

การประยุกต์ใช้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเพื่อลดสารประกอบอินทรีย์
ในน้ำและพื้นผิวของซีเมนต์เพสต์

THE APPLICATIONS OF PHOTO CATALYSIS FOR REDUCING ORGANIC
COMPOUNDS IN WATER AND CEMENT PASTE SURFACES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-220-106

การประยุกต์ใช้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเพื่อลดสารประกอบอินทรีย์
ในน้ำและพื้นผิวของซีเมนต์เพสต์

THE APPLICATIONS OF PHOTO CATALYSIS FOR REDUCING ORGANIC
COMPOUNDS IN WATER AND CEMENT PASTE SURFACES



นุชจรินทร์ จูสิงห์
NUTJARIN JOOSING

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-220-106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE APPLICATIONS OF PHOTO CATALYSIS FOR REDUCING ORGANIC
COMPOUNDS IN WATER AND CEMENT PASTE SURFACES



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018
KMITL-2018-EN-M-220-106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประยุกต์ใช้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเพื่อลดสารประกอบอินทรีย์ในน้ำและพื้นผิวของซีเมนต์เพสต์

Thesis Title The Applications of Photo Catalysis for Reducing Organic Compounds in Water and Cement Paste Surfaces

นักศึกษา นางสาวนุชจรินทร์ จูสิงห์

รหัสประจำตัว 57601347

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-M-220-106

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ศ.ดร.นวดล	เหล่าศิริพจน์	
ดร.นริศรา	ทองบุญชู	
ผศ.ดร.ธนาวรรณ	พิณรัตน์	
ดร.ณัฐนันท์	ไพบุลย์ศิลป์	
ผศ.ดร.กุลนันท์	เกียรติกิตติพงษ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 18 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง HM-302 อาคารเฉลิมพระเกียรติ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ฉบับดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 18 กรกฎาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเพื่อลดสารประกอบอินทรีย์ในน้ำและพื้นผิวของซีเมนต์เพสต์
นักศึกษา	นางสาวนุชจรินทร์ จุสิงห์
รหัสประจำตัว	57601347
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากในน้ำ พร้อมทั้งประยุกต์ใช้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเพื่อเพิ่มความสามารถในการทำ ความสะอาดตัวเองแก่พื้นผิวซีเมนต์เพสต์ ในส่วนของการประยุกต์ใช้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง กำจัดสารอินทรีย์ในน้ำ ทั้งนี้เพื่อศึกษาผลของไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และ ธิบอบอนนาโนไททาเนต ($\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$) ต่อกระบวนการย่อยสลายเชิงแสงของฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) และเมทิลีนบลู (Methylene blue) โดยธิบอบอนนาโนไททาเนตสามารถเตรียมได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ใน อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งมีไททาเนียมไดออกไซด์ แบบอะนาเทสเป็นสารตั้ง ต้น และภายหลังการสังเคราะห์ได้ธิบอบอนนาโนไททาเนตที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 18 ตารางเมตรต่อกรัม จาก ไททาเนียมไดออกไซด์ แบบอะนาเทสที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 10 ตารางเมตรต่อกรัม โดยธิบอบอนนาโนไททา เนตที่มีพื้นที่ผิวสูงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายเมทิลีนบลูสูงขึ้น ในขณะที่พื้นที่ผิวที่สูงขึ้นไม่ ส่งผลต่อการย่อยสลายฟอร์มัลดีไฮด์ เนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์ที่ค่าช่องว่างของแถบพลังงานต่ำกว่า สามารถย่อยสลายฟอร์มัลดีไฮด์ได้ดีกว่า และในส่วนของ การเพิ่มความสามารถในการทำ ความสะอาด ตัวเองพื้นผิวซีเมนต์เพสต์ ด้วยการย่อยสลายเมทิลีนบลูบนพื้นผิว ซึ่งซีเมนต์เพสต์ที่นำมาศึกษาเตรียมได้ จากการนำปูนซีเมนต์ขาวผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ และไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่าน การแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 100 200 400 และ 800 องศาเซลเซียส (CT100 CT200 CT400 และ CT800) ตามลำดับในปริมาณการผสมที่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์ขาว จากนั้น ปรับเปลี่ยนปริมาณของ CT200 ในการผสมรวมกับซีเมนต์ขาวที่ 0.5 1 1.5 และ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์ขาว โดยพบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ได้จากการผสมปูนซีเมนต์ขาวกับตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายเมทิลีนบลูบนผิวของซีเมนต์เพสต์ได้ ซึ่งพบว่า CT200 ที่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์ขาว ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเมทิลีนบลูที่ดีที่สุด และ การผสมซีเมนต์เพสต์กับตัวเร่งปฏิกิริยายังส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	THE APPLICATIONS OF PHOTO CATALYSIS FOR REDUCING ORGANIC COMPOUNDS IN WATER AND CEMENT PASTE SURFACES
Student	Miss.Nutjarin Joosing
Student ID.	57601347
Degree	Master of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr.Kulanun Kiatkittipong

ABSTRACT

This research presented the applications of photo catalysis for organic compound reducing in liquid phase and improving self - cleaning properties of cement plates for reduce methylene blue on cement plates surfaces. The part of organic compound reducing in liquid phase aim to study the effect of titania anatase (TiO_2) and sodium titanate nanoribbons ($\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$) on photodegradation of formaldehyde and methylene blue. Sodium titanate nanoribbons were synthesized by using titania anatase as a starting material under alkaline hydrothermal method at 150 °C for 24 h. Titania and titanate nanoribbons have a specific surface area of 10 and 18 m^2/g , respectively. The comparatively higher surface area of titanate nanoribbons outperformed commercial titania for methylene blue degradation, However, a high surface area of titanate nanoribbons was not pronounced for formaldehyde decomposition. The photodegradation of formaldehyde may be governed by a narrower band gap energy of titania which can be absorb more photons. The part of improving self - cleaning properties of cement plates aim to study photocatalytic activity for removal methylene blue on cement plates surfaces. The cement plates were preparing by white cement samples mixed with 1%wt of different semi-conductor (titania anatase, CT100, CT200, CT400 and CT800) and then vary amount of CT200 (0.5%wt, 1%wt, 1.5%wt and 2%wt) were used as a model reaction to find appropriate condition for the photo catalytic degradation of methylene blue on cement plates surfaces. The results of photo degradation of methylene blue were measured by colorimeter (colorimeter CR400). In this work, it was found that cement plates mixed with 1%wt of CT200 was high photo catalytic activity in the degradation of methylene blue. The cement plates mixtures were higher compressive strength than pure cement plates.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ พร้อมทั้งให้คำชี้แนะ และช่วยแก้ปัญหาในงานวิจัย ตลอดจนให้ความรู้สร้างความเข้าใจแก่ข้าพเจ้า จนงานวิจัยสำเร็จได้

ขอขอบพระคุณ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะชี้จุดที่ต้องปรับปรุงแก้ไข จนงานวิจัยสำเร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และคุณสมบัติ ที่เอื้อเพื่อสถานที่ อุปกรณ์ รวมไปถึงคำแนะนำในส่วนของการผสมปูนซีเมนต์แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณคณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องวัดสี CR400

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

นุชจรินทร์ จุสิงห์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก.....	5
2.2 สารประกอบไททาเนียม – ออกไซด์.....	9
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก.....	10
2.4 การเตรียมโครงสร้างระดับนาโนของไททาเนียม – ออกไซด์.....	12
2.5 การเคลือบ.....	13
2.6 โซเลน.....	13
2.7 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับซีเมนต์.....	14
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
บทที่ 3 ผลของไททาเนียมไดออกไซด์และ ริปบอนนาโนไททาเนตต่อการย่อยสลาย สารอินทรีย์ในน้ำ.....	20
3.1 ความเป็นมาของการศึกษาการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำด้วยไททาเนียม ได-ออกไซด์ และริปบอนนาโนไททาเนต.....	20
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	21
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	21
3.4 การสังเคราะห์ริปบอนนาโนไททาเนตด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล.....	22
3.5 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมี.....	23
3.6 การย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก.....	23
3.7 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของสารตั้งต้น (ไททาเนียมไดออกไซด์ แบบอะนาเทส).....	24
3.8 ผลการสังเคราะห์ริปบอนนาโนไททาเนต.....	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.9 ผลของโททานิยมไดออกไซด์ และริบบอนนาโนโททานेत ต่อการย่อยสลายพอร์มาลดีไฮด์ และเมทิลีนบลู.....	30
บทที่ 4 ผลของโททานิยมไดออกไซด์ และโททานิยมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์บนพื้นผิวของซีเมนต์เพสต์.....	34
4.1 ความเป็นมาของการศึกษาผลของโททานิยมไดออกไซด์ และโททานิยมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ ต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์บนพื้นผิวของซีเมนต์เพสต์.....	34
4.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	35
4.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	36
4.4 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโททานิยมไดออกไซด์ด้วยวิธีการแคลไซน์.....	37
4.5 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมี.....	37
4.6 การเตรียมซีเมนต์เพสต์.....	37
4.7 การวัดสมบัติกำลังอัด (Strength) ของซีเมนต์เพสต์.....	38
4.8 การศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของซีเมนต์เพสต์ในการกำจัดเมทิลีนบลูบนพื้นผิว.....	38
4.9 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของโททานิยมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์.....	39
4.10 ผลของสมบัติกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์.....	41
4.11 ผลของการย่อยสลายเมทิลีนบลูบนพื้นผิวของซีเมนต์เพสต์.....	44
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	51
5.1 สรุปผลของโททานิยมไดออกไซด์ และริบบอนนาโนโททานेत ต่อการย่อยสลายพอร์มาลดีไฮด์ และเมทิลีนบลู.....	55
5.2 สรุปผลของโททานิยมไดออกไซด์ และโททานิยมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ ต่อการกำจัดสารอินทรีย์บนพื้นผิวของซีเมนต์เพสต์.....	56
บทที่ 6 ข้อเสนอแนะ และงานในอนาคต.....	58
6.1 ข้อเสนอแนะ.....	58
6.2 งานในอนาคต.....	58
เอกสารอ้างอิง.....	59
ภาคผนวก.....	63
ภาคผนวก ก การย่อยสลายของสารอินทรีย์ในน้ำ โดยโททานิยมไดออกไซด์ และ โททานेतนาโนริบบอน.....	64
ภาคผนวก ข การกำจัดสารอินทรีย์บนพื้นผิวของซีเมนต์เพสต์ ด้วยโททานิยมไดออกไซด์ และโททานิยมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์.....	68
ประวัติผู้เขียน.....	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	ตัวอย่างสภาวะการสังเคราะห์ไททานิตของสารประกอบไททานีียมไดออกไซด์.....	13
ตารางที่ 3.1	ผลการวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง.....	29
ตารางที่ 3.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นแสงและความเข้มสัมพัทธ์ของหลอดเมอร์คิวรีที่ความยาวคลื่น 300 ถึง 450 นาโนเมตร.....	33
ตารางที่ ก.1	ความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกกรณีไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	66
ตารางที่ ก.2	ความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกกรณีใส่ไททานีียมไดออกไซด์ แบบอะนาเทส และริบบอนนาโนไททานิต.....	66
ตารางที่ ก.3	ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกกรณีใส่ไททานีียมไดออกไซด์ แบบอะนาเทส และริบบอนนาโนไททานิต.....	67
ตารางที่ ข.1	ขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา จากผล XRD ที่อุณหภูมิในการแคลไซน์ต่างกัน.....	69
ตารางที่ ข.2	ค่ากำลังอัดเฉลี่ยของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา และซีเมนต์เพสต์ที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆในปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	70
ตารางที่ ข.3	ค่ากำลังอัดเฉลี่ยของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา และซีเมนต์เพสต์ที่เติมตัวเร่งไททานีียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ในอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส (CT200) ปริมาณ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก..	70
ตารางที่ ข.4	ค่ากำลังอัดเฉลี่ยของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา และซีเมนต์เพสต์ที่เติมตัวเร่งไททานีียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ในอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส (CT200) ปริมาณ 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พร้อมทั้งผสมไซเลน (APTES).....	71
ตารางที่ ข.5	ค่าความสว่าง (L) ที่เปลี่ยนไปของผิวซีเมนต์เพสต์ที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา และซีเมนต์เพสต์ที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆในปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	71
ตารางที่ ข.6	ค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) ที่เปลี่ยนไปของผิวของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา และซีเมนต์เพสต์ที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆในปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	72
ตารางที่ ข.7	ค่าความสว่าง (L) ที่เปลี่ยนไปของผิวของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา และซีเมนต์เพสต์ที่เติมตัวเร่งไททานีียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ในอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส(CT200) ปริมาณ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	72

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ ข.8	
ค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) ที่เปลี่ยนไปของผิวของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา และ ซีเมนต์เพสต์ที่เติมตัวเร่งไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ในอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส (CT200) ปริมาณ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	73
ตารางที่ ข.9	
ค่าความสว่าง (L) ที่เปลี่ยนไปของผิวของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา และซีเมนต์เพสต์ที่เติมตัวเร่งไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ในอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส (CT200) ปริมาณ 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พร้อมทั้งผสมไฮเลน (APTES).....	73
ตารางที่ ข.10	
ค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) ที่เปลี่ยนไปของผิวของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา และซีเมนต์เพสต์ที่เติมตัวเร่งไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ในอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส (CT200) ปริมาณ 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พร้อมทั้งผสมไฮเลน (APTES).....	74



สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	การเกิดคู่อิเล็กตรอน และโฮล จากการกระตุ้นด้วยพลังงานแสง.....	5
รูปที่ 2.2	กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	6
รูปที่ 2.3	การประยุกต์ใช้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเพื่อกำจัดสารประกอบอินทรีย์ในน้ำ.....	7
รูปที่ 2.4	โครงสร้างทางเคมีของฟอร์มมาลดีไฮด์.....	7
รูปที่ 2.5	โครงสร้างทางเคมีของเมทิลีนบลู.....	8
รูปที่ 2.6	โครงสร้างผลึกของไททานเนียมไดออกไซด์ (ก)อะนาเทส (ข) รูไทล์ และ (ค) บรูกไซต์.....	9
รูปที่ 3.1	ส่วนประกอบเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอล.....	22
รูปที่ 3.2	โครงสร้างผลึกของไททานเนียมออกไซด์ แบบอะนาเทส (XRD pattern: No.21 - 1272).....	25
รูปที่ 3.3	ลักษณะสัญญาณ และพื้นผิวของไททานเนียมออกไซด์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้น (ก) กำลังขยาย 5000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า.....	25
รูปที่ 3.4	เส้นสเปกตรัมของไททานเนียมไดออกไซด์.....	26
รูปที่ 3.5	โครงสร้างผลึกของโซเดียมไททาเนต (XRD pattern: No.31-1329).....	27
รูปที่ 3.6	ลักษณะสัญญาณ และลักษณะพื้นผิวของริบบอนนาโนไททาเนต.....	28
รูปที่ 3.7	กราฟสัดส่วนของธาตุแต่ละชนิดในริบบอนนาโนไททาเนต.....	29
รูปที่ 3.8	เส้นสเปกตรัมของไททานเนียมไดออกไซด์ และริบบอนนาโนไททาเนต	30
รูปที่ 3.9	ลำดับของผลิตภัณฑ์จากการย่อยสลายเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก.....	31
รูปที่ 3.10	อัตรากร่อยสลายสารอินทรีย์ที่ 90 เปอร์เซ็นต์ ของไททานเนียมไดออกไซด์เทียบกับริบบอนนาโนไททาเนต.....	32
รูปที่ 4.1	เครื่องวัดสี CR400.....	36
รูปที่ 4.2	โครงสร้างผลึกของไททานเนียมไดออกไซด์ และไททานเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 100 200 400 และ 800 องศาเซลเซียส ตามลำดับ... ..	39
รูปที่ 4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดผลึกของไททานเนียมไดออกไซด์ที่เป็นสารตั้งต้น และไททานเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ในอุณหภูมิ 100 200 400 และ 800 องศาเซลเซียส.....	40
รูปที่ 4.4	ลักษณะสัญญาณ และพื้นผิวของไททานเนียมออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 100 200 400 และ 800 องศาเซลเซียส.....	41

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านแรงกด (Compressive strength (kcs)) ที่ผสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาวกับไททาเนียมไดออกไซด์ CT100 CT200 CT400 และ CT800 ในปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับปูนซีเมนต์	42
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านแรงกด (Compressive strength (kcs)) ที่ผสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาวกับ CT200 ในปริมาณ 0.5 1 1.5 และ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับปูนซีเมนต์.....	43
รูปที่ 4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านแรงกด (Compressive strength (kcs)) ที่ผสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาวกับ CT200 ในปริมาณ 0.5 1 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับปูนซีเมนต์ พร้อมทั้งผสมสารที่ช่วยในการกระจายตัว APTES.....	44
รูปที่ 4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างของพื้นผิวซีเมนต์เพสต์ (Light) ที่ผสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาวกับไททาเนียมไดออกไซด์ CT100 CT200 CT400 และ CT800 เทียบกับเวลา.....	46
รูปที่ 4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างสีที่แสดงบนพื้นผิวซีเมนต์เพสต์ (ΔE) ที่ผสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาวกับไททาเนียมไดออกไซด์ CT100 CT200 CT400 และ CT800 เทียบกับเวลา.....	46
รูปที่ 4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างสีที่แสดงบนพื้นผิวซีเมนต์เพสต์ ที่ผสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาว กับไททาเนียมไดออกไซด์ CT100 CT200 CT400 และ CT800 ที่เวลาเริ่มต้น และเมื่อให้พลังงานแสงผ่านไป 70 นาที.....	47
รูปที่ 4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างของพื้นผิวซีเมนต์เพสต์ (Light) ที่ผสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาวกับตัวเร่งปฏิกิริยา CT200 ที่ปริมาณ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับเวลา.....	48
รูปที่ 4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างสีที่แสดงบนพื้นผิวซีเมนต์เพสต์ (ΔE) ที่ผสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาวกับตัวเร่งปฏิกิริยา CT200 ที่ปริมาณ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับเวลา.....	49
รูปที่ 4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างสีที่แสดงบนพื้นผิวซีเมนต์เพสต์ ที่ผสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาวกับตัวเร่งปฏิกิริยา CT200 ที่ปริมาณ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลาเริ่มต้น และเมื่อให้พลังงานแสงผ่านไป 70 นาที	49
รูปที่ 4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างของพื้นผิวซีเมนต์เพสต์ (Light) ที่ผสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาวกับตัวเร่งปฏิกิริยา CT200 ที่ปริมาณ 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ APTES ปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์ขาว เทียบกับเวลา.....	51

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างสีที่แสดงบนพื้นผิวซีเมนต์เพสต์ (ΔE) ที่ผสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาวกับตัวเร่งปฏิกิริยา CT200 ที่ปริมาณ 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ APTES ปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์ขาว เทียบกับเวลา.....	51
รูปที่ 4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างสีที่แสดงบนพื้นผิวซีเมนต์เพสต์ ที่ผสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาว กับตัวเร่งปฏิกิริยา CT200 ที่ปริมาณ 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ APTES ปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์ขาว ที่เวลาเริ่มต้น และเมื่อให้พลังงานแสงผ่านไป 70 นาที.....	52
รูปที่ 4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างของพื้นผิวซีเมนต์เพสต์ (Light) ที่ผสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาวกับตัวเร่งปฏิกิริยา CT200 ที่ปริมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในกรณีที่ได้เติม APTES ปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์ขาว กับกรณีที่ไม่ได้เติม เทียบกับเวลา.....	53
รูปที่ 4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างของพื้นผิวซีเมนต์เพสต์ (Light) ที่ผสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาวกับตัวเร่งปฏิกิริยา CT200 ที่ปริมาณ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในกรณีที่ได้เติม APTES ปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์ขาว กับกรณีที่ไม่ได้เติม เทียบกับเวลา	53
รูปที่ 4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างของพื้นผิวซีเมนต์เพสต์ (Light) ที่ผสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาวกับตัวเร่งปฏิกิริยา CT200 ที่ปริมาณ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในกรณีที่ได้เติม APTES ปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์ขาว กับกรณีที่ไม่ได้เติม เทียบกับเวลา.....	54
รูปที่ ก.1	กราฟมาตรฐานของสารละลายฟอร์มมาลดีไฮด์.....	65
รูปที่ ก.2	กราฟมาตรฐานของสารละลายเมทิลีนบลู.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก (Photo-catalytic reaction) เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันที่สามารถทำลายโครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ ให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และน้ำ ด้วยการใช้อนุสารกึ่งตัวนำ (Semi-conductor) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับการให้พลังงานโฟตอนที่มีมากเพียงพอเพื่อกระตุ้นให้เกิดช่องว่างอิเล็กตรอน และโฮลภายในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องได้เป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล และซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออน ที่มีความสามารถในการทำลายโครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ โดยสารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายคือไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂)

ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความเสถียรทั้งในเชิงกายภาพ และเคมี นิยมนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photo-catalyst) ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ประยุกต์ใช้เพื่อการจัดการน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของสารประกอบอินทรีย์ โดยเติมไททาเนียมไดออกไซด์ลงในน้ำเสีย ร่วมกับการให้พลังงานแสงที่มากเพียงพอ จะสามารถทำลายโครงสร้างของสารประกอบอินทรีย์ ลดการปนเปื้อนของสารประกอบอินทรีย์ได้ อีกทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ เพื่อคุณสมบัติการทำความสะอาดตัวเอง (Self-cleaning) ของวัสดุชนิดอื่นๆ เช่น ปูนซีเมนต์ พอลิเมอร์ หรือ สี เป็นต้น โดยผสมไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับวัสดุที่ต้องการให้มีคุณสมบัติการทำความสะอาดตัวเอง ด้วยความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผสมลงในเนื้อวัสดุ ส่งผลให้สามารถทำลายโครงสร้างของสารประกอบอินทรีย์ที่ยึดเกาะบนผิวของวัสดุได้ ซึ่งคุณสมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์ เช่น โครงสร้าง (Phase - structure) ขนาดอนุภาค (Particle size) พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) และอื่นๆ ต่างมีผลโดยตรงต่อกลไกการเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นในหลายงานวิจัยจึงมีการทดลองปรับปรุงคุณสมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์ เพื่อให้เหมาะต่อการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

การปรับปรุงลักษณะทางกายภาพของไททาเนียมไดออกไซด์ ทั้งลักษณะโครงสร้าง พื้นที่ผิวจำเพาะ สามารถปรับปรุงได้หลากหลายวิธี เช่น การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ ด้วยเทคนิคต่างๆ ทั้งวิธีการโซลเจล วิธีปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต และวิธีไฮโดรเทอร์มอล ซึ่งวิธีสังเคราะห์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล [3] เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมมาก เนื่องจากสามารถควบคุมรูปร่างของผลึกได้ ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สังเคราะห์มีความเป็นเนื้อเดียวกันของสารทางเคมีที่ดีโดยไม่จำเป็นต้องมีการเผาหรืออบย่อยอีก ทำให้ประหยัดพลังงาน และค่าใช้จ่ายในการสังเคราะห์ อีกทั้งยังสามารถสังเคราะห์สารประกอบที่มีลักษณะรูปร่างแบบต่างๆ ที่มีโครงสร้างในระดับนาโนเมตร (Nano-structure) เป็น ท่อนาโน (Nano-tube) ริบบอนนาโน (Nano-ribbon) และเส้นลวดนาโน (Nano-wire) เป็นต้น รวมทั้งการปรับปรุงไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยการแคลไซน์ (Calcination) ในอุณหภูมิต่างๆ เพื่อปรับปรุงโครงสร้าง และจัดระเบียบผลึกภายในของไททาเนียมไดออกไซด์ วิธีการเหล่านี้เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกของไททาเนียมไดออกไซด์

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเล็งเห็นถึงประสิทธิภาพกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกโดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย จึงแบ่งงานวิจัยเป็นสองส่วน ส่วนแรกเพื่อใช้กระบวนการโฟโตแคตตาไลติกในการจัดการน้ำที่มีการปนเปื้อนสารอินทรีย์อันเป็นมลพิษทางน้ำซึ่งปัญหาที่ทวีความรุนแรงมากขึ้นในปัจจุบันจากการเพิ่มขึ้นของประชากรทำให้ความต้องการในการอุปโภคบริโภคสูงขึ้น ส่งผลต่อการขยายตัวของอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ อันเป็นแหล่งสำคัญในการปลดปล่อยสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ลักษณะสารประกอบอินทรีย์ที่ถูกปลดปล่อยมาเนื่องจากการจัดการที่ไม่มีประสิทธิภาพส่วนใหญ่อยู่ในรูปของน้ำทิ้ง ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพน้ำในแม่น้ำลำคลอง ซึ่งจากรายงานค่าดัชนีคุณภาพน้ำ (Water quality index) ของระบบฐานข้อมูลคุณภาพแหล่งน้ำผิวดินทั่วประเทศ (IWIS) ได้รายงานค่าดัชนีคุณภาพน้ำเฉลี่ยของแม่น้ำเจ้าพระยา อยู่ในเกณฑ์เสื่อมโทรม นอกเหนือจากนั้นจุดตรวจวัดในบริเวณอื่นๆ โดยเฉพาะบริเวณนิคมอุตสาหกรรม พบว่าแนวโน้มของค่าดัชนีคุณภาพน้ำมีแนวโน้มแย่ลงใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้ เนื่องจากการปนเปื้อนของสารประกอบอินทรีย์ในแหล่งน้ำโดยสารประกอบอินทรีย์ที่นำมาใช้เป็นแบบจำลองในกระบวนการคือ เมทิลีนบลู (Methylene blue) และ ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde) ที่ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม พร้อมทั้งปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของไททานาเนียมไดออกไซด์ ด้วยการสังเคราะห์เป็นริบบอนนาโนไททาเนต ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

ส่วนที่สองนำไททาเนียมไดออกไซด์ผสมลงในปูนซีเมนต์ขาว ผสมเป็นซีเมนต์เพสต์ เพื่อเพิ่มความสามารถให้ผิวของซีเมนต์เพสต์ในการทำความสะอาดตัวเอง เนื่องจากซีเมนต์ถือเป็นวัสดุหลักในงานก่อสร้างต่างๆ โดยเฉพาะปูนซีเมนต์ขาวที่นิยมนำมาฉาบผนัง สร้างงานปูนปั้น เมื่อผ่านการใช้งานไปได้ระยะหนึ่งอาจมีความหมองจากการยึดเกาะของคราบสิ่งสกปรก ฝุ่น รวมไปถึงเขม่าควัน อันเป็นแหล่งสะสมของเชื้อแบคทีเรีย หรือสารอินทรีย์เป็นพิษต่างๆ ดังนั้นการเติมไททาเนียมไดออกไซด์จึงช่วยให้มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทำความสะอาดตัวเองป้องกันความหมอง จากการยึดเกาะของคราบสิ่งสกปรก พร้อมทั้งช่วยลดมลพิษทางอากาศในบริเวณพื้นผิวดังกล่าว พร้อมทั้งงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงโครงสร้างของโททาเนียมไดออกไซด์ ด้วยการนำไปเผาที่อุณหภูมิต่างๆ และปรับเปลี่ยนปริมาณของโททาเนียมไดออกไซด์ที่ผสม เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ที่ยึดเกาะบนผิวของซีเมนต์เพสต์

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อปรับปรุงลักษณะพื้นฐาน และขนาดพื้นที่ผิวของโททาเนียมไดออกไซด์ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ด้วยการสังเคราะห์เป็นริบบอนนาโนโททาเนต
- 1.2.2 เพื่อปรับปรุงโครงสร้างผลึกของโททาเนียมไดออกไซด์ ให้เหมาะสมต่อการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ด้วยวิธีการแคลไซน์
- 1.2.3 เพื่อประยุกต์ใช้การเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำ โดยใช้ฟอร์มาลดีไฮด์ และเมทิลีนบลู เป็นสารตัวอย่าง
- 1.2.4 เพื่อเพิ่มความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์บนผิวของซีเมนต์เพสต์ด้วยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง โดยไม่ทำให้คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์แยลง และใช้เมทิลีนบลูเป็นสารตัวอย่าง
- 1.2.5 เพื่อหาปริมาณของโททาเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมต่อการนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ขาวที่เหมาะสมต่อการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง พร้อมศึกษาผลการกระจายตัว โดยไม่ทำให้คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์แยลง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 สังเคราะห์ริบบอนนาโนโททาเนตจากสารตั้งต้นโททาเนียมไดออกไซด์ ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล
- 1.3.2 ปรับปรุงโครงสร้างของโททาเนียมไดออกไซด์ ด้วยการนำไปแคลไซน์ในช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 800 องศาเซลเซียส
- 1.3.3 ปรับเปลี่ยนปริมาณของโททาเนียมไดออกไซด์ที่ผสมลงในปูนซีเมนต์ขาวในช่วงปริมาณ 0.5 ถึง 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์ขาว เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.4 ปรับปรุงการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาในปูนด้วยการเติม 3-Aminopropyl triethoxysilane (APTES)

1.3.5 ทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก โดยใช้ฟอร์มัลดีไฮด์ และเมทิลีนบลู เป็นสารตัวอย่าง เพื่อเปรียบเทียบผลในการย่อยสลายสารอินทรีย์ทั้งสองจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างกัน

1.3.6 การทดสอบประสิทธิภาพการทำความสะอาดตัวเองบนของซีเมนต์เพสต์ ด้วยการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง โดยใช้เมทิลีนบลูเป็นสารตัวอย่าง

1.3.7 การทดสอบสมบัติกำลังอัด (Strength) ของซีเมนต์เพสต์ก่อนและหลังการผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาภายหลังการบ่มน้ำเป็นเวลา 7 วัน

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ค้นพบคุณสมบัติของไททานเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์หลากหลายชนิดที่ปะปนอยู่ในน้ำ

1.4.2 ช่วยเพิ่มคุณสมบัติในการทำความสะอาดตัวเองบนพื้นผิวของซีเมนต์ พร้อมทั้งได้ทราบปริมาณในการผสมที่เหมาะสมต่อคุณสมบัติดังกล่าว

1.4.3 ผลการเติมส่งผลให้กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ดีขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก (Photocatalytic activity)

กระบวนการโฟโตแคตตาไลติกเป็นกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่เกิดจากการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง หรือพลังงานโฟตอน ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกกระตุ้นจะดูดซับโฟตอน ที่มีพลังงานเทียบเท่าหรือมากกว่าค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy) ซึ่งขึ้นกับค่าของแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap energy) เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาถูกกระตุ้นด้วยพลังงานที่เหมาะสมดังที่กล่าวข้างต้น ส่งผลให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (Valence band, VB) ถูกกระตุ้นขึ้นไปยังแถบคอนดักชัน (Conduction band, CB) ก่อให้เกิดสถานะการขาดอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ เรียกลักษณะเช่นนี้ว่า โฮล (e^-/h^+ pair) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



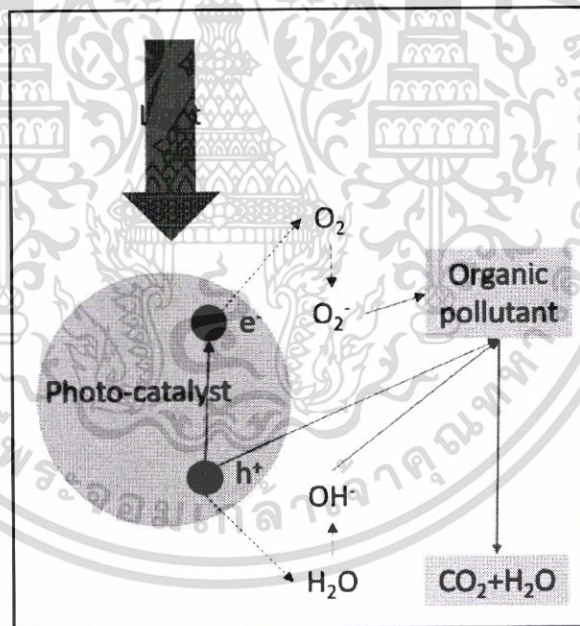
รูปที่ 2.1 การเกิดคู่อิเล็กตรอน และโฮล จากการกระตุ้นด้วยพลังงานแสง

เมื่อผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาในสถานะที่มีคู่อิเล็กตรอน-โฮลสัมผัสกับโมเลกุลของน้ำหรือออกซิเจน (O_2) ในอากาศจะเกิดเรดิคัล (Radical) ที่มีความว่องไวสูง ประกอบไปด้วยไฮดรอกซิลเรดิคัล ($OH\cdot$) ซึ่งเกิดจากโมเลกุลของน้ำที่ถูกออกซิไดซ์ด้วยโฮล ดังสมการที่ (2.1) และซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออน (O_2^-) ซึ่งเกิดจากโมเลกุลของออกซิเจนถูกรีดิวซ์ด้วยอิเล็กตรอนในแถบคอนดักชัน ดังสมการที่ (2.2)



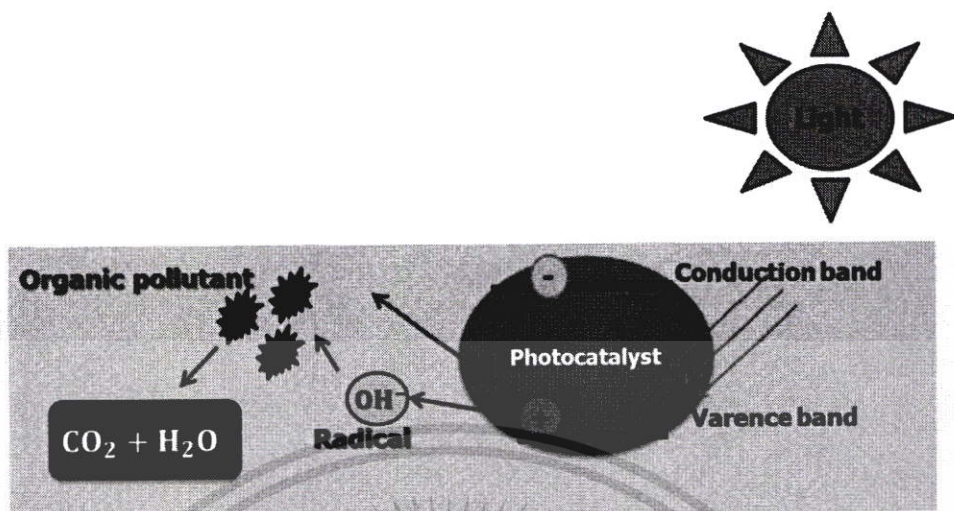
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮดรอกซิลแรดิคัลที่เกิดขึ้นเป็นตัวออกซิไดซ์ที่สามารถย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ เรียกกระบวนการนี้ว่าโฟโตออกซิเดชัน (Photo - oxidation) ขณะที่ซูเปอร์ออกไซด์แรดิคัลแอนไอออนเป็นตัวรีดิวซ์ที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) ที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ ด้วยปฏิกิริยาโฟตรีดักชัน (Photo - reduction) [6] จากสองกระบวนการที่กล่าวข้างต้น จึงสามารถเรียกกระบวนการโดยรวมว่า กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก (Photo - catalytic reaction) หรือการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงสามารถประยุกต์ใช้เพื่อกำจัดสารประกอบอินทรีย์ได้หลายวิธี เช่นการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปในน้ำโดยตรง โดยลักษณะการเกิดปฏิกิริยาในน้ำแสดงดังรูปที่ 2.3 หรือการผสมตัวเร่งปฏิกิริยากับสารชนิดอื่นส่งผลทำให้พื้นผิวของสารชนิดนั้นสามารถทำความสะอาดตัวเองได้ (Self - cleaning) จากการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง เนื่องจากน้ำซึ่งผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงจะเคลือบบริเวณพื้นผิวส่งผลให้ทำให้เกิดลักษณะเป็นพื้นผิวที่ชอบน้ำ (Hydrophilic surface) จึงสามารถป้องกันการรวมตัวกันของหยดน้ำในอากาศที่มาเกาะบนพื้นผิว อันนำมาซึ่งคราบสกปรก ดังนั้นพื้นผิวจะทำความสะอาดได้โดยง่ายเพียงมีการชะล้างเบาๆ



รูปที่ 2.2 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของตัวเร่งปฏิกิริยา [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



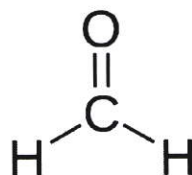
รูปที่ 2.3 การประยุกต์ใช้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเพื่อกำจัดสารประกอบอินทรีย์ในน้ำ

จากประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกที่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์โครงสร้างของสารอินทรีย์ได้ กระบวนการนี้จึงถูกนำมาใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ตัวอย่างในงานวิจัยนี้ โดยสารอินทรีย์ที่นำมาเป็นสารตัวอย่างคือฟอร์มัลดีไฮด์ และเมทิลีนบลู ซึ่งเป็นสารเคมีที่นำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม ทั้งอุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมยา เป็นต้น

2.1.1 สารประกอบอินทรีย์

- ฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde)

ฟอร์มัลดีไฮด์ หรือฟอร์มาลีน มีสูตรทางเคมี คือ CH_2O ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม เกษตรกรรม และการแพทย์ ผลิตได้ในรูปของสารละลาย ฟอร์มัลดีไฮด์ หรือฟอร์มาลีน ซึ่งนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์ ฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ และเคมีภัณฑ์ อื่นๆ อาทิเช่น สารฆ่าเชื้อ สารกันเสีย ยาฆ่าแมลง ตัวลดออกซิเจนในปฏิกิริยา [2] มีสมบัติเป็นก๊าซไวไฟที่ไม่มีสี มีกลิ่นฉุน และมีฤทธิ์กัดกร่อน สามารถเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ได้ง่าย



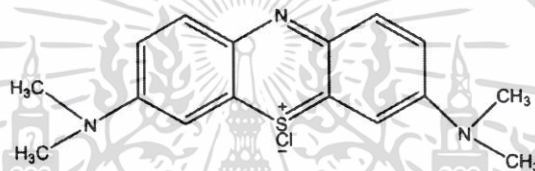
รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของฟอร์มัลดีไฮด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการที่ฟอร์มาลดีไฮด์ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม จึงอาจพบการปนเปื้อนของฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำทิ้ง ซึ่งถ้าภายหลังการใช้งานมีการระบายสารเคมีชนิดนี้โดยปราศจากการจัดการที่เหมาะสม อาจก่อให้เกิดการปนเปื้อนของฟอร์มาลดีไฮด์ในแหล่งน้ำธรรมชาตินำไปสู่ความอันตรายต่อสัตว์น้ำ พืชน้ำ รวมไปถึงมนุษย์ที่ใช้น้ำในการอุปโภคบริโภค

- เมทิลีนบลู (Methylene blue)

เมทิลีนบลู เป็นสีชนิดสีเบสิก (Basic Dyes) มีสูตรทางเคมี คือ $C_{16}H_{18}ClN_3S$ ดังรูป 2.5 เป็นเกลือของด่างอินทรีย์ที่สามารถละลายน้ำได้ดี มีโครโมฟอร์ (Chromophore) ที่ให้ประจุบวก (Cation) จึงเรียกอีกอย่างว่า สีแคทไอออน ซึ่งมีสถานะเป็นของแข็งสีเขียวเข้ม ณ อุณหภูมิห้อง และเป็นสีฟ้าจนถึงน้ำเงินเมื่อละลายน้ำ พบมากในอุตสาหกรรมสี หรืออุตสาหกรรมการฟอกย้อมต่างๆ โดยสามารถปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้โดยง่ายเช่นกัน



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของเมทิลีนบลู [17]

จากตัวอย่างของสารประกอบอินทรีย์ทั้งสองชนิดข้างต้นที่อาจปนเปื้อนสู่ระบบนิเวศน์ได้ง่ายนำไปสู่การจัดการการปนเปื้อนของสารประกอบอินทรีย์ในแหล่งน้ำธรรมชาติซึ่งมีหลายวิธี เช่น การเติมสารให้ตกตะกอน การย่อยด้วยจุลินทรีย์ หรือการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ เป็นต้น ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถลดการปนเปื้อนได้ แต่อาจเกิดเป็นกากของเสียได้ เช่น กากของเสียจากการดูดซับ เมื่อต้องการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ ต้องมีการคายซับ ส่งผลให้สารพิษที่ปนเปื้อนยังคงความเป็นพิษ และอยู่ในระบบนิเวศน์ไม่ได้ถูกกำจัดอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเป็นกระบวนการที่สามารถกำจัดการปนเปื้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยการทำลายโครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ วิธีดังกล่าวช่วยลดการปนเปื้อนของสารประกอบอินทรีย์ในระบบนิเวศ และไม่ทิ้งกากของเสียอีกด้วย

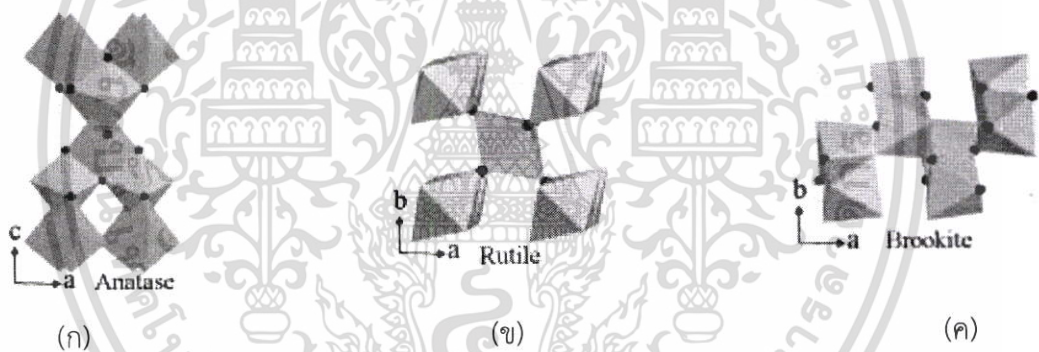
ทั้งนี้จากการศึกษาในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงพบว่าปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งของกระบวนการคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำ (Semi-conductor) โดยส่วนใหญ่นิยมใช้สารประกอบไททาเนียม - ออกไซด์ เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความเสถียรทั้งทางกายภาพ และทางเคมี รวมทั้งไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 สารประกอบไททาเนียม-ออกไซด์ (Titanium-oxide compound)

2.2.1. ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide; TiO_2)

ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไททาเนียม มีลักษณะของโครงสร้างผลึก 3 แบบ คืออะนาเทส (Anatase), รูไทล์ (Rutile) และบรูคไคท์ (Brookite) โดยอะนาเทส กับรูไทล์มีโครงสร้างผลึกเป็นเตตระโกนอล (Tetragonal) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ก) และ (ข) ส่วนบรูคไคท์มีโครงสร้างผลึกเป็นออร์โธรอมบิก (Orthorhombic) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ค) ซึ่งโครงสร้างผลึกทั้ง 3 แบบของไททาเนียมไดออกไซด์เกิดจากอะตอมของออกซิเจนของออกตะฮีดรอลโดยไอออนของ Ti^{4+} ถูกล้อมรอบด้วย 6 ไอออนของ O^{2-} ซึ่งการจัดเรียงตัวของสายโซ่ออกตะฮีดรอลในแต่ละโครงสร้างนั้นจะแตกต่างกัน โดยโครงสร้างแบบอะนาเทสเกิดจากการเชื่อมต่อกันของออกตะฮีดรอลบริเวณขอบ แต่ละออกตะฮีดรอลจะถูกล้อมรอบด้วยออกตะฮีดรอลสี่ออกตะฮีดรอลและใช้ขอบร่วมกัน โครงสร้างแบบรูไทล์เกิดจากการเชื่อมต่อออกตะฮีดรอลบริเวณมุมและขอบ ส่วนโครงสร้างแบบบรูคไคท์จะมีระบบผลึกเป็นออร์โธรอมบิกที่มีการเชื่อมต่อของออกตะฮีดรอลบริเวณขอบและมุม [6]



รูปที่ 2.6 โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ (ก)อะนาเทส (ข) รูไทล์และ (ค) บรูคไคท์ [8]

2.2.2. ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียม - ออกไซด์ (Ti - O based catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียม ออกไซด์ ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายในการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง เนื่องจากเป็นสารประกอบกึ่งโลหะที่สามารถเร่งปฏิกิริยาได้เมื่อดูดซับพลังงานโฟตอน แต่การใช้ไททาเนียม - ออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยายังมีข้อจำกัดอยู่ ทั้งขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะ ค่าของช่องว่างแถบพลังงานที่สูงไปยากต่อการเร่งปฏิกิริยา หรือการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากกระบวนการ หลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จสิ้น ดังนั้นในหลายงานวิจัยจึงปรับปรุงไททาเนียม - ออกไซด์ด้วยการเติมโลหะบางชนิด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงเคมี ลดค่าช่องว่างแถบพลังงาน หรือเพื่อให้มีการกระจายตัวที่ดี เพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสและเพิ่มความเสถียรต่อความร้อน

งานวิจัยของ Zang J. et. al. (2015) ได้นำไททาเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทส ไปเคลือบชั้นที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส พบว่ายังมีโครงสร้างเป็นอะนาเทส แต่เมื่อเคลือบชั้นในอุณหภูมิสูงถึง 800 องศาเซลเซียส พบว่าโครงสร้างเริ่มเปลี่ยนเป็นรูไทล์ จึงปรับปรุงไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยแกโดลิเนียม (Gadolinium oxide: Gd_2O_3) ส่งผลให้ไททาเนียมไดออกไซด์มีความเสถียรต่อความร้อน สามารถเคลือบชั้นได้ถึง 800 องศาเซลเซียส โดยยังคงโครงสร้างแบบอะนาเทส โดยได้ขนาดผลึกของอะนาเทสที่ใหญ่ขึ้น ส่งผลให้การเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกเพื่อย่อยสลายสีย้อมในงานวิจัยนี้ดีขึ้น [30]

งานวิจัยของ Behnajady M. et al. (2013) ได้เติมซิลเวอร์ (Ag) และ คอปเปอร์ (Cu) บนไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่าการเติมคอปเปอร์บนไททาเนียมไดออกไซด์ช่วยลดค่าช่องว่างแถบพลังงานจาก 3.16 เหลือ 3.10 และการเติมซิลเวอร์ช่วยลดค่าช่องว่างแถบพลังงานจาก 3.16 เหลือ 3.08 นอกเหนือจากนั้นขนาดของผลึกที่ได้ภายหลังการเติมโลหะทั้งสองมีค่าสูงขึ้นเช่นกัน [23]

2.2.3 โครงสร้างแบบชั้น (Layered structure: titanate)

ลักษณะสัณฐานของไททาเนียม – ออกไซด์ ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของลักษณะที่ไม่สามารถระบุสัณฐานได้ ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก หรือลักษณะสัณฐานระดับนาโนด้วยการสังเคราะห์ให้อยู่ในรูปของไททาเนต ($A_2Ti_nO_{2n+1}$; $3 \leq n \leq 6$ [22]) โดยไททาเนตที่สังเคราะห์ได้จะมีโครงสร้างแบบชั้น เนื่องจากการแทรกตัวของประจุบวก (A) ที่นำมาทำปฏิกิริยา ไททาเนตส่วนใหญ่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์ ร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) การสังเคราะห์ไททาเนตสามารถเปลี่ยนลักษณะสัณฐานระดับนาโนของสารตั้งต้นได้หลากหลาย เช่น ท่อนาโนไททาเนต เส้นใยนาโนไททาเนต แผ่นนาโนไททาเนต เป็นต้น โดยวิธีการในการสังเคราะห์จะกล่าวไว้ในหัวข้อ 2.4

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก

ไททาเนียม-ออกไซด์ เป็นสารประกอบที่สามารถประยุกต์ใช้ได้หลากหลายงาน เช่น การเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) การกำจัดสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) การกำจัดสารประกอบซัลเฟอร์ รวมถึงการผลิตไฮโดรเจนด้วยปฏิกิริยา Gas shift reaction เป็นต้น

จากการศึกษากระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง พบว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ คือสารกึ่งตัวนำ ซึ่งไททาเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาใช้ในการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง โดยคุณลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของไททาเนียมไดออกไซด์นั้นส่งผลต่อประสิทธิภาพของการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ทั้งขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะที่เพียงพอต่อการดูดซับพลังงานโฟตอน เพื่อผลิตแตรดิคอลที่จำเป็นต่อการเกิดปฏิกิริยา โครงสร้างผลึก รวมถึงค่าพลังงานกระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area)

ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะของไททาเนียมไดออกไซด์เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก เนื่องจากต้องมีพื้นที่ที่เพียงพอต่อการดูดซับสารอินทรีย์ที่ต้องการย่อยสลาย พร้อมทั้งรองรับการทำปฏิกิริยาที่บริเวณพื้นผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ ซึ่งสามารถปรับปรุงพื้นที่ผิวจำเพาะของไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยการสังเคราะห์เป็นลักษณะสัณฐานอื่นในระดับนาโน

2.3.2 โครงสร้างผลึก (Crystal structure)

จากที่ได้กล่าวข้างต้นในส่วนของชนิดของโครงสร้างผลึกไททาเนียมไดออกไซด์ทั้ง 3 ชนิด คือ รูไทล์ อะนาเทส และบรูคไคท์ โดยขนาดผลึกของรูไทล์นั้นมีขนาดใหญ่ที่สุดเมื่อเทียบกับ อะนาเทส และบรูคไคท์ ซึ่งขนาดของผลึกนั้นเป็นอีกหนึ่งปัจจัยต่อกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก เนื่องจากขนาดของผลึกมีผลต่อความสามารถในการดูดซับพลังงานโฟตอนเพื่อผลิตแตรดิคอลที่จำเป็นต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก ซึ่งขนาดและโครงสร้างของผลึกสามารถปรับปรุงได้ด้วยการนำไททาเนียมไดออกไซด์ไปผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อปรับปรุงขนาดของผลึก และสามารถปรับเปลี่ยนโครงสร้างของผลึกได้

2.3.3 ช่องว่างของระดับพลังงาน (Band gap energy)

ช่องว่างของระดับพลังงานเป็นสิ่งที่กำหนดว่าต้องใช้พลังงานเท่าไรในการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา ให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากแถบวาเลนซ์ เคลื่อนที่ไปยังแถบการนำ เพื่อให้เกิดการเร่งปฏิกิริยา ถ้าขนาดช่องว่างของระดับพลังงานมากต้องใช้พลังงานมาก ในทางกลับกันถ้าระดับพลังงานต่ำพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาจะต่ำลงเช่นกัน ซึ่งไททาเนียมไดออกไซด์มีค่าช่องว่างของระดับพลังงานอยู่ที่ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ [27] ในกรณีที่ต้องการลดช่องว่างของระดับพลังงานสามารถทำได้หลายวิธี โดยวิธีการที่นิยมคือการเติมโลหะออกไซด์ลงในไททาเนียมไดออกไซด์ เช่น การเติมคอปเปอร์ ซิลเวอร์ หรือแพลตตินัม เป็นต้น โดยค่าของช่องว่างของระดับพลังงานสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.3

$$E = \frac{1240}{\lambda} \quad (2.3)$$

เมื่อ E คือ พลังงานที่ใช้ในการกระตุ้น หรือ Band gap energy หน่วย อิเล็กตรอนโวลต์ (eV)
 λ คือ ความยาวคลื่น หน่วย นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกที่ได้กล่าวข้างต้น เป็นสิ่งที่สามารถปรับปรุงได้ด้วยหลายวิธีการ หนึ่งในนั้นคือการเปลี่ยนโครงสร้างระดับนาโนของตัวเร่งปฏิกิริยา

2.4 การเตรียมโครงสร้างระดับนาโนของไททาเนียม – ออกไซด์

2.4.1 วิธีการโซล – เจล (Sol – gel method) [6]

วิธีการโซล – เจล เป็นการเตรียมโครงสร้างระดับนาโนแบบเปียก ที่ให้ผลผลิตมีความเป็นเนื้อเดียวกัน และมีความบริสุทธิ์สูง ด้วยการเปลี่ยนสถานะจากของเหลว “โซล” ซึ่งอยู่ในรูปของสารคอลลอยด์ เป็นสารที่จับตัวกันมีลักษณะคล้ายวุ้น มีความหนืดสูงขึ้น “เจล” โดยมีวิธีการหลักๆดังนี้

- การเตรียมโซล

โซล สามารถเตรียมด้วยการผสมสารตั้งต้นประเภทสารประกอบโลหะ และกึ่งโลหะที่มีอนุภาคนาโนเล็กกว่า 0.1 ไมโครเมตร โดยถูกล้อมรอบด้วยลิแกนด์ที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา

- การเกิดเจล

ขั้นตอนการเกิด เจล ด้วยการระเหยของเหลวบางส่วน ส่งผลให้ความเข้มข้นของสารละลายเปลี่ยนไป เมื่อระเหยสารละลายออกไปเรื่อยๆ โซล จะมีความเหลวขึ้นเรื่อยๆเกิดเป็น เจล ซึ่งขั้นตอนนี้พบว่ามีการปฏิกิริยาที่เข้ามาเกี่ยวข้อง 2 ปฏิกิริยา คือ การแยกสลายด้วยน้ำ (Hydrolysis) และการควบแน่น (Condensation)

- การระเหยของเหลว

เจล ที่ได้จากขั้นตอนก่อนหน้าอาจมีของเหลวหลงเหลืออยู่ ในขั้นนี้จึงต้องระเหยของเหลวออก โดยโครงสร้างเจลที่เป็นสารกึ่งของแข็งจะช่วยควบคุมไม่ให้โครงสร้างอะตอมที่ได้ไม่มีการย้ายตำแหน่ง หรือหลุดออก ทั้งนี้ขั้นตอนนี้จะช่วยรักษาความเป็นเนื้อเดียวกันของสารในระดับโมเลกุลให้คงอยู่

- การเผาเจล

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายที่ใช้กำจัดน้ำที่อยู่ในเจล โดยนำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 300 – 500 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้ผงผลึกระดับนาโนเมตร

2.4.2 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Alkaline hydrothermal synthesis)

กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเป็นเทคนิคการสังเคราะห์วัสดุสมัยใหม่ (Advance materials) ซึ่งมีจุดเด่น คือ สามารถสังเคราะห์สารประกอบที่มีโครงสร้างง่าย หรือซับซ้อนได้ โดยมีวิธีการเตรียมสารที่ไม่ยุ่งยาก ควบคุมรูปร่างของอนุภาคได้ดี โดยอนุภาคที่ได้มีความบริสุทธิ์ และมีความละเอียดสูง จึงไม่จำเป็นต้องผ่านการเผา หรือบดย่อย ส่งผลให้ลดพลังงาน และลดต้นทุนในการสังเคราะห์ อีกทั้งยังสามารถควบคุมลักษณะโครงสร้างในระดับนาโนเมตร (nanostructure) ได้ เช่นการสังเคราะห์เป็นริบบอนนาโน (nano – ribbons) ท่อนาโน (nano – tubes) แท่งนาโน (nano - rods) เส้นลวดนาโน (nano

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- wires) หรือเส้นใยนาโน (nano - fibers) ซึ่งความแตกต่างของโครงสร้างดังกล่าวเกิดจากสภาวะการสังเคราะห์ที่ต่างกัน โดยตัวอย่างของสภาวะในการสังเคราะห์แสดงดังตารางที่ 2.1

ตาราง 2.1 ตัวอย่างสภาวะการสังเคราะห์ไททานเนตของสารประกอบไททานเนียมไดออกไซด์

ชนิดโครงสร้างตัวเร่งปฏิกิริยา	สภาวะการสังเคราะห์	
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)
ริบบอนนาโนไททานเนต [16]	200	24
ท่อนาโนไททานเนต [16]	150	72
เส้นลวดนาโน [9]	180	40

2.5 การแคลไซน์ (Calcination)

การแคลไซน์ คือ การเผาสารบางชนิดภายใต้อุณหภูมิสูงในระดับอุณหภูมิที่ไม่ถึงจุดหลอมเหลวของสารนั้นๆ โดยกระบวนการแคลไซน์สามารถช่วยกำจัดความชื้น สารอินทรีย์ หรือไล่ก๊าซให้กับสารที่นำไปเผา อีกทั้งยังสามารถเติมออกซิเจนให้กับสารที่ผ่านการเผาได้ นอกจากนี้อุณหภูมิในการแคลไซน์สามารถเปลี่ยนโครงสร้างของอนุภาคสาร และสามารถเปลี่ยนขนาดผลึกของสารได้ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้กระบวนการแคลไซน์เพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพ และทางเคมีของไททานเนียมไดออกไซด์

จากการศึกษาเรื่องการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง โดยมีปัจจัยสำคัญในปฏิกิริยา คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ซึ่งที่นิยมใช้คือ ไททานเนียมไดออกไซด์ พบว่าสามารถกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำได้ และสามารถนำไททานเนียมไดออกไซด์ไปผสมกับวัสดุอื่นเพื่อให้วัสดุนั้นมีคุณสมบัติในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ ด้วยการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง วัสดุที่นิยมนำไปผสม อาทิเช่น สี พอลิเมอร์ หรือปูนซีเมนต์ เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาการผสมไททานเนียมไดออกไซด์ร่วมกับปูนซีเมนต์ เนื่องจากเป็นวัสดุหลักที่ใช้ในการก่อสร้างทั่วไป จึงเป็นการดีถ้าทำให้อาคาร หรือสิ่งปลูกสร้าง ที่ทำจากปูนซีเมนต์ที่ผ่านการผสมไททานเนียมไดออกไซด์จะมีสมบัติในการย่อยสลายสารอินทรีย์บนพื้นผิว ทำให้อาคาร หรือสิ่งปลูกสร้างเหล่านั้นมีความใหม่อยู่เสมอ

2.6 ไฮเลน (Silane)

เป็นสารควบคู่ปฏิกิริยาชนิดหนึ่ง โดยสารควบคู่ปฏิกิริยาเป็นสารที่ช่วยปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ทำหน้าที่เปรียบเสมือนสะพานเชื่อม อีกทั้งยังสามารถช่วยลดแรงตึงผิว และเปลี่ยนลักษณะของพื้นผิวจากไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) เป็นไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) ส่งผลให้การผสมเกิดขึ้นได้ดี และช่วยปรับปรุงคุณสมบัติโดยรวมของคอมโพสิต ซึ่งสารควบคู่ปฏิกิริยาประเภทไฮเลนนี้ นิยมใช้กับพลาสติกหลายชนิด ช่วยให้ฟิลเลอร์กระจายตัวในพลาสติกได้ดีขึ้น โดยมีโครงสร้างที่สำคัญคือ ส่วนที่เกิดปฏิกิริยากับผิวของฟิลเลอร์ ส่วนที่เกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ ส่วนสุดท้ายเป็นกลุ่มอัลคิลเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่เชื่อมกับ Si และในงานวิจัยนี้ได้นำไฮเลนมาเติมลงในปูนซีเมนต์ขาวเพื่อศึกษาการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาในซีเมนต์

2.7 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับซีเมนต์ (Cement)

ซีเมนต์ มีรากศัพท์จากภาษาละติน ความหมายทั่วไปคือ วัตถุที่แข็งเมื่อผสมกับน้ำ นั่นคือเมื่อนำไปผสมกับน้ำ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี สามารถยึดส่วนต่าง ๆ หรือทำให้ของแข็งรวมตัวกันได้ [4] ซึ่งสามารถจำแนกตามการใช้งานทางวิศวกรรมได้ 2 ชนิด คือ บิทูมินัสซีเมนต์ (Bituminous) ได้แก่ ยางมะตอย (Asphalts) และน้ำมันดิน (Tars) ที่ส่วนใหญ่นำมาใช้เป็นตัวประสานหิน กรวด เพื่อทำผิวถนน หรือนำบิทูมินัสซีเมนต์ผสมกับหิน ทราาย รวดทำผิวถนน โดยเรียกว่า แอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt concrete) และนอนบิทูมินัส (Nonbituminous) ได้แก่ อะลูมินาซีเมนต์ (Alumina cement) และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland cement) มีลักษณะเป็นผงสีเทาอ่อนต้องผสมน้ำปริมาณมากพอสมควร แข็งตัวในน้ำได้ แล้วทิ้งไว้ให้แห้งจึงจะแข็งตัว เรียกว่า ไฮดรอลิกซีเมนต์ (Hydraulic cement) ซึ่งเป็นซีเมนต์ที่ใช้ในการก่อสร้างมากที่สุด

2.7.1. พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland cement)

พอร์ตแลนด์ซีเมนต์เป็นซีเมนต์ไฮดรอลิก เกิดจากการบดปูนเม็ด (Clinker) ที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ ไฮดรอลิกแคลเซียมซิลิเกต (Hydraulic calcium silicate) กับสารหน่วงการก่อตัวเช่น ยิปซัม (Gypsum) มีส่วนผสมหลักคือ ปูน (Calcareous materials) ได้แก่ หินปูน (Limestone) และดินสอพอง (Chalk) ดิน (Argillaceous materials) ได้แก่ ซิลิกา (Silica) อลูมินา (Alumina) ที่อยู่ในรูปของดินเหนียว (Clay) และดินดาน (Shale) สุดท้ายคือโลหะออกไซด์ (Iron oxide materials) ได้แก่ แร่เหล็ก (Iron ore) หรือคิลาแลง (Laterite) ในส่วนกรรมวิธีการผลิตนั้น สามารถแบ่งได้ตามลักษณะของวัตถุดิบที่นำมาใช้ได้ 2 วิธี คือ การผลิตแบบเปียก (Wet process) และการผลิตแบบแห้ง (Dry process)

ซึ่งปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่นิยมใช้ในประเทศไทย สามารถจำแนกได้เป็น 5 ประเภทย่อยตามคุณสมบัติและลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันดังนี้

1. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ชนิดธรรมดา ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป เช่น การสร้างสะพาน ทำผิวถนน เป็นต้น ซึ่งซีเมนต์ชนิดนี้มีข้อเสียคือ ไม่ทนต่อสารที่เป็นด่าง หรืออาคารที่มีสารเป็นด่างอยู่
2. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ดัดแปลงชนิดให้ความร้อน และทนต่างได้ปานกลาง ซีเมนต์ชนิดนี้เมื่อผสมน้ำจะมีการคายความร้อนต่ำกว่าชนิดธรรมดา เหมาะสำหรับงานก่อสร้างต่อม่อในบริเวณที่มีอากาศร้อนจัด
3. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ชนิดเกิดแรงสูงและเร็ว ซีเมนต์ชนิดนี้เกิดแรงสูงเร็วในระยะแรก เหมาะสำหรับงานที่ต้องการถอดแบบเร็ว เนื้อของซีเมนต์ชนิดนี้มีความละเอียดมากกว่าชนิดอื่น จึงอาจเกิดรอยร้าวบริเวณพื้นผิวได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ชนิดคายความร้อนต่ำ เหมาะสำหรับงานก่อสร้างขนาดใหญ่ เช่นการ สร้างเขื่อน ที่ต้องควบคุมความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนในช่วงกำลังแข็งตัวไม่ ให้มากเกินไป เนื่องจากอาจก่อให้เกิดการแตกร้าวและสร้างความเสียหายต่อเขื่อนได้

5. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ชนิดทนซัลเฟตสูง ซีเมนต์ชนิดนี้แข็งตัวช้ากว่าซีเมนต์ธรรมดา ใช้สำหรับ สร้างอาคารที่ต้องสัมผัสสารที่เป็นต่างอย่างแรง หรือสร้างตอม่อที่ตั้งอยู่ริมทะเล เป็นต้น

นอกเหนือจากปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ทั้ง 5 ชนิดข้างต้น ยังมีปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ชนิดพิเศษที่ พบเห็นในการก่อสร้างเสมอ นั่นคือปูนซีเมนต์ขาว

2.7.2. ปูนซีเมนต์ขาว (White cement)

ปูนซีเมนต์ขาวเป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ชนิดหนึ่ง ที่มีเนื้อปูนซีเมนต์แน่น ละเอียด มีสี ขาวบริสุทธิ์ ระยะเวลาในการแห้งตัวเหมาะสมประมาณ 3 ชั่วโมง กำลังการยัดเกาะสูง และมีความ แข็งแกร่ง มักนำมาใช้ปูนสำหรับตกแต่งอาคารทั้งภายใน ภายนอก งานรูปปั้น งานหล่อวัสดุ เช่น โตะ แก้ว บ่อน้ำพุ เป็นต้น งานฉาบผิว ทำหินขัด ทราลัยล่าง หรืองานผสมสี เนื่องจากแม่สีจะไม่เกิดปฏิกิริยา ทางเคมีกับปูนซีเมนต์ทำให้ได้สีที่ผสมตามต้องการไม่ผิดเพี้ยน รวมไปถึงการใช้เป็นปูนยาแนวกระเบื้อง โดยส่วนผสมในการผลิตปูนซีเมนต์ขาวนั้น มีส่วนผสมหลักที่ไม่แตกต่างจากปูนซีเมนต์เทา เพียงแต่ ปูนซีเมนต์ขาวจะคัดวัตถุดิบเฉพาะ โดยควบคุมปริมาณของเหล็กออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ ให้น้อย ที่สุดเพื่อให้ปูนซีเมนต์มีความขาวมากที่สุด ในส่วนของกระบวนการผลิตมีความแตกต่างจากการผลิต ปูนซีเมนต์เทาเล็กน้อย ทั้งการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่าปูนซีเมนต์เทา และมีขั้นตอนการลดอุณหภูมิ เพื่อ ควบคุมความคงที่ของสีปูน ซึ่งแบ่งขั้นตอนการผลิตได้เป็น 9 ขั้นตอนดังนี้

1. การบดย่อยวัตถุดิบ วัตถุดิบจำพวกหินปูน เกล็ดหิน และยิปซัม ซึ่งมีขนาดใหญ่จะถูกลำเลียงเข้าสู่ เครื่องบดย่อยให้มีขนาดเล็กลง เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป
2. การปรับสัดส่วน เป็นกระบวนการจัดอัตราส่วนของหินปูน เกล็ดหิน และทราย ให้ได้สัดส่วนที่ เหมาะสม
3. การบดละเอียด เป็นการบดผสมให้วัตถุดิบเป็นผง
4. การผสมเป็นเนื้อเดียวกัน วัตถุดิบผงที่ได้จากขั้นตอนก่อนหน้าจะถูกส่งเข้าสู่ระบบหมุนผสมเพื่อให้ได้ ส่วนผสมคงที่สม่ำเสมอ
5. การเผา วัตถุดิบผงที่ผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน จะถูกลำเลียงเข้าเตาเผาที่มีอุณหภูมิประมาณ 1,500 องศาเซลเซียส ได้เป็นปูนเม็ด
6. การลดอุณหภูมิและทำแห้ง ปูนเม็ดที่อุณหภูมิสูงจะถูกลดอุณหภูมิลง และนำไปอบไล่ความชื้น
7. การปรับสัดส่วน เป็นกระบวนการปรับอัตราส่วนระหว่างปูนเม็ดกับยิปซัมให้ได้สัดส่วนที่ถูกต้อง
8. การบดละเอียดขั้นสุดท้ายและผสมเป็นเนื้อเดียว ปูนเม็ดและยิปซัมที่ผ่านการปรับสัดส่วนแล้วจะถูก บดละเอียด และเข้าสู่กระบวนการหมุนผสมอีกครั้ง เพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์ขาวที่มีคุณภาพดีสม่ำเสมอ
9. การบรรจุ ส่วนใหญ่จะบรรจุใส่ถุงกระดาษขนาดมาตรฐาน 50 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยขั้นตอนที่เพิ่มขึ้นและอุณหภูมิการเผาที่สูงกว่าปูนซีเมนต์เทาทั่วไป จึงส่งผลให้ราคาของปูนซีเมนต์ขาวนั้นสูงกว่าปูนซีเมนต์เทา การนำไปใช้งานจึงแตกต่างกันออกไปเช่นกัน ซึ่งการใช้ปูนซีเมนต์ทั่วไปนั้นต้องนำไปผสมรวมกับวัสดุอื่น ให้ได้คุณสมบัติตรงตามเหมาะสมกับแต่ละงาน

2.7.3. การประยุกต์ใช้เบื้องต้น

แบ่งหลักๆตามวัสดุที่นำไปผสมได้ 3 แบบ คือ

1. ซีเมนต์เพสต์ (Cement paste) คือ การนำปูนซีเมนต์ไปผสมกับน้ำ ทำให้ได้ซีเมนต์เหลวในช่วงเวลาหนึ่ง โดยที่คุณสมบัติยังไม่เปลี่ยนแปลง เรียกซีเมนต์ช่วงนี้ว่า Dormant period หลังจากนั้น ซีเมนต์เพสต์จะเริ่มแข็งตัว ซึ่งยังคงมีความนิ่มอยู่ แต่ไม่สามารถไหลได้ ช่วงนี้เรียกว่า จุดแข็งตัวเริ่มต้น (Initial set) โดยเวลาตั้งแต่เริ่มผสมจนถึงจุดแข็งตัวเริ่มต้น เรียกว่า เวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial setting time) การก่อตัวของซีเมนต์เพสต์จะยังคงดำเนินไปถึงสภาพที่เป็นของแข็ง เรียกว่า จุดแข็งตัวสุดท้าย (Final set) และเวลาที่ทำให้ถึงช่วงนี้ เรียกว่า เวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final setting time) ซึ่งซีเมนต์เพสต์ยังคงแข็งตัวต่อไป และสามารถรับน้ำหนักได้ กระบวนการทั้งหมดนี้ เรียกว่า การแข็งตัว (Hardening) ซึ่งคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ขึ้นอยู่กับ คุณภาพของปูน อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ และความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ ซึ่งเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) โดยซีเมนต์เพสต์จะทำหน้าที่เสริมสร้างช่องว่างระหว่างมวลรวม หล่อลื่นคอนกรีตระหว่างเทหล่อ พร้อมทั้งให้กำลังแก่ปูนเมื่อแข็งตัว และป้องกันการซึมผ่านของน้ำ

2. มอร์ตาร์ (Mortar) คือ การนำปูนซีเมนต์ไปผสมน้ำ และทราย หรือกล่าวเป็นการนำซีเมนต์เพสต์ผสมทราย เหมาะสำหรับงานเทพื้นระดับพื้นผิวคอนกรีตที่ไม่ต้องการกำลังอัด หรือใช้เทหล่อเลี้ยงท่อก่อนลำเลียงคอนกรีต ซึ่งปัจจุบันมีการผลิตมอร์ตาร์สำเร็จรูปนั้นคือผสมปูนกับทรายในอัตราส่วนที่เหมาะสมแต่ละงาน เมื่อต้องการใช้สามารถนำมาผสมน้ำแล้วใช้ได้ทันที

3. คอนกรีต (Concrete) คือ การนำปูนซีเมนต์ไปผสมน้ำ ทราย และ หิน หรือกรวด ซึ่งเมื่อผสมแล้วจะเหลวอยู่ระยะหนึ่ง พอที่จะเทลงแบบหล่อให้มีรูปร่างตามต้องการได้ จากนั้นจะเริ่มแข็งตัวจนเป็นของแข็ง สามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้นตามอายุของคอนกรีต ซึ่งคุณภาพของคอนกรีตนั้นจะขึ้นอยู่กับ วัสดุองค์ประกอบ สัดส่วนผสม การผสม การลำเลียง การเทคอนกรีตลงแบบ การอัดแน่น รวมไปถึงการบ่ม

ซึ่งงานก่อสร้างส่วนใหญ่จะเห็นการใช้ปูนซีเมนต์อยู่ในรูปของคอนกรีต แต่ส่วนผสมหลักที่เป็นพื้นฐานคือซีเมนต์เพสต์ ที่ช่วยให้ปูนซีเมนต์สามารถไหลเข้าแบบได้ เนื่องจากจะมีลักษณะเหลวในช่วงแรก นอกเหนือจากส่วนผสมหลักจำพวกน้ำ ทราย หรือ หิน กรวด ข้างต้น ยังมีการใส่สารเติมแต่งต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงให้เหมาะสมกับงาน หรือให้มีคุณสมบัติบางอย่างตามต้องการ เช่น ใส่สารเติมแต่งให้ปูนซีเมนต์แข็งตัวเร็วขึ้น และยังคงความแข็งแรงอยู่ เพื่อลดระยะเวลาในการก่อสร้าง ซึ่งงานวิจัยนี้ที่สนใจการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์เพื่อให้เกิดความสามารถในการทำความสะดวกของตัวเองของพื้นผิว

ป้องกันความหม่นหมองจากการยิดเกาะของสารประกอบอินทรีย์ หรือฝุ่น ควัน ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ซึ่งในการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อความเข้ากันได้กับปูนซีเมนต์ในการผสม จึงมีการเติมสารที่ช่วยในการกระจายตัวจำพวกสารคู่ควบไซเลน เช่น Tetraethoxysilane (TEOS) 3-Aminopropyltriethoxysilane (APTES) หรือ N-2-Aminoethyl-3-aminopropyltrimethoxysilane (AEAPTMS) เป็นต้น

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 งานวิจัยที่ศึกษากระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง พร้อมทั้งปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเพื่อกำจัดสารประกอบอินทรีย์

- อีรการุณวงศ์ (2555) ได้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับวิธีการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ พร้อมทั้งศึกษาโครงสร้างของวัสดุนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ประกอบด้วยวิธีโซล - เจล วิธีไฮโดรเทอร์มอล วิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต และประยุกต์ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการสังเคราะห์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมเชิงแสงเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ พร้อมทั้งปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งพบว่าการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไอออนของโลหะ และธาตุกลุ่มอัลคาไลน์จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

- Kiatkitipong, et al. (2011) ศึกษาผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ ต่อลักษณะของอนุภาคนาโนไททาเนต และสมบัติการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงระหว่างริบบอนนาโนไททาเนตกับท่อนาโนไททาเนต โดยพบว่าโครงสร้างของอนุภาคนาโนไททาเนตเปลี่ยนจากเฟสผสมระหว่างอะนาเทส กับรูไทล์ เป็นอะนา-เทส โดยสมบูรณ์ ภายหลังจากแคลไซน์ด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้น นอกจากนั้นพบว่าการลดลงของพื้นที่ผิวอย่างชัดเจนในท่อนาโนไททาเนต ในขณะที่ค่าแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดมีค่าลดลงใกล้เคียงกัน เมื่อนำไปทดสอบประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ พบว่าปัจจัยในการกำจัดกรดออกซาลิก (Oxalic acid) นั้นขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่าเมื่อเทียบกับการกำจัดเมทานอล (Methanol)

- Xiong, et al. (2009) ศึกษาผลของการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาสองชนิด คือไททาเนียมไดออกไซด์ ท่อนาโนไททาเนต และท่อนาโนไททาเนตที่ผ่านการแคลไซน์ โดยพบว่าการดูดซับของเมทิลีน-บลูบนตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอมชนิดแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) :ซึ่งท่อนาโนไททาเนตที่ผ่านการแคลไซน์มีประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลูที่ดีที่สุด เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูงขึ้นภายหลังจากแคลไซน์ ซึ่งเมื่อมีการดูดซับของเมทิลีนบลูลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาจะก่อให้เกิดพันธะอ่อนๆระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา และเมทิลีนบลู จึงส่งผลให้การเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเพื่อกำจัดเมทิลีนบลูมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

- เทียนผ่องใส และคณะ (2551) ศึกษาปัจจัยต่อการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยศึกษา ระยะเวลาในการให้พลังงานแสง ปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์ และปัจจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่าความเป็นกรด เบส ของสารละลาย จากการศึกษาพบว่า การเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณ 5.0 กรัมต่อลิตร และให้พลังงานแสงต่อเนื่องที่ 4 ชั่วโมง สามารถกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ได้มากที่สุดประมาณ 30-50 เปอร์เซ็นต์

2.8.2 งานวิจัยที่ศึกษาการผสมไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับปูนซีเมนต์เพื่อคุณสมบัติการทำความสะอาดตัวเองของพื้นผิว (Self - cleaning)

- Lackhoff M., et al. (2003) ศึกษาคุณสมบัติการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง และคุณสมบัติด้านกำลังอัดของซีเมนต์ที่ผสมกับสารกึ่งตัวนำ 4 ชนิดคือ ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2 , Degussa P25) Hombikat UV 100 Coarse-grained anatase และ ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) พบว่าไททาเนียมไดออกไซด์ให้คุณสมบัติการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงดีที่สุด รองลงมาคือ Hombikat UV 100 ในส่วน Coarse-grained anatase และ ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) นั้นแทบไม่ให้คุณสมบัติการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง และเมื่อศึกษาในด้านกำลังหลังเติมสารกึ่งตัวนำทั้ง 4 ชนิดพบว่า ไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลให้ซีเมนต์มีกำลังอัดสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่เติม รองลงมาคือ Coarse-grained anatase และ Hombikat UV 100 ตามลำดับในส่วนของ การเติมซิงค์ออกไซด์กลับทำให้กำลังของซีเมนต์แย่ง

- Chen J., et al. (2009) ศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกของซีเมนต์ในการกำจัดออกไซด์ของไนโตรเจน โทลูอิน โดยกำจัดออกไซด์ของไนโตรเจนด้วยวิธีการเคลือบผิวคอนกรีตด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้น 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ พร้อมทั้งเปลี่ยนปริมาณของโทลูอินที่ผสมรวมกับออกไซด์ของไนโตรเจน พบว่าการเคลือบผิวคอนกรีตด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ที่ 10 เปอร์เซ็นต์สามารถกำจัดออกไซด์ของไนโตรเจนได้ดีกว่าที่ 5 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ปริมาณของโทลูอินที่รวมกับออกไซด์ของไนโตรเจนไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัด และเมื่อนำไททาเนียมไดออกไซด์ไปผสมรวมกับปูนซีเมนต์และทราายเป็นซีเมนต์มอร์ตาร์ แล้วทดลองหยดสีย้อมลงบนพื้นผิว จากนั้นให้พลังงานแสง พบว่าการผสมไททาเนียมไดออกไซด์ลงในซีเมนต์มอร์ตาร์ส่งผลให้สีย้อมที่ถูกหยดลงบนพื้นผิวจางลง เมื่อเทียบกับกรณีไม่ผสม ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวแปรหลักในที่ทำให้ซีเมนต์มีความสามารถในการทำความสะอาดตัวเองได้

- Smits M., et al. (2014) ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเพื่อย่อยสลายผงเขม่าบนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีความสามารถในการทำความสะอาดพื้นผิวตัวเอง ตัวแปรที่ศึกษามีทั้งหมด 3 ตัวแปร คือ ความเข้มข้นของไททาเนียมไดออกไซด์ (P25) ที่ถูกเคลือบไว้บริเวณพื้นผิวของซีเมนต์มอร์ตาร์ เปรียบเทียบระหว่าง 50 ไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตร กับ 250 ไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตัวแปรที่สองคือ ปริมาณของเขม่า ที่เป็นตัวอย่างสารอินทรีย์ประเภทของแข็ง เปรียบเทียบระหว่าง 2 ไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตร กับ 5 ไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตร และตัวแปรสุดท้ายที่ศึกษาคือ อัตราส่วนน้ำกับซีเมนต์ (W/C ratio) เปรียบเทียบระหว่าง 0.4 0.5 และ 0.6 พบว่าประสิทธิภาพจากการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ 50 ไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตรดีกว่า 250 ไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตร และสามารถกำจัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เขม่าได้สูงสุดที่ 2 ไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเขม่าที่พบได้จริงทั่วไปมีค่าประมาณ 0.8 ไมโครกรัมต่อตารางเมตร จึงกล่าวได้ว่าสามารถใช้การเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงย่อยสลายเขม่าทั่วไปได้จริง ในส่วนของอัตราส่วนซีเมนต์และน้ำการปริมอัตราส่วนเพิ่มส่งผลเล็กน้อยต่อการกำจัดเขม่า

- Janus M., et al. (2015) ศึกษากระบวนการโฟโตแคตตาไลติกของซีเมนต์เพสต์ ที่ผสมด้วยไนโตรเจน คาร์บอน ร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ เพื่อกำจัดสี reactive red 198 พร้อมทั้งนำไปแคลไซน์ที่ 300 และ 600 องศาเซลเซียส เทียบกับการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมด้วยไนโตรเจน คาร์บอน ร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีดีที่สุด

- Krishnan P., et al (2016) ศึกษาการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเพื่อย่อยสลายอนุภาคของมลพิษและความสามารถในการทำความสะอาดตัวเองของซิลิเกต และมอร์ตาร์ ที่ถูกเคลือบด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ โดยใช้สีย้อมโรดาไมด์บี (Rhoda mine B) เป็นสารตัวอย่าง ซึ่งพบว่าซิลิเกตที่ถูกเคลือบด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมได้เป็นที่น่าพอใจ ภายในห้องปฏิบัติการที่มีการให้พลังงานแสงถึง 2,500 ชั่วโมง เทียบเท่ากับระยะเวลา 2.4 ปีในแถบที่มีเขตอากาศร้อนชื้น เพื่อแสดงถึงความทนทาน

- Wang J., et al (2014) พบว่าปัญหามลภาวะทางสิ่งแวดล้อมส่งผลกระทบต่อสิ่งปลูกสร้างที่ผลิตจากปูนซีเมนต์เสริมใยแก้ว จึงนำสารผสมระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์และซิลิกอนไดออกไซด์มาเคลือบผิวของปูนซีเมนต์เสริมใยแก้วและทดลองกำจัดสีย้อมโรดาไมด์บี พบว่าการเคลือบปูนซีเมนต์เสริมใยแก้วด้วยสารผสมดังกล่าวมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสีย้อม และมีความเสถียร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ผลของไททาเนียมไดออกไซด์และ ริปบอนนาโนไททาเนตต่อการ ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ

3.1 ความเป็นมาของการศึกษาการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำด้วยไททาเนียมได- ออกไซด์ และริปบอนนาโนไททาเนต

จากการติดตามรายงานคุณภาพน้ำผิวดินในแหล่งน้ำหลายแห่งพบว่าส่วนใหญ่มีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์เสื่อมโทรม และมีแนวโน้มที่จำนวนแหล่งน้ำจะถูกจัดอยู่ในเกณฑ์เสื่อมโทรมสูงขึ้น โดยผลการตรวจวัดคุณภาพของแม่น้ำสายหลักของประเทศไทยอย่างแม่น้ำเจ้าพระยาพบว่าในจำนวนจุดตรวจวัด 10 จุดจาก 19 จุดตรวจวัด ได้รายงานค่าดัชนีคุณภาพน้ำ (Water Quality Index: WQI) ต่ำกว่า 60 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์เสื่อมโทรม [1] ทั้งนี้ปัญหาการเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำส่วนใหญ่เกิดจากการที่ชุมชน และอุตสาหกรรม มีการจัดการน้ำเสียที่อาจปนเปื้อนสารอินทรีย์ไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ส่งผลเสียต่อคุณภาพแหล่งน้ำที่ใช้ในการอุปโภค บริโภค รวมถึงสัตว์น้ำต่างๆ ทั้งนี้จึงควรตระหนักถึงการปรับปรุงการจัดการคุณภาพน้ำโดยเฉพาะการจัดการกับสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากในน้ำอย่างเหมาะสมก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

การจัดการสารอินทรีย์ที่ได้รับความสนใจอย่างมาก คือกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก ด้วยการให้แสง หรือพลังงานโฟตอนกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นสารกึ่งตัวนำ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะดูดซับโฟตอนที่ให้พลังงานเทียบเท่าหรือมากกว่าค่าพลังงานกระตุ้น ส่งผลให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ ถูกกระตุ้นไปยังแถบคอนดักชัน แถบวาเลนซ์จะเกิดสภาวะขาดอิเล็กตรอน เรียกว่า โฮล เมื่อโฮลสัมผัสโมเลกุลของน้ำจะสามารถออกซิไดซ์โมเลกุลน้ำเกิดเป็นไฮดรอกซิลแรดิคัล ในขณะที่แถบคอนดักชันที่มีอิเล็กตรอนนั้น อิเล็กตรอนสามารถรีดิวซ์โมเลกุลของออกซิเจน เป็นซูเปอร์ออกไซด์แรดิคัล โดยทั้งไฮดรอกซิลแรดิคัล และซูเปอร์ออกไซด์แรดิคัล สามารถย่อยสลายโครงสร้างของสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างเป็นพิก ให้มีโครงสร้างที่ไม่เป็นพิก กล่าวคือไม่ทิ้งกากของเสียเหมือนวิธีการอื่นๆ เช่น การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ หรือการใส่สารเคมีให้ตกตะกอน เป็นต้น ดังนั้นกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกจึงเป็นวิธีการที่นำมาใช้เพื่อการจัดการสารอินทรีย์ในน้ำสำหรับงานวิจัยนี้

สารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้ในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกนั้นมีหลากหลายชนิด เช่น สารประกอบไททาเนียมออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งสารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้ในงานวิจัยคือ ไททาเนียมไดออกไซด์ เนื่องจาก ราคาถูก และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่คุณสมบัติทางกายภาพของไททาเนียมไดออกไซด์ ทั้งพื้นที่ผิวจำเพาะในการดูดซับโฟตอน ลักษณะโครงสร้างผลึก รวมถึงค่าพลังงานกระตุ้น ถือเป็นข้อจำกัดที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก จึงจำเป็นต้องปรับปรุงคุณสมบัติบางประการเพื่อขยายขีดจำกัดในการทำปฏิกิริยา โดยงานวิจัยนี้ได้นำไททาเนียมไดออกไซด์ มาสังเคราะห์ใหม่เป็นริปบอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นาโนไททาเนต เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะในการดูดซับโฟตอน ซึ่งมีผลต่อการสร้างคู่อิเล็กตรอน โฮล ที่มีผลต่อการเกิดแรดิคอลที่สามารถย่อยสลายโครงสร้างของสารอินทรีย์ได้ อีกทั้งโครงสร้างดังกล่าวยังมีความเสถียรต่ออนุมูลสูง

วิธีการสังเคราะห์ริบบอนนาโนไททาเนตในงานวิจัยนี้คือ กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล เนื่องจากมีวิธีการสังเคราะห์ไม่ยุ่งยาก สามารถควบคุมลักษณะโครงสร้างระดับนาโนเมตรได้ อีกทั้งอนุภาคที่ได้จากการสังเคราะห์มีความบริสุทธิ์ และมีความละเอียดสูง โดยไม่จำเป็นต้องผ่านการเผา หรือบดย่อย เป็นการลดพลังงาน และลดต้นทุนในการสังเคราะห์ ซึ่งสภาวะในการสังเคราะห์ริบบอนนาโนไททาเนต คือ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา 24 ชั่วโมง [16]

งานวิจัยในส่วนนี้จึงเป็นการปรับปรุงพื้นที่ผิวจำเพาะของไททาเนียมไดออกไซด์ ด้วยการสังเคราะห์เป็นริบบอนนาโนไททาเนต โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกที่นำมาใช้ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก ซึ่งสารอินทรีย์ที่นำมาเป็นสารตัวอย่างคือ สารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ และเมทิลีนบลู เนื่องจากเป็นสารอินทรีย์ที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมกระดาษ เป็นต้น อีกทั้งสารอินทรีย์ทั้งสองมีความสามารถในการละลายน้ำ โดยเฉพาะฟอร์มาลดีไฮด์สามารถละลายน้ำได้ถึง 100 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร ในอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส [7]

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂ anatase 100%) บริษัท Carlo Erba
- 3.2.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Ajax Finechem Pty Ltd
- 3.2.3 3-Aminopropyl triethoxysilane (APTES ≥ 98.0%) บริษัท ALDRICH Chemistry
- 3.2.4 สารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Qrec
- 3.2.5 อะเซทิลอะซีโตน เกรดวิเคราะห์ บริษัท Sigma - Aldrich
- 3.2.6 สีย้อม (Methylene blue, Union Chemical 1986)
- 3.2.7 น้ำปราศจากไอออน

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.3.1 ตู้อบ
- 3.3.2 เครื่องยูวี - วิสิเบิล สเปกโตรมิเตอร์ (UV - Vis Spectrophotometer)
- 3.3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)
- 3.3.4 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X - ray Diffractometer: XRD)
- 3.3.5 เครื่องวัดการดูดซับก๊าซ (BET)
- 3.3.6 เครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.7 เครื่องปั่นกวน

3.3.8 แท่งแม่เหล็ก

3.3.9 เครื่องเหวี่ยงสารให้ตกตะกอน (Centrifuge)

3.3.10 ถ้วยเซรามิก

3.3.11 หลอดเมอร์คิวรี 500 วัตต์ (Mercury lamp) ความยาวคลื่น (380 - 800 นาโนเมตร)

3.3.12 อุปกรณ์เครื่องแก้ว (เช่น บีกเกอร์ ขวดวัดปริมาตร แท่งแก้วคนสาร เป็นต้น)

3.4 การสังเคราะห์ริบบอนนาโนไททานเดด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

3.4.1 ผสมผงไททานเดียมไดออกไซด์ 0.5 กรัม รวมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที

3.4.2 เมื่อครบตามเวลาเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที เทสารที่ได้ลงในเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอล ดังรูป 3.1 แล้วนำเข้าตู้อบเพื่อผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.4.3 เมื่อครบ 24 ชั่วโมง นำเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอลออกจากตู้อบและปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเปิดเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งภายในเครื่องปฏิกรณ์จะเกิดการแยกชั้นของผลิตภัณฑ์ประกอบด้วยสารละลาย และของแข็ง เทสารละลายออก

3.4.4 จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งจากข้อข้างต้นออกมาผสมน้ำปราศจากไอออนครั้งละ 400 มิลลิลิตร จากนั้นทำให้ตกตะกอนออกด้วยเครื่องเหวี่ยงสารตกตะกอน ทำซ้ำจนค่าของสารผลิตภัณฑ์แสดงความเป็นกรด - เบส ประมาณ 7 ได้ตะกอนของผลิตภัณฑ์ที่มีค่าเป็นกลาง

3.4.5 นำตะกอนที่ได้อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตะกอนที่อบแห้งได้ มาบดเป็นผงละเอียดเพื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างทางผลึก และใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงต่อไป



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมี

3.5.1 การวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกของสารตั้งต้น และรีบบอนนาโนไททาเนต (XRD) ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์เท่ากับ 1.5406 นาโนเมตร ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์โดยไม่ทำลายสารตัวอย่าง โดยวิเคราะห์จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างในมุมต่าง ๆ กัน จากนั้นนำผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน เพื่อระบุโครงสร้างผลึกของสารประกอบตัวอย่าง

3.5.2 การวิเคราะห์สัณฐาน และลักษณะพื้นผิวของอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลที่แสดงผลอยู่ในรูปของภาพสามมิติ ซึ่งภาพที่ได้เกิดจากการตรวจวัดอิเล็กตรอนจากผิวหน้าของตัวอย่าง พร้อมทั้งวิเคราะห์หาปริมาณธาตุในตัวอย่างด้วยชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDX)

3.5.3 การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว และขนาดรูพรุนด้วยเครื่องวัดการดูดซับก๊าซ (BET) เป็นการวัดปริมาตรก๊าซที่ถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวของอนุภาค โดยก๊าซที่นิยมใช้คือก๊าซไนโตรเจน ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิจุดเดือดของก๊าซไนโตรเจน (ประมาณ -196 องศาเซลเซียส) ขั้นตอนแรกต้องไล่ก๊าซที่ไม่ใช่ไนโตรเจนเหลวออกจากพื้นผิวของอนุภาค จากนั้นจึงให้พื้นผิวดูดซับก๊าซไนโตรเจน และวัดปริมาณการดูดซับจากปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่หายไปเมื่อป้อนสู่ออนุภาค หรือวัดจากปริมาณก๊าซที่คายออกมาตอนไล่ก๊าซออกจากอนุภาค

3.6 การย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก

3.6.1 นำตัวเร่งปฏิกิริยาจำนวน 0.01 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 400 มิลลิลิตร ที่บรรจุน้ำปราศจากไอออนปริมาณ 300 มิลลิลิตร

3.6.2 นำบีกเกอร์ที่เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาไว้ ใส่ในกล่องที่บแสงที่ต่อกับหลอดไฟปรอท แล้วปั่นกวนสารละลายภายใต้แสงเป็นเวลา 20 นาที เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนในตัวเร่งปฏิกิริยา และให้ตัวเร่งปฏิกิริยาดูดซับพลังงานจนเกิดคู่อิเล็กตรอน และโฮล

3.6.3 เมื่อครบเวลา 20 นาที ปิดสวิตซ์ไฟ และเปิดกล่องที่บแสง เพื่อให้อากาศเข้าไปทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยา โดยโมเลกุลของออกซิเจนในอากาศจะถูกรีดิวซ์ด้วยอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบคอนดักชัน เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออนที่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ จากนั้นปั่นกวนสารในบีกเกอร์ต่อเป็นเวลา 10 นาที

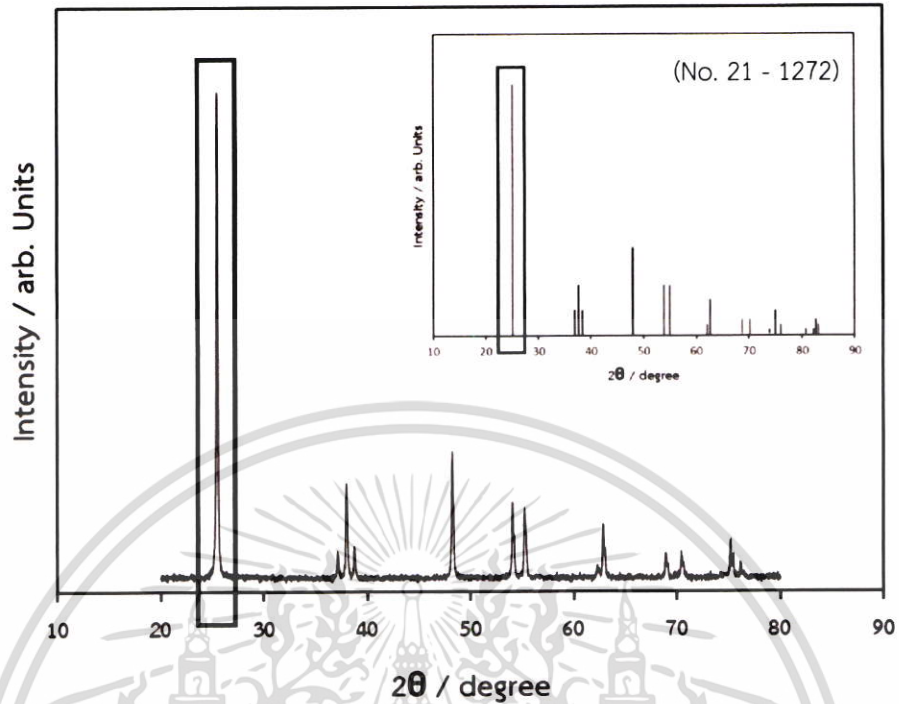
3.6.4 เติมสารอินทรีย์ลงในสารละลายของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมไว้ (ฟอร์มาลดีไฮด์ และเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 800 มิลลิกรัมต่อลิตร) จากนั้นเริ่มเก็บสารตัวอย่างทุกๆ 5 นาทีเป็นเวลาครึ่งชั่วโมง จากนั้นเก็บสารตัวอย่างทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.6.5 นำสารตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้น โดยสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ใช้วิธีการทำให้เกิดสี ในส่วนของเมทิลีนบลูวิเคราะห์ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรมิเตอร์ (ในการทดลองแต่ละสภาวะมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง)

3.7 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของสารตั้งต้น (ไททาเนียมไดออกไซด์ แบบอะนาเทส)

สารตั้งต้นไททาเนียมไดออกไซด์ มีลักษณะเป็นผงสีขาว ละเอียด ฟุ้งกระจายง่าย เมื่อผ่านการวิเคราะห์โครงสร้างภายในด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD) พบว่ามีตำแหน่งของการเกิดพีคสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนมาตรฐานหมายเลข 21 - 1272 ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทส บ่งชี้ได้จากพีคสำคัญในตำแหน่ง $2 - \theta$ (Theta) เท่ากับ 25° จากนั้นนำไททาเนียมไดออกไซด์ไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 3.3 (ก) และ 3.3 (ข) โดยรูปที่ 3.3 (ก) แสดงลักษณะพื้นผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า พบว่ามีการกระจุกตัว พร้อมทั้งกระจายตัว โดยมีลักษณะสัณฐานที่หลากหลาย ไม่สามารถระบุรูปร่างได้อย่างชัดเจน เมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 30,000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (ข) จึงสามารถสรุปได้ว่าไททาเนียมไดออกไซด์ที่นำมาเป็นสารตั้งต้นมีลักษณะสัณฐานชนิดไม่สามารถระบุสัณฐานได้ (Random shape) และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 197 นาโนเมตร เมื่อวัดพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเครื่องวัดการดูดซับก๊าซ (BET) มีค่าเท่ากับ 10 ตารางเมตรต่อกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 โครงสร้างผลึกของโพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต แบบอะนาเทส (XRD pattern: No.21 - 1272)



(ก)

(ข)

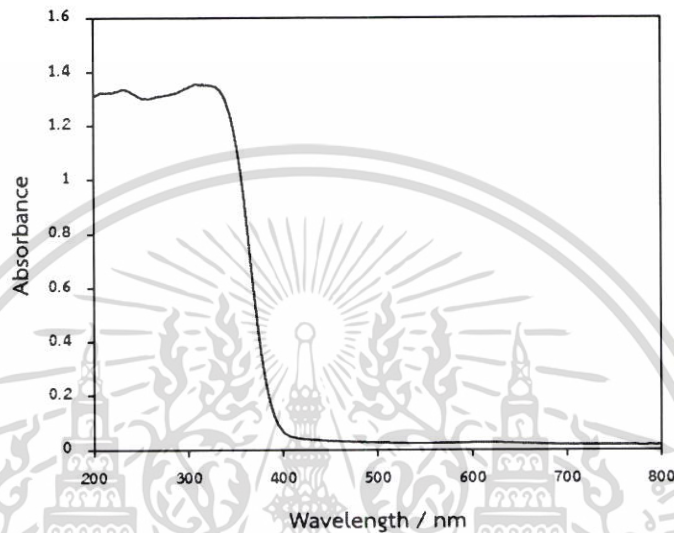
รูปที่ 3.3 ลักษณะสัณฐาน และพื้นผิวของโพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้เป็นสารตั้งต้น

(ก) กำลังขยาย 5000 เท่า (ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า

รูปที่ 3.4 แสดงเส้นสเปกตรัมของโพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต จากเครื่องยูวี - วิสิเบิล สเปกโตรมิเตอร์ พบว่าโพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมีความสามารถในการดูดซับโฟตอนได้ดีที่ความยาวคลื่นสูงสุด 387.5 นาโนเมตร เมื่อคำนวณค่าพลังงานที่ต้องใช้ในการกระตุ้นเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาจากสมการ 3.1 พบว่าต้องใช้พลังงานอย่างน้อย 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ค่าความยาวคลื่น และพลังงานกระตุ้นที่วัดได้ในงานวิจัยนี้มีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใกล้เคียงกับการศึกษาของ Kiatkittipong, K. et. al. (2011) ที่ใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ชนิดโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์โซเดียมไททาเนต และไฮโดรเจนไททาเนต เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสามที่มีต่อกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก



รูปที่ 3.4 เส้นสเปกตรัมของไททาเนียมไดออกไซด์

$$E = \frac{1240}{\lambda} \quad (3.1)$$

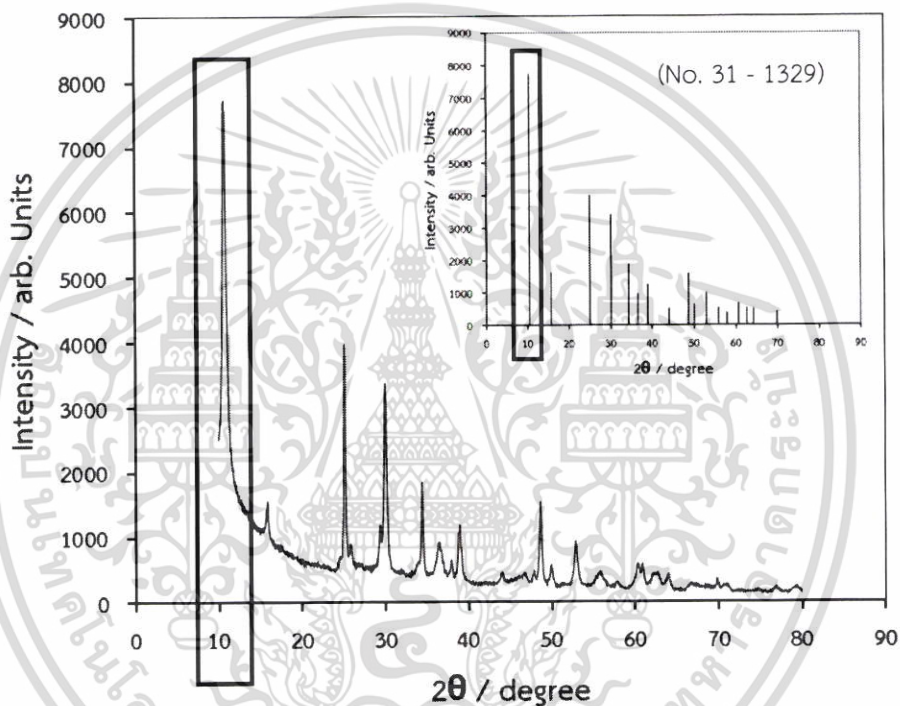
เมื่อ E คือ พลังงานที่ใช้ในการกระตุ้น หรือ Band gap energy หน่วย อิเล็กตรอนโวลต์ (eV)
 λ คือ ความยาวคลื่น หน่วย นาโนเมตร

3.8 ผลการสังเคราะห์ริบบอนนาโนไททาเนต

ลักษณะทางกายภาพของสารสังเคราะห์หลังจากนำสารตั้งต้นไททาเนียมไดออกไซด์ แบบอะนาเทสทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง [16] พบว่าสารสังเคราะห์มีลักษณะเป็นผงสีขาว เช่นเดียวกับสารตั้งต้น แต่มีความละเอียดมากขึ้น และเมื่อส่องตัวอย่างมาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย XRD พิกที่ไดจากการวิเคราะห์มีตำแหน่งสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนมาตรฐานหมายเลข 31 - 1329 ดังแสดงในรูปที่ 3.5 แสดงให้เห็นว่าสารสังเคราะห์ที่ได้มีโครงสร้างแบบโซเดียมไททาเนต ($\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$) โดยมีพิกที่เห็นได้ชัดเจนอยู่ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่ง 2 – Theta (2θ) ประมาณ 10.7° 25° 30° 34° และ 48.6° สอดคล้องกับงานวิจัยของ Thennarasu. S. et. al. (2013) ที่ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณลักษณะ และประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของท่อไททานิต และไททานิตนาโนริบบอน: ซึ่งสังเคราะห์ไททานิตนาโนริบบอนด้วยการทำปฏิกิริยาระหว่างไททานเนียมไดออกไซด์ กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ภายใต้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส .ใช้เวลา 24 ชั่วโมง [26] โดยพิกแรกที่เห็นได้ชัดเจน แสดงความเป็นชั้นของโครงสร้างไททานิตที่สังเคราะห์ได้ จากการแทรกตัวของประจุบวกของโลหะที่นำมาทำปฏิกิริยาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ในที่นี้คือประจุของโซเดียม จากโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นสารตั้งต้น

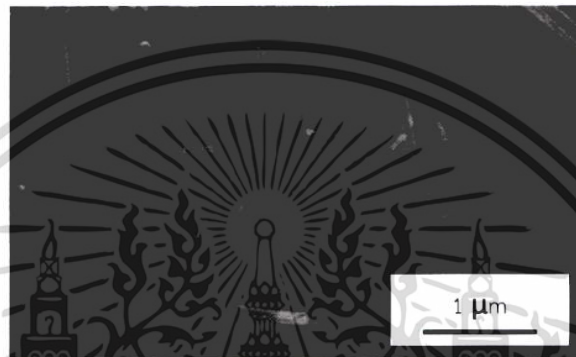


รูปที่ 3.5 โครงสร้างผลึกของโซเดียมไททานิต (XRD pattern: No.31-1329)

เมื่อวิเคราะห์ลักษณะสัณฐาน และลักษณะพื้นผิวของไททานิตด้วย SEM ดังแสดงในรูปที่ 3.6 พบว่าลักษณะสัณฐานที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นแผ่นคล้ายริบบิ้น หรือไม้บรรทัด จึงเรียกสารที่ผ่านการสังเคราะห์นี้ว่า ริบบอนนาโนไททานิต โดยมีขนาดความกว้าง และความยาวเฉลี่ยเท่ากับ 118 นาโนเมตร และ 1,033 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Sluban. M. et. al. (2015) ที่ศึกษาการควบคุมโครงสร้างของไททานเนียมไดออกไซด์ในไตรดให้มีโครงสร้างเป็นนาโนริบบอน ด้วยวิธีการผ่านแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งควบคุมปริมาณการไหลของแก๊สไนโตรเจน และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยนาโนริบบอนที่ได้มีความกว้างอยู่ที่ 40 – 250 นาโนเมตร มีความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยาวอยู่ที่ 500 – 3,000 นาโนเมตร [21] ที่สังเคราะห์ได้ในขณะที่ Thennarasu. S. et. al. (2013) ได้สังเคราะห์ไททานาโนริบบอนด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ด้วยอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เช่นเดียวกับงานวิจัยนี้ แต่ได้ไททานาโนริบบอนที่มีความกว้าง และความยาวเฉลี่ยอยู่ที่ 10 ถึง 400 นาโนเมตร [26] ทั้งนี้อาจเกิดจากวิธีการในการปรับค่าความเป็นกรด – เบส ด้วยกรดไฮโดรคลอริกในงานวิจัยของ Thennarasu. S. et. al. (2013) ที่สามารถทำให้โครงสร้างที่ได้เกิดการแตกหัก เนื่องจากความเป็นกรดได้ จึงมีขนาดเล็ก และสั้นกว่างานวิจัยนี้ที่ปรับค่าความเป็นกรด – เบส ด้วยน้ำปราศจากไอออน



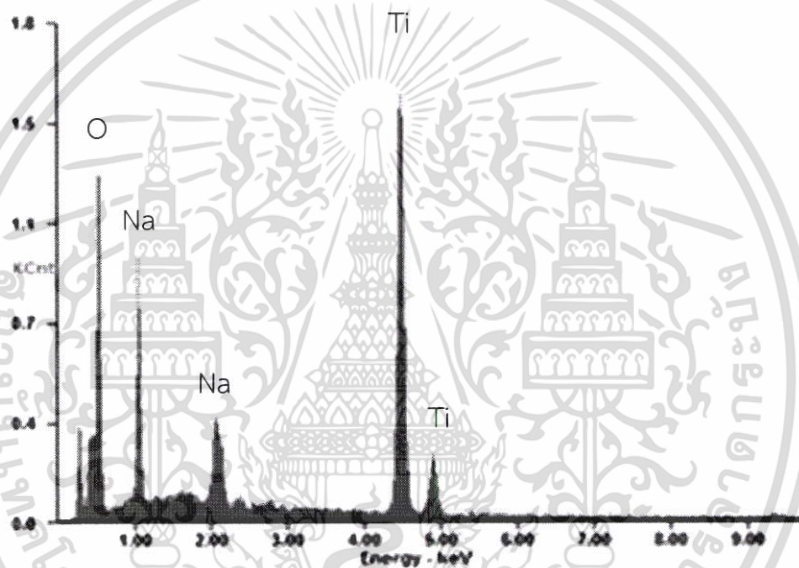
รูปที่ 3.6 ลักษณะสัณฐาน และลักษณะพื้นผิวของริบบอนนาโนไททานา

เมื่อศึกษาปริมาณสัดส่วนของธาตุภายในริบบอนนาโนไททานา ด้วยวิธีตรวจวัดพลังงานที่ถูกคายออกมาจากอิเล็กตรอน (EDX) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 เพื่อยืนยันว่ามีโซเดียมอยู่ในโครงสร้างของริบบอนนาโนไททานา ซึ่งพบว่าสัดส่วนเชิงปริมาณของโซเดียมต่อไททานเนียมออกไซด์ มีค่าประมาณ 1 : 4 และเมื่อนำอนุภาคของริบบอนนาโนไททานาไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งแสดงเส้นสเปกตรัมของไททานนาโนริบบอนที่สังเคราะห์ได้ เทียบกับไททานเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทส ที่เป็นสารตั้งต้น พบว่าไททานนาโนริบบอนดูดกลืนแสงอยู่ในช่วงความคลื่นต่ำลงอยู่ที่ 335.1 นาโนเมตร และจากสมการ 3.1 สามารถคำนวณค่าพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 3.7 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งต้องใช้พลังงานสูงขึ้นเมื่อเทียบกับไททานเนียมไดออกไซด์ที่เป็นสารตั้งต้น แต่ในขณะเดียวกันริบบอนนาโนไททานาที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้นจาก 10 ตารางเมตรต่อกรัม เป็น 18 ตารางเมตรต่อกรัม โดยสามารถสรุปผลการวิเคราะห์คุณลักษณะ เพื่อพิจารณาคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงได้ดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

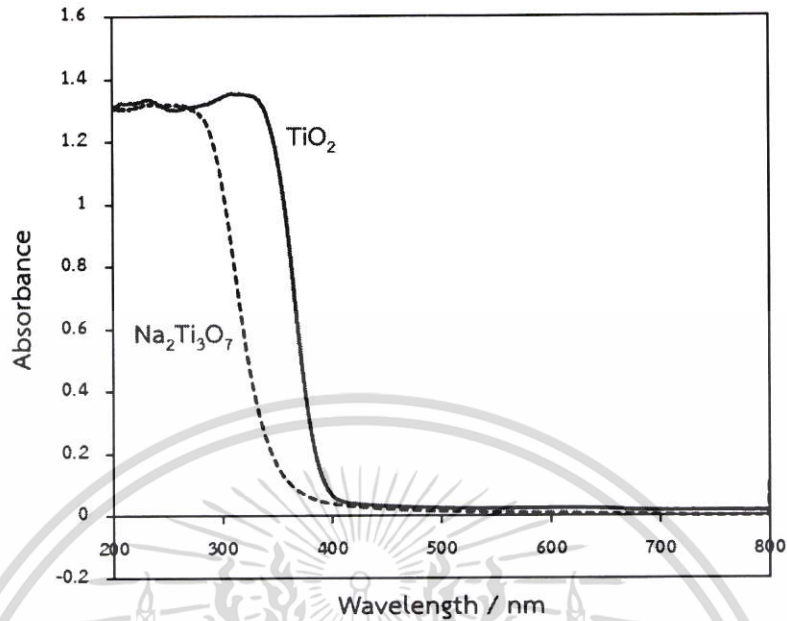
ตารางที่ 3.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง	ค่าพลังงานกระตุ้น (อิเล็กตรอนโวลต์)	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	พื้นที่ผิว (ตารางเมตร/กรัม)
ไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂)	3.20	387.5	10.0
โซเดียมไททานเต (Na ₂ Ti ₃ O ₇)	3.70	335.1	18.0



รูปที่ 3.7 กราฟสัดส่วนของธาตุแต่ละชนิดในริบบอนนาโนไททานเต

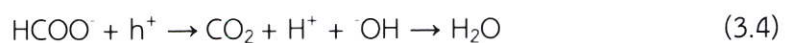
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



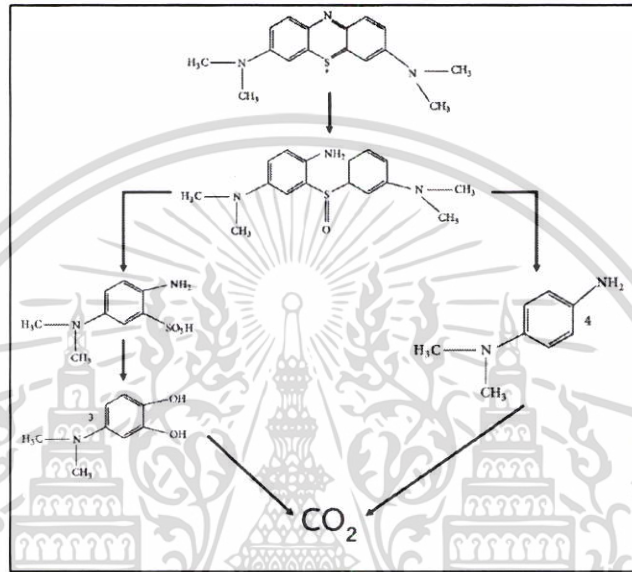
รูปที่ 3.8 เส้นสเปกตรัมของไททาเนียมไดออกไซด์ (เส้นทึบ) และริบบอนนาโนไททาเนต (เส้นประ)

3.9 ผลของไททาเนียมไดออกไซด์ และริบบอนนาโนไททาเนต ต่อการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ และเมทิลีนบลู

ไททาเนียมไดออกไซด์ และริบบอนนาโนไททาเนต ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ถูกนำมาทดสอบประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำ โดยมีฟอร์มาลดีไฮด์ และเมทิลีนบลู เป็นสารอินทรีย์ตัวอย่าง และใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง 0.01 กรัม กำจัดสารอินทรีย์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 800 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที โดยกลไกการย่อยสลายด้วยการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของฟอร์มาลดีไฮด์แสดงในสมการที่ 3.2 3.3 และ 3.4 ในส่วนกลไกการย่อยสลายด้วยการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของเมทิลีนบลูแสดงในสมการที่ 3.5 และ 3.6 โดยได้ผลิตภัณฑ์เป็นลำดับดังรูปที่ 3.9



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

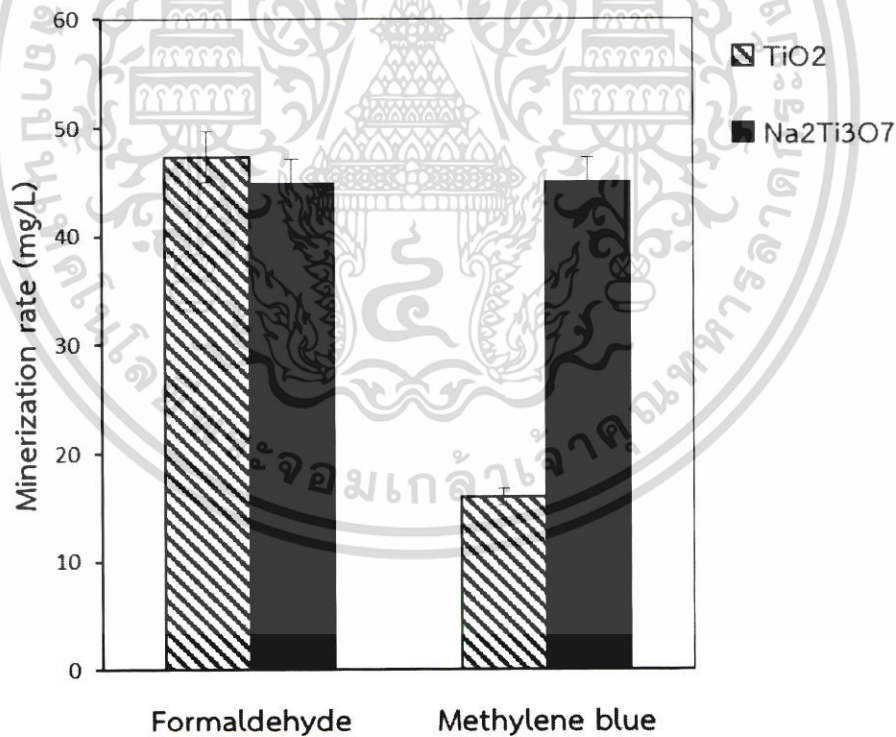


รูปที่ 3.9 ลำดับของผลิตภัณฑ์จากการย่อยสลายเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก

จากนั้นวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เหลือในสารละลาย โดยแสดงผลในรูปของปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายไป 90 เปอร์เซ็นต์ (R90) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์ กับ ไรบอบนาโนไททาเนต พบว่าไททาเนียมไดออกไซด์สามารถกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ได้ 47 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ไรบอบนาโนไททาเนตสามารถย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ได้ 45 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงให้เห็นว่าไททาเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ดีกว่าไรบอบนาโนไททาเนตเพียงเล็กน้อย แม้ไรบอบนาโนไททาเนตจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะในการเร่งปฏิกิริยามากกว่าไททาเนียมไดออกไซด์ ทั้งนี้เมื่ออ้างอิงจากงานวิจัยของ Tran. H. et al. (2006) ที่ศึกษาผลของไททาเนียมไดออกไซด์ และไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการเติมซิลเวอร์ (Ag) เข้าไปในโครงสร้าง ต่อการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างแตกต่างกันด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก ซึ่งรายงานว่าฟอร์มาลดีไฮด์ที่อยู่ในกลุ่มของสารประกอบคาร์บอกซิลิก มีความสามารถในการดูดซับลงบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาดี และสามารถทำปฏิกิริยากับไฮไลต์ที่เกิดจากการให้พลังงานเพื่อกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา [13] ดังนั้นพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นของไรบอบนาโนไททาเนต ส่งผลต่อการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ และเมื่อพิจารณาผลในตารางที่ 3.1 พบว่าไททาเนียมไดออกไซด์มีค่าพลังงานกระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ที่ 3.2 อิเล็กตรอนโวลท์ สามารถดูดซับพลังงานโฟตอนได้ที่ความยาวคลื่นสูงสุดที่ 387.5 นาโนเมตร ในขณะที่ริบบอนนาโนไททาเนตมีค่าพลังงานกระตุ้นสูงกว่าอยู่ที่ 3.7 อิเล็กตรอนโวลท์ สามารถดูดซับพลังงานโฟตอนได้ที่ความยาวคลื่นสูงสุดที่ประมาณ 335 นาโนเมตร ดังนั้นค่าพลังงานกระตุ้นที่ต่ำกว่าของไททาเนียมไดออกไซด์จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่า และเมื่อพิจารณาช่วงความยาวคลื่นแสงของหลอดเมอร์คิวรีที่ใช้ในงานวิจัยดังแสดงในตารางที่ 3.2 ประกอบ จึงเห็นได้ว่าไททาเนียมไดออกไซด์สามารถดูดซับโฟตอนของแสงได้ในสองช่วงความยาวคลื่นคือ ที่ความยาวคลื่น 344 และ 382 นาโนเมตร ในขณะที่ริบบอนนาโนไททาเนตดูดซับโฟตอนของแสงได้เพียงที่ความยาวคลื่น 344 นาโนเมตรเท่านั้น ดังนั้นไททาเนียมไดออกไซด์จึงสามารถเกิดคู่อิเล็กตรอน - โฮล ได้ดีเมื่อเทียบกับริบบอนนาโนไททาเนต ในทำนองเดียวกันไททาเนียมไดออกไซด์จะสามารถผลิตไฮดรอกซิลแรดิคัลได้ดีกว่าริบบอนนาโนไททาเนตเช่นกัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองต่อการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ไม่แตกต่างกันมาก และจึงกล่าวได้ว่าประสิทธิภาพในการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงนั้นเป็นผลจากพื้นที่ผิวที่มากขึ้น และค่าพลังงานกระตุ้นที่ต่ำเนื่องจากสามารถผลิตคู่อิเล็กตรอน - โฮลได้ดี



รูปที่ 3.10 อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ 90 เปอร์เซ็นต์ ของไททาเนียมไดออกไซด์ เทียบกับริบบอนนาโนไททาเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นแสงและความเข้มสัมพัทธ์ของหลอดเมอร์คิวรีที่

ความยาวคลื่น 300 ถึง 450 นาโนเมตร

ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)
344	27
382	24
413	49

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการย่อยสลายเมทิลีนบลูระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์ กับ ริปบอนนาโนไททาเนต ดังแสดงในรูปที่ 3.10 พบว่าไททาเนียมไดออกไซด์สามารถกำจัดเมทิลีนบลูได้ 16 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ริปบอนนาโนไททาเนตสามารถย่อยสลายเมทิลีนบลูได้ถึง 45 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวที่มากกว่าของริปบอนนาโนไททาเนต มีผลต่อการย่อยสลายเมทิลีนบลู แม้ว่าริปบอนนาโนไททาเนตต้องใช้พลังงานกระตุ้นที่สูงกว่า และดูดซับโฟตอนได้ที่มีความยาวคลื่นเพียงช่วงเดียว จึงเป็นผลให้ผลิตไฮดรอกซิลเรดิคัลได้น้อยกว่า เมื่อเทียบกับไททาเนียมไดออกไซด์ แต่กลับให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายเมทิลีนบลูได้สูงกว่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ Xiong, L. et. al. (2009) ที่ศึกษาการย่อยสลายเมทิลีนบลูด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 46.9 ตารางเมตรต่อกรัม พร้อมทั้งสังเคราะห์ไททาเนตเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าเท่ากับ 157.9 ตารางเมตรต่อกรัม จากนั้นได้รายงานว่าการเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับส่งผลให้สามารถย่อยสลายเมทิลีนบลูได้มากขึ้น [17] พร้อมทั้งเมื่อพิจารณาการย่อยสลายเมทิลีนบลูซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่ จำเป็นใช้เรดิคอลในปริมาณมากเนื่องจากการย่อยสลายหลายขั้นตอน ดังรูปที่ 3.9 กล่าวได้ว่าการย่อยสลายเมทิลีนบลูหนึ่งโมเลกุล จำเป็นต้องใช้เรดิคอลจำนวนมาก ดังนั้นไททาเนียมไดออกไซด์ที่สามารถผลิตเรดิคอลได้มากจึงสามารถกำจัดเมทิลีนบลูได้เล็กน้อย โดยจากผลงานวิจัยนี้สามารถกล่าวได้ว่าประสิทธิภาพในการย่อยสลายเมทิลีนบลูด้วยการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงนั้นขึ้นกับขนาดพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อให้เมทิลีนบลูดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและถูกย่อยสลายโดยโฮล

กล่าวโดยสรุปคือ การย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ และเมทิลีนบลูด้วยการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงนั้น การเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงมีผลต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ อีกทั้งมีผลอย่างมากต่อการย่อยสลายเมทิลีนบลู และในทำนองเดียวกันค่าพลังงานกระตุ้นที่ต่ำของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่ส่งผลให้ผลิตไฮดรอกซิลเรดิคัลได้มาก ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์มากกว่าประสิทธิภาพในการย่อยสลายเมทิลีนบลู

บทที่ 4

ผลของไททาเนียมไดออกไซด์ และไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ ต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์บนพื้นผิวของซีเมนต์เพสต์

4.1 ความเป็นมาของการศึกษาผลของไททาเนียมไดออกไซด์ และไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ ต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์บนพื้นผิวของซีเมนต์เพสต์

ปูนซีเมนต์ถือเป็นวัสดุหลักในงานก่อสร้างหลากหลายประเภท ตั้งแต่งานซ่อมแซมขนาดเล็กจนถึงงานก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่ รวมไปถึงการนำไปผสมกับวัสดุก่อสร้างอื่นเพื่อให้ได้คุณสมบัติใหม่ที่เหมาะสมกับงานที่ต้องการ เช่น การนำปูนซีเมนต์ไปผสมน้ำ หวาย และหิน เป็นคอนกรีตเพื่อสร้างเสาหรือสะพาน เป็นต้น โดยปูนซีเมนต์ที่มีจำหน่ายในปัจจุบันนั้นแบ่งหลักๆเป็น ปูนซีเมนต์เทา และปูนซีเมนต์ขาว ซึ่งมีส่วนประกอบหลักเหมือนกัน คือ หินปูน หินดินดาน ดินลูกรัง และทราย ส่งผลให้คุณสมบัติโดยรวมของปูนซีเมนต์ทั้งสองประเภทนั้นใกล้เคียงกัน เพียงแต่ปูนซีเมนต์ขาวมีการควบคุมปริมาณของเหล็กออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ อีกทั้งยังถูกเผาในอุณหภูมิที่สูงกว่าปูนซีเมนต์เทา และมีขั้นตอนการลดอุณหภูมิ ทั้งนี้เพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มีสีขาวอย่างคงที่ ทำให้ปูนซีเมนต์ขาวมีต้นทุนการผลิตที่สูงกว่าปูนซีเมนต์เทา ด้วยเหตุนี้งานก่อสร้างที่ต้องใช้ปูนซีเมนต์จำนวนมากจึงนิยมใช้ปูนซีเมนต์เทา มากกว่าปูนซีเมนต์ขาวที่มีราคาสูงกว่า

โดยปูนซีเมนต์ขาวนิยมนำมาใช้ในงานฉาบผนังที่ต้องการโชว์ผิวผนังสีขาว งานปูนปั้น หรือนำไปผสมสีเฉดต่าง ๆ ใช้ในงานฉาบสี เพื่อให้ได้สีอย่างชัดเจน รวมไปถึงการทำหินขัด กรวดล้าง ทรายล้าง และสามารถนำมาเป็นวัสดุประเภทกาซีเมนต์ที่ใส่ยาแนวกระเบื้อง แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปบริเวณพื้นผิวขาวอาจเกิดความหมองจางจากคราบการเกาะของฝุ่น ควัน หรือสิ่งสกปรก ที่สามารถเห็นได้ชัดเจน บั่นทอนความสวยงาม อีกทั้งเป็นแหล่งสะสมเชื้อแบคทีเรีย หรือสารอินทรีย์ต่าง ๆ ซึ่งบางชนิดสามารถยึดเกาะได้ดี เช่น สารอินทรีย์จำพวกสีย้อม เมทิลีนบลู (Methylene blue)

ด้วยเหตุนี้จึงมีงานวิจัยที่ศึกษาการใส่สารเติมแต่งลงในปูนซีเมนต์ เพื่อคุณสมบัติการทำความสะอาดตัวเอง (Self-cleaning) เช่นงานวิจัยของ Sanchez. F. (2009) ที่เติมไททาเนียมไดออกไซด์ลงในส่วนผสมของคอนกรีตและพบว่าสามารถทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการทำความสะอาดตัวเองจากมลภาวะในอากาศ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide) ไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) แอลดีไฮด์ (Aldehydes) เป็นต้น [12] โดยความสามารถในการทำความสะอาดตัวเองของพื้นผิวนั้นเกิดจากกระบวนการโฟโตแคตตาลิติก (Photo catalytic) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันขั้นสูงที่สามารถขจัดความเป็นพิษของสารประกอบอินทรีย์ด้วยการทำลายโครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบจากที่มีความเป็นพิษให้ไม่เป็นพิษ ด้วยการใช้สารกึ่งตัวนำ (Semi-conductor) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือสารประกอบไททาเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากมีความเสถียร และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสงที่มากเพียงพอ จะส่งผลให้เกิดช่องว่างอิเล็กตรอน และโฮล ซึ่งโฮลที่เกิดขึ้นมีความสามารถในการออกซิไดซ์โมเลกุลน้ำเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH) และอิเล็กตรอนมีความสามารถในการรีดิวซ์ออกซิเจนในอากาศเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออน (O_2^-) ซึ่งต่างมีความสามารถสูงในการทำลายโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ที่อาจยึดเกาะอยู่บนพื้นผิว หรือปนเปื้อนอยู่ในอากาศ

ในส่วนคุณสมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์ ทั้งโครงสร้าง (Phase - structure) ขนาดอนุภาค (Particle size) พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) และอื่น ๆ ต่างส่งผลต่อกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังนั้นเพื่อให้ปฏิกิริยามีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นหลายงานวิจัยจึงนำไททาเนียมไดออกไซด์ไปผ่านกระบวนการแคลไซน์ (Calcination) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งส่งผลให้เกิดการปรับเปลี่ยนของโครงสร้าง และการจัดเรียงผลึกที่มีความเป็นระเบียบมากขึ้น รวมไปถึงการปรับเปลี่ยนปริมาณของไททาเนียมไดออกไซด์ในแต่ละปฏิกิริยาเพื่อให้มีความเหมาะสม เนื่องจากถ้าปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์น้อยไปปฏิกิริยาอาจเกิดได้ไม่ดีเท่าที่ควร แต่ถ้าใส่ในปริมาณมากไปอาจเกิดการขัดขวางซึ่งกันและกันในการเกิดปฏิกิริยา หรือเกิดคู่อิเล็กตรอน โฮลมากเกินไปจนทำให้อิเล็กตรอน โฮลที่เกิดขึ้น มีการรวมตัวกันไม่เข้าทำปฏิกิริยา ส่งผลให้ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาลดลงได้เช่นกัน

งานวิจัยส่วนนี้จึงปรับปรุงโครงสร้างของไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยการแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ พร้อมทั้งปรับเปลี่ยนปริมาณที่ใช้ในการผสมลงในปูนซีเมนต์ขาว เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก ให้เหมาะสมต่อความสามารถในการทำสะอาดตัวเองของพื้นผิวซีเมนต์ เมื่อถูกยึดเกาะด้วยสารอินทรีย์ที่มีความสามารถยึดเกาะได้ดีอย่างเมทิลีนบลู พร้อมทั้งใส่สารที่ช่วยในการกระจายตัวเพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่เติมลงไปกระจายตัวในซีเมนต์ได้ดียิ่งขึ้น

4.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

4.2.1 ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2 anatase 100%) บริษัท Carlo Erba

4.2.2 ปูนซีเมนต์ขาว (ปูนตราเสือ)

4.2.3 3-Aminopropyl triethoxysilane (APTES $\geq 98.0\%$) บริษัท ALDRICH Chemistry

4.2.4 สีย้อม (Methylene blue, Union Chemical 1986)

4.2.5 น้ำปราศจากไอออน

4.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

4.3.1 ตู้อบ

4.3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

4.3.3 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer: XRD)

4.3.4 เครื่องวัดการดูดซับก๊าซ (BET)

4.3.5 ถ้วยเซรามิก

4.3.6 เครื่องผสมปูนขนาดเล็ก

4.3.7 แม่แบบขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร

4.3.8 เครื่องความต้านแรงกด

4.3.9 หลอดเมอร์คิวรี 500 วัตต์ (Mercury lamp) ความยาวคลื่น (380-800 นาโนเมตร)

4.3.10 เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง

4.3.11 เครื่องวัดสี CR400

4.3.12 อุปกรณ์เครื่องแก้ว (เช่น บีกเกอร์ ขวดวัดปริมาตร แท่งแก้วคนสาร เป็นต้น)



รูปที่ 4.1 เครื่องวัดสี CR400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีการแคลไซน์

4.4.1 นำผงไททาเนียมไดออกไซด์ ใส่ลงในถ้วยเซรามิก ปริมาณ 10 กรัม

4.4.2 นำถ้วยเซรามิกที่บรรจุผงไททาเนียมไดออกไซด์ เข้าตู้อบ เพื่อแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 100 200 400 และ 800 องศาเซลเซียสตามลำดับ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ไปตรวจสอบโครงสร้างทางผลึกต่อไป

4.5 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมี

4.5.1 การวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ และไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้พิสูจน์เอกลักษณ์ของสารโดยวิเคราะห์จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างในมุมต่าง ๆ กัน จากนั้นนำผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐานเพื่อระบุโครงสร้างผลึก และสามารถระบุขนาดของผลึก (Crystallite size) จากสมการเชอร์เรอร์ (Scherrer's equation) แสดงดังสมการที่ 4.1 [24]

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (4.1)$$

เมื่อ D คือ ขนาดผลึก หน่วย อังสตรอม (Å)

λ คือ ความยาวคลื่น มีค่า 1.5406 อังสตรอม

β คือ ค่า Full Width at Half Maximum (FWHM)

และ θ คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนตามกฎของแบรกก์ (The Bragg angle)

4.5.2 การวิเคราะห์สัณฐาน และลักษณะพื้นผิวของอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลที่แสดงผลการวิเคราะห์ในรูปของภาพสามมิติ โดยภาพที่ได้เกิดจากการตรวจวัดอิเล็กตรอนจากผิวหน้าของสารตัวอย่าง

4.5.3 การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว และขนาดรูพรุนด้วยเครื่องวัดการดูดซับก๊าซ (BET) เป็นการวัดปริมาณก๊าซที่ถูกดูดซับไว้บนผิวและภายในรูพรุนของอนุภาค โดยก๊าซที่นิยมใช้คือก๊าซไนโตรเจน ขั้นตอนแรกเป็นการไล่ก๊าซที่ไม่ใช่ไนโตรเจนเหลวออกจากพื้นผิวของอนุภาค จากนั้นจึงให้พื้นผิวดูดซับก๊าซไนโตรเจน และวัดปริมาณการดูดซับจากปริมาณก๊าซไนโตรเจน หรือวัดจากปริมาณก๊าซที่คายออกมาตอนไล่ก๊าซออกจากอนุภาค ณ จุดเดือดของก๊าซไนโตรเจน (ประมาณ -196 องศาเซลเซียส)

4.6 การเตรียมซีเมนต์เฟส

4.6.1 เตรียมปูนซีเมนต์ขาว 800 กรัม และตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์ 1 เปอร์เซ็นต์ 1.5 เปอร์เซ็นต์ และ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักปูน เทพสมลงในเครื่องผสมปูนพร้อมใส่น้ำปริมาณ 35 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักปูน (ในกรณีผสม APTES จะเติมในปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักปูน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.2 ผสมปูนในเครื่องผสมปูนโดยใช้เวลา 2 นาที ให้ปูนซีเมนต์ขาว ตัวเร่งปฏิกิริยา และน้ำ (รวมทั้ง APTES กรณีที่เติม) ผสมเข้ากันได้ดี มีความเหลวที่พอเหมาะสามารถเทลงแบบได้

4.6.3 เตรียมแม่แบบขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร ทาน้ำมันบาง ๆ เพื่อป้องกันปูนซีเมนต์ติดแม่แบบ จากนั้นเทปูนซีเมนต์ขาวที่ผสมแล้วลงในแบบ ปาดหน้าปูนให้เรียบเสมอแบบ ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงจนมั่นใจว่าปูนซีเมนต์ขาวแข็งตัวเป็นซีเมนต์เพสต์

4.6.4 นำซีเมนต์เพสต์ออกจากแบบ จะได้ซีเมนต์เพสต์ทรงลูกบาศก์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร

4.7 การวัดสมบัติค่ากำลังอัด (Strength) ของซีเมนต์เพสต์

4.7.1 นำซีเมนต์เพสต์ไปบ่ม ด้วยการแช่ในน้ำ เป็นเวลา 7 วัน ตามมาตรฐานอเมริกาซึ่งเหมาะกับงานก่อสร้างทั่วไป จากนั้นนำขึ้นมาผึ่งให้แห้ง

4.7.2 นำเข้าเครื่องวัดความต้านแรงอัด เครื่องจะอัดก้อนซีเมนต์เพสต์ด้วยแรงกดตั้งแต่ค่า 0 กิโลนิวตันจนถึงค่าที่ทำให้ก้อนซีเมนต์เพสต์แตก บันทึกค่าที่ได้ เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความต้านแรงอัดด้วยสมการที่ 2

$$\text{กำลังอัด} = \frac{F/g}{A} \quad (4.2)$$

เมื่อ กำลังอัด หน่วย กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

F คือ แรงอัด หน่วย นิวตัน

g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก 9.81 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง

และ A คือ พื้นที่ผิวด้านที่ถูกอัด หน่วย ตารางเซนติเมตร

4.8 การศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของซีเมนต์เพสต์ในการกำจัดเมทิลีนบลูบนพื้นผิว

4.8.1 เตรียมสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ปริมาณ 3 ลิตร จากนั้นเทลงในภาดสแตนเลส

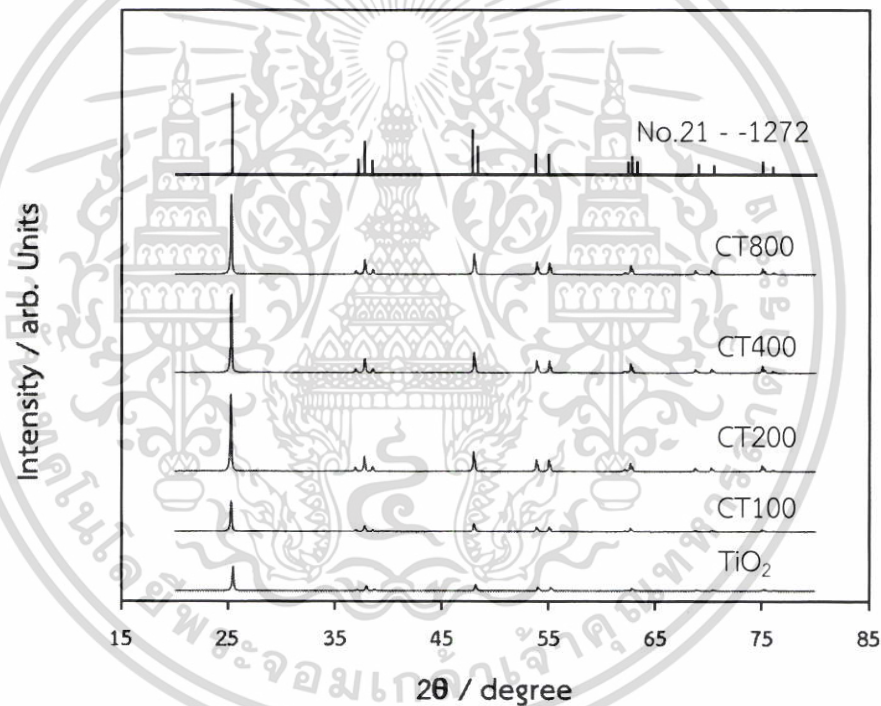
4.8.2 นำซีเมนต์เพสต์ที่เตรียมไว้ จำนวน 15 ก้อน จุ่มแช่ลงในสารละลายเมทิลีนบลู ทิ้งไว้ 2 ชั่วโมง จากนั้นนำมาผึ่งให้แห้งในที่ทึบแสง 2 ชั่วโมง

4.8.3 นำซีเมนต์เพสต์จากข้อสอง ใส่ลงในกล่องดำทึบแสงที่ต่อกับหลอดเมอร์คิวรี นำซีเมนต์เพสต์ออกมาทีละก้อนทุก ๆ 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำซีเมนต์ออกมาทีละก้อนทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.8.4 นำซีเมนต์เพสต์ที่ได้จากข้อสามมาวัดเฉดสี และความสว่างด้วยเครื่องวัดสี บันทึกค่าที่ได้ (โดยในแต่ละตัวแปรที่ศึกษามีการทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง)

4.9 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์

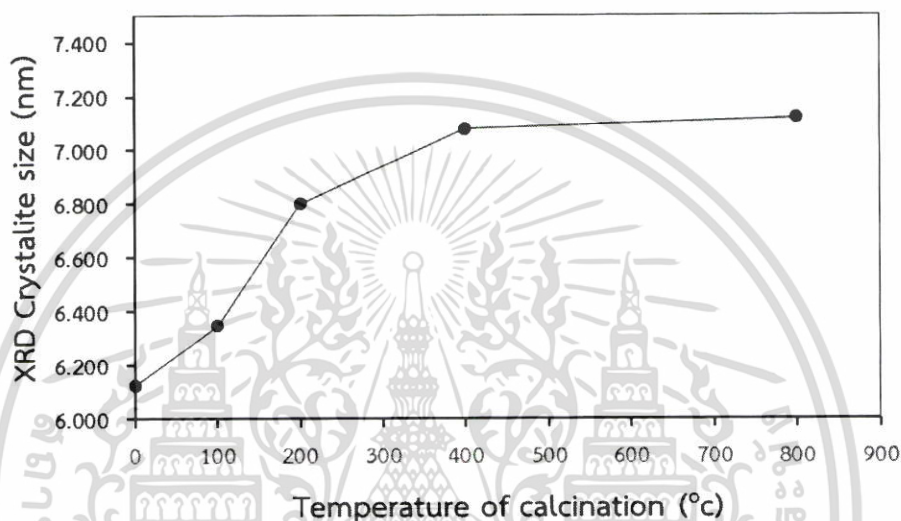
ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ในอุณหภูมิ 100 200 400 และ 800 องศาเซลเซียสตามลำดับ ยังคงมีลักษณะภายนอกเป็นผงสีขาว เมื่อนำไปพิสูจน์ลักษณะโครงสร้างผลึกด้วย XRD ได้พีคของสารตัวอย่างแสดงในรูปที่ 4.2 โดย CT100 CT200 CT400 และ CT800 เป็นตัวแปรที่กำหนดชั้นแทนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ในอุณหภูมิ 100 200 400 และ 800 องศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งจากภาพสารตัวอย่างทั้ง 5 แสดงพีคที่เหมือนกันแตกต่างกันที่ความสูงของพีค และมีพีคที่เห็นเด่นชัดอยู่ที่ 2θ ประมาณ 25° และเมื่อนำตำแหน่งการเกิดพีคที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูลการเลี้ยวเบนมาตรฐานหมายเลข 12 - 1272 ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างไททาเนียมไดออกไซด์ แบบอะนาเทส



รูปที่ 4.2 โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ และไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 100 200 400 และ 800 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (XRD pattern: No.21 - 1272)

จากความสูงของพีคที่ต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4.2 สามารถนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ XRD มาคำนวณขนาดของผลึกด้วยสมการเชอร์เรอร์ (Scherrer's equation) แสดงผลการวิเคราะห์ไว้ในรูปที่ 4.3 ซึ่งพบว่าเมื่อแคลไซน์ไททาเนียมไดออกไซด์ในอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้ขนาดผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Mahdjoub N., et. al. (2010) ที่ศึกษาผลของการแคลไซน์ไททาเนียมได

ออกไซด์ แบบอะนาเทส ในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 1000 เคลวิน และรายงานผลว่าอุณหภูมิที่ใช้แคลไซน์สูงขึ้นส่งผลให้ขนาดผลึกที่มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อทดสอบประสิทธิภาพในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกพบว่าไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก [24] ทั้งนี้เนื่องจากขนาดผลึกที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะสามารถเพิ่มปริมาณในการผลิตไฮดรอกซิลแรดิคัล ซึ่งจำเป็นต่อกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก

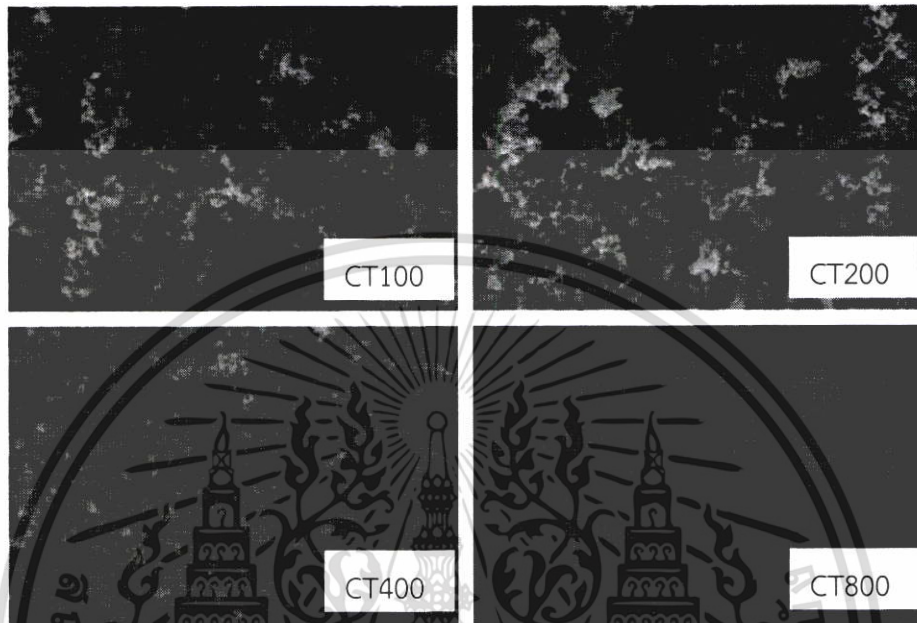


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ที่เป็นสารตั้งต้น

และไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ในอุณหภูมิ 100 200 400 และ 800 องศาเซลเซียส

เมื่อส่องตัวอย่างสารมาวิเคราะห์ลักษณะสัณฐาน และลักษณะพื้นผิวด้วย SEM แสดงผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.4 โดยไททาเนียมไดออกไซด์ในอุณหภูมิการแคลไซน์ที่ 100 องศาเซลเซียส (CT100) พบว่ามีการกระจายตัวของอนุภาค และมีการเกาะกลุ่มกันเล็กน้อย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการแคลไซน์เป็น 200 องศาเซลเซียส (CT200) พบว่ามีการเกาะกลุ่มกันระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้นจากการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเล็กน้อย ในขณะที่อุณหภูมิในการแคลไซน์ 400 องศาเซลเซียส (CT400) เริ่มสังเกตเห็นการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคเพิ่มมากขึ้น และเห็นการเกาะกลุ่มกันหนาแน่นอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการแคลไซน์สูงถึง 800 องศาเซลเซียส (CT800) สอดคล้องกับงานวิจัยของ B. Sathyaseelan et. al. (2016) ที่ศึกษาลักษณะโครงสร้างของไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยการแคลไซน์พบว่าที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสมีการเกาะกลุ่มกันของอนุภาค และมีขนาดพื้นที่ผิวลดลง [11] ทั้งนี้ไททาเนียมที่ผ่านการแคลไซน์ในอุณหภูมิต่างๆยังคงลักษณะสัณฐานที่ไม่สามารถระบุได้ เช่นเดียวกับไททา

เนียมไดออกไซด์ที่นำมาเป็นสารตั้งต้น เพียงแต่มีการกระจายตัวของอนุภาคที่แตกต่างกันจากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น



รูปที่ 4.4 ลักษณะสัณฐาน และพื้นผิวของโททานียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 100 200 400 และ 800 องศาเซลเซียส

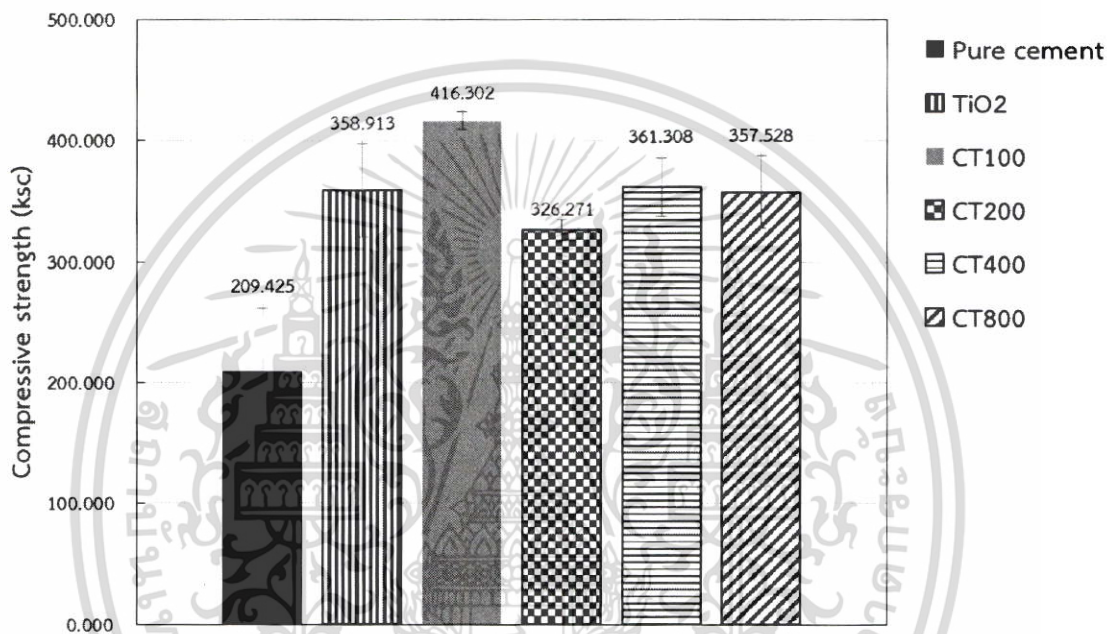
4.10 ผลของสมบัติกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์

4.10.1 ผลของโททานียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ

เมื่อนำซีเมนต์เพสต์ที่ได้จากการผสมปูนซีเมนต์ขาวร่วมกับ โททานียมไดออกไซด์ CT100 CT200 CT400 และ CT800 ในปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์บ่มในน้ำเป็นเวลา 7 วัน และผึ่งให้แห้ง เพื่อวัดสมบัติการต้านแรงกดได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าการเติมโททานียมไดออกไซด์ และโททานียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ส่งผลให้กำลังอัดของซีเมนต์มีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับกรณีไม่เติม ให้ค่าความต้านแรงกดจาก 209.42 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยเพิ่มเป็น 358.91 416.30 326.27 361.31 และ 357.53 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งการผสม CT100 ส่งผลให้ได้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด แต่ทั้งนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่ากำลังอัดระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดพบว่าค่าที่ได้ไม่มีความแตกต่างอย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างกันเฉลี่ย 150 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จึงกล่าวได้ว่าขนาดของผลึกที่เปลี่ยนแปลงของโททานียมไดออกไซด์เนื่องจากการแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ แต่การเติมโททานียมไดออกไซด์ และโททานียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในอุณหภูมิต่างๆ ล้วนเพิ่มค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sanchez F., et. al. (2010) และ Nazari A., et. al. (2010) ที่รายงานว่าเมื่อเติมโททานเนียมไดออกไซด์ผสมร่วมกับคอนกรีต ส่งผลให้ค่ากำลังอัด และค่าความแข็งแรงของคอนกรีตเพิ่มขึ้น [10], [12] ทั้งนี้ Kushwaha A., et al. (2015) ที่ศึกษาผลของโททานเนียมไดออกไซด์ต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีตได้รายงานว่า โททานเนียมไดออกไซด์ที่ผสมร่วมกับปูนซีเมนต์จะกระจายตัว และช่วยเติมเต็มรูพรุนภายในโครงสร้างของคอนกรีต ทำให้โครงสร้างของคอนกรีตมีความหนาแน่นมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้มีค่ากำลังอัดสูงขึ้น



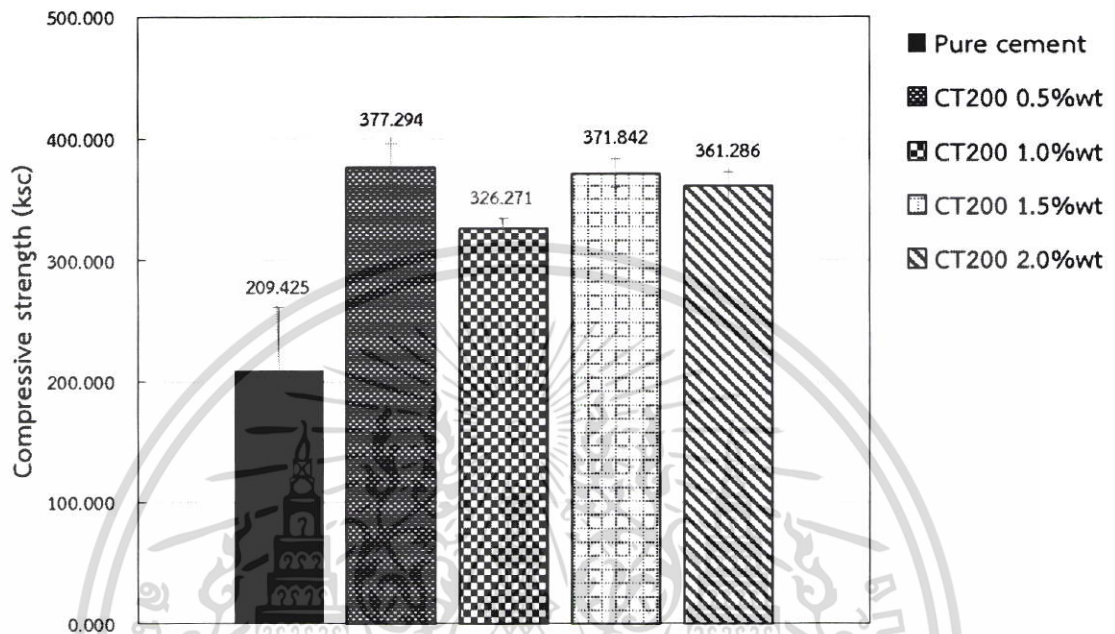
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านแรงกด (Compressive strength (kcs)) ที่ผสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาวกับโททานเนียมไดออกไซด์ CT100 CT200 CT400 และ CT800 ในปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักเทียบกับปูนซีเมนต์

4.10.2 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผสมร่วมกับซีเมนต์ขาว

จากที่ได้กล่าวข้างต้นพบว่าการเติมโททานเนียมไดออกไซด์ และโททานเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ในอุณหภูมิต่างๆ ส่งผลให้ค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์เพิ่มสูงขึ้น จึงพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ผสม ซึ่งใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CT200 ผสมร่วมกับซีเมนต์ขาวที่ปริมาณ 0.5 1 1.5 และ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์ขาว แสดงผลดังรูปที่ 4.6 พบว่าค่ากำลังอัดที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็น 377.29 326.27 371.84 และ 361.29 เมื่อเทียบกับกรณีไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา สอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.9.3 แต่ผลจากงานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่าปริมาณของ CT200 ที่เปลี่ยนแปลงไปซึ่งเป็นปริมาณเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณปูนซีเมนต์ขาวที่เป็นส่วนผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลัก ไม่ส่งผลให้ค่ากำลังอัดที่ได้แตกต่างกันอย่างชัดเจน เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงขนาดของระนาบผลึกจากการเคลือบผิวด้วยปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ

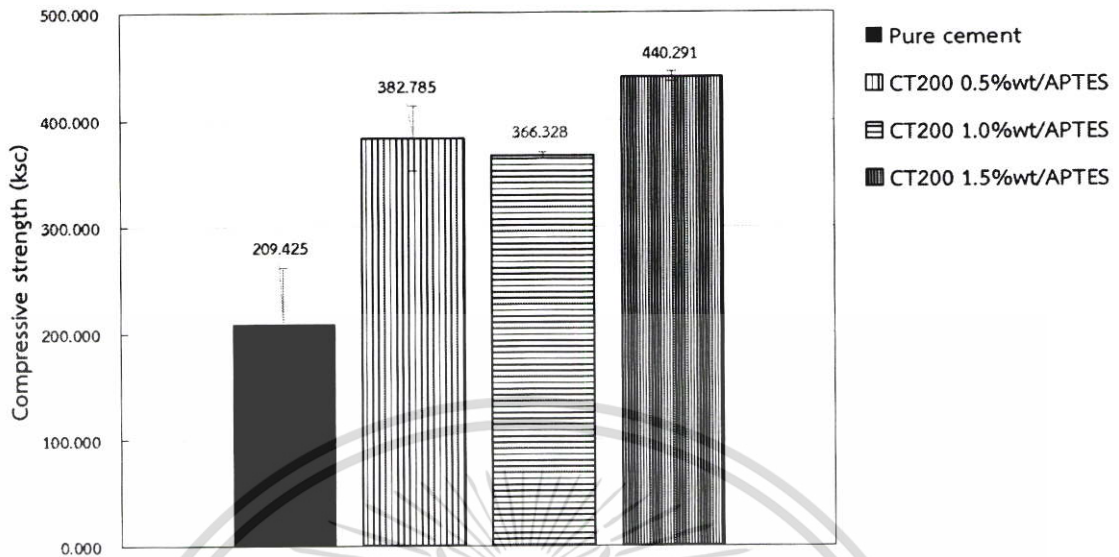


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านแรงกด (Compressive strength (kcs)) ที่ผสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาวกับ CT200 ในปริมาณ 0.5 1 1.5 และ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับปูนซีเมนต์

4.10.3 ผลของสารที่ช่วยในการกระจายตัว (Silane: APTES)

จากในกรณีที่พิจารณาปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ขาว ซึ่งอาจมีการกระจายได้ไม่ดีเท่าที่ควร จึงเติม APTES เพื่อช่วยให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผสมกระจายตัวได้ดี ในปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์ขาว ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา CT200 ผสมรวมกับซีเมนต์ขาวที่ปริมาณ 0.5 1 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์ขาว แสดงผลดังรูปที่ 4.7 พบว่า APTES ที่เติมไม่ส่งผลให้ค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ming Kong X., et al. (2014) ที่ศึกษาผลของการเติมซิลิโคนแต่ละชนิด ระหว่าง tetraethoxysilane (TEOS) 3 - aminopropyltriethoxysilane (APTES) และ N - 2 - aminoethyl - 3 - aminopropyltrimethoxysilane (AEAPTMS) ลงในซีเมนต์มอร์ตาร์ ซึ่งรายงานว่าการเติม APTES เป็นซิลิโคนที่เติมแล้วไม่ส่งผลให้ค่ากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ลดลง [28] โดยเมื่อเทียบค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยของรูปที่ 4.7 เทียบกับรูปที่ 4.6 เห็นได้ชัดในกรณีที่เติม CT200 ในปริมาณ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับปริมาณปูนซีเมนต์ที่มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 371.84 กิโลกรัมต่อเซนติเมตร เป็น 440.29 กิโลกรัมต่อเซนติเมตร จึงกล่าวได้ว่า APTES ที่เติมลงไป ช่วยให้ CT200 กระจายตัวไปเติมเต็มรูพรุนภายในซีเมนต์เพสต์ได้ดียิ่งขึ้น จึงส่งผลให้ค่ากำลังอัดมีค่าสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านแรงกด (Compressive strength (kcs)) ที่ผสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาวกับ CT200 ในปริมาณ 0.5 1 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับปูนซีเมนต์ พร้อมทั้งผสมสารที่ช่วยในการกระจายตัว APTES

4.11 ผลของการย่อยสลายเมทิลีนบลูบนผิวของซีเมนต์เพสต์

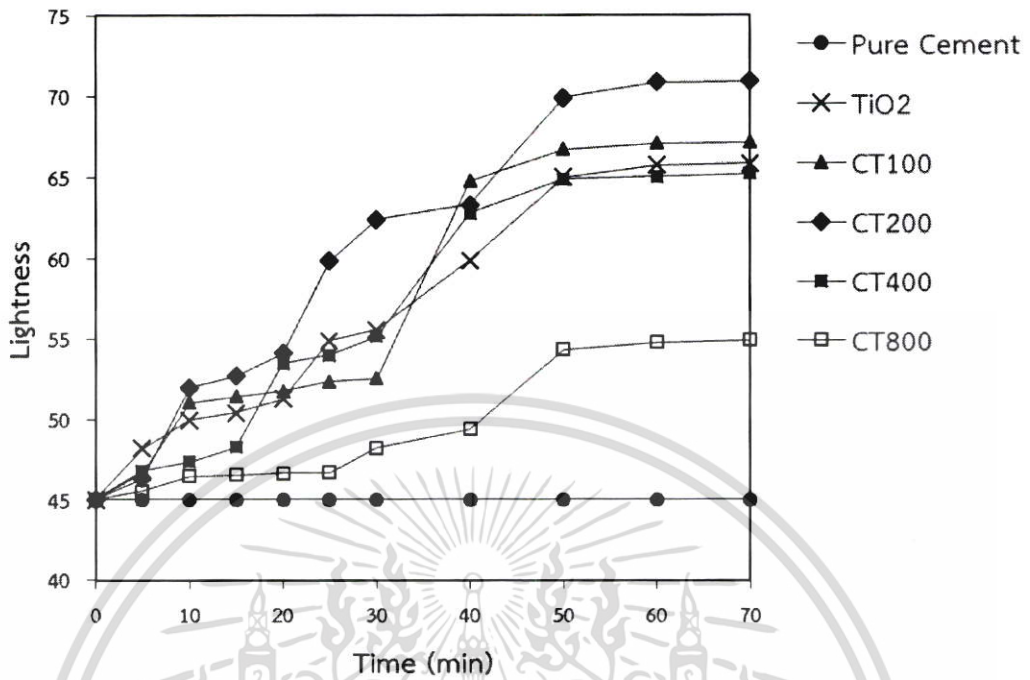
4.11.1 ผลของไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ

ซีเมนต์เพสต์ทรงลูกบาศก์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร ที่ได้จากการผสมปูนซีเมนต์ขาวร่วมกับ ไททาเนียมไดออกไซด์ หรือไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ CT100 CT200 CT400 และ CT800 ในปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักของปูนซีเมนต์ขาว ภายหลังจากจุ่มแช่ในสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ถูกนำมาทดสอบประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในการกำจัดเมทิลีนบลูบนพื้นผิว แสดงผลในรูปของความสว่าง (Light) ที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับเวลา และสี (ΔE) ที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับเวลา ดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ

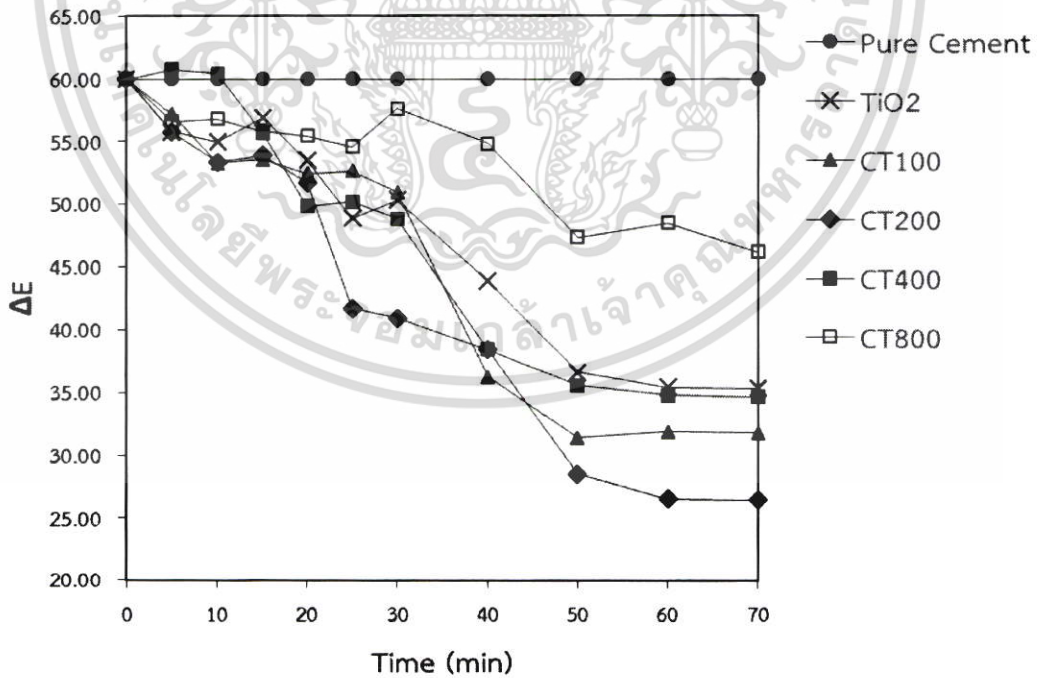
พิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดเมทิลีนบลูบนพื้นผิวซีเมนต์เพสต์ด้วยการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง เมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการผสมตัวเร่งปฏิกิริยา โดยพิจารณาจากความสว่างและค่าสีที่เปลี่ยนไปของพื้นผิวซีเมนต์เพสต์ โดยค่าความสว่างและค่าสีของซีเมนต์เพสต์ก่อนการทดลองมีค่าความสว่างเฉลี่ยเท่ากับ 92.43 และมีค่าสีเฉลี่ยเท่ากับ 7.35 โดยรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาพื้นผิวของซีเมนต์เพสต์มีแนวโน้มความสว่างเพิ่มขึ้นเมื่อเริ่มให้พลังงานแสง เทียบกับค่าความสว่างเริ่มต้นที่มีค่า 45 และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดจากเส้นแนวโน้มพบว่าการเติมไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลให้บริเวณพื้นผิวของปูนสามารถกำจัดสีของเมทิลีนบลูได้จนมีค่าความสว่างเพิ่มขึ้นเป็น 65.87 และเมื่อนำไททาเนียมไดออกไซด์ไปแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสนั้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเมทิลีนบลูดีขึ้นเล็กน้อย โดยได้ค่าเป็น 67.20 ที่อุณหภูมิ

แคลไซน์ 200 องศาเซลเซียสที่ทำให้ได้ค่าความสว่างเพิ่มขึ้นเป็น 70.94 เป็นสภาวะที่ดีที่สุด แต่เมื่อนำไป แคลไซน์ในอุณหภูมิสูงขึ้นไป 400 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพกลับลดลงใกล้เคียงกับไททาเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ผ่านการแคลไซน์ที่ให้ค่าความสว่าง 65.25 และที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส กลับทำให้ ประสิทธิภาพลดลงต่ำกว่าไททาเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ผ่านการแคลไซน์ ให้ค่าความสว่างเพียง 54.96 ผลของการพิจารณาความสว่างของพื้นผิวมีแนวโน้มเดียวกับค่าการลดลงของสีที่แสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสทำให้สีบนพื้นผิวของซีเมนต์เพสต์มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด เมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการผสมตัวเร่งปฏิกิริยา และตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ส่งผลให้สีมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด ซึ่งน้อยกว่าไททาเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ผ่านการแคลไซน์

จากผลการทดลองที่แสดงข้างต้นพบว่า การเติมไททาเนียมไดออกไซด์สามารถทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความสามารถในการทำความสะอาดตัวเองของพื้นผิวจากการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง และเมื่อนำไททาเนียมไดออกไซด์ไปผ่านการแคลไซน์ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดตัวเองดีขึ้น แต่เมื่อแคลไซน์ในอุณหภูมิที่สูงมากกลับทำให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงลดลง ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lin X., et al. (2016) ที่ใช้ช่วงอุณหภูมิในการแคลไซน์ 100 ถึง 800 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อนำไททาเนียมไดออกไซด์ไปแคลไซน์ส่งผลให้ประสิทธิภาพในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกดีขึ้นจนถึงที่สุดที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิไปถึง 800 องศาเซลเซียส กลับทำให้ประสิทธิภาพในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกลดลง [17] ทั้งนี้เนื่องจากการแคลไซน์จะเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้การจัดเรียงผลึกในเฟสอะนาเทสเป็นระเบียบมากขึ้น และทำให้ขนาดผลึกมีค่าสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3 จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตคู่อิเล็กตรอน - โฮล ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง แต่เมื่อแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงขึ้นไปกลับทำให้ประสิทธิภาพลดลง เนื่องจากผลของอุณหภูมิสูงส่งผลให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของไททาเนียมไดออกไซด์ ส่งผลให้พื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาลดลง ประสิทธิภาพในการกำจัดเมทิลีนบลูจึงลดลง เห็นได้ชัดเมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงถึง 800 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.4 จึงทำให้ประสิทธิภาพลดลง ซึ่งในงานวิจัยนี้พบว่าประสิทธิภาพต่ำกว่าไททาเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ผ่านการแคลไซน์

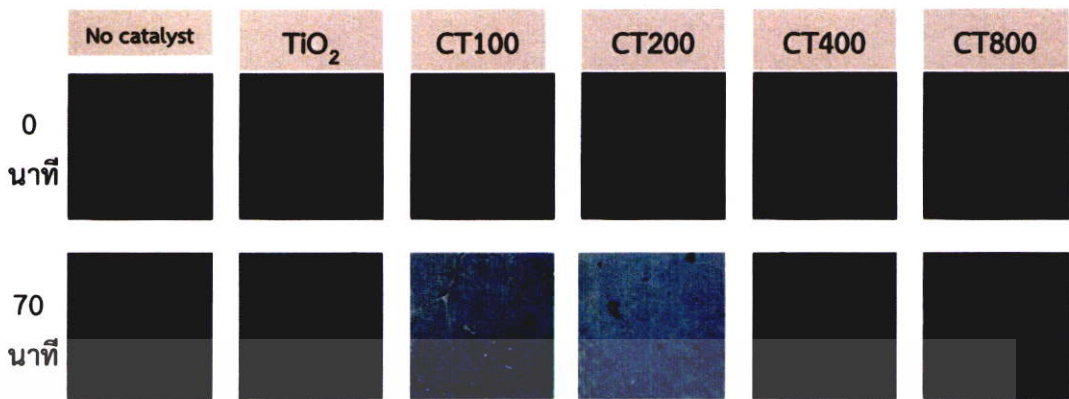


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างของพื้นผิวซีเมนต์เพสต์ (Light) ที่ผสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาวกับไททาเนียมไดออกไซด์ CT100 CT200 CT400 และ CT800 เทียบกับเวลา



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างสีที่แสดงบนพื้นผิวซีเมนต์เพสต์ (ΔE) ที่ผสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาวกับไททาเนียมไดออกไซด์ CT100 CT200 CT400 และ CT800 เทียบกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างสีที่แสดงบนพื้นผิวซีเมนต์เพสต์ ที่ผสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาวกับไททาเนียมไดออกไซด์ CT100 CT200 CT400 และ CT800 ที่เวลาเริ่มต้น และเมื่อให้พลังงานแสงผ่านไป 70 นาที

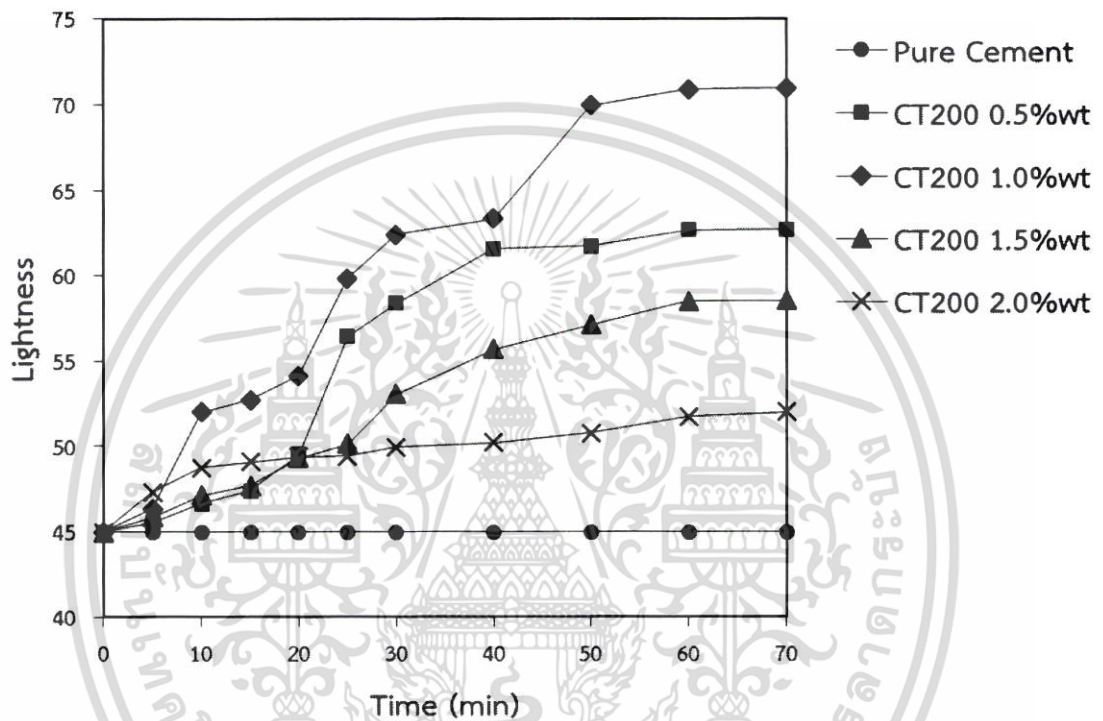
4.11.2 ผลของปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผสมร่วมกับซีเมนต์ขาว

จากข้อมูลในหัวข้อ 4.10.1 พบว่าไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส (CT200) เป็นอุณหภูมิที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเมทิลีนบลูบนพื้นผิวของซีเมนต์เพสต์ดีที่สุด เมื่อนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ขาวที่ปริมาณต่าง ๆ คือ 0.5 1 1.5 และ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์ขาว ได้เป็นซีเมนต์เพสต์ทรงลูกบาศก์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร เมื่อผ่านการจุ่มในสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร จะถูกนำมาทดสอบประสิทธิภาพในการย่อยสลายเมทิลีนบลูบนพื้นผิว แสดงผลในรูปของความสว่าง (Light) ที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับเวลา และสี (ΔE) ที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับเวลา ดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ

พิจารณาปริมาณของ CT200 ต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายเมทิลีนบลูเมื่อผสมรวมกับปูนซีเมนต์ขาวเป็นซีเมนต์เพสต์ จากความสว่างของพื้นผิว ดังรูปที่ 4.10 จากเส้นแนวโน้มพบว่าเมื่อผสม CT200 ในปริมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับปริมาณปูน ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเมทิลีนบลูได้ส่งผลให้ความสว่างเพิ่มจาก 45 เป็น 62.69 เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา และมีประสิทธิภาพดีขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับปริมาณปูน ให้ค่าความสว่างเป็น 70.94 แต่ประสิทธิภาพกลับลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 1.5 และ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับปริมาณปูน ให้ค่าความสว่างเป็น 58.52 และ 52.01 ตามลำดับ ซึ่งค่าของการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิว ดังรูปที่ 4.11 มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน คือมีการเปลี่ยนสีจากเริ่มต้นคือ 60 ลดลงเป็น 38.02 26.43 45.93 และ 51.52 ตามปริมาณการเติม CT200 ที่ 0.5 1 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเมื่อเทียบกับปริมาณปูน

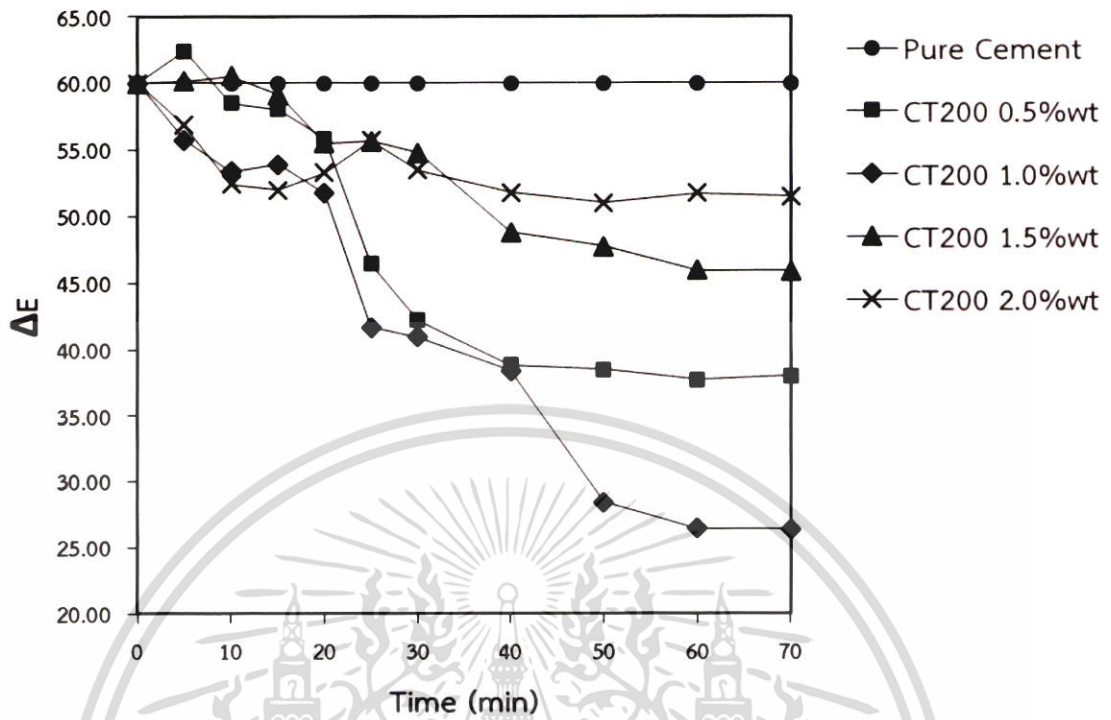
จากผลการทดลองพบว่าปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา CT200 ที่ผสมรวมกับปูนซีเมนต์ ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายเมทิลีนบลูบนพื้นผิว ซึ่งให้ประสิทธิภาพดีที่สุดที่ปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับปริมาณปูนซีเมนต์ขาว แต่เมื่อเพิ่มปริมาณกลับทำให้ประสิทธิภาพลดลง เนื่องจากปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา CT200 ที่มากเกินไปจะขัดขวาง หรือบดบังการรับพลังงานโฟตอน ซึ่งกันและกันได้ นอกเหนือจากนั้นในกรณีที่จำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮล ที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นของพลังงานโฟตอนที่

ปริมาณมากเกินไปส่งผลให้อิเล็กตรอนบางส่วนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยากลับมารวมกับโฮล คู่อิเล็กตรอน-โฮล ที่ทำปฏิกิริยาจึงมีจำนวนลดลง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายเมทิลีนบลูบริเวณพื้นผิวของซีเมนต์เพสต์ลดลงเช่นกัน ดังนั้นจากผลการทดลองนี้จึงถือได้ว่าปริมาณของ CT200 ที่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับปริมาณปูนซีเมนต์ขาว เป็นปริมาณที่เหมาะสมต่อการผสมกับปูนซีเมนต์ขาวเพื่อใช้กำจัดเมทิลีนบลูบนพื้นผิวของซีเมนต์เพสต์ เมื่อเทียบกับปริมาณอื่นๆในการทดลอง

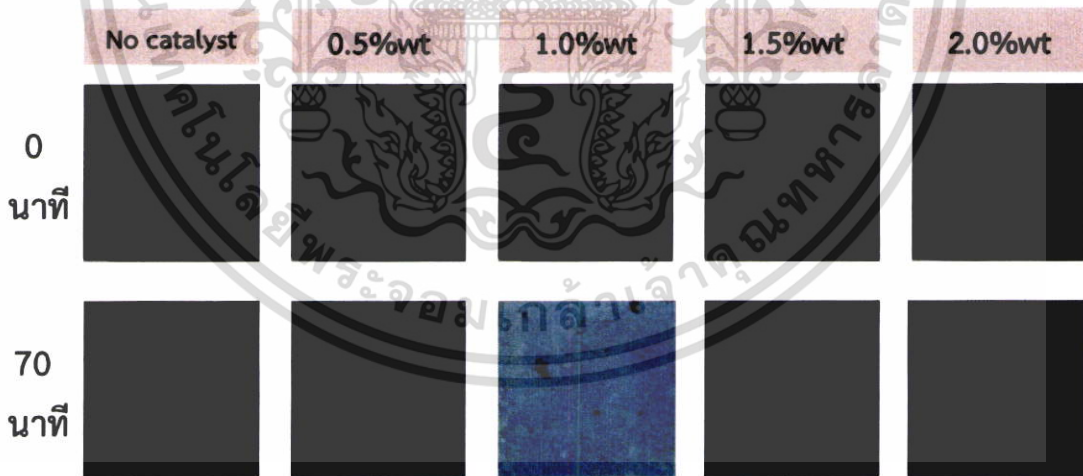


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างของพื้นผิวซีเมนต์เพสต์ (Light) ที่ผสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาวกับตัวเร่งปฏิกิริยา CT200 ที่ปริมาณ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างสีที่แสดงบนพื้นผิวซีเมนต์เพสต์ (ΔE) ที่ผสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาวกับตัวเร่งปฏิกิริยา CT200 ที่ปริมาณ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับเวลา



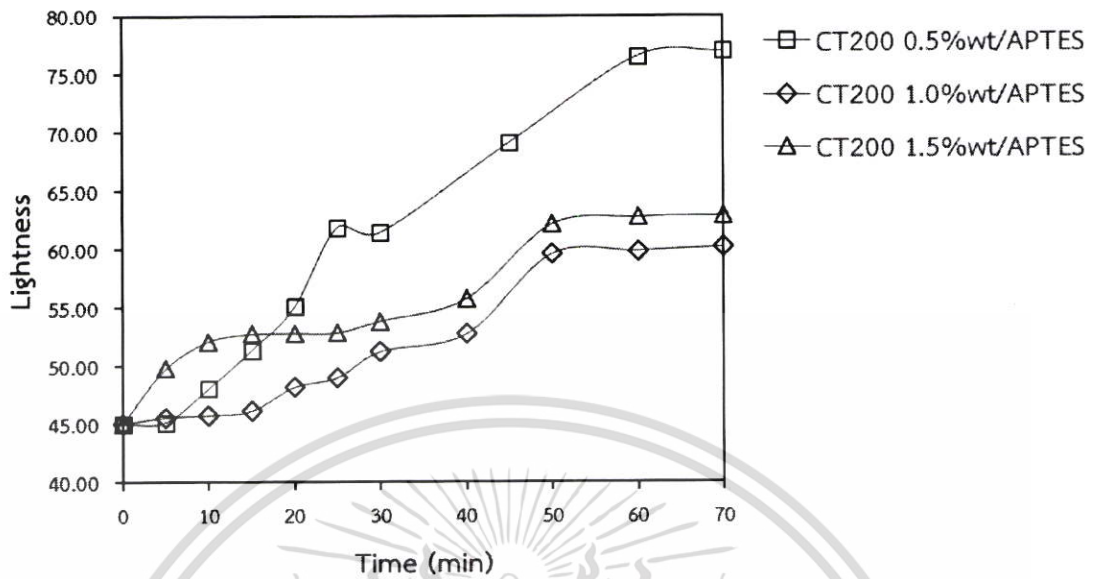
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างสีที่แสดงบนพื้นผิวซีเมนต์เพสต์ ที่ผสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาวกับตัวเร่งปฏิกิริยา CT200 ที่ปริมาณ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เวลาเริ่มต้น และเมื่อให้พลังงานแสงผ่านไป 70 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

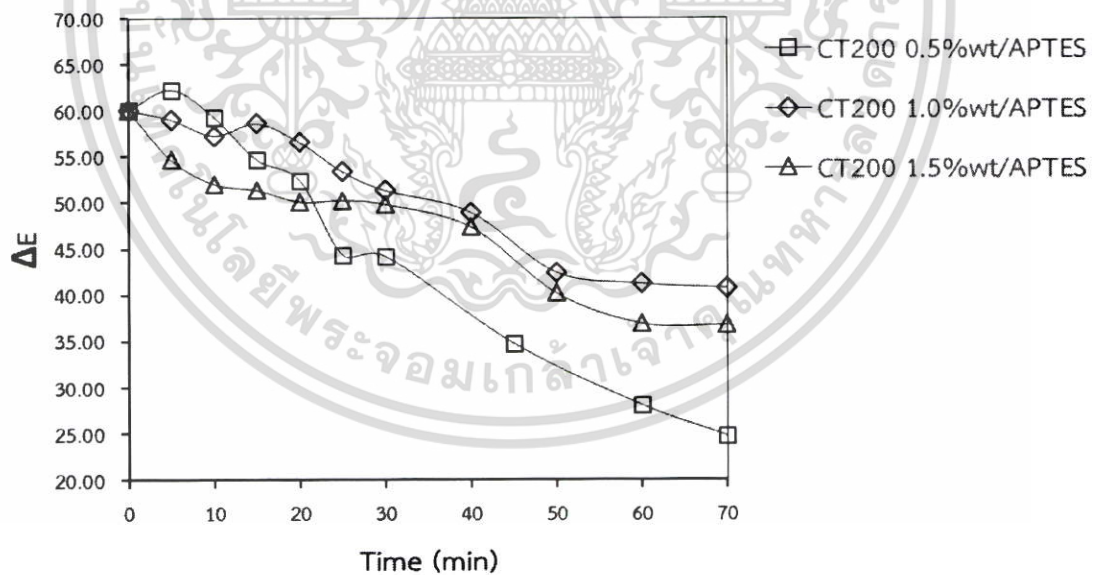
4.11.3 ผลของสารที่ช่วยในการกระจายตัว (Silane: APTES)

จากการพิจารณาประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกด้วยการเติม CT200 ในปริมาณต่างๆในหัวข้อ 4.10.2 ที่พบว่าเมื่อเติม CT200 มากเกิน 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกในการย่อยสลายเมทิลีนบลูลดลง ในส่วนนี้จึงทดลองผสม APTES ซึ่งเป็นสารที่ช่วยในการกระจายตัว ในปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์ขาว ร่วมกับ CT200 ในปริมาณ 0.5 1 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์ขาว ได้เป็นซีเมนต์เพสต์ทรงลูกบาศก์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร เมื่อผ่านการจุ่มในเมทิลีนบลูบนพื้นผิว แสดงผลในรูปของความสว่าง (Light) ที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับเวลา และสี (ΔE) ที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับเวลา ดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาการเติม APTES เพื่อเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวให้กับ CT200 เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ขาว และศึกษาประสิทธิภาพในการย่อยสลายเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก วิเคราะห์ผลจากความสว่างของพื้นผิว ดังรูปที่ 4.12 จากเส้นแนวโน้มพบว่าเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยา CT200 ในปริมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับปริมาณปูน ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเมทิลีนบลูได้ส่งผลให้ความสว่างเพิ่มจาก 45 เป็น 76.96 ซึ่งมีประสิทธิภาพดีที่สุดใน เนื่องจากมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับปริมาณปูนให้ค่าความสว่างเป็น 60.21 :ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณเป็น 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับปริมาณปูน โดยให้ค่าความสว่างเป็น 62.89 ซึ่งค่าของการเปลี่ยนแปลงสีบนพื้นผิว ดังรูปที่ 4.13 มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน โดยมีการเปลี่ยนแปลงสีมากที่สุดจากการผสม CT200 ในปริมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักปูน ร่วมกับ APTES ในขณะที่การผสมในปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักปูน ให้การเปลี่ยนแปลงสีที่น้อยที่สุด เมื่อเทียบกับปริมาณการเติมที่ 0.5 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักปูน

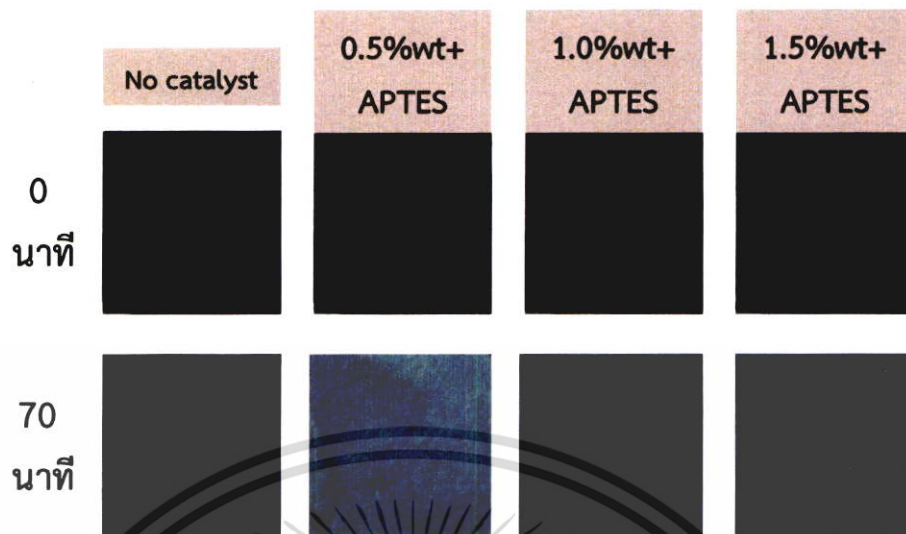


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างของพื้นผิวซีเมนต์เพสต์ (Light) ที่ผสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาวกับตัวเร่งปฏิกิริยา CT200 ที่ปริมาณ 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ APTES ปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์ขาว เทียบกับเวลา



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างสีที่แสดงบนพื้นผิวซีเมนต์เพสต์ (ΔE) ที่ผสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาวกับตัวเร่งปฏิกิริยา CT200 ที่ปริมาณ 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ APTES ปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์ขาว เทียบกับเวลา

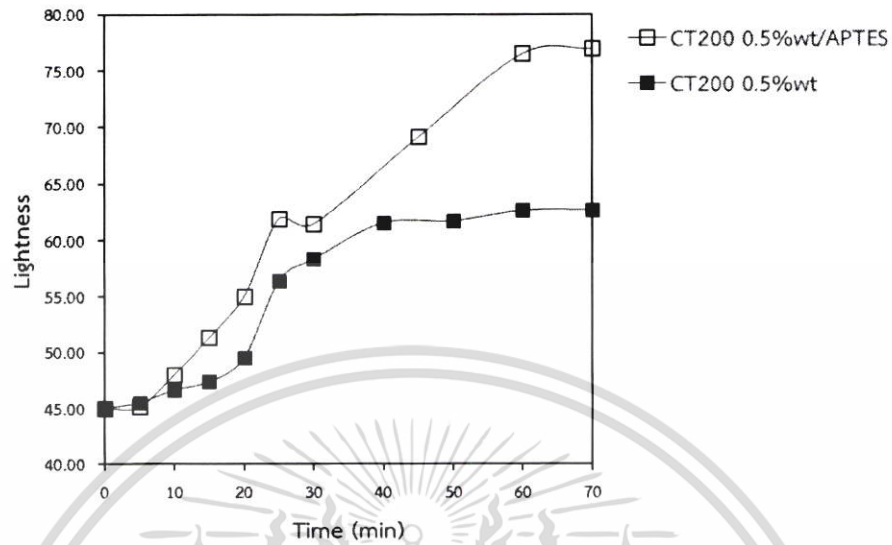
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



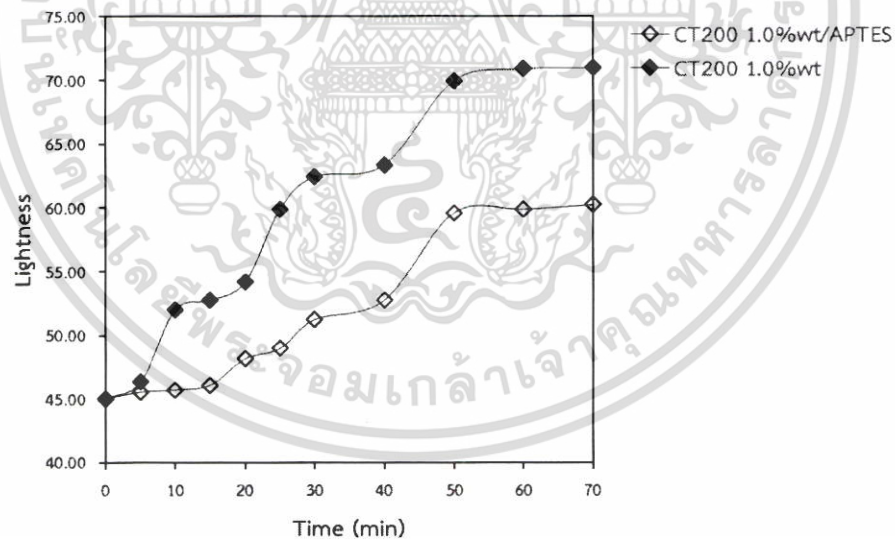
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างสีที่แสดงบนพื้นผิวซีเมนต์เพสต์ ที่ผสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาว กับตัวเร่งปฏิกิริยา CT200 ที่ปริมาณ 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ APTES ปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์ขาว ที่เวลาเริ่มต้น และเมื่อให้พลังงานแสงผ่านไป 70 นาที

เมื่อพิจารณาในส่วนของการกระจายของตัวเร่งปฏิกิริยาภายในปูนซีเมนต์เพสต์ ซึ่งจากการทดลองพบว่า APTES ช่วยในการกระจายตัวของ CT200 ให้อยู่บริเวณพื้นผิวมากยิ่งขึ้น สังเกตได้จากประสิทธิภาพในการย่อยสลายเมทิลีนบลูดีขึ้น ที่ปริมาณการผสม 0.5 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับปริมาณปูน ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.16 ในทางกลับกันประสิทธิภาพของ CT200 ที่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับปริมาณปูน นั้นลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.15 เนื่องจาก APTES ช่วยให้ CT200 กระจายตัวได้ดีในปูนซีเมนต์เพสต์ ซึ่งอาจกระจายตัวสู่พื้นผิวของซีเมนต์เพสต์ หรือรวมอยู่ภายในก้อนซีเมนต์เพสต์ไม่สามารถรับพลังงานโฟตอนได้ ดังนั้นจึงมีโอกาสที่ CT200 ที่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับปริมาณปูน ซึ่งเป็นปริมาณที่เหมาะสม และมีการกระจายตัวได้ดีอยู่แล้วจากผลการทดลองข้างต้น เมื่อผสม APTES ลงไปอาจส่งผลให้มีการกระจายตัวอยู่ภายในก้อนซีเมนต์มากยิ่งขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพลดลง และในทำนองเดียวกันสำหรับปริมาณในการผสมที่ 0.5 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับปริมาณปูน มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เนื่องจากมีการกระจายตัวของ CT200 อยู่ที่ผิวซีเมนต์เพสต์มากขึ้น จนเหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้น APTES ที่เป็นสารที่ช่วยในการกระจายตัวของ CT200 ในการผสมรวมกับปูนซีเมนต์ขาวจึงมีทั้งข้อดีและข้อเสียต่อประสิทธิภาพในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก เนื่องจากอาจเกิดการกระจายตัวรวมภายในก้อนซีเมนต์เพสต์มากเกินไปจนไม่อยู่บริเวณผิว จึงไม่สามารถดูดซับพลังงานโฟตอนได้ดีเท่าที่ควร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

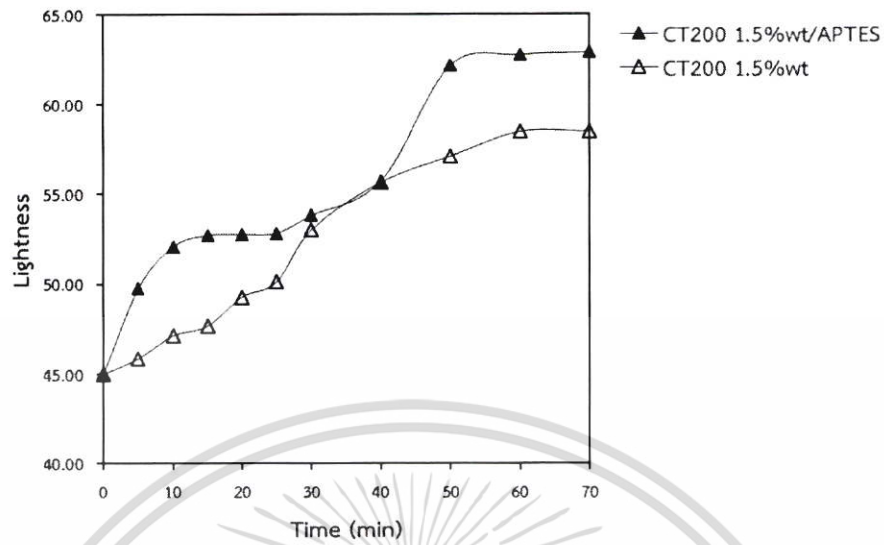


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างของพื้นผิวซีเมนต์เพสต์ (Light) ที่ผสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาวกับตัวเร่งปฏิกิริยา CT200 ที่ปริมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในกรณีที่ไม่เติม APTES ปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์ขาว กับกรณีที่ไม่เติม เทียบกับเวลา



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างของพื้นผิวซีเมนต์เพสต์ (Light) ที่ผสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาวกับตัวเร่งปฏิกิริยา CT200 ที่ปริมาณ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในกรณีที่ไม่เติม APTES ปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์ขาว กับกรณีที่ไม่เติม เทียบกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างของพื้นผิวซีเมนต์เพสต์ (Light) ที่ผสมระหว่างปูนซีเมนต์ขาว กับตัวเร่งปฏิกิริยา CT200 ที่ปริมาณ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในกรณีที่ไม่เติม APTES ปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์ขาว กับกรณีที่ไม่เติม เทียบกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลของไททาเนียมไดออกไซด์ และริบบอนนาโนไททาเนต ต่อการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ และเมทิลีนบลู

5.1.1 สรุปผลการสังเคราะห์ริบบอนนาโนไททาเนต

ริบบอนนาโนไททาเนต ที่ผ่านการสังเคราะห์จากการทำปฏิกิริยาระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทส กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้เป็นโซเดียมไททาเนต โดยมีสัดส่วนเชิงปริมาณของโซเดียมต่อไททาเนียมไดออกไซด์ มีค่าประมาณ 1 : 4 โซเดียมไททาเนตที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะพื้นฐานเป็นนาโนริบบอน ขนาดความกว้าง และความยาวเฉลี่ยอยู่ที่ 118 นาโนเมตร และ 1,033 นาโนเมตร ตามลำดับ ส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นจาก 10 ตารางเมตรต่อกรัม เป็น 18 ตารางเมตรต่อกรัม แต่ค่าพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นสูงขึ้นจาก 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์เป็น 3.7 อิเล็กตรอนโวลต์ หรือกล่าวได้ว่าใช้พลังงานในการกระตุ้นที่ความยาวคลื่นต่ำลงจาก 387.5 นาโนเมตร เป็น 335.1 นาโนเมตร

5.1.2 สรุปผลของไททาเนียมไดออกไซด์ และริบบอนนาโนไททาเนต ต่อการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ และเมทิลีนบลู

จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง 0.01 กรัม ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 800 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นแสดงผลของสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายในรูปของ R90 เพื่อพิจารณาประสิทธิภาพของไททาเนียมไดออกไซด์ และริบบอนนาโนไททาเนต ต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก พบว่าไททาเนียมไดออกไซด์สามารถกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ได้ 47 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ริบบอนนาโนไททาเนตสามารถกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ได้ 45 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกันแม้ว่าพื้นที่ผิวจำเพาะในการเร่งปฏิกิริยาของริบบอนนาโนไททาเนตจะเพิ่มขึ้น และพิจารณาการย่อยสลายเมทิลีนบลูพบว่าไททาเนียมไดออกไซด์สามารถกำจัดเมทิลีนบลูได้ 16 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ริบบอนนาโนไททาเนตสามารถกำจัดเมทิลีนบลูได้ถึง 45 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งริบบอนนาโนไททาเนตสามารถย่อยสลายเมทิลีนบลูได้สูงขึ้นมากเมื่อเทียบกับไททาเนียมไดออกไซด์ ทั้งนี้จึงสรุปได้ว่า การเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ และส่งผลต่อการย่อยสลายเมทิลีนบลู ในขณะที่ค่าพลังงานกระตุ้นที่ต่ำลงของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงส่งผลให้สามารถผลิตแรงแคตอลมากขึ้น มีงผลต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ได้ดีกว่าการย่อยสลายเมทิลีนบลู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 สรุปผลของไททาเนียมไดออกไซด์ และไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ต่อการกำจัดสารอินทรีย์บนพื้นผิวของซีเมนต์เพสต์

5.2.1 ผลทางสัณฐานวิทยาจากการแคลไซน์ไททาเนียมไดออกไซด์

ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ยังคงมีโครงสร้างผลึกเป็นไททาเนียมไดออกไซด์ แบบอะนาเทส เช่นเดียวกับสารตั้งต้น แต่พีคที่ได้นั้นสูงขึ้น ซึ่งสามารถนำไปคำนวณขนาดผลึกได้จากสมการของเชอร์เรอร์ พบว่าขนาดผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์มีค่าสูงขึ้นแปรผันตามอุณหภูมิที่ใช้แคลไซน์ คือ 6.123 6.346 6.801 7.080 และ 7.120 ตามลำดับ ในขณะที่ลักษณะสัณฐานยังคงไม่สามารถระบุได้ และมีการเกาะกลุ่มกันอย่างชัดเจนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

5.2.2 ผลของไททาเนียมไดออกไซด์ และไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ ต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์

กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์พบว่าการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ช่วยให้กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์สูงขึ้นจาก 209.42 จนถึง 416.3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นค่ากำลังอัดที่สูงสุดจากการผสมตัวเร่งปฏิกิริยา CT100 ปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์ขาว แต่เมื่อพิจารณาค่ากำลังอัดที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงตัวเร่งปฏิกิริยา และการปรับเปลี่ยนปริมาณ พบว่ามีค่าไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน จึงสรุปได้ว่าการผสมตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ลงในปูนซีเมนต์ขาวทำให้กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์สูงขึ้น แต่โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เปลี่ยนแปลงไป และปริมาณการผสมที่แตกต่างกันเล็กน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณปูน ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์

5.2.3 ผลของไททาเนียมไดออกไซด์ และไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ ต่อการย่อยสลายเมทิลีนบลูบนผิวของซีเมนต์เพสต์

ความสามารถในการทำความสะอาดตัวเองของพื้นผิวก่อนซีเมนต์เพสต์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร เมื่อจุ่มแช่เมทิลีนบลูความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผึ่งให้แห้งเป็นเวลา 2 ชั่วโมงจากกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก โดยผสมปูนซีเมนต์ขาวรวมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการแคลไซน์เป็น CT100 CT200 CT400 และ CT800 ตามลำดับ พบว่าการผสมตัวเร่งปฏิกิริยา CT200 ลงในปูนซีเมนต์ขาวทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายเมทิลีนบลูดีที่สุด พิจารณาจากความสว่างที่เปลี่ยนไปจาก 45 เป็น 70.94 เมื่อเทียบกับการใส่ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ผ่านการแคลไซน์ที่ให้ความสว่างเปลี่ยนไปจาก 45 เป็น 65.87 เนื่องจากอุณหภูมิในการแคลไซน์ที่ 200 องศาเซลเซียสส่งผลให้การจัดเรียงตัวของผลึกในเฟสอะนาเทสมีความเป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น ส่งผลดีต่อกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก และเมื่อนำ CT200 ผสมรวมกับปูนซีเมนต์ขาวในปริมาณ 0.5 1 1.5 และ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์ขาว พบว่าที่ปริมาณการผสม 1 เปอร์เซ็นต์โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักเทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์ขาว ให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายเมทิลีนบลูดีที่สุด สรุปได้ว่า CT200 ปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์ขาว เป็นชนิด และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการผสมลงในปูนซีเมนต์ขาว เพื่อความสามารถในการทำความสะอาดตัวเองจากการยัดเกาะของเมทิลีนบลูบนพื้นผิวได้ดีที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

ข้อเสนอแนะ และงานในอนาคต

6.1 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์ต่อกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกที่สามารถประยุกต์ใช้งานได้ทั้งการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ หรือนำไปผสมปูนซีเมนต์เพื่อเพิ่มความสามารถในการทำความสะอาดตนเอง ทั้งนี้นอกจากสามารถทำความสะอาดพื้นผิวแล้วยังสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อยู่ในอากาศบริเวณพื้นผิวได้ เพื่อให้ตรวจวัดได้จึงควรทำในระบบปิดและมีเครื่องตรวจจับสารอินทรีย์ที่ปะปนอยู่ภายในอากาศ

6.2 งานในอนาคต

จากความสำเร็จในการเพิ่มความสามารถในการทำความสะอาดตัวเองของซีเมนต์เพสต์ ในส่วนของงานวิจัยในอนาคตเพื่อประสิทธิภาพที่ดีขึ้นของกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์ได้นอกจากการสังเคราะห์เป็นริบบอนนาโนไททาเนต หรือการเคลือบ แต่สามารถปรับปรุงได้ด้วยการสังเคราะห์เป็นโครงสร้างอื่น เช่น ท่อนาโน (nanotubes) ดอกไม้ (nanoflowers) เป็นต้น หรือการเติมโลหะออกไซด์ เช่น ซิลเวอร์ คอปเปอร์ เป็นต้น เพื่อลดค่าพลังงานในการกระตุ้นลง

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมควบคุมมลพิษ “สถานการณ์คุณภาพน้ำผิวดิน ช่วงเดือนกรกฎาคม ถึง กันยายน 2559” ส่วนแหล่งน้ำจืด สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ, 2559
- [2] กรมโรงงานอุตสาหกรรม. “คู่มือการจัดการสารเคมีอันตรายสูงฟอร์มัลดีไฮด์.” [Online]. Available <http://oaep.diw.go.th/cms/images/stories/pdf/Formaldehyde.pdf>.
- [3] ชลดา อีรการณวงศ์. “ทบทวนเอกสารเรื่องวิธีการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์และโครงสร้างของวัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์.” วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. ปีที่ 14 (ฉบับที่ 1), 2555
- [4] ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. “คอนกรีตเทคโนโลยี”, 2543
- [5] ณรงค์พันธุ์ รัตนปนัดดา. “เทคนิคการอ่านค่าสีของเครื่องวัดค่าสี Colorimeter” โปรแกรม วิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต, 2550
- [6] ณัฐวดี เทียนผ่องใส ปรางทิพย์ ทองอุดม และศิริรัตน์ โพธิ์พิมพ์ “การบำบัดน้ำเสียที่มีฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกในสภาวะที่ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551
- [7] ศันสนีย์ เพชรทองบุญ. “การบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียจากโรงงานผลิตพลาสติก เรซิน” วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2548
- [8] อูชา สุขขา. “ผลของพฤติกรรมทางความร้อนและการเจือโลหะเงินที่มีต่อโครงสร้างผลึกสมบัติ ทางกายภาพของไททาเนียมไดออกไซด์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีอินทรีย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551
- [9] Agnieszka Baszczuk, Marek Jasiorski, Beata Borak, Jerzy Wódak. “Insights into the multistep transformation of titanate nanotubes into nanowires and nanoribbons” Journal of Materials Science-Poland. 691 – 702, 2016.
- [10] Ali Nazari, Shadi Riahi. “TiO₂ nanoparticles effects on physical, thermal and mechanical properties of self compacting concrete with ground

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- granulated blast furnace slag as binder”** Journal of Energy and Buildings 43. 995 – 1002, 2010.
- [11] B. Sathyaseelan, E. Manikandan, V. Lakshmanan, I. Baskaran , K. Sivakumar, Rasiah Ladchumananandasivam, J. Kennedy, M. Maaza. **“Structural, optical and morphological properties of post-growth calcined TiO₂ nanopowder for opto-electronic device application: Ex-situ studies”** Journal of Alloys and Compounds 671: 486 – 492, 2016.
- [12] Florence Sanchez, Konstantin Sobolev. **“Nanotechnology in concrete – A review”** Journal of Construction and Building Materials 24. 2060 – 2071, 2010.
- [13] Hoang Tran, Jason Scott, Ken Chiang, Rose Amal. **“Clarifying the role of silver deposits on titania for the photocatalytic mineralization of organic compounds”** Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 183.: 41 – 45, 2006.
- [14] Jian Wang, ChunHua Lua, JiRu Xiong. **“Self-cleaning and depollution of fiber reinforced cement materials modified by neutral TiO₂/SiO₂ hydrosol photoactive coatings”** Journal of Applied Surface Science 298: 19 – 25, 2014.
- [15] Jun Chen, Chi-sun Poon. **“Photocatalytic construction and building materials: From fundamentals to applications”** Journal of Building and Environment 44: 1899–1906, 2009.
- [16] Kunlanan Kiatkittipong, Jason Scott, and Rose Amal. **“Hydrothermally Synthesized Titanate Nanostructures: Impact of Heat Treatment on Particle Characteristics and Photocatalytic Properties.”** Journal of Chemical Engineering Science. 3: 3988 - 3996, 2011.
- [17] Lin Xiong, Ye Yang, Jiaying Mai, Weiling Sun, Chaoying Zhang, Dapeng Wei, Qing Chen, Jinren Ni. **“Adsorption behavior of methylene blue onto titanate nanotubes”** Journal of Chemical Engineering. 156: 313 - 320, 2009.
- [18] Magdalena Janusa,b, Justyna Zatorskaa, Adam Czyżewskia, Kamila Bubacza,Ewelina Kusiak-Nejmana, Antoni W. Morawski. **“Self-cleaning properties of cement plates loaded with N,C-modified TiO₂ photocatalysts”** Journal of Applied Surface Science 330: 200 – 206, 2015.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [19] Marianne Smitsa, Dieter Huyghb, Bart Craeyec, Silvia Lenaerts. **“Effect of process parameters on the photocatalytic soot degradation on self-cleaning cementitious materials”** Journal of Catalysis Today 230: 250 – 255, 2014.
- [20] Marion Lackhoff, Xavier Prieto, Nikolaus Nestle, Frank Dehnb, Reinhard Niessner. **“Photocatalytic activity of semiconductor-modified cement— influence of semiconductor type and cement ageing”** Journal of Applied Catalysis B: Environmental 43: 205 – 216, 2003.
- [21] Melita Sluban, Polona Umek, Zvonko Jaglicic, Joze Buh, Petra Smitek, Ales Mrzel, Carla Bittencourt, Peter Guttman, Marie-Helene Delville, Dragan Mihailovic, and Denis Arco. **“Controlling Disorder and Superconductivity in Titanium Oxynitride Nanoribbons with Anion Exchange”** Journal of ACS Nano. VOL. 9: 10133 - -10141, 2015.
- [22] Melita Rutar, Nejc Rozman, Matej Pregelj, Carla Bittencourt, Romana Cerc Korošec, Andrijana Sever Škapin, Aleš Mrzel, Srečo D. Škapin and Polona Umek. **“Transformation of hydrogen titanate nanoribbons to TiO₂ nanoribbons and the influence of the transformation strategies on the photocatalytic performance”** Journal of nanotechnology. 831 – 844, 2015
- [23] Mohammad A. Behnajady, Hamed Eskandarloo. **“Silver and copper co – impregnated onto TiO₂ – P25 nanoparticles and its photocatalytic activity”** Journal of Chemical Engineering 228: 1207 – 1213, 2013.
- [24] N. Mahdjoub, N. Allen, P. Kelly, V. Vishnyakov. **“SEM and Raman study of thermally treated TiO₂ anatase nanopowders: Influence of calcination on photocatalytic activity”** Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 211: 59 – 64, 2010.
- [25] Padmaja Krishnan, Min-Hong Zhang, Liya Yu, Huajun Feng. **“Photocatalytic degradation of particulate pollutants and self-cleaning performance of TiO₂-containing silicate coating and mortar”** Journal of Construction and Building Materials 44: 309 – 316, 2013.
- [26] S. Thennarasu, K. Rajasekar, K. Balkis Ameen. **“Hydrothermal temperature as a morphological control factor: Preparation, characterization and photocatalytic activity of titanate nanotubes and nanoribbons.”** Journal of Molecular Structure. 1049: 446 – 457, 2013.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [27] Samira Bagheri, NurhidayatullailiMuhd Julkapli, and Sharifah Bee Abd Hamid. **“Titanium Dioxide as a Catalyst Support in Heterogeneous Catalysis”** Journal of The Scientific World. 1 – 21, 2014.
- [28] Xiang-Ming Kong a, Hui Liua, Zhen-Bao Lu, Dong-MinWang. **“The influence of silanes on hydration and strength development of cementitious systems”** Journal of Cement and Concrete Research 67: 168 – 178, 2014.
- [29] Xuan Hao Lina, Ye Wua, Jiao Xianga, Da Hea, Sam Fong Yau Lia. **“Elucidation of mesopore-organic molecules interactions inmesoporous TiO₂photocatalysts to improve photocatalytic activity”** Journal of Applied Catalysis B: Environmental 199: 64 – 74, 2016.
- [30] Zhang, Weicheng Wu, Song Yan, Gang Chu, Shanlin Zhao, Xiang Wang, Can Li. **“Enhanced photocatalytic activity for the degradation of rhodamine Bby TiO₂ modified with Gd₂O₃calcined at high temperature”** Journal of Applied Surface Science 344: 249 – 256, 2015.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก
การย่อยสลายของสารอินทรีย์ในน้ำ โดยไททานเนียมไดออกไซด์ และ
ไททานีนาโนริบบอน

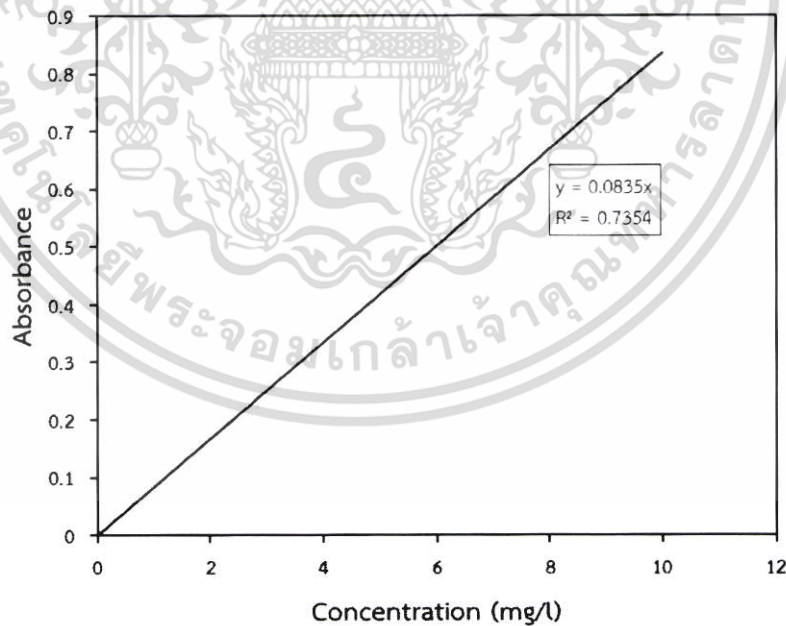
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำตัวอย่างด้วยวิธีการทำให้เกิดสี [6]

- 1.1 ปิเปตสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์จากสารละลายตัวอย่าง 3 มิลลิลิตร พร้อมทั้งกรองตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปนมากับสารละลายออก ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร จากนั้นเติมกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน แล้วจึงเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร พร้อมทั้งเขย่าให้เข้ากัน
- 1.2 ปิเปตอะเซทิลอะซิโตนปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงในสารละลายผสมข้อ 1 จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นทิ้งให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง สารละลายจะเปลี่ยนสีจากขาวใส เป็นสีเหลืองใส
- 1.3 นำสารละลายผสมจากข้อ 2 ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร โดยใช้น้ำกลั่นเป็นแบลนด์

2. ข้อมูลดิบ

2.1 ข้อมูลการย่อยสลายของสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานของสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก
กรณีไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา

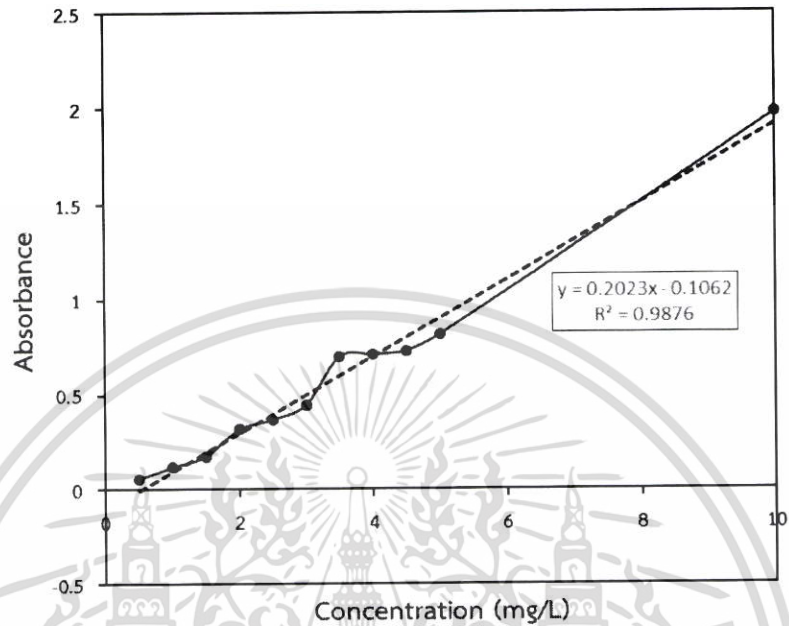
เวลา (นาที)	Abs.	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	0.205	800
15	0.088	340.4
30	0.021	81.2
45	0.020	77.4
60	0.019	73.5

ตารางที่ ก.2 ความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก
กรณีใส่ไททาเนียมไดออกไซด์ แบบอะนาเทส และริบบอนนาโนไททาเนต

เวลา (นาที)	ไททาเนียมไดออกไซด์		ริบบอนนาโนไททาเนต	
	Abs.	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	Abs.	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	0.205	800	0.205	800
*5	0.003	11.6	0.013	50.3
*10	0.003	11.6	0.012	46.4
12	0.004	15.5	0.006	23.2
14	0.002	7.7	0.005	19.3
16	0.002	7.7	0.005	19.3
18	0.006	23.2	0.004	15.5

หมายเหตุ * คือช่วงเวลาที่ยังไม่ได้เปิดไฟ

2.2 ข้อมูลการย่อยสลายของสารละลายเมทิลีนบลู



รูปที่ ก.2 กราฟมาตรฐานของสารละลายเมทิลีนบลู

ตารางที่ ก.3 ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก
กรณีใส่ไททาเนียมไดออกไซด์ แบบอะนาเทส และริบบอนนาโนไททาเนต

เวลา (นาที)	ไททาเนียมไดออกไซด์		ริบบอนนาโนไททาเนต	
	Abs.	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	Abs.	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	0.215	800	0.215	800
30	0.381	605.2	0.159	66.1
60	0.251	443.7	0.175	70.05
90			0.202	76.75
120	0.158	329.2	0.168	68.3
150	0.266	277.7	0.09	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก - ข
การกำจัดสารอินทรีย์บนพื้นผิวของซีเมนต์เพสต์ ด้วยไททานเนียมไดออกไซด์ และไททานเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการเคลือบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. วิธีการอ่านค่าสีจากเครื่องวัดค่าสี Colorimeter [5]

เครื่องวัดค่าสี เป็นอุปกรณ์วัดปริมาณแสงที่สะท้อนกลับมาจากการตกกระทบพื้นผิวตัวอย่าง โดยรายงานค่าเป็นตัวเลขต่างๆ ซึ่งค่าตัวเลขที่ได้จากเครื่องวัดสีชนิด CR400 ในงานวิจัยนี้คือ LabΔE เป็นหน่วยวัดค่าสีในระบบของ Hunter ที่ได้รับการนำเสนอในปี ค.ศ.1948 และเพิ่มตัวแปรในส่วนของสีเขียวดำ โดยตัวแปร L เป็นตัวแปรที่บ่งบอกถึงค่าความสว่าง a เป็นตัวแปรที่บอกถึงสีแดง และสีเขียว ซึ่งถ้าตัวอย่างมีค่าสีแดงมากกว่า a จะมีค่าเป็นบวก ในทางกลับกัน a จะมีค่าเป็นลบเมื่อตัวอย่างมีค่าสีเขียวมากกว่า ตัวแปร b เป็นตัวแปรที่บอกถึงลักษณะสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน หากตัวอย่างมีค่าสีเหลืองมากกว่า b จะมีค่าเป็นบวก และหากตัวอย่างมีค่าสีน้ำเงินมากกว่า b จะมีค่าเป็นลบ ในส่วนของ ΔE เป็นค่าการเปลี่ยนแปลงสี จากสมการ ข.1

$$\Delta E = [(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2] \quad (\text{ข.1})$$

2. ข้อมูลดิบ

2.1 ข้อมูลของโททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์

ตารางที่ ข.1 ขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา จากผล XRD ที่อุณหภูมิในการแคลไซน์ต่างกัน

ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิในการแคลไซน์ (องศาเซลเซียส)	ขนาดผลึก (นาโนเมตร)
TiO ₂	0	6.123
CT100	100	6.346
CT200	200	6.801
CT400	400	7.080
CT800	800	7.120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ข้อมูลสมบัติกำลังอัด (Strength) ของซีเมนต์เพสต์

ตารางที่ ข.2 ค่ากำลังอัดเฉลี่ยของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา และซีเมนต์เพสต์ที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆในปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ซีเมนต์เพสต์	กำลังอัดเฉลี่ย (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา	209.43
ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂)	358.91
CT100	416.30
CT200	326.27
CT400	361.31
CT800	357.53

ตารางที่ ข.3 ค่ากำลังอัดเฉลี่ยของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา และซีเมนต์เพสต์ที่เติมตัวเร่งไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ในอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส (CT200) ปริมาณ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ซีเมนต์เพสต์	กำลังอัดเฉลี่ย (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา	209.43
CT200 (0.5%wt)	377.29
CT200 (1.0%wt)	366.33
CT200 (1.5%wt)	371.84
CT200 (2.0%wt)	361.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 ค่ากำลังอัดเฉลี่ยของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา และซีเมนต์เพสต์ที่เติมตัวเร่งไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการเคลือบในอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส (CT200) ปริมาณ 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พร้อมทั้งผสมไซเลน (APTES)

ซีเมนต์เพสต์	กำลังอัดเฉลี่ย (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา	209.43
CT200 (0.5%wt) + Silane	382.78
CT200 (1.0%wt) + Silane	366.33
CT200 (1.5%wt) + Silane	440.29

2.3 ข้อมูลการกำจัดสารอินทรีย์บนพื้นผิวซีเมนต์เพสต์

ตารางที่ ข.5 ค่าความสว่าง (L) ที่เปลี่ยนไปของผิวซีเมนต์เพสต์ที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา และซีเมนต์เพสต์ที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆในปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เวลา (นาที)	ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา	ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂)	CT100	CT200	CT400	CT800
0	45.00	45.00	45.00	45.00	45.00	45.00
5	45.00	48.22	46.72	46.33	46.8	45.53
10	45.00	49.95	51.05	51.99	47.39	46.49
15	45.00	50.41	51.43	52.71	48.29	46.57
20	45.00	51.28	51.78	54.14	53.48	46.65
25	45.00	54.91	52.37	59.85	54.03	46.72
30	45.00	55.58	52.57	62.41	55.18	48.25
40	45.00	59.86	64.80	63.32	62.81	49.41
50	45.00	65.00	66.72	69.94	64.9	54.37
60	45.00	65.77	67.10	70.86	65.06	54.82
70	45.00	65.87	67.20	70.94	65.25	54.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.6 ค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) ที่เปลี่ยนไปของผิวของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา และซีเมนต์เพสต์ที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆในปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เวลา (นาท)	ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา	ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂)	CT100	CT200	CT400	CT800
0	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
5	60.00	55.77	57.18	55.75	60.74	56.63
10	60.00	54.95	53.27	53.39	60.4	56.78
15	60.00	56.89	53.55	53.91	55.69	55.85
20	60.00	53.52	52.46	51.73	49.84	55.44
25	60.00	48.90	52.67	41.68	50.2	54.60
30	60.00	50.36	50.96	40.94	48.86	57.60
40	60.00	43.88	36.21	38.37	38.37	54.81
50	60.00	36.57	31.39	28.47	35.51	47.34
60	60.00	35.38	31.84	26.50	34.78	48.49
70	60.00	35.29	31.75	26.43	34.62	46.19

ตารางที่ ข.7 ค่าความสว่าง (L) ที่เปลี่ยนไปของผิวของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา และซีเมนต์เพสต์ที่เติมตัวเร่งไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ในอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส (CT200) ปริมาณ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เวลา (นาท)	ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา	CT200			
		0.5%wt	1.0%wt	1.5%wt	2.0%wt
0	45.00	45.00	45.00	45.00	45.00
5	45.00	45.54	46.33	45.87	47.32
10	45.00	46.66	51.99	47.14	48.73
15	45.00	47.39	52.71	47.68	49.08
20	45.00	49.54	54.14	49.30	49.38
25	45.00	56.43	59.85	50.13	49.41
30	45.00	58.37	62.41	53.04	49.93
40	45.00	61.56	63.32	55.67	50.19
50	45.00	61.73	69.94	57.12	50.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

60	45.00	62.65	70.86	58.50	51.73
70	45.00	62.69	70.94	58.52	52.01

ตารางที่ ข.8 ค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) ที่เปลี่ยนไปของผิวของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา และซีเมนต์เพสต์ที่เติมตัวเร่งไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการเคลือบในอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส (CT200) ปริมาณ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เวลา (นาท)	ไม่เติมตัวเร่ง ปฏิกิริยา	CT200			
		0.5%wt	1.0%wt	1.5%wt	2.0%wt
0	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
5	60.00	62.42	55.75	60.15	56.88
10	60.00	58.52	53.39	60.51	52.43
15	60.00	58.02	53.91	59.15	52.00
20	60.00	55.87	51.73	55.52	53.32
25	60.00	46.46	41.68	55.67	55.69
30	60.00	42.19	40.94	54.80	53.47
40	60.00	38.81	38.37	48.82	51.82
50	60.00	38.50	28.47	47.73	51.03
60	60.00	37.71	26.50	45.95	51.75
70	60.00	38.02	26.43	45.93	51.52

ตารางที่ ข.9 ค่าความสว่าง (L) ที่เปลี่ยนไปของผิวของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา และซีเมนต์เพสต์ที่เติมตัวเร่งไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการเคลือบในอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส (CT200) ปริมาณ 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พร้อมทั้งผสมไซเลน (APTES)

เวลา (นาท)	ไม่เติมตัวเร่ง ปฏิกิริยา	CT200 + Silane		
		0.5%wt	1.0%wt	1.5%wt
0	45.00	45.00	45.00	45.00
5	45.00	45.14	45.54	49.75
10	45.00	48.04	45.72	52.09
15	45.00	51.33	46.09	52.73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20	45.00	55.07	48.14	52.78
25	45.00	61.90	48.96	52.85
30	45.00	61.46	51.21	53.83
40	45.00	69.14	52.72	55.73
50	45.00	76.52	59.59	62.15
60	45.00	76.96	59.86	62.76
70	45.00	76.96	60.21	62.89

ตารางที่ ข.10 ค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) ที่เปลี่ยนไปของผิวของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา และซีเมนต์เพสต์ที่เติมตัวเร่งไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการเคลือบในอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส (CT200) ปริมาณ 0.5 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พร้อมทั้งผสม ไฮเลน (APTES)

เวลา (นาท)	ไม่เติมตัวเร่ง ปฏิกิริยา	CT200 + Silane		
		0.5%wt	1.0%wt	1.5%wt
0	45.00	60.00	60.00	60.00
5	45.00	62.24	58.99	54.62
10	45.00	59.26	57.25	51.98
15	45.00	54.64	58.57	51.32
20	45.00	52.41	56.53	50.07
25	45.00	44.35	53.34	50.22
30	45.00	44.21	51.29	49.79
40	45.00	34.74	48.91	47.34
50	45.00	28.07	42.41	40.17
60	45.00	24.77	41.19	36.87
70	45.00	24.77	40.74	36.71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวนุชจรินทร์ จูสิงห์
 วัน เดือน ปีเกิด 4 มิถุนายน 2534
 ที่อยู่ 46/1 หมู่ 5 ถนนลำไทร แขวงโคกแฝด เขตหนองจอก จังหวัดกรุงเทพมหานคร
 10530
 ประวัติการศึกษา 2557 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย

พ.ศ.2556

นักศึกษาฝึกงาน ตำแหน่งวิศวกรควบคุมกระบวนการผลิต โรงผลิตเม็ดพลาสติกชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) บริษัท พีทีที โกลบอล เคมิคอล จำกัด (มหาชน)

พ.ศ.2557

วิจัยการปรับปรุงโครงสร้างไททานิตแบบชั้นด้วยคอปเปอร์(II)ไอออนเพื่อกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้