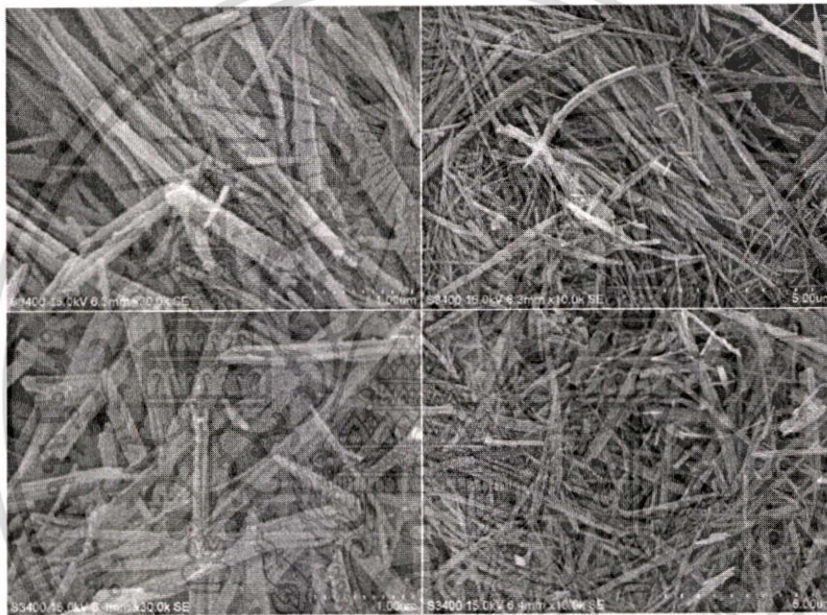
การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานและลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าลักษณะสัณฐานที่ได้มีลักษณะคล้ายริบบิ้น หรือไม้บรรทัด จึงสามารถเรียกได้อีกชื่อว่าริบบอนนาโนไททาเนต สำหรับริบบอนโซเดียมนาโนไททาเนต ดังแสดงในภาพที่ 4.7 และริบบอนไฮโดรเจนนาโนไททาเนต ดังแสดงในภาพที่ 4.8 มีความกว้าง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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.7 สัณฐานและลักษณะพื้นผิวของริบบอนโซเดียมนาโนไททานต



ภาพที่ 4.8 สัณฐานและลักษณะพื้นผิวของริบบอนไฮโดรเจนนาโนไททานต

4.1.3 ท่อนานาโนไททานต

เมื่อนำไททานเนียมไดออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์มาทำปฏิกิริยาด้วยกระบวนการไฮโดร-เทอร์มอลที่สภาวะ อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง [1] ซึ่งต่างจากสภาวะของริบบอนนาโนไททานต ลักษณะทางกายภาพของท่อนานาโนไททานตมีลักษณะเป็นของแข็งละเอียดสีขาวและมีน้ำหนักเบา เมื่อนำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาลักษณะสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ซึ่งมีลักษณะคล้ายท่อจึงเรียกว่าท่อนานาโนไททานต มีความกว้าง และความยาวโดยเฉลี่ยเป็น 0.2 และ 6.469 ไมโครเมตร ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4.9 จากงานวิจัยของ (Kunlanan Kiatkittipong, et al (2011)) [1] ในส่วนของ การวัดพื้นที่ผิว โดยใช้เครื่องวัดการดูดซับก๊าซ (BET) เป็นอุปกรณ์ในการวัด จะพบว่า ท่อนานาโนไททานตมีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ

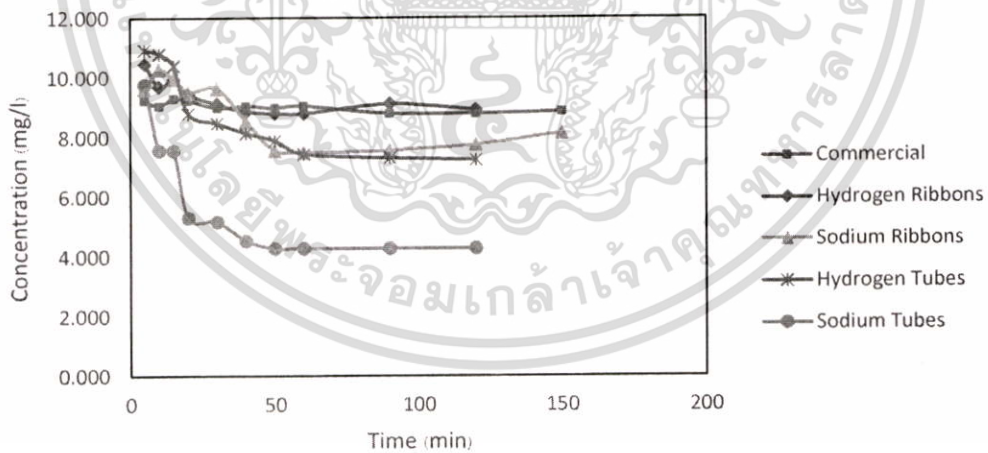
138 ตารางเมตรต่อกรัม [1] อ้างอิงจากการสังเคราะห์ที่สภาวะเดียวกัน โดยใช้เครื่องวัดการดูดซับก๊าซ (BET) เป็นอุปกรณ์ในการวัด



ภาพที่ 4.9 ลักษณะพื้นผิวของท่อนาโนไททานต

4.2 ประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู

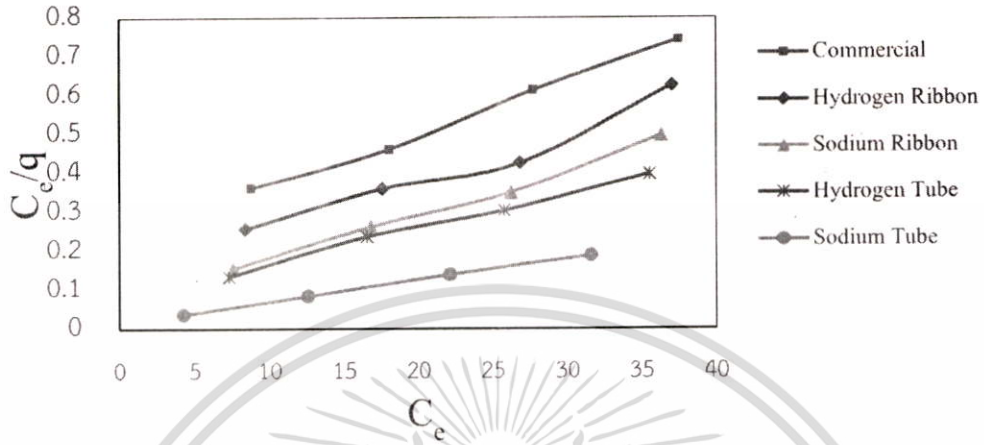
ในการหาประสิทธิภาพของการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู สามารถหาได้จากไอโซเทอมของการดูดซับซึ่งสามารถเปรียบเทียบจากสมการของแลงเมียร์ไอโซเทอม และฟลูนดิชไอโซเทอม โดยนำค่าความเข้มข้นที่จุดสมดุลของการดูดซับมาคำนวณ จากภาพที่ 4.10 จะแสดงค่าความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่ลดลงเทียบกับเวลาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร



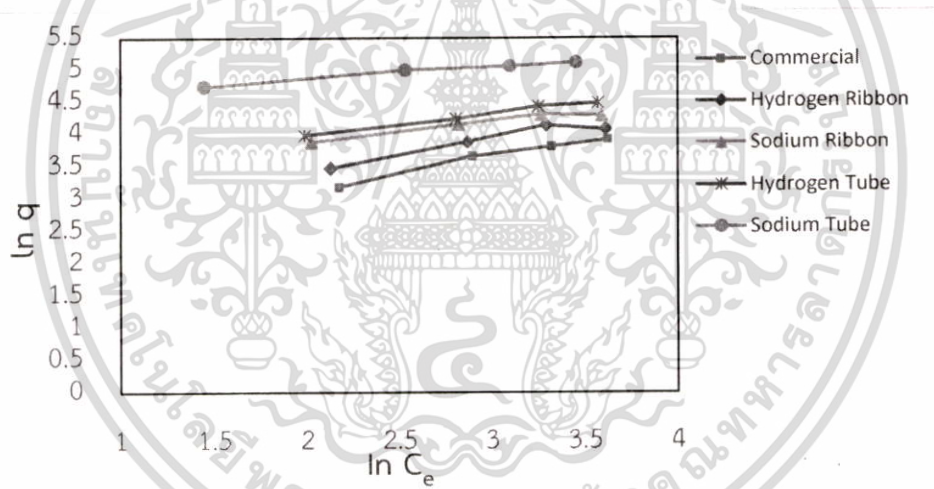
ภาพที่ 4.10 กราฟความเข้มข้นสารละลายเมทิลีนบลูเทียบกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm)



ภาพที่ 4.11 ผลการคำนวณ Langmuir Isotherm



ภาพที่ 4.12 ผลการคำนวณ Freundlich Isotherm

การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ต่างๆ ด้วยสมการของ ไอโซเทอมแลงเมียร์ และไอโซเทอมฟรุนดลิช โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีลักษณะโครงสร้างและสารประกอบที่ต่างกัน ได้แก่ ไททาเนียมไดออกไซด์ ริปบอนไฮโดรเจนนาโนไททานต ริปบอนโซเดียมนาโนไททานต ท่อไฮโดรเจนนาโนไททานต และท่อโซเดียมนาโนไททานต แสดงดังภาพที่ 4.11 และ 4.12 จากกราฟค่าความชันและจุดตัดแกน แสดงน้ำหนักของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวเกือบสมบูรณ์ (q_m) และ ค่าคงที่ การดูดซับของไอโซเทอมแลงเมียร์ b ดังสมการที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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 ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดเทียบแลงเมียร์ไอโซเทอมกับฟรุนดลิชไอโซเทอม

Catalyst	Langmuir Isotherm R^2	Freundlich Isotherm R^2
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 ฟรุนดลิชไอโซเทอม ซึ่งกล่าวได้ว่าสมการ แลงเมียร์ไอโซเทอม เหมาะสมที่จะใช้ในการอธิบายสมดุลการดูดซับสีย้อมมากกว่าสมการ ฟรุนดลิชไอโซเทอมที่สุด โดยสมการแลงเมียร์ไอโซเทอมจะมีข้อสมมติฐานกล่าวว่า เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว และจำนวน โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนแน่นอน

ตารางที่ 4.2 ค่าความจุและค่าคงที่ของการดูดซับจากแลงเมียร์ไอโซเทอม

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดท่อ โซเดียมไททาเนต (Sodium Tubes) มีการดูดซับพื้นผิวเกือบสมบูรณ์ (q_m) มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นๆซึ่งมีค่าเท่ากับ 178.57 มิลลิกรัม/กรัม และค่าคงที่การดูดซับของไอโซเทอร์มแลงเมียร์ (b) มีค่าเท่ากับ 0.388 จึงกล่าวได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดท่อนาโนโซเดียมไททาเนต (Sodium Tube) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการดูดซับสีย้อมดีที่สุด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างแบบท่อนาโนไททาเนตกับริบรินาโนไททาเนต พบว่าโครงสร้างแบบท่อนาโนไททาเนตที่มีพื้นที่ผิวมากกว่าแบบริบรินาโนไททาเนต จะส่งผลให้มีค่าความจุในการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูมากกว่าโครงสร้างแบบริบรินาโนไททาเนต

4.2.2 ค่าไคเนติกของการดูดซับ (Kinetic Adsorption)

ในการศึกษาหาเวลาในการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ โดยศึกษาผลกระทบที่เกี่ยวเนื่องกับเวลาในการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู 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

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

และ สมการ pseudo second order จะมีรูปแบบสมการเชิงเส้นดังสมการ 4.2

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

โดย Q_c คือ จำนวนที่ดูดซับเมทิลีนบลูที่จุดสมดุล (mg/g)

Q_t คือ จำนวนที่ดูดซับเมทิลีนบลูที่เวลาใดๆ (mg/g)

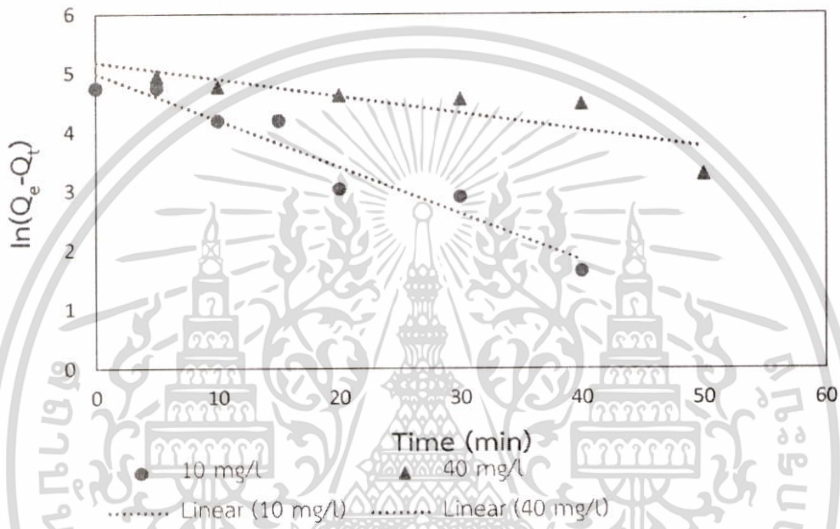
k_1 คือ ค่าคงที่ของอัตรา pseudo first order (1/min)

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

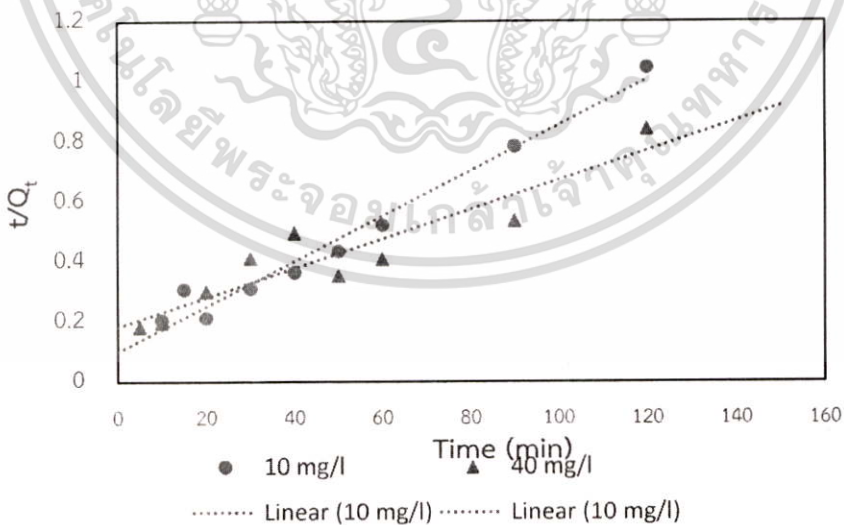
จากกราฟภาพที่ 4.12 และ 4.13 แสดงกราฟเชิงเส้นของรูปแบบจำลองของ 2 แบบจำลอง pseudo first order และ pseudo second order สามารถหาค่าไคเนติก (k_1, k_2) และจำนวนการดูดซับ (Q_{e1}, Q_{e2}) โดยสามารถเปรียบเทียบรูปแบบจำลองได้โดยค่าสัมประสิทธิ์การทำนายเชิงเส้น (R^2) 0.938 และ 0.763 ของแบบจำลอง pseudo first order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

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การทำนายเชิงเส้น (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_c) ของแบบจำลอง pseudo first order อยู่ที่ 146.9 และ 121.5 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 และ 40 mg/l ตามลำดับ ส่วนใน

แบบจำลอง pseudo second order จะมีค่าที่ 133.33 และ 200 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อนำค่าของทั้ง 2 แบบจำลองมาเทียบกันจะพบว่า ค่าความจุในการดูดซับของ pseudo second order จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าความจุของการดูดซับ (Q_e) ของการทดลองมากที่สุด จึงสรุปว่าการดูดซับนี้เป็นการดูดซับในรูปแบบของ pseudo second order ซึ่งพบว่า การดูดซับที่แบบจำลองนี้ จะมีค่าการดูดซับที่คงที่ช่วงหนึ่ง เมื่อเวลาผ่านไปค่าการดูดซับจะเริ่มปรับตัวเปลี่ยนไปจากแนวโน้ม ซึ่งอาจเกิดจากการคายซับของตัวดูดซับส่วนหนึ่ง โดยจะมีค่าคงที่ของอัตรา (k_2) เท่ากับ 0.075 และ 0.028 g/(mg•min)



ภาพที่ 4.13 กราฟเชิงเส้นหาความสัมพันธ์ pseudo first order



ภาพที่ 4.14 กราฟเชิงเส้นหาความสัมพันธ์ pseudo second order

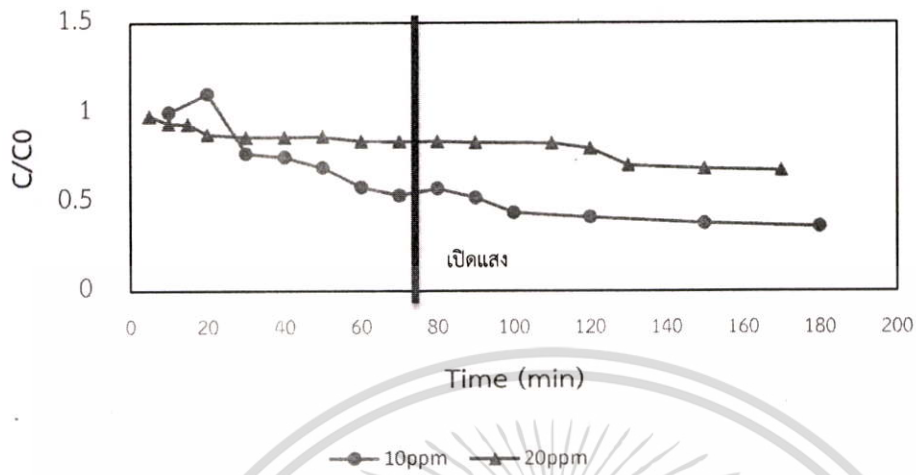
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณการหาแบบจำลองและค่าไคเนติกการดูดซับ

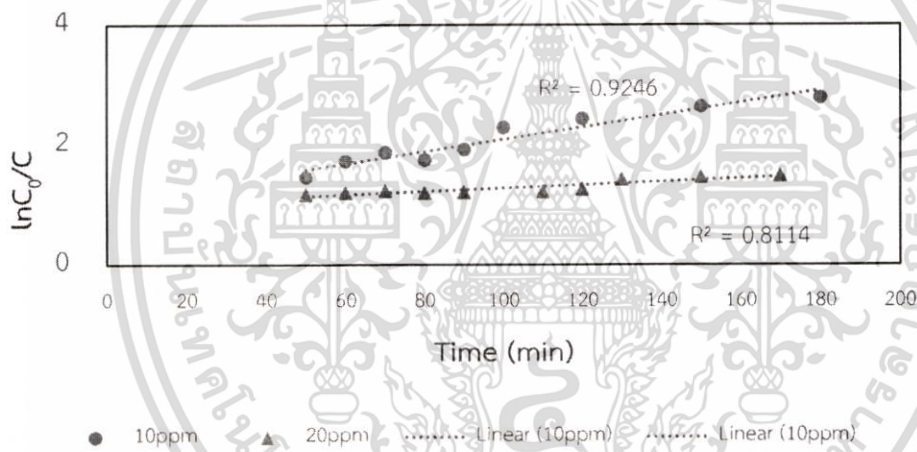
ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	Q_e, exp (mg/g)	pseudo-first-order			pseudo-second-order		
		k_1 (min^{-1})	$Q_{e1, \text{cal}}$ (mg/g)	R^2	k_2 (g/(mg min))	$Q_{e2, \text{cal}}$ (mg/g)	R^2
10	114.843	0.079	146.907	0.938	0.075	133.333	0.973
40	167.914	0.029	121.510	0.720	0.028	200.000	0.858

4.3 การย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลู

จากการทดลองการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูพบว่าโครงสร้างแบบท่อนานโน มีประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูมากกว่าโครงสร้างแบบริบบอนนาโน และสารประกอบแบบไฮโดรเจนไททานเด มีค่าการดูดซับมากกว่าแบบไฮโดรเจนไททานเด จึงได้นำท่อไฮเดรอนาโนไททานเดมาทำการทดลองและที่ความเข้มข้นสารละลายเมทิลีนบลูที่ 10 และ 20 mg/l ซึ่งมีค่าการทดลองที่แม่นยำกว่าค่าความเข้มข้นอื่น จึงได้นำมาทำการทดลองการย่อยสลายเมทิลีนบลูโดยใช้แสงเป็นตัวกระตุ้น โดยจากการทดลองการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูจะได้ค่าความเข้มข้นคงที่ (C_e) ของแต่ละความเข้มข้นจะมีค่าความเข้มข้นคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 60 นาทีหลังเริ่มทดลอง ดังนั้นในส่วนของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูโดยใช้แสงกระตุ้น หรือ กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก จะทำการเปิดแสงจากหลอดเมอร์คิวรี 500 วัตต์ ซึ่งเป็นแสงที่มองเห็นได้มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 360-800 นาโนเมตร หลังจากเวลาผ่านไป 60 นาทีและนำค่ามาพล็อตกราฟระหว่างค่าความเข้มข้นต่อความเข้มข้นเริ่มต้นกับ ซึ่งจะมีค่าความเข้มข้นลดลงเพิ่มขึ้นจากเดิมจนคงที่เมื่อผ่านไป 3 ชั่วโมงดังภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.15 การย่อยสลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 และ 20 mg/l



ภาพที่ 4.16 กราฟเชิงเส้นของอัตราการย่อยสลายเมทิลีนบลูภายใต้แสงที่มองเห็น

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

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

จากสมการข้างต้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมีค่าน้อยกว่า 10^{-3} มิลลิกรัมต่อลิตร จะสามารถแปลงสมการได้เป็นสมการที่ 4.4

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

โดยค่า C คือ ค่าความเข้มข้นสารละลายเมทิลีนบลูที่เวลาใดๆ (mg/l)

C_0 คือ ค่าความเข้มข้นสารละลายเมทิลีนบลูเริ่มต้น (mg/l)

k_r คือ ค่าคงที่อัตราการปฏิริยา

K_c คือ ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับบนโฟโตแคตตาไลซิส

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

จากกราฟภาพที่ 4.16 เป็นการหาค่าคงที่อัตราโดยรวมของสารละลายเมทิลีนบลูในการย่อยสลายเมทิลีนบลูจะมีรูปแบบของ pseudo first order ตามความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 10 และ 20 mg/l ด้วยท่อโซเดียมนาโนไททาเนตจะพบว่ามีค่าคงที่อัตราการย่อยสลาย (k') อยู่ที่ 0.0102 และ 0.0028 ต่อนาที ตามลำดับ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักเชิงเส้น (R^2) ที่ 0.9246 และ 0.8114



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองในการสังเคราะห์สารประกอบนาโนไททานเนตด้วยไททานเนียมไดออกไซด์กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ภายใต้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เวลา 72 ชั่วโมง ได้ท่อนาโนไททานเนต ขนาดความกว้าง 0.2 ไมโครเมตร ความยาว 6.4 ไมโครเมตร มีลักษณะพื้นที่ผิว 138 ตารางเมตรต่อกรัม และที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง ได้รีบบอนนาโนไททานเนต ขนาดความกว้าง 0.2 ไมโครเมตร ความยาว 2.5 ไมโครเมตร มีลักษณะพื้นที่ผิว 32 ตารางเมตรต่อกรัม และมีการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเพื่อให้ได้โครงสร้างไฮโดรเจนนาโนไททานเนต

ในการทดลองการดูดซับเมทิลีนบลูเพื่อเปรียบเทียบด้วยแรงปฏิกิริยาทั้งหมด 5 ชนิด คือ ท่อนาโนโซเดียมไททานเนต ท่อนาโนไฮโดรเจนไททานเนต รีบบอนนาโนโซเดียมไททานเนต รีบบอนไฮโดรเจนนาโนไททานเนตและไททานเนียมไดออกไซด์ ซึ่งจะเปรียบเทียบจากไอโซเทอมของการดูดซับเพื่อหาประสิทธิภาพของการดูดซับ จากการเปรียบเทียบการคำนวณจะพบว่า สารประกอบนาโนไททานเนตจะมีไอโซเทอมในรูปแบบของ แลงเมียร์ไอโซเทอม และจากด้วยแรงปฏิกิริยาทั้ง 5 ชนิดนั้น จะพบว่าท่อโซเดียมนาโนไททานเนต สามารถดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูได้มากที่สุด จากการคำนวณสมการแลงเมียร์ไอโซเทอม โดยมีค่าการดูดซับมากที่สุดอยู่ที่ 178.57 มิลลิกรัม/กรัม ดังนั้นแล้ว ท่อโซเดียมนาโนไททานเนตจึงเป็นด้วยแรงปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู โดยพบว่าพื้นที่ผิวที่มากจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากขึ้น และได้นำมาหาค่าคงที่อัตราการดูดซับพบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงในรูปแบบจำลองของ pseudo second order โดยมีค่าคงที่อัตราการดูดซับอยู่ที่ 0.075 และ 0.028 ต่อ มิลลิวินาที ที่สารละลายเริ่มต้นเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร การกำจัดสารละลายเมทิลีนบลูโดยเลือกด้วยแรงปฏิกิริยาท่อโซเดียมนาโนไททานเนตจากการที่มีค่าการดูดซับมากที่สุด 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. ควรเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของสารประกอบนาโนไททานเนตตัวอื่นในการกำจัดสารละลายเมทิลีนบลู
3. ควรศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับและกำจัดสารละลายเมทิลีนบลูนอกจากสารประกอบและโครงสร้าง เช่น อุณหภูมิ กระบวนการสังเคราะห์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ “Kiatkittipong, K., Assabumrungrat, S., (2017) A Comparative Study of Sodium/Hydrogen Titanate Nanotubes/Nanoribbons on Destruction of Recalcitrant Compounds and Sedimentation, Journal of Cleaner Production, 148, 905-914.” (Impact factor: 5.715)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง

- [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 และชุตินันท์ ศรีสุทธิกมล. **“กระบวนการ Photocatalytic.”** 2548.
- [4] กาญจนา ลือพาว์ และนงนุช ศศิธร. **“การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมด้วยเทคนิคโฟโตแคตตาไลติก ร่วมกับกระบวนการดูดซับ.”** มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น. 2553
- [5] กัญญาพร ไชยวงศ์ และคณะ. **“การใช้กระบวนการ แสงอาทิตย์ – โฟโตแคตตาไลติก สำหรับปฏิกิริยาแบบขั้นบันได ในการบำบัดสารเมทิลีนบลูในน้ำเสีย.”** มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน.
- [6] สยามเคมี. **“ไททาเนียมไดออกไซด์/ TiO₂.”** [Online] Available: <http://www.siamchemi.com> (13/11/2557)
- [7] สรรค์ จิตรไคร์ครวญ. **“การทำความสะอาดโดยตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงด้วยไททาเนียมไดออกไซด์.”** วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ.
- [8] กมลมาศ จิววิสาย และกรรณิภา จันทร์ทรายมูล. **“การใช้วัสดุนาโนขั้นสูงเพื่อใช้งานในด้านสิ่งแวดล้อม.”** วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2256.
- [9] ชลดา ชีรการณวงศ์. **“วัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์: การวิเคราะห์โครงสร้าง และการประยุกต์ใช้.”** วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. 1 มกราคม – มีนาคม 2555.
- [10] ดร.นัสดา เวชชากุล. **“การกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำด้วยตัวเร่ง ปฏิกิริยานาโนไททาเนียมไดออกไซด์.”** ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2012.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [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_2/O_2 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.Vithaln,S.RamaKrishna,G.Ravi,SureshPalla,RadhaVelchuri,SomeshwarPola (2013). “Synthesis of Cu^{2+} and Ag^+ doped $Na_2Ti_3O_7$ by afacileion-exchange method as visible-light-driven photocatalysts.” *Ceramics International*. 39: 8429-8439.
- [16] ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์เพื่อมาตรฐานและอุตสาหกรรม. “การวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการเอกสารเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.” [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-eletron-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. “TiO2 Photocatalyst”. [Online] Available: <http://www.tradekorea.com/product/detail/P291864/TiO2-Photocatalyst.html>

แบบรายงานการใช้จ่ายเงินโครงการวิจัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รายงานความก้าวหน้า ครั้งที่ 3 รอบ 12 เดือน ประจำปีงบประมาณ 2560

 แหล่งงบประมาณแผ่นดิน (แบบปกติ) แหล่งเงินรายได้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงและประสิทธิภาพของการดูดซับสารอินทรีย์ที่ทนต่อการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยท่อและริบบอนนาโนไททานेट

(ภาษาอังกฤษ) Photocatalytic Activity and Adsorption of Bio-recalcitrant Organic Compound with Titanate Nanoribbons/Nanotubes

ชื่อ-สกุลหัวหน้าโครงการวิจัย/ผู้รับทุน/ผู้วิจัย ผศ.ดร.กฤษณ์นันทน์ เกียรติกิตติพงษ์

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 1/ตุลาคม/2559 ถึงวันที่ 30/กันยายน/2560

ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี - เดือน ตั้งแต่วันที่ 1/ตุลาคม/2559 ถึงวันที่ 30/กันยายน/2560

ข้อมูลการรายงานค่าใช้จ่ายงบประมาณโครงการวิจัย

1. การเบิกจ่ายงบประมาณ (กรณีการจ่ายเงินถ้าจ่ายงวดเดียวให้ลบข้อที่ไม่เกี่ยวข้องออก)

งวดที่ 1 340,000 บาท 85 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ด/ว) 31/03/60

งวดที่ 2 บาท % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ด/ว)

2. สรุปงบประมาณค่าใช้จ่ายที่ขึ้นบัญชีตั้งแต่เริ่มทำการวิจัยถึงปัจจุบัน (จำแนกตามหมวดค่าใช้จ่าย)

หมวดค่าใช้จ่าย	งบประมาณรวมทั้งโครงการ	ค่าใช้จ่าย (บาท)	คงเหลือ (หรือเกิน)
งบบุคลากร : ค่าจ้างชั่วคราว	-	-	-
งบดำเนินงาน			
ค่าตอบแทน	-	-	-
ค่าใช้สอย	140,000	140,000	0
ค่าวัสดุ	260,000	260,000	0
ค่าสาธารณูปโภค			
งบลงทุน: ค่าครุภัณฑ์			
รวม	400,000	400,000	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล ผศ.ดร.กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์

ตำแหน่งปัจจุบัน

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
Ph.D. (Chem. Eng.)	Chemical Engineering	The University of New South Wales	2012
B.Sc. (Chem. Eng.)	Chemical Engineering	Chulalongkorn University	2008

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา).....

การใช้โครงสร้างนาโนไททานเตแบบหนึ่งมิติ (1D titanate) ที่เตรียมได้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมไททานเนียมไดออกไซด์/ไททานเต โครงสร้าง 2 หรือ 3 มิติ (2D, 3D structures) เพื่อได้ลักษณะโครงสร้างที่เลือกจำเพาะ (Shape selective) สำหรับการดูดซับ หรือการเร่งปฏิกิริยา หรือเพื่อปรับปรุง เปลี่ยนแปลง คุณสมบัติ เช่น เฟสของผลึก (crystalline phase) ด้านมุมของผลึก (exposed facets) เพื่อให้การใช้งานโครงสร้างนาโนไททานเตเกิดประสิทธิภาพ และความหลากหลายในการประยุกต์ใช้งานมากขึ้น.....

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2557	ทุนวิจัย	ทุนส่งเสริมนักวิจัยรุ่นใหม่ (สกว.)
2558	ทุนวิจัย	ทุนโครงการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.
2559	ทุนวิจัย	ทุนส่งเสริมนักวิจัยรุ่นใหม่ สจล.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

Publications

1. Payormhorm, J., Chuangchote, S., **Kiatkittipong, K.**, Chiarakorn, S., Laosiripojana, N., (2017) Xylitol and gluconic acid productions via photocatalytic-glucose conversion using TiO₂ fabricated by surfactant-assisted techniques: Effects of structural and textural properties, *Materials Chemistry and Physics*, 196 29-36.
2. **Kiatkittipong, K.**, Assabumrungrat, S., (2017) A Comparative Study of Sodium/Hydrogen Titanate Nanotubes/Nanoribbons on Destruction of Recalcitrant Compounds and Sedimentation, *Journal of Cleaner Production*, 148, 905-914.
3. Phimsen, S., Yamada, H., Tagawa, T., Kiatkittipong, W., **Kiatkittipong, K.**, Laosiripojana, N., Assabumrungrat, S., (2017) Epoxidation of methyl oleate in a TiO₂ coated-wall capillary microreactor, *Chemical Engineering Journal*, 314, 594-599.
4. Phimsen, S., Kiatkittipong, W., Yamada, H., Tagawa, T., **Kiatkittipong, K.**, Laosiripojana, N., Assabumrungrat, S., (2016) Oil extracted from spent coffee grounds for bio-hydrotreated diesel production, *Energy Conversion and Management*, 126, 1028-1036.
5. Pairojpiriyakul, T., Croiset, E., Kiatkittipong, W., **Kiatkittipong, K.**, Arpornwichanop, A., Assabumrungrat, S., (2014) Catalytic reforming of glycerol in supercritical water with nickel-based catalysts, *International Journal of Hydrogen Energy* 39 (27), 14739-14750.
6. Eiamsa-ard, S., **Kiatkittipong, K.**, (2014) Heat transfer enhancement by multiple twisted tape inserts and TiO₂/water nanofluid, *Applied Thermal Engineering* 70, 896-924
7. Pairojpiriyakul, T., Croiset, E., **Kiatkittipong, K.**, Kiatkittipong, W., Arpornwichanop, A., Assabumrungrat, S. (2014) Catalytic reforming of glycerol in supercritical water with nickel-based catalyst, *International Journal of Hydrogen Energy* 39 (27), 14739-14750.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. Kiatkittipong, W., Phimsen, S., Kiatkittipong, K., Wongsakulphasatch, S., Laosiripojana, N., Assabumrungrat, S. (2013) Diesel-like hydrocarbons production from hydroprocessing of relevant refining palm oil, *Fuel Processing Technology* 116, 16-26 (impact factor 2013 = 3.019)
9. Pairojpiriyakul, T., Croiset, E., Kiatkittipong, W., Kiatkittipong, K., Arpornwichanop, A., Assabumrungrat, S. (2013) Hydrogen production from catalytic supercritical water reforming of glycerol with cobalt based catalysts, *International Journal of Hydrogen Energy* 38 (11), 4368-4379. (impact factor 2013 = 2.930)
10. Kiatkittipong, K., Iwase, A., Scott, J., Amal, R. (2013) Photocatalysis of heat treated sodium- and hydrogen-titanate nanoribbons for water splitting, H_2/O_2 generation and oxalic acid oxidation, *Chemical Engineering Science*, 33, 341-349 (impact factor 2013 = 2.613)
11. Kiatkittipong, K., Scott, J., Amal, R. (2011) Hydrothermally synthesised titanate nanostructures: Impact of heat treatment on particle characteristics and photocatalytic properties, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 3, 3988-3996. (impact factor 2013 = 5.900)
12. Kiatkittipong, K., Ye, C., Scott, J., Amal, R. (2010) Understanding hydrothermal titanate nanoribbon formation, *Crystal Growth & Design*, 10, 3618-3625. (impact factor 2013 = 4.558)
13. Kiatkittipong, K., Ye, C., Scott, J., Amal, R. (2010) Investigation preparation parameters during titanium oxide nanoribbon synthesis, *IEEE Explore on Nanoscience and Nanotechnology*, 6045196, 105-107.
14. Wang, Y., Chan S.L., Amal, R., Shen, Y.R., Kiatkittipong, K. (2010). XRD Anisotropic Broadening of Nano-Particles, *Powder Diffraction* 25, 217. (impact factor 2013 = 0.544)

National Publications

1. กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์, การผลิตไฮโดรเจนโดยใช้รีบบอนนาโนไททานेटโครงสร้างแบบชั้นที่แลกเปลี่ยนด้วยทิน (II) ไอออน ภายใต้แสงวิสิเบิล, วารสารวิศวกรรมศาสตร์ 2, 1-12., 2556
2. กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์, การสังเคราะห์โครงสร้างระดับนาโนเมตรไททานेटด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มัล, วารสารสมาคมวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย 3, 64-69, 2556.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Refereed International Conference Proceedings

1. Ouraipryvan, P., Joosing, N., Kiatkittipong K., (2014) Effect of copper dopant on photocatalytic activity of titanate nanoribbon, The 4th TIChE International Conference 2014 (18-19 December 2014)
2. **Kiatkittipong, K.**, Assabumrungrat, S. (2014) Understanding phase transformation of titanate nanoribbons by heat treatment, Proceedings, 23rd International Symposium on Chemical Reaction Engineering (ISCRE 23) and 7th Asia-Pacific Chemical Reaction Engineering Symposium (APCRE 7) (7 – 10 September 2014, Bangkok, Thailand)
3. Teerachaiyapat, T., **Kiatkittipong, K.**, Kiatkittipong, W., Assabumrungrat, S. (2014) Ti-O nanoribbon photocatalyst: the ion exchange process of co^{2+} intercalated in layered nanoribbons, Proceedings, 23rd International Symposium on Chemical Reaction Engineering (ISCRE 23) and 7th Asia-Pacific Chemical Reaction Engineering Symposium (APCRE 7) (7–10 September 2014, Bangkok, Thailand)
4. Phimsen, S., Kiatkittipong, W., **Kiatkittipong, K.**, Yamada, H., Tagawa, T., Laosiripojana, N., Assabumrungrat, S. (2014) Oil extracted from spent coffee grounds for bio-hydrogenated diesel production, Proceedings, 23rd International Symposium on Chemical Reaction Engineering (ISCRE 23) and 7th Asia-Pacific Chemical Reaction Engineering Symposium (APCRE 7) (7 – 10 September 2014, Bangkok, Thailand)
5. Pongsiriyakul, K., Kiatkittipong, W., **Kiatkittipong, K.**, Wongsakulphasatch, S., Laosiripojana, N., Assabumrungrat, S. (2014) Hydrotreated vegetable oil production under synthesis gas, Proceedings, 23rd International Symposium on Chemical Reaction Engineering (ISCRE 23) and 7th Asia-Pacific Chemical Reaction Engineering Symposium (APCRE 7) (7 – 10 September 2014, Bangkok, Thailand)
6. **Kiatkittipong, K.**, Pongsiriyakul, K., Phimsen, S., Kiatkittipong, W., Wongsakulphasatch, S., Laosiripojana, N., Assabumrungrat, S. (2013) Hydrotreated biodiesel production from palm fatty acid distillate, Proceedings, The 5th Regional Conference on Chemical Engineering (7-8 February 2013, Pattaya, Thailand)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. **Kiatkittipong, K.,** Scott, J., Amal, R., The impact of calcination on titanate nanostructure characteristics and their ensuing photocatalytic properties, Proceedings, The 16th International Conference on TiO₂ Photocatalysis Fundamentals and Applications (7-10 November 2011, San Diego, USA)
8. **Kiatkittipong, K.,** Scott, J., Amal, R., Titanate nanostructure phase transformation and its influence on photocatalytic activity, Proceedings, Chemeca Conference (18-21 September 2011, Sydney, Australia)
9. **Kiatkittipong, K.,** Scott, J., Amal, R., The structural transformation of hydrothermally synthesized titanate nanoribbons and nanotubes and photocatalytic activity, Proceedings, 22nd North American Catalysis Society Meeting (5-10 June 2011, Detroit, USA)
10. **Kiatkittipong, K.,** Scott, J., Amal, R., An investigation of titanate nanostructure and photodegradation, Proceedings, The 7th Annual Conference of the ARC centre of Excellence for Functional Nanomaterials (25-26 November 2010, Gold Coast, Australia)
11. **Kiatkittipong, K.,** Scott, J., Amal, R., The effect of calcination temperature on titanate nanoribbon structure and its photocatalytic activity, Proceedings, Chemeca Conference (26-29 September 2010, Adelaide, Australia)
12. **Kiatkittipong, K.,** Ye, C., Scott, J., Amal, R., Synthesis condition and post treatment effect on titanate nanoribbons, Proceedings, The 6th Annual Conference of the ARC centre of Excellence for Functional Nanomaterials (9-11 November 2009, Coffs Harbour, Australia)