

การศึกษาคุณสมบัติของมอร์ตาร์ปูนฉาบชนิดทำความสะอาดตัวเองได้

โชติชีวิน มิพล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



**A STUDY OF THE CHARACTERISTICS OF SELF-CLEANING  
PLASTERING MORTAR**

**CHODCHEWIN MIPHOL**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULLFILLMENT OF THE REQUIREMENTS  
FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING  
MAJOR IN CIVIL ENGINEERING  
UBON RATCHATHANI UNIVERSITY  
ACADEMIC YEAR 2014  
COPYRIGHT OF UBON RATCHATHANI UNIVERSITY**



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

เรื่อง การศึกษาคุณสมบัติสมรรถนะการบูรณาการงานด้านวิศวกรรมโยธา

ผู้วิจัย นายโชติชวิน มิพล

คณะกรรมการสอบ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สหลาภ หอมวุฒิม่วงค์	ประธานกรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติศักดิ์ ชันติยวิชัย	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวีศักดิ์ ว่างไพศาล	กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติศักดิ์ ชันติยวิชัย)

(รองศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง)  
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.อริยาภรณ์ พงษ์รัตน์)  
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปีการศึกษา 2557

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบุคคลต่อไปนี้ ที่ได้ช่วยให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี  
กราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.กิตติศักดิ์ ชันติวิชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้  
ให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ในการค้นคว้าข้อมูลที่หลากหลาย ตลอดจนอบรมให้  
ข้าพเจ้าตระหนักถึงความมีระเบียบวินัยในความเป็นนักวิจัยเพื่อเป็นประโยชน์ให้แก่ประเทศชาติ

กราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐยานัน พงศ์สถาปติ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี  
เทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้โอกาสแนะนำแนวทางการทดลองวิจัย  
ตลอดจนความรู้และประสบการณ์ใหม่ในเชิงวิชาการ

กราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวีศักดิ์ วั่งไพศาล อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรม  
โยธา มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้คำแนะนำในระเบียบวิธีวิจัย คอยตักเตือนให้ข้าพเจ้าได้ถ่วงถอง  
ความคิด ถ่วงถองงานเขียนวิทยานิพนธ์นี้ให้เพิ่มคุณค่าของวิทยานิพนธ์ยิ่งขึ้น ขอขอบพระคุณท่าน  
อาจารย์ที่เสียสละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน พร้อมทั้งคำแนะนำ และข้อเสนอแนะ  
ที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณน้องนักศึกษาปีที่ 4 ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่เป็น  
ผู้ช่วยตลอดการทดลอง กราบขอบพระคุณ บิดา มารดา บุคคลผู้เป็นที่รักและเพื่อน ๆ ที่คอยเป็น  
กำลังใจให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

โชติชีวิน มิพล  
ผู้วิจัย

## บทคัดย่อ

ชื่อเรื่อง : การศึกษาคุณสมบัติของมอร์ตาร์ทับูนฉาบชนิดทำความสะอาดตัวเองได้  
 ผู้วิจัย : โชติชวิน มิพล  
 ชื่อปริญญา : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
 สาขาวิชา : วิศวกรรมโยธา  
 อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติศักดิ์ ชันติยวิชัย  
 คำสำคัญ : มอร์ตาร์ทับูนฉาบ, การทำความสะอาดตัวเอง, ปฏิริยาโฟโตคะตะไลซิส, สารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติการทำความสะอาดตัวเองของมอร์ตาร์ทับูนฉาบโดยใช้ปฏิริยาโฟโตคะตะไลซิสบนสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้การฉายแสง ในงานวิจัยนี้ สารปองโซ 4 อาร์ (Ponceau 4 R) ถูกเลือกใช้เป็นตัวแทนสารอินทรีย์ปนเปื้อนที่เกาะติดบนวัสดุมอร์ตาร์ทับูนฉาบเนื่องจากสารนี้เป็นสารสีสังเคราะห์ที่ให้สีแดง ผลของการทำความสะอาดตัวเองของมอร์ตาร์ทับูนฉาบโดยสรุปว่าการเติมสารไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดอุตสาหกรรมสามารถทำความสะอาดตัวเองได้ในพลังงานแสงที่เพียงพอ ที่ความเข้มแสงขาว 25,000 ลักซ์ และแสงยูวี เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นการทำความสะอาดตัวเองจะดำเนินต่อไป และในแสงขาว 500 ลักซ์ สามารถทำความสะอาดตัวเองเมื่อผสมสารไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดตัดแปรร โดยปัจจัยอื่นเช่น อายุมอร์ตาร์ท และค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ทเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ผลการทดลองรายงานผลในรูปร้อยละการย่อยสลายของสารปองโซ 4 อาร์ โดยระดับปริมาณสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ร้อยละ 0, 2 และ 5 โดยน้ำหนัก ชนิดของแสง ทั้งที่เป็นแสงขาวและแสงยูวี ระดับความเข้มของแสงขาวที่ 500 ลักซ์ และ 25,000 ลักซ์ และช่วงระยะเวลาของการฉายแสงตั้งแต่ 5 นาที ถึง 600 นาที จากผลการทดลอง พบว่ามอร์ตาร์ทับูนฉาบไม่สามารถทำความสะอาดตัวเองหากไม่มีการเติมสารไทเทเนียมไดออกไซด์ แต่เมื่อเติมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนัก ภายใต้การฉายแสงขาวที่มีความเข้ม 25,000 ลักซ์ จะทำให้ได้ค่าร้อยละการย่อยสลายของสารปองโซ 4 อาร์ เพิ่มขึ้นร้อยละ 37 ถึง ร้อยละ 44 และเมื่อทำการฉายแสงภายใต้แสงยูวี (กำลัง 10 วัตต์ต่อตารางเมตร) ไม่เกิน 120 นาที และยังพบว่าร้อยละการย่อยสลายของสารปองโซ 4 อาร์ เพิ่มขึ้นร้อยละ 44 ถึง ร้อยละ 48 นอกจากนี้ยังพบว่าผลของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม และสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดวิเคราะห์ ให้ผลการทดลองไม่แตกต่างกัน สำหรับผลการทดลองที่ผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ตัดแปรร M-01 และ M-02 ภายใต้การฉายแสงขาว 500 ลักซ์ มีผลทำให้วัสดุมอร์ตาร์ทมีความสามารถในการทำความสะอาดตัวเองได้โดยพบว่าร้อยละการย่อยสลายของสารปองโซ 4 อาร์ เพิ่มขึ้นเป็น 6.6 และ 7.7 เท่า สำหรับอัตราส่วนผสมร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก และ 11.8 เท่า กับ 12.2 เท่า สำหรับอัตราส่วนผสมร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

## ABSTRACT

TITLE : A STUDY OF THE CHARACTERISTICS OF SELF-CLEANING  
PLASTERING MORTAR  
AUTHOR : CHODCHEEWIN MIPHOL  
DEGREE : MASTER OF ENGINEERING  
MAJOR : CIVIL ENGINEERING  
ADVISOR : ASSOC. PROF. KITTISAK KUNTIYAWICHAI, Ph.D  
KEYWORD : PLASTERING MORTAR, SELF-CLEANING, PHOTOCATALYSIS,  
TITANIUM DIOXIDE SEMICONDUCTOR

The main purpose of this work is to investigate self-cleaning of plastering mortar via photocatalysis over titanium dioxide ( $\text{TiO}_2$ ) semiconductor under irradiation. Through the process, the ponceau 4 R was selected to be an organic material which contaminated on the plastering mortar since it is a synthetic red dye. According to the result of self-cleaning in plastering mortar, this could be achieved by adding the industrial grade of titanium dioxide with loading type of irradiation including (sufficient visible light at the luminosity level of 25,000 lux and UV light. Moreover, self-cleaning under the sufficient visible light of 25,000 lux and UV light is ongoing through the increased period of time under the visible light at the luminosity level of 500 lux. Additionally, the other factors including the average of the mortar ages and compression are slightly decreased. side from this, the self-cleaning of plastering mortar was reported in terms of a percentage of Ponceau 4 R degradation under influence of type of  $\text{TiO}_2$  with loading (0, 2, 5 % (w/w)), type of irradiation (visible light, UV light), luminosity level (500 and 25,000 Lux), period for irradiation (10 min to 600 min). From the experimental results, it was found that plastering mortar could not make a self-cleaning without adding titanium dioxide semiconductor. When adding 2 %, 5 % (w/w)  $\text{TiO}_2$  to plastering mortar, the degradation of Ponceau 4 R was increased to 37 % - 44 % under visible light irradiation at the level of 25,000 lux while the degradation was increased to 44 % - 48 % under UV light irradiation (10 Watt/  $\text{m}^2$ ) in 120 minutes. Moreover it was found that the performance of  $\text{TiO}_2$  with industrial grade was the same as that with analytical grade. When using the modified  $\text{TiO}_2$  (M-01 and M-02) with 2, 5 % (w/w) loading weight under 500 lux irradiation of visible light—causing a self-cleaning in plastering mortar, a percentage of Ponceau 4 R degradation was increased around 6.6-fold, 7.7-fold and 11.8-fold, 12.2-fold, respectively

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา	3
1.4 สมมติฐานในการศึกษา	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 ทัวไป	5
2.2 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysis)	6
2.3 พลังงาน	9
2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง	12
2.5 การสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำด้วยกระบวนการแอนโนไดเซชัน	14
2.6 มลพิษทางอากาศ	15
2.7 ประโยชน์ของนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์	17
2.8 การประยุกต์ใช้งานวัสดุโฟโตคะตะไลติกในงานวิศวกรรม	20
2.9 หน่วยที่ใช้ในการวัดความสว่างของแสง	24
2.10 ค่าการเปลี่ยนแปลงสี	27
2.11 ระบบวัดค่าสีของเครื่อง	28
2.12 กำลังอัดประลัยซีเมนต์มอร์ตาร์	30
2.13 มาตรฐานกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนฉาบ	32
2.14 การปรับปรุงไทเทเนียมไดออกไซด์ให้มีความว่องไวในช่วงแสงขาว	32
2.15 การเจือโลหะในไทเทเนียมไดออกไซด์	32
2.16 ปัจจัยที่มีผลต่อความว่องไวในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก	33
2.17 แนวโน้มการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเจือโลหะในไทเทเนียมไดออกไซด์	34
2.18 สรุป	34

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย</b>	
3.1 ทั่วไป	36
3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	38
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์	39
3.4 วิธีเตรียมการทดลอง	41
3.5 รายละเอียดตัวอย่างในการทดสอบ	44
3.6 การคำนวณความสว่างของแสง	46
3.7 ตารางบันทึกผลการทดลอง	47
3.8 สรุป	48
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์</b>	
4.1 บทนำ	49
4.2 ผลการทดสอบค่าการเปลี่ยนแปลงสีมอร์ตาร์ทาร์ปูนฉาบ	50
4.3 วิเคราะห์ผลการทดลองการทำความสะอาดตัวเองของมอร์ตาร์ทาร์ผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม	69
4.4 ผลของการผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อกำลังรับแรงอัด ของมอร์ตาร์ทาร์	74
4.5 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลเมื่อผสมสารไทเทเนียมไดออกไซด์ ชนิดดัดแปรเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพค่าการเปลี่ยนแปลงสี	76
4.6 สรุป	83
<b>บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา</b>	
5.1 สรุปผลการทดสอบ	85
5.2 ข้อเสนอแนะ	86
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>87</b>
<b>ภาคผนวก</b>	
ก ผลการทดสอบค่าการเปลี่ยนแปลงสี	92
ข ผลการทดสอบกำลังของปูนฉาบที่ทำจากปูนซีเมนต์ขาว	107
ค เอกสารความปลอดภัยของสารเคมี	110
<b>ประวัติผู้วิจัย</b>	<b>118</b>



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สเปกตรัมและความยาวคลื่นของแสงขาว	11
2.2	ช่วงของความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV)	11
2.3	ตำแหน่งช่องว่างพลังงานและขนาดช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ	13
2.4	ค่าความเข้มแสงที่เหมาะสมในชีวิตประจำวัน	26
2.5	เกณฑ์กำหนดกำลังอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ตาร์มาตรฐาน	31
3.1	จำนวนตัวอย่างของมอร์ตาร์ซีเมนต์ปูนฉาบผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ TiO <sub>2</sub> (Self-Cleaning-Test)	45
3.2	จำนวนตัวอย่างของมอร์ตาร์ซีเมนต์ปูนขาวผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ TiO <sub>2</sub> (Self-Cleaning-Test)	45
3.3	จำนวนตัวอย่างของมอร์ตาร์ซีเมนต์ปูนฉาบผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ TiO <sub>2</sub> (Compression Test)	45
3.4	จำนวนตัวอย่างของมอร์ตาร์ซีเมนต์ปูนขาวผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ TiO <sub>2</sub> (Compression Test)	46
4.1	ค่าการเปลี่ยนแปลงสีวัสดุมอร์ตาร์ปูนฉาบธรรมดา (Color Variation) $\Delta E$ ที่อายุบ่มปูนฉาบ 7 วัน	51
4.2	ค่าการเปลี่ยนแปลงสีวัสดุมอร์ตาร์ปูนขาวฉาบ (Color Variation) $\Delta E$ ที่อายุบ่มปูนฉาบ 7 วัน	51
4.3	ค่าการเปลี่ยนแปลงสีวัสดุมอร์ตาร์ปูนฉาบธรรมดา (Color Variation) $\Delta E$ ที่อายุบ่มปูนฉาบ 14 วัน	56
4.4	ค่าการเปลี่ยนแปลงสีวัสดุมอร์ตาร์ปูนขาวฉาบ (Color Variation) $\Delta E$ ที่อายุบ่มปูนขาวฉาบ 14 วัน	57
4.5	ค่าการเปลี่ยนแปลงสีวัสดุมอร์ตาร์ปูนฉาบธรรมดา (Color Variation) $\Delta E$ ที่อายุบ่มปูนฉาบ 28 วัน	63
4.6	ค่าการเปลี่ยนแปลงสีวัสดุมอร์ตาร์ปูนขาวธรรมดา (Color Variation) $\Delta E$ ที่อายุบ่มปูนฉาบ 28 วัน	64
4.7	เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงสี ณ เวลาการฉายแสง 600 นาที	70
4.8	ค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่เวลา 600 นาที ระยะเวลาการให้พลังงานแสง (ร้อยละ)	71
4.9	ผลของการทดสอบกำลังของปูนซีเมนต์ฉาบที่อายุ 7 14 และ 28 วัน อัตราส่วนผสมของสารไทเทเนียมไดออกไซด์ ร้อยละ 0 2 5 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ฉาบ ในหน่วย ksc	74
4.10	ผลของการทดสอบกำลังของปูนซีเมนต์ขาวที่อายุ 7 14 และ 28 วัน อัตราส่วนผสมของสารไทเทเนียมไดออกไซด์ ร้อยละ 0 2 5 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ขาว ในหน่วย ksc	75

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.11	ค่าการเปลี่ยนแปลงสีวัสดุเมอร์ดาร์ปุนฉาบที่ผสมสารกึ่งตัวนำ ไทเทเนียมไดออกไซด์ เกรดทดลอง	77
4.12	ค่าการเปลี่ยนแปลงสีวัสดุเมอร์ดาร์ปุนฉาบที่ผสมสารกึ่งตัวนำ ไทเทเนียมไดออกไซด์ดัดแปร ชนิด M-01	78
4.13	ค่าการเปลี่ยนแปลงสีวัสดุเมอร์ดาร์ปุนฉาบที่ผสมสารกึ่งตัวนำ ไทเทเนียมไดออกไซด์ดัดแปร ชนิด M-02	79
4.14	ค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่เวลา 600 นาทีของระยะเวลา การให้พลังงานแสง (ไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักส่วนผสม)	79

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนสารกึ่งตัวนำเมื่อมีการฉายแสง	8
2.2	ค่าช่องว่างของพลังงาน (Band Gap) ของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ	8
2.3	สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	10
2.4	โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมแบรุตไทล์และอนาเทส	13
2.5	โครงสร้างผลึกของไทเทเนียม: บรูคไคต์	14
2.6	เมื่อแบคทีเรียกระจายทั่วพื้นผิวสารพิษที่เกิดจากการตาย เซลล์ก็ถูกทำลายจากการเร่งปฏิกิริยาของไทเทเนียมไดออกไซด์ TiO <sub>2</sub>	18
2.7	กระบวนการกำจัดโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ระเหยอยู่ในอากาศ	18
2.8	ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเร่งด้วยปฏิกิริยาแสงทำให้กำจัดสารที่ ก่อให้เกิดมลภาวะ	19
2.9	แสดงคราบที่หายไปเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง	19
2.10	ไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดน้ำเสีย	20
2.11	โบสถ์จูปิเตอร์ในกรุงโรมที่สร้างด้วยเทคโนโลยีโฟโตคะตะไลซิส	21
2.12	คอนกรีตปูผิวทางโดยบริษัทมิตซูบิชิ	21
2.13	สะพาน I-35W ในเมืองมินเนโซโพลิส ประเทศสหรัฐอเมริกา	22
2.14	แผ่นป้ายอะคริลิกสีขาวประหยัดพลังงาน	23
2.15	หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ชนิด T5 เคลือบสารนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนผิวหลอดไฟ	23
2.16	ศูนย์ฝึกบาสเกตบอล แอล เอส ยู บาตัน เมืองลอสแอนเจลิส	24
2.17	สิ่งก่อสร้าง ซีเต้ เดลา มูซีควาเอ็ด เดส บรอก อาร์ต	24
2.18	แสดงความสัมพันธ์ของหน่วยวัดแสงสว่างในรูปของลักซ์	25
2.19	แสดงลักษณะของเครื่องวัดปริมาณของการส่องสว่างลักซ์มิเตอร์	25
2.20	การทำงานของเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์	28
2.21	แสดงปริภูมิสี L*,a*,b*	29
2.22	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ a*,b*(ภาพตัดขวาง)	29
2.23	แสดงค่าสีที่วัดได้ของผลแอปเปิ้ล	30
2.24	แสดงทรงกลมรัศมี ΔE	30
3.1	แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลองค่าการเปลี่ยนแปลงสีของ วัสดุเมอร์ตาร์ปูนฉาบผสมสารกึ่งตัวนำเกรดอุตสาหกรรม	37
3.2	การศึกษากำลังของตัวอย่างปูนฉาบ	37
3.3	แผนภาพแสดงการออกแบบตัวอย่างการทดลองค่าการเปลี่ยนแปลงสี แบ่งตามชนิดของสารกึ่งตัวนำ	38
3.4	วัสดุที่ใช้ในการศึกษา	39

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา	40
3.6 ภาพวัสดุอมอร์ทัลาร์กับสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมเปียก	42
3.7 เทววัสดุอมอร์ทัลาร์ที่ผสมสารกึ่งตัวนำเป็นเนื้อเดียวกันแล้วเทเข้าแบบหล่อ	42
3.8 หยดสารละลายโรดามีน บี ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลต่อลิตร	42
3.9 ภาพการฉายแสงลงบนวัสดุทดลองที่ความเข้มแสงต่างกัน	43
3.10 ภาพการใช้เครื่อง Spectrophotometer วัดค่าการเปลี่ยนแปลงสี	43
4.1 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของอมอร์ทัลาร์ปูนฉาบที่อายุบ่ม 7 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำต่างๆ โดยใช้แสงขาวในการเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มแสง 500 ลักซ์	52
4.2 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของอมอร์ทัลาร์ปูนฉาบที่อายุบ่ม 7 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำต่างๆ โดยใช้แสงขาวในการเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มแสง 25,000 ลักซ์	53
4.3 ค่าการเปลี่ยนแปลงสี ของอมอร์ทัลาร์ปูนฉาบที่อายุบ่ม 7 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำต่างๆ โดยใช้แสงยูวีในการเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มแสง 10 วัตต์ต่อตารางเมตร	53
4.4 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของอมอร์ทัลาร์ปูนขาวที่อายุบ่ม 7 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำต่างๆ โดยใช้แสงขาวในการเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มแสง 500 ลักซ์	54
4.5 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของอมอร์ทัลาร์ปูนขาวที่อายุบ่ม 7 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำต่างๆ โดยใช้แสงขาวในการเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มแสง 25,000 ลักซ์	55
4.6 ค่าการเปลี่ยนแปลงสี ของอมอร์ทัลาร์ปูนขาวที่อายุบ่ม 7 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำต่างๆ โดยใช้แสงยูวีในการเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มแสง 10 วัตต์ต่อตารางเมตร	55
4.7 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของอมอร์ทัลาร์ปูนฉาบที่อายุบ่ม 14 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำต่างๆ โดยใช้แสงขาวในการเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มแสง 500 ลักซ์	58
4.8 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของอมอร์ทัลาร์ปูนฉาบที่อายุบ่ม 14 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำต่างๆ โดยใช้แสงขาวในการเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มแสง 25,000 ลักซ์	58

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.9	ค่าการเปลี่ยนแปลงสี ของมอร์ตาร์ปูนฉาบที่อายุบ่ม 14 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำต่างๆ โดยใช้แสงยูวีในการเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มแสง 10 วัตต์ต่อตารางเมตร	59
4.10	ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของมอร์ตาร์ปูนขาวที่อายุบ่ม 14 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำต่างๆ โดยใช้แสงขาวในการเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มแสง 500 ลักซ์	60
4.11	ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของมอร์ตาร์ปูนขาวที่อายุบ่ม 14 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำต่างๆ โดยใช้แสงขาวในการเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มแสง 25,000 ลักซ์	61
4.12	ค่าการเปลี่ยนแปลงสี ของมอร์ตาร์ปูนขาวที่อายุบ่ม 14 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำต่างๆ โดยใช้แสงยูวีในการเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มแสง 10 วัตต์ต่อตารางเมตร	61
4.13	ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของมอร์ตาร์ปูนฉาบที่อายุบ่ม 28 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำต่างๆ โดยใช้แสงขาวในการเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มแสง 500 ลักซ์	65
4.14	ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของมอร์ตาร์ปูนฉาบที่อายุบ่ม 28 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำต่างๆ โดยใช้แสงขาวในการเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มแสง 25,000 ลักซ์	65
4.15	ค่าการเปลี่ยนแปลงสี ของมอร์ตาร์ปูนฉาบที่อายุบ่ม 28 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำต่างๆ โดยใช้แสงยูวีในการเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มแสง 10 วัตต์ต่อตารางเมตร	66
4.16	ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของมอร์ตาร์ปูนขาวที่อายุบ่ม 28 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำต่างๆ โดยใช้แสงขาวในการเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มแสง 500 ลักซ์	67
4.17	ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของมอร์ตาร์ปูนขาวที่อายุบ่ม 28 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำต่างๆ โดยใช้แสงขาวในการเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มแสง 25,000 ลักซ์	67
4.18	ค่าการเปลี่ยนแปลงสี ของมอร์ตาร์ปูนขาวที่อายุบ่ม 28 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำต่างๆ โดยใช้แสงยูวีในการเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มแสง 10 วัตต์ต่อตารางเมตร	68
4.19	ค่าการเปลี่ยนแปลงสีเมื่อเติมสารกึ่งตัวนำลงในมอร์ตาร์ (ภาพถ่ายแสงที่ความเข้มแสงขาว 25,000 ลักซ์)	69

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.20 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีเมื่อเติมสารกึ่งตัวนำลงในมอร์ตาร์ ฉายแสงขาว 25,000 ลักซ์ อายุมอร์ตาร์ 14 วัน	72
4.21 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีเมื่อเติมสารกึ่งตัวนำลงในมอร์ตาร์ ฉายแสงขาว 500 ลักซ์ อายุมอร์ตาร์ 7 วัน	73
4.22 ความสัมพันธ์กำลังอัดของปูนฉาบกับระยะเวลาการบ่ม ของตัวอย่างที่มีปริมาณอัตราส่วนผสมร้อยละ 0 2 5 โดยน้ำหนัก	75
4.23 ความสัมพันธ์กำลังอัดของปูนฉาบกับระยะเวลาการบ่ม เปรียบเทียบกับมอก. 1776-2542 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม	76
4.24 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของมอร์ตาร์ปูนฉาบ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (เกรดอุตสาหกรรม เกรดทดลอง M-01 M-02) ฉายแสงยูวี 10 วัดต่อตารางเมตร	80
4.25 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของมอร์ตาร์ปูนฉาบ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (เกรดอุตสาหกรรม เกรดทดลอง M-01 และ M-02) ฉายแสงขาว 25,000 ลักซ์	80
4.26 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของมอร์ตาร์ปูนฉาบ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (เกรดอุตสาหกรรม เกรดทดลอง M-01 และ M-02) ฉายแสงขาว 500 ลักซ์	81
4.27 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งลักษณะโครงสร้าง R หมายถึง รูไทล์ (Rutile) และ A หมายถึง อะนาเทส (Anatase)	82
4.28 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของการฉายแสงยูวีและแสงขาวของ สารไทเทเนียมไดออกไซด์	83

## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในโลกปัจจุบันที่วิทยาการและความก้าวหน้าของเทคโนโลยีมีอิทธิพลต่อการดำรงชีวิตของมนุษยชาติไม่มีใครปฏิเสธได้ว่าบนความก้าวหน้าของเทคโนโลยีและวิทยาการต่าง ๆ นั้นนอกจากให้ประโยชน์ต่อมนุษย์แล้ว เมื่อยังพัฒนาศักยภาพมากขึ้นก็ส่งผลทำให้เกิดปัญหาควบคู่กันตามไปด้วย เพราะการคิดค้นนวัตกรรมใหม่ของนักประดิษฐ์ส่วนใหญ่ไม่ได้มีการคำนึงถึงผลกระทบอื่นที่จะส่งผลตามมา ซึ่งที่สำคัญมากที่สุดได้แก่ ปัญหาทางมลภาวะที่เกิดขึ้น ไม่ว่าจะเป็นมลภาวะทางอากาศ มลภาวะทางเสียง มลภาวะทางน้ำ และอื่นๆ ปัญหาเหล่านี้เพิ่มมากขึ้นทุกวันและส่งผลกระทบต่อโลกและสิ่งมีชีวิตบนโลก รวมทั้งมนุษย์ด้วย แต่ถึงอย่างไรในทศวรรษหลังมานี้ นักวิจัยและผู้เกี่ยวข้องได้ให้ความสำคัญกับปัญหาที่เกิดขึ้น มีการวิจัยและคิดค้นแนวทางและวิธีในการจัดการกับปัญหามลภาวะต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น มลภาวะทางเสียง มลภาวะทางน้ำ หรือแม้แต่มลภาวะทางอากาศ เป็นต้น ปัญหามลพิษทางอากาศนับเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญต่อการดำรงชีวิตของประชากรที่อาศัยตามเมืองต่างๆ โดยการเกิดมลพิษอากาศมีสาเหตุมาจากหลายปัจจัยไม่ว่าจะเป็นมลพิษอากาศที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การเผาไร่ การเผาไหม้เศษวัสดุขยะมูลฝอยรั่วพิษต่างๆ การเผาขยะในที่โล่ง และควันจากการสูบบุหรี่ รวมทั้งมลพิษที่เกิดจากการขยายตัวเพื่อรองรับกิจกรรมต่างๆ โดยเฉพาะด้านอุตสาหกรรม และการคมนาคมขนส่ง ยกตัวอย่างเช่น ระบบการคมนาคมขนส่งของกรุงเทพมหานครในปัจจุบันใช้การจราจรทางบกเป็นหลัก โดยมีอัตราส่วนการใช้รถยนต์ส่วนบุคคลถึงร้อยละ 53 ในขณะที่มีการใช้รถขนส่งมวลชนเพียงร้อยละ 47 ยานพาหนะต่างๆ ที่สัญจรไปมาบนท้องถนนรวมทั้งสภาพการจราจรที่ติดขัด และการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของยานพาหนะ ส่งผลให้มีการเกิดควันเสียจากยานพาหนะและการเผาไหม้ ที่ไม่สมบูรณ์ของเครื่องยนต์ทำให้เกิดมลพิษอากาศขึ้นโดยมลพิษอากาศที่สำคัญ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ก๊าซโอโซน ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ตะกั่ว ฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน ซึ่งผลที่เกิดขึ้นจากมลพิษดังกล่าวเป็นกลิ่น การระคายเคือง ความรำคาญ ตลอดจนผลกระทบต่อสุขภาพที่เกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจ ระบบการทำงานของ หัวใจและปอด ซึ่งมลพิษต่างๆ ที่เกิดมานั้นยังส่งผลกระทบต่อสิ่งก่อสร้างต่างๆ อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ด้วยเหตุผลนี้จึงมีการพัฒนาด้านอุตสาหกรรมการก่อสร้างทั้งในปัจจุบันและอนาคตให้สอดคล้องกับสภาพปัญหามลภาวะที่เกิดขึ้น และเป็นสิ่งที่ถูกให้ความสนใจจากหลายๆ ฝ่ายตลอดช่วงทศวรรษหลังๆ ที่ผ่านมา และประเด็นที่น่าสนใจเหล่านี้ที่มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับการลดปัญหามลภาวะควบคู่กับการพัฒนาวัสดุก่อสร้าง ทำให้เกิดแนวคิดที่ใช้ทฤษฎีทางวิทยาศาสตร์มาประยุกต์กับการพัฒนาด้านวัสดุก่อสร้าง ซึ่งเน้นการเพิ่มขีดความสามารถของพื้นผิววัสดุก่อสร้างให้สามารถทำความสะอาดตัวเอง (Self – cleaning) อีกทั้งลดมลพิษในอากาศ (Pollution reducing) ที่อยู่รอบๆ วัสดุก่อสร้างนั้นๆ นักวิจัยของ Italcementi Group เมืองเบอร์กาโม ประเทศอิตาลี ได้ทดลองผลิตคอนกรีตที่สามารถทำความสะอาดตัวเองได้ (Self-cleaning concrete) เพื่อปกป้องพื้นผิวของโครงสร้างตึกอาคารให้ปราศจากความหมองคล้ำจากคราบสิ่งสกปรกและมลพิษใน

บรรยากาศ ด้วยวิธีการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide,  $TiO_2$ ) เข้าไปในส่วนผสมของปูนซีเมนต์เพื่อนำไปผสมเป็นคอนกรีต เมื่อนอนภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $TiO_2$ ) ดูดซับ (Absorb) แสงยูวี (Ultraviolet) จะเปลี่ยนสภาพเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $TiO_2$ ) ที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยา (Highly active) และมีความสามารถในการย่อยสลายมลพิษในอากาศที่มาสัมผัสกับพื้นผิวของคอนกรีตทำให้คอนกรีตสามารถทำสะอาดพื้นผิวและลดมลพิษในอากาศ

การที่วัสดุมีความสามารถในการทำความสะอาดตัวเองได้นั้นจำเป็นต้องอาศัยหลักการของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) ของสารที่สามารถถูกกระตุ้นได้ง่ายด้วยแสงยูวี นักวิจัยพบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $TiO_2$ ) ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น เป็นเม็ดสีสำหรับสีขาวในอุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมพลาสติก และเครื่องสำอาง จัดเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยามากเมื่อสัมผัสกับแสงยูวี (Ultraviolet) เนื่องจากแสงยูวีจะไปกระตุ้นให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $TiO_2$ ) สร้าง negative electron ( $e^-$ ) และ positive-hole ( $h^+$ ) โดยที่ negative electron ( $e^-$ ) ของ  $TiO_2$  จะสามารถทำปฏิกิริยาเพื่อย่อยสลายโมเลกุลของน้ำทำให้ได้ก๊าซไฮโดรเจน (hydrogen gas,  $H_2$ ) และไฮดรอกซิลเรดิคัล (hydroxyl radical,  $OH^\cdot$ ) ส่วน positive-hole ( $h^+$ ) จะไปทำปฏิกิริยากับโมเลกุลออกซิเจน ( $O_2$ ) แล้วได้ซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน (super oxide anion,  $O_2^{\cdot-}$ ) โดยวงจรของการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวนี้จะดำเนินต่อเนื่องไปเรื่อยๆ เมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $TiO_2$ ) ได้รับแสง ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยา Photocatalysis ที่กระตุ้นให้เกิดสารออกซิไดซิง (strong oxidizing agent) เช่น  $OH^\cdot$   $O_2^{\cdot-}$  นั้น จะสามารถย่อยสลายมลพิษในอากาศ ทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และอนินทรีย์ (organic and inorganic pollutants) ให้เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำที่ไม่เป็นอันตรายดังนั้นเมื่อนำสาร ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $TiO_2$ ) มาผสมในปูนซีเมนต์เพื่อผลิตคอนกรีต ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) จะช่วยย่อยสลายสารอินทรีย์ เช่น เหม่า คิวบ์ น้ำมัน เชื้อรา ตะไคร่ สาหร่าย แบคทีเรีย ก๊าซพิษฟอร์มาดีไฮด์ เบนซีน ควีนบูทรี ไนตรัสออกไซด์ ( $NO_x$ ) ซัลฟูริกออกไซด์ ( $SO_x$ ) เป็นต้น ให้กลายเป็นออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ ไนเตรท ซัลเฟต และโมเลกุลอื่นๆ ที่ไม่ส่งผลกระทบต่อความสกปรกของพื้นผิวและไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสภาพแวดล้อมในอากาศ สำหรับตัวอย่างการกำจัดไนตรัสออกไซด์  $NO_x$  ให้กลายเป็นไนเตรท ( $NO_3$ ) ผลิตภัณฑ์ต่างๆของปฏิกิริยา Photocatalysis โดยเฉพาะน้ำเมื่อเกิดขึ้นบนพื้นผิวจะเคลือบอยู่เต็มพื้นผิวทำให้เกิดพื้นผิวที่ชอบน้ำ หรือที่เรียกว่า Hydrophilic surface จึงสามารถป้องกันไม่ให้ความชื้นในอากาศรวมตัวเป็นหยดน้ำเกาะบนพื้นผิว ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการจับตัวของคราบสิ่งสกปรกบนพื้นผิวได้ ดังนั้นเมื่อมีฝนตกหรือใช้การชะล้างแบบเบาๆ พื้นผิวจะสามารถทำความสะอาดได้ง่าย ส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตสามารถสวยงาม สะอาด และดูใหม่ได้ยาวนานขึ้น เนื่องจากวัสดุก่อสร้างโฟโตคะตะไลติกนั้นถูกจำกัดการนำไปใช้ไว้ด้วยลิขสิทธิ์ในต่างประเทศ ทำให้ความรู้ความเข้าใจพื้นฐานวัสดุดังกล่าวในประเทศไทยยังไม่แพร่หลายมากนัก ทั้งทฤษฎีอัตราส่วนของผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างโฟโตคะตะไลติก งานวิจัยต่างๆที่จะนำประโยชน์จากทฤษฎีโฟโตคะตะไลซิส มาใช้กับวัสดุก่อสร้างในประเทศไทย หากสรุปวัสดุก่อสร้างโฟโตคะตะไลติกยังถูกใช้น้อยมากโดยเฉพาะวัสดุคอนกรีตโฟโตคะตะไลติก งานวิจัยที่กล่าวถึงน้อยมากแต่เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้งานวัสดุคอนกรีตในไทยมีมาก หากประยุกต์นำวัสดุคอนกรีตมาใช้ในรูปแบบวัสดุคอนกรีตโฟโตคะตะไลติกเป็นประโยชน์อย่างกว้างขวางในการพัฒนาวัสดุก่อสร้างในประเทศไทย



การวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการใช้ประโยชน์จากแสงและการเหนี่ยวนำแสงเพื่อเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (photocatalyst) เพื่อศึกษาการใช้งานของสารกึ่งตัวนำและกระบวนการเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้ปูนฉาบสามารถทำความสะอาดตัวเองได้ด้วยการศึกษาผลจากอัตราส่วนการผสมของสารกึ่งตัวนำว่าอัตราส่วนผสมใดที่มีความเหมาะสมมากที่สุดเพื่อนำไปเป็นอัตราส่วนผสมในวัสดุปูนฉาบ ซึ่งมีการศึกษาต่อด้วยว่าการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำความสะอาดตัวเองของวัสดุเมอร์ตาร์ทาร์นั้นมีหลักการและวิธีการศึกษาอย่างไร และอัตราส่วนนั้นมีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดของปูนฉาบในค่าที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน เพื่อเป็นแหล่งข้อมูลให้ความรู้ และส่งเสริมความเข้าใจ เผยแพร่ประโยชน์และความสำคัญของวัสดุปูนฉาบโฟโตคะตะไลติกแก่ผู้สนใจและเป็นฐานข้อมูลการวิจัยเพื่อพัฒนาวัสดุก่อสร้างโฟโตคะตะไลติกต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทำความสะอาดตัวเองบนผิววัสดุเมอร์ตาร์ทาร์ตัวกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลของการตัดแปรสารกึ่งตัวนำมีผลต่อความสามารถในการทำความสะอาดตัวเองได้ของวัสดุเมอร์ตาร์ทาร์ปูนฉาบ
- 1.2.3 เพื่อศึกษาผลกระทบต่อกำลังรับน้ำหนักของวัสดุเมอร์ตาร์ทาร์ปูนฉาบเมื่อเติมสารกึ่งตัวนำลงไปวัสดุปูนฉาบโฟโตคะตะไลติก

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 วัสดุที่ใช้ทำการศึกษาค้นทดลองนั้น แบ่งออกเป็นวัสดุ 2 ชนิด คือ ปูนซีเมนต์ฉาบสูตรพิเศษตราเสือ และ ปูนขาวตักแต่งภายในและภายนอกตราเสือ โดยเมื่อผสมวัสดุซีเมนต์แต่ละชนิดกับสารกึ่งตัวนำที่ใช้คือ  $\text{TiO}_2$  (ไทเทเนียมไดออกไซด์) เกรดอุตสาหกรรมในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก คือ ร้อยละ 0.2 และ 5 โดยน้ำหนัก
- 1.3.2 กำหนดอัตราส่วนการผสมของเมอร์ตาร์ทาร์ปูนฉาบ ปูนซีเมนต์:ทราย คือ 1 : 3 และเมอร์ตาร์ทาร์ปูนขาว ปูนขาว : ทราย คือ 1 : 2 โดยปริมาตร โดยที่ทรายมีค่าโมดูลัสความละเอียดที่ 2.0 - 2.2 โดยผ่านการอบแห้ง
- 1.3.3 ให้ขอบเขตการวัดค่าการทำความสะอาดจากสารอินทรีย์ที่เปลี่ยนแปลงสีบนผิววัสดุในสภาวะอากาศที่อุณหภูมิห้อง ไม่มีสิ่งเร้าที่มากกระตุ้น
- 1.3.4 ศึกษาคุณสมบัติการทำความสะอาดตัวเองโดยวัดค่าจากการย่อยสลายสารปนเปื้อนคือสารปองโซร์ 4 อาร์ โดยสารปนเปื้อนมีความเข้มข้นคงที่ 1.0 มิลลิโมลต่อลิตร ใช้หยดลงชิ้นส่วนการทดลอง 1 มิลลิลิตร ต่อ ชิ้นทดลอง 1 ชิ้น
- 1.3.5 สำหรับการทดลองค่าการเปลี่ยนแปลงสีนั้น ขนาดโมลชิ้นตัวอย่างการทดลองที่นำมาใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2 นิ้ว ความสูง 2 เซนติเมตร ทุกชิ้นการทดลอง สำหรับการทดลองกำลังรับแรงอัด โมลตัวอย่างที่ใช้มีลักษณะเป็นทรงลูกบาศก์ ขนาด กว้าง 15.0 เซนติเมตร ยาว 15.0 เซนติเมตร สูง 15.0 เซนติเมตร

1.3.6 การจำลองการฉายแสงกระทำภายในกล่องทรงลูกบาศก์ที่มีขนาดกว้าง 1.00 เมตร ยาว 1.00 เมตร สูง 1.00 เมตร โดยคำนวณค่าความเข้มของแสงที่ 500 ลักซ์ สำหรับแสงขาวที่อยู่ภายในอาคาร 25,000 ลักซ์ สำหรับแสงขาวภายนอกอาคาร และแสงเหนือม่วง (UV) ความเข้มแสง 10 วัตต์ต่อตารางเมตร

1.3.7 การทดสอบอัตราการทำความสะอาดตัวเองของวัสดุโพลีเอสเตอร์ไลติก และกำลังของวัสดุโพลีเอสเตอร์ไลติกนั้นทำที่อายุมอร์ตาร์ 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน บ่มในอากาศที่ไม่มีแสง หรือห้องสภาพมิดชิด

1.3.8 การทดลองความสามารถในการทำความสะอาดตัวเองวัดจากค่าการเปลี่ยนแปลงสี กำหนดให้ใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) ของบริษัทเทคนิไดน์ (Technidyne) ในการทดลอง

#### 1.4 สมมติฐาน

1.4.1 วัสดุปูนฉาบและวัสดุปูนขาวที่ผสมสารกึ่งตัวนำ  $TiO_2$  สามารถทำความสะอาดสารอินทรีย์ที่ติดอยู่บริเวณผิววัสดุได้

1.4.2 วัสดุมอร์ตาร์โพลีเอสเตอร์ไลติกที่ผสมสารกึ่งตัวนำที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักที่แตกต่างกันจะมีอัตราการทำความสะอาดสารปนเปื้อนที่ต่างกัน

1.4.3 วัสดุมอร์ตาร์โพลีเอสเตอร์ไลติกที่ผสมสารกึ่งตัวนำที่อายุมอร์ตาร์ที่ต่างกันจะมีอัตราการทำความสะอาดสารปนเปื้อนที่ต่างกัน

1.4.4 ความเข้มของแสงขาวและรังสียูวีม่วงที่ฉายแสงบนผิวชั้นทดลองจะเกิดปฏิกิริยาทำให้อัตราการทำความสะอาดที่ผิววัสดุมอร์ตาร์โพลีเอสเตอร์ไลติกที่ต่างกัน

1.4.5 วัสดุโพลีเอสเตอร์ไลติกที่เป็นชนิดปูนฉาบและชนิดปูนขาวมีความสามารถในการทำความสะอาดสารปนเปื้อนที่ต่างกัน

1.4.6 อัตราส่วนผสมระหว่างทั้งวัสดุซีเมนต์มอร์ตาร์กับสารกึ่งตัวนำที่อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักที่ต่างกันจะมีผลทำให้กำลังของมอร์ตาร์แตกต่างกัน

1.4.7 สารกึ่งตัวนำดัดแปรจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการทำความสะอาดตัวเองของวัสดุทำความสะอาดตัวเองเปลี่ยนแปลงไป

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.5.1 ทราบอัตราส่วนการผสมของวัสดุก่อสร้างปูนฉาบและปูนขาวที่ผสมสารกึ่งตัวนำในอัตราส่วนที่พอเหมาะสำหรับการเกิดปฏิกิริยาที่จะทำให้เกิดการทำความสะอาดเพื่อนำไปใช้งานได้ตามความเหมาะสมใน

1.5.2 เข้าใจถึงแนวโน้มของการเกิดปฏิกิริยาที่จะทำให้เกิดการทำความสะอาดตัวเองของวัสดุโพลีเอสเตอร์ไลติกในสภาวะแสงที่ต่างกัน เพื่อนำไปใช้ในอัตราส่วนการผสมสารกึ่งตัวนำกับวัสดุมอร์ตาร์ปูนฉาบ และ วัสดุมอร์ตาร์ปูนขาว

1.5.3 สามารถวิเคราะห์แนวโน้มประสิทธิภาพการทำความสะอาดของสารกึ่งตัวนำเมื่อทำการดัดแปรสารกึ่งตัวนำเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและนำมาประยุกต์ใช้งานจริง

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รายละเอียดในบทนี้ประกอบด้วยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ ได้แก่ บททั่วไปซึ่งอธิบายเกี่ยวกับความเป็นมาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และหลักการและทฤษฎีที่มีความเกี่ยวข้องในการอธิบายทฤษฎีเบื้องต้นและหลักการของงานวิจัยดังนี้

### 2.1 ทัวไป

การพัฒนาวัสดุก่อสร้างในปัจจุบันได้ก้าวล้ำเทคโนโลยีขั้นสูง จนนักวิทยาศาสตร์สามารถทำให้พื้นผิวของวัสดุสามารถทำความสะอาดตัวเอง และลดมลพิษทางอากาศได้และสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้จริงในช่วงต้นของ ค.ศ. 1990 นักวิจัยของบริษัทอิตาซีเมนต์ (Italcementi) ในเมืองเบอร์กาโม ประเทศอิตาลี ได้ทดลองผลิตคอนกรีตที่ทำความสะอาดตัวเองได้ เพื่อปกป้องพื้นผิวของโครงสร้างตึก อาคาร ให้ปราศจากความหมองคล้ำจากคราบสิ่งสกปรกและมลพิษในบรรยากาศด้วยวิธีผสมผงสีขาวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) เข้าไปในส่วนผสมของปูนซีเมนต์เพื่อนำไปผสมเป็นคอนกรีต เมื่ออนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ดูดซับแสงยูวีจะเปลี่ยนสภาพเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาและมีความสามารถในการย่อยสลายมลพิษในอากาศที่มาสัมผัสกับพื้นผิวของคอนกรีตทำให้คอนกรีตสามารถทำความสะอาดพื้นผิวของตัวเองและลดมลพิษในอากาศได้ ต่อมามีการศึกษาค้นคว้ากระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic) เพื่อใช้ทำความสะอาดผิววัสดุก่อสร้าง เช่น กระจก หน้าต่างกระจกภายนอกอาคาร เป็นต้น เพราะในปัจจุบันมีการเพิ่มขึ้นของสิ่งปลูกสร้างปัญหาที่ตามมาประการหนึ่งคือการบำรุงรักษา เมื่อต้องการทำการบำรุงรักษาต้องสิ้นเปลืองทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาในอัตราที่สูง จึงมีผู้คิดค้นการรักษาความสะอาดของผิววัสดุก่อสร้างไปเรื่อยๆตลอดอายุการใช้งานของผิววัสดุก่อสร้าง

ผู้ริเริ่มศึกษากระบวนการโฟโตคะตะไลติก คือ ฟุจิชิม่า (Fujishima) และ ฮอนด้า (Honda) ในช่วง ค.ศ.1970 ความคืบหน้าในงานวิจัยที่ต่อเนื่องส่งผลให้มีการนำมาใช้จริงซึ่งรวมถึงด้านการก่อสร้างและนำมาพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อนำมาใช้กับวัสดุก่อสร้างอีกด้วยซึ่งในงานวิจัยมุ่งเน้นในการพัฒนาวัสดุที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ขาว โดยวัสดุที่มีส่วนผสมของไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นที่นิยมมาก เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีคุณสมบัติโฟโตคะตะไลติก ซึ่งเก็บรักษาสมดุลของคอนกรีตเมื่อเวลาผ่านไปและมีส่วนร่วมในการกำจัดมลพิษที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม รูปแบบการประยุกต์ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์คือ ผลิตวัสดุก่อสร้างคุณสมบัติโฟโตคะตะไลติก รวมไปถึงการบำบัดพื้นพุ่มลภาวะในสิ่งแวดล้อม ทำความสะอาดผิวสัมผัสของตัวเองและยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อโรค สารอินทรีย์อื่นๆบนพื้นผิว เป็นการใช้ประโยชน์จากแสงแดด ลม และฝนในกระบวนการทำงาน และขยายขอบเขตสำหรับงานวัสดุก่อสร้างเพื่อเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม การประยุกต์ใช้งานจากกระบวนการโฟโตคะตะไล ให้ประโยชน์อย่างมากกับวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ทั้งเทคโนโลยีในยุคหลังปฏิกิริยาทางเคมีของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสมีส่วนในการดักจับมลพิษทางอากาศ ซึ่งแสงยูวี (Ultraviolet) ที่มีอยู่ในอากาศนั้นมีส่วนในการบำบัดน้ำและกลั่นอันไม่พึงประสงค์ ซึ่งพื้นฐานทั้ง

2 ประการนั้น กระบวนการทางเคมีของแสง เป็นคุณสมบัติของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox) เนื่องจากแสงส่งผลให้เกิดซูเปอร์ไฮโดรฟิลิตี (superhydrophilicity) คือคุณลักษณะพื้นผิวที่ชอบน้ำ ซึ่งเป็นพื้นฐานในการนำมาประยุกต์ใช้เพื่อบำบัดสิ่งแวดล้อม [1-3] คุณสมบัติเชิงกลและเชิงจลน์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลต์ มีการค้นคว้ากันอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะการศึกษากระบวนการโฟโตคะตะไลซิสจากไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำ ในความเป็นจริงแล้วขนาดที่นำมาใช้ โมเลกุลของไทเทเนียมนั้นอยู่ในระดับนาโนไทเทเนียม วัสดุโฟโตคะตะไลติกจะอยู่ในรูปของผงหรือเป็นลักษณะแผ่นบางที่บริเวณผิว ซึ่งเป็นมีหน้าที่ป้องกันรอยขีดข่วนที่ทำให้เกิดริ้วรอยบริเวณผิว โดยเราจะพบในการผลิตวัสดุในลักษณะของแก้ว [4-5] การใช้ในงานเส้นใยคาร์บอน [6] งานกระดาษ [7] เซรามิก [8] วัสดุซีเมนต์ [9-10] และในกลุ่มที่ให้ความสนใจในการศึกษาโดยพื้นฐานจากวัสดุซีเมนต์ ยกตัวอย่างเช่น ซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ตาร์ และ คอนกรีต ซึ่งมีคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกัน รวมถึงความพรุนของโครงสร้าง

คุณสมบัติที่มีความน่าสนใจในการศึกษาคือกระบวนการโฟโตคะตะไลติกของวัสดุก่อสร้างที่ทำให้ความสะอาดพื้นผิวของอาคารโดยการดักจับมลพิษต่างๆ หรือสารอินทรีย์ที่ติดตามผิววัสดุตามอาคาร เนื่องจากการใช้งานของอาคารที่เป็นเวลายาวนาน นอกจากนี้ ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ยังสามารถผสมลงวัสดุผิวทางซึ่งมีการศึกษาเกี่ยวกับการดักจับเพื่อลดปริมาณของสารพิษ ( $\text{NO}_x$ ) โดยการผสมผงแบง์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ลงบนวัสดุผิวทาง [11 - 12] นอกจากนี้ยังมีเทคนิคอื่นๆ ไม่ว่าจะเป็นการพ่น เคลือบ การทาวีสดูกึ่งตัวนำ ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ลงบนผิววัสดุ [13-15] ซึ่งการเคลือบผิวสามารถนำมาใช้กับวัสดุก่อสร้างอาคารได้ แต่ถึงอย่างไรการเคลือบผิวยังมีข้อบกพร่องของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุก่อสร้างเดิมกับวัสดุเคลือบผิว ซึ่งหากวิเคราะห์ผลแล้วยังมีความด้อยคุณภาพในการใช้งานกับอาคารภายนอก [16] แต่การศึกษาคุณสมบัติการทำความสะอาดตัวเองของวัสดุคอนกรีตโดยผสมสารกึ่งตัวนำ ( $\text{TiO}_2$ ) ลงไปในอัตราส่วนที่เหมาะสมแล้วปรากฏว่าวัสดุคอนกรีตทำความสะอาดตัวเองได้นั้นมีประสิทธิภาพดีในการทำปฏิกิริยากับแสงยูวี และความเข้มแสงแสงขาวที่เพียงพอเมื่อเทียบเป็นความเข้มแสงภายนอกอาคาร และประสิทธิภาพการทำความสะอาดตัวเองของวัสดุคอนกรีตลดลงในสภาพความเข้มแสงเทียบกับความเข้มแสงภายในอาคาร [17] ปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการทำความสะอาดตัวเองของวัสดุคอนกรีตนั้นเป็นปฏิกิริยาที่ไม่ก่อให้เกิดมลพิษและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมจึงมีความน่าสนใจที่ควรศึกษาและพัฒนาต่อเนื่อง โดยมีแนวทางในการพัฒนาเพื่อจะได้เพิ่มประสิทธิภาพของการทำความสะอาดตัวเองในแสงขาวที่สภาวะความเข้มแสงภายในอาคาร เปลี่ยนวัสดุการศึกษาจากคอนกรีตมาเป็นวัสดุปูนฉาบดังจะกล่าวในงานวิจัยนี้

## 2.2 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysis)

ในเนื้อหาที่กล่าวถึงกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูง (Advance oxidation technologies) สามารถนำมาบำบัดมลพิษทั้งในด้านน้ำ และอากาศ [18] มีหลักการเบื้องต้น คือ การฉายแสงเพื่อกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นบนตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นของสารกึ่งตัวนำทำให้ปฏิกิริยานั้นๆเกิดได้รวดเร็วขึ้น [19] การกำจัดสารมลพิษโดยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเริ่มจากการให้ ระบบรวมถึงสารเคมีต่างๆในระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวจะเกิดการดูดซับสาร ปนเปื้อนขึ้นบนสารกึ่งตัวนำที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะ

สมดุจจากนั้นจึงเป็นการ ฉายแสงทำให้เกิดการทำปฏิกิริยาลดสลายสารปนเปื้อนเหล่านั้นหรือลดความเป็นพิษของสารปนเปื้อน โดยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถจำแนกตามสถานะของสารที่ทำปฏิกิริยาร่วมกันได้เป็นสองประเภท คือ Heterogeneous Photocatalysis เป็นลักษณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยากับมลพิษที่ต้องการบำบัดในสถานะที่แตกต่างกัน เช่น ของเหลวกับของแข็ง เป็นต้น และ Homogeneous Photocatalysis เป็นลักษณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยากับมลพิษที่ต้องการบำบัดอยู่ในสถานะเดียวกัน เช่น ของเหลวกับของเหลว เป็นต้น

### 2.2.1 การดูดซับของตัวเร่งปฏิกิริยา (Adsorption Process)

การดูดซับของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุล หรือ คอลลอยด์ที่อยู่ในของเหลวหรือก๊าซให้มาดูดซับบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ปรากฏการณ์เช่นนี้จะเป็นการเคลื่อนย้ายสารจากของเหลวหรือก๊าซมาอยู่ที่ผิวของของแข็งโมเลกุลหรือคอลลอยด์ เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับ เรียกว่า ตัวดูดซับ การดูดซับโมเลกุลบนผิวของตัวดูดซับอาจเกิดขึ้นด้วยแรงทางกายภาพ แรงทางเคมี หรือทั้งสองอย่างรวมกัน โดยแรงทางกายภาพ เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ แรงทางไฟฟ้าสถิตย์ เป็นต้น และแรงทางเคมี เป็นการสร้างพันธะเคมีขึ้นระหว่างผิวของตัวเร่งปฏิกิริยากับสารถูกดูดซับ โดยสารถูกดูดซับไม่สามารถหลุดออกมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาได้ ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดังกล่าว การดูดซับจะเกิด จากแรงทางเคมีเป็นหลัก

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับมีดังต่อไปนี้

2.2.1.1 ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับอัตราการแพร่ผ่านรูพรุนซึ่งความปั่นป่วนของระบบเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ

2.2.1.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับ และพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity) ยกเว้นในกรณีที่โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีขนาดใหญ่กว่าช่องว่างของสารดูดซับ

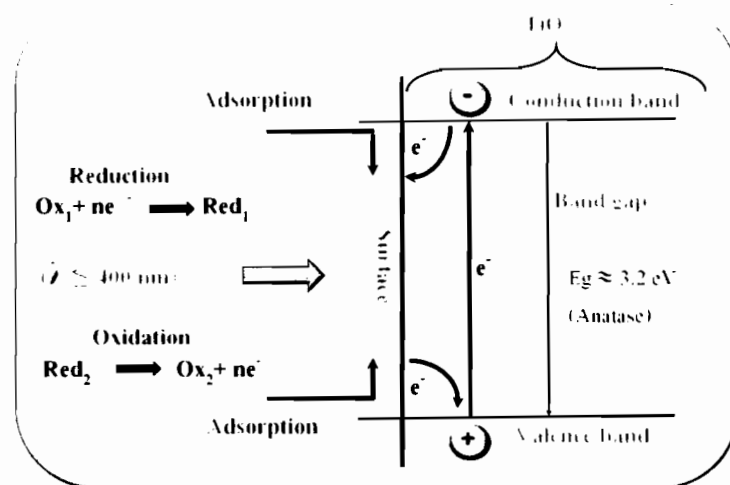
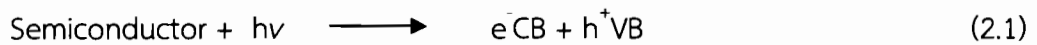
2.2.1.3 ขนาดของสาร หรือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับบนผิวสารดูดซับมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในช่องว่างของสารดูดซับ

2.2.1.4 อุณหภูมิในกรณีการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนพบว่าเมื่ออุณหภูมิลดลงความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้น แต่อัตราเร็วในการดูดซับจะลดลง ในทางตรงกันข้ามถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลงแต่อัตราเร็วในการดูดซับจะสูงขึ้น

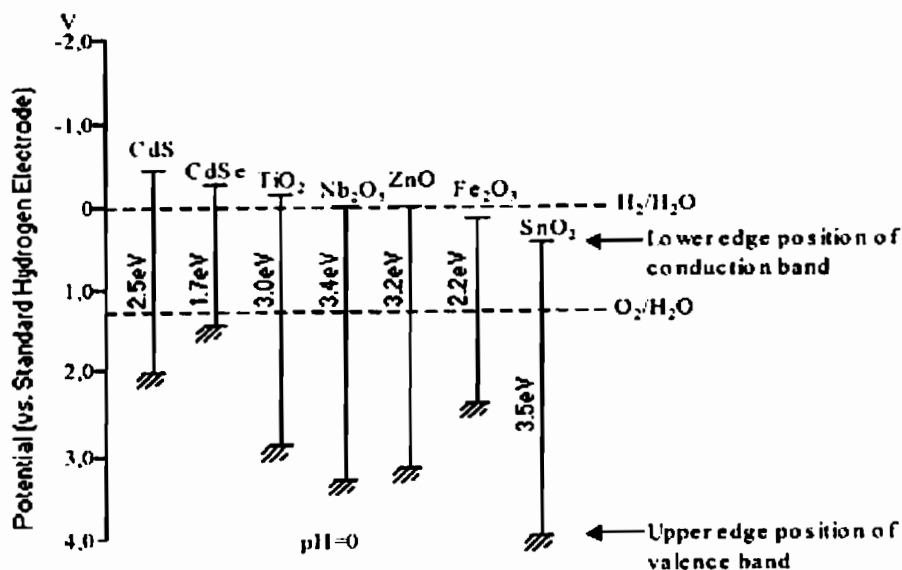
### 2.2.2 การฉายแสง (Irradiation Process)

การฉายแสงเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานแสงมากระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยเป็นการเร่งปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้การจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนเปลี่ยนแปลงไปและเริ่มมีการสลายของพันธะภายในโมเลกุลขึ้นดังแสดงในภาพที่ 2.1 โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ซึ่งอนุภาคของสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีแถบพลังงานอยู่สองแถบคือแถบวาเลนซ์แบนด์ (Valance Band) ที่มีพลังงานอิเล็กตรอนสูงและแถบนำไฟฟ้า (Conduction Band) ที่ไม่มีพลังงานอิเล็กตรอนอยู่โดยแถบทั้งสองจะถูกแยกออกจากกันโดยแถบช่องว่างพลังงาน (Band Gap) ค่าของช่องว่างพลังงาน (Energy Gap) จะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลางโดยตัวกลางแต่ละชนิดจะมีค่าต่างกัน

ออกไปดังภาพที่ 2.2 ต่อมาเมื่อมีการฉายแสง ( $h\nu$ ) บนตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับ แถบช่องว่างพลังงานจะเกิดการกระตุ้นอิเล็กตรอนบนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำในแถบวาเลนซ์แบนด์ให้มีพลังงานเพิ่มขึ้นจนสามารถเคลื่อนที่ข้ามแถบช่องว่างพลังงานเข้าสู่แถบการนำไฟฟ้า ( $e^-CB$ ) จึงทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนเรียกว่าโฮล (Hole,  $h^+VB$ ) ในแถบวาเลนซ์แบนด์เกิดเป็นคู่อิเล็กตรอนและที่ว่างของอิเล็กตรอนในอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาดังแสดงในสมการที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนสารกึ่งตัวนำเมื่อมีการฉายแสง



ภาพที่ 2.2 ค่าช่องว่างของพลังงาน (Band Gap) ของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ

โดยคู่อิเล็กตรอนและที่ว่างของอิเล็กตรอนจะมีบทบาทในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันเพื่อให้และรับอิเล็กตรอนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาและมลสารอื่นๆโดยอิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของออกซิเจนที่ถูกดูดติดผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ( $O_2$ ) ทำให้โมเลกุลของออกซิเจนเกิดปฏิกิริยารีดักชันเปลี่ยนไปเป็นซูเปอร์ออกไซด์อออนเรดิคอล ( $O_2^{\cdot -}$ ) ดังแสดงในสมการที่ 2.2



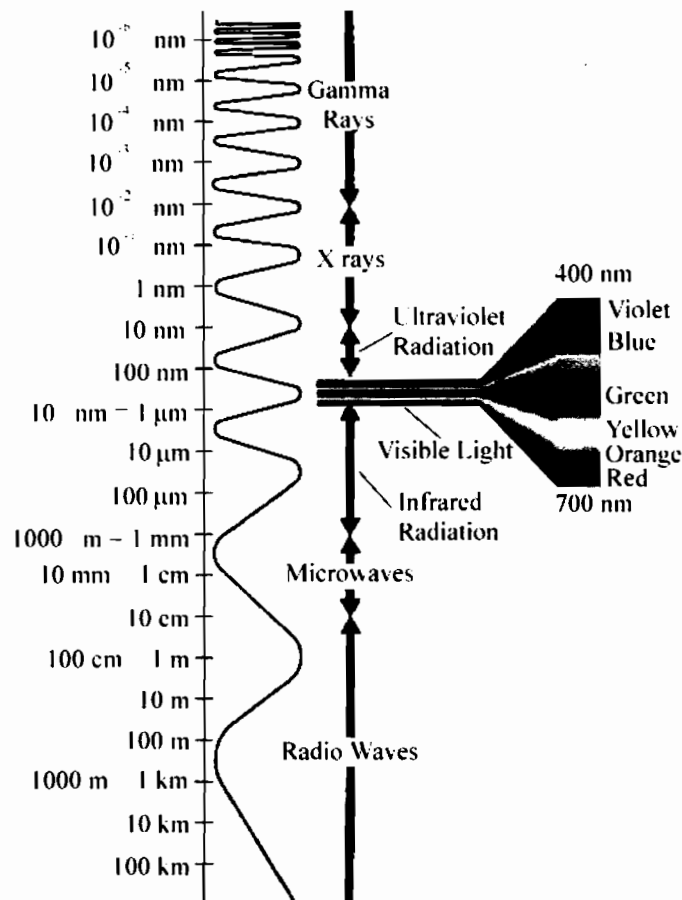
ที่ว่างอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์แบนด์จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกไซด์อออน ( $OH^-$ ) และน้ำ ( $H_2O$ ) เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคอล ( $OH^{\cdot}$ ) และเรดิคอลตัวอื่นดังแสดงในสมการ 2.3 ถึง 2.4 ซึ่งไฮดรอกซิลเรดิคอลสามารถเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนได้โดยตรง



แต่ในกรณีที่ไม่มีตัวรับหรือตัวให้อิเล็กตรอนในระบบอิเล็กตรอนสามารถรวมตัวกับที่ว่างของอิเล็กตรอนได้อีกเกิดปฏิกิริยาที่เรียกว่า Recombination

### 2.3 พลังงานแสง

พลังงานแสงเป็นรังสีหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแต่ละชนิดมีความยาวคลื่นที่แตกต่างกันโดยรังสีที่ประสาทตาสามารถรับรู้ได้เรียกว่า แสง มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง  $4 \times 10^{-7}$  ถึง  $7 \times 10^{-7}$  เมตร ส่วนรังสีที่มีความยาวคลื่นยาวกว่าหรือสั้นกว่าแสงประสาทตาไม่สามารถรับรู้ได้เรียกว่า รังสีที่มองไม่เห็นเมื่อจัดเรียงลำดับตามความยาวคลื่นและความถี่ของคลื่นเหล่านี้จะได้สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Spectrum) แสดงดังภาพที่ 2.3 โดยรังสีที่มีความถี่สูงจะมีพลังงานสูงกว่ารังสีที่มีความถี่ต่ำ แม้มีแหล่งกำเนิดและการตรวจจับได้ที่แตกต่างกันแต่ก็มีสมบัติที่สำคัญเหมือนกัน คือ เคลื่อนที่ไปได้ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสง ( $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที) และมีพลังงานส่งผ่านไปในรูปแบบของคลื่น โดยพลังงานแสงที่เลือกนำมาใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและช่วงแสงขาว (Visible) [20] ตารางที่ 2.1 แสดงสเปกตรัมและค่าความยาวคลื่นของแสงขาว



ภาพที่ 2.3 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [20]

รังสียูวีเป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 190 - 400 นาโนเมตร มีคุณสมบัติไม่แตกตัวรังสียูวีเป็นเส้นแบ่งของรังสีชนิดแตกตัวได้และชนิดที่แตกตัวไม่ได้สามารถแบ่งได้เป็นยูวีเอ (UVA) หรือรังสียูวีคลื่นยาว ยูวีบี (UVB) หรือรังสียูวีคลื่นกลาง และยูวีซี (UVC) หรือรังสีอัลตราไวโอเล็ตคลื่นสั้นความยาวคลื่นในช่วงต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.1 ถึง 2.2 โดยแหล่งกำเนิดที่สำคัญของรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้แก่ 1) การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์จะมีการปล่อยรังสีออกมาหลายความยาวคลื่นโดยรังสีอัลตราไวโอเล็ตและแสงขาวที่เดินทางมายังผิวโลกจะถูกดูดซับไว้โดยชั้นบรรยากาศทำให้ความเข้มข้นของรังสีลดลงอย่างรวดเร็วเพราะถูกโอโซนที่ชั้นสตราโทสเฟียร์ดูดซับไว้ก่อนมาถึงพื้นโลก 2) แหล่งกำเนิดที่มนุษย์สร้างขึ้นวัตถุทุกชนิดที่ถูกทำให้ร้อนจนมีอุณหภูมิสูงกว่า 2,500 เคลวิน จะสามารถปล่อยรังสียูวี วัตถุประสงค์หลักที่มนุษย์นำรังสีนี้มาใช้ก็เพื่อประโยชน์ต่อสิ่งมีชีวิตสามารถทำได้จากอุปกรณ์สร้างประกายไฟฟ้าหรือหลอดฟลูออเรสเซนต์ หรือแหล่งกำเนิดของแสงที่สามารถปล่อยความยาวคลื่นในช่วงที่ต่ำกว่า 260 นาโนเมตรและสามารถทำให้เกิดโอโซนที่ใช้ประโยชน์ในการฆ่าเชื้อโรค



ตารางที่ 2.1 สเปกตรัมและความยาวคลื่นของแสงขาว

แสงสี	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)
ม่วง	380-450
คราม	450-500
น้ำเงิน	
เขียว	500-570
เหลือง	570-590
แสด	590-610
แดง	610-760

ตารางที่ 2.2 ช่วงของความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV)

สเปกตรัมรังสี	ความยาวคลื่น(นาโนเมตร)	
อัลตราไวโอเล็ต	100-400	
	UVA	315-400
	UVB	280-315
	UVC	280-315
แสงขาว	400-760	

ความเข้มแสงคือพลังงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลาหรืออนุภาคแสง 1 โฟตอน ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานคือพลังงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อเวลาโดยที่อนุภาคแสง 1 โฟตอนมีความถี่ ( $\nu$ ) และขึ้นกับความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) ซึ่งมีสมการแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.5

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $c$  คือค่าความเร็วแสง ( $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที)

พลังงานของ Photon จะสามารถคำนวณได้โดยอาศัยความยาวคลื่นของ Photon ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้ดังสมการ 2.6

$$\text{Photon energy (E)} = hv = h(c/\lambda) \quad (2.6)$$

เมื่อ  $h$  เท่ากับ 1.24 อิเล็กตรอนโวลต์นาโนเมตร

## 2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะเป็นสารกึ่งตัวนำซึ่งมีหลายชนิด [24] ทั้งที่อยู่ในรูปออกไซด์ และซัลไฟด์ต่างๆ สารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) ทั้งสแตโนไดรอกไซด์ (WO<sub>3</sub>) ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) และแร่สฟาเลอไรต์ (ZnS) เป็นต้นจะมีค่าช่องว่างพลังงานที่แตกต่างกันตามตารางที่ 2.3 ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวกลางที่นิยมใช้กันมากที่สุดเนื่องจากมีช่วงของช่องว่างพลังงานที่กว้างเมื่อเปรียบเทียบกับสารกึ่งตัวนำอื่นๆ ยกเว้นสารกึ่งตัวนำชนิดที่มีสังกะสีเป็นส่วนประกอบแต่เนื่องจากสังกะสีมีความเป็นพิษซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยจึงไม่นิยมใช้อีกทั้งไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวกลางที่มีเสถียรภาพที่สุดไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมหลังการใช้งานจะเกิดการกัดกร่อนเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเป็นตัวดูดซับสารอินทรีย์ที่ดีโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์เหมาะที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสารอินทรีย์และสามารถรีดักชันออกซิเจนได้ในขณะเดียวกันอีกทั้งราคาค่อนข้างถูกเมื่อเปรียบเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นในด้านสิ่งแวดล้อมมีการใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์อย่างแพร่หลายไม่ว่าจะเป็นด้านการทำน้ำให้บริสุทธิ์การบำบัดน้ำเสีย การควบคุมของเสียอันตรายและการบำบัดอากาศ

### 2.4.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอยู่ในธรรมชาติมีรูปแบบของผลึกอยู่ 3 รูปแบบดังนี้

2.4.1.1 รูไทล์ (Rutile) มีเสถียรภาพมากที่สุดอุณหภูมิสูงๆ นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเช่น โรงงานสีโรงงานทำเครื่องสำอางโรงงานทำอาหาร เป็นต้น

2.4.1.2 อนาเทส (Anatase) มีเสถียรภาพมากที่สุดอุณหภูมิต่ำกว่ารูไทล์ผลึกชนิดนี้นิยมใช้ในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง

2.4.1.3 บรูคไคต์ (Brookite) เป็นผลึกที่พบในแร่เท่านั้นและมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์ทอโรมบิก (Orthorhombic)

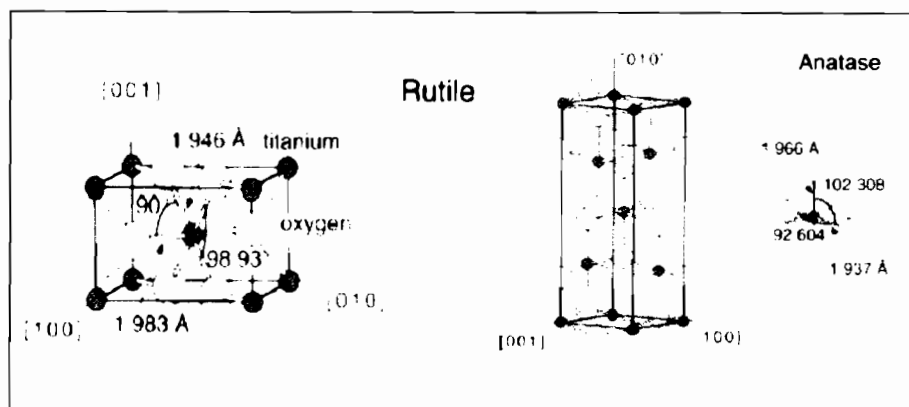
ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถสกัดจากแร่อิเลเมนต์ หรือ แร่เล็กโซซิน ถ้าต้องการให้อยู่ในภาพที่บริสุทธิ์ที่สุดจะต้องใช้ทรายธรรมชาติจากทะเลมาเป็นแร่ตั้งต้นในการสกัดไทเทเนียมไดออกไซด์อีกครั้งหนึ่งซึ่งเหมาะสมที่จะใช้งานแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของอะตอมของโครงสร้างซึ่งทั้งสามชนิดมีความแตกต่างกันเนื่องมาจากการบิดตัวของแต่ละออกตะฮีดรอลที่เรียงต่อกันและจากรูปแบบการเรียงตัวของออกตะฮีดรอลโดยโครงสร้างผลึกอนาเทสเกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ส่วนยอดของแต่ละออกตะฮีดรอลในขณะที่โครงสร้างผลึกรูไทล์เกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ส่วนขอบของแต่ละออกตะฮีดรอลและโครงสร้างผลึกบรูคไคต์เกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ทั้งส่วนยอด

และส่วนขอบของแต่ละออกตะฮีดรอลดังแสดงโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมในภาพที่ 2.4 และ 2.5 โดยมีข้อมูลสมบัติทางกายภาพทั่วไปของไทเทเนียมไดออกไซด์ [20] ดังนี้

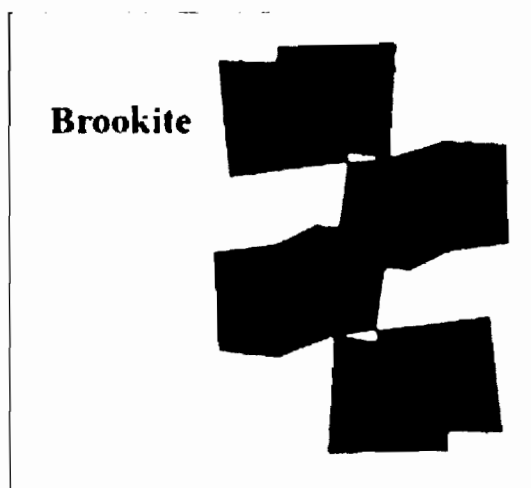
สูตรเคมี:  $\text{TiO}_2$  น้ำหนักโมเลกุล: 79.9 เอเอ็มยู (Atomic Mass Unit) จุดเดือด : 2500 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว: 1830 องศาเซลเซียสสถานะและสี: ของแข็งสีขาวความหนาแน่น: รูไทล์ 4.26 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรอนาเทส 3.84 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 2.3 ตำแหน่งช่องว่างพลังงานและขนาดช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ [20]

Semiconductor	Valence Band (eV)	Conductance Band	Ban gap (ev)	Band gap Wavelength(nm)
$\text{TiO}_2$ (Rutile)	+3.1	+0.1	3.0	380
$\text{TiO}_2$ (Anatase)	+2.9	-0.3	3.4	380
$\text{SnO}_2$	+4.1	+0.3	3.9	318
ZnO	+3.0	-0.2	3.2	390
ZnS	+1.4	-2.3	3.7	336
$\text{WO}_3$	+3.0	+0.2	2.8	443
CdS	+2.1	-0.4	2.5	497
CdSe	+1.6	-0.1	1.7	730



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมแบบรูไทล์และอนาเทส



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียม: บรูคโคต์

#### 2.4.2 การประยุกต์ใช้งานของไทเทเนียมไดออกไซด์

มีการประยุกต์ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์หลายด้านยกตัวอย่างเช่น

2.4.2.1 Pigment การนำไปใช้ทำได้โดยการใช้ฉาบหรือเคลือบพื้นผสมลงในพลาสติก กระดาษหมึกเส้นใยเครื่องสำอางผงสีขาวของไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีค่าดัชนีการสะท้อนแสง (reflective index) มากจึงมีความสำคัญมากในการนำไปใช้ในงานด้านรังสียูวี

2.4.2.2 Photocatalysis ทำหน้าที่เป็นตัวที่มีการตอบสนองต่อแสงได้ดีในโซลาเซลล์ และใช้เป็นอิเล็กโทรดในกระบวนการแยกน้ำให้แตกออกเป็น H และ O เป็นต้นอีกทั้งสามารถใช้บำบัดมลสารที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ซึ่งจะสามารถเปลี่ยนมลสารที่เป็นพิษให้พิษน้อยลงหรือไม่มีพิษได้ เช่น เฮกซะวาเลนซ์โครเมียม (Cr-VI) ที่เป็นพิษและเป็นสารก่อมะเร็งกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) สามารถทำให้เฮกซะวาเลนซ์โครเมียมเปลี่ยนรูปเป็นไตรวาเลนซ์โครเมียม (Cr-III) ที่ไม่เป็นพิษได้

2.4.2.3 Oxygen Sensor ทำหน้าที่เป็นตัวจับสัญญาณค่าออกซิเจนที่เหลืออยู่ในไอเสีย โดยค่าออกซิเจนเป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้

2.4.2.4 Antimicrobial Coating เมื่อนำมาเคลือบผิววัสดุจะทำให้มีคุณสมบัติสามารถทำความสะอาดตัวเองได้และมีคุณสมบัติที่สามารถตอบสนองแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ดีคือสามารถใช้งานด้านทำยาเคลือบผิวอาหารหรือเคลือบผิวอุปกรณ์เพื่อป้องกันการสีกกร่อน

#### 2.5 การสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำด้วยกระบวนการแอนโนไดเซชัน

เมื่อก้าวถึงกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysis) สามารถใช้ในการกำจัดสารมลพิษออกจากสิ่งแวดล้อมได้ทั้งมลพิษทางน้ำและมลพิษทางอากาศซึ่งกระบวนการนี้มีส่วนประกอบที่สำคัญสองส่วนด้วยกันส่วนแรกคือพลังงานแสงซึ่งต้องมีพลังงานมากพอที่จะกระตุ้นให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาและส่วนที่สองคือตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะเป็นสารกึ่งนำไฟฟ้า (Semiconductor) ที่สามารถให้อิเล็กตรอนออกมาได้เมื่อมีพลังงานมากกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ได้แก่ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ทังสเทนไดรอกไซด์ ( $\text{WO}_3$ ) ซิงก์ออกไซด์ ( $\text{ZnO}$ )

และแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) เป็นต้น [21] งานวิจัยทางด้านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในหลายรูปแบบด้วยกันในยุคแรกของงานวิจัยจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารกึ่งตัวนำรูปแบบผง ที่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตรลักษณะคล้ายแป้งโดยสารกึ่งตัวนำจะถูกเติมลงไปผสมกับน้ำที่ต้องการบำบัดเช่นน้ำเสียทำให้อนุภาคผงของสารกึ่งตัวนำปะปนอยู่กับน้ำเมื่อมีการฉายแสงประสิทธิภาพที่ได้จากการบำบัดมลพิษเกิดขึ้นน้อยกว่าที่ควรจะเป็นเนื่องจากตัวอนุภาคผงของตัวเร่งปฏิกิริยานี้เองเป็นตัวบดบังการเข้าถึงของพลังงานแสงที่จะทำปฏิกิริยาให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาจึงทำให้การกระตุ้นโดยพลังงานแสงได้ไม่เต็มที่ทำให้จำนวนอิเล็กตรอนที่ได้น้อยกว่าที่ควรจะเป็นและมีความยุ่งยากในการแยกผงตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากน้ำหลังจากการบำบัดแล้วเนื่องจากละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำ [21] ต่อมานักวิจัยได้คิดวิธีลดปัญหาดังกล่าวโดยทำการตรึงตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปผงหรือเจล บนตัวกลางทำให้เป็นฟิล์มบาง จะช่วยลดปัญหาข้างต้นได้ ปัจจุบันนักวิจัยสามารถสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยกระบวนการแอโนไดเซชันบนวัสดุปลูกต่างๆ เพื่อให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตรซึ่งมีข้อดีคือในขนาดตัวกลางที่เท่ากันค่าการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกระบวนการแอโนไดเซชันทำให้มีพื้นที่ในการรับพลังงานแสงมากกว่าการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบตรึงบนตัวกลางซึ่งเมื่อมีพื้นที่ในการรับแสงมากส่งผลให้สามารถกระตุ้นให้เกิดอิเล็กตรอนบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาได้มากตามไปด้วยโดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้นี้สามารถส่งผ่านกระแสไฟฟ้าได้โดยแทบจะไม่มีแรงต้านไฟฟ้าเลยแสดงให้เห็นว่าสามารถสร้างเป็นตัวนำยิ่งยวดได้โดยในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกระบวนการแอโนไดเซชันนอกจากทำให้พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นรูพรุนแล้วยังสามารถสังเคราะห์ให้พื้นผิวเกิดโครงสร้างรูปท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระดับนาโนเมตรได้อีกด้วยซึ่งโครงสร้างของพื้นผิวจะเป็นลักษณะใดนั้นขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้หรือสัดส่วนองค์ประกอบของวัสดุอื่นที่นำมาผสมโดยวัสดุปลูกที่ถูกนำมาใช้ในการศึกษา เช่นอะลูมิเนียมไนโอเบียมไทเทเนียมทั้งสแตนสังกะสีแทนทาลัมและแอฟเนียม เป็นต้น

## 2.6 มลพิษอากาศ

ในด้านสิ่งแวดล้อมนั้นปัญหาด้านมลพิษอากาศเป็นอีกปัญหาที่มีความสำคัญและมีการคิดค้นหาวิธีการบำบัดมลพิษอย่างกว้างขวางเนื่องจากเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของสิ่งมีชีวิตโดยที่มลพิษอากาศที่มีความสำคัญ คือ ก๊าซเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ไม่ว่าจะมาจากยานพาหนะโรงงานอุตสาหกรรมหรือแม้กระทั่งบ้านเรือนนั้นมีส่วนประกอบของสารมลพิษ เช่น สารไฮโดรคาร์บอน (HC) สารคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) สารไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) ฝุ่นละออง และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้ล้วนส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งสิ้น

### 2.6.1 แหล่งกำเนิดมลพิษอากาศ

แหล่งกำเนิดมลพิษอากาศแบ่งตามแหล่งกำเนิดเป็น 2 ประเภท คือ แหล่งกำเนิดตามธรรมชาติ เช่น ภูเขาไฟระเบิด ไฟป่า ทะเล และมหาสมุทร เป็นต้น และแหล่งกำเนิดที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ทำให้มีการระบายมลพิษอากาศ โดยแบ่งเป็นแหล่งกำเนิดที่เคลื่อนที่ได้ ได้แก่ รถยนต์ เรือยนต์ เครื่องบิน เป็นต้น และแหล่งกำเนิดที่อยู่กับที่ เช่น โรงงานอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมปิโตรเคมี โรงกลั่นน้ำมัน อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมผลิต เคมีภัณฑ์ เป็นต้น ซึ่งเกิดจากการใช้เชื้อเพลิงในกระบวนการผลิต สารมลพิษอากาศแบ่งออกเป็น 2 ประเภท

ตามลักษณะการเกิด คือ สารมลพิษ อากาศปฐมภูมิ และสารมลพิษอากาศทุติยภูมิ [31] โดยที่มลพิษ อากาศปฐมภูมิจะเกิดขึ้นและถูกระบายออกจากแหล่งกำเนิดโดยตรง เช่น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซออกไซด์ไนโตรเจน (NO<sub>x</sub>) ซีโอ้ และเขม่าควันดำที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในยานพาหนะและเตาเผาในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น และสารมลพิษอากาศ ทุติยภูมิเกิดในบรรยากาศทั่วไป จากปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารมลพิษอากาศปฐมภูมิด้วยกันเองหรือ ปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารมลพิษอากาศปฐมภูมิกับสารประกอบอื่นที่อยู่ในบรรยากาศ เช่น ก๊าซโอโซน (O<sub>3</sub>) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาเคมี Photochemical Oxidation ระหว่างออกไซด์ของไนโตรเจน กับ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (HC) ที่อยู่ในบรรยากาศ โดยมีแสงแดดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

## 2.6.2 ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีแหล่งกำเนิดสองแหล่ง คือ

2.6.2.1 จากธรรมชาติสร้างขึ้นโดยเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของก๊าซมีเทนหรือ ปฏิกิริยาโฟโตเคมีคอลออกซิเดชันของสารอินทรีย์บนพื้นที่ผิวมหาสมุทร แม่น้ำ บึง เป็นต้น รวมทั้ง การเผาไหม้ที่เกิดจากธรรมชาติ เช่น ไฟป่า ภูเขาไฟ หรือพายุคะนอง ก็เป็นอีกสาเหตุที่ทำให้เกิด ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้

2.6.2.2 จากการกระทำของมนุษย์ ได้แก่ การเผาไร่ การเผาไหม้เศษวัสดุขยะมูลฝอย วัชพืชต่างๆการเผาขยะในที่โล่ง และคว้นบุหรี การสันดาปของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องยนต์ทั้งใน ยานยนต์ และอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมที่มีการใช้น้ำมันเตา และถ่านหิน เป็นต้น

โดยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นก๊าซไม่มีสีไม่มีกลิ่น และรสเบากว่าอากาศเพียงเล็กน้อย ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นก๊าซเฉื่อยในสภาพอุณหภูมิและความกดดันปกติแต่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิสูง และสามารถลดออกซิเจนในอากาศได้ดีเนื่องจากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เกิดจากการ เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของสารประกอบคาร์บอน โดยเมื่อหายใจเอาก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เข้าไปใน ร่างกายจะมีผลต่อ ระบบประสาทรวมอย่างรวดเร็วแม้ร่างกายจะได้รับก๊าซนี้ในปริมาณน้อย โดยก๊าซ คาร์บอนมอนอกไซด์จะสามารถรวมกับฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดงได้มากกว่าก๊าซออกซิเจน 200 ถึง 250 เท่า เกิดเป็นคาร์บอกซีฮีโมโกลบิน ซึ่งลดความสามารถในการนำก๊าซออกซิเจนจากปอดไปยัง เนื้อเยื่อต่างๆหากระดับคาร์บอกซีฮีโมโกลบินอิมตัวในเลือดเกินกว่าร้อยละ 10 จะทำให้ร่างกายมี อาการอ่อนเพลีย ปวดศีรษะคลื่นไส้ ตาพร่ามัว ง่วงนอน หมดสติ ชัก เป็นต้น และหากระดับ คาร์บอกซีฮีโมโกลบินอิมตัวในเลือดเกินกว่าร้อยละ 60 อาจส่งผลต่อการทำงานของหัวใจอย่าง เฉียบพลันทำให้หัวใจผิดปกติ เช่น เพิ่มจังหวะการเต้นของหัวใจ เริ่มอาการของโรคหัวใจมีอาการ หัวใจรั่วชั่วคราวการหอบหืดของหัวใจเนื่องจากขาดอากาศและอาจถึงตายในที่สุด

## 2.6.3 การควบคุมก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

2.6.3.1 การควบคุมโดยการบำบัดมลพิษอากาศก่อนที่จะปล่อยออกสู่บรรยากาศโดยมี การจัดทำระบบบำบัดมลพิษอากาศที่ปล่อยที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรมระบบบำบัดที่ใช้ เช่น Wet Scrubber เป็นต้น

2.6.3.2 การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของรถยนต์นั้นเป็นอีกสาเหตุที่ทำให้สภาพแวดล้อม ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งแนวทางในการควบคุมไอเสียในรถยนต์ คือ บำบัดไอเสีย โดยการลดปริมาณไฮโดรคาร์บอน (HC) และก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ในขั้นแรกสามารถทำได้

โดยการปรับปรุงแบบเครื่องยนต์และการป้อนน้ำมันแต่ที่กำลังได้รับการพัฒนา ได้ด้วยวิธี เช่น Thermal Reactor และ Catalytic Converter - Thermal Reactor ถูกนำมาใช้แทนที่ท่อไอเสียปกติมีการควบคุมให้อุณหภูมิสูงจนพอที่จะเกิดการออกซิเดชันของไฮโดรคาร์บอนและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้มากซึ่งมีลักษณะเป็นท่อไอเสียที่มีฉนวนกันความร้อนที่มีขนาดใหญ่กว่าปกติมีแผงภายในควบคุมทิศทางไหลของไอเสียรวมทั้งป้อนอากาศซึ่งจำเป็นต่อการออกซิเดชันโดย Thermal Reactor อาจมีการออกซิเดชันที่ผิวโลหะและผิวออกไซด์นี้จะเกิดการเสียดสีของ อนุภาคมลสารในไอเสียที่ลอยผ่านด้วยความเร็วสูงโดยเฉพาะสารประกอบตะกั่วทำให้เกิดความเสียหายต่อผิวของ Reactor ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีความคงทนสูงสามารถทนความร้อนได้ถึง 900 องศาเซลเซียส Catalytic Converter ทำหน้าที่ช่วยการออกซิเดชันของไฮโดรคาร์บอนและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำต้องใช้อากาศช่วยในการเกิดปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาใช้กันมากในอุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเลียมซึ่งมีอุณหภูมิสม่ำเสมออัตราไหลคงที่และตัวทำปฏิกิริยามีความเข้มข้นสูงสม่ำเสมอการเร่งปฏิกิริยาของไอเสียจากรถยนต์มีปัญหายุ่งยากเนื่องจากอุณหภูมิอัตราไหลและความเข้มข้นของไอเสียเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ตัวเร่งปฏิกิริยาต้องอุ่นเครื่องโดยเร็วเมื่อติดเครื่องสามารถทนความร้อนสูงได้เป็นเวลานานจะต้องสามารถขจัดมลสารในอากาศที่เจือจางและไหลเร็วและจะต้องทนต่อปฏิกิริยากับสารประกอบในไอเสีย

2.6.3.3 การบำบัดมลพิษอากาศภายในอาคารมีการติดตั้งเครื่องฟอกอากาศเพื่อดักจับสิ่งสกปรกออกจากอากาศโดยเครื่องฟอกอากาศมีหลายแบบยกตัวอย่าง เช่น แบบใช้แผ่นกรองคาร์บอนที่ทำปฏิกิริยาดูดกลืนสกปรกและกลิ่นอับชื้นในอากาศโดยใช้ไส้กรองที่มีส่วนผสมของคาร์บอนเป็นตัวดักจับกลิ่นจากอากาศที่ถูกเป่าหรือดูดหมุนเวียนผ่านไส้กรองซึ่งต้องเปลี่ยนไส้กรองตามอายุการใช้งาน แบบใช้ประจุไฟฟ้าซึ่งนอกจากสามารถดักจับฝุ่นละอองที่ฟุ้งกระจายอยู่ในอากาศแล้วยังสามารถกรองฝุ่นเกสรดอกไม้ ควันทูบหรี่ ควันสัตว์เลี้ยงรวมทั้งกลิ่นของสารระเหย และกลิ่นของน้ำยาหรือสารเคมีต่างๆที่ใช้ในครัวเรือน แบบประสิทธิภาพในการกรองสูงเป็นเครื่องฟอกอากาศที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและดีที่สุดไส้กรองเป็นแบบชนิดที่ทำจากใยแก้วละเอียดซึ่งมีประสิทธิภาพในการกรองสูง เครื่องฟอกอากาศแบบผสมเป็นเครื่องฟอกอากาศแบบที่รวมข้อดีของเครื่องฟอกอากาศต่างชนิดไว้ด้วยกันทำให้เครื่องฟอกอากาศแบบนี้สามารถกำจัดกลิ่นควัน ฝุ่น ละออง และเชื้อโรคได้ในเครื่องเดียวกัน เป็นต้น

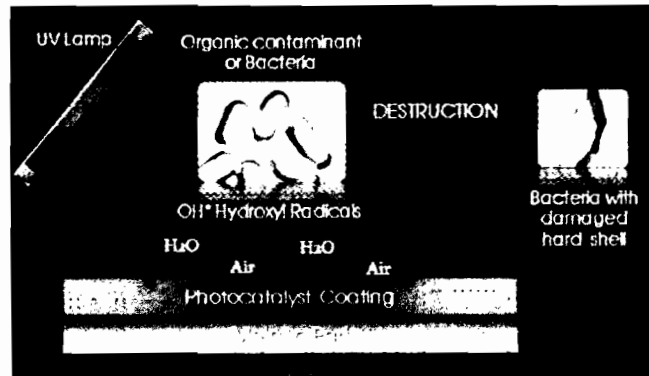
## 2.7 ประโยชน์ของนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

ด้วยคุณสมบัติของ “นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์” ที่ช่วยฟอกอากาศกำจัดเชื้อแบคทีเรียและการป้องกันคราบยัดเกาะพื้นผิวอีกทั้งไม่เสื่อมสภาพหลังการใช้งานทำความสะอาดง่ายไม่ทิ้งสารตกค้างที่เป็นอันตรายต่อชีวิตและสิ่งแวดล้อมทำให้นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วถูกนำไปใช้ในสินค้าต่างๆ ทั้งสินค้าสุขภาพ เครื่องสำอาง เสื้อผ้า อาหารและเครื่องดื่มตลอดจนสินค้าเกี่ยวกับบ้านและสวน

### 2.7.1 ความสามารถในการต้านแบคทีเรีย

ไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่เพียงแต่ฆ่าแบคทีเรียได้เท่านั้นแต่ยังช่วยในการย่อยสลายซาก จึงไม่เกิดสารพิษจากซากของมันด้วยมีประสิทธิภาพสูงกว่าสารต้านแบคทีเรียชนิดอื่นๆ ที่จะทำงานเมื่อมี

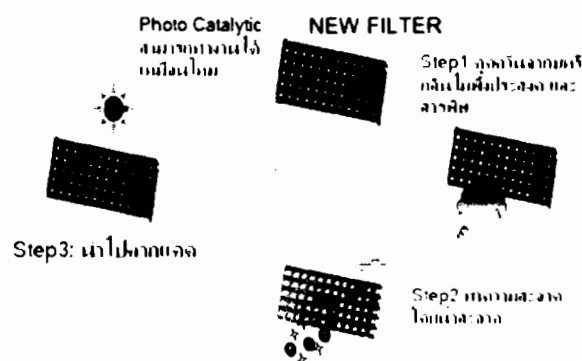
เซลล์แบคทีเรียสัมผัสกับพื้นผิวและที่สำคัญไทเทเนียมไดออกไซด์จะไม่เกิดการเสื่อมประสิทธิภาพหลังจากที่ทำลายเชื้อแบคทีเรียทำให้คงประสิทธิภาพการใช้งานที่ยาวนานและนอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์ยังมีประสิทธิภาพต้านยับยั้งหรือต่อต้านการติดเชื้อมากกว่าคลอรีน 3 เท่า และมากกว่าโอโซน 1.5 เท่า ดังแสดงในรูป 2.6



ภาพที่ 2.6 เมื่อแบคทีเรียกระจายทั่วพื้นผิวสารพิษที่เกิดจากการตาย เซลล์ก็ถูกทำลายจากการเร่งปฏิกิริยาของไทเทเนียมไดออกไซด์  $\text{TiO}_2$  [22]

### 2.7.2 ความสามารถด้านการกำจัดกลิ่น

ด้วยคุณสมบัติของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยการทำลายพันธะระหว่างโมเลกุลของสารให้แตกออกเป็นโมเลกุลเดี่ยวทำให้มีความสามารถกำจัดโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ระเหยอยู่ในอากาศ (Volatile Organic Compounds หรือ VOCs) อันเป็นสาเหตุของกลิ่นไม่พึงประสงค์ เช่น กลิ่นบุหรี่ย กลิ่นยาสูบ สารประเภทฟอร์มัลดีไฮด์ ยูรีน กลิ่นไม่พึงประสงค์ น้ำมันเชื้อเพลิง ควัน เกสรดอกไม้ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอีกหลายชนิดในอากาศดังแสดงในรูป 2.7 การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์จึงเป็นการแก้ปัญหาที่ต้นเหตุ

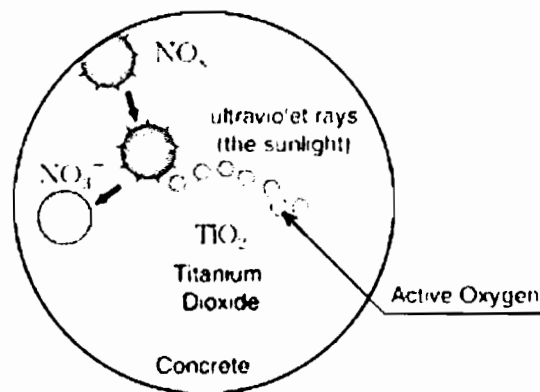


ภาพที่ 2.7 กระบวนการกำจัดโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ระเหยอยู่ในอากาศ [22]



### 2.7.3 ความสามารถในการฟอกอากาศ

ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเร่งด้วยปฏิกิริยาแสง สามารถกำจัดสารที่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศได้ เช่น สารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คิวบุนทรีย์ สารระเหยต่างๆ ที่ออกมาจากอาคารรวมถึงช่วยกำจัดสารประเภทที่ทำลายชั้นบรรยากาศ เช่น ก๊าซเรือนกระจก และก๊าซคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) ทั้งทางตรงและทางอ้อมเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสงแม่ในบริเวณที่มีมลภาวะสูง ไทเทเนียมไดออกไซด์จึงช่วยลดสารก่อมลภาวะเหล่านี้ได้ดังแสดงในรูป 2.8



ภาพที่ 2.8 ไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกเร่งด้วยปฏิกิริยาแสงทำให้กำจัดสารที่ก่อเกิดมลภาวะ [22]

### 2.7.4 ความสามารถในการป้องกันการเกิดคราบ และคุณสมบัติการทำความสะอาดตัวเอง

คุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ ในการทำความสะอาดตัวเองเมื่อกระตุ้นด้วยแสง เมื่อผนังด้านนอกของอาคารที่มักต้องเจอกับคราบเขม่าจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่มีส่วนประกอบเป็นน้ำมันได้รับการปกป้องด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยสารจะทำลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอนรวมทั้งฝุ่นผงต่างๆที่เกาะติดอยู่กับผนังจึงถูกชะล้างออกจากผนังอย่างง่ายดายได้เมื่อฝนตกลงมาทำให้ผนังตึกดูสะอาดและใหม่อยู่เสมอ ดังแสดงในรูป 2.9



ภาพที่ 2.9 คราบที่หายไปเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง [22]

### 2.7.5 ความสามารถในการทำน้ำสะอาด

สามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่ก่อมลภาวะให้กลายเป็นสารที่ไม่เป็นอันตรายได้ เช่น ทำให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ โดยไทเทเนียมไดออกไซด์จะนำไปใช้ในขั้นตอนที่สองของการบำบัดน้ำเสียโครงการต้นแบบในการบำบัดน้ำเสียดังในภาพที่ 2.10 แสดงให้เห็นว่า กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงนั้นมีประสิทธิภาพสูงในการฆ่าแบคทีเรีย Escherichia coli ซึ่งเป็นแบคทีเรียในอุจจาระที่ปนเปื้อนในน้ำได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 2.10 ไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดน้ำเสีย [22]

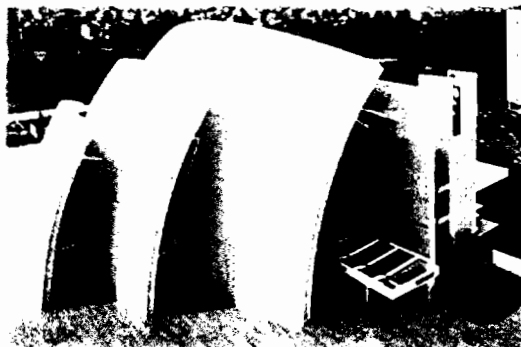
### 2.8 การประยุกต์ใช้งานวัสดุโฟโตคะตะไลติกในงานวิศวกรรม

ในปัจจุบันบริษัทเอสส์ร็อก Essroc ผู้ผลิตปูนซีเมนต์ชั้นนำในแถบอเมริกาเหนือ และอยู่ในเครือบริษัท Italcementi Group ของอิตาลี ซึ่งมีกำลังการผลิตปูนซีเมนต์ใหญ่เป็นอันดับ 5 ของโลก ได้คิดค้นและผลิตปูนซีเมนต์สำหรับการผลิตคอนกรีตทำความสะอาดตัวเอง Self-cleaning concrete ภายใต้ชื่อ TX Active Photocatalytic Cement โดยมีอยู่ 2 เกรด คือ

2.8.1 Self-cleaning มีคุณสมบัติด้านทานมลพิษที่เป็นสารอินทรีย์และอนินทรีย์ที่มาเกาะติดบนพื้นผิว คอนกรีตที่เป็นสาเหตุทำให้สีของคอนกรีตเปลี่ยนแปลง เช่น เขม่าควัน ฝนสกปรก คราบบุหรี่ยา ตะไคร่ สาหร่าย แบคทีเรีย เป็นต้น

2.8.2 Self-cleaning and Pollution Reducing: นอกจากจะมีคุณสมบัติทำความสะอาดตัวเองได้แล้วยังมีความสามารถในการขจัดมลพิษในบรรยากาศที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของคนเราด้วย

ปัจจุบันในยุโรปและญี่ปุ่นมีการนำเทคโนโลยีโฟโตแคตตาไลซิส (Photocatalysis) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ไปใช้แล้วเป็นจำนวนมากโดยเฉพาะยุโรปถือว่าเป็นแห่งแรกที่มีการนำเทคโนโลยีนี้ไปใช้งาน เช่น โบสถ์จubilée Jubilee Church ในกรุงโรม ประเทศอิตาลี ดังแสดงในภาพที่ 2.11 สร้างเสร็จเมื่อปี 2003 เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยคอนกรีตหล่อไว้สำเร็จก่อนมาประกอบ จำนวน 256 ชิ้น และคอนกรีตอัดแรง ที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์สีขาว ที่มีการใส่สารโฟโตแคตตาไลติก ซึ่งผลิตจากบริษัท Italcementi และใช้หินอ่อนทั้งหมดเพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีสีขาวสดใส โดยคาดหวังว่าโครงสร้างนี้จะคงความสวยงามสะอาดและดูใหม่เป็นเวลานานถึง 1,000 ปี



ภาพที่ 2.11 โบสถ์จูบิลีในกรุงโรมที่สร้างด้วยเทคโนโลยีโฟโตคะตะไลซิส [23]

ในญี่ปุ่นบริษัทมิตรซูบิชิ Mitsubishi ได้มีการนำเทคโนโลยีนี้ไปใช้ผลิตเป็นคอนกรีตปูผิวทาง ภายใต้ชื่อยี่ห้อ น็อกเซอร์ Noxer ดังแสดงในภาพที่ 2.12 สามารถทำความสะอาดตัวเองได้และยังมีจุดประสงค์เพื่อลดมลพิษในอากาศ จากผลการศึกษาพบว่าโฟโตคะตะไลติกปูผิวทางสามารถลดปริมาณไนโตรสออกไซด์ที่ปล่อยจากรถยนต์ที่วิ่งบนท้องถนนได้ถึง ร้อยละ 15 ซึ่งมีประสิทธิภาพดีกว่าการปลูกต้นไม้ไว้ 2 ข้างทางของถนน ถ้าท้องถนน ทางเดินเท้า และพื้นผิวด้านนอกของโครงสร้างอาคารนำเทคโนโลยีนี้ไปใช้แล้ว คุณภาพของอากาศโดยรอบจะดีขึ้นถึง ร้อยละ 80



ภาพที่ 2.12 คอนกรีตปูผิวทางโดยบริษัทมิตรซูบิชิ [24]

สิ่งก่อสร้างสิ่งหนึ่ง ที่สามารถปรับตัว พร้อมรับมือกับการเปลี่ยนแปลงของมันได้ตามกาลเวลานั้นคือ สะพานใหม่ของเมืองมินเนโซปอลิส Minneapolis สะพานนี้ ถูกออกแบบขึ้นมาโดยเทคโนโลยีที่มุ่งสู่นาคต โดยสะพานที่สร้างใหม่มีความยาว 504 ฟุต และได้รับการออกแบบจากวิศวกร ซึ่งจะมีการฝัง sensor เข้าไปในคอนกรีตเพื่อไว้ส่งสัญญาณเตือนภัย และที่หัวสะพานทั้งสองด้านจะมีการใช้ที่เอ็กแอ็คทีฟ TX Active ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ชนิดหนึ่งที่จะเกิดปฏิกิริยาในการกำจัดมลพิษได้เมื่อได้รับการเร่งจากแสงในเวลากลางวันจะใช้แสงสว่างจากหลอด แอล อี ดี LEDs (Light Emitting Diode)

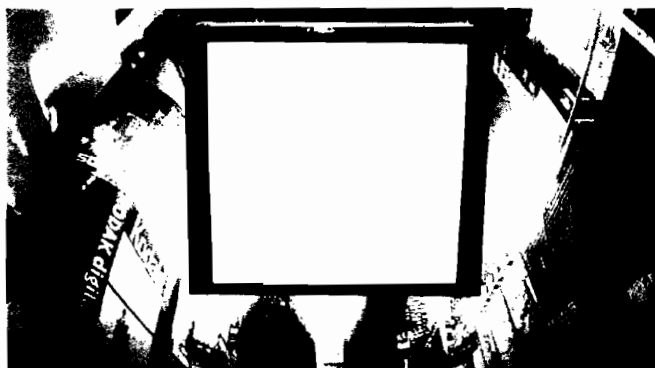
ซึ่งใช้พลังงานน้อยและไม่ต้องการการดูแลรักษาสูง ซึ่งสะพานแห่งนี้มีการนำอุปกรณ์เหล่านี้มาใช้เป็นครั้งแรกในสหรัฐอเมริกา โดยหลอดไฟ แอล อี ดี และคอนกรีตที่ทำความสะอาดตัวเองได้นี้ ช่วยให้สะพานนี้มีคุณสมบัติประหยัดและมุ่งสู่การพัฒนาในการสร้างสะพานสำหรับอนาคตจริงๆ ผู้ออกแบบสะพานนี้คือ ฟลอริดา เบส ฟิกก์ (Florida-based FIGG) โดยมีช่องทางจราจร 10 ช่องและสามารถขยายได้อีกเป็น 14 ช่องทาง ซึ่งในอนาคตจะรวมถึงทางรถไฟ และช่องสำหรับจักรยานได้อีก

ลินดา ฟิกก์ (Linda Figg) ผู้อำนวยการในการออกแบบสะพานจาก กล่าวว่สะพาน I-35W ดังแสดงในรูป 2.13 ได้ถูกออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งานในอนาคต ซึ่งจะมีการใช้วัสดุที่มีประสิทธิภาพสูงสามารถรองรับการใช้งานและรับประกันความปลอดภัย ซึ่งมีการคำนวณแล้วว่าโครงสร้างของสะพานนี้จะมีความทนทานกว่า 100 ปีทีเดียว [25]



ภาพที่ 2.13 สะพาน I-35W ในเมืองมินเนโซโพลิส ประเทศสหรัฐอเมริกา.

ผลิตภัณฑ์นวัตกรรมระดับประเทศของแผ่นป้ายอะคริลิกสีขาวประหยัดพลังงาน ที่ใช้เทคโนโลยีการให้สีพลาสติก (Plastic coloration) ใช้ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีคุณสมบัติกระเจิงแสงให้แสงส่องผ่านได้มากกว่าปกติ จึงลดการใช้หลอดไฟในช่วงกลางคืนได้ร้อยละ 33 ผลความสำเร็จของโครงการ ผลงานนี้ส่งเข้าประกวดในงานสิ่งประดิษฐ์ Seoul International Invention Fair 2008 (SIIF 2008) เมื่อวันที่ 9 เมษายน 2551 ที่ผ่านมา ณ ประเทศเกาหลีใต้ ได้รับรางวัลเหรียญทอง นอกจากนี้ ยังได้รับรางวัลผลงานสิ่งประดิษฐ์ดีเด่น ของสภาวิจัยแห่งชาติของสหรัฐอเมริกาดังแสดงในภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 แผ่นป้ายอะคริลิกสีขาวประหยัดพลังงาน [26]

ผลิตภัณฑ์หลอดไฟลูออเรสเซนต์ ชนิด T5 เคลือบสารนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนผิวหลอดไฟ สารนี้จะเปิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก-แอกติวิตี (photocatalytic activity) ในขณะที่ได้รับแสงและความชื้นในอากาศก่อให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาสลายสารประกอบอินทรีย์ฝุ่นและสิ่งสกปรกได้เอง (self-cleaning) ทั้งนี้ยังเพิ่มความสว่างและยั้บยั้งเชื้อจุลินทรีย์ได้ดังแสดงในภาพที่ 2.15



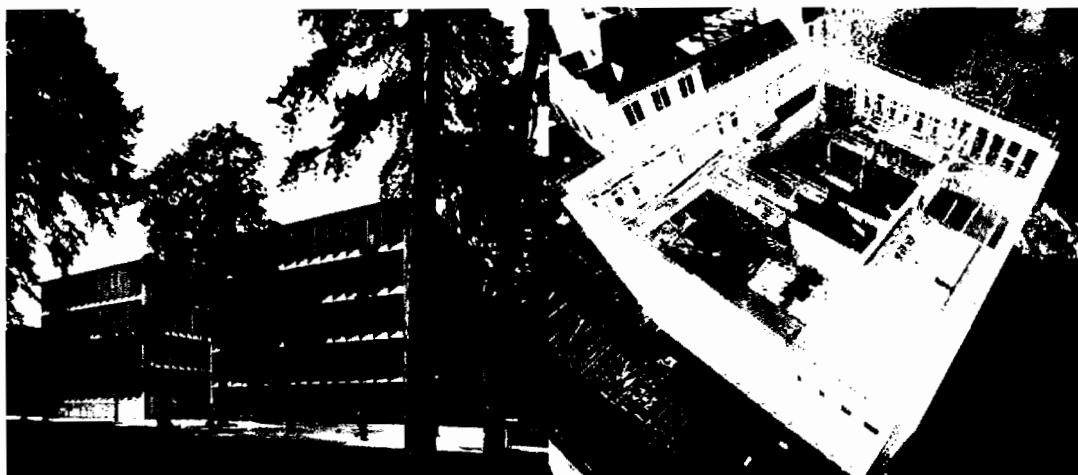
ภาพที่ 2.15 หลอดไฟลูออเรสเซนต์ชนิด T5 [26]

สนามบาสเกตบอลที่สร้างด้วยนวัตกรรมใหม่ โดยใช้ซีเมนต์หรือคอนกรีตที่ทำความสะอาดตัวเอง (self-cleaning) และลดมลพิษเมื่อถูกแสงแดดโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสดังในภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 ศูนย์ฝึกบาสเกตบอล แอล เอส ยู บาดัน เมืองลอสแอนเจลิส [27]

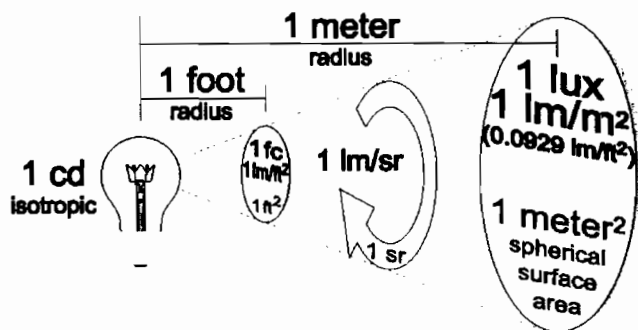
สิ่งก่อสร้าง ชื่อ ชิเต้ เดลา มูซีควาเอ็ด เดส บรอก อาร์ต ใช้คอนกรีตที่เป็นวัสดุที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการเร่งปฏิกิริยาทางเคมี คือ คอนกรีตสำเร็จรูปจะสามารถทำความสะอาดตัวเองและสามารถที่จะนำไปสู่การลดมลพิษได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 สิ่งก่อสร้าง ชิเต้ เดลา มูซีควาเอ็ด เดส บรอก อาร์ต [27]

## 2.9 หน่วยที่ใช้ในการวัดความสว่างของแสง [28]

แสงสว่างเป็นพลังงานอย่างหนึ่งที่สามารถวัดปริมาณได้เหมือนพลังงานอื่นๆ แต่มีชื่อที่เรียกแตกต่างกันออกไปการวัดปริมาณแสงสว่างอาจจะออกมาในรูปความเข้มของการส่องสว่าง ปริมาณเส้นแรงของแสงสว่าง หรืออยู่ในรูปปริมาณเส้นแรงของแสงสว่างต่อหน่วยพื้นที่ และอื่นๆอีก ค่าการส่องสว่าง (illuminance) หรือ ลักซ์ (Lux) แต่ถ้าเรานำแหล่งกำเนิดแสงที่มีขนาดเล็กมากๆ เสมือนจุดและมีค่าความเข้มแสงของการส่องสว่างที่เปล่งออกมารอบตัวมันอย่างสม่ำเสมอรอบๆทุกทิศทางและมีค่าเท่ากับ 1 แคนเดลา นำมาวางที่จุดศูนย์กลางของทรงกลมโดยมีรัศมี 1 เมตร และมีปริมาณจำนวนเส้นแรงของแสงสว่าง 1 ลูเมน ไปตกลงบนพื้นผิวของทรงกลมทุกๆ 1 เมตร ปริมาณของการส่องสว่างที่เกิดขึ้นจะมีค่ากับ 1 ลักซ์ หรือมีค่า 1 ลูเมนต่อตารางเมตร ดูที่รูป 2.18



ภาพที่ 2.18 ความสัมพันธ์ของหน่วยวัดแสงสว่างในรูปของลักซ์

ค่าปริมาณของการส่องสว่าง 1 ฟุต-แคนเดิล จะมีค่าเท่ากับ 10.76 ลักซ์ เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าปริมาณของการส่องสว่างที่นิยมใช้อยู่ในปัจจุบันมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ ฟุต-แคนเดิลมิเตอร์ (Foot-candlemeter) กับ ลักซ์มิเตอร์ (Luxmeter) ดูในภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 เครื่องวัดปริมาณของการส่องสว่างลักซ์มิเตอร์

ในมาตรฐานทางแสงสว่างแต่ละแห่ง เช่น มาตรฐานการส่องสว่าง IES ประเทศสหรัฐอเมริกา มาตรฐานการส่องสว่างของอังกฤษ IES (BS.) เป็นต้น อาจกำหนดค่าความส่องสว่างที่ต่างกันออกไป สำหรับการใช้งานในพื้นที่อย่างเดียวกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพการใช้ชีวิต สภาพอากาศ เป็นต้น มาตรฐานสากลคือ CIE (International Commission on Illumination) CIE [28] ได้กำหนดค่าความส่องสว่างที่เหมาะสมสำหรับงานแต่ละอย่างดังแสดงในตารางที่ 2.4 ดังนี้

#### ตารางที่ 2.4 ค่าความเข้มแสงที่เหมาะสมในชีวิตประจำวัน

สถานที่	ความเข้มแสง (ลักซ์)
<b>บ้าน</b>	
ห้องนั่งเล่น ห้องครัว ห้องอาหาร	150-300
ห้องอ่านหนังสือ ห้องทำงาน	500-1000
<b>โรงเรียน</b>	
โรงพลศึกษา หอประชุม	75-300
ห้องเรียน	300-750
ห้องสมุด ห้องปฏิบัติการ ห้องเขียน แบบ	750-1000
<b>โรงพยาบาล</b>	
ห้องตรวจโรค	200-750
ห้องผ่าตัด	5000-10000
<b>สำนักงาน</b>	
บันไดฉุกเฉิน	30-75
ทางเดินภายในอาคาร	75-200
ห้องประชุม ห้องรับรอง	200-750

CIE (International Commission on Illumination) กำหนดความส่องสว่างในตารางข้างบน ออกเป็นสามค่าโดยใช้ค่ากลางเป็นค่าเฉลี่ย ส่วนอีกสองค่าใช้ในกรณีสภาพแวดล้อมอื่นๆ คือ อาจใช้ค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยหรือน้อยกว่าค่าเฉลี่ย ขึ้นอยู่กับสภาพต่างๆดังนี้ถ้าการสะท้อนแสงของพื้นผิว หรือคอนทราสต์ต่ำกว่าปกติให้ใช้ความส่องสว่างมากขึ้นถ้าความผิดพลาด เนื่องจากการมองอาจทำให้เกิดปัญหาร้ายแรง หรือเสียหายมาก ก็ให้ใช้ค่าความส่องสว่างในตารางมากขึ้นถ้าการมองวัตถุใช้เวลาสั้นมาก ก็ให้ใช้ค่าความส่องสว่างมากขึ้นถ้าบริเวณพื้นที่ที่กำลังพิจารณาไม่มีหน้าต่าง ให้ใช้ค่าความส่องสว่างมากขึ้นถ้าผู้ใช้งานบริเวณที่กำลังพิจารณาเป็นผู้สูงอายุให้ใช้ค่าความส่องสว่างมากขึ้น



## 2.10 ค่าการเปลี่ยนแปลงสี

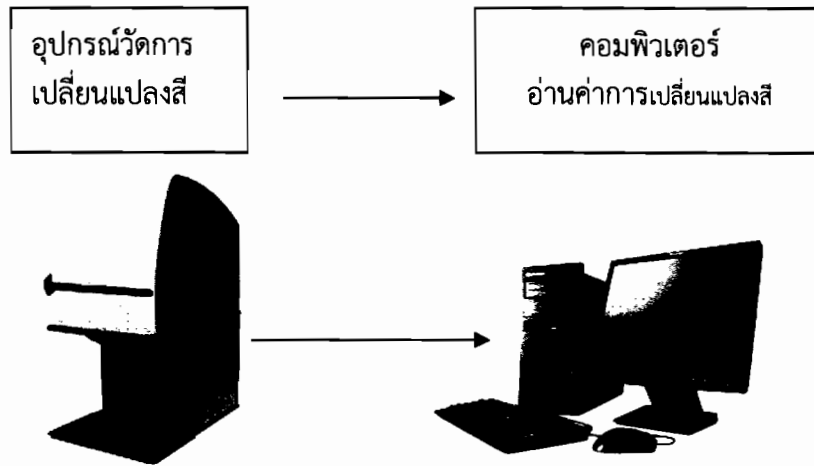
ค่าการเปลี่ยนแปลงสีในงานวิจัยนี้มีความสำคัญในเรื่องการวิเคราะห์ค่าการทำความสะอาดตัวเองของวัสดุ โดยสารแต่ละชนิดสามารถเปลี่ยนแปลงสีได้ด้วยความยาวคลื่นแตกต่างกัน สารไม่มีสีส่วนใหญ่จะดูดกลืนช่วงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งมีความยาวคลื่น 200 ถึง 300 นาโนเมตร ช่วงคลื่นสูงกว่า 780 ถึง 1000 นาโนเมตร เป็นช่วงคลื่นอินฟราเรดที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าเช่นกัน ส่วนสารที่มีสีจะเปลี่ยนแปลงสีในช่วงคลื่นสูงกว่า 380 ถึง 780 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงคลื่นแสงขาวที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าจากสมบัติของสารดังกล่าวจึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์สารชนิดต่างๆได้ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีของสารในช่วงคลื่นอัลตราไวโอเล็ต แสงขาวและอินฟราเรด การวัดการดูดกลืนคลื่นอัลตราไวโอเล็ตและแสงขาว ส่วนใหญ่จะใช้ในการวิเคราะห์สารอินทรีย์ ส่วนการเปลี่ยนแปลงสีในช่วงอินฟราเรดจะใช้กับการวิเคราะห์สารอินทรีย์การวัดการเปลี่ยนแปลงสีของสารสามารถใช้หาปริมาณสารนั้นได้ การหาปริมาณสารโดยวัดการเปลี่ยนแปลงสีในช่วงแสงขาวมีหลักสำคัญคือ สารที่ต้องการหาปริมาณจะต้องมีสีหรือสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นแล้วทำให้เกิดสารที่มีสีได้ สารละลายมีสีที่ใช้ในการวิเคราะห์ควรมีคุณสมบัติดังนี้

- (1) สีของสารควรมีความเข้มมากพอที่จะวัดการดูดกลืนของแสงได้ แม้ว่าสารนั้นจะประกอบด้วยสารที่ต้องการวิเคราะห์จำนวนเล็กน้อยก็ตาม
- (2) สีของสารที่อยู่ในสารละลายจะต้องอยู่ตัวไม่จางลงอย่างรวดเร็ว
- (3) สีของสารจะต้องไม่เปลี่ยนแปลงหรือจางลง เมื่อ pH หรืออุณหภูมิของสารละลายเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย
- (4) สารที่ทำให้เกิดสีกับสารที่ต้องการวิเคราะห์ จะต้องไม่มีสีหรือไม่เปลี่ยนแปลงสีช่วงเดียวกับสารมีสีที่เกิดขึ้น
- (5) ปฏิกิริยาของรีเอเจนต์กับสารที่ต้องการวิเคราะห์ จะต้องให้สารมีสีชนิดเดียวเท่านั้น

### 2.10.1 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีและการทำความสะอาดตัวเองของมอร์ตาร์

ค่าการเปลี่ยนแปลงสีเป็นค่าที่อ่านได้จากเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ไม่มีหน่วย ยิ่งวัตถุหรือสารละลายมีสีต่ำจะมีค่าการเปลี่ยนแปลงสีมากเนื่องจากแสงที่ส่องผ่านนั้นสามารถส่องผ่านได้น้อย จึงทำให้วัตถุสีต่ำมีค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่มากเหมือนหลักการฟิล์มกรองแสงรถยนต์สำหรับค่าการเปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ทำการทดสอบเราจะจำลองค่าการเปลี่ยนแปลงสีเริ่มต้นคือจำลองคราบสิ่งสกปรกที่แสงส่องผ่านได้น้อยทำให้มีค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่มาก และเมื่อเวลาทดสอบผ่านไปตัวอย่างมอร์ตาร์ที่นำมาทดสอบนั้นนำไปทำการทดสอบวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสีแล้วค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่ได้มีค่าลดลงจากตอนเริ่มต้นแสงว่าคราบสกปรกจางลง ซึ่งบ่งบอกว่าตัวอย่างมอร์ตาร์นั้นสามารถทำความสะอาดตัวเองได้ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสีของวัตถุที่มีลักษณะสีจางลงไปเป็นการบ่งบอกถึงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเกิดการขาละล้างผิวของวัสดุทำให้อินทรีย์สารที่ติดตามผิวจางหายไปตามระยะเวลา การทำความสะอาดตัวเองของมอร์ตาร์นั้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าเปลี่ยนแปลงสีที่อ่านได้จากเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

## 2.10.2 ส่วนประกอบของเครื่องโฟโตมิเตอร์



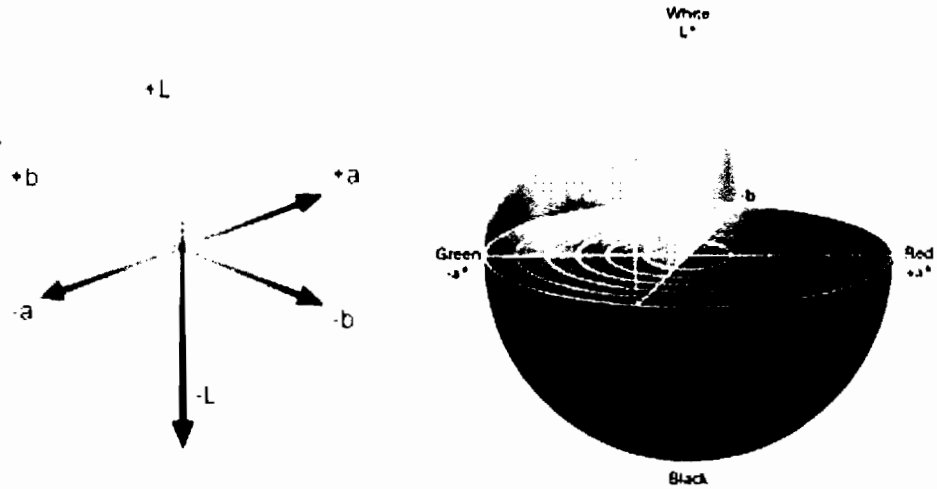
ภาพที่ 2.20 การทำงานของเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

แหล่งกำเนิดแสงถ้าใช้หลอดไฮโดรเจน ดิวทีเรียม ซีนอน หรือเมอร์คิวริอาร์ค จะได้แหล่งของแสงช่วงอัลตราไวโอเล็ต และถ้าใช้หลอดทั้งสแตนจะด้แหล่งของแสงขาว อุปกรณ์แยกคลื่นแสง ได้แก่ เกรตติงหรือปริซึม ทำหน้าที่แยกลำแสงที่มีความยาวคลื่นต่อเนื่องออกเป็นความยาวคลื่นเดี่ยว และเป็นช่วงคลื่นที่ต้องการให้ผ่านสารที่วิเคราะห์ภาชนะสำหรับใส่สารที่ต้องการวิเคราะห์ เรียกว่า เซลล์หรือคิวเวตต์ (cuvette) ทำจาก ควอตซ์ แต่ถ้าวัดในช่วงคลื่นแสงขาวอาจใช้ภาชนะที่ทำด้วยแก้วก็ได้ เซลล์ที่ใช้มีทั้งแบบทรงกระบอกและทรงสี่เหลี่ยม อุปกรณ์วัดความเข้มของแสง (radiation detector) ทำหน้าที่เปลี่ยนความเข้มของแสงที่ถูกส่งผ่านออกมาจากสารให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า อุปกรณ์อ่านหรือแปลสัญญาณ (signal indicator)

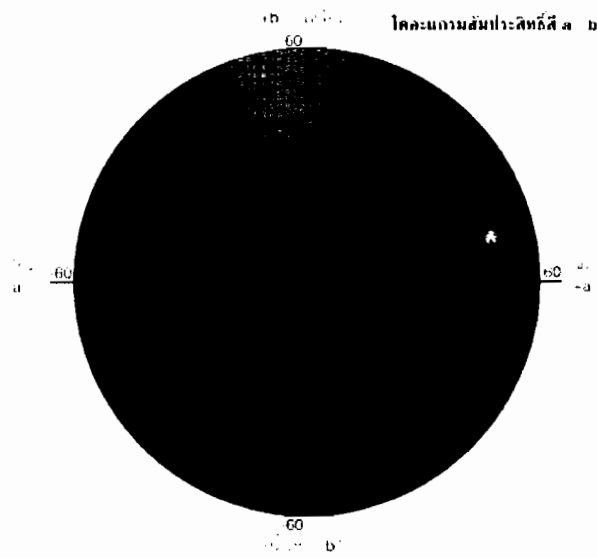
## 2.11 ระบบวัดค่าสีของเครื่อง

### 2.11.1 ระบบ $L^*a^*b^*$ หรือ CIELAB [29]

ในปี ค.ศ.1976 CIE ได้กำหนดปริภูมิสีระบบ  $L^*a^*b^*$  หรือ CIELAB ขึ้น เพื่อใช้แก้ปัญหาการแปลค่าสีที่เกิดขึ้นในระบบ  $Y_{xy}$  เพราะพบว่า ระยะห่างระหว่าง  $x$  กับ  $y$  บนไดอะแกรมสีจะไม่สอดคล้องกับความแตกต่างของสีที่เกิดจากการมองเห็นจริง ระบบสี  $L^*a^*b^*$  เป็นระบบการบรรยายสีแบบ 3 มิติ และเป็นอีกระบบหนึ่งที่นิยมกันมากในการนำมาใช้วัดค่าสีและใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดในหลายๆ วงการ โดยปริภูมิสีเป็นประเภทที่มีสเกลสม่ำเสมอ (Uniform) ในระบบสี  $L^*a^*b^*$  นี้ ค่า  $L^*$  จะหมายถึงความสว่าง ส่วน  $a^*$  และ  $b^*$  จะเป็นค่าสัมประสิทธิ์สี ดังแสดงในรูปด้านบน ไดอะแกรมดังกล่าว ค่า  $a^*$  และ  $b^*$  จะบอกทิศทางของสี เช่น  $+a^*$  หมายถึงอยู่ในทิศของสีแดง  $-a^*$  หมายถึง อยู่ในทิศของสีเขียว  $+b^*$  หมายถึงอยู่ในทิศของสีเหลือง และ  $-b^*$  หมายถึงอยู่ในทิศของสีเหลือง (Achromatic) เมื่อค่า  $a^*$  และ  $b^*$  เพิ่มขึ้นและจุดดังกล่าวเคลื่อนที่ออกจากศูนย์กลางความเข้มตัวของสีก็จะเพิ่มขึ้น ดังตัวอย่างรูปด้านล่าง ซึ่งแสดงให้เห็นค่าสีต่างๆ ของปริภูมิสี  $L^*a^*b^*$  อย่างชัดเจน

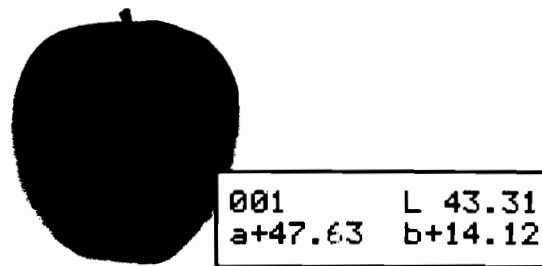


ภาพที่ 2.21 ปริภูมิสี L\* a\* b\*



ภาพที่ 2.22 ค่าสัมประสิทธิ์ a\* b\* (ภาพตัดขวาง) [28]

ตัวเมื่อเราวัดสีของผลแอปเปิ้ล โดยใช้ระบบสี L\* a\* b\* เราได้ค่าตามตัวอย่างข้างล่าง ค่าที่ได้แทนตำแหน่งสีได้อย่างไร เมื่อเราพล็อตค่า a\* และ b\* (a\* = +47.63 b\* = +14.12) ลงบนแกน a\* และ b\* ในภาพที่ 8 จุด A เป็นจุดที่แสดงสีของผลแอปเปิ้ล



ภาพที่ 2.23 ค่าสีที่วัดได้ของผลแอปเปิ้ล [30]

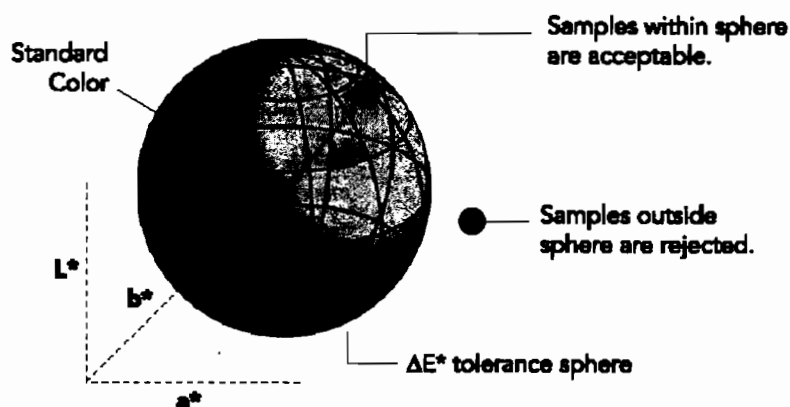
### 2.11.2 การกำหนดความคลาดเคลื่อนโดยใช้ $\Delta E$

CIE ได้พยายามที่จะกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยได้กำหนดสมการค่าความแตกต่างของสีโดยรวม (Total Colour Difference,  $\Delta E$ ) ซึ่งเป็นตัวเลขเดียว ดังนี้

$$\Delta E = (\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2)^{1/2} \quad (2.19)$$

เมื่อพิจารณารูปแบบของสมการแล้ว พบว่าเป็นสมการของทรงกลมรัศมี  $\Delta E$

$$\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2 = \Delta E^2 \quad (2.20)$$



ภาพที่ 2.24 ทรงกลมรัศมี  $\Delta E$  [29]

### 2.12 กำลังอัดประลัยซีเมนต์มอร์ตาร์ (Compressive strength of cement mortar)

กำลังอัดของคอนกรีตมีส่วนสำคัญกับการพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งกำลังอัดของคอนกรีต มีคุณสมบัติสำคัญต่อการออกแบบโครงสร้างและองค์อาคารในส่วนต่างๆ นอกจากนี้กำลังอัดยังมีความสัมพันธ์กับปัจจัยอื่นๆที่ใช้บอกคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านต่างๆ เช่น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

(Elastic Modulus) ความสามารถการซึมผ่านได้ (Permeability) รวมถึงค่าต้านทานความสึกกร่อน (Abrasive resistance) ทั้งนี้ [31] ได้สรุปปัจจัยที่มีผลต่อกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ได้โดยแบ่งออกเป็น 3 ปัจจัยหลักดังนี้

- 2.12.1 ลักษณะและสัดส่วนของวัสดุได้แก่
  - 2.12.1.1 อัตราส่วนระหว่างน้ำกับวัสดุประสาน (Water/binder ratio)
  - 2.12.1.2 การกักกระจายฟองอากาศ (Air entrainment)
  - 2.12.1.3 ชนิดและส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุซีเมนต์
  - 2.12.1.4 ลักษณะของมวลรวมที่ใช้ (Characteristic of aggregate)
  - 2.12.1.5 น้ำที่ใช้ผสม (Mixing water)
  - 2.12.1.6 สารผสมเพิ่ม (Admixtures)
- 2.12.2 การบ่ม (Curing condition)
  - 2.12.2.1 ระยะเวลาการบ่ม (Time of curing)
  - 2.12.2.2 ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity)
  - 2.12.2.3 อุณหภูมิในการบ่ม (Curing Temperature)
- 2.12.3 การทดสอบ (Testing parameter)
  - 2.12.3.1 ขนาดของตัวอย่างที่ทดสอบ (Specimen Geometry)
  - 2.12.3.2 สภาพของการทดสอบ (Loading condition)

ตารางที่ 2.5 เกณฑ์กำหนดกำลังรับแรงอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ตาร์มาตรฐาน [31]

อายุการบ่ม	กำลังอัด ( กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)				
	ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 2	ประเภทที่ 3	ประเภทที่ 4	ประเภทที่ 5
1 วันในอากาศชื้น	-	120	-	-	-
1วันในอากาศชื้น 2 วันในน้ำ	85	70	210	-	-
1วันในอากาศชื้น 6 วันในน้ำ	150	130	-	55	65
1วันในอากาศชื้น 27 วันในน้ำ	245	245	-	140	210

### 2.13 มาตรฐานกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนฉาบ

การทดสอบหากล้างอัดของปูนฉาบ เป็นอีกวิธีการหนึ่งในการตรวจสอบคุณภาพของปูนฉาบที่จะนำมาใช้งานว่ามีคุณภาพมาตรฐานหรือไม่ เกณฑ์กำหนดค่ากำลังอัดของก้อนลูกบาศก์ซีเมนต์ตามมาตรฐาน ซึ่งประกอบด้วยปูนซีเมนต์ 1 ส่วน ต่อทรายมาตรฐาน 2.75 ส่วน และทดสอบตามวิธีมาตรฐานจะต้องไม่น้อยกว่าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2.4

### 2.14 การปรับปรุงไทเทเนียมไดออกไซด์ให้มีความว่องไวในช่วงแสงขาว [32]

นักวิจัยส่วนใหญ่พยายามปรับปรุงประสิทธิภาพของไทเทเนียมด้วยวิธีการต่างๆ เพื่อให้สามารถเร่งปฏิกิริยาภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงในช่วงแสงขาวได้เนื่องจากในแสงอาทิตย์จากธรรมชาติมีปริมาณของแสงช่วงแสงขาว ( $\lambda = 400-700 \text{ nm}$ ) มากถึง 43% ซึ่งมากกว่าแสงยูวีซึ่งมีเพียง 5% วิธีการทำให้ไทเทเนียมสามารถเร่งปฏิกิริยาในช่วงแสงขาวได้นั้นสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การเจือด้วยโลหะ การเจือด้วยอโลหะ และการเตรียมให้ไทเทเนียมมีโครงสร้างแบบรีดิวส์ เป็นต้น แม้จะมีรายงานว่า การเจือโลหะทรานสิชันบางชนิด เช่น วานาเดียม (V) โครเมียม (Cr) และเหล็ก (Fe) ทำให้ไทเทเนียมเร่งปฏิกิริยาได้ดีในช่วงแสงขาว แต่ การเจือโลหะยังคงมีข้อจำกัดหลายประการคือ โลหะที่เจือเข้าไปอาจถูกกัดกร่อนด้วยแสงและทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางในการรวม  $e^-$  ไทเทเนียมทั้งหมด แต่ มีบางส่วนเหลืออยู่ที่ผิวและบดบังตำแหน่งที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก เป็นผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้ช้าลง การเจือด้วยอโลหะจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่นักวิจัยส่วนใหญ่เริ่มหันมาให้ความสนใจ เพราะนอกจากจะสามารถทำให้ไทเทเนียมเร่งปฏิกิริยาในช่วงแสงขาวได้แล้ว

### 2.15 การเจืออโลหะในไทเทเนียมไดออกไซด์ [32]

ชนิดของอโลหะที่ถูกนำมาศึกษาและทดสอบปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก ได้แก่ ไนโตรเจน (N) ซัลเฟอร์ (S) ฟอสฟอรัส (F) ไอโอดีน (I) และคาร์บอน (C) เป็นต้น ไทเทเนียมที่เจือด้วยอโลหะจะมีคุณสมบัติและโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีในช่วงแสงขาวได้ อธิบายได้ดังนี้

#### 2.15.1 การเจืออโลหะทำให้แบนด์แก๊ปแคบลง

พบว่าการเจือด้วยไนโตรเจน ทำให้เกิดการไฮบริดเซชันของ  $e^-$  ในออร์บิทัล N 2p และออร์บิทัล O 2p เนื่องจากมีค่าพลังงานใกล้เคียงกันการรวมออร์บิทัลนี้ทำให้แบนด์แก๊ปแคบลง จึงสามารถเปลี่ยนแปลงสีในช่วงแสงขาวได้ การเจือไนโตรเจนทำให้แบนด์แก๊ปลดลงจาก 3.2 eV เหลือเพียง 2.64 eV เท่านั้น

#### 2.15.2 การเจืออโลหะทำให้เกิดระดับชั้นพลังงานของสารเจือ

อะตอมของไนโตรเจน ที่เจือเข้าไปนั้นจะเข้าไปแทนที่อะตอม ของออกซิเจนที่อยู่ในโครงสร้าง ของไทเทเนียมเกิดเป็นระดับชั้นพลังงานของสารเจืออยู่เหนือวาเลนซ์แบนด์ การฉายแสงในช่วงยูวี จะสามารถกระตุ้นได้ทั้ง  $e^-$  ที่อยู่ในวาเลนซ์แบนด์ และที่อยู่ในระดับชั้นพลังงานของสารเจือส่วนการฉายแสงในช่วงแสงขาวจะกระตุ้นได้เฉพาะ  $e^-$  ที่อยู่ในระดับชั้นพลังงานของสารเจือเท่านั้น ดังนั้น การฉายด้วยแสงยูวีจึงมีจำนวน  $e^-$  ที่ถูกกระตุ้นมากกว่าทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เจือด้วยไนโตรเจนมีความว่องไวมากกว่าการฉายด้วยแสงขาว

### 2.15.3 การเจือโลหะทำให้เกิดตำแหน่งที่ว่างของออกซิเจน

ไนโตรเจนอะตอมที่เจือซึ่งอยู่ในรูปไอออน  $N^{3-}$  จะเข้าแทนที่ตำแหน่งของไอออน  $O^{2-}$  ในโครงสร้าง และในขณะเดียวกันสามารถ ทำให้เกิด Oxygen vacancies (OV) ขึ้นในโครงสร้างเป็นชั้นพลังงานใหม่ อยู่ระหว่างวาเลนซ์แบนด์ และคอนดักชันแบนด์ของไทเทเนียมจึงทำให้ไทเทเนียมมีความว่องไวในช่วงแสงขาวได้

## 2.16 ปัจจัยที่มีผลต่อความว่องไวในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก [32]

### 2.16.1 ปริมาณของโลหะที่เจือ

การศึกษาการเจือซัลเฟอร์โดยใช้ Thiourea (TU) เป็นแหล่งซัลเฟอร์ และพบว่าอะตอมของซัลเฟอร์จะเข้าไปในโครงสร้างของไทเทเนียมเกิดเป็นชั้นพลังงานใหม่อยู่เหนือวาเลนซ์แบนด์ทำให้แบนด์แคบแคบลงโดยชั้นพลังงานใหม่นี้จะยกตัวสูงขึ้นตามปริมาณการเจือซัลเฟอร์ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเจือในปริมาณที่มากเกินไป (อัตราส่วนโดยมวลของ  $TU:TiO_2 > 1$ ) ซัลเฟอร์ที่เจือจะทำหน้าที่เป็น recombination center ซึ่งส่งผลให้ ความว่องไวในปฏิกิริยาลดลง

### 2.16.2 ชนิดของสารตั้งต้นสำหรับเตรียมโลหะที่เจือ

สารตั้งต้นแต่ละชนิดจะให้สถานะทางเคมี (Chemical state) ของสารเจือที่แตกต่างกัน ทำให้การเจือไนโตรเจนโดยใช้สารตั้งต้นที่แตกต่างกันสองชนิด คือ สารละลายแอมโมเนีย ( $NH_3$ ) และแอมโมเนียมคลอไรด์ ( $NH_4Cl$ ) พบว่าการใช้สารตั้งต้นที่ต่างกันทำให้เกิดสถานะทางเคมีของไนโตรเจนที่ต่างกันการใช้  $NH_4Cl$  เป็นสารตั้งต้นจะเกิดการแทนที่อะตอมของออกซิเจนในโครงผลึกไทเทเนียมเป็นแบบ O-Ti-N ส่วนการใช้  $NH_3$  เป็นสารตั้งต้นจะเกิดทั้งการแทนที่ออกซิเจนในโครงผลึกแบบ O-Ti-N และแทรกอยู่บนพื้นผิวแบบ Ti-O-N สถานะทางเคมีของสารเจือที่เป็น  $NH_3$  จะให้แบนด์แคบแคบกว่าสามารถเปลี่ยนแปลงสีในช่วงแสงขาวได้ดีกว่ามีปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลที่พื้นผิวมากกว่า และประสิทธิภาพในการแยก  $e^-$  และ  $h^+$  สูงกว่า จึงสามารถย่อยสลาย ปองโซ 4 อาร์ ได้ดีกว่าสารเจือที่เป็น  $NH_4Cl$

### 2.16.3 ชนิดของไอออนโลหะที่เจือ

การเจือโลหะหรือโลหะในไทเทเนียมอาจทำให้เกิดการแทนที่อะตอมในโครงผลึกของไทเทเนียม ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของไอออนที่เจือการเจือด้วยโลหะซึ่งอยู่ในรูปไอออนบวกจะเกิดการแทนที่อะตอมของไทเทเนียม ( $Ti^{4+}$ ) ในโครงผลึกและเกิดชั้นพลังงานใหม่ของสารเจือที่ตำแหน่งที่ต่ำกว่าคอนดักชันแบนด์ ในขณะที่การเจือด้วยโลหะซึ่งอยู่ในรูปไอออนลบจะเกิดการแทนที่อะตอมของออกซิเจน ( $O^{2-}$ ) ในโครงผลึกและเกิดชั้นพลังงานใหม่ของสารเจือที่ตำแหน่งเหนือวาเลนซ์แบนด์ ผลงานวิจัยจำนวนหนึ่งรายงานว่า การเจือด้วยไอออนบวกช่วยให้การเปลี่ยนแปลงสีและการเร่งปฏิกิริยาในช่วงแสงขาวดีกว่าการเจือด้วยไอออนลบ แต่การเจือด้วยโลหะมีข้อจำกัดในเรื่องของการเกิด Recombination center ได้ง่ายกว่าการเจือด้วยโลหะดังนั้น นักวิจัยจึงพยายามค้นหาวิธีการเจือโลหะในสภาพของไอออนบวก เปรียบเทียบการเจือไอโอดีนในสภาพที่เป็นไอออนบวก ( $I^{+7} - I^{+5}$ ) และไอออนลบ (I) ซึ่งพบว่าการเจือด้วยไอออนบวกจะเกิดชั้นพลังงานที่อยู่ใกล้กับคอนดักชันแบนด์

มากกว่าการเจือด้วยไอออนลบส่งผลให้สามารถเปลี่ยนแปลงสีทั้งในช่วงยูวีและแสงขาวได้ดีกว่าช่วยเพิ่มจำนวนของ  $e^-$  และ  $h^+$  ที่ถูกกระตุ้นจึงมีความไวในปฏิกิริยาแบบใช้แสงสูงกว่า

### 2.17 แนวโน้มการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเจือโลหะในไทเทเนียมไดออกไซด์ [32]

ปัญหาหลักของไทเทเนียมที่เจือด้วยโลหะคือความไวในการเร่งปฏิกิริยาภายใต้แสงขาวยังน้อยกว่าการเร่งปฏิกิริยาภายใต้แสงยูวีอยู่มาก การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาในปัจจุบันและอนาคตจึงมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความไวและเพิ่มเสถียรภาพการใช้งานในช่วงแสงขาว โดยการเจือแบบผสมซึ่งอาจมีทั้งการเจือผสมระหว่างโลหะกับอโลหะ เช่น การเจือระหว่างไนโตรเจนและซิลเฟอร์พบว่ามีความไวในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกมากกว่าการเจือไนโตรเจนหรือซิลเฟอร์เพียงอย่างเดียว หรือการเจือผสมระหว่างโลหะกับโลหะ เช่น การเจือผสมระหว่างไนโตรเจนและทังสเทน ไนโตรเจนและเหล็ก ต่างแสดงให้เห็นว่าสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้ เมื่อเปรียบเทียบกับที่เจือด้วยโลหะหรือโลหะเพียงชนิดเดียว การเจือผสมระหว่างไอออนลบและไอออนบวกไม่เพียงแต่ช่วยลดแบนด์แก๊ป แต่ยังช่วยลดการกลับมารวมตัวกันของ  $e^-$  กับ  $h^+$  ได้อีกด้วยเนื่องจากเกิดสถานะเป็นกลาง (Neutralization) ระหว่างประจุบวกและประจุลบขึ้นในไทเทเนียม นอกจากนี้ยังมีการเจือด้วยโลหะและโลหะมากกว่าสองชนิด เช่น การเจือโลหะร่วมกับโลหะในกลุ่มแลนทาไนด์ เช่น Nd La Ce และ Sm การศึกษาการเจือผสมระหว่างคาร์บอนซิลเฟอร์และซามาเรียม (Sm) พบว่าไทเทเนียมที่เจือแบบผสมสามชนิดให้ความไวสูงกว่าการเจือผสมสองชนิดระหว่างคาร์บอนและซิลเฟอร์มาก ข้อดีของการเจือแบบผสมคือจะทำให้ได้ไทเทเนียมที่มีคุณลักษณะเฉพาะยิ่งกว่าการเจือด้วยธาตุชนิดเดียวจึงช่วยลดการเกิด Recombination center ได้ดีกว่าและคุณลักษณะเฉพาะของสารเจือแต่ละชนิดจะช่วยส่งเสริมให้ไทเทเนียมมีความไวเพิ่มขึ้นในช่วงแสงขาว การปรับปรุงไทเทเนียมด้วยวิธีการเจือโลหะช่วยให้ไทเทเนียมมีความไวในช่วงแสงขาวและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแยกอิเล็กตรอนและโฮลออกจากกันอย่างมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกในแสงขาวของไทเทเนียมที่เจือด้วยโลหะยังคงต่ำกว่าการเร่งปฏิกิริยาในแสงยูวี ดังนั้น แนวโน้มการวิจัยในอนาคตจึงอยู่ที่การพยายามปรับปรุงประสิทธิภาพของไทเทเนียมที่เจือด้วยโลหะให้ดีขึ้น ด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การเจือผสมด้วยโลหะหรือโลหะตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปการใช้เทคนิคและวิธีการใหม่ๆ ในการเจือ หรือการใช้สารแรกเริ่มชนิดใหม่ๆ ของโลหะที่ใช้เจือเป็นต้นหากความพยายามของนักวิจัยประสบผลสำเร็จจะเป็นคุณประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านสิ่งแวดล้อมในสภาวะที่มีข้อจำกัดด้านพลังงานเพราะกระบวนการดังกล่าวสามารถกำจัดสารมลพิษได้โดยใช้พลังงานจากแหล่งกำเนิดด้วยแสงอาทิตย์โดยมีอย่างไม่มีจำกัด

### 2.18 สรุป

การทบทวนงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเพื่อหาสาเหตุและจุดประเด็นเพื่อทำการศึกษาค้นคว้าของการทดลองที่จะสามารถสรุปได้ ตั้งในบทนี้กล่าวโดยสรุปในขั้นตอนของการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

การศึกษาวัดค่าความสะอาดตัวเองได้หรือที่เรียกว่าวัสดุโฟโตคะตะไลติกนั้นได้จากการผสมสารกึ่งตัวนำลงไปเป็นส่วนผสมของวัสดุนั้นและอาศัยคุณสมบัติเคมีและฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำในการ



เกิดปฏิกิริยาและทำความสะอาดตัวเองได้ โดยความเกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมการก่อสร้างของวัสดุทำความสะอาดตัวเองได้นั้น ในช่วงต้นมีการศึกษาวัสดุคอนกรีตทำความสะอาดตัวเองได้และมีการนำไปใช้ จนทำให้มีแนวทางของการศึกษาวัสดุอมอร์ตาร์ทำความสะอาดตัวเองได้ การศึกษานี้เป็นประโยชน์อย่างยิ่งกับการก่อสร้างในประเทศไทย เพราะมีการใช้วัสดุอมอร์ตาร์ในงานฉาบผิววัสดุอย่างกว้างขวาง

การศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเช่นคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์เบื้องต้นเช่น กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ค่าพลังงานแสง ตัวเร่งปฏิกิริยาของกระบวนการแสง การสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำด้วยกระบวนการแอนโนโดเซชัน และการศึกษาถึงประโยชน์ของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีผลกับมลพิษทางอากาศที่นำมาใช้กับงานทางวิศวกรรม นอกจากนี้การวัดค่าทางการทดลองเช่น หน่วยที่ใช้ในการวัดความสว่างแสง ค่าการเปลี่ยนแปลงสี ระบบวัดค่าของเครื่องวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสี เมื่อทำการผสมสารกึ่งตัวนำลงในวัสดุอมอร์ตาร์ยังต้องศึกษาผลของค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต และเมื่อศึกษาในส่วนแรกของการทำความสะอาดวัสดุอมอร์ตาร์ยังมีแนวทางในการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มคุณสมบัติการทำความสะอาดตัวเองของวัสดุอมอร์ตาร์ปูนฉาบด้วยการเจือสารอโลหะบางตัวลงในไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งในเนื้อหาการทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกล่าวถึง การเจืออโลหะและแนวโน้มการศึกษาเกี่ยวกับการเจืออโลหะลงในสารไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อจากนั้นจะมีปัจจัยใดบ้างที่มีผลต่อความว่องไวในปฏิกิริยาที่ทำความสะอาดตัวเองได้ และต่อจากนั้นเริ่มทำการวางแผนการทดลอง กำหนดเป้าหมายและวิธีการทดลองเพื่อให้ได้ค่าการทดลองในการวิเคราะห์และสรุปผลได้ในบทที่ 3 และ บทที่ 4 ต่อไป

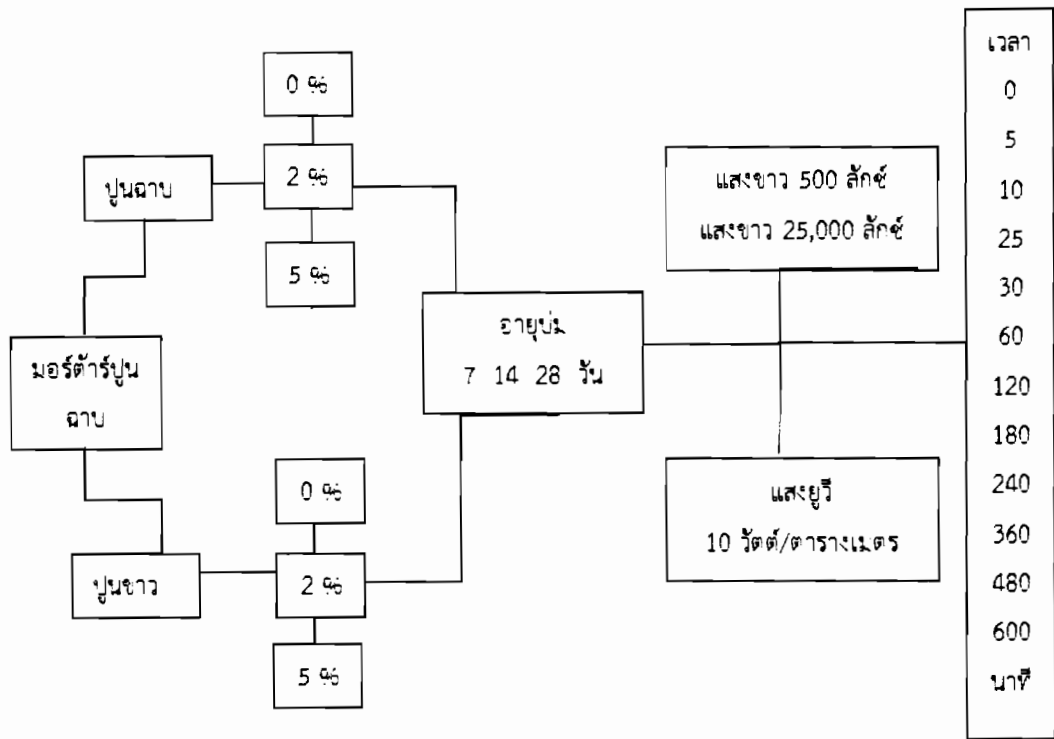
## บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

### 3.1 ทัวไป

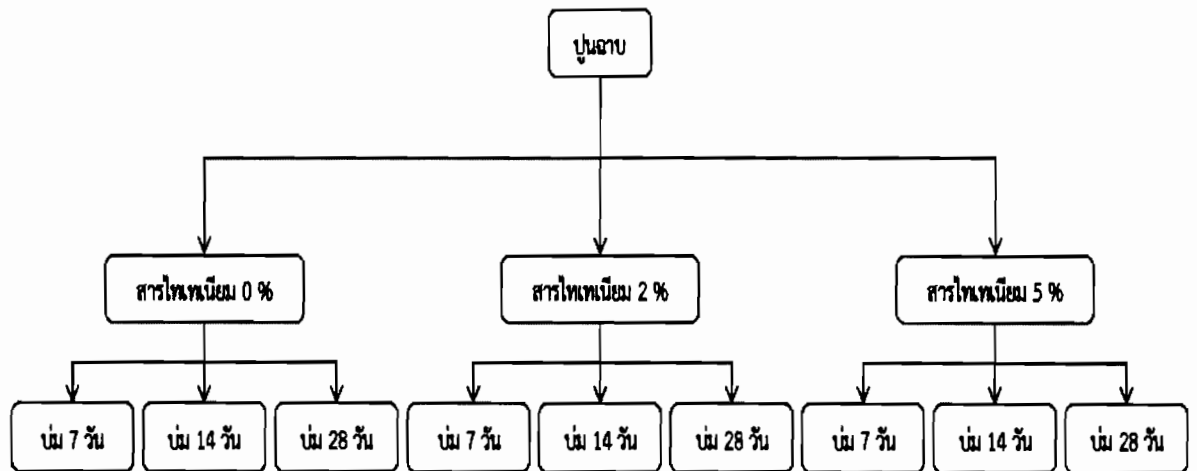
บทนี้จะกล่าวถึงวิธีการศึกษาคุณสมบัติของมอร์ทัลาร์ปูนฉาบชนิดทำความสะอาดตัวเองได้ ประกอบด้วย การเตรียมชิ้นตัวอย่างทดลอง อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง วิธีการทดลอง ขั้นตอนการทดลอง การเก็บข้อมูลการทดลองงานทดลองในห้องปฏิบัติการจะทำการหล่อตัวอย่างวัสดุมอร์ทัลาร์โพโตคะตะไลติกโดยผสมระหว่าง วัสดุปูนซีเมนต์ฉาบกับสารกึ่งตัวนำ ( $\text{TiO}_2$ ) ไทเทเนียมไดออกไซด์ และ วัสดุซีเมนต์ปูนขาวฉาบกับสารกึ่งตัวนำ ( $\text{TiO}_2$ ) และจะแบ่งตัวอย่างแต่ละกลุ่มออกเป็น 3 ชุดการทดลอง เพื่อทดสอบคุณสมบัติการทำความสะอาดตัวเอง (self-cleaning) โดยวัดจากค่าการเปลี่ยนแปลงสี ซึ่งแต่ละกลุ่มจะมีปริมาณสารกึ่งตัวนำแตกต่างกัน (ร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก และร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก) นอกจากนี้ แต่ละชุดการทดลองจะถูกกำหนดอายุการบ่มตัวอย่างวัสดุมอร์ทัลาร์ 3 ระยะ คือ 7 14 และ 28 วัน ตัวอย่างวัสดุมอร์ทัลาร์ที่มีปริมาณสารกึ่งตัวนำที่ระดับต่าง ๆ และผ่านการบ่มแต่ละระยะเวลา จะอยู่ภายใต้การฉายแสงอีก 3 สภาวะ กล่าวคือ ภายใต้การฉายแสงขาวที่มีความเข้มแสงในระดับ 25,000 ลักซ์ ภายใต้การฉายแสงขาวที่มีความเข้มของแสงในระดับ 500 ลักซ์ และภายใต้การฉายแสงยูวีที่มีความเข้มแสง 10 วัตต์ต่อตารางเมตร โดยที่แต่ละสภาวะจะมีระยะเวลาการฉายแสงตั้งแต่ 0 ถึง 600 นาที ดังแสดงในภาพที่ 3.1

ลำดับขั้นถัดมายังนำวัสดุตัวอย่างที่ทำการทดลองวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสีมาทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการผสมสารกึ่งตัวนำลงในวัสดุปูนฉาบนั้นๆ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่มีการกำหนดใช้ตามวิศวกรรม ดังแสดงในภาพที่ 3.2

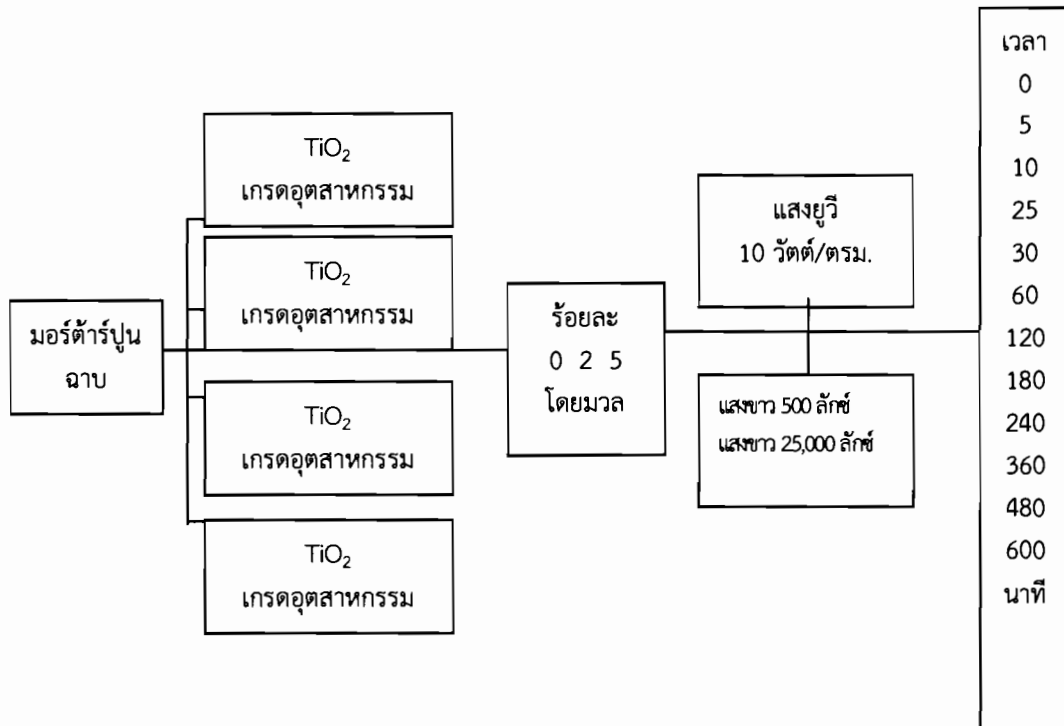
ในเบื้องต้นการทดสอบค่าการเปลี่ยนแปลงสีของวัสดุมอร์ทัลาร์ปูนฉาบนั้นได้ผลสรุปอย่างไรแล้ว หลังจากนั้นจะมีการทดสอบเพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของการทำความสะอาดวัสดุมอร์ทัลาร์ปูนฉาบโดยการดัดแปรสารกึ่งตัวนำที่ผสมวัสดุมอร์ทัลาร์ปูนฉาบชนิดทำความสะอาดตัวเองได้ โดยในงานวิจัยนี้เรียกสารกึ่งตัวนำที่ดัดแปรคือ สารกึ่งตัวนำ M-01 และ สารกึ่งตัวนำ M-02 ทำการทดลองค่าการเปลี่ยนแปลงสีเช่นเดียวกับการทดลองค่าการเปลี่ยนแปลงสีในช่วงแรก โดยสรุปการทดลองทั้งหมดจำแนกได้ตามแผนผังการวิจัยดังแสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการทดลองค่าการเปลี่ยนแปลงสีของวัสดุมอร์ตาร์ทปุ๋ยฉาบผสมสารกึ่งตัวนำเกรดอุตสาหกรรม



ภาพที่ 3.2 การศึกษากำลั้งของตัวอย่างปุ๋ยฉาบ



ภาพที่ 3.3 แผนภาพการออกแบบตัวอย่างทดลองค่าการเปลี่ยนแปลงสี

การทดสอบค่าการการทำความสะอาดนั้น เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงสีเมื่อทำการทดลองในแสงขาวและนำมาเปรียบเทียบกับแสงเหนือม่วง เพื่อเป็นแนวทางในการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานจริง ในสภาวะต่างๆที่มีความเข้มของแสงทั้งในสภาวะแสงที่ภายในอาคารและภายนอกอาคาร นอกจากนี้ยังคำนึงถึงค่ากำลังวัตต์ที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการผสมวัสดุกึ่งตัวนำลงในวัสดุปูนฉาบว่ายังอยู่ในค่ามาตรฐานทางวิศวกรรมที่ยอมรับได้หรือไม่ นอกจากนั้นยังทำการทดสอบการผสมสารกึ่งตัวนำที่ทำการดัดแปรสารเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุฉาบในการทำความสะอาดตัวเองซึ่งกระบวนการทดลองทั้งหมดดังกล่าวถึงดังต่อไปนี้

### 3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.2.1 ปูนซีเมนต์ฉาบ (สูตรพิเศษ ตราเสือ) ปูนซีเมนต์ที่ใช้หล่อตัวอย่างทดสอบหรือ ปูนฉาบ (สูตรพิเศษ) กำหนดให้ใช้ปูนซีเมนต์ผสม (Mixed cement) ที่ได้รับรองมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 80-2550 หรือคุณสมบัติเทียบเท่า

3.2.2 ปูนซีเมนต์ขาว (ตกแต่งภายใน ภายนอก ตราเสือ) ปูนซีเมนต์ขาวที่ใช้หล่อตัวอย่างทดสอบกำหนดให้ใช้ปูนซีเมนต์ขาวที่ใช้ตกแต่งภายในและภายนอกที่ได้รับรองมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 80-2550 หรือคุณสมบัติเทียบเท่า

3.2.3 สารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์สารกึ่งตัวนำที่ใช้ผสมในการหล่อชิ้นตัวอย่างทดสอบให้ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในชั้นคุณภาพทั้งหมด 4 ชั้น คือ อุตสาหกรรม รหัส R-103 (commercial

grade) ชั้น Analytical grade สารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ตัดแปร M-01 และสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ตัดแปร M-02

3.2.4 สีย้อมที่ใช้แทนสารปนเปื้อนสารเคมีที่ใช้ย้อมแทนสารปนเปื้อนในการทดลองให้ใช้สารสีแดงสตอเบอร์รี่ (สารป้องกัน 4 อาร์) ที่อยู่ในชั้น AR grade

3.2.5 มวลรวมละเอียด ทราเยมน้ำที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดประมาณ 2.0 – 2.2 ที่อบแห้งร้อนผ่านตะแกรงเพื่อแยกตะกอนซากพืชซากสัตว์ออก

3.2.6 น้ำประปาที่มีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7  
วัสดุต่างๆนี้ใช้ในการทดสอบถูกแสดงในภาพที่ 3.4



(ก)



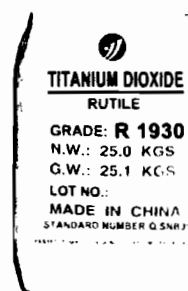
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

ภาพที่ 3.4 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา ก)ปูนซีเมนต์ฉาบสูตรพิเศษ ข)ปูนซีเมนต์ขาวพอร์ตแลนด์ประเภท 1 งานตกแต่งภายใน ค)สารสีแดงสตอเบอร์รี่ (สารป้องกัน 4 อาร์) ง) ทราเยละเอียดค่าโมดูลัสความละเอียด 2.0 – 2.2 จ) สารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม เกรดทดลอง เกรดตัดแปร M-01 และ M-02

### 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้แสดงดังภาพที่ 3.4 และมีรายละเอียดดังนี้

3.3.1 แบบหล่อ PVC ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว หนา 1 นิ้ว

3.3.2 กระบะปูนซีเมนต์

3.3.3 กล่องจำลองการให้แสงขนาด กว้าง 1.00 เมตร ยาว 1.00 เมตร สูง 1.00 เมตร 4 กล่อง

3.3.4 หลอดไฟฮาโลเจน Day light ขนาด 50 watt จำนวน 3 หลอด และ หลอด ยูวี 10 watt จำนวน 1 หลอด พร้อมชุดสายไฟ

3.3.5 กระจกฉีดยาขนาด 5 มม.

3.3.6 กล่องบรรจุชิ้นทดลองทึบแสง

3.3.7 เครื่องวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสี spectrophotometer (Thechnidyne)

3.3.8 แบบหล่อคอนกรีตลูกบาศก์ ขนาดกว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร

3.3.9 เครื่องวัดค่ากำลังคอนกรีต

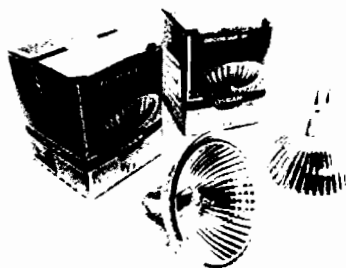
3.3.10 ตราซั้งแบบละเอียด



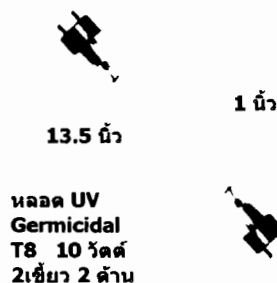
(ก)



(ข)



(ค)

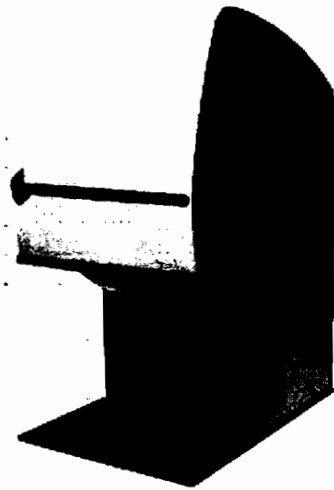


(ง)

ภาพที่ 3.5 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา ก) แบบหล่อมอร์ตารขึ้นตัวอย่าง ขนาด 2 นิ้ว หนา 2.00 ซม.  
 ข) กล่องไม้สำหรับจำลองการให้แสงขนาด กว้าง 1.00 ม. ยาว 1.00 ม. สูง 1.00  
 ค) หลอดทังสเตนฮาโลเจน ขนาด 65 วัตต์ ง) หลอดยูวี ขนาด 10 วัตต์



(จ)



(ข)



(ค)



(ง)



(ฉ)

ภาพที่ 3.5 จ) กล้องเก็บตัวอย่างทึบแสง ข) เครื่องวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสี  
 ค) แบบหล่อตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัดทรงลูกบาศก์ กว้าง 15 ซม.  
 ยาว 15 ซม สูง 15 ซม ง) และ ฉ) เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด (ต่อ)

### 3.4 วิธีการเตรียมการทดลอง

#### ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

3.4.1 นำปูนซีเมนต์ผสมกับทรายในอัตราส่วน 1:3 โดยปริมาตร(ปูนซีเมนต์ขาวใช้ 1:2 โดยปริมาตร)

3.4.2 เมื่อผสมปูนซีเมนต์กับทรายเป็นเนื้อเดียวกัน ให้ผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ ลงไปในอัตราส่วน ร้อยละ 0 ร้อยละ 2 และ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แล้วผสมให้เข้ากันในสภาพแห้ง

3.4.3 จากนั้นใส่น้ำลงไปในส่วนผสมที่ผสมไว้เป็นเนื้อเดียวกันในอัตราส่วนต่อปูนซีเมนต์ 1:1 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 . ภาพวัสดุคูลอร์ตำรกับสารกึ่งตัวนำโทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมเป็ยก

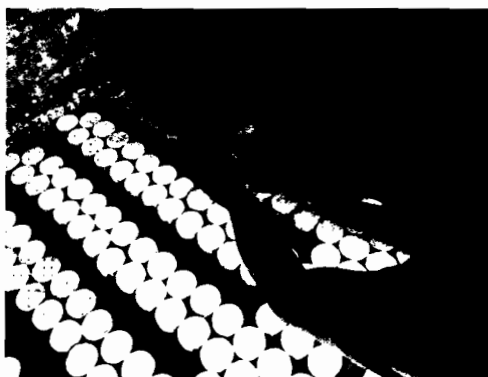
3.4.4 เมื่อทำการผสมกับน้ำเรียบร็อยนำมอร์ตำรสดเทลงในแบบหล่อ PVC ที่เตรียมไว้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว สูง 1 นิ้ว (ดังแสดงในภาพที่ 3.7) วางเก็บไว้ในที่มืดซิดไม่มีแสงผ่านเข้าไปเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยา และถือเป็นการเริ่มบ่มคอนกรีตในอากาศเป็นเวลา 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน



ภาพที่ 3.7 เทวัสดุคูลอร์ตำรที่ผสมสารกึ่งตัวนำเป็นเนื้อเดียวกันแล้วเทเข้าแบบหล่อทรงกระบอก

3.4.5 และทำขึ้นตัวอย่างการทดลองค่ากำลังคอนกรีต โดยเทมอร์ตำรดังกล่าวลงแบบหล่อขนาดกว้าง 15 ซม. ยาว 15 ซม. สูง 15 ซม. เป็นทรงลูกบาศก์

3.4.6 เมื่อครบอายุการบ่มมอร์ตำรแต่ละชนิดแล้วก่อนนำเข้ากล่องให้แสงให้หยุดสารละลายปองโซ 4 อาร์ แทนสารปนเปื้อน ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลต่อลิตร ปริมาตร 1 มิลลิลิตร หยุดลงบนผิวมอร์ตำรที่เตรียมไว้ ทิ้งไว้ 60 นาที โดยประมาณเพื่อให้แห้ง ดังแสดงในภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 หยุดสารละลายโรดามีน บี ลงขึ้นตัวอย่าง



3.4.7 นำชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ททดลองวางในกล่องให้แสงในแนวราบ โดยแต่ละกล่องจะจำลองสภาพของแสงที่มีความเข้มต่างๆ กำหนดใช้ที่  $500 \pm 50$  ลักซ์  $25,000 \pm 1000$  ลักซ์ และที่ความเข้มแสงยูวี 10 วัตต์ต่อตารางเมตร ทั้งหมด 3 กล่อง ดังแสดงในภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 ภาพการฉายแสงลงบนวัสดุทดลองที่ความเข้มแสงต่างกัน

3.4.8 การวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสีทำโดยนำก้อนตัวอย่างที่ฉายแสงตามเวลาที่กำหนดคือ 0, 5, 10, 20, 30, 60, 120, 240, 360, 480, และ 600 นาที 12 ช่วงเวลา นับจากเริ่มฉายแสง มาทำการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) ดังแสดงในภาพที่ 3.10 ซึ่งค่าที่อ่านได้จะมี 3 ค่า คือ  $L^*$   $a^*$  และ  $b^*$  มาคำนวณหาค่า  $\Delta E$  จากสมการ  $\Delta E = [(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 + (\Delta L^*)^2]^{1/2}$  แล้วนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป



ภาพที่ 3.10 ภาพการใช้เครื่อง Spectrophotometer วัดค่าการเปลี่ยนแปลงสี

### 3.5 รายละเอียดตัวอย่างในการทดสอบ

ในการทดสอบแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม คือ กลุ่มแรกทดสอบซีเมนต์มอร์ตาร์ปูนฉาบที่ผสมกับสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์  $TiO_2$  และกลุ่มที่สองคือทดสอบซีเมนต์มอร์ตาร์ปูนขาวที่ผสมกับสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์  $TiO_2$  ซึ่งกลุ่มการทดลองที่ 1 และกลุ่มที่ 2 ที่มีขึ้นตัวอย่างทดสอบแต่ละกลุ่มคือ 432 ตัวอย่างตามลำดับ ขนาดตัวอย่างเป็นทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว สูง 1 นิ้ว ซึ่งแบ่งการทดสอบออกตามปัจจัยต่างๆ ที่มีผลการทดลอง ได้แก่

3.5.1 อัตราส่วนผสมระหว่างซีเมนต์กับสารกึ่งตัวนำ ร้อยละ 0 ร้อยละ 2 และร้อยละ 5

3.5.2 อายุของมอร์ตาร์ซีเมนต์ 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน

3.5.3 ความเข้มของแสง คือ 500 ลักซ์ 25,000 ลักซ์ และ แสงยูวี 10 วัตต์ต่อตารางเมตร

3.5.4 สารกึ่งตัวนำที่ตัดแปรคือ สารกึ่งตัวนำ M-01 และ สารกึ่งตัวนำ M-02 โดยนำสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดทดลองนำมาผ่านการเติมสารอโลหะด้วยการตีผิวโดยใช้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้น จะเรียกว่า สารกึ่งตัวนำ M-01 ส่วนสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดทดลองนำมาผ่านการเติมสารอโลหะด้วยการตกตะกอนบนผิวโดยใช้ความร้อนสูงเป็นตัวกระตุ้น จะเรียกว่า สารกึ่งตัวนำ M-02 เมื่อมองด้วยตาเปล่า จะพบว่า สารสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดทดลอง สารกึ่งตัวนำ M-01 และ สารกึ่งตัวนำ M-02 มีลักษณะภายนอกเหมือนกันทุกประการ และแต่ละชนิดของปัจจัยจะมีตัวอย่างขึ้นทดลองอย่างละ 3 ชิ้น เพื่อหาค่าเฉลี่ย ในกลุ่มที่ 3 คือการทดสอบค่ากำลังมอร์ตาร์คอนกรีตปูนฉาบสูตรพิเศษโดยมีปัจจัยคือค่าของอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำกับซีเมนต์มอร์ตาร์ที่แตกต่างกัน ที่ ร้อยละ 0 ร้อยละ 2 และร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และในกลุ่มสุดท้าย คือการทดสอบค่ากำลังมอร์ตาร์ปูนขาวโดยมีปัจจัยคือค่าของอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำกับซีเมนต์มอร์ตาร์ที่แตกต่างกัน ที่ ร้อยละ 0 ร้อยละ 2 และร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยทั้งสองกลุ่มหลังนี้ จะทำขึ้นตัวอย่างทดสอบโดยอาศัยปัจจัย คือ

3.5.4.1) ความแตกต่างของอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์กับสารกึ่งตัวนำ ร้อยละ 0 ร้อยละ 2 และร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

3.5.4.2) อายุของมอร์ตาร์คอนกรีตที่ 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน

โดยจะทำขึ้นตัวอย่างทดสอบแยกเป็นตามปัจจัยๆละ 3 ชิ้นตัวอย่าง เพื่อหาค่าเฉลี่ย โดยทำทั้งหมดกลุ่มการทดลองละ 27 ตัวอย่าง ขนาดตัวอย่างที่ทำ เป็นทรงลูกบาศก์ กว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร



ตารางที่ 3.4 จำนวนตัวอย่างมอร์ตาร์ซีเมนต์ปูนขาวผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ TiO<sub>2</sub> (Compression Test) ฉายแสงในเวลา 0-600 นาที (กรณีละ 3 ตัวอย่าง)

อัตราส่วนผสม % ไทเทเนียมไดออกไซด์	อายุมอร์ตาร์ซีเมนต์ 7 วัน			อายุมอร์ตาร์ซีเมนต์ 14 วัน			อายุมอร์ตาร์ซีเมนต์ 28 วัน		
	ความเข้มของแสง			ความเข้มของแสง			ความเข้มของแสง		
	500 ลักซ์	25,000 ลักซ์	ยูวี	500 ลักซ์	25,000 ลักซ์	ยูวี	500 ลักซ์	25,000 ลักซ์	ยูวี
0%	3 ชั้น	3 ชั้น	3 ชั้น	3 ชั้น	3 ชั้น	3 ชั้น	3 ชั้น	3 ชั้น	3 ชั้น
2%	3 ชั้น	3 ชั้น	3 ชั้น	3 ชั้น	3 ชั้น	3 ชั้น	3 ชั้น	3 ชั้น	3 ชั้น
5%	3 ชั้น	3 ชั้น	3 ชั้น	3 ชั้น	3 ชั้น	3 ชั้น	3 ชั้น	3 ชั้น	3 ชั้น

### 3.6 การคำนวณความสว่างของแสง

ความสว่างของแสง

$$E = I/R^2 \quad (3.1)$$

E คือ ความสว่าง มีหน่วยเป็น Lumen/m<sup>2</sup>

I คือ กำลังของการส่องสว่าง หน่วยคือ cd. หรือ แคนเดลล่า

R คือ ระยะแสงตกใส่พื้นผิว มีหน่วยเป็น m (เมตร) ที่ต้องการหาว่าจะวางหลอดให้รัศมีห่างจาก  
ชิ้นส่วนทดลองเป็นระยะเท่าไร

และจาก

$$I = P/(4\pi R^2) \quad (3.2)$$

โดยตามทฤษฎีคือฟลักซ์ของแสงส่องรอบๆเป็นลักษณะพื้นผิววงกลมค่า R ก็คือระยะเดียวกันกับ ระยะ  
หลอดไฟกับชิ้นทดลองที่ต้องการหา แทนค่าสมการ (3.2) ในสมการ (3.1) จะได้ว่า

$$E = P/(4\pi R^4) \quad (3.3)$$

3.6.1 การคำนวณความสว่างแสงขาวภายในอาคาร 500 ลักซ์ ใช้หลอดไฟที่มีกำลัง (P) 65 วัตต์  
และต้องการความส่องสว่างที่ 500 ลักซ์ คำนวณหาค่าระยะแสงตกใส่ผิววัตถุ (R) ซึ่งจากการแทนค่าใน  
สมการที่ 3.3 จะได้ระยะห่างระหว่างหลอดไฟกับผิววัตถุ คือ 0.3189 เมตร

3.6.2 การคำนวณความสว่างแสงขาวภายนอกอาคาร 25,000 ลักซ์ ใช้หลอดไฟที่มีกำลัง (P) 65  
วัตต์ สองหลอด (คิดเป็น 130 วัตต์) และต้องการความส่องสว่างที่ 25,000 ลักซ์ คำนวณหาค่าระยะ  
แสงตกใส่ผิววัตถุ (R) ซึ่งจากการแทนค่าในสมการที่ 3.3 จะได้ระยะห่างระหว่างหลอดไฟกับผิววัตถุ  
คือ 0.1426 เมตร

3.6.3 การคำนวณความสว่างแสงยูวี ใช้หลอดไฟ ยูวี ที่มีกำลัง (P) 10 วัตต์ต่อตารางเมตร ดังนั้น  
จึงได้ระยะห่างระหว่างหลอดไฟกับวัตถุคือ 1 เมตร



### 3.7.2 ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลองค่าการเปลี่ยนแปลงสี

เวลา (นาท)	ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงสี(อัตราการเปลี่ยนแปลงของสี Color variation) $\Delta E$								
	ความเข้มแสงขาว 500 ลักซ์			ความเข้มแสงขาว 25,000 ลักซ์			ความเข้มแสงเหนือม่วง 10 watt/m <sup>2</sup>		
	0%	2%	5%	0%	2%	5%	0%	2%	5%
0									
5									
10									
20									
30									
60									
120									
180									
240									
360									
480									
600									

### 3.7.3 ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลองกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์

เวลาในการบ่ม	กำลังอัดประลัยของปูนซีเมนต์ขาว			
	0%	2%	5%	
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย
7 วัน				
14 วัน				
28 วัน				

## 3.8 สรุป

การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ชุดการทดลอง ในส่วนแรกกล่าวถึงการทดลองหาค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดจากการผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ในเกรดอุตสาหกรรม โดยกำหนดตัวแปรการศึกษา คือ อายุมอร์ตาร์ ระยะเวลาการให้แสง ชนิดของแสงเร่งปฏิกิริยา และอัตราส่วนสารกึ่งตัวนำที่ผสม และสุดท้ายคือชนิดของปูนซีเมนต์คือแบบธรรมดาและปูนขาว ในส่วนที่ 2 เมื่อทำการผสมแล้วทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่เปลี่ยนแปลงไป และในส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาเพื่อเพิ่มคุณสมบัติการทำความสะอาดตัวเองของมอร์ตาร์โดยการผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดดัดแปร และกำหนดตัวแปรเช่นเดียวกันกับการทดลองในส่วนแรก เมื่อได้ผลการทดลองครบถ้วนทำการวิเคราะห์ผลในบทที่ 4 ต่อไป

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงผลของการทดลองที่ได้จากวิธีการดำเนินการวิจัยในบทที่ 3 โดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ผลซึ่งการทดลองจะแยกเป็น 3 ประเด็นสำคัญคือ

4.1.1 การทดลองหาค่าการเปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนฉาบ โดยมีรายละเอียดของข้อมูลจะแสดงในรูปของข้อมูลเปรียบเทียบผลการทดลองในรูปของกราฟแสดงผลเพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ โดยจะจำแนกตามตัวแปร คือ

##### 4.1.1.1 ชนิดของมอร์ตาร์ปูนฉาบ

- 1) มอร์ตาร์ปูนฉาบธรรมดา
- 2) มอร์ตาร์ปูนขาวฉาบตกแต่ง

##### 4.1.1.2 อายุบ่มของมอร์ตาร์ปูนฉาบ ที่อายุบ่ม 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน

##### 4.1.1.3 ชนิดของพลังงานแสงโดยแบ่ง 3 รูปแบบพลังงาน

- 1) แสงขาวที่ความเข้ม 500 ลักซ์ (ความเข้มแสงขาวภายในอาคาร)
- 2) แสงขาวที่ความเข้ม 25,000 ลักซ์ (ความเข้มแสงขาวภายนอกอาคาร)
- 3) แสงสียูวีที่ความเข้ม 10 วัตต์ต่อตารางเมตร (แสงยูวีภายนอกอาคาร)

4.1.1.4 อัตราส่วนการผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์  $TiO_2$  ที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 2 และ 5 โดยน้ำหนักซีเมนต์ปูนฉาบ

##### 4.1.1.5 ระยะเวลาการให้พลังงานแสงตั้งแต่ 0 – 600 นาที

4.1.2 การทดลองค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ จากปัจจัยที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อผสมสารกึ่งตัวนำ ตามปัจจัยดังนี้

##### 4.1.2.1 ชนิดของมอร์ตาร์ปูนฉาบ

- 1) มอร์ตาร์ปูนฉาบธรรมดา
- 2) มอร์ตาร์ปูนขาวฉาบตกแต่ง

##### 4.1.2.2 อายุบ่มของมอร์ตาร์ปูนฉาบ ที่อายุบ่ม 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน

4.1.2.3 อัตราส่วนการผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์  $TiO_2$  ที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 2 และ 5 โดยน้ำหนักซีเมนต์ปูนฉาบ

โดยข้อมูลจากการกำหนดตัวแปรข้างต้นนำมาสรุปผลการทดลองและวิเคราะห์ผลตามหัวข้อดังต่อไปนี้

##### 4.1.3 การทดลองค่าการเปลี่ยนแปลงสีเมื่อผสมสารกึ่งตัวนำที่มีการตัดแปร

จากการทดลองค่าการเปลี่ยนแปลงสีในหัวข้อผลการทดลองที่ 4.1.1 เมื่อได้ผลการทดลองที่สามารถบอกประสิทธิภาพของการทำความสะอาดตัวเองได้ของวัสดุอมอร์ตาร์ปูนฉาบแล้วมีการทดลองต่อเนื่องเพื่อศึกษาและปรับปรุงค่าการทำความสะอาดตัวเองได้โดยตัดแปรสารกึ่งตัวนำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น โดยจำแนกผลการทดลองเพื่อวิเคราะห์ตามชนิดของสารกึ่งตัวนำ 4 ชนิด ดังนี้

4.1.3.1 สารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ เกรตอุตสาหกรรม

4.1.3.2 สารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ เกรตทดลอง

4.1.3.3 สารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ดัดแปร M-01

4.1.3.4 สารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ดัดแปร M-02

โดยเมื่อทดลองหาค่าการเปลี่ยนแปลงสีแล้วเสร็จ นำมาวิเคราะห์หาค่าการทำควมสะอาดตัวเองได้ของวัสดุอมอร์ฟาร์ปูนฉาบ เพื่อเป็นข้อมูลในการไปปรับปรุงประสิทธิภาพของวัสดุอมอร์ฟาร์ปูนฉาบต่อไป

## 4.2 ผลการทดลองค่าการเปลี่ยนแปลงสีอมอร์ฟาร์ปูนฉาบ

อมอร์ฟาร์ปูนฉาบแบ่งออกเป็น 2 ชนิดที่นำมาทำการลองคือ อมอร์ฟาร์ปูนฉาบธรรมดา และอมอร์ฟาร์ปูนฉาบขาวฉาบตกแต่ง เมื่ออายุของอมอร์ฟาร์ปูนฉาบบ่มได้ครบตามอายุของอมอร์ฟาร์ที่กำหนดแล้วคือ 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน และได้ทำการหยดสารละลายปองโซ 4 อาร์ ซึ่งกำหนดให้เป็นสารปนเปื้อนสำหรับผิวของอมอร์ฟาร์ที่ปริมาณเดียวกันแล้ว ทำการฉายแสงที่รูปแบบการให้พลังงานใน 3 รูปแบบคือ

- (1) แสงขาวที่ความเข้ม 500 ลักซ์ (ความเข้มแสงขาวภายในอาคาร)
- (2) แสงขาวที่ความเข้ม 25,000 ลักซ์ (ความเข้มแสงขาวภายนอกอาคาร)
- (3) แสงยูวีที่ความเข้ม 10 วัตต์ต่อตารางเมตร (แสงยูวีภายนอกอาคาร)

ตามระยะเวลาที่กำหนด 12 ช่วงเวลา คือ 0, 5, 10, 20, 30, 60, 120, 180, 240, 360, 480 และ 600 นาที เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนดแล้วนำขึ้นตัวอย่างที่ทำการฉายแสงเรียบร้อยแล้วทำการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่เปลี่ยนไปจะแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาการฉลางของผิววัสดุอมอร์ฟาร์ปูนฉาบที่ผสมสารกึ่งตัวที่สภาวะต่างๆ โดยได้ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงสีดังนี้

### 4.2.1 ผลการทดลองค่าการเปลี่ยนแปลงสีของอมอร์ฟาร์ปูนฉาบที่อายุบ่ม 7 วัน

ผลการทดลองค่าการเปลี่ยนแปลงสีของอมอร์ฟาร์ปูนฉาบทำการวัดค่าโดยนำขึ้นตัวอย่างที่จะทำการทดลองมาอ่านค่าด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งค่าที่ได้จะออกมาเป็นค่าบ่งชี้ของสีคือค่า  $L^*$   $a^*$   $b^*$  แล้วหาค่า  $\Delta E = [(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 + (\Delta L^*)^2]^{1/2}$  ซึ่งค่า  $\Delta E$  คือค่าการเปลี่ยนแปลงของสีที่เปลี่ยนไป (Color variation) ณ เวลาที่ให้พลังงานแสงใดๆ เริ่มจากนาที่ที่ 0 ถึง 600 นาที ดังตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของสีของอมอร์ฟาร์ปูนฉาบธรรมดาและอมอร์ฟาร์ปูนฉาบขาวตกแต่งที่อายุบ่ม 7 วัน โดยอัตราส่วนผสมของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ร้อยละ 0, 2, 5 โดยน้ำหนักซีเมนต์ปูนฉาบ และฉายแสงที่มีความเข้ม แสงขาวที่ความเข้มแสง 500 ลักซ์ ความเข้มแสงขาว 25,000 ลักซ์ และแสงยูวี ความเข้ม 10 วัตต์ต่อตารางเมตร



ตารางที่ 4.1 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของมอร์ตาร์ดาร์ปุนฉาบ (Color Variation)  $\Delta E$  อายุบ่ม 7 วัน

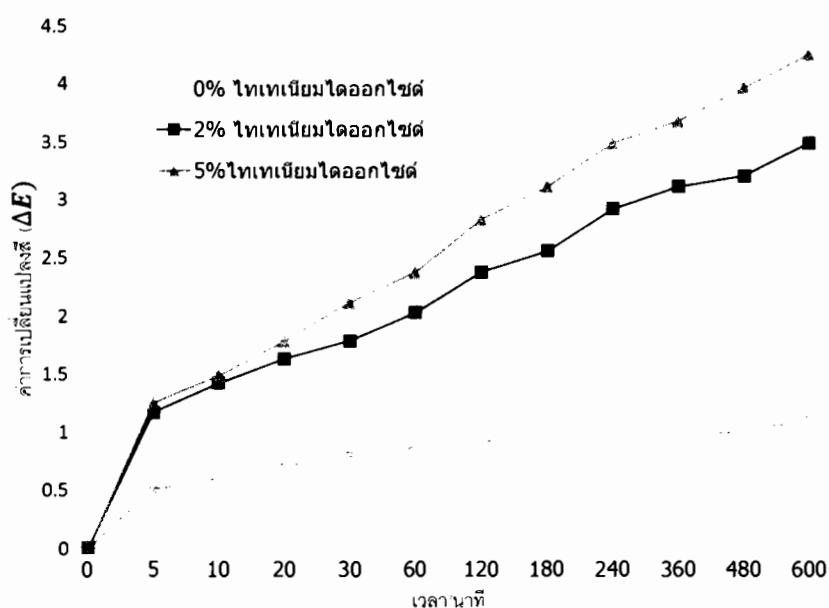
เวลา (นาทีก)	ค่าการเปลี่ยนแปลงของสี (Color variation) $\Delta E$								
	ความเข้มแสงขาว 500 ลักซ์ (ร้อยละ)			ความเข้มแสงขาว 25,000 ลักซ์ (ร้อยละ)			ความเข้มแสงยูวี 10 วัตต์ต่อตารางเมตร (ร้อยละ)		
	0	2	5	0	2	5	0	2	5
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0.50	1.17	1.25	0.70	1.10	1.28	0.70	0.90	2.63
10	0.61	1.42	1.48	1.56	1.97	2.36	1.55	2.90	4.24
20	0.70	1.62	1.78	1.91	3.91	4.51	1.89	4.90	7.74
30	0.82	1.78	2.11	2.28	4.89	5.29	2.25	5.90	8.69
60	0.86	2.02	2.37	2.63	5.85	6.45	2.57	7.50	9.79
120	0.91	2.37	2.82	2.96	6.79	6.99	2.65	8.40	10.18
180	0.94	2.55	3.10	3.00	7.72	7.92	2.62	9.52	10.63
240	0.95	2.91	3.48	2.99	8.16	8.46	2.77	9.76	11.24
360	0.96	3.10	3.67	2.95	8.54	9.07	2.73	10.17	11.65
480	0.99	3.19	3.95	2.90	8.91	9.74	2.67	10.45	12.13
600	1.10	3.48	4.24	2.86	9.29	10.42	2.62	10.49	12.44

ตารางที่ 4.2 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของมอร์ตาร์ดาร์ปุนขาว (Color Variation)  $\Delta E$  อายุบ่ม 7 วัน

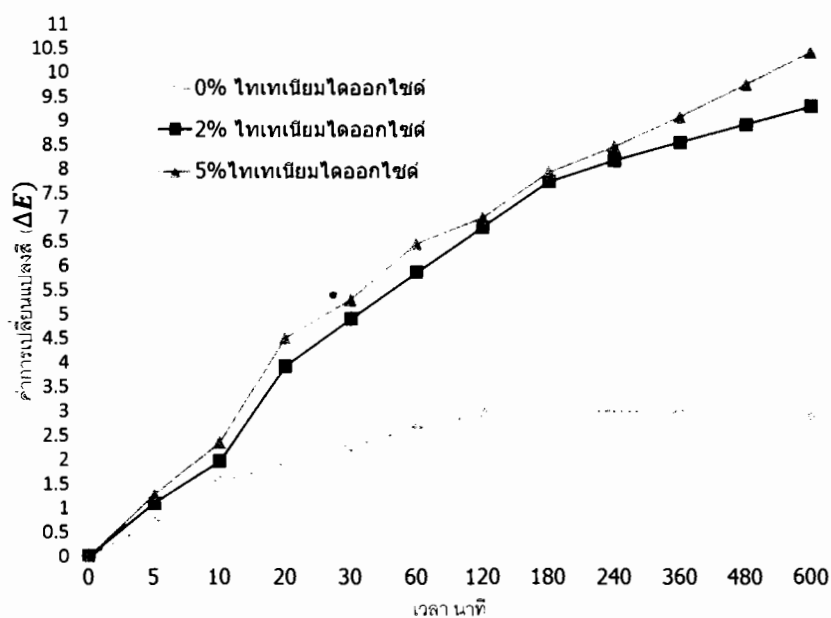
เวลา (นาทีก)	ค่าการเปลี่ยนแปลงของสี (Color variation) $\Delta E$								
	ความเข้มแสงขาว 500 ลักซ์ (ร้อยละ)			ความเข้มแสงขาว 25,000 ลักซ์ (ร้อยละ)			ความเข้มแสงยูวี 10 วัตต์ต่อตารางเมตร (ร้อยละ)		
	0	2	5	0	2	5	0	2	5
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0.71	1.06	1.10	0.71	2.10	2.28	0.70	1.48	3.57
10	0.87	1.19	1.31	1.57	3.98	4.37	1.56	4.19	4.98
20	0.93	1.60	1.60	1.93	5.93	6.53	1.91	5.44	7.86
30	0.99	1.68	1.93	2.31	6.92	7.32	2.28	6.79	9.07
60	1.07	1.93	2.19	2.69	7.91	8.51	2.63	7.59	10.37
120	1.11	2.28	2.65	3.08	8.91	9.11	2.77	8.79	10.86
180	1.15	2.46	2.93	3.18	9.90	10.10	2.80	10.09	11.45
240	1.18	2.74	3.30	3.23	10.40	10.70	2.77	10.27	11.96
360	1.18	2.93	3.50	3.31	10.90	11.43	2.73	10.72	12.15
480	1.19	3.11	3.78	3.38	11.39	12.22	2.67	11.12	12.85
600	1.22	3.40	4.17	3.46	11.89	13.02	2.67	11.50	13.48

#### 4.2.1.1 ค่าความสว่างของแสงกับค่าการเปลี่ยนแปลงสี

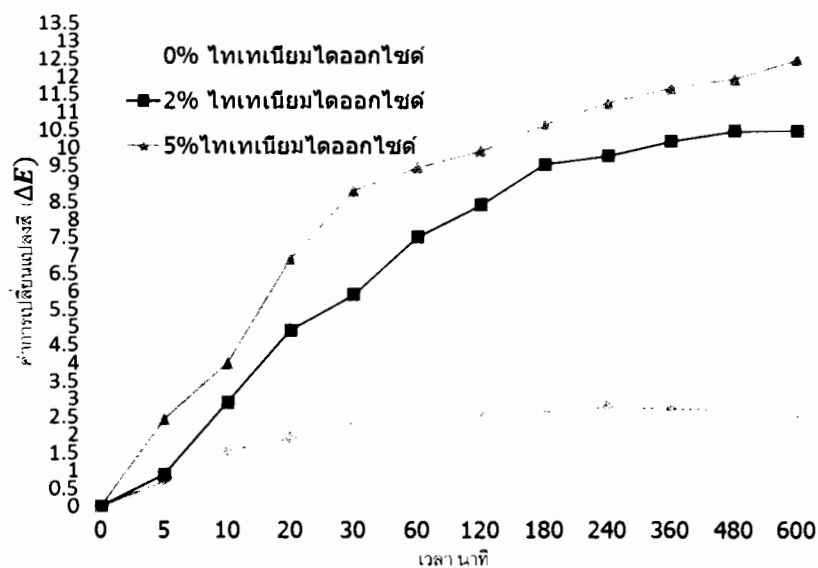
เมื่อให้พลังงานในรูปแสงขาวที่มีความเข้มแสง 500 ลักซ์ ค่าการเปลี่ยนแปลงสีเมื่อเวลาผ่านไป 600 นาที มีค่าสูงสุดที่  $\Delta E = 4.24$  สำหรับแสงขาวที่ความเข้ม 25,000 ลักซ์ (ความสว่างภายนอก) เมื่อให้พลังงานแสงค่าเปลี่ยนแปลงสีเมื่อเวลาผ่านไป 600 นาที มีค่าสูงสุดที่  $\Delta E = 10.42$  และสำหรับพลังงานของแสงยูวี เมื่อเวลาผ่านไป 600 นาที มีค่าการดูดกลืนสูงสุดอยู่ที่  $\Delta E = 12.44$  เห็นได้ว่าในปัจจุบันเดียวกันค่าการเปลี่ยนแปลงสี ระหว่างแสงขาวที่ 25,000 ลักซ์ มีค่าใกล้เคียงกับ แสงยูวีที่ 10 วัตต์ต่อตารางเมตร และมีค่าแตกต่างกันกับแสงขาวที่ 500 ลักซ์ โดยคิดเป็นอัตราส่วนทั้งหมด แสงขาว 500 ลักซ์ : แสงขาว 25,000 ลักซ์ : แสงยูวี 10 วัตต์ต่อตารางเมตร คือ 0.1564 : 0.3845 : 0.4590



ภาพที่ 4.1 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของมอร์ตาร์ทับนฉาบที่อายุบ่ม 7 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำต่างๆ โดยใช้แสงขาวในการเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มแสง 500 ลักซ์



ภาพที่ 4.2 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของมอร์ตำรปุณฉาบที่อายุป่ม 7 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำต่างๆ โดยใช้แสงขาวในการเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มแสง 25,000 ลักซ์



ภาพที่ 4.3 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของมอร์ตำรปุณฉาบที่อายุป่ม 7 วัน อัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำต่างๆ โดยใช้แสงยูวีในการเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มแสง 10 วัตต์ต่อตารางเมตร

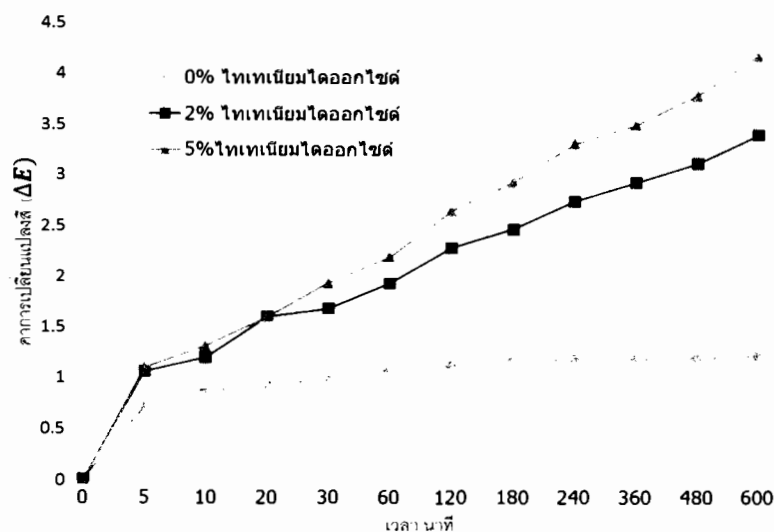
4.2.1.2 ผลของอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำโทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสี

จากภาพที่ 4.1 ภาพที่ 4.2 และภาพที่ 4.3 เห็นได้ชัดว่าค่าการเปลี่ยนแปลงสีเมื่อเวลาการให้แสงผ่านไป 600 นาที ของอัตราส่วนผสมโทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก

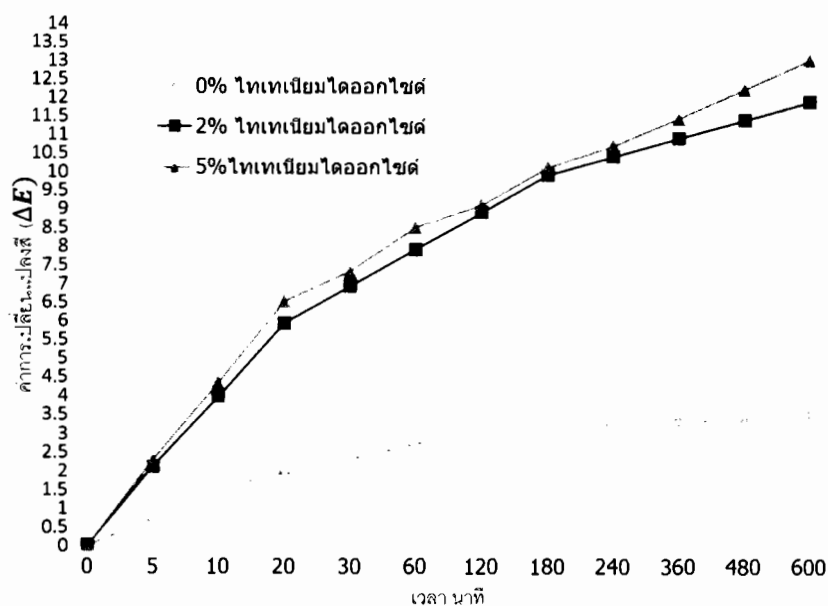
มีค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่น้อย โดยมีค่าการเปลี่ยนแปลงสี  $\Delta E = 1.10$   $\Delta E = 2.86$   $\Delta E = 2.62$  จากค่าการให้พลังงานแสง แสงขาว 500 ลักซ์ แสงขาว 25,000 ลักซ์ และแสงยูวี 10 วัตต์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ เมื่อเทียบกับอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก มีค่าการเปลี่ยนแปลงสี  $\Delta E = 3.48$   $\Delta E = 9.29$   $\Delta E = 10.46$  จากค่าการให้พลังงานแสง แสงขาว 500 ลักซ์ แสงขาว 25,000 ลักซ์ และแสงยูวี 10 วัตต์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ และอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าการเปลี่ยนแปลงสี  $\Delta E = 4.24$   $\Delta E = 10.42$   $\Delta E = 12.44$  จึงสรุปผลได้ว่า เมื่อมีการผสมสารไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนัก จะมีผลทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสีเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารกึ่งตัวนำที่ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนัก ค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่ความเข้มแสง 25,000 ลักซ์ มีค่าใกล้เคียงกัน จะมีเพียงความเข้มแสงขาว 500 ลักซ์ และ แสงยูวีที่ 10 วัตต์ต่อตารางเมตร ที่ค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่สารกึ่งตัวนำที่ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่มีความแตกต่างกันมากกว่า สรุปได้ว่าอัตราส่วนผสมที่สารกึ่งตัวนำที่ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนัก ไม่ส่งผลทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสีแตกต่างกันมากที่ความเข้มแสง 25,000 ลักซ์ แต่สำหรับแสงยูวีค่าอัตราส่วนผสมมีผลกับค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดขึ้น

#### 4.2.1.3 ผลของระยะเวลาของการให้พลังงานแสงต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสี

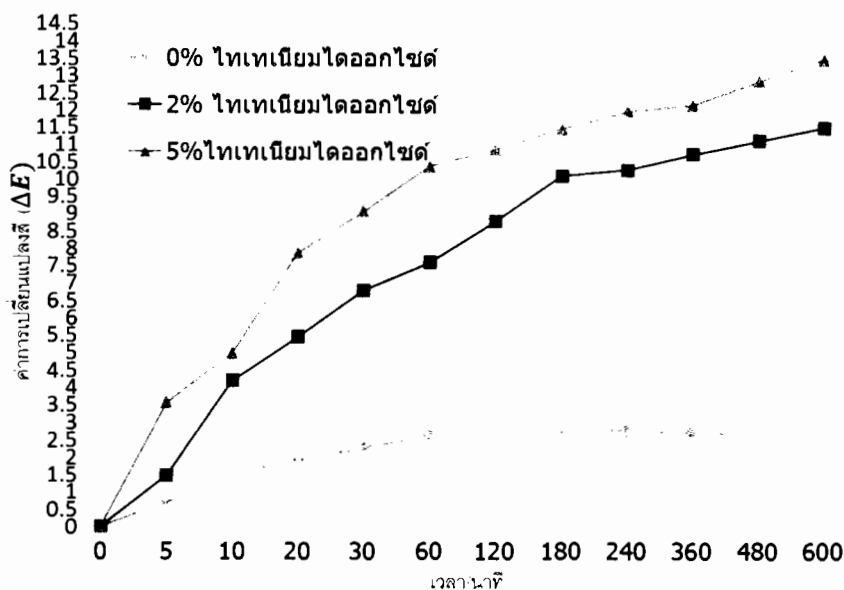
ในช่วงเวลาที่ให้พลังงานแสง 0 – 600 นาที ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของมอร์ตาร์ปูนฉาบที่ผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา เมื่อพิจารณาที่ค่าความเข้มของแสงที่ให้ จะเห็นได้จากภาพที่ 4.2 การเพิ่มขึ้นของค่าการเปลี่ยนแปลงสีเป็นไปอย่างต่อเนื่องและเรื่อยๆ แตกต่างจากค่าความเข้มแสงยูวีจากภาพที่ 4.3 ที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงสีเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงเวลา 120 นาทีแรก หลังจากนั้นค่าเปลี่ยนแปลงสีเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่น้อยลง จึงสรุปได้ว่าค่าการเปลี่ยนแปลงสีของแสงขาวที่ความเข้ม 500 ลักซ์ และ 25,000 ลักซ์ มีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ที่ช่วงเวลา 600 นาที แต่แสงยูวีมีค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่เพิ่มขึ้นมากในช่วงเวลา 120 นาทีแรก หลังจากนั้นค่าการเปลี่ยนแปลงสีจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ลดลง



ภาพที่ 4.4 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของมอร์ตาร์ปูนขาวที่อายุบ่ม 7 วัน ที่อัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำต่างๆ โดยใช้แสงขาวในการเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มแสง 500 ลักซ์



ภาพที่ 4.5 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของมอร์ตาร์ปูนขาวที่อายุบ่ม 7 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำต่างๆ โดยใช้แสงขาวในการเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มแสง 25,000 ลักซ์



ภาพที่ 4.6 ค่าการเปลี่ยนแปลงสี ของมอร์ตาร์ปูนขาวที่อายุบ่ม 7 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำต่างๆ โดยใช้แสงยูวีเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้ม 10 วัตต์ต่อตารางเมตร

4.2.1.4 ชนิดของมอร์ตาร์ปูนฉาบธรรมดาและมอร์ตาร์ปูนฉาบขาวตกแต่งมีผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสี

จากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบปัจจัยที่มีผลทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงสีเปลี่ยนแปลงจากมอร์ตาร์ปูนฉาบทั้ง 2 ชนิด แล้ว จากภาพที่ 1 และภาพที่ 4 แนวโน้มของค่าการเปลี่ยนแปลงสีเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ที่ความเข้มแสงขาว 500 ลักซ์ และความเข้มแสงขาว

25,000 ลักซ์ ดูจากภาพที่ 4.2 และภาพที่ 4.5 รวมไปถึงความเข้มของแสงยูวี จากภาพที่ 4.3 และภาพที่ 4.6

จากภาพที่ 4.1 และภาพที่ 4.4 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่อัตราส่วนผสม ร้อยละ 0, 2, 5 โดยน้ำหนัก ของวัสดุอมอร์ฟาร์ปูนฉาบมีความแตกต่างจากวัสดุอมอร์ฟาร์ปูนขาว ที่เวลา 600 นาที เป็น 0.12 0.08 0.07 ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.2 และภาพที่ 4.5 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่อัตราส่วนผสม ร้อยละ 0, 2, 5 โดยน้ำหนัก ของวัสดุอมอร์ฟาร์ปูนฉาบมีความแตกต่างจากวัสดุอมอร์ฟาร์ปูนขาว ที่เวลา 600 นาที เป็น 0.60 2.60 2.60 ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.3 และภาพที่ 4.6 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่อัตราส่วนผสม ร้อยละ 0, 2, 5 โดยน้ำหนัก ของวัสดุอมอร์ฟาร์ปูนฉาบมีความแตกต่างจากวัสดุอมอร์ฟาร์ปูนขาว ที่เวลา 600 นาที เป็น 0.05 1.01 1.04 ตามลำดับ

#### 4.2.2 ผลการทดลองค่าการเปลี่ยนแปลงสีของอมอร์ฟาร์ปูนฉาบที่อายุบ่ม 14 วัน

ผลการทดลองค่าการเปลี่ยนแปลงสีของอมอร์ฟาร์ปูนฉาบทำการวัดค่าโดยนำชิ้นตัวอย่างที่จะทำการทดลองมาอ่านค่าด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งค่าที่ได้จะออกมาเป็นค่าบ่งชี้ของสีคือค่า  $L^* a^* b^*$  แล้วหาค่า  $\Delta E = [(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 + (\Delta L^*)^2]^{1/2}$  ซึ่งค่า  $\Delta E$  คือค่าการเปลี่ยนแปลงของสีที่เปลี่ยนไป (Color variation) ณ เวลาที่ให้พลังงานแสงใดๆ เริ่มจากนาฬิกาที่ 0 ถึง 600 นาที ดังตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของสี ของอมอร์ฟาร์ปูนฉาบธรรมดา และอมอร์ฟาร์ปูนขาวฉาบตกแต่งที่อายุบ่ม 7 วัน โดยอัตราส่วนผสมของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ร้อยละ 0, 2 และ 5 โดยน้ำหนัก โดยน้ำหนักซีเมนต์ปูนฉาบ และฉายแสงที่มีความเข้ม แสงขาวที่ความเข้มแสง 500 ลักซ์ ความเข้มแสงขาว 25,000 ลักซ์ และแสงยูวี ความเข้ม 10 วัตต์ต่อตารางเมตร

#### ตารางที่ 4.3 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของวัสดุอมอร์ฟาร์ปูนฉาบ (Color Variation) $\Delta E$ บ่ม 14 วัน

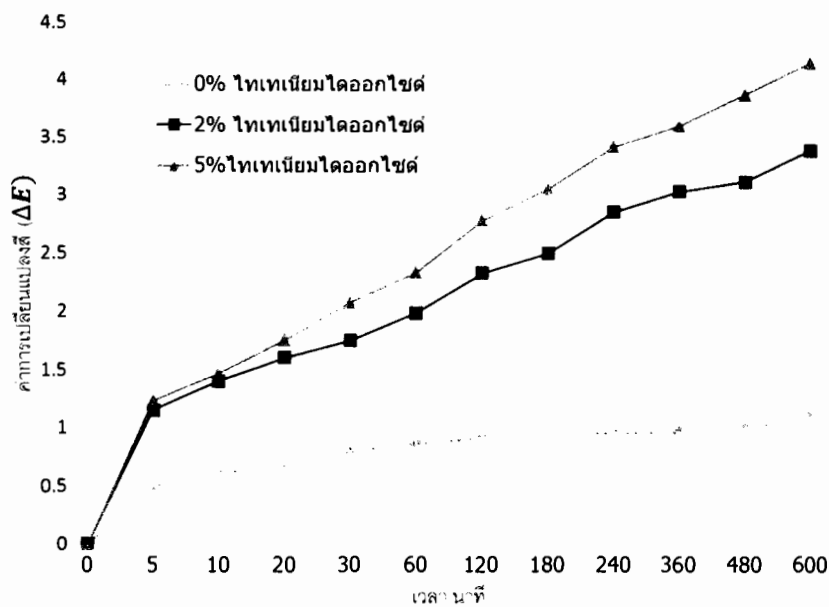
เวลา (นาที)	ค่าการเปลี่ยนแปลงของสี (Color variation) $\Delta E$								
	ความเข้มแสงขาว 500 ลักซ์ (ร้อยละ)			ความเข้มแสงขาว 25,000 ลักซ์ (ร้อยละ)			ความเข้มแสงยูวี 10 วัตต์ต่อตารางเมตร(ร้อยละ)		
	0	2	5	0	2	5	0	2	5
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0.5	1.15	1.23	0.70	1.36	1.41	0.81	1.31	3.46
10	0.6	1.40	1.46	1.56	2.31	2.50	1.67	3.33	5.08
20	0.7	1.60	1.75	1.91	3.99	4.67	2.03	5.35	8.62
30	0.8	1.75	2.07	2.28	5.16	5.46	2.39	6.36	9.58
60	0.86	1.98	2.33	2.63	5.82	6.63	2.44	7.98	10.69
120	0.91	2.32	2.77	2.96	6.88	7.17	2.56	8.88	11.08
180	0.94	2.49	3.04	3.00	7.68	8.11	2.68	10.02	11.54
240	0.95	2.85	3.41	2.99	8.15	8.66	2.73	10.26	12.15
360	0.96	3.02	3.59	2.95	8.64	9.27	2.75	10.67	12.57
480	0.99	3.10	3.86	3.05	8.88	9.95	2.76	10.95	13.05
600	1.1	3.37	4.14	3.45	9.41	10.63	2.77	10.96	13.36

ตารางที่ 4.4 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของวัสดุอมอร์ฟาร์ปูนขาว (Color Variation)  $\Delta E$  บ่ม 14 วัน

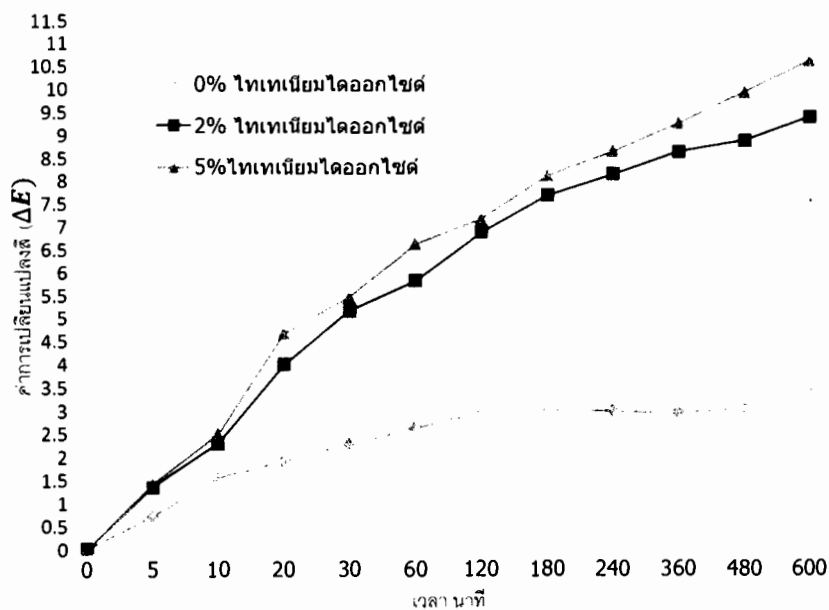
เวลา (นาทึ)	ค่าการเปลี่ยนแปลงของสี (Color variation) $\Delta E$								
	ความเข้มแสงขาว 500 ลักซ์ (ร้อยละ)			ความเข้มแสงขาว 25,000 ลักซ์ (ร้อยละ)			ความเข้มแสงยูวี 10 วัตต์ต่อตารางเมตร(ร้อยละ)		
	0	2	5	0	2	5	0	2	5
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0.71	0.71	0.75	0.83	2.50	2.68	0.81	1.74	4.05
10	0.87	0.82	0.94	1.69	4.20	4.77	1.67	4.48	5.48
20	0.93	1.20	1.20	2.05	6.06	6.93	2.03	5.74	8.39
30	0.99	1.26	1.51	2.43	7.05	7.72	2.40	7.11	9.61
60	1.07	1.48	1.74	2.81	8.04	8.91	2.65	7.92	10.92
120	1.11	1.81	2.18	3.20	9.04	9.51	2.67	9.12	11.42
180	1.15	1.97	2.44	3.30	10.03	10.50	2.70	10.44	12.01
240	1.18	2.23	2.80	3.35	10.53	11.10	2.76	10.62	12.53
360	1.18	2.40	2.97	3.43	11.03	11.83	2.79	11.08	12.72
480	1.19	2.57	3.24	3.50	11.52	12.62	2.81	11.48	13.43
600	1.22	2.83	3.61	3.58	12.02	13.42	2.83	11.87	14.06

## 4.2.2.1 ค่าความสว่างของแสงกับค่าการเปลี่ยนแปลงสี

เมื่อให้พลังงานในรูปแสงขาวที่มีความเข้มแสง 500 ลักซ์ (ความสว่างภายใน) ค่าการเปลี่ยนแปลงสีเมื่อเวลาผ่านไป 600 นาที มีค่าสูงสุดที่  $\Delta E = 4.14$  สำหรับแสงขาวที่ความเข้ม 25,000 ลักซ์ (ความสว่างภายนอก) เมื่อให้พลังงานแสงค่าเปลี่ยนแปลงสีเมื่อเวลาผ่านไป 600 นาที มีค่าสูงสุดที่  $\Delta E = 10.63$  และสำหรับพลังงานของแสงยูวี เมื่อเวลาผ่านไป 600 นาที มีค่าการดูดกลืนสูงสุดอยู่ที่  $\Delta E = 13.36$  เห็นได้ว่าในปัจจุบันเดียวกันค่าการเปลี่ยนแปลงสี ระหว่างแสงขาวที่ 25,000 ลักซ์ มีค่าใกล้เคียงกับ แสงยูวีที่ 10 วัตต์ต่อตารางเมตร และมีค่าแตกต่างกันกับแสงขาวที่ 500 ลักซ์ โดยคิดเป็นอัตราส่วนทั้งหมด แสงขาว 500 ลักซ์ : แสงขาว 25,000 ลักซ์ : แสงยูวี 10 วัตต์ต่อตารางเมตร คือ 0.1502 : 0.3650 : 0.4847

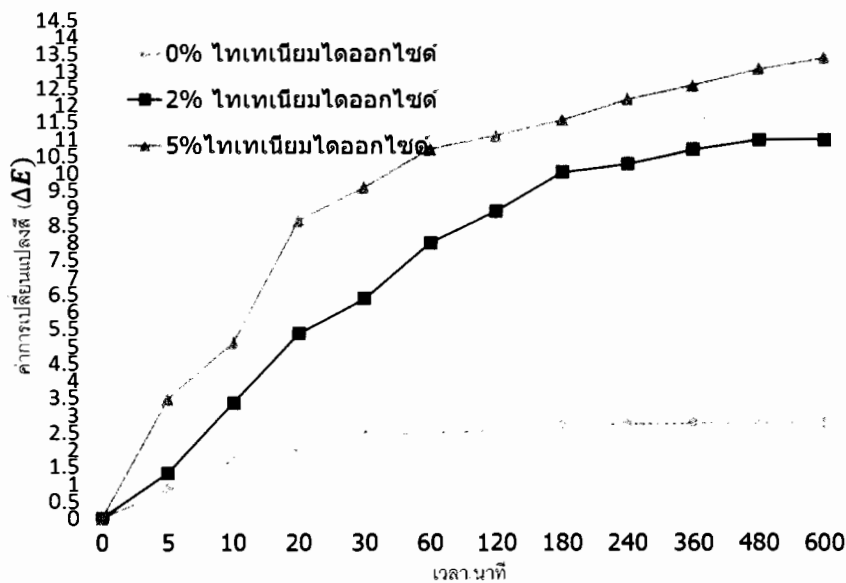


ภาพที่ 4.7 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของมอร์ตาร์ปูนฉาบที่อายุบ่ม 14 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำต่างๆ โดยใช้แสงขาวในการเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มแสง 500 ลักซ์



ภาพที่ 4.8 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของมอร์ตาร์ปูนฉาบที่อายุบ่ม 14 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำต่างๆ โดยใช้แสงขาวในการเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มแสง 25,000 ลักซ์





ภาพที่ 4.9 ค่าการเปลี่ยนแปลงสี ของมอร์ตารูปูนฉาบที่อายุป่ม 14 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำ โดยใช้แสงยูวีในการเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มแสง 10 วัตต์ต่อตารางเมตร

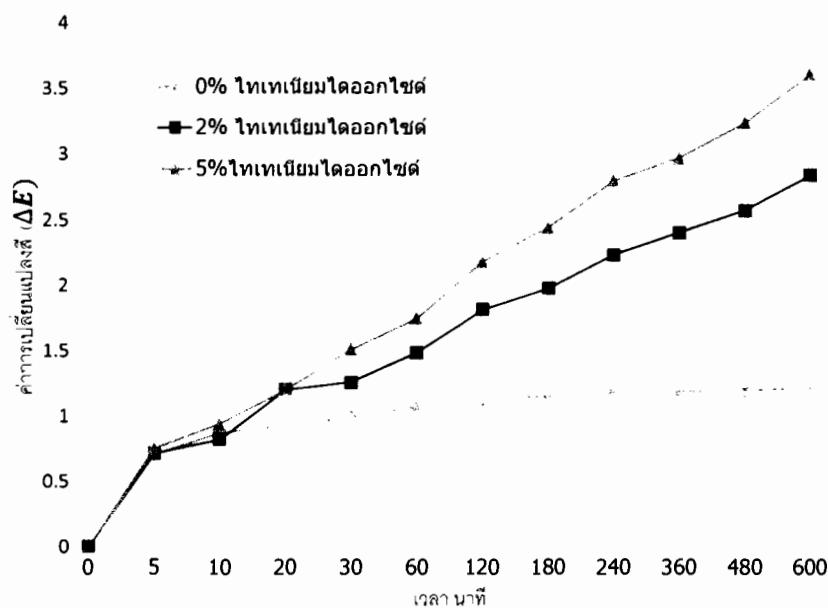
4.2.2.2 ผลของอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสี

จากภาพที่ 4.7 ภาพที่ 4.8 และภาพที่ 4.9 จะเห็นได้ชัดว่าค่าการเปลี่ยนแปลงสีเมื่อเวลาการให้แสงผ่านไป 600 นาที ของอัตราส่วนผสมที่ ร้อยละ 0 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่น้อย โดยมีค่าการเปลี่ยนแปลงสี  $\Delta E = 1.10$   $\Delta E = 3.45$   $\Delta E = 2.87$  จากค่าการให้พลังงานแสง แสงขาว 500 ลักซ์ แสงขาว 25,000 ลักซ์ และแสงยูวี 10 วัตต์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ เมื่อเทียบกับอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ร้อยละ 2 มีค่าการเปลี่ยนแปลงสี  $\Delta E = 3.37$   $\Delta E = 9.41$   $\Delta E = 10.96$  จากค่าการให้พลังงานแสง แสงขาว 500 ลักซ์ แสงขาว 25,000 ลักซ์ และแสงยูวี 10 วัตต์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ และอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ร้อยละ 5 มีค่าการเปลี่ยนแปลงสี  $\Delta E = 4.14$   $\Delta E = 10.63$   $\Delta E = 13.36$  สรุปผลได้ว่าการผสมสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 2 และ 5 จะมีผลทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสีเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารกึ่งตัวนำที่ร้อยละ 2 และ 5 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่ความเข้มแสง 25,000 ลักซ์ มีค่าใกล้เคียงกัน จะมีเพียงความเข้มแสงขาว 500 ลักซ์ และ แสงยูวีที่ 10 วัตต์ต่อตารางเมตร ที่ค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่ ร้อยละ 2 และ 5 มีค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่มีความแตกต่างกันมากกว่า สรุปได้ว่าอัตราส่วนผสมที่ร้อยละ 2 และ 5 ไม่ส่งผลทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสีแตกต่างกันมากที่ความเข้มแสง 25,000 ลักซ์ แต่สำหรับแสงยูวีค่า อัตราส่วนผสมมีผลกับค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดขึ้น

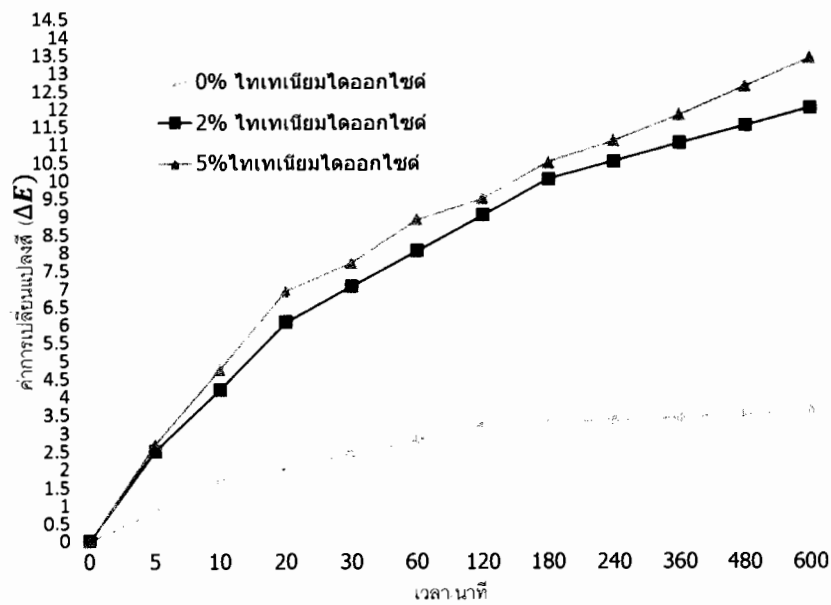
4.2.2.3 ผลของระยะเวลาของการให้พลังงานแสงมีผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสี

ในช่วงเวลาที่ให้พลังงานแสง 0 - 600 นาที ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของวัสดุ มอร์ตารูปูนฉาบที่ผสมสารกึ่งตัวนำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา เมื่อพิจารณาที่ค่า

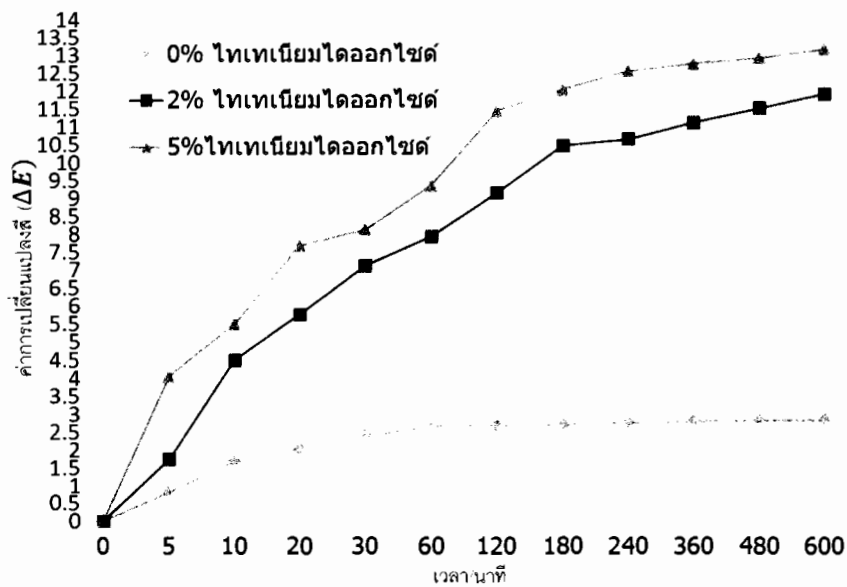
ความเข้มของแสงที่ให้ จะเห็นได้จากภาพที่ 4.8 การเพิ่มขึ้นของค่าการเปลี่ยนแปลงสีเป็นไปอย่างต่อเนื่องและเรื่อยๆ แตกต่างจากค่าความเข้มแสงยูวีจากภาพที่ 4.9 ที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงสีเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงเวลา 120 นาทีแรก หลังจากนั้นค่าเปลี่ยนแปลงสีเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่น้อยลง จึงสรุปได้ว่าค่าการเปลี่ยนแปลงสีของแสงขาวที่ความเข้ม 500 ลักซ์ และ 25,000 ลักซ์ มีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ที่ช่วงเวลา 600 นาที แต่แสงยูวีมีค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่เพิ่มขึ้นมากในช่วงเวลา 120 นาทีแรก หลังจากนั้นค่าการเปลี่ยนแปลงสีจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ลดลง



ภาพที่ 4.10 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของมอร์ตาร์ดาร์บุนขาวที่อายุบ่ม 14 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำ โดยใช้แสงขาวในการเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มแสง 500 ลักซ์



ภาพที่ 4.11 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของมอร์ตาร์ดาร์ปุนขาวที่อายุปม 14 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำ โดยใช้แสงขาวในการเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มแสง 25,000 ลักซ์



ภาพที่ 4.12 ค่าการเปลี่ยนแปลงสี ของมอร์ตาร์ดาร์ปุนขาวที่อายุปม 14 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำต่ำ โดยใช้แสงยูวีในการเร่งปฏิกิริยาความเข้มแสง 10 วัตต์ต่อตารางเมตร

#### 4.2.2.4 ชนิดของมอร์ตาร์ดาร์ปุนฉาบต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสี

จากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบปัจจัยที่มีผลทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสีเปลี่ยนแปลงจากวัสดุมอร์ตาร์ดาร์ปุนฉาบทั้ง 2 ชนิด แล้ว จากภาพที่ 4.7 และภาพที่ 4.10 แนวโน้มของค่าการเปลี่ยนแปลงสีเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ที่ความเข้มแสงขาว 500 ลักซ์ และความเข้มแสงขาว

25,000 ลักซ์ ดูจากภาพที่ 4.8 และภาพที่ 4.11 รวมไปถึงความเข้มของแสงยูวี จากภาพที่ 4.9 และภาพที่ 4.12

จากภาพที่ 4.7 และภาพที่ 4.10 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่อัตราร้อยละ 0, 2 และ 5 โดยน้ำหนัก ของวัสดุออร์ตาปุนฉาบมีความแตกต่างจากวัสดุออร์ตาปุนขาว ที่เวลา 600 นาที เป็น 0.12, 0.54, 0.53 ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.8 และภาพที่ 4.11 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่อัตราร้อยละ 0, 2 และ 5 โดยน้ำหนัก ของวัสดุออร์ตาปุนฉาบมีความแตกต่างจากวัสดุออร์ตาปุนขาว ที่เวลา 600 นาที เป็น 0.13, 2.61, 2.79 ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.9 และภาพที่ 4.12 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่อัตราร้อยละ 0, 2 และ 5 โดยน้ำหนัก ของวัสดุออร์ตาปุนฉาบมีความแตกต่างจากวัสดุออร์ตาปุนขาว ที่เวลา 600 นาที เป็น 0.06, 0.91, 0.70 ตามลำดับ

#### 4.2.3 ผลการทดลองค่าการเปลี่ยนแปลงสีของมอร์ตาร์ปูนฉาบที่อายุบ่ม 28 วัน

ผลการทดลองค่าการเปลี่ยนแปลงสีของมอร์ตาร์ปูนฉาบทำการวัดค่าโดยนำชิ้นตัวอย่างที่จะทำการทดลองมาอ่านค่าด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งค่าที่ได้จะออกมาเป็นค่าบ่งชี้ของสีคือค่า  $L^*$   $a^*$   $b^*$  แล้วหาค่า  $\Delta E = [(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 + (\Delta L^*)^2]^{1/2}$  ซึ่งค่า  $\Delta E$  คือค่าการเปลี่ยนแปลงของสีที่เปลี่ยนไป (Color variation) ณ เวลาที่ให้พลังงานแสงใดๆ เริ่มนาที่ที่ 0 – 600 นาที่ ดังตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของสี (Color variation) ของมอร์ตาร์ปูนฉาบธรรมดา และมอร์ตาร์ปูนขาวฉาบตกแต่งที่อายุบ่ม 28 วัน โดยอัตราส่วนผสมของสารไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ร้อยละ 0 2 และ 5 โดยน้ำหนักซีเมนต์ และฉายแสงที่มีความเข้ม ความเข้มแสงขาวที่ 500 ลักซ์ ความเข้มแสงขาว 25,000 ลักซ์ และแสงยูวี (Ultraviolet) ความเข้ม 10 วัตต์ต่อตารางเมตร

ตารางที่ 4.5 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีวัสดุมอร์ตาร์ปูนฉาบโดยแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงไปของสี (Color Variation)  $\Delta E$  ที่อายุบ่มปูนฉาบ 28 วัน

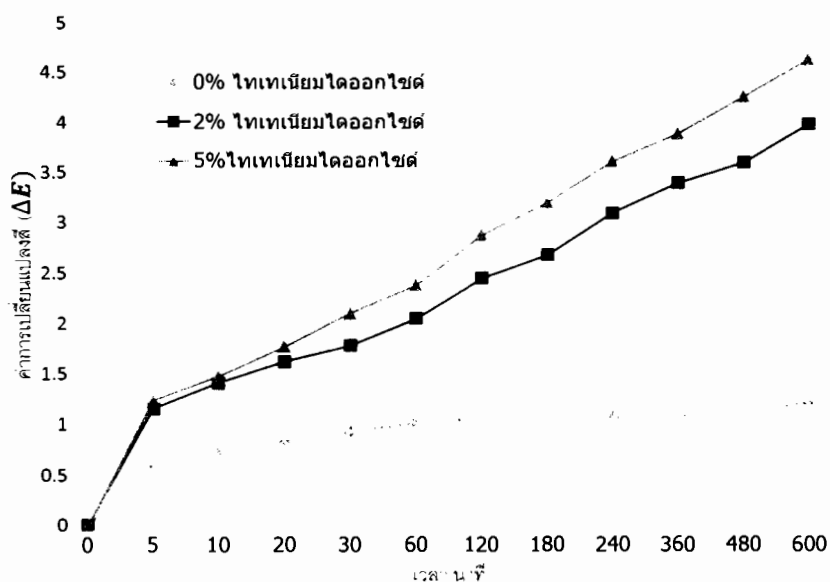
เวลา (นาที่)	ค่าการเปลี่ยนแปลงของสี (Color variation) $\Delta E$								
	ความเข้มแสงขาว 500 ลักซ์ (ร้อยละ)			ความเข้มแสงขาว 25,000 ลักซ์ (ร้อยละ)			ความเข้มแสงยูวี 10 วัตต์ต่อตารางเมตร (ร้อยละ)		
	0	2	5	0	2	5	0	2	5
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0.61	1.16	1.24	0.71	1.37	1.47	0.81	1.33	3.54
10	0.71	1.41	1.47	1.58	2.34	2.61	1.67	3.39	5.21
20	0.82	1.62	1.77	1.95	4.03	4.86	2.03	5.45	8.85
30	0.92	1.78	2.10	2.34	5.21	5.71	2.40	6.48	9.84
60	1.01	2.04	2.38	2.75	5.87	6.91	2.75	8.13	10.98
120	1.05	2.44	2.87	3.20	6.94	7.51	2.87	9.05	11.39
180	1.08	2.67	3.19	3.36	7.74	8.49	2.90	10.21	11.86
240	1.06	3.09	3.60	3.47	8.21	9.06	2.93	10.45	12.49
360	1.07	3.38	3.88	3.67	8.70	9.70	2.93	10.88	12.92
480	1.1	3.58	4.25	3.86	8.94	10.39	3.00	11.16	13.42
600	1.21	3.97	4.62	3.88	9.47	11.10	3.05	11.17	13.74

ตารางที่ 4.6 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีวัสดุอมอร์ฟาร์บูนขาวธรรมดาโดยแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสี (Color Variation)  $\Delta E$  ที่อายุบ่มปูนฉาบ 28 วัน

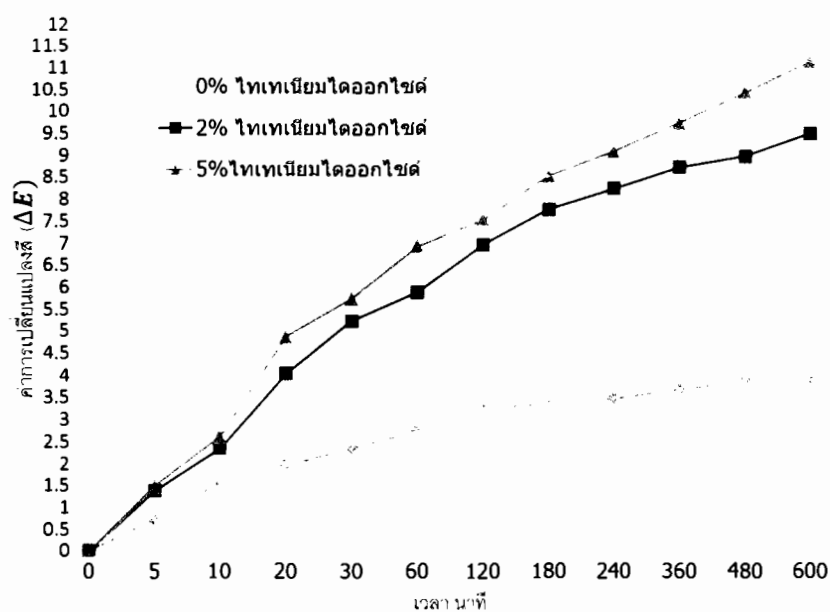
เวลา (นาทึ)	ค่าการเปลี่ยนแปลงของสี (Color variation) $\Delta E$								
	ความเข้มแสงขาว 500 ลักซ์ (ร้อยละ)			ความเข้มแสงขาว 500 ลักซ์ (ร้อยละ)			ความเข้มแสงขาว 500 ลักซ์ (ร้อยละ)		
	0	2	5	0	2	5	0	2	5
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0.71	0.71	0.71	0.83	2.51	2.69	1.69	2.74	4.75
10	0.88	0.87	0.93	1.70	4.21	4.78	2.55	5.48	6.18
20	0.96	1.07	1.23	2.07	6.08	6.95	2.91	6.74	9.09
30	1.01	1.57	1.57	2.46	7.08	7.75	3.28	8.11	10.31
60	1.10	1.66	1.94	2.87	8.10	8.97	3.63	8.92	11.62
120	1.17	1.94	2.22	3.32	9.16	9.63	3.75	10.12	12.12
180	1.24	2.31	2.70	3.48	10.21	10.68	3.78	11.44	12.71
240	1.30	2.50	2.99	3.59	10.77	11.34	3.81	11.62	13.23
360	1.36	2.79	3.38	3.79	11.39	12.19	3.81	12.08	13.42
480	1.43	2.99	3.58	3.98	12.00	13.10	3.88	12.48	14.13
600	1.52	3.18	3.87	4.18	12.62	14.02	3.93	12.87	14.76

#### 4.2.3.1 ค่าความสว่างของแสงกับค่าการเปลี่ยนแปลงสี

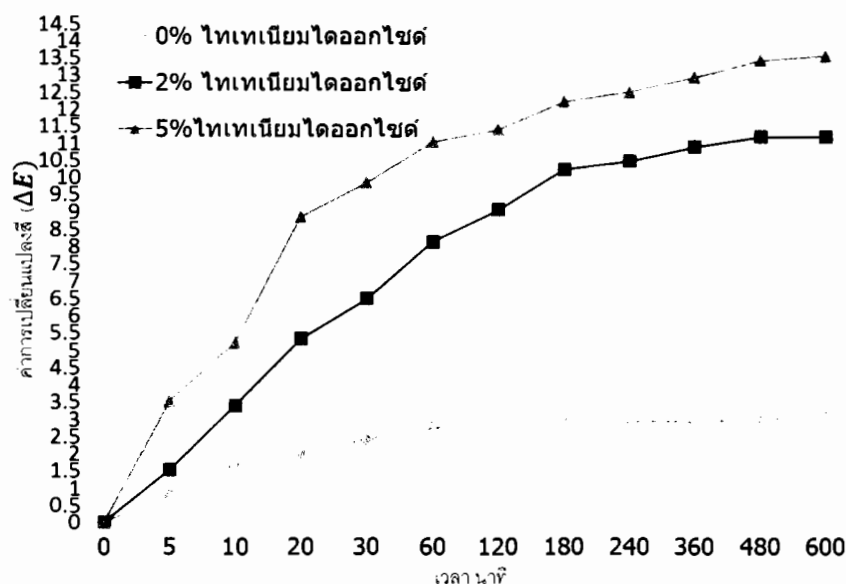
เมื่อให้พลังงานในรูปแสงขาวที่มีความเข้มแสง 500 ลักซ์ (ความสว่างภายใน) ค่าการเปลี่ยนแปลงสีเมื่อเวลาผ่านไป 600 นาที มีค่าสูงสุดที่  $\Delta E = 4.62$  สำหรับแสงขาวที่ความเข้ม 25,000 ลักซ์ (ความสว่างภายนอก) เมื่อให้พลังงานแสงค่าเปลี่ยนแปลงสีเมื่อเวลาผ่านไป 600 นาที มีค่าสูงสุดที่  $\Delta E = 11.10$  และสำหรับพลังงานของแสงยูวี เมื่อเวลาผ่านไป 600 นาที มีค่าการเปลี่ยนแปลงสีสูงสุดอยู่ที่  $\Delta E = 13.74$  เห็นได้ว่าในปัจจุบันเดียวกันค่าการเปลี่ยนแปลงสี ระหว่างแสงขาวที่ 25,000 ลักซ์ มีค่าใกล้เคียงกับ แสงยูวีที่ 10 วัตต์ต่อตารางเมตร และมีค่าแตกต่างกันกับแสงขาวที่ 500 ลักซ์ โดยคิดเป็นอัตราส่วนทั้งหมด แสงขาว 500 ลักซ์ : แสงขาว 25,000 ลักซ์ : แสงยูวี 10 วัตต์ต่อตารางเมตร คือ 0.1568 : 0.3767 : 0.4663



ภาพที่ 4.13 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของมอร์ตาร์ดาร์ปุนฉาบที่อายุบ่ม 28 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำต่างๆ โดยใช้แสงขาวในการเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มแสง 500 ลักซ์



ภาพที่ 4.14 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของมอร์ตาร์ดาร์ปุนฉาบที่อายุบ่ม 28 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำต่างๆ โดยใช้แสงขาวในการเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มแสง 25,000 ลักซ์



ภาพที่ 4.15 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของมอร์ดาร์ปุนฉาบที่อายุบ่ม 28 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัว ใช้แสงยูวีในการเร่งปฏิกิริยาความเข้มแสง 10 วัตต์ต่อตารางเมตร

#### 4.2.3.2 ผลของอัตราส่วนผสมสารโทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสี

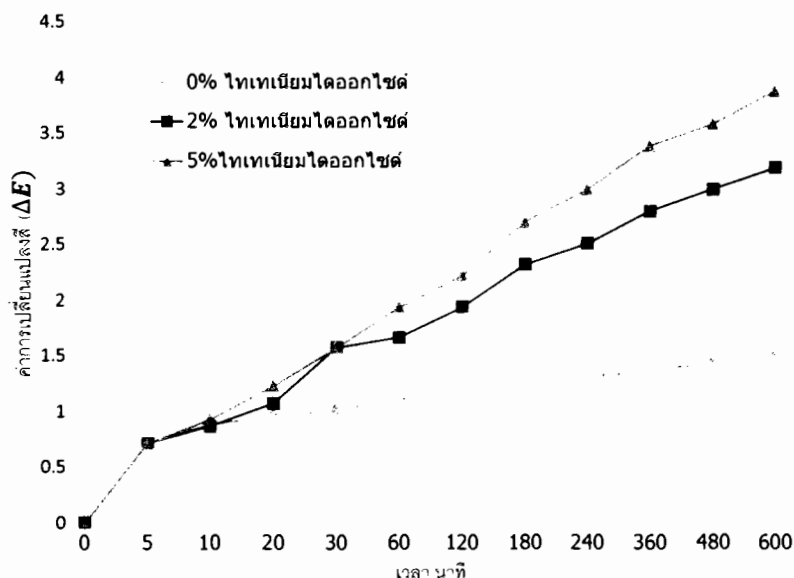
จากภาพที่ 4.13 ภาพที่ 4.14 และภาพที่ 4.15 จะแสดงให้เห็นได้ชัดว่า ค่าการเปลี่ยนแปลงสีเมื่อเวลาการให้แสงผ่านไป 600 นาที ของอัตราส่วนผสมที่โทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก มีค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่น้อย โดยมีค่าการเปลี่ยนแปลงสี  $\Delta E = 1.21$   $\Delta E = 3.88$   $\Delta E = 3.05$  จากค่าการให้พลังงานแสง แสงขาว 500 ลักซ์ แสงขาว 25,000 ลักซ์ และแสงยูวี 10 วัตต์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ เมื่อเทียบกับอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำโทเทเนียม 2 % มีค่าการเปลี่ยนแปลงสี  $\Delta E = 3.97$   $\Delta E = 9.47$   $\Delta E = 11.17$  จากค่าการให้พลังงานแสง แสงขาว 500 ลักซ์ แสงขาว 25,000 ลักซ์ และแสงยูวี 10 วัตต์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ และอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำโทเทเนียมร้อยละ 5 มีค่าการเปลี่ยนแปลงสี  $\Delta E = 4.62$   $\Delta E = 11.10$   $\Delta E = 13.74$  จึงสรุปผลได้ว่า เมื่อมีการผสมสารโทเทเนียมไดออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 2 และ 5 จะมีผลทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสีเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารกึ่งตัวนำที่ร้อยละ 2 และ 5 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่ความเข้มแสง 25,000 ลักซ์ มีค่าใกล้เคียงกัน จะมีเพียงความเข้มแสงขาว 500 ลักซ์ และ แสงยูวีที่ 10 วัตต์ต่อตารางเมตร ที่ค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่มีความแตกต่างกันมากกว่า สรุปได้ว่าอัตราส่วนผสมที่ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนัก ไม่ส่งผลทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสีแตกต่างกันมากที่ความเข้มแสง 25,000 ลักซ์ แต่สำหรับแสงยูวีอัตราส่วนผสมมีผลกับค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดขึ้น

#### 4.2.3.3 ผลของระยะเวลาของการให้พลังงานแสงต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสี

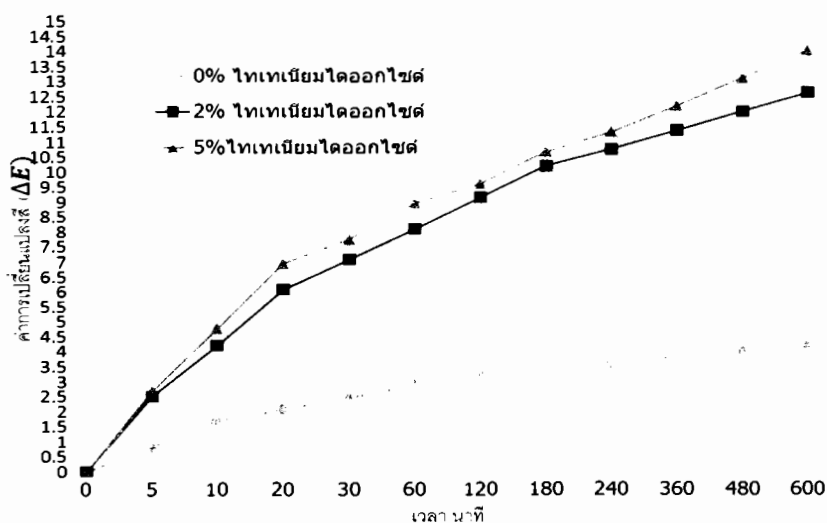
ในช่วงเวลาที่ให้พลังงานแสง 0 – 600 นาที ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของมอร์ดาร์ปุนฉาบที่ผสมสารกึ่งตัวนำโทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา เมื่อพิจารณาที่ค่าความเข้มของแสงที่ให้ จะเห็นได้จากภาพที่ 4.14 การเพิ่มขึ้นของค่าการเปลี่ยนแปลงสีเป็นไปอย่างต่อเนื่องและ



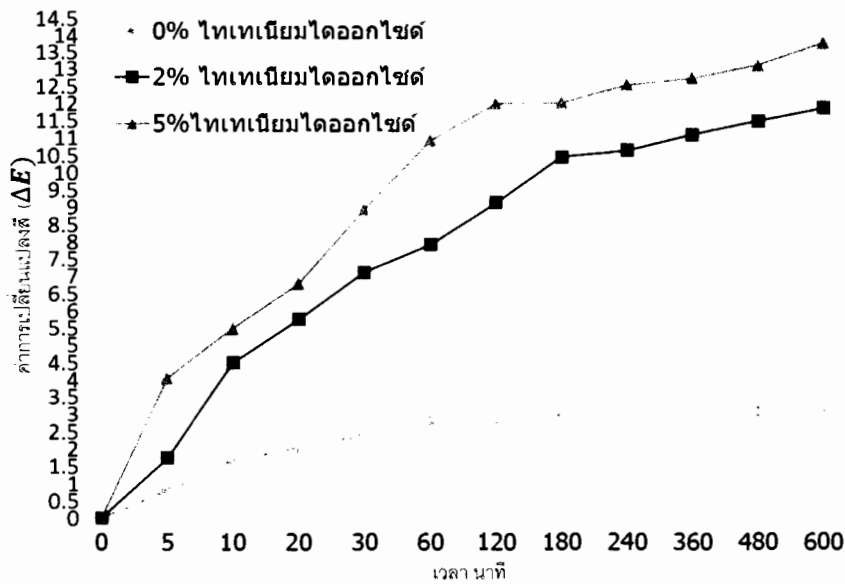
เรื่อยๆ แตกต่างจากค่าความเข้มแสงยูวีจากภาพที่ 4.15 ที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงสีเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงเวลา 120 นาทีแรก หลังจากนั้นค่าเปลี่ยนแปลงสีเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่น้อยลง จึงสรุปได้ว่าค่าการเปลี่ยนแปลงสีของแสงขาวที่ความเข้ม 500 ลักซ์ และ 25,000 ลักซ์ มีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ที่ช่วงเวลา 600 นาที แต่แสงยูวีมีค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่เพิ่มขึ้นมากในช่วงเวลา 120 นาทีแรก หลังจากนั้นค่าการเปลี่ยนแปลงสีจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ลดลง



ภาพที่ 4.16 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของมอร์ตาร์ปูนขาวที่อายุป่ม 28 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำต่างๆ โดยใช้แสงขาวในการเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มแสง 500 ลักซ์



ภาพที่ 4.17 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของมอร์ตาร์ปูนขาวที่อายุป่ม 28 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำต่างๆ โดยใช้แสงขาวในการเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มแสง 25,000 ลักซ์



ภาพที่ 4.18 ค่าการเปลี่ยนแปลงสี ของมอร์ตาร์ดาร์ปุนขาวที่อายุปม 28 วัน ที่มีอัตราส่วนผสมสารกึ่งตัวนำต่างๆ ใช้แสงยูวีในการเร่งปฏิกิริยาความเข้มแสง 10 วัตต์ต่อตารางเมตร

#### 4.2.3.4 ชนิดของมอร์ตาร์ดาร์ปุนฉาบต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสี

จากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบปัจจัยที่มีผลทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสีเปลี่ยนแปลงจากวัสดุมอร์ตาร์ดาร์ปุนฉาบทั้ง 2 ชนิด แล้ว จากภาพที่ 13 และภาพที่ 16 แนวโน้มของค่าการเปลี่ยนแปลงสีเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ที่ความเข้มแสงขาว 500 ลักซ์ และความเข้มแสงขาว 25,000 ลักซ์ ดูจากภาพที่ 4.14 และภาพที่ 4.17 รวมไปถึงความเข้มของแสงยูวี จากภาพที่ 4.15 และภาพที่ 4.18

จากภาพที่ 4.13 และภาพที่ 4.16 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่อัตราร้อยละ 0, 2 และ 5 โดยน้ำหนักของวัสดุมอร์ตาร์ดาร์ปุนฉาบมีความแตกต่างจากวัสดุมอร์ตาร์ดาร์ปุนขาว ที่เวลา 600 นาที เป็น 0.31, 0.79, 0.75 ตามลำดับ

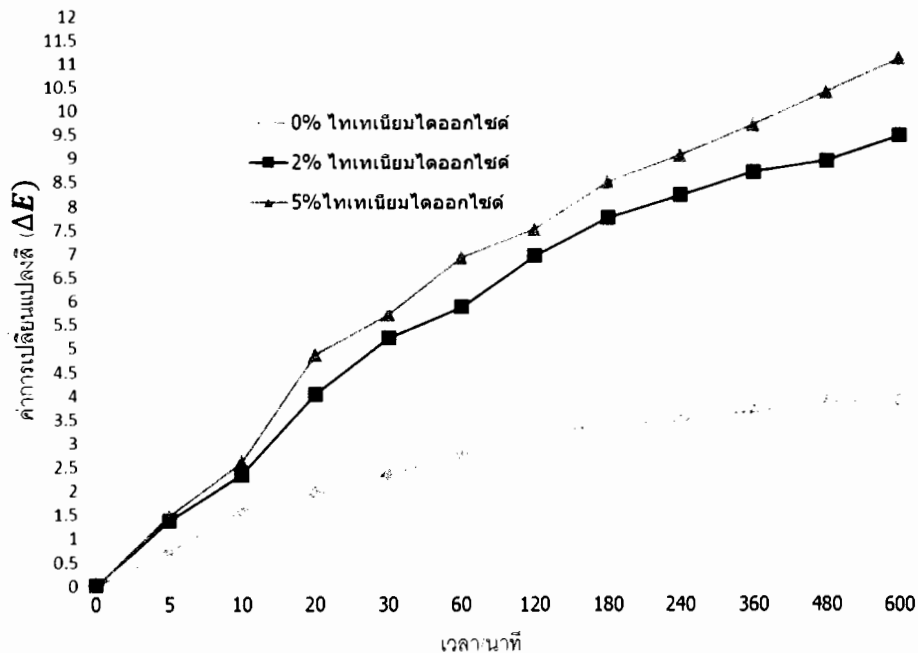
จากภาพที่ 4.14 และภาพที่ 4.17 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่อัตราร้อยละ 0, 2 และ 5 โดยน้ำหนักของวัสดุมอร์ตาร์ดาร์ปุนฉาบมีความแตกต่างจากวัสดุมอร์ตาร์ดาร์ปุนขาว ที่เวลา 600 นาที เป็น 0.30, 3.15, 2.90 ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.15 และภาพที่ 4.18 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่อัตราร้อยละ 0, 2 และ 5 โดยน้ำหนักของวัสดุมอร์ตาร์ดาร์ปุนฉาบมีความแตกต่างจากวัสดุมอร์ตาร์ดาร์ปุนขาว ที่เวลา 600 นาที เป็น 0.00, 0.70, 0.32 ตามลำดับ

### 4.3 วิเคราะห์ผลการทดลองการทำความสะอาดตัวเองของมอร์ตาร์ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม

จากการทดลองปัจจัยที่มีผลต่อการทำความสะอาดตัวเองของวัสดุมอร์ตาร์สามารถวิเคราะห์ถึงปัจจัยที่ทำการศึกษาโดยแบ่งตามปัจจัยการศึกษาดังต่อไปนี้

#### 4.3.1 อัตราส่วนผสมของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์



ภาพที่ 4.19 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีเมื่อเติมสารกึ่งตัวนำลงในมอร์ตาร์ (แสงขาว 25,000 ลักซ์) อายุมอร์ตาร์ 28 วัน

จากภาพที่ 4.19 วัสดุมอร์ตาร์ที่ไม่ได้ผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมลงไปค่าการเปลี่ยนแปลงสีของวัสดุจะคงที่ไม่มีเปลี่ยนแปลง แต่สำหรับวัสดุมอร์ตาร์ที่ผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ลงไปค่าการเปลี่ยนแปลงสีของวัสดุมอร์ตาร์จะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และเนื่องจากการฉายแสงที่ให้พลังงานมากพอที่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของวัสดุมอร์ตาร์คือ แสงขาวที่ 25,000 ลักซ์ และ แสงยูวีความเข้ม 10 วัตต์ต่อตารางเมตร ทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสีเพิ่มขึ้น สำหรับแสงขาว 25,000 ลักซ์ ค่าการเปลี่ยนแปลงสีจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่นาที 5 - 600 แต่สำหรับแสงยูวี (10 วัตต์ต่อตารางเมตร) ค่าการเปลี่ยนแปลงสีจะเพิ่มขึ้นมากในช่วง 120 นาทีแรก และเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่น้อยลงหลังจากนาทที่ 120 นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณสารไทเทเนียมไดออกไซด์จากร้อยละ 2 เพิ่มเป็น ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ยังมีผลไม่มากนักในการเพิ่มค่าการเปลี่ยนแปลงสี แต่ถึงอย่างไรยังมีความชัดเจนว่าเมื่อทำการเติมสารไทเทเนียมไดออกไซด์ลงไปทำให้วัสดุมอร์ตาร์มีค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่เพิ่มขึ้น นั่นคือวัสดุมีการทำความสะอาดตัวเองได้อย่างเนื่องหากมีพลังงานแสงที่มีเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสนั่นเอง

### 4.3.2 ชนิดของมอร์ตาร์ปูนฉาบ

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงสี ณ เวลาการฉายแสง 600 นาที

ชนิดแสง/ ความเข้มแสง	อายุบ่ม มอร์ตาร์	มอร์ตาร์ปูนฉาบ			มอร์ตาร์ปูนขาว		
		ร้อยละ 0	ร้อยละ 2	ร้อยละ 5	ร้อยละ 0	ร้อยละ 2	ร้อยละ 5
แสงขาว 500 ลักซ์	7 วัน	1.10	3.48	4.24	1.22	3.4	4.17
แสงขาว 25,000ลักซ์	7 วัน	2.86	9.29	10.42	3.46	11.89	13.02
แสงยูวี 10 วัตต์/ตรม.	7 วัน	2.62	10.49	12.44	2.67	11.5	13.48
แสงขาว 500 ลักซ์	14 วัน	1.10	3.37	4.14	1.22	2.83	3.61
แสงขาว 25,000ลักซ์	14 วัน	3.45	9.41	10.63	3.88	12.02	13.42
แสงยูวี 10 วัตต์/ตรม.	14 วัน	2.77	10.96	13.36	2.83	11.87	14.06
แสงขาว 500 ลักซ์	28 วัน	1.21	3.97	4.62	1.52	3.18	3.87
แสงขาว 25,000ลักซ์	28 วัน	3.88	9.47	11.1	4.18	12.62	14.02
แสงยูวี 10 วัตต์/ตรม.	28 วัน	3.08	11.17	13.74	3.93	12.87	14.76

จากตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงสีเมื่อดูจากชนิดของวัสดุมอร์ตาร์หากต้องการพิจารณาต้องดูจากค่าการเปลี่ยนแปลงสีในช่วงค่าพลังงานแสงที่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา คือ แสงขาว 25,000 ลักซ์ และแสงยูวี 10 วัตต์/ตารางเมตร พบว่าค่าเปลี่ยนแปลงสีของมอร์ตาร์ปูนขาวมีค่าใกล้เคียงและมากกว่ามอร์ตาร์ปูนฉาบเพียงเล็กน้อย ดังตัวอย่าง  $\Delta E = 13.48$   $\Delta E = 12.44$  สำหรับแสงยูวี อายุบ่มมอร์ตาร์ 7 วัน อัตราส่วนผสมร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ของวัสดุมอร์ตาร์ปูนขาว และวัสดุมอร์ตาร์ปูนฉาบ ตามลำดับ สามารถวิเคราะห์ได้ว่าค่าการเปลี่ยนแปลงสีของวัสดุมอร์ตาร์ปูนขาวมีค่ามากกว่าวัสดุมอร์ตาร์ปูนฉาบเล็กน้อยนั้นเกิดจากซีเมนต์ปูนขาวที่นำมาผสมมอร์ตาร์นั้นมีส่วนผสมของเมตะคาโอลิน [17] ซึ่งในโครงสร้างพื้นฐานของเมตะคาโอลินมีส่วนผสมของ ไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่ จึงเป็นผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของวัสดุปูนขาวมากกว่าปูนฉาบธรรมดา

### 4.3.3 ความเข้มแสงกับค่าการเปลี่ยนแปลงสี

ความเข้มของแสงขาว 500 ลักซ์ (ความสว่างภายในอาคาร) ที่ฉายลงวัสดุมอร์ตาร์ที่ผสมสารกึ่งตัวนำ มีค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยมีสัดส่วน จากตาราง 4.8 จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์ค่าการเปลี่ยนแปลงสีความเข้มแสงขาวที่ให้พลังงานในเวลา 600 นาที อยู่ในช่วงร้อยละ 11.16 - 15.68

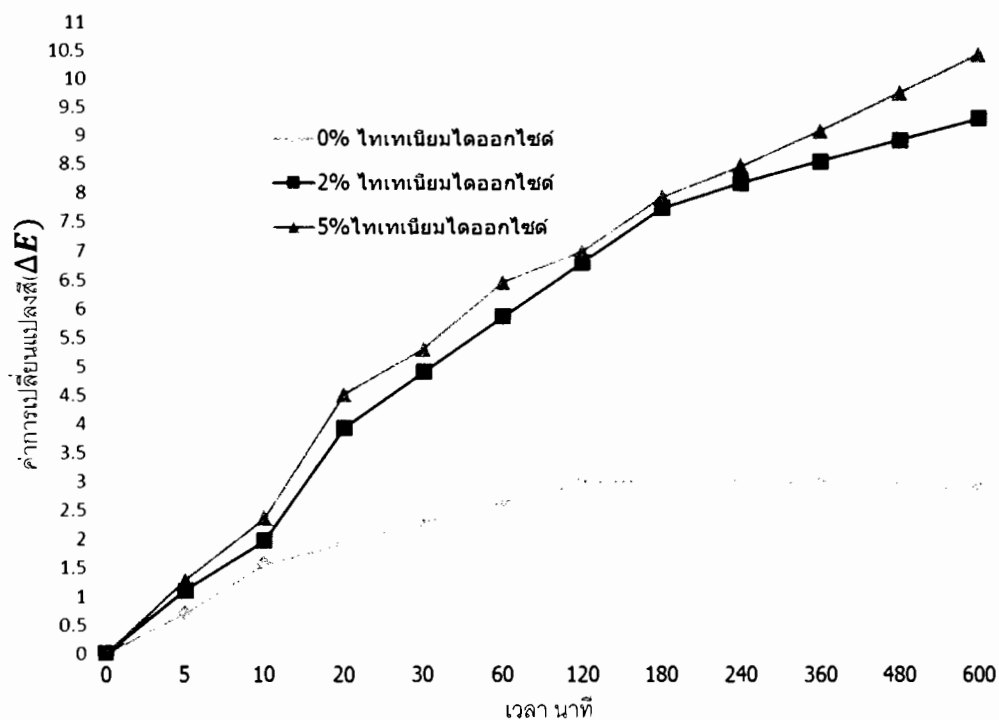
ความเข้มของแสงขาว 25,000 ลักซ์ (ความสว่างภายนอกอาคาร) ที่ฉายลงวัสดุมอร์ตาร์ที่ผสมสารกึ่งตัวนำ มีค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยมีสัดส่วน จากตาราง 4.8 จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์ค่าการเปลี่ยนแปลงสีความเข้มแสงขาวที่ให้พลังงานในเวลา 600 นาที อยู่ในช่วงร้อยละ 37.68 - 43.17

ความเข้มของแสงยูวีที่ความเข้ม 10 วัตต์ต่อตารางเมตร (ความสว่างภายนอกอาคาร) ที่ฉายลงวัสดุอมอร์ทัลาร์ที่ผสมสารกึ่งตัวนำ มีค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยมีสัดส่วน จากตาราง 4.8 จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของ ความเข้มแสงยูวีที่ให้พลังงานในเวลา 600 นาที อยู่ในช่วงร้อยละ 43.9 - 47.49

ตารางที่ 4.8 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่เวลา 600 นาที ระยะเวลาการให้พลังงานแสง (ร้อยละ)

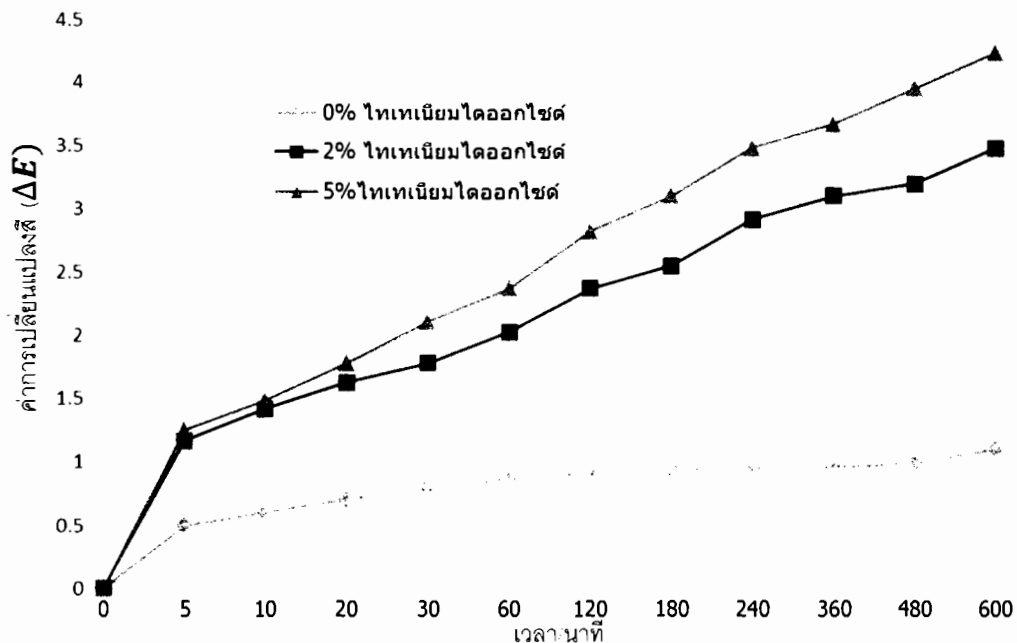
ค่าการเปลี่ยนแปลงสี 600 นาที	$\Delta E$ 500 ลักซ์	$\Delta E$ 25,000 ลักซ์	$\Delta E$ UV 10 วัตต์ต่อตารางเมตร	$\Delta E$ 500ลักซ์ (ร้อยละ)	$\Delta E$ 25,000 ลักซ์ (ร้อยละ)	$\Delta E$ UV 10วัตต์/ตารางเมตร (ร้อยละ)
ปูนฉาบ/ 7 วัน	4.24	10.42	12.44	15.65	38.45	45.90
ปูนฉาบ/ 14 วัน	4.17	13.02	13.48	13.60	42.45	43.95
ปูนฉาบ/28 วัน	4.14	10.63	13.36	14.72	37.79	47.49
ปูนขาว/ 7 วัน	3.61	13.42	14.06	11.61	43.17	45.22
ปูนขาว/ 14 วัน	4.62	11.10	13.74	15.68	37.68	46.64
ปูนขาว/ 28 วัน	3.87	14.10	14.06	12.08	44.02	43.90

จากภาพที่ 4.20 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีเห็นได้ชัดที่ความเข้มแสงขาว 25,000 ลักซ์ ค่าการเปลี่ยนแปลงสีจากนาที่ที่ 0-600 เป็นไปแบบต่อเนื่องเป็นเพราะการให้พลังงานแสงที่ทำให้ปฏิกิริยากับวัสดุเป็นการถ่ายทอดพลังงานแบบดูดซับพลังงานจนถึงขีดจำกัดที่เกิดปฏิกิริยา ทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสีเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ต่างจากแสงยูวีที่เมื่อดูจากค่าการเปลี่ยนแปลงสีจะเกิดขึ้นมากในช่วงเวลา 0 – 120 นาทีแรก เกิดจากพลังงานของแสงกระทบวัสดุกึ่งตัวนำแล้วเกิดปฏิกิริยาขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และหลังจากนั้นค่าการเปลี่ยนแปลงสีจะลดลงมากกว่าในช่วงแรก และสำหรับความเข้มแสงขาว 500 ลักซ์ การเปลี่ยนแปลงสียังน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี แสงขาว 25,000 ลักซ์ และแสงยูวี ค่าการเปลี่ยนแปลงสียังน้อยมาก มีเพียงแค่อ้อยละของการดูดกลืนที่สามารถศึกษาต่อไป แสดงให้เห็นว่าแสงยูวีที่มีมากในแสงอาทิตย์สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ดีกับสารไทเทเนียมไดออกไซด์จึงมีประโยชน์กับอุตสาหกรรมที่ใช้ประโยชน์จากกระบวนการนี้ รวมถึงหากใช้แสงขาวที่มีความเข้ม 25,000 ลักซ์ เช่นกัน แต่สำหรับความเข้มแสงขาวที่ 500 ลักซ์ ยังไม่มีผลมากนักกับการเร่งปฏิกิริยาของสารกึ่งตัวนำหากจะเป็นแนวทางในการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป



ภาพที่ 4.20 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีเมื่อเติมสารกึ่งตัวนำลงในมอร์ตาร์ ฉายแสงขาว 25,000 ลักซ์ อายุมอร์ตาร์ 7 วัน

การที่จะเกิดปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดค่าการเปลี่ยนแปลงสีได้นั้นวัสดุมอร์ตาร์ที่ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อัตราส่วนผสมต่างๆต้องได้รับค่าพลังงานแสงที่เพียงพอให้เกิดปฏิกิริยา จากภาพที่ 4.21 แสดงให้เห็นว่าแม้จะเติมสารไทเทเนียมไดออกไซด์ลงไปวัสดุมอร์ตาร์มีค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่น้อยมากสำหรับการฉายแสงขาว 500 ลักซ์ เมื่อนำมาเทียบกับการฉายแสงขาว 25,000 ลักซ์ และแสงยูวี ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีโฟโตคะตะไลซิส [20] ที่ว่าแสงที่มีพลังงานมากพอจึงจะทำให้สารกึ่งตัวนำเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสได้



ภาพที่ 4.21 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีเมื่อเติมสารกึ่งตัวนำลงในมอร์ตาร์ ฉายแสงขาว 500 ลักซ์ อายุมอร์ตาร์ 7 วัน

#### 4.3.4 อายุบ่ม

จากตารางที่ 4.8 เมื่อเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่อายุบ่มปูนฉาบ 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน ยังไม่มีความชัดเจนในทางความเป็นไปได้ของอิทธิพลของปัจจัยอายุของมอร์ตาร์ปูนฉาบ เนื่องจากผิววัสดุมอร์ตาร์รวมถึงชั้นการทดลองมีปฏิกิริยาของการเกิดมอร์ตาร์ที่ซับซ้อนจึงไม่สามารถสรุปได้ถึงปัจจัยของอายุบ่มที่มีผลต่อการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสีของวัสดุมอร์ตาร์ปูนฉาบ จึงวิเคราะห์ได้ว่าที่อายุบ่มตั้งแต่ 7 วันที่ทำการทดลองกระบวนการเปลี่ยนแปลงสีของวัสดุปูนฉาบเริ่มทำงานและทำงานอย่างต่อเนื่องโดยไม่ขึ้นกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของวัสดุมอร์ตาร์ ซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงสีของแต่ละอายุบ่มนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

#### 4.3.5 ระยะเวลาการฉายแสงเร่งปฏิกิริยา

ในช่วงเวลาที่ฉายแสง 0 - 600 นาที ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของวัสดุมอร์ตาร์ปูนฉาบที่ผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา เมื่อพิจารณาที่ค่าความเข้มของแสงที่ให้ มีการเพิ่มขึ้นของค่าการเปลี่ยนแปลงสีเป็นไปอย่างต่อเนื่องและเรื่อยๆ แตกต่างจากค่าความเข้มแสงยูวี ที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงสีเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงเวลา 120 นาทีแรก หลังจากนั้นค่าเปลี่ยนแปลงสีเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่น้อยลง ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของแสงขาวที่ความเข้ม 500 ลักซ์ และ 25,000 ลักซ์ มีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ที่ช่วงเวลา 600 นาที แต่แสงยูวีมีค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่เพิ่มขึ้นมากในช่วงเวลา 120 นาทีแรก หลังจากนั้นค่าการเปลี่ยนแปลงสีจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ลดลง จึงสรุปได้ว่าค่าการเปลี่ยนแปลงสีของแสงขาวที่ความเข้ม 500 ลักซ์ และ 25,000 ลักซ์ มีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ที่ช่วงเวลา 600 นาที แต่แสงยูวีมีค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่เพิ่มขึ้นมากในช่วงเวลา 120 นาทีแรก หลังจากนั้นค่าการเปลี่ยนแปลงสีจะเพิ่มขึ้นแต่

ยังน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเวลาในช่วง 120 นาทีแรก และอย่างไรก็ตามการให้แสงเพื่อเร่งปฏิกิริยานั้นจะทำให้วัสดุทำความสะอาดตัวเองอยู่ตลอดเวลาในช่วงเวลา 600 นาที และจะยังทำความสะอาดตัวเองไปเรื่อยๆจนกว่าส่วนผสมของสารไทเทเนียมไดออกไซด์ในปูนฉาบเริ่มน้อยลงซึ่งระยะเวลาที่แน่นอนนั้นยังจะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมในเชิงลึกซึ่งยังไม่มีในจุดประสงค์ในงานวิจัยนี้

#### 4.4 ผลของการผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์

วัสดุมอร์ตาร์ปูนฉาบทำความสะอาดตัวเองได้นั้นเกิดจากการผสมระหว่างวัสดุซีเมนต์ปูนฉาบและมวลรวมละเอียดและนำวัสดุสารกึ่งตัวนำมาผสมเพื่อเพิ่มคุณสมบัติการทำความสะอาดของตัวมอร์ตาร์ปูนฉาบนั้น นอกจากการคำนึงถึงคุณสมบัติการทำความสะอาดตัวเองของวัสดุปูนฉาบแล้ว คุณสมบัติที่สำคัญในการนำมาประยุกต์ใช้ที่สำคัญที่ควรคำนึงถึงคือ ค่ากำลังรับแรงอัดเพื่อให้ได้ตามมาตรฐานทางวิศวกรรมหรือว่ามีค่ากำลังที่เปลี่ยนแปลงไปหรือไม่

การผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์เข้ามาในส่วนผสมของวัสดุปูนฉาบ ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันมีสารตั้งต้นเพิ่มขึ้น ตัวละลายที่เป็นน้ำจึงถูกดึงไปใช้ในปฏิกิริยา ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันมีน้ำในการทำปฏิกิริยาที่เปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของวัสดุปูนฉาบลดลงเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดไม่สมบูรณ์ การขาดช่วงของปฏิกิริยา หรือ  $\text{TiO}_2$  อาจจะมีพันธะโครงสร้างแปลกๆ เข้าไปจับคู่กับโครงสร้างของปูนฉาบ โครงสร้างของปูนฉาบจึงผิดแปลกไปจากปกติ รูปร่างโครงสร้างจับเป็นผลึกชนิดใหม่ อาจทำให้กำลังอัดของปูนฉาบลดลง ซึ่งเราไม่ได้ศึกษาโครงสร้างของปูนฉาบจึงไม่ทราบที่ชัดเจน

ตารางที่ 4.9 ผลของการทดลองกำลังของปูนซีเมนต์ฉาบที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน อัตราส่วนผสมของสารไทเทเนียมไดออกไซด์ ร้อยละ 0, 2 และ 5 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ฉาบ ในหน่วยกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc)

อายุมอร์ตาร์	ไทเทเนียม ร้อยละ 0	ไทเทเนียม ร้อยละ 2	ไทเทเนียม ร้อยละ 5
7 วัน	100.0	78.7	74.0
14 วัน	103.3	59.3	58.3
28 วัน	114.7	94.0	91.3

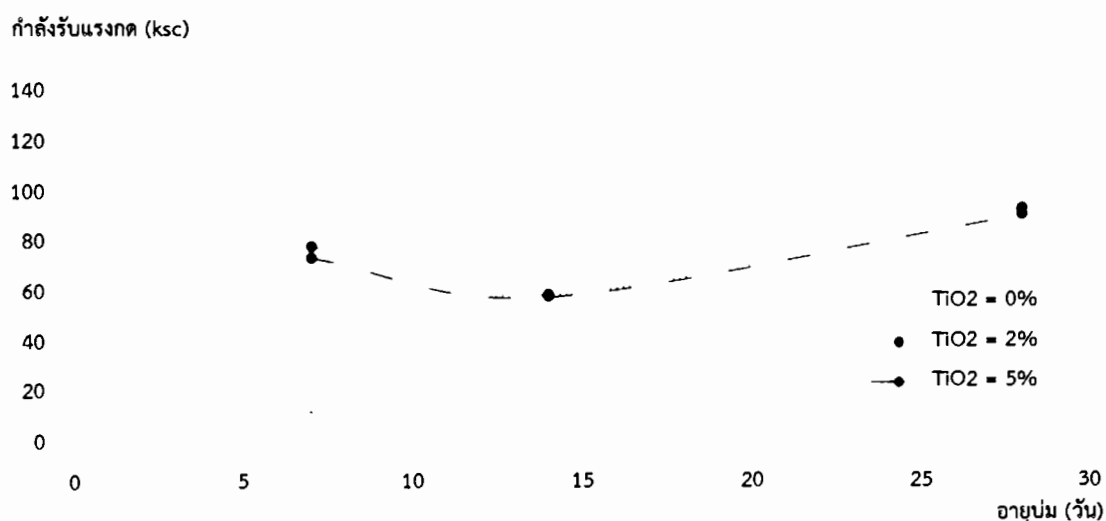


ตารางที่ 4.10 ผลของการทดลองกำลังของปูนซีเมนต์ขาวที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน อัตราส่วนผสมของสารไทเทเนียมไดออกไซด์ ร้อยละ 0, 2 และ 5 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ขาว ในหน่วยกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc)

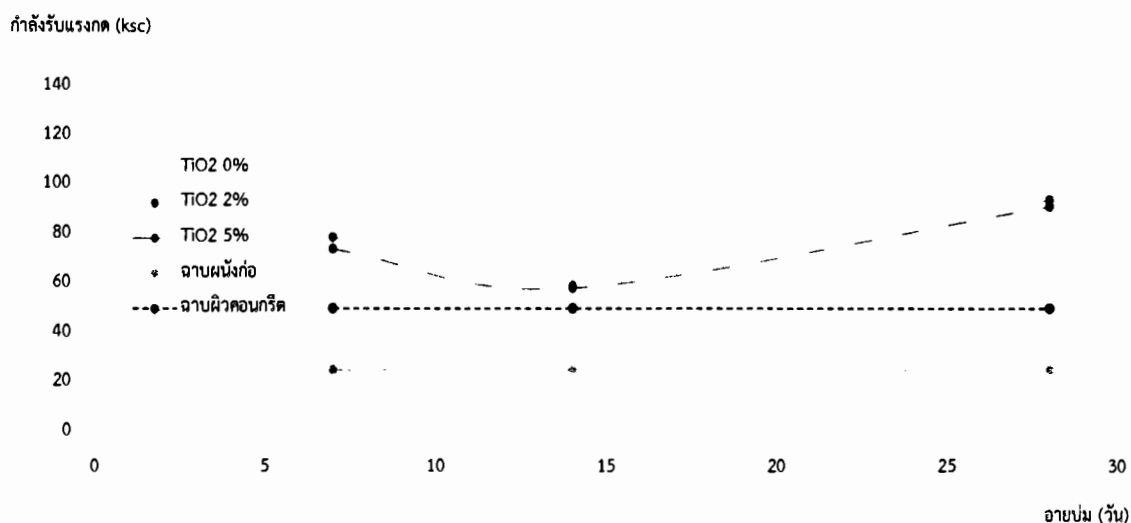
อายุ มอร์ตาร์	ไทเทเนียม ร้อยละ 0	ไทเทเนียม ร้อยละ 2	ไทเทเนียม ร้อยละ 5
7 วัน	207.3	159.0	152.7
14 วัน	215.1	153.5	124.6
28 วัน	236.3	229.3	199.3

จากภาพที่ 4.22 เห็นอย่างได้ชัดเจน ว่า  $TiO_2$  มีผลต่อกำลังอัดปูนฉาบทำให้กำลังอัดลดลง โดยที่  $TiO_2$  เมื่อเติม  $TiO_2$  ร้อยละ 2 และร้อยละ 5 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ มีกำลังแตกต่างจากกำลังของปูนฉาบเมื่อเติม  $TiO_2$  ร้อยละ 0 เป็น ร้อยละ 18.05 และ ร้อยละ 20.40 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาในด้านผลกระทบในการนำไปใช้งาน ถือว่าเป็นการลดลงที่มาก ทำให้จะต้องพิจารณาเป็นพิเศษ หรืออาจจะนำมาใช้งานไม่ได้จริง

กำลังรับแรงอัดปูนฉาบของอายุบ่ม 14 วัน มีค่าน้อยกว่ากำลังรับแรงอัดของปูนฉาบอายุบ่ม 7 วัน เป็นข้อขัดแย้งของทฤษฎีซึ่งมีการทดลองซ้ำ ผลที่ได้ยังคงตรงกัน ดังนั้น จึงควรยกประเด็นนี้ศึกษาแยกย่อยออกไป ปัจจัยของโครงสร้างผลึก ความเป็นกรด-ด่าง ปฏิบัติการดูดน้ำ คายน้ำ ปัจจัยเหล่านี้อยู่นอกเหนือของวัตถุประสงค์ซึ่งยังไม่ได้ศึกษาวิเคราะห์เชิงลึก



ภาพที่ 4.22 ความสัมพันธ์กำลังอัดของปูนฉาบกับระยะเวลาการบ่ม ของตัวอย่างที่มีปริมาณอัตราส่วนผสมร้อยละ 0, 2 และ 5 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.23 ความสัมพันธ์กำลังอัดของปูนฉาบกับระยะเวลาการบ่มเปรียบเทียบ มอก. 1776-2542 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมมอร์ตาร์สำหรับฉาบ

จากมอก.1776-2542 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมมอร์ตาร์สำหรับปูนฉาบ ค่ากำลังรับแรงอัดของปูนฉาบที่ผสมสารไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เห็นได้จากกราฟ ในภาพที่ 4.23 มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่ามาตรฐาน มอก.1776-2542 นั้นแสดงให้เห็นว่าปูนฉาบผสมสารไทเทเนียมไดออกไซด์ สามารถนำไปใช้งานได้ถึงแม้กำลังอัดจะลดลงไปจากการเติม  $\text{TiO}_2$  ร้อยละ 0 โดยที่มีกำลังอัดสูงกว่ามาตรฐานถึงร้อยละ 73.40 และร้อยละ 72.62 ของการเติม  $\text{TiO}_2$  ร้อยละ 2 และร้อยละ 5 ตามลำดับ

#### 4.5 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลเมื่อผสมสารไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดดัดแปร เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพค่าการเปลี่ยนแปลงสี

การดัดแปรสารไทเทเนียมไดออกไซด์มีหลักการเพื่อต้องการให้ค่าพลังงานแบนแก๊พของสารกึ่งตัวนำมีค่าต่ำลง เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการเกิดปฏิกิริยาในการทำความสะอาดตัวเองของมอร์ตาร์ปูนฉาบ ผลการทดลองแบ่งการวิเคราะห์เพื่อให้มองเห็นปัจจัยความสำคัญต่อการศึกษาดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.11 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีวัสดุมอร์ตาร์ปูนฉาบที่ผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์  
เกรดทดลอง

เวลา (นาที)	ค่าการเปลี่ยนแปลงของสี (Color variation) $\Delta E$								
	ความเข้มแสงขาว 500 ลักซ์ (ร้อยละ)			ความเข้มแสงขาว 25,000 ลักซ์ (ร้อยละ)			ความเข้มแสงยูวี 10 วัตต์ต่อตารางเมตร		
	0	2	5	0	2	5	0	2	5
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0.61	0.22	0.98	0.71	0.41	2.07	0.81	3.01	3.37
10	0.71	0.4	1.29	1.58	1.04	2.76	1.67	3.6	3.52
20	0.82	0.79	1.48	1.95	1.56	4.2	2.03	3.62	5.25
30	0.92	0.91	2.08	2.34	2.77	6.74	2.40	4.51	5.37
60	1.01	1.78	2.4	2.75	4.89	7.17	2.75	5.04	6.04
120	1.05	1.09	3.41	3.20	7.94	8.77	2.87	6.16	7.07
180	1.08	1.99	3.69	3.36	9.79	10.83	2.90	6.44	7.29
240	1.06	2.61	4.21	3.47	10.59	12.07	2.93	6.75	8.79
360	1.07	3.33	4.39	3.67	11.94	13.38	2.93	11.57	13.2
480	1.1	3.59	4.63	3.86	12.43	14.08	3.00	12.99	16.61
600	1.21	4.02	5.18	3.88	13.28	16.02	3.05	13.72	17.72

ผลการทดลองค่าการเปลี่ยนแปลงสีของมอร์ตาร์ปูนฉาบทำการวัดค่าโดยนำขึ้นตัวอย่างที่จะทำการทดลองมาอ่านค่าด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งค่าที่ได้เป็นค่าบ่งชี้ของสีคือค่า  $L^*$   $a^*$   $b^*$  แล้วหาค่า  $\Delta E = [(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 + (\Delta L^*)^2]^{1/2}$  ซึ่งค่า  $\Delta E$  คือค่าการเปลี่ยนแปลงของสีที่เปลี่ยนไป (Color variation) ณ เวลาที่ให้พลังงานแสงใดๆ เริ่มจากนาทีที่ 0 - 600 นาที ดังตารางที่ 4.11 ตารางที่ 4.12 ตารางที่ 4.13 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของสี ของมอร์ตาร์ปูนฉาบธรรมดา โดยอัตราส่วนผสมของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ ชนิด เกรดทดลอง ดัดแปร M-01 และ ดัดแปร M-02 ตามลำดับ ที่ร้อยละ 0 2 และ 5 โดยนำหนักซีเมนต์ปูนฉาบ และฉายแสงที่มีความเข้ม แสงขาวที่ความเข้มแสง 500 ลักซ์ ความเข้มแสงขาว 25,000 ลักซ์ และแสงยูวี (Ultraviolet) ความเข้ม 10 วัตต์ต่อตารางเมตร

ตารางที่ 4.12 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีวัสดุอมอร์ฟาร์บุณฉาบที่ผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์  
เกรดตัดแปร ชนิด M-01

เวลา (นาทึ)	ค่าการเปลี่ยนแปลงของสี (Color variation) $\Delta E$								
	ความเข้มแสงขาว 500 ลักซ์ (ร้อยละ)			ความเข้มแสงขาว 25,000 ลักซ์ (ร้อยละ)			ความเข้มแสงยูวี 10 วัตต์ต่อตารางเมตร		
	0	2	5	0	2	5	0	2	5
0	0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
5	0.61	5.3	3.2	0.71	1.2	0.7	0.81	1.1	1.7
10	0.71	5.6	3.5	1.58	2.3	1.8	1.67	1.6	1.8
20	0.82	6.0	6.1	1.95	2.9	3.8	2.03	3.4	2.8
30	0.92	6.7	7.8	2.34	4.5	4.1	2.40	6.7	6.0
60	1.01	7.0	9.2	2.75	5.2	12.8	2.75	17.3	14.5
120	1.05	7.5	10.6	3.20	7.4	17.9	2.87	21.5	29.8
180	1.08	8.4	14.2	3.36	11.0	23.0	2.90	28.1	31.3
240	1.06	8.6	19.7	3.47	14.2	24.1	2.93	29.4	31.5
360	1.07	10.5	20.3	3.67	15.4	27.7	2.93	30.1	32.0
480	1.1	14.4	20.6	3.86	15.5	30.8	3.00	30.3	34.3
600	1.21	22.7	29.8	3.88	23.0	31.8	3.05	31.8	34.4

จากตารางที่ 4.13 เมื่อทำการใช้สารตัดแปร M-02 ค่าการทำความสะอาดตัวเองมีค่าอยู่ในช่วง  
บรรทัดฐาน สำหรับแสงขาว 500 ลักซ์ ในเวลา 30 นาที และ 10 นาที ที่อัตราส่วนร้อยละ 2 และ 5  
ตามลำดับ สำหรับแสงขาว 25,000 ลักซ์ และแสงยูวีนั้น ภายใน 5 นาทีแรกก็สามารถทำความสะอาด  
ตัวเองได้เช่นกัน

ตารางที่ 4.13 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีวัสดุอมอร์ฟาร์บุณฉาบที่ผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์  
เกรดตัดแปร ชนิด M-02

เวลา (นาท)	ค่าการเปลี่ยนแปลงของสี (Color variation) $\Delta E$								
	ความเข้มแสงขาว 500 ลักซ์ (ร้อยละ)			ความเข้มแสงขาว 25,000 ลักซ์ (ร้อยละ)			ความเข้มแสงยูวี 10 วัตต์ต่อตารางเมตร		
	0	2	5	0	2	5	0	2	5
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0.61	7.4	8.72	0.71	15.49	9.02	0.81	12.57	12.32
10	0.71	9.02	18.84	1.58	9.84	11.6	1.67	19.86	26.06
20	0.82	10.8	26.19	1.95	22.57	12.6	2.03	26.24	30.79
30	0.92	19.71	27.51	2.34	23.2	26.29	2.40	28.65	34.74
60	1.01	22.51	30.23	2.75	30.41	33.65	2.75	34.3	37.18
120	1.05	25.66	32.81	3.20	33.77	37.6	2.87	38.37	39.23
180	1.08	30.37	34.4	3.36	39.61	46.98	2.90	37.01	44.66
240	1.06	32.03	40.36	3.47	41.37	52.34	2.93	40.59	48.32
360	1.07	34.4	43.78	3.67	41.74	56.7	2.93	44.34	50.87
480	1.1	39.25	46.2	3.86	45.52	58.93	3.00	46.3	54.07
600	1.21	42.34	49.87	3.88	47.21	61.34	3.05	55.32	64.86

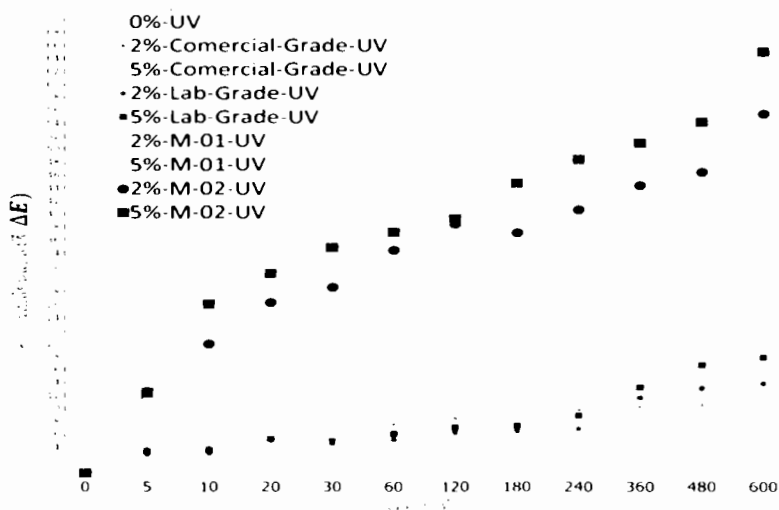
คุณสมบัติเฉพาะตัวของสารตัดแปรทั้ง 2 ชนิด มีผลดีมากสำหรับการทำความสะอาดตัวเองของวัสดุอมอร์ฟาร์ซึ่งระยะเวลาในการทำความสะอาดใช้เวลาสั้นและยังต้องศึกษาต่อว่าปริมาณในการใช้งานในกระบวนการทำความสะอาดนั้นมีมากน้อยเพียงใดซึ่งนอกเหนือจากจุดประสงค์ที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ ที่จะต้องมีการศึกษาในโอกาสต่อไป

ตารางที่ 4.14 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่เวลา 600 นาทของระยะเวลาการให้พลังงานแสง  
(ไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักส่วนผสม)

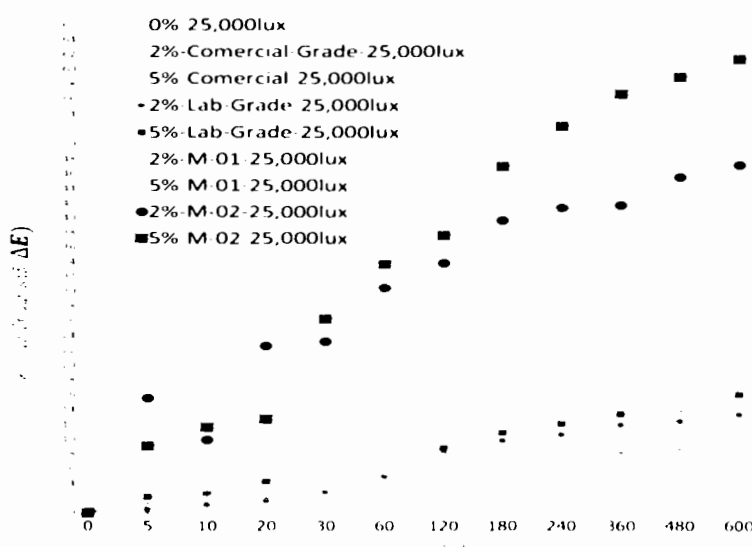
ค่าการ เปลี่ยนแปลง สี 600 นาท	$\Delta E$ 500ลักซ์	$\Delta E$ 25,000ลักซ์	$\Delta E$ ยูวี 10 วัตต์ ต่อตาราง เมตร	$\Delta E$ 500 ลักซ์ (ร้อยละ)	$\Delta E$ 25,000 ลักซ์ (ร้อยละX	$\Delta E$ ยูวี 10 วัตต์ /ตรม. (ร้อยละ)
ตารางที่ 4.8	5.18	16.02	17.72	6.10	14.68	15.15
ตารางที่ 4.9	29.80	31.80	34.40	35.12	29.13	29.42
ตารางที่ 4.10	49.87	61.34	64.82	58.77	56.19	55.43
				100	100	100

### 4.5.1 วิเคราะห์ชนิดของสารกึ่งตัวนำที่ผสมวัสดุเมอร์ตาร์ดาร์

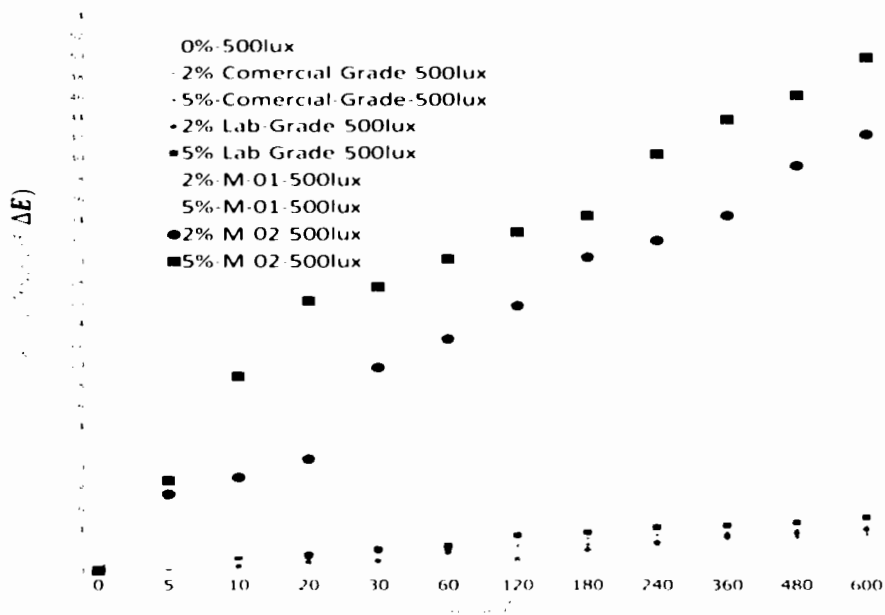
เมื่อดูจากกราฟภาพที่ 4.24 ภาพที่ 4.25 และภาพที่ 4.26 มีความชัดเจนว่า สารไทเทเนียมดัดแปร M-02 และ M-01 มีค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่มากกว่า สารไทเทเนียมไดออกไซด์ เกรดอุตสาหกรรมและเกรดทดลองอย่างชัดเจน เนื่องจากสารดัดแปรได้มาจากการดัดแปร สารไทเทเนียมให้คุณสมบัติของพลังงานแบนแก๊พมีค่าลดลงจากสารไทเทเนียมไดออกไซด์ เกรดอุตสาหกรรมและเกรดทดลอง ทำให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของสารไทเทเนียมดัดแปร M-01 และ M-02 เกิดได้ดีซึ่งดูได้จากค่าการเปลี่ยนแปลงสีของวัสดุเมอร์ตาร์ดาร์



ภาพที่ 4.24 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของเมอร์ตาร์ดาร์ปูนฉาบ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (เกรดอุตสาหกรรม เกรดทดลอง M-01 M-02) ฉายแสงยูวี 10 วัตต์ต่อตารางเมตร



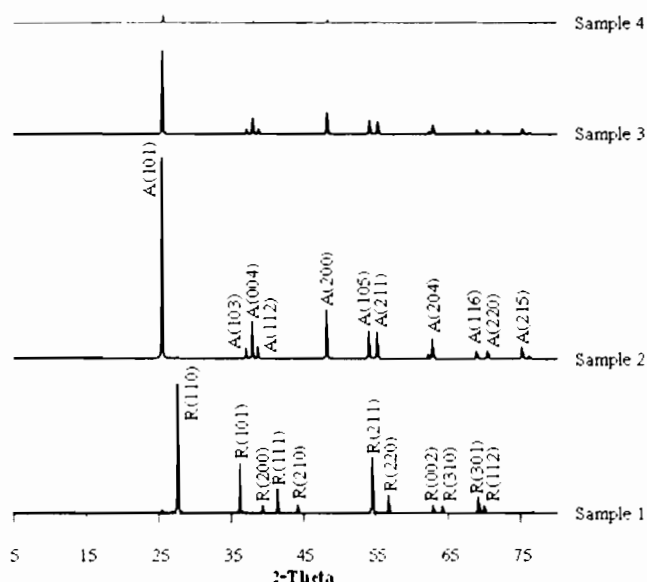
ภาพที่ 4.25 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของเมอร์ตาร์ดาร์ปูนฉาบ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (เกรดอุตสาหกรรม เกรดทดลอง M-01 และ M-02) ฉายแสงขาว 25,000 ลักซ์



ภาพที่ 4.26 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของมอร์ตาร์ปูนฉาบ โทเทเนียมไดออกไซด์ (เกรดอุตสาหกรรม เกรดทดลอง M-01 และ M-02) ฉายแสงขาว 500 ลักซ์ (ความสว่างภายในอาคาร)

#### 4.5.2 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

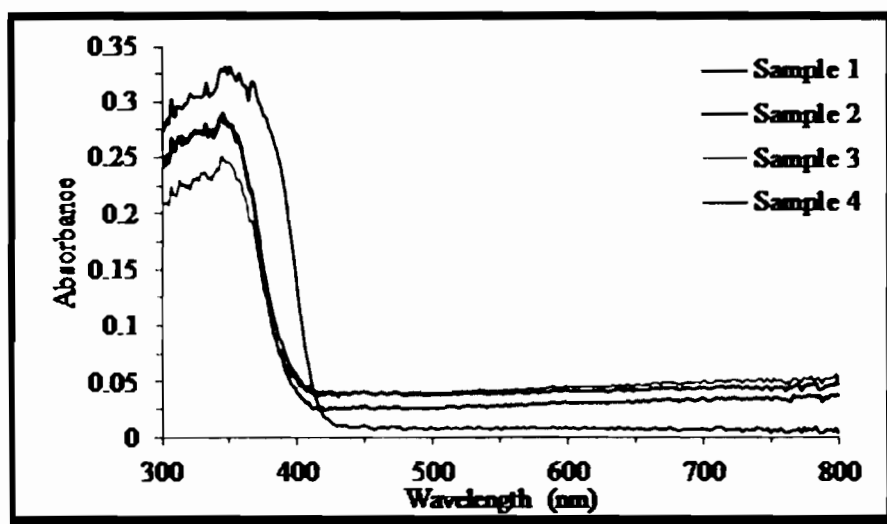
จากผลการวิเคราะห์คุณลักษณะโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารกึ่งตัวนำ โทเทเนียมไดออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (แสดงดังภาพที่ 4.27 Sample 1) สารโทเทเนียมไดออกไซด์ เกรดทดลอง (แสดงดังภาพที่ 4.27 Sample 2) สารกึ่งตัวนำโทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการดัดแปร M-01 (แสดงดังภาพที่ 4.27 Sample 3) และสารกึ่งตัวนำโทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการดัดแปร M-02 (แสดงดังภาพที่ 4.27 Sample 4) จะพบว่าสารกึ่งตัวนำโทเทเนียมไดออกไซด์เกรดทดลอง สารกึ่งตัวนำโทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการดัดแปร M-01 และสารกึ่งตัวนำโทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการดัดแปร M-02 มีโครงสร้างแบบอะนาเทส ซึ่งมีความว่องไวสูงต่อการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ขณะที่สารกึ่งตัวนำโทเทเนียมไดออกไซด์เกรดอุตสาหกรรมมีโครงสร้างแบบรูไทล์ ซึ่งมีความว่องไวต่ำต่อการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ดังนั้นวัสดุอมอร์ตาร์ที่ผสมสารกึ่งตัวนำโทเทเนียมไดออกไซด์เกรดทดลอง วัสดุอมอร์ตาร์ที่ผสมสารกึ่งตัวนำโทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการดัดแปร M-01 วัสดุอมอร์ตาร์ที่ผสมสารกึ่งตัวนำโทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการดัดแปร M-02 จึงให้ผลค่าการเปลี่ยนแปลงสีของมอร์ตาร์ปูนฉาบสูงกว่าวัสดุอมอร์ตาร์ที่ผสมสารกึ่งตัวนำโทเทเนียมไดออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม



ภาพที่ 4.27 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งลักษณะโครงสร้าง R หมายถึง รูไทล์ (Rutile) และ A หมายถึง อะนาเทส

จากผลการวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของแสงยูวีและแสงขาวของสารไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (แสดงดังภาพที่ 4.28 Sample 1) สารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดทดลอง (แสดงดังภาพที่ 4.28 Sample 2) สารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการดัดแปร M-01 (แสดงดังภาพที่ 4.28 Sample 3) และสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการดัดแปร M-02 (แสดงดังภาพที่ 4.28 Sample 4) พบว่า สารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการดัดแปร M-02 และสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการดัดแปร M-01 สามารถเปลี่ยนแปลงสีได้ตั้งแต่ช่วงแสงขาว ในขณะที่สารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม และ สารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดทดลองสามารถเปลี่ยนแปลงสีได้ตั้งแต่ช่วงแสงยูวี ดังนั้น วัสดุอมอร์ฟาร์ที่ผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการดัดแปร M-01 วัสดุอมอร์ฟาร์ที่ผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการดัดแปร M-02 จึงให้ผลค่าการเปลี่ยนแปลงสีของอมอร์ฟาร์ปูนฉาบสูงกว่าวัสดุอมอร์ฟาร์ที่ผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดทดลอง ภายใต้การฉายแสงขาว และแสงยูวี





ภาพที่ 4.28 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของการฉายแสงยูวีและแสงขาวของสารไทเทเนียมไดออกไซด์

นอกจากนี้ ยังพบว่าวัสดุอมอร์ฟัสที่ผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดัดแปร M-02 ให้ผลค่าการเปลี่ยนแปลงสีของอมอร์ฟัสสูงกว่ววัสดุอมอร์ฟัสที่ผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการดัดแปร M-01 ที่เป็นเช่นนี้ เพราะเมื่อแสงกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสแล้ว จะทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องการย่อยสลายของสารสี้อม (สารปองโซ 4 อาร์) สิ่งนี้จึงสะท้อนให้ทราบว่าปฏิกิริยาที่ไม่ช่วยให้เกิดการการย่อยสลายของสารสี้อมอันเกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโพรงของสารกึ่งตัวนำที่ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสงนั้นมีค่าน้อยลงเมื่อใช้สารไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการดัดแปร M-02 สารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการดัดแปร M-01 และสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดทดลอง ตามลำดับ ดังนั้นจากทั้งหมดนี้จึงอธิบายผลได้ว่า วัสดุอมอร์ฟัสที่ผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการดัดแปร M-02 จึงให้ผลค่าการเปลี่ยนแปลงสีของอมอร์ฟัสสูงกว่ววัสดุอมอร์ฟัสที่ผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการดัดแปร M-01 วัสดุอมอร์ฟัสที่ผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดทดลอง วัสดุอมอร์ฟัสที่ผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม ตามลำดับ นอกจากนี้ยังเป็นการบอกกล่าวได้ว่าวิธีการดัดแปรสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างก็ยังมีผลต่อความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส และการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโพรงของสารกึ่งตัวนำ

#### 4.6 สรุป

ค่าการเปลี่ยนแปลงสีบ่งชี้ถึงค่าการทำความสะอาดจากที่กล่าวในข้างต้นนั้น การวิเคราะห์ผลพบว่าค่าการทำความสะอาดตัวเอง  $\Delta E$  ที่ทดลองสำหรับสารไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่แสงยูวีมีค่าการทำความสะอาด  $\Delta E$  ที่เวลา 600 นาทีในการให้แสงที่ 12-14 โดยประมาณ (จากตารางที่ 4.2 ถือเป็นค่าบรรทัดฐานเทียบการทำความสะอาด) เมื่อทำการใช้สารดัดแปร M-01 ค่าการทำความสะอาดตัวเองมีค่าอยู่ในช่วงบรรทัดฐาน สำหรับแสงขาว 500 ลักซ์

ในเวลา 480 นาที และ 180 นาที ที่อัตราร้อยละ 2 และ 5 ตามลำดับ สำหรับแสงขาว 25,000 ลักซ์  
ในเวลา 240 นาที และ 60 นาที ที่อัตราส่วนร้อยละ 2 และ 5 ตามลำดับ และแสงยูวีนั้น ใน 5 นาที  
แรกก็สามารถทำความสะอาดตัวเองได้

หากเมื่อพิจารณาจากผลวิเคราะห์ค่าการทำความสะอาดตัวเองแล้วพบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมี  
ความสอดคล้องกับผลวิเคราะห์คุณลักษณะโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ซึ่งค่าพลังงานของการ  
เกิดปฏิกิริยาที่ทำความสะอาดตัวเองในการทดลองสามารถบ่งบอกได้ด้วยการนำผลการวิเคราะห์  
คุณลักษณะโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์มาอ้างอิงการทดลองได้

นอกจากนี้การผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ในงานวิจัยนี้ยังส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดที่  
น้อยมากหากเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานในการนำไปใช้งานในผลการทดลองและวิเคราะห์ผลกำลังรับ  
แรงอัด

## บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา

### 5.1 สรุปผลการทดสอบ

เมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองแล้วสามารถสรุปผลการทดลองทั้งหมดตามสมมติฐานที่ตั้งต่อไปนี้

5.1.1 การทดสอบวัสดุอมอร์ฟาร์ปูนฉาบทำความสะอาดตัวเองได้ Self-cleaning plastering mortar, SPM โดยอาศัยการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสีของผิววัสดุที่ปนเปื้อนแล้วหาค่าการเปลี่ยนแปลงสีของวัสดุเพื่อเป็นค่าบ่งชี้อัตราการทำความสะอาดตัวเองของวัสดุ SPM ซึ่งเมื่อสรุปผลการทดลองพบว่า SPM ภายใต้การฉายแสงด้วยแสงยูวี UV และ แสงขาวที่ความเข้มแสง 25,000 ลักซ์ ที่เปรียบเทียบกับความสว่างของแสงขาวภายนอกอาคาร Strong light outdoor irradiation, SLO มีประสิทธิภาพในการทำความสะอาดตัวเองของผิววัสดุ SPM ที่ชัดเจนเมื่อมีการผสมสาร  $TiO_2$  และมีอัตราการทำความสะอาดมากกว่า วัสดุ SPM ที่ฉายแสงขาวความเข้ม 500 ลักซ์ ซึ่งเปรียบเทียบกับความสว่างของแสงภายในอาคาร Weak light indoor irradiation, WLI ที่มีค่าการทำความสะอาดตัวเองที่ผิววัสดุ SPM ที่มีค่าน้อยกว่า ทั้งนี้ปฏิกิริยาออกซิเดชันของวัสดุโฟโตคะตะไลติกเกิดขึ้นที่ผิวของวัสดุซีเมนต์ที่มีความซับซ้อนมาก ซึ่งปฏิกิริยาด้วยแสงนั้นเกิดระหว่าง สารตั้งต้นและโฟตอนพลังงานของโฟตอนไม่สามารถส่งผ่านวัสดุซีเมนต์ไปยังผิวด้านในของวัสดุ SPM การป้องกันผิววัสดุด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจึงเกิดที่บริเวณผิววัสดุ SPM ทำให้การเกิดปฏิกิริยาด้วยแสงสามารถทำความสะอาดพื้นผิววัสดุ SPM ได้ ซึ่งค่าการทำความสะอาดตัวเองของวัสดุ SPM นั้นถูกระบุด้วยปัจจัยหลักที่กำหนดภายหลังด้วยประสิทธิภาพของวัสดุโฟโตคะตะไลติก

5.1.2 ในการทดสอบเพื่อศึกษาอัตราการทำความสะอาดตัวเองของวัสดุปูนฉาบ ปัจจัยที่มีความชัดเจนว่ามีผลต่อการทำความสะอาดของวัสดุปูนฉาบนั้นคือ หากความเข้มข้นของสารกึ่งตัวนำที่ผสมลงไปเพิ่มขึ้น มีผลทำให้การทำความสะอาดตัวเองเพิ่มขึ้น แต่การศึกษาที่มีการผสมสารไทเทเนียมในเกรดอุตสาหกรรม และเกรดทดลอง จะเกิดปฏิกิริยาได้ดีสำหรับแสงยูวี และแสงขาวที่มีความสว่างมากพอคือ 25,000 ลักซ์ เท่านั้น ทำให้เกิดการศึกษเพิ่มเติม โดยการดัดแปรสารกึ่งตัวนำให้เกิดปฏิกิริยาดีขึ้น ในงานวิจัยนี้ให้ชื่อว่า สารกึ่งตัวนำไทเทเนียมดัดแปร M-01 และ M-02 โดยเมื่อทำการทดสอบ โดยกำหนดตัวแปรที่ควบคุมให้คงที่เทียบเท่ากับการทดสอบที่ใช้สารไทเทเนียมเกรดอุตสาหกรรม และ เกรดทดลอง แล้วมีผลการทดสอบที่มีนัยสำคัญว่า สารกึ่งตัวนำไทเทเนียมดัดแปร ทั้ง 2 ชนิด มีผลทำให้การทำความสะอาดวัสดุปูนฉาบทำความสะอาดตัวเองได้ดีขึ้น และสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ดัดแปร M-02 มีผลการทดสอบที่ได้ค่าการทำความสะอาดที่มากกว่า M-01 โดยสารดัดแปร M-02 มีความสามารถทำความสะอาดตัวเองได้มีค่าเทียบเท่าในช่วงเดียวกันกับสารไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดอุตสาหกรรมและเกรดทดลองในระยะเวลาช่วง 10 นาทีแรกเท่านั้น และสำหรับสารดัดแปร M-01 ก็มีความสามารถได้เทียบเท่าในระยะเวลาช่วง 180 – 480 นาที เมื่อเป็นการฉายแสงขาวที่ความเข้ม 500 ลักซ์ ซึ่งเป็นค่าความเข้มแสงของแสงภายในอาคาร จึงเป็นแนวทางที่ดีในการศึกษาและนำมาประยุกต์ใช้ทำความสะอาดตัวเองภายในอาคาร ทั้งนี้ปัจจัยอื่นๆที่

ศึกษา เช่น อายุขุมคอนกรีต ชนิดของปูนฉาบธรรมดา และปูนขาว เมื่อสรุปผลแล้วปรากฏว่ามีประสิทธิภาพในการทำความสะอาดตัวเองที่ใกล้เคียงกัน

5.1.3 การทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำการผสมสารกึ่งตัวนำลงไปในวัสดุ มอร์ตาร์ปูนฉาบ พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดลดลงในค่าที่น้อยมาก เกิดขึ้นได้เพราะโครงสร้างของมอร์ตาร์ ภายในหลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากทฤษฎีกำลังคอนกรีตที่ควรจะเป็นแต่ถึงอย่างไรเมื่อทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแล้วพบว่าค่าที่ได้ผลการทดสอบออกมานั้นยังอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ในการนำไปใช้งาน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

### 5.2.1 แนวทางศึกษาต่อเพื่อประยุกต์ใช้งานจริง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษามาถึงขั้นตอนที่ปรับปรุงประสิทธิภาพให้การทำความสะอาดเกิดได้ในสภาวะที่พลังงานของแสงมียังไม่เพียงพอ แต่ยังมีปัจจัยอื่นๆที่ยังต้องศึกษาเพิ่มเติมอีก เช่น การศึกษาโครงสร้างภายในผลึกเมื่อเกิดการผสมสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมลงน้สตุปูนซีเมนต์ รวมทั้งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดหลังการผสม และยังมีปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ ที่ทางผู้สนใจเล็งเห็นความสำคัญของการศึกษาเพื่อให้งานวิจัยนี้เป็นประโยชน์อย่างกว้างขวางในวงการก่อสร้างต่อไป

### 5.2.2 กระบวนการทดลอง

ในการทดลองต้องคำนึงปัจจัยสำคัญดังนี้

5.2.2.1 ทุกกระบวนการที่ทดลองควรทำในห้องทดลองที่มืดชิดไม่มีแสงยูวีหรือแสงขาว ผ่านหรือป้องกันกรองผ่านของแสงให้มากที่สุด เพื่อผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

5.2.2.2 การทดสอบด้วยสารปองโซ 4 อาร์ มีส่วนผสมของโลหะหนัก ควรระมัดระวัง หลังการทดลองควรทำความสะอาดและเก็บให้มืดชิด

5.2.2.3 การผสมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ควรทำให้ละเอียดมากที่สุดเพราะสารไทเทเนียมผงเมื่อโดนความชื้นมักจะเกาะกลุ่มกันแน่นเมื่อผสมแล้วนำไปทดลองการเกิดปฏิกิริยาจะออกมาคลาดเคลื่อนได้

5.2.2.4 ไม่ควรเก็บสารไทเทเนียมไดออกไซด์ในที่อากาศผ่านและมีแสงผ่านได้เพราะแสงยูวีสามารถทำให้ไทเทเนียมเกิดปฏิกิริยาก่อนจะทำการทดลองได้

เอกสารอ้างอิง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Fujishima A, Hishimoto K, and Watanabe T. "TiO<sub>2</sub> photocatalysis: fundamentals and applications", in **TiO<sub>2</sub> photocatalysis: fundamentals and applications**. Tokyo: BKC Inc , 1999.
- [2] Agrios AG, Pichat P. "State of the art and perspective on materials and applications of photocatalysis over TiO<sub>2</sub>", **J ApplElectrochem**. 35: 655-63, 2005.
- [3] Fujishima A, Zhang X, and Tryk DA. "TiO<sub>2</sub> photocatalysis and related surface phenomena", **Surf Sci Rep**. 63: 515-82, 2008.
- [4] Paz Y, Luo Z, Rabenberg L, Heller A. "Photooxidative self-cleaning transparent titanium dioxide film on glass", **J Mater res**. 10: 2842-8, 1995.
- [5] Negishi N, Matsuzawa S, Takeuchi K, and Pichat P. "Transparent micrometer-thick TiO<sub>2</sub> films on SiO<sub>2</sub>-coated glass prepared by repeated dip-coating/calcinations: characteristic and photocatalytic activities for removing acetaldehyde or toluene in air", **Chem Mater**. 19: 3808-14, 2007.
- [6] Guo T, Bai Z, Wu C, and Zhu T. "Influence of relative humidity on the photocatalytic oxidation (PCO) of toluene by TiO<sub>2</sub> loaded on activated carbon fibers: PCO rate and intermediates accumulation", **Appl Catal B Environ** 2008. 79: 171-8, 2008.
- [7] Raillard C, Hequet V, Le Cloirec P, and Legrand J. "Kinetic study of Ketones photocatalytic oxidation in gas phase using TiO<sub>2</sub>-containing paper: effect of water vapor", **J PhotochemPhotobiol A chem**. 163: 425-31, 2004.
- [8] Teekateerawej S, Nishino J, and Nosaka Y, "Design and evaluation of photocatalytic micro-channel reactor using TiO<sub>2</sub>-coated porous ceramics", **J PhotochemPhotobiol A chem**. 179: 263-8, 2006.
- [9] Maggos T, Plassais A, Bartzis JG, Vasilakos C, Moussiopoulos N, and Bonafous L. "Photocatalytic degradation of NO<sub>x</sub> in a pilot street canyon configuration using TiO<sub>2</sub>-mortar panels", **Environ Monit Assess**. 136: 35-44, 2008
- [10] Hassana MM, Dylla H, Mohammad LN, and Rupnow T. "Evaluation of the durability of titanium dioxide photocatalyst coating for concrete pavement", **Constr Build Mater**. 24: 1456-61, 2010.
- [11] Guerrini GL, Peccati E. "Photocatalytic cementitious roads for depollution", **Proceedings of international RILEM symposium on photocatalysis environment and construction materials.Bagneux**. 179-86, 2007.

### เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [12] Husken G, Hunger M, Brouwers HJH. “Experimental study of photocatalytic concrete products for air purification”, **Build Environ.** 44: 2463-74, 2009.
- [13] Carneiro JO, Teixeira V, Marttins AJ, Mendes M, Ribeiro M, Vieira A. “Surface properties of doped and undoped TiO<sub>2</sub> thin films deposited by magnetron sputtering”, **Vacuum.** 83: 1303-6, 2009.
- [14] Racel A, Subrahmanyam M, Boule P. “Comparison of photocatalytic efficiencies of TiO<sub>2</sub> in suspended and immobilized form for the photocatalytic degradation of nitrobenzenesulfonic acids.”, **ApplCatal B Environ.** 37: 301-8, 2002.
- [15] Boccaccini AR, Rossetti M, Roether JA, Zein SHS, Ferraris M. “Development of titania coatings on glass foams”, **Constr Build Mater.** 23: 2554-8, 2009.
- [16] Ramirez AM, Demeestere K, De Belie N, Mantyla T, Levanen E. “Titanium dioxide coated cementitious materials for air purifying purposes : preparation, characterization and toluene removal potential”, **Build Environ.** 45: 832-8, 2010.
- [17] Jun C, Shi-cong K, Chi-sun P. “Photocatalytic cement-based materials : Comparison of nitrogen oxides and toluene removal potentials and evaluation of self-cleaning performance”, **Building and Environment.** 46: 1827-1833, 2011.
- [18] International Organization for Standardization. **CIE standard illuminance for colorimetry.** ISO 10526, 2007.
- [19] Fujitsu Laboratory LTD. “Environment clean-up (purification) technology by photocatalyst titanium apatite”, **Environment clean-up.**  
<http://jp.fujitsu.com/group/labs/downloads/en/business/activities/activities-3/fujitsu-labs-envtech-003-en.pdf>. 26 February, 2009.
- [20] ฉลาด บรรเทา และชูลิทธิ์ ศรีสุทธิกมล. (2548). “กระบวนการเกิด”, **Photocatalytic** [www.software602.com](http://www.software602.com). 26 กุมภาพันธ์, 2557.
- [21] วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง. “วัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์”, แหล่งที่มา : <http://www.nano.kmitl.ac.th>. 26 กุมภาพันธ์, 2557.
- [22] ฉลาด บรรเทา และชูลิทธิ์ ศรีสุทธิกมล. (2548). “กลไกการทำความสะอาดตัวเองและการลดมลพิษในอากาศ”, **กลไกการทำความสะอาดตัวเองและการลดมลพิษในอากาศ.** [www.software602.com](http://www.software602.com). 26 กุมภาพันธ์, 2557.

### เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [23] Mitsubishi, A., (2552). “Concrete paver ในญี่ปุ่นที่สร้างด้วยเทคโนโลยี Photocatalysis”, **Concrete paver ในญี่ปุ่นที่สร้างด้วยเทคโนโลยี Photocatalysis**. [www.concretedetor.net](http://www.concretedetor.net), 26 กุมภาพันธ์, 2557.
- [24] บริษัท เคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด (2548). “ไทเทเนียมไดออกไซด์ และโมเลกุลของไทเทเนียมไดออกไซด์”, **ไทเทเนียมไดออกไซด์ และโมเลกุลของไทเทเนียมไดออกไซด์**. <http://content.chemipan.net>. 26 กุมภาพันธ์, 2557.
- [25] EssrocItalcementi Group (2552). “TX Active Photocatalytic Concrete Technology”, **TX Active Photocatalytic Concrete Technology**. [www.italcementigroup.com/ENG](http://www.italcementigroup.com/ENG). 30 เมษายน, 2557
- [26] บริษัท ลี กิจเจริญแสง จำกัด. “เลซีเซT5 นาโน”, **หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ไร้ฝุ่น**. <http://www.nia.or.th/rmut/example.html>. 30 เมษายน, 2557
- [27] John A. Weeks III .1996 – 2004 . “Iaint Anthony Falls Bridgel-35W Mississippi River CrossingMinneapolis”, **MN**. <http://www.johnweeks.com/i35w/ms32.htm>. 30 เมษายน, 2557
- [28] ปรียา อนุพงษ์อ้อจ.2557. ”การส่องสว่างและการเปรียบเทียบความเข้มแสง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต”, **การส่องสว่างและการเปรียบเทียบความเข้มแสง**. [http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/62/light1/ligh\\_2.htm](http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/62/light1/ligh_2.htm). 30 เมษายน, 2557
- [29] PITI RUNGSRITANANON (2557) . “ค่าไตรสตีมูลัส XYZ ปริภูมิสี Y X Z และ  $L^*C^*h^*$ ”, **ค่าไตรสตีมูลัส XYZ ปริภูมิสี Y X Z และ  $L^*C^*h^*$** . <http://alwayyours.blogspot.com/2013/07/xyz-yxy-lch.html>. 30 เมษายน, 2557
- [30] นพพร รัตน์ชัยกุล.2010. “cie standard”, **cie standard คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯลาดกระบัง**. แหล่งที่มา:<http://chalermchai124.exteen.com>, 26 เมษายน, 2557
- [31] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมมอร์ต้าปูนฉาบ**. มอก. 1776-2542, 2542.
- [32] ญัฐญา คุ่มทรัพย์, “วิศวกรรมลาดกระบัง 30”, **ผลของการเจือโลหะต่อความว่องไวในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกช่วงวิสิเบิลของไททาเนียมไดออกไซด์**. กรุงเทพมหานคร: 19-24, 2013.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
ผลการทดสอบค่าการเปลี่ยนแปลงสี

ตารางที่ ก.1 อายุปูนฉาบ 7 วัน แสง 500 ลักซ์

เวลา (นาท)	ฉาบร้อยละ 0 โดยเฉลี่ย				ฉาบร้อยละ 2 โดยเฉลี่ย				ฉาบร้อยละ 5 โดยเฉลี่ย			
	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E
0	70.72	2.88	10.03	0.00	78.49	1.82	7.67	0.00	81.13	1.09	5.52	0.00
5	71.19	3.28	11.06	1.20	76.76	1.56	7.38	1.77	81.21	1.39	5.98	0.55
10	71.78	2.96	10.59	1.20	77.72	1.70	7.29	0.87	82.50	0.85	4.73	1.60
20	72.60	2.78	10.30	1.90	77.56	1.77	7.67	0.93	82.20	1.12	5.05	1.17
30	71.60	3.54	11.19	1.60	78.19	1.66	7.91	0.42	81.49	0.98	4.96	0.67
60	73.00	3.81	10.28	2.48	77.99	2.00	7.97	0.61	81.49	1.09	5.60	0.37
120	71.67	3.36	10.81	1.32	78.67	1.73	7.68	0.20	82.21	1.25	4.83	1.29
180	73.52	3.01	9.85	2.81	79.06	1.60	6.88	1.00	83.11	1.22	4.96	2.06
240	71.67	3.36	10.81	1.32	79.82	1.97	8.13	1.42	82.82	1.45	5.37	1.73
360	75.15	2.89	10.03	4.43	79.77	2.21	8.20	1.44	81.58	3.80	5.02	2.79
480	72.53	2.77	10.14	1.82	78.82	1.46	7.05	0.79	82.85	0.92	5.03	1.80
600	74.53	2.93	10.03	3.81	79.28	2.09	8.09	0.93	83.27	1.31	5.68	2.16

ตารางที่ ก.2 อายุปูนฉาบ 7 วัน แสง 25000 ลักซ์

เวลา (นาท)	ฉาบร้อยละ 0 โดยเฉลี่ย				ฉาบร้อยละ 2 โดยเฉลี่ย				ฉาบร้อยละ 5 โดยเฉลี่ย			
	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E
0	70.72	3.88	10.03	0.00	78.49	4.82	7.67	0.00	81.13	3.28	5.52	0.00
5	72.04	3.13	10.09	1.52	78.60	2.48	7.97	2.36	84.90	1.14	4.79	4.40
10	74.65	3.34	9.88	3.97	78.12	1.64	8.33	3.27	82.59	1.06	5.00	2.71
20	72.29	3.43	10.92	1.86	78.49	1.77	8.22	3.10	84.53	1.92	3.84	4.03
30	73.77	3.29	8.92	3.30	77.47	1.75	8.36	3.31	87.04	3.86	5.32	5.94
60	74.79	2.87	9.45	4.23	79.80	1.88	7.87	3.22	84.57	1.35	4.67	4.03
120	74.00	3.01	10.33	3.41	77.29	2.01	8.50	3.17	83.91	0.97	3.74	4.03
180	74.63	2.94	9.89	4.02	77.80	1.93	7.99	2.99	84.34	1.60	3.85	3.99
240	74.50	3.12	9.65	3.87	78.42	1.84	8.19	3.03	83.67	2.92	3.81	3.08
360	74.82	2.96	9.63	4.22	80.36	1.74	7.70	3.60	83.62	1.18	4.82	3.33
480	74.83	2.81	9.39	4.29	77.51	1.90	8.23	3.13	82.17	6.81	4.33	3.87
600	76.18	3.03	9.31	5.57	79.77	1.62	7.54	3.45	82.35	2.01	5.24	1.78

ตารางที่ ก.3 อายุปูนฉาบ 7 วัน แสง UV

เวลา (นาที)	ฉาบร้อยละ 0 โดยเฉลี่ย				ฉาบร้อยละ 2 โดยเฉลี่ย				ฉาบร้อยละ 5 โดยเฉลี่ย			
	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E
0	77.33	3.33	10.03	0.00	78.49	2.82	7.67	0.00	81.13	2.20	5.52	0.00
5	77.20	3.25	8.54	1.50	80.78	2.04	7.30	2.45	82.30	0.98	5.24	1.71
10	74.37	4.31	10.15	3.12	79.29	2.07	7.62	1.10	82.05	1.02	4.91	1.62
20	74.19	4.06	10.41	3.25	78.37	2.27	8.25	0.81	74.77	0.68	4.79	6.58
30	77.47	3.20	8.18	1.86	80.83	1.37	6.42	3.02	83.03	1.49	5.17	2.06
60	77.83	4.74	12.02	2.49	77.64	2.57	9.52	2.05	80.30	1.42	6.19	1.32
120	76.22	2.94	4.79	5.37	79.93	2.18	7.75	1.58	74.03	3.13	10.34	8.63
180	75.90	3.07	9.08	1.74	75.99	2.62	7.90	2.52	84.31	0.98	5.42	3.41
240	76.62	2.82	9.55	1.00	79.87	1.99	7.54	1.62	83.30	0.94	5.74	2.52
360	74.80	3.29	10.00	2.53	77.53	1.69	7.69	1.48	82.54	0.81	4.76	2.12
480	73.03	2.56	9.76	4.38	79.59	1.27	6.87	2.06	80.52	1.51	6.57	1.40
600	75.99	2.30	10.10	1.69	78.47	2.07	9.81	2.27	84.42	1.12	5.49	3.46

ตารางที่ ก.4 อายุปูนฉาบ 14 วัน แสง 500 ลักซ์

เวลา (นาที)	ฉาบร้อยละ 0 โดยเฉลี่ย				ฉาบร้อยละ 2 โดยเฉลี่ย				ฉาบร้อยละ 5 โดยเฉลี่ย			
	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E
0	81.59	4.20	6.78	0.00	78.68	4.44	8.31	0.00	84.09	2.29	5.16	0.00
5	80.61	4.94	6.70	1.23	79.63	4.28	8.16	0.97	80.61	3.87	6.47	4.04
10	74.93	6.55	8.14	7.19	77.76	8.83	7.93	4.50	78.23	10.18	6.89	9.98
20	78.84	3.14	7.10	2.96	80.45	3.35	6.77	2.59	80.96	7.63	5.91	6.23
30	79.37	3.60	6.67	2.30	80.97	2.91	7.64	2.83	80.73	4.67	5.98	4.20
60	79.41	2.71	7.45	2.72	80.30	2.28	7.17	2.93	79.22	5.99	7.88	6.69
120	79.59	5.86	7.71	2.76	79.32	2.95	7.44	1.84	80.12	10.62	6.46	9.32
180	78.95	3.93	8.44	3.13	80.52	4.45	7.89	1.89	99.15	0.01	0.15	16.03
240	79.17	4.12	6.78	2.42	81.09	3.49	6.79	3.00	98.24	-1.23	-0.52	15.65
360	79.14	8.59	7.41	5.07	81.90	2.98	8.18	3.54	102.24	-4.96	-2.02	20.82
480	78.29	11.72	7.84	8.28	79.87	4.15	8.00	1.26	99.99	-2.26	-0.89	17.61
600	82.79	4.48	7.20	1.30	81.42	3.42	8.03	2.94	82.11	3.64	5.05	2.40

ตารางที่ ก.5 อายุปูนฉาบ 14 วัน แสง 25000 ลักซ์

เวลา (นาท)	ฉาบร้อยละ 0 โดยเฉลี่ย				ฉาบร้อยละ 2 โดยเฉลี่ย				ฉาบร้อยละ 5 โดยเฉลี่ย			
	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E
0	81.59	4.20	6.78	0.00	78.68	4.44	8.31	0.00	84.09	2.29	5.16	0.00
5	77.56	4.33	7.45	4.09	80.85	4.25	7.19	2.45	84.54	2.80	6.10	1.16
10	73.01	3.97	9.12	8.90	80.45	4.05	8.26	1.81	82.68	5.01	5.43	3.08
20	76.16	3.60	9.11	5.94	79.75	3.69	7.03	1.83	80.78	6.82	5.73	5.64
30	79.59	3.49	7.30	2.19	78.52	4.06	8.53	0.47	84.28	4.41	4.55	2.21
60	79.51	3.56	8.74	2.93	81.12	2.74	8.12	2.98	83.56	1.68	6.70	1.74
120	76.89	4.49	9.23	5.31	81.49	3.28	7.45	3.16	80.93	10.30	6.34	8.69
180	80.57	5.07	7.06	1.37	80.66	3.52	8.59	2.20	81.75	4.96	5.67	3.59
240	75.73	11.71	9.44	9.89	80.48	7.71	7.30	3.87	80.45	9.80	6.20	8.41
360	80.23	4.52	8.27	2.04	80.54	3.21	9.04	2.35	83.92	2.93	4.44	0.98
480	77.97	6.94	9.45	5.27	80.60	4.10	9.35	2.21	82.91	4.12	5.59	2.22
600	78.41	8.51	8.70	5.69	80.44	4.93	7.85	1.88	79.25	11.79	7.64	10.95

ตารางที่ ก.6 อายุปูนฉาบ 14 วัน แสง UV

เวลา (นาท)	ฉาบร้อยละ 0 โดยเฉลี่ย				ฉาบร้อยละ 2 โดยเฉลี่ย				ฉาบร้อยละ 5 โดยเฉลี่ย			
	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E
0	81.59	4.20	6.78	0.00	78.68	4.44	8.31	0.00	84.09	2.29	5.16	0.00
5	77.29	3.67	7.23	4.36	78.89	4.57	7.51	0.84	85.24	2.39	5.69	1.27
10	76.81	4.18	6.98	4.78	78.13	4.77	8.37	0.64	82.61	5.57	5.22	3.60
20	75.46	4.29	8.44	6.35	77.68	6.07	8.58	1.93	79.21	8.80	6.30	8.22
30	78.88	3.40	8.78	3.46	76.76	5.60	9.13	2.39	80.83	7.56	5.81	6.23
60	78.44	3.58	9.26	4.06	81.02	5.04	6.45	3.05	81.99	2.94	5.82	2.30
120	79.07	4.28	7.75	2.70	82.33	3.12	6.18	4.43	78.91	7.21	7.00	7.38
180	79.99	4.89	8.03	2.14	79.72	4.41	9.62	1.67	82.72	3.26	6.15	1.95
240	79.52	2.85	9.07	3.37	80.05	3.35	8.45	1.76	83.64	2.22	5.98	0.94
360	78.72	3.42	9.78	4.22	79.23	3.30	8.85	1.38	83.98	2.10	5.90	0.77
480	76.73	3.77	9.79	5.73	79.69	3.94	8.99	1.32	83.62	2.71	5.28	0.64
600	79.92	4.83	7.51	1.93	80.84	4.52	5.98	3.18	82.10	1.86	6.67	2.53

ตารางที่ ก.7 อายุปูนฉาบ 28 วัน แสง 500 ลักซ์

เวลา (นาที)	ฉาบร้อยละ 0 โดยเฉลี่ย				ฉาบร้อยละ 2 โดยเฉลี่ย				ฉาบร้อยละ 5 โดยเฉลี่ย			
	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E
0	80.08	5.20	7.36	0.00	84.76	2.45	6.19	0.00	80.00	8.57	8.79	0.00
5	77.72	4.22	8.82	2.94	78.19	8.58	7.05	9.03	87.04	3.88	5.97	8.92
10	76.09	3.79	8.12	4.30	80.50	5.27	4.93	5.26	84.63	3.48	8.00	6.93
20	81.08	2.77	8.06	2.72	83.19	2.63	4.56	2.27	86.53	2.64	5.90	9.28
30	74.51	0.92	5.46	7.28	79.95	5.05	8.14	5.81	85.84	2.55	4.48	9.43
60	77.24	5.10	7.62	2.85	80.93	1.28	6.04	4.01	85.97	3.12	7.12	8.25
120	79.62	4.94	8.45	1.21	84.21	2.25	5.42	0.97	86.41	2.18	7.30	9.17
180	79.90	4.78	6.83	0.70	74.31	1.59	6.74	10.50	84.18	4.40	7.37	6.07
240	79.40	4.94	8.03	0.99	84.09	4.14	5.82	1.86	83.92	2.90	6.20	7.36
360	81.81	4.57	8.08	1.98	81.70	4.11	4.75	3.77	86.04	2.27	7.25	8.86
480	80.00	3.57	7.40	1.63	82.51	4.02	5.16	2.93	84.49	2.88	7.55	7.35
600	80.19	3.43	7.07	1.80	84.99	2.51	5.85	0.41	84.81	2.94	7.32	7.55

ตารางที่ ก.8 อายุปูนฉาบ 28 วัน แสง 25000 ลักซ์

เวลา (นาที)	ฉาบร้อยละ 0 โดยเฉลี่ย				ฉาบร้อยละ 2 โดยเฉลี่ย				ฉาบร้อยละ 5 โดยเฉลี่ย			
	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E
0	80.08	5.20	7.36	0.00	84.76	2.45	6.19	0.00	80.00	8.57	8.79	0.00
5	79.64	5.13	8.13	0.89	79.42	5.16	5.84	6.00	82.33	9.90	7.42	3.01
10	78.79	4.88	8.43	1.71	83.45	2.37	4.65	2.02	86.52	2.16	5.69	9.65
20	77.94	6.59	7.05	2.57	84.17	2.42	6.45	0.65	83.20	8.22	6.92	3.72
30	81.20	3.15	7.72	2.36	81.79	8.92	6.67	7.14	84.64	6.09	6.18	5.87
60	81.51	3.19	5.54	3.07	84.68	1.96	5.84	0.61	86.75	2.65	4.13	10.12
120	80.65	3.22	8.05	2.17	81.99	4.28	3.71	4.14	86.78	2.75	5.26	9.61
180	86.94	4.02	5.79	7.14	81.93	6.08	5.45	4.66	78.10	10.26	8.51	2.56
240	78.25	7.36	6.74	2.90	80.63	6.58	6.34	5.84	82.50	10.77	6.88	3.84
360	79.91	5.64	8.73	1.45	81.35	5.82	4.62	5.04	81.81	9.67	7.76	2.36
480	78.05	8.61	7.74	3.99	80.97	6.66	4.67	5.87	84.14	5.63	4.92	6.38
600	80.12	9.34	7.95	4.18	82.30	8.68	6.67	6.72	80.24	1.96	7.35	6.77

ตารางที่ ก.9 อายุปูนฉาบ 28 วัน แสง UV

เวลา (นาท)	ฉาบร้อยละ 0 โดยเฉลี่ย				ฉาบร้อยละ 2 โดยเฉลี่ย				ฉาบร้อยละ 5 โดยเฉลี่ย			
	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E
0	80.08	5.20	7.36	0.00	84.76	2.45	6.19	0.00	80.00	8.57	8.79	0.00
5	79.47	6.46	7.54	1.41	81.50	1.33	5.51	3.51	86.16	3.40	4.25	9.24
10	72.11	2.69	8.56	8.44	84.77	3.35	6.07	0.91	80.56	2.39	7.45	6.35
20	77.65	9.22	8.11	4.76	83.60	2.13	6.67	1.30	82.84	3.50	8.07	5.86
30	81.15	9.46	7.28	4.39	80.25	4.02	5.99	4.78	85.14	3.08	6.50	7.86
60	79.56	5.84	7.38	0.82	80.52	6.29	4.59	5.94	85.11	2.26	6.78	8.36
120	78.93	5.88	8.24	1.60	79.56	5.82	5.83	6.21	85.47	3.45	7.68	7.57
180	78.83	6.40	7.71	1.77	80.64	4.92	5.26	4.89	87.38	2.88	5.67	9.83
240	78.64	4.51	7.62	1.62	79.80	7.78	6.74	7.30	84.43	2.71	4.30	8.61
360	83.97	2.27	6.57	4.93	80.62	5.74	5.61	5.32	86.90	2.80	6.63	9.25
480	77.48	9.79	9.09	5.55	80.05	6.97	6.00	6.53	86.75	2.46	7.03	9.27
600	80.51	3.63	7.70	1.66	85.05	7.70	5.85	5.27	87.22	2.22	7.67	9.68

ตารางที่ ก.10 อายุปูนขาว 7 วัน แสง 500 ลักซ์

เวลา (นาท)	โทเทเนียมไดออกไซด์											
	0%				2%				5%			
	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E
0	88.06	13.3	7.83	0	93.12	14.43	8.87	0	90.87	13.5	6.97	0
5	88.06	12.59	7.83	0.71	93.12	13.37	8.87	1.06	90.87	12.25	6.97	1.10
10	88.06	12.43	7.83	0.87	93.12	13.24	8.87	1.19	90.87	12.02	6.97	1.31
20	88.06	12.37	7.83	0.93	93.12	12.83	8.87	1.60	90.87	11.72	6.97	1.60
30	88.06	12.31	7.83	0.99	93.12	12.75	8.87	1.68	90.87	11.39	6.97	1.93
60	88.06	12.23	7.83	1.07	93.12	12.50	8.87	1.93	90.87	11.13	6.97	2.19
120	88.06	12.19	7.83	1.11	93.12	12.15	8.87	2.28	90.87	10.68	6.97	2.65
180	88.06	12.15	7.83	1.15	93.12	11.97	8.87	2.46	90.87	10.40	6.97	2.93
240	88.06	12.12	7.83	1.18	93.12	11.69	8.87	2.74	90.87	10.02	6.97	3.30
360	88.06	12.12	7.83	1.18	93.12	11.50	8.87	2.93	90.87	9.83	6.97	3.50
480	88.06	12.11	7.83	1.19	93.12	11.32	8.87	3.11	90.87	9.55	6.97	3.78
600	88.06	12.08	7.83	1.22	93.12	11.03	8.87	3.40	90.87	9.26	6.97	4.17

ตารางที่ ก.11 อายุปูนขาว 14 วัน แสง 500 ลักซ์

เวลา (นาท)	โทเทเนียมไดออกไซด์											
	0%				2%				5%			
	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E
0	92.44	14.78	7.81	0	93.43	14.53	8.78	0	93.33	14.77	8.43	0
5	92.44	14.07	7.81	0.71	93.43	13.82	8.78	0.71	93.33	14.02	8.43	0.75
10	92.44	13.91	7.81	0.87	93.43	13.71	8.78	0.82	93.33	13.83	8.43	0.94
20	92.44	13.85	7.81	0.93	93.43	13.33	8.78	1.20	93.33	13.57	8.43	1.20
30	92.44	13.79	7.81	0.99	93.43	13.27	8.78	1.26	93.33	13.26	8.43	1.51
60	92.44	13.71	7.81	1.07	93.43	13.05	8.78	1.48	93.33	13.03	8.43	1.74
120	92.44	13.67	7.81	1.11	93.43	12.72	8.78	1.81	93.33	12.59	8.43	2.18
180	92.44	13.63	7.81	1.15	93.43	12.56	8.78	1.97	93.33	12.33	8.43	2.44
240	92.44	13.60	7.81	1.18	93.43	12.30	8.78	2.23	93.33	11.97	8.43	2.80
360	92.44	13.60	7.81	1.18	93.43	12.13	8.78	2.40	93.33	11.80	8.43	2.97
480	92.44	13.59	7.81	1.19	93.43	11.96	8.78	2.57	93.33	11.53	8.43	3.24
600	92.44	13.56	7.81	1.22	93.43	11.70	8.78	2.83	93.33	11.16	8.43	3.61

ตารางที่ ก.12 อายุปูนขาว 28 วัน แสง 500 ลักซ์

เวลา (นาท)	โทเทเนียมไดออกไซด์											
	0%				2%				5%			
	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E
0	92.44	14.48	9.03	0	92.34	14.34	9.04	0	92.67	14.36	8.8	0
5	92.44	13.77	9.03	0.71	92.34	13.63	9.04	0.71	92.67	13.65	8.8	0.71
10	92.44	13.60	9.03	0.88	92.34	13.47	9.04	0.87	92.67	13.43	8.8	0.93
20	92.44	13.52	9.03	0.96	92.34	13.27	9.04	1.07	92.67	13.13	8.8	1.23
30	92.44	13.47	9.03	1.01	92.34	12.77	9.04	1.57	92.67	12.79	8.8	1.57
60	92.44	13.38	9.03	1.10	92.34	12.68	9.04	1.66	92.67	12.42	8.8	1.94
120	92.44	13.31	9.03	1.17	92.34	12.40	9.04	1.94	92.67	12.14	8.8	2.22
180	92.44	13.24	9.03	1.24	92.34	12.03	9.04	2.31	92.67	11.66	8.8	2.70
240	92.44	13.18	9.03	1.30	92.34	11.84	9.04	2.50	92.67	11.37	8.8	2.99
360	92.44	13.12	9.03	1.36	92.34	11.55	9.04	2.79	92.67	10.98	8.8	3.38
480	92.44	13.05	9.03	1.43	92.34	11.35	9.04	2.99	92.67	10.78	8.8	3.58
600	92.44	12.96	9.03	1.52	92.34	11.16	9.04	3.18	92.67	10.49	8.8	3.87



ตารางที่ ก.13 อายุปูนขาว 7 วัน แสง 25,000 ลักซ์

เวลา (นาท)	โทเทเนียมไดออกไซด์											
	0%				2%				5%			
	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E
0	91.01	12.23	6.02	0	90.31	13.34	9.08	0	90.22	14.21	9.02	0
5	91.01	11.52	6.02	0.71	90.31	11.24	9.08	2.10	90.22	11.93	9.02	2.28
10	91.01	10.66	6.02	1.57	90.31	9.36	9.08	3.98	90.22	9.84	9.02	4.37
20	91.01	10.30	6.02	1.93	90.31	7.41	9.08	5.93	90.22	7.68	9.02	6.53
30	91.01	9.92	6.02	2.31	90.31	6.42	9.08	6.92	90.22	6.89	9.02	7.32
60	91.01	9.54	6.02	2.69	90.31	5.43	9.08	7.91	90.22	5.70	9.02	8.51
120	91.01	9.15	6.02	3.08	90.31	4.43	9.08	8.91	90.22	5.10	9.02	9.11
180	91.01	9.05	6.02	3.18	90.31	3.44	9.08	9.90	90.22	4.11	9.02	10.10
240	91.01	9.00	6.02	3.23	90.31	2.94	9.08	10.40	90.22	3.51	9.02	10.70
360	91.01	8.92	6.02	3.31	90.31	2.44	9.08	10.90	90.22	2.78	9.02	11.43
480	91.01	8.85	6.02	3.38	90.31	1.95	9.08	11.39	90.22	1.99	9.02	12.22
600	91.01	8.77	6.02	3.46	90.31	1.45	9.08	11.89	90.22	1.19	9.02	13.02

ตารางที่ ก.14 อายุปูนขาว 14 วัน แสง 25,000 ลักซ์

เวลา (นาท)	โทเทเนียมไดออกไซด์											
	0%				2%				5%			
	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E
0	90.21	13.89	7.34	0	91.21	14.67	8.78	0	93.78	14.32	8.89	0
5	90.21	13.06	7.34	0.83	91.21	12.17	8.78	2.50	93.78	11.64	8.89	2.68
10	90.21	12.20	7.34	1.69	91.21	10.47	8.78	4.20	93.78	9.55	8.89	4.77
20	90.21	11.84	7.34	2.05	91.21	8.61	8.78	6.06	93.78	7.39	8.89	6.93
30	90.21	11.46	7.34	2.43	91.21	7.62	8.78	7.05	93.78	6.60	8.89	7.72
60	90.21	11.08	7.34	2.81	91.21	6.63	8.78	8.04	93.78	5.41	8.89	8.91
120	90.21	10.69	7.34	3.20	91.21	5.63	8.78	9.04	93.78	4.81	8.89	9.51
180	90.21	10.59	7.34	3.30	91.21	4.64	8.78	10.03	93.78	3.82	8.89	10.50
240	90.21	10.54	7.34	3.35	91.21	4.14	8.78	10.53	93.78	3.22	8.89	11.10
360	90.21	10.46	7.34	3.43	91.21	3.64	8.78	11.03	93.78	2.49	8.89	11.83
480	90.21	10.39	7.34	3.50	91.21	3.15	8.78	11.52	93.78	1.70	8.89	12.62
600	90.21	10.31	7.34	3.58	91.21	2.65	8.78	12.02	93.78	0.90	8.89	13.42

ตารางที่ ก.15 อายุปูนขาว 28 วัน แสง 25,000 ลักซ์

เวลา (นาที)	โทเทเนียมไดออกไซด์											
	0%				2%				5%			
	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E
0	90.34	14.89	8.92	0	92.34	15.01	8.89	0	93.33	14.98	8.62	0
5	90.34	14.06	8.03	0.83	92.34	12.50	8.89	2.51	93.33	12.29	8.62	2.69
10	90.34	13.19	8.03	1.70	92.34	10.80	8.89	4.21	93.33	10.20	8.62	4.78
20	90.34	12.82	8.03	2.07	92.34	8.93	8.89	6.08	93.33	8.03	8.62	6.95
30	90.34	12.43	8.03	2.46	92.34	7.93	8.89	7.08	93.33	7.23	8.62	7.75
60	90.34	12.02	8.03	2.87	92.34	6.91	8.89	8.10	93.33	6.01	8.62	8.97
120	90.34	11.57	8.03	3.32	92.34	5.85	8.89	9.16	93.33	5.35	8.62	9.63
180	90.34	11.41	8.03	3.48	92.34	4.80	8.89	10.21	93.33	4.30	8.62	10.68
240	90.34	11.30	8.03	3.59	92.34	4.24	8.89	10.77	93.33	3.64	8.62	11.34
360	90.34	11.10	8.03	3.79	92.34	3.62	8.89	11.39	93.33	2.79	8.62	12.19
480	90.34	10.91	8.03	3.98	92.34	3.01	8.89	12.00	93.33	1.88	8.62	13.10
600	90.34	10.71	8.03	4.18	92.34	2.39	8.89	12.62	93.33	0.96	8.62	14.02

ตารางที่ ก.16 อายุปูนขาว 7 วัน แสงยูวี

เวลา (นาที)	โทเทเนียมไดออกไซด์											
	0%				2%				5%			
	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E
0	91.34	14.33	7.87	0	93.2	14.54	9.97	0	92.32	14.65	9.87	0
5	91.34	13.63	7.87	0.70	93.2	13.06	9.97	1.48	92.32	11.08	9.87	3.57
10	91.34	12.78	7.87	1.55	93.2	10.35	9.97	4.19	92.32	9.67	9.87	4.98
20	91.34	12.44	7.87	1.89	93.2	9.10	9.97	5.44	92.32	6.79	9.87	7.86
30	91.34	12.08	7.87	2.25	93.2	7.75	9.97	6.79	92.32	5.58	9.87	9.07
60	91.34	11.76	7.87	2.57	93.2	6.95	9.97	7.59	92.32	4.28	9.87	10.37
120	91.34	11.68	7.87	2.65	93.2	5.75	9.97	8.79	92.32	3.79	9.87	10.86
180	91.34	11.71	7.87	2.62	93.2	4.45	9.97	10.09	92.32	3.20	9.87	11.45
240	91.34	11.56	7.87	2.77	93.2	4.27	9.97	10.27	92.32	2.69	9.87	11.96
360	91.34	11.60	7.87	2.73	93.2	3.82	9.97	10.72	92.32	2.50	9.87	12.15
480	91.34	11.66	7.87	2.67	93.2	3.42	9.97	11.12	92.32	1.80	9.87	12.85
600	91.34	11.71	7.87	2.62	93.2	3.04	9.97	11.50	92.32	1.17	9.87	13.48

ตารางที่ ก.17 อายุปูนขาว 14 วัน แสงยูวี

เวลา (นาท)	โทเทเนียมไดออกไซด์											
	0%				2%				5%			
	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E
0	92.34	14.57	9.01	0	93.44	14.87	9.31	0	93.45	14.93	8.91	0
5	92.34	13.76	9.01	0.81	93.44	13.13	9.31	1.74	93.45	10.88	8.91	4.05
10	92.34	12.90	9.01	1.67	93.44	10.39	9.31	4.48	93.45	9.45	8.91	5.48
20	92.34	12.54	9.01	2.03	93.44	9.13	9.31	5.74	93.45	6.54	8.91	8.39
30	92.34	12.17	9.01	2.40	93.44	7.76	9.31	7.11	93.45	5.32	8.91	9.61
60	92.34	11.92	9.01	2.65	93.44	6.95	9.31	7.92	93.45	4.01	8.91	10.92
120	92.34	11.90	9.01	2.67	93.44	5.75	9.31	9.12	93.45	3.51	8.91	11.42
180	92.34	11.87	9.01	2.70	93.44	4.43	9.31	10.44	93.45	2.92	8.91	12.01
240	92.34	11.81	9.01	2.76	93.44	4.25	9.31	10.62	93.45	2.40	8.91	12.53
360	92.34	11.78	9.01	2.79	93.44	3.79	9.31	11.08	93.45	2.21	8.91	12.72
480	92.34	11.76	9.01	2.81	93.44	3.39	9.31	11.48	93.45	1.50	8.91	13.43
600	92.34	11.74	9.01	2.83	93.44	3.01	9.31	11.87	93.45	0.87	8.91	14.06

ตารางที่ ก.18 อายุปูนขาว 28 วัน แสงยูวี

เวลา (นาท)	โทเทเนียมไดออกไซด์											
	0%				2%				5%			
	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E
0	92.42	14.98	9.23	0	93.41	14.98	8.65	0	92.13	14.98	8.67	0
5	92.42	14.19	9.23	0.81	93.41	13.24	8.65	1.74	92.13	10.93	8.67	4.05
10	92.42	13.33	9.23	1.67	93.41	10.50	8.65	4.48	92.13	9.50	8.67	5.48
20	92.42	12.97	9.23	2.03	93.41	9.24	8.65	5.74	92.13	6.59	8.67	8.39
30	92.42	12.60	9.23	2.40	93.41	7.87	8.65	7.11	92.13	5.37	8.67	9.61
60	92.42	12.25	9.23	2.76	93.41	7.06	8.65	7.92	92.13	4.06	8.67	10.92
120	92.42	12.13	9.23	2.88	93.41	5.86	8.65	9.12	92.13	3.56	8.67	11.42
180	92.42	12.10	9.23	2.92	93.41	4.54	8.65	10.44	92.13	2.97	8.67	12.01
240	92.42	12.07	9.23	3.02	93.41	4.36	8.65	10.62	92.13	2.45	8.67	12.53
360	92.42	12.07	9.23	3.04	93.41	3.90	8.65	11.08	92.13	2.26	8.67	12.72
480	92.42	12.00	9.23	3.04	93.41	3.50	8.65	11.48	92.13	1.55	8.67	13.43
600	92.42	11.95	9.23	3.05	93.41	3.12	8.65	11.87	92.13	0.92	8.67	14.06

ตารางที่ ก.19 อายุปูนฉาบ 7 วัน แสงขาว 500 ลักซ์ โทเทเนียมไดออกไซด์เกรดทดลอง

เวลา (นาที)	โทเทเนียมไดออกไซด์											
	0%				2%				5%			
	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E
0	70.72	2.88	10.03	0.00	64.83	23.21	26.16	0	63.65	21.3	27.73	0
5	71.19	3.28	11.06	1.20	64.83	22.99	26.16	0.22	63.65	20.32	27.73	0.98
10	71.78	2.96	10.59	1.20	64.83	22.81	26.16	0.4	63.65	20.01	27.73	1.29
20	72.60	2.78	10.30	1.90	64.83	22.42	26.16	0.79	63.65	19.82	27.73	1.48
30	71.60	3.54	11.19	1.60	64.83	22.30	26.16	0.91	63.65	19.22	27.73	2.08
60	73.00	3.81	10.28	2.48	64.83	21.43	26.16	1.78	63.65	18.90	27.73	2.4
120	71.67	3.36	10.81	1.32	64.83	22.12	26.16	1.09	63.65	17.89	27.73	3.41
180	73.52	3.01	9.85	2.81	64.83	21.22	26.16	1.99	63.65	17.61	27.73	3.69
240	71.67	3.36	10.81	1.32	64.83	20.60	26.16	2.61	63.65	17.09	27.73	4.21
360	75.15	2.89	10.03	4.43	64.83	19.88	26.16	3.33	63.65	16.91	27.73	4.39
480	72.53	2.77	10.14	1.82	64.83	19.62	26.16	3.59	63.65	16.67	27.73	4.63
600	74.53	2.93	10.03	3.81	64.83	19.19	26.16	4.02	63.65	16.12	27.73	5.18

ตารางที่ ก.20 อายุปูนฉาบ 7 วัน แสงขาว 25,000 ลักซ์ โทเทเนียมไดออกไซด์เกรดทดลอง

เวลา (นาที)	โทเทเนียมไดออกไซด์											
	0%				2%				5%			
	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E
0	70.72	3.88	10.03	0.00	65.71	18.66	23.95	0	66.28	20.98	24.54	0
5	72.04	3.13	10.09	1.20	65.71	18.25	23.95	0.41	66.28	18.91	24.54	2.07
10	74.65	3.34	9.88	1.20	65.71	17.62	23.95	1.04	66.28	18.22	24.54	2.76
20	72.29	3.43	10.92	1.90	65.71	17.10	23.95	1.56	66.28	16.78	24.54	4.2
30	73.77	3.29	8.92	1.60	65.71	15.89	23.95	2.77	66.28	14.24	24.54	6.74
60	74.79	2.87	9.45	2.48	65.71	13.77	23.95	4.89	66.28	13.81	24.54	7.17
120	74.00	3.01	10.33	1.32	65.71	10.72	23.95	7.94	66.28	12.21	24.54	8.77
180	74.63	2.94	9.89	2.81	65.71	8.87	23.95	9.79	66.28	10.15	24.54	10.83
240	74.50	3.12	9.65	1.32	65.71	8.07	23.95	10.59	66.28	8.91	24.54	12.07
360	74.82	2.96	9.63	4.43	65.71	6.72	23.95	11.94	66.28	7.60	24.54	13.38
480	74.83	2.81	9.39	1.82	65.71	6.23	23.95	12.43	66.28	6.90	24.54	14.08
600	76.18	3.03	9.31	3.81	65.71	5.38	23.95	13.28	66.28	4.96	24.54	16.02

ตารางที่ ก.21 อายุปูนฉาบ 7 วัน แสงยูวี โทเทเนียมไดออกไซด์เกรดทดลอง

เวลา (นาท)	โทเทเนียมไดออกไซด์											
	0%				2%				5%			
	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E
0	77.33	3.33	10.03	0.00	54.42	28.23	33.44	0	63.08	23.63	25.24	0
5	77.20	3.25	8.54	1.50	54.42	25.22	33.44	3.01	63.08	20.26	25.24	3.37
10	74.37	4.31	10.15	3.12	54.42	24.63	33.44	3.6	63.08	20.11	25.24	3.52
20	74.19	4.06	10.41	3.25	54.42	24.61	33.44	3.62	63.08	18.38	25.24	5.25
30	77.47	3.20	8.18	1.86	54.42	23.72	33.44	4.51	63.08	18.26	25.24	5.37
60	77.83	4.74	12.02	2.49	54.42	23.19	33.44	5.04	63.08	17.59	25.24	6.04
120	76.22	2.94	4.79	5.37	54.42	22.07	33.44	6.16	63.08	16.56	25.24	7.07
180	75.90	3.07	9.08	1.74	54.42	21.79	33.44	6.44	63.08	16.34	25.24	7.29
240	76.62	2.82	9.55	1.00	54.42	21.48	33.44	6.75	63.08	14.84	25.24	8.79
360	74.80	3.29	10.00	2.53	54.42	16.66	33.44	11.57	63.08	10.43	25.24	13.2
480	73.03	2.56	9.76	4.38	54.42	15.24	33.44	12.99	63.08	7.02	25.24	16.61
600	75.99	2.30	10.10	1.69	54.42	14.51	33.44	13.72	63.08	5.91	25.24	17.72

ตารางที่ ก.22 อายุปูนฉาบ 7 วัน แสงขาว 500 ลักซ์ โทเทเนียมไดออกไซด์เกรดตัดแปรร M-01

เวลา (นาท)	โทเทเนียมไดออกไซด์											
	0%				2%				5%			
	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E
0	70.72	2.88	10.03	0.00				0				0
5	71.19	3.28	11.06	1.20				1.1733				0.73
10	71.78	2.96	10.59	1.20				2.3333				1.8267
20	72.60	2.78	10.30	1.90				2.8967				3.8367
30	71.60	3.54	11.19	1.60				4.4967				4.0533
60	73.00	3.81	10.28	2.48				5.22				12.83
120	71.67	3.36	10.81	1.32				7.44				17.863
180	73.52	3.01	9.85	2.81				10.96				23.04
240	71.67	3.36	10.81	1.32				14.177				24.1
360	75.15	2.89	10.03	4.43				15.43				27.653
480	72.53	2.77	10.14	1.82				15.48				30.793
600	74.53	2.93	10.03	3.81				22.98				31.813

ตารางที่ ก.23 อายุปูนฉาบ 7 วัน แสงขาว 25,000 ลักซ์ โทเทเนียมไดออกไซด์เกรดดัดแปร M-01

เวลา (นาทิจ)	โทเทเนียมไดออกไซด์											
	0%				2%				5%			
	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E
0	70.72	3.88	10.03	0.00				0				0.0
5	72.04	3.13	10.09	1.52				5.28				3.2
10	74.65	3.34	9.88	3.97				5.6433				3.5
20	72.29	3.43	10.92	1.86				6				6.1
30	73.77	3.29	8.92	3.30				6.7133				7.8
60	74.79	2.87	9.45	4.23				7.0233				9.2
120	74.00	3.01	10.33	3.41				7.5067				10.6
180	74.63	2.94	9.89	4.02				8.3633				14.2
240	74.50	3.12	9.65	3.87				8.64				19.7
360	74.82	2.96	9.63	4.22				10.54				20.3
480	74.83	2.81	9.39	4.29				14.433				20.6
600	76.18	3.03	9.31	5.57				22.74				29.8

ตารางที่ ก.24 อายุปูนฉาบ 7 วัน แสงยูวี โทเทเนียมไดออกไซด์เกรดดัดแปร M-01

เวลา (นาทิจ)	โทเทเนียมไดออกไซด์											
	0%				2%				5%			
	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E
0	77.33	3.33	10.03	0.00				0.0				0
5	77.20	3.25	8.54	1.50				1.1				1.6567
10	74.37	4.31	10.15	3.12				1.6				1.8367
20	74.19	4.06	10.41	3.25				3.4				2.78
30	77.47	3.20	8.18	1.86				6.7				6.0233
60	77.83	4.74	12.02	2.49				17.3				14.527
120	76.22	2.94	4.79	5.37				21.5				29.75
180	75.90	3.07	9.08	1.74				28.1				31.287
240	76.62	2.82	9.55	1.00				29.4				31.517
360	74.80	3.29	10.00	2.53				30.1				32.007
480	73.03	2.56	9.76	4.38				30.3				34.297
600	75.99	2.30	10.10	1.69				31.8				34.367

ตารางที่ ก.25 อายุปูนฉาบ 7 วัน แสงขาว 500 ลักซ์ โทเทเนียมไดออกไซด์เกรดตัดแปร M-02

เวลา (นาที)	โทเทเนียมไดออกไซด์											
	0%				2%				5%			
	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E
0	70.72	2.88	10.03	0.00	64	21.36	29.9	0	59.81	25.07	27.46	0
5	71.19	3.28	11.06	1.20	66.05	20.01	25.9	7.4	65	22.95	26.05	8.72
10	71.78	2.96	10.59	1.20	66.4	19.95	24.69	9.02	67.34	20.52	20.7	18.84
20	72.60	2.78	10.30	1.90	66.85	19.48	23.83	10.8	69.76	17.33	18.96	26.19
30	71.60	3.54	11.19	1.60	67.84	18.62	16.77	19.71	70.19	17.14	18.26	27.51
60	73.00	3.81	10.28	2.48	68.02	17.86	14.91	22.51	70.62	15.89	17.22	30.23
120	71.67	3.36	10.81	1.32	68.92	16.86	13.66	25.66	70.74	15.77	14.88	32.81
180	73.52	3.01	9.85	2.81	70.27	15.79	11.37	30.37	70.82	14.5	14.64	34.4
240	71.67	3.36	10.81	1.32	70.38	15.03	10.58	32.03	70.99	11.01	12.34	40.36
360	75.15	2.89	10.03	4.43	70.68	14.80	8.74	34.4	71.74	9.15	11.53	43.78
480	72.53	2.77	10.14	1.82	71.88	13.72	6.17	39.25	72.22	8.84	9.9	46.2
600	74.53	2.93	10.03	3.81	71.8	11.24	5.48	42.34	74.67	8.39	9.13	49.87

ตารางที่ ก.26 อายุปูนฉาบ 7 วัน แสงขาว 25,000 ลักซ์ โทเทเนียมไดออกไซด์เกรดตัดแปร M-02

เวลา (นาที)	โทเทเนียมไดออกไซด์											
	0%				2%				5%			
	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E
0	70.72	3.88	10.03	0.00	59.88	25.56	31.07	0	64.27	24.44	29.9	0
5	72.04	3.13	10.09	1.52	64.08	16.49	28.85	15.49	66.84	21.99	25.9	9.02
10	74.65	3.34	9.88	3.97	65.88	24.41	28.38	9.84	64.56	18.34	24.69	11.6
20	72.29	3.43	10.92	1.86	66.08	18.79	21.47	22.57	64.4	18.04	23.83	12.6
30	73.77	3.29	8.92	3.30	66.67	19.14	21.08	23.2	70	17.01	16.77	26.29
60	74.79	2.87	9.45	4.23	66.75	14.95	18.14	30.41	69.74	11.25	14.91	33.65
120	74.00	3.01	10.33	3.41	69.95	15.73	17.2	33.77	73.15	11.96	13.66	37.6
180	74.63	2.94	9.89	4.02	70.42	12.67	14.89	39.61	75.76	8.48	10.37	46.98
240	74.50	3.12	9.65	3.87	70.63	11.94	14.07	41.37	77.06	6.21	8.58	52.34
360	74.82	2.96	9.63	4.22	70.67	12.85	12.83	41.74	78.48	4.11	7.74	56.7
480	74.83	2.81	9.39	4.29	70.78	9.44	12.57	45.52	77.05	2.02	6.17	58.93
600	76.18	3.03	9.31	5.57	71.77	9.83	11.48	47.21	77.83	1.08	5.48	61.34

ตารางที่ ก.27 อายุปูนฉาบ 7 วัน แสงยูวี โทเทเนียมไดออกไซด์เกรดตัดแปร M-02

เวลา (นาที)	โทเทเนียมไดออกไซด์											
	0%				2%				5%			
	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E	L*	a*	b*	E
0	77.33	3.33	10.03	0.00	57.76	27.99	30.57	0	62.36	23.63	29.6	0
5	77.20	3.25	8.54	1.50	63.03	21.97	29.29	12.57	66.77	19.37	25.95	12.32
10	74.37	4.31	10.15	3.12	65.04	20.30	25.68	19.86	69.44	15.38	18.87	26.06
20	74.19	4.06	10.41	3.25	66.32	18.93	21.95	26.24	70.61	13.93	16.76	30.79
30	77.47	3.20	8.18	1.86	67.58	18.95	20.78	28.65	71	11.88	15.25	34.74
60	77.83	4.74	12.02	2.49	69.74	18.53	17.71	34.3	71.92	11.22	14.39	37.18
120	76.22	2.94	4.79	5.37	69.74	16.23	15.94	38.37	72.69	11.1	13.23	39.23
180	75.90	3.07	9.08	1.74	69.79	18.72	14.86	37.01	73.99	9.81	10.39	44.66
240	76.62	2.82	9.55	1.00	70.12	16.17	14.16	40.59	74.79	8.61	8.73	48.32
360	74.80	3.29	10.00	2.53	70.12	13.76	12.82	44.34	75.64	8.04	7.6	50.87
480	73.03	2.56	9.76	4.38	71.39	15.20	10.69	46.3	75.9	6.02	6.68	54.07
600	75.99	2.30	10.10	1.69	73.92	10.09	9.31	55.32	82.39	4.84	3.56	64.86



**ภาคผนวก ข**  
**ผลการทดสอบกำลังของปูนฉาบที่ทำจากปูนซีเมนต์ขาว**

ตารางที่ ข.1 สรุปผลการทดสอบด้านกำลังของปูนฉาบที่ทำจากปูนขาวที่อายุ 7 วันในหน่วย KN

ตัวอย่าง ที่	TiO2 (0%)		TiO2 (2%)		TiO2 (5%)	
	weight (Kg)	strength (KN)	weight (Kg)	strength (KN)	weight (Kg)	strength (KN)
1	7.03	463	7.08	329	6.87	370
2	7.04	508	7.04	296	6.89	353
3	7.07	488	6.95	380	6.9	328

ตารางที่ ข.2 สรุปผลการทดสอบด้านกำลังของปูนฉาบที่ทำจากปูนขาวที่อายุ 14 วันในหน่วย KN

ตัวอย่าง ที่	TiO2 (0%)		TiO2 (2%)		TiO2 (5%)	
	weight (Kg)	strength (KN)	weight (Kg)	strength (KN)	weight (Kg)	strength (KN)
1	7	490	6.98	383	6.96	272
2	6.91	510	7.12	243	7.05	310
3	6.97	480	7.04	430	7.1	275

ตารางที่ ข.3 สรุปผลการทดสอบด้านกำลังของปูนฉาบที่ทำจากปูนขาวที่อายุ 28 วันในหน่วย KN

ตัวอย่าง ที่	TiO2 (0%)		TiO2 (2%)		TiO2 (5%)	
	weight (Kg)	strength (KN)	weight (Kg)	strength (KN)	weight (Kg)	strength (KN)
1	6.97	489	7.11	512	7.01	448
2	7.04	495	7.09	644	7.04	466
3	7.02	542	7.07	540	6.95	381

ตารางที่ ข.4 สรุปผลการทดสอบด้านกำลังของปูนฉาบที่ทำจากปูนขาวที่อายุ 7 วันในหน่วย ksc

ตัวอย่าง ที่	TiO2 (0%)		TiO2 (2%)		TiO2 (5%)	
	weight (Kg)	strength (ksc)	weight (Kg)	strength (ksc)	weight (Kg)	strength (ksc)
1	7.03	210	7.08	149	6.87	168
2	7.04	230	7.04	134	6.89	160
3	7.07	221	6.95	172	6.9	149

ตารางที่ ข.5 สรุปผลการทดสอบด้านกำลังของปูนฉาบที่ทำจากปูนขาวที่อายุ 14 วันในหน่วย ksc

ตัวอย่าง ที่	TiO2 (0%)		TiO2 (2%)		TiO2 (5%)	
	weight (Kg)	strength (ksc)	weight (Kg)	strength (ksc)	weight (Kg)	strength (ksc)
1	7	222	6.98	174	6.96	123
2	6.91	231	7.12	110	7.05	140
3	6.97	217	7.04	195	7.1	125

ตารางที่ ข.6 สรุปผลการทดสอบด้านกำลังของปูนฉาบที่ทำจากปูนขาวที่อายุ 28 วันในหน่วย ksc

ตัวอย่าง ที่	TiO2 (0%)		TiO2 (2%)		TiO2 (5%)	
	weight (Kg)	strength (ksc)	weight (Kg)	strength (ksc)	weight (Kg)	strength (ksc)
1	6.97	222	7.11	232	7.01	203
2	7.04	224	7.09	292	7.04	211
3	7.02	246	7.07	245	6.95	173

**ภาคผนวก ค**  
**เอกสารความปลอดภัยของสารเคมี**

## 1. ชื่อเคมี IUPAC: Titanium (IV) oxide

ชื่อเคมีทั่วไป	Baytitan ; Titanium oxide			
ชื่อท้องถิ่น	Rutile; Anatase; Brookite; Titanium(IV)Dioxide; Tioxide; Atlas white titanium dioxide; Bayertitan; Baytitan; Calcotone white t; Hombitan; Kronos titanium dioxide; Levanox white rkb; Runa rh20; Tiofine; Titania; Tionat.d.; Tipaque; Titafrance; Titanox; Titanox 2010; Zopaque; Cosmetic white C47-9623; Horse head a-410; Horse head a-420; Horse head r-710; Unitane o-110; Unitane o-220; Unitane or-150; Unitane or-340; Unitane or-342; Unitane or-350; Unitane or-540; Unitane or-640; C.I. 77891; C.I. pigment white 6; Cosmetic white C47-5175; 1700 White; A-fil cream; Austiox; Bayeritian; Flamenco; Kronos; KH360; Rayox; Rutioxcr; Ti-pure; Titanium peroxide; Titan white; Trioxide(s); Tronox; Tioxiderhd; Kronos cl 220; Tioxidersm; Titanoxranc; Austiox r-cr 3; R 680; RO 2; Ti-pure r 900; Tioxide ad-m; Tioxider.xl; Cab-o-ti; Ti-pure r 901; Tipaque r 820; Kronos rn 56; Kronos rn 40p; Bayertitan a; Bayertitan r-u-f; Tioxide r-cr; P 25 (oxide); Unitane or 650; Unitane or 450; Zopaqueldc; Runaarh 20; Runaarh 200; Hombitan r 101d; Hombitan r 610k; Kronos 2073; P 25; Unitane or 572; Ti-pure r 101; Ti-pure r 915; Titanic anhydride; Titanic acid anhydride; Titanic oxide; Titanium white; Octahedrite; Unitane; Titanium Dioxide P25			
สูตรโมเลกุล	$\text{TiO}_2$	สูตรโครงสร้าง		
รหัส IMO	CAS No	13463-67-7	รหัส EC NO.	-
	UN/ID No.	-	รหัส RTECS	XR 2275000
รหัส EUEINECS/ELINCS	236-675-5	ชื่อวงศ์	-	
ชื่อผู้ผลิต/นำเข้า	ASHLAND CHEMICAL CO.			
แหล่งข้อมูลอื่นๆ	-			

## 2. การใช้ประโยชน์ (Uses)

- ใช้ในการผลิตอะลูมิเนียมคลอไรด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารเคลือบผิว สารเพิ่มสี ใช้ในการทำฟัน ใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษ

### 3. ค่ามาตรฐานและความเป็นพิษ (Standard and Toxicity)

LD <sub>50</sub> (มก./กก.) :	- (-)	LC <sub>50</sub> (มก./ม <sup>3</sup> ) :	- / -	ชั่วโมง (-)	
IDLH(ppm) :	1550	ADI(ppm) :	-	MAC(ppm) :	-
PEL-TWA(ppm) :	4.65	PEL-STEL(ppm) :	-	PEL-C(ppm) :	-
TLV-TWA(ppm) :	3.1	TLV-STEL(ppm) :	-	TLV-C(ppm) :	-
พรบ. ส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2535(ppm)					
:					
พรบ. โรงงาน พ.ศ. 2535 (ppm) :					
-					
พรบ. ควบคุมยุทธภัณฑ์ พ.ศ. 2530 : Γ ชนิดที่ 1 Γ ชนิดที่ 2 Γ ชนิดที่ 3					
พรบ. คุ้มครองแรงงาน พ.ศ. 2541 (ppm) :					
เฉลี่ย 8 ชั่วโมง - ระยะสั้น - ค่าสูงสุด - สารเคมีอันตราย : Γ					
พรบ. วัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 : Γ ชนิดที่ 1 Γ ชนิดที่ 2 Γ ชนิดที่ 3 Γ ชนิดที่ 4					
หน่วยงานที่รับผิดชอบ :					

### 4. คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

สถานะ :	ของแข็ง	สี :	ขาว	กลิ่น :	ไม่มีกลิ่น	น.โมเลกุล :	79.90
จุดเดือด(°ซ.) :	2500-3000			จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง(°ซ.) :	1840		
ความถ่วงจำเพาะ(น้ำ=1) :	3.9			ความหนาแน่นไอ(อากาศ=1) :	-		
ความหนืด(mPa.sec) :	-	ความดันไอ(มม.ปรอท) :	-	ที่ -°ซ.			
ความสามารถในการละลายน้ำที่(กรัม/100 มล.) :	ไม่ละลาย	ที่ 20 ซ.		ความเป็นกรด-ด่าง (pH) :	7-8	ที่ 20 ซ.	
แฟคเตอร์แปลงหน่วย 1 ppm = 3.27	มก./ม <sup>3</sup>	หรือ 1 มก./ม <sup>3</sup> = 0.31		ppm ที่ 25		°ซ.	
ข้อมูลทางกายภาพและเคมีอื่น ๆ :							
- สารนี้สามารถละลายได้ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่ร้อน และกรดไฮโดรฟลูออริก							

### 5. อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

สัมผัสทางหายใจ	- การหายใจเอาฝุ่นของสารนี้เข้าไปเป็นระยะเวลานาน หรือการสัมผัสซ้ำ จะทำให้เกิดอาการหลอดลมอักเสบเรื้อรัง ทำให้เกิดอาการไอ และหายใจติดขัด
สัมผัสทางผิวหนัง	- การสัมผัสผิวหนัง สารนี้ไม่ก่อให้เกิดการระคายเคืองและทำอันตรายอื่นๆ ต่อผิวหนังและไม่ดูดซึมผ่านผิวหนังเข้าสู่ร่างกาย
กินหรือกลืนเข้าไป	- การกลืนหรือกินเข้าไปจะไม่ก่อให้เกิดอันตราย
สัมผัสถูกตา	- การสัมผัสถูกตา จะก่อให้เกิดการระคายเคือง, ปวดแสบปวดร้อน, น้ำตาไหล, ตาแดง และบวม
การก่อมะเร็ง ความผิดปกติอื่น ๆ	-

### 6. ความคงตัวและการเกิดปฏิกิริยา (Stability and Reaction)

- ความคงตัวทางเคมี : สารนี้มีความเสถียร
- สารเคมีอันตรายที่เกิดจากการสลายตัว : คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนนอกไซด์
- อันตรายจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ : ไม่เกิดขึ้น

### 7. การเกิดอัคคีภัยและการระเบิด (Fire and Explosion)

จุดวาบไฟ(°ซ.) :-	จุดลุกติดไฟได้เอง(°ซ.) :-
ค่า LEL % :-	UEL % :-
LFL % :-	UFL % :-
NFPA Code :	
- สารนี้ไม่ไวไฟ	
- กรณีเกิดเพลิงไหม้ให้เลือกใช้สารดับเพลิง/วิธีการดับเพลิงที่เหมาะสมสำหรับสภาพเกิดเพลิงโดยรอบ	
- ใช้น้ำฉีดเป็นฝอยเพื่อหล่อเย็นภาชนะบรรจุที่ถูกเพลิงไหม้	
- กรณีเกิดเพลิงไหม้ให้เลือกใช้สารดับเพลิง/วิธีการดับเพลิงที่เหมาะสมสำหรับสภาพเกิดเพลิงโดยรอบ	

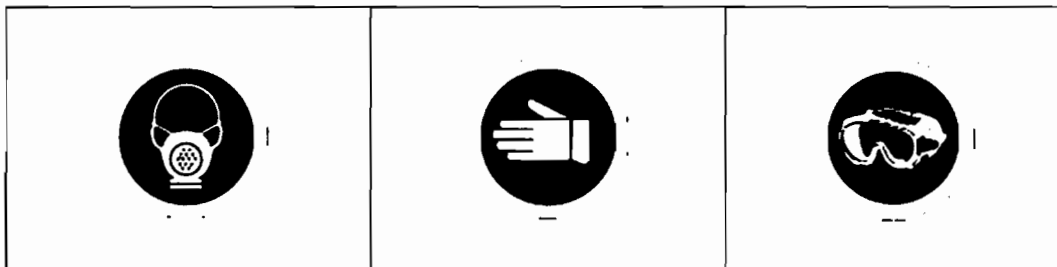
## 8. การเก็บรักษา/สถานที่เก็บ/เคลื่อนย้าย/ขนส่ง (Storage and Handling)

- เก็บในภาชนะบรรจุที่ปิดมิดชิด
- เก็บในบริเวณที่เย็นและแห้ง
- เก็บในบริเวณที่มีการระบายอากาศเพียงพอ
- ภาชนะบรรจุของสารที่เป็นถึงเปล่า แต่มีกากสารเคมีตกค้างอยู่ เช่น ไอระเหย ของเหลว อาจเป็นอันตรายได้
- ให้สังเกตค่าเตือนและข้อควรระวังทั้งหมดที่ให้ไว้สำหรับสารนี้

## 9. การกำจัดกรณีรั่วไหล (Leak and Spill)

- ให้ทำการหยุดการรั่วไหลที่แหล่งกำเนิด
- ถ้าหกรั่วไหลเล็กน้อยให้เก็บส่วนที่หกรั่วไหลโดยใช้เครื่องดูดฝุ่น
- ถ้าหกรั่วไหลปริมาณมาก ให้ดูดซับสารที่หกรั่วไหลด้วยวัสดุดูดซับ ให้ใช้ปลั๊กตักส่วนที่หกรั่วไหลใส่ในภาชนะบรรจุที่ปิดมิดชิด เพื่อนำไปกำจัด
- ทำความสะอาดบริเวณที่หกรั่วไหลเพื่อป้องกันสารเคมีตกค้าง
- การกำจัดให้เป็นไปตามกฎระเบียบที่ทางราชการกำหนด

## 10. อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล (PPD/PPE)



ขอแนะนำการเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล(PPD/PPE) :

- ขอแนะนำในการเลือกประเภทหน้ากากป้องกันระบบหายใจ
- ที่ช่วงความเข้มข้นที่เกิดกว่าค่ามาตรฐานที่ NIOSH แนะนำหรือที่ทุกช่วงความเข้มข้นที่สามารถวัดได้
- : ให้ใช้อุปกรณ์ช่วยหายใจชนิดที่มีถังอากาศในตัว (SCBA) พร้อมหน้ากากแบบเต็มหน้า ซึ่งมีการ



ทำงานแบบความดันภายในเป็นบวก ( pressure-demand / positive pressure mode) โดยแนะนำให้ใช้อุปกรณ์ที่มีค่า APF. = 10,000 หรือให้ใช้อุปกรณ์ส่งอากาศสำหรับการหายใจ (Supplied - air respirator) พร้อมหน้ากากแบบเต็มหน้า ซึ่งมีการทำงานแบบความดันภายในเป็นบวก ( pressure-demand / positive pressure mode) หรือแบบที่ใช้การทำงานร่วมกันระหว่างอุปกรณ์ช่วยหายใจชนิดมีถังอากาศในตัว และแบบความดันภายในเป็นบวก (combination with an auxiliary self-contained positive-pressure breathing apparatus) โดยแนะนำให้ใช้อุปกรณ์ที่มีค่า APF. = 10,000

- ในกรณีการหลบหนีออกจากสถานการณ์ฉุกเฉิน : ให้ใช้อุปกรณ์ทำให้อากาศบริสุทธิ์ (Air - purifying respirator) พร้อมหน้ากากแบบเต็มหน้า และอุปกรณ์กรองอนุภาคประสิทธิภาพ (HEPA filter) หรือให้ใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสมสำหรับในกรณีการหลบหนีออกจากสถานการณ์ฉุกเฉิน พร้อมอุปกรณ์ช่วยหายใจชนิดมีถังอากาศในตัว (SCBA) โดยแนะนำให้ใช้อุปกรณ์ที่มีค่า APF. = 50

### 11. การปฐมพยาบาล (First Aid)

หายใจเข้าไป:	- ถ้าหายใจเข้าไปปกติไม่ต้องทำการปฐมพยาบาล ถ้าอาการรุนแรงขึ้นให้เคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกจากบริเวณที่สัมผัส ไปยังบริเวณที่มีอากาศบริสุทธิ์ ถ้าอาการยังไม่ทุเลาเองให้ นำส่งไปพบแพทย์
กินหรือกลืนเข้าไป:	- ถ้ากลืนหรือกินเข้าไป ปกติไม่ต้องทำการปฐมพยาบาล แต่ถ้าหากเกิดอาการรุนแรงขึ้นให้ นำส่งไปพบแพทย์
สัมผัสถูกผิวหนัง:	- ถ้าสัมผัสถูกผิวหนัง ปกติไม่จำเป็นต้องทำการปฐมพยาบาล ควรล้างผิวหนังที่ปนเปื้อนด้วยสบู่และน้ำ
สัมผัสถูกตา :	- ถ้าสัมผัสถูกตา ถ้าอาการรุนแรงขึ้นให้เคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกจากบริเวณที่สัมผัสกับสารเคมีไปในที่ที่มีอากาศบริสุทธิ์ ให้ฉีดล้างตาทันทีด้วยน้ำประมาณอย่างน้อย 15 นาที นำส่งไปพบแพทย์
อื่น ๆ:	ความผิดปกติของอวัยวะบางส่วนอาจจะเพิ่มมากขึ้นได้ ภายหลังจากการรับหรือสัมผัสกับสารนี้ เช่น ปอด : เกิดโรคหอบหืด

### 12. ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

- ห้ามทิ้งลงสู่ท่อระบายน้ำ, ดิน, ท่อส่งน้ำ, แม่น้ำ
- ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ หากมีการใช้และจัดการกับผลิตภัณฑ์อย่างเหมาะสม

### 13. การเก็บและวิเคราะห์ (Sampling and Analytical)

NMAM NO. :	S 385 (I-3)	OSHA NO. :	-
<p>วิธีการเก็บตัวอย่าง : <input checked="" type="checkbox"/> กระดาษกรอง <input type="checkbox"/> หลอดเก็บตัวอย่าง <input type="checkbox"/> อิมพินเจอร์</p> <p>วิธีการวิเคราะห์ : <input type="checkbox"/> ชั่งน้ำหนัก <input type="checkbox"/> สเปคโตรโฟโตมิเตอร์</p> <p><input type="checkbox"/> แก๊สโครมาโตกราฟี <input checked="" type="checkbox"/> อะตอมมิกแอบซอปชัน</p> <p>ข้อมูลอื่น ๆ :</p> <p>- การเก็บตัวอย่างใช้ Mixed cellulose ester membrane</p>			

### 14. ขั้นตอนการปฏิบัติงานฉุกเฉิน (Emergency Response)

AVERS Guide :	-	DOT Guide :	-
<p>- กรณีฉุกเฉินโปรดใช้บริการระบบให้บริการข้อมูลการระงับอุบัติเหตุจากสารเคมีทางโทรศัพท์หรือสายด่วน AVERS ที่หมายเลขโทรศัพท์ 1650</p> <p>- ต้องการทราบรายละเอียดเพิ่มเติมโปรดติดต่อ กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย กรมควบคุมมลพิษ โทร 0 2298 2447, 0 2298 2457</p>			

## 15 เอกสารอ้างอิง (Reference)

- ┌ 1. "Chemical Safety Sheet ,Samsom Chemical Publisher ,1991 ,หน้า - "
- ┐ 2. "NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards.US.DHHS ,1990 ,หน้า 310 "
- ┌ 3. "Lange'S Handbook of Chemistry McGrawHill ,1999 ,หน้า - "
- ┌ 4. "Fire Protection Guide to Hazardous Material ,NFPA ,1994 ,หน้า - "
- ┐ 5. "ITP. SAX'S Dangerous Properties of Industrial Materials ,1996 ,หน้า 3181 "
- ┐ 6. "สอป.มาตรฐานสารเคมีในอากาศและดัชนีวัดทางชีวภาพ ,นำอักษรการพิมพ์ ,2543 ,หน้า 56 "
- ┐ 7. "http://www.cdc.gov/NIOSH ,CISC Card. , 0338 "
- ┌ 8. "Firefighter 's Hazardous Materials Reference Book ,1997 ,หน้า - "
- 9." ACGIH. 2000 TLVs and BEIs Threshold Limit Values for Chemical
- ┐ Substances and Physical Agents ,and Biological Exposure Indices. Ohio.,2000 ,หน้า 56 "
- ┌ 10. Source of Ignition หน้า - "
- ┌ 11. "อื่น ๆ" http://chemtrack.trf.or.th "

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นายโชติชีวิน มิพล
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2549 – 2553 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2553 –พ.ศ. 2554 วิศวกรสนาม บริษัท เอส ซี แอสเซท จำกัด มหาชน พ.ศ.2555 – พ.ศ.2556 วิศวกรโครงการ บริษัท โปรเจค เมท จำกัด พ.ศ.2556 – ปัจจุบัน วิศวกรออกแบบโครงสร้าง รับงานอิสระ
รางวัลที่เคยได้รับ	การนำเสนอบทความได้รับรางวัลนำเสนอผลงานยอดเยี่ยม การประชุมทาง วิชาการระดับชาติ วิศวกรรมและการก่อสร้าง ครั้งที่ 2 ณ โรงแรมเอเชีย กรุงเทพมหานคร จัดโดย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย
ตำแหน่ง	วิศวกรออกแบบโครงสร้าง
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	อำเภอเดชอุดม จังหวัดอุบลราชธานี

