



การสังเคราะห์เม็ดสีเทอร์โมโครมิกระดับนาโนของวานาเดียมไดออกไซด์
เจือทั้งสแตโนไตรออกไซด์และซิงค์ออกไซด์

Synthesis of WO_3 and ZnO-doped VO_2 Thermochromic Nanopigment

วิทยา พรหมมินทร์

Vittaya Prommin

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Materials Engineering
Prince of Songkla University

2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การสังเคราะห์เม็ดสีเทอร์โมโครมิกระดับนาโนของวานาเดียมไดออกไซด์
 เจือทั้งสเดนไดรออกไซด์และซิงค์ออกไซด์

ผู้เขียน นายวิทยา พรหมมินทร์

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง)

.....ประธานกรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิระชัย แสงฉาย)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ กัลยาณี คุปตานนท์)

.....
 (รองศาสตราจารย์ กัลยาณี คุปตานนท์)

.....กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิญญู ราชเพ็ชร)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
 ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ กัลยาณี คุปตานนท์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ.....

(นายวิทยา พรหมมินทร์)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายวิทยา พรหมมินทร์)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ การสังเคราะห์เม็ดสีเทอร์โมโครมิกระดับนาโนของวานาเดียมไดออกไซด์
 เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์และซิงค์ออกไซด์

ผู้เขียน นายวิทยา พรหมมินทร์

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

ปีการศึกษา 2558

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์ในการสังเคราะห์เม็ดสีเทอร์โมโครมิกของวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ ซึ่งแบ่งออกเป็นสองส่วน ในส่วนแรกการสังเคราะห์เม็ดสีเทอร์โมโครมิกของวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์โดยใช้ปริมาณสารเจือที่ 0.0175-0.250 เปอร์เซ็นต์อะตอม ด้วยวิธีทางเคมี โดยวิทยานิพนธ์ส่วนนี้มุ่งศึกษาผลของปริมาณสารเจือต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยน โครงสร้างของสารเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ภายหลังจากการสังเคราะห์และเผาที่ 700 องศาเซลเซียส ภายใต้อากาศในโตรเจนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของสารพบว่าเม็ดสีเทอร์โมโครมิกสามารถเปลี่ยน โครงสร้างจากโมโนคลินิกเป็นเตตระโกนอลหรือรูไทล์เมื่อได้รับความร้อนที่ 40 องศาเซลเซียส โดยมีขนาดผลึกอยู่ในช่วง 40-100 นาโนเมตร ในส่วนของเม็ดสีและเมื่อใช้ซิงค์ออกไซด์เจือร่วมกับทั้งสแตนไดรออกไซด์ในวานาเดียมไดออกไซด์พบว่าที่ปริมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่งผลให้อุณหภูมิแทรนซิชันของเม็ดสีเทอร์โมโครมิกลดลง อยู่ที่ 52 องศาเซลเซียส ในขณะเดียวกันเมื่อวานาเดียมไดออกไซด์เปลี่ยน โครงสร้างเป็นเตตระโกนอล ความสามารถในการนำไฟฟ้าของวานาเดียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น

ส่วนที่สองของงานวิจัยการผสมเม็ดสีเทอร์โมโครมิกของวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์ผสมร่วมกับซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณ 0.1, 0.3 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเพื่อใช้เป็นส่วนประกอบในสีทาอาคาร โดยวิทยานิพนธ์ในส่วนนี้ศึกษาความสามารถในการสะท้อนความร้อนของเม็ดสี ประสิทธิภาพในการทำมาสะอาดตัวเอง รวมถึงศักยภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของเม็ดสี จากการทดสอบความร้อนด้วยชุดทดสอบพบว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเม็ดสีเทอร์โมโครมิก คิดเป็น 3.8 เปอร์เซ็นต์ของสีมีความสามารถในการสะท้อนโดยการวัดอุณหภูมิที่ผิวหนังนอกที่ได้รับความร้อนและผิวหนังในของชิ้นทดสอบเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบมาตรฐาน พบว่าอุณหภูมิของผิวหนังในต่ำกว่าอุณหภูมิผิวหนังนอกประมาณ 14 องศาเซลเซียสเมื่อชิ้นทดสอบมีความหนา 1.5 เซนติเมตร และจากการศึกษาประสิทธิภาพในการทำมา

สะอาดตัวเองของสีทา โดยการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำ พบว่าสีที่ผสมด้วยเม็ดสีเทอร์โมโครมิกมีสภาพผิวเปียกน้ำที่ดี สามารถวัดมุมสัมผัสได้ 10.2 องศา เมื่อผ่านการฉายรังสียูวีเป็นเวลา 60 นาที ก่อนการวัด

สำหรับการทดสอบการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* (*E.coli*) ของสีทาที่ผสมเม็ดสีเทอร์โมโครมิก พบว่าที่ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียชนิด *E.coli* ได้ ถึง 99.99 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 40 นาทีภายใต้แสงยูวี

Thesis	Synthesis of WO ₃ and ZnO-doped VO ₂ Thermochromic Nanopigment
Author	Mr Vitaya Prommin
Major	Materials Engineering
Academic Year	2015

Abstract

The thesis aims to synthesize thermochromic nano-pigments of WO₃ and ZnO-doped VO₂ which were prepared by Chemical method. In which there are two parts of synthesis. The first part is to synthesize thermochromic nano-pigments with tungsten trioxide doped content ranging from 0.025 at% to 0.250 at%. A study has been done to investigate the effect of WO₃-doping on the structural properties in the rate of change of the temperature after annealing at 700 °C for 1 hour in Nitrogen atmosphere. The result shows the reversible phase transition between monoclinic and tetragonal phase. The transition temperature was found to be 40°C, and the particle sizes are about 60-100 nanometers. At 0.5 wt% ZnO and WO₃ co-doped VO₂, the phase transition temperature was reduced from 66.25°C to 52°C. As the result, while the structural properties changed to tetragonal, the electrical conductivity also increased.

The second part is to synthesize thermochromic nano-pigments with 0.1, 0.3, 0.5 wt%-ZnO for making paints component. This part mainly focuses on investigating the heat reflectiveness, efficiency of self-cleaning, and potentiality of antibacterial agent ability of the nano-pigment. It has been found that at 0.5 wt% of thermochromic nano-pigments accounted for 3.8 percent by weight comparing the internal and external temperatures with standard based. For cement sheets with thickness of 1.5 cm, the internal temperature is lower than the external temperature. The self-cleaning efficiency was also consider, it found that thermochromic nano-pigments exhibited the hydrophilic property, with contact angle about 10.2° under UV irradiation for 1 hour.

The disinfection effect of the thermochromic nano-pigment containing in the paints on *E.coli* was also investigated under UV irradiation for designated times. It was found that 0.5 wt% nano-pigment loading in the paint showed an excellent killing performance under UV irradiation for 40 min, and could destroy 99.99% of bacteria.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณผู้เกี่ยวข้องทุกท่านเป็นอย่างสูง ทั้งที่ออกนามและไม่ออกนาม ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าในทุกด้านไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำปรึกษาและคำแนะนำสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ กัลยาณี คุปตานนท์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่คอยให้คำแนะนำสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ และบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ ที่คอยให้คำแนะนำและเป็นที่ปรึกษาเกี่ยวกับการปฏิบัติการและงานด้านเอกสารต่างๆ

ขอขอบคุณสถานวิจัยความเป็นเลิศด้านนาโนเทคโนโลยีเพื่อพลังงาน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทดสอบและเงินทุนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ นักศึกษาปริญญาเอกและโท พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ ที่เป็นกำลังใจ ให้คำแนะนำและช่วยเหลือที่ดีในทุกโอกาส

ท้ายที่สุดขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และสมาชิกทุกคนในครอบครัวที่อยู่เบื้องหลังคอยให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดเสมอมา ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะมีประโยชน์สำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนบุคคลทั่วไปที่สนใจ หากพบว่ามีข้อบกพร่องประการใด ผู้เขียนก็ขออภัยไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

วิทยา พรหมมินทร์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	(5)
Abstract	(7)
กิตติกรรมประกาศ.....	(8)
สารบัญ.....	(9)
รายการตาราง.....	(12)
รายการรูป.....	(14)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ.....	(18)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	5
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 วัสดุเทอร์โมโครมิก (Thermochromic).....	8
2.2 การเปลี่ยนสีและโครงสร้างของวัสดุเทอร์โมโครมิก.....	8
2.3 สมบัติทางแสง.....	12
2.3.1 แสงที่ไม่สามารถมองเห็น (Near infrared-NIR)	12
2.3.2 แสงที่มองเห็นได้ (Visible light)	13
2.4 ความร้อน อุ่นหภูมิและการถ่ายเทความร้อน	14
2.5 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
2.5.1 การสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมโครมิกชนิดวานเดียมไดออกไซด์.....	17
2.5.2 การเพิ่มประสิทธิภาพเทอร์โมโครมิก.....	19
2.5.3 สารเทอร์โมโครมิกชนิด VO ₂ เจือด้วยสารต่าง ๆ.....	20
2.5.4 สารที่มีสมบัติการทำความสะอาดตัวเองและการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย.....	27
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	32
3.1 วิธีการวิจัย.....	32
3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์สารวานเดียมไดออกไซด์เฟส โมโนคลินิก.....	32

3.3	ขั้นตอนการสังเคราะห์สารวานิเลียมไดออกไซด์เฟสโมโนคลินิกด้วยสารเจือทั้งสเดนไตรออกไซด์และซิงค์ออกไซด์	33
3.3.1	การสังเคราะห์สารวานิเลียมไดออกไซด์เฟสโมโนคลินิกเจือด้วยทั้งสเดนไตรออกไซด์.....	33
3.3.2	อัตราส่วนระหว่างสารตั้งต้นแอมโมเนียมเมตาวานาเคทเจือแอมโมเนียมพาราทั้งสเดนและซิงค์ออกไซด์	34
3.4	ขั้นตอนการเตรียมสีทาที่ผสมด้วยเม็ดสีวานิเลียมไดออกไซด์เพื่อทดสอบความสามารถในการสะท้อนความร้อน.....	38
3.5	การทดสอบการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของสารวานิเลียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดนไตรออกไซด์ผสมซิงค์ออกไซด์.....	41
3.6	การตรวจสอบคุณลักษณะของผงตัวอย่าง.....	42
3.6.1	X-Ray Diffractometry (XRD).....	42
3.6.2	Differential scanning calorimetry (DSC).....	42
3.6.3	Scanning Electron Microscope (SEM)	43
3.6.4	Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS).....	43
3.6.5	Transmission Electron Microscope (TEM)	43
3.6.6	การวัดสมบัติการนำไฟฟ้า	43
3.6.7	Fourier-Transformed Infrared Spectrophotometer (FT-IR).....	44
3.6.8	Contact angle measurement	44
3.6.9	X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)	45
บทที่ 4	ผลและการอภิปรายผล	46
4.1	ผลการสังเคราะห์สารวานิเลียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดนไตรออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ ...	46
4.1.1	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเฟสของสารที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค XRD	46
4.1.2	การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology) ของผงวานิเลียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสเดนไตรออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	50
4.1.3	การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology) ของวานิเลียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยทั้งสเดนผสมซิงค์ออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM).....	51
4.1.4	การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDS.....	52
4.1.5	การศึกษาการกระจายตัวของผงวานิเลียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดนไตรออกไซด์ผสมซิงค์ออกไซด์ที่ผสมในสีทาอาคารด้วยเทคนิค EDS.....	56

4.1.6 ผลการศึกษาองค์ประกอบและโครงสร้างเคมีของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดนด้วยเทคนิค XPS.....	56
4.2 สมบัติเทอร์โมโครมิกของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดนไตรออกไซด์ผสมซิงค์ออกไซด์	59
4.2.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดนด้วยเทคนิค DSC.....	59
4.2.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันผงวานเนเดียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค FT-IR	66
4.2.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดนไตรออกไซด์	68
4.3 ผลการประยุกต์ใช้ผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดนไตรออกไซด์ผสมซิงค์ออกไซด์ในงานทางการสะท้อนความร้อน	70
4.3.1 ผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดนไตรออกไซด์ที่ผสมซิงค์ออกไซด์ผสมในสีทาอาคาร.....	71
4.3.2 การทดสอบการสะท้อนความร้อนของแผ่นปูนซีเมนต์เปล้าและแผ่นปูนทาด้วยสีสำหรับทาอาคารทั่วไป	72
4.3.3 การทดสอบการสะท้อนความร้อนของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดนไตรออกไซด์ผสมในสีสำหรับทาอาคาร	76
4.3.4 การทดสอบการสะท้อนความร้อนของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดนผสมซิงค์ออกไซด์ในสีสำหรับทาอาคาร	83
4.3.5 ผลการฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดนไตรออกไซด์ผสมซิงค์ออกไซด์.....	86
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	89
5.1 บทสรุป.....	89
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	90
บรรณานุกรม	91
ภาคผนวก	96
ภาคผนวก ก. จำนวนเชื้อเฉลี่ยของ <i>E.coli</i> ภายหลังการได้รับแสงยูวี จำนวนเชื้อเริ่มต้น (N_0) เท่ากับ จำนวนเชื้อเริ่มต้น 10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร และจำนวนเชื้อของ <i>E.coli</i> ที่รอดชีวิตหลังจากรับแสงยูวี (N).....	97
ภาคผนวก ข อุณหภูมิการทดสอบความร้อนของเม็คสีเทอร์โมโครมิกโดยเฉลี่ยจากการเก็บข้อมูล 10 ครั้ง ต่อตัวอย่าง.....	97

รายการตาราง

ตารางที่ 1.1 แสดงประมาณการกำลังการผลิตไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย แยกตามผู้ผลิตไฟฟ้า (หน่วย:เมกกะวัตต์)	2
ตารางที่ 1.2 แสดงอัตราการใช้ไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศ.....	2
ตารางที่ 2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการเปลี่ยนสีของตัวอย่าง	19
ตารางที่ 2.2 ข้อมูลทั่วไปของทั้งสแตนออกไซด์.....	22
ตารางที่ 2.3 อิทธิพลของสารเจือทั้งสแตนและทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิทรานซิชันของนักวิจัยต่างๆ	24
ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างเมล็ดสีจากสารอินทรีย์และอนินทรีย์	26
ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบสมบัติต่างๆของสารเทอร์โมโครมิกแต่ละชนิด.....	27
ตารางที่ 2.6 สมบัติของซิงค์ออกไซด์นาโน	29
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนระหว่างสารตั้งต้นแอมโมเนียมเมตาวานาเดทและสารเจือแอมโมเนียมพาราทั้งสแตน	33
ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนระหว่างสารตั้งต้นแอมโมเนียมเมตาวานาเดท เจือแอมโมเนียม พาราทั้งสแตนและซิงค์ออกไซด์.....	34
ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนผสมระหว่างสีทาอาคารกับผงวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์	39
ตารางที่ 3.4 ลักษณะแผ่นวัสดุฐานและตัวอย่างสีที่ใช้ในการทดลอง.....	40
ตารางที่ 3.5 อัตราส่วนผสมระหว่างสีทาอาคารกับผงวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์และซิงค์ออกไซด์.....	41
ตารางที่ 4.1 ขนาดผลึกเปอร์เซ็นต์เฟสและร้อยละผลผลิตของสารวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์สูตรต่างๆ	47
ตารางที่ 4.2ขนาดผลึกและร้อยละผลผลิตของผงวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์และซิงค์ออกไซด์สูตรต่าง ๆ	49
ตารางที่ 4.3 ปริมาณธาตุประกอบในผงวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ 0.025 at%.....	53
ตารางที่ 4.4 ปริมาณธาตุประกอบในผงวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ 0.100 at%.....	53
ตารางที่ 4.5 ปริมาณธาตุประกอบในผงวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ 0.175 at%.....	53
ตารางที่ 4.6 ปริมาณสารเจือทั้งสแตนไดรออกไซด์และซิงค์ออกไซด์สูตรต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง	60

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิแปรผันชั้นของวานเนเดียมไดออกไซด์และสารสังเคราะห์ของ ผงสูตรต่าง ๆ	65
ตารางที่ 4.8 ค่ามุมสัมผัสของผิวสเฟอโรไมโครมิกสูตรต่างๆเมื่อได้รับแสงยูวี	71
ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบความร้อนที่ผิวตัวอย่างที่เวลา 120 นาที	75
ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบความร้อนที่ผิวตัวอย่างที่ทำด้วยสีทาอาคารทั่วไปที่เวลา 120 นาที	76
ตารางที่ 4.11 ผลการวัดความร้อนของเม็ดสีผสมในสีทาอาคารสีเข้ม (สีเทา)	77
ตารางที่ 4.12 ผลการวัดความร้อนของเม็ดสีผสมในสีทาอาคารสีอ่อน (สีครีม)	79
ตารางที่ 4.13 ผลการวัดความร้อนของเม็ดสีผสมในสีทาอาคารสีขาว	81
ตารางที่ 4.14 อัตราส่วนผสมระหว่างสีทาอาคารกับผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดน ไตรออกไซด์ผสมซิงค์ออกไซด์	83
ตารางที่ 4.15 ผลการวัดความร้อนของเม็ดสีวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดนผสมซิงค์ออกไซด์ ในสีทาอาคาร (สีขาว)	84

รายการรูป

รูปที่ 2.1	อุณหภูมิภายในอาคารภายหลังการใช้สีที่มีสมบัติกันความร้อน	7
รูปที่ 2.2	การเปลี่ยนแปลงสีของเมอร์คิวรี (II) ไอโอไดด์จากรูปผลึกแอลฟาไปเป็นรูปผลึกเบตาเมื่อมีการให้หรือลดความร้อน (ที่มา: http://www.kmutt.ac.th/hynae/)	9
รูปที่ 2.3	Phase diagram for the vanadium oxygen system (Joyeeta Nag , 2011)	11
รูปที่ 2.4	โครงสร้างของวานาเดียมไดออกไซด์ ชนิด โมโนคลินิกและเตตระโกนอล (Zhenda Lu, 2011)	11
รูปที่ 2.5	ความยาวคลื่นแสงประเภทต่างๆ	12
รูปที่ 2.6	การหักเหของแสงเมื่อเดินทางผ่านปริซึม	14
รูปที่ 2.7	การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเข้าสู่ภายในอาคาร	17
รูปที่ 2.8	XRD การเกิดเฟสของ VO ₂ nanorods ก่อนและหลังกระบวนการทางความร้อน (Kinson และคณะ (2006)).....	18
รูปที่ 2.9	อุณหภูมิแทรนซิชันและฮิสเทอรีซิสหุบของวานาเดียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโครเมียม (Beteille และคณะ (1998))	21
รูปที่ 2.10	โครงสร้างของทังสเตนไดออกไซด์.....	22
รูปที่ 2.11	โครงสร้าง ZnO ชนิด Wurtzite (1), โครงสร้าง ZnO ชนิด Zinc blende (2)	28
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนการสังเคราะห์สารวานาเดียมไดออกไซด์เฟส โมโนคลินิก	35
รูปที่ 3.2	ขั้นตอนการสังเคราะห์สารวานาเดียมไดออกไซด์เฟส โมโนคลินิกเจือด้วยทังสเตนไดรอกไซด์	36
รูปที่ 3.3	ขั้นตอนการสังเคราะห์สารวานาเดียมไดออกไซด์เฟส โมโนคลินิกเจือด้วยทังสเตนไดรอกไซด์และซิงค์ออกไซด์	37
รูปที่ 3.4	การทำสีตัวอย่างลงบนวัสดุฐาน (แผ่นปูนซีเมนต์)	38
รูปที่ 3.5	อุปกรณ์การทดสอบการสะท้อนความร้อนของแผ่นวัสดุฐาน	39
รูปที่ 3.6	โครงสร้างรูไทล์ (R phase) และ โมโนคลินิก (M phase) ของวานาเดียมไดออกไซด์.....	42
รูปที่ 3.7	มุมสัมผัสที่เกิดขึ้นจากของเหลวที่สัมผัสของแข็ง	44
รูปที่ 4.1	XRD สเปกตรัมของผงวานาเดียมไดออกไซด์เจือทังสเตนไดรอกไซด์.....	48
รูปที่ 4.2	XRD สเปกตรัมของผงวานาเดียมไดออกไซด์เจือทังสเตนไดรอกไซด์ผสมซิงค์ออกไซด์	49

รูปที่ 4.3 SEM ของผงวานเนเดียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ (1) VO ₂ Commercial grade (2) undoped (3) 0.0175 at%WO ₃ (4) 0.025 at%WO ₃ (5) 0.100 at% WO ₃ (6) 0.175 at% ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า	50
รูปที่ 4.4 TEM ของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรอกไซด์ (0.025 at%WO ₃)	51
รูปที่ 4.5 TEM ของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรอกไซด์ผสมซิงค์ออกไซด์ (0.5at% ZnO/WO ₃ /VO ₂).....	52
รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ธาตุของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรอกไซด์ ที่ 0.025 at% WO ₃	54
รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ธาตุของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรอกไซด์ ที่ 0.100 at% WO ₃	54
รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ธาตุของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรอกไซด์ ที่ 0.175 at% WO ₃	55
รูปที่ 4.9 EDS- mapping แสดงการกระจายตัวธาตุต่างของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรอกไซด์ที่ปริมาณ 0.025 (A), 0.100 (B),0.175 (C) at%	55
รูปที่ 4.10 การกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ ของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรอกไซด์ผสมซิงค์ออกไซด์ที่ผสมอยู่ในสัทอาการ	56
รูปที่ 4.11 สเปกตรัมแบบ Survey ของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรอกไซด์ที่ 0.025 at% ..	57
รูปที่ 4.12 สเปกตรัมแบบ High resolutionของธาตุ O1s.....	57
รูปที่ 4.13 สเปกตรัมแบบ High resolutionของธาตุ V2p	58
รูปที่ 4.14 สเปกตรัมแบบ High resolutionของธาตุ W4f.....	58
รูปที่ 4.15 ผลวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน ของวานเนเดียมไดออกไซด์ที่ไม่มีสารเจือภายหลังการเผาที่ 700 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมงภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน	61
รูปที่ 4.16 ผลวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของวานเนเดียมไดออกไซด์เจือด้วย 0.0175at% WO ₃ แบบ Three-cycles of heating and cooling curves	61
รูปที่ 4.17 ผลวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของวานเนเดียมไดออกไซด์เจือด้วย 0.025at% WO ₃ แบบ Three-cycles of heating and cooling curves	62
รูปที่ 4.18 ผลวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของวานเนเดียมไดออกไซด์เจือด้วย 0.1at% WO ₃ แบบ Three-cycles of heating and cooling curves	62
รูปที่ 4.19 ผลวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของวานเนเดียมไดออกไซด์เจือด้วย 0.175 at% WO ₃ แบบ Three-cycles of heating and cooling curves	63

รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารเจือทั้งสเดน ไตรออกไซด์กับอุณหภูมิทรานซิชันของ วานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดน ไตรออกไซด์	63
รูปที่ 4.21 ผลวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของวานเนเดียมไดออกไซด์เจือด้วย 0.3 at% ZnO/WO ₃ /VO ₂ แบบ Three-cycles of heating and cooling curves	64
รูปที่ 4.22 ผลวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของวานเนเดียมไดออกไซด์เจือด้วย 0.5 at% ZnO/WO ₃ /VO ₂ แบบ Three-cycles of heating and cooling curves	64
รูปที่ 4.23 FT-IR สเปกตรัมของผงวานเนเดียมไดออกไซด์โดยไม่มีสารเจือทั้งสเดน ไตรออกไซด์....	67
รูปที่ 4.24 FT-IR สเปกตรัมของผงวานเนเดียมไดออกไซด์โดยเจือทั้งสเดน ไตรออกไซด์ ที่ 0.025 at% WO ₃	67
รูปที่ 4.25 FT-IR สเปกตรัมของผงวานเนเดียมไดออกไซด์โดยเจือทั้งสเดน ไตรออกไซด์ ที่ 0.025 at% WO ₃ ภายหลังจากได้รับความร้อนที่ 50 องศาเซลเซียส.....	68
รูปที่ 4.26 การนำไฟฟ้าของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดน ไตรออกไซด์	69
รูปที่ 4.27 การต้านทานไฟฟ้าของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดน ไตรออกไซด์.....	70
รูปที่ 4.28 การวัดมุมสัมผัสของผิวสี่เทอร์โมโครมิกสูตรต่าง ๆ ที่เวลาต่างกันภายใต้แสงยูวี.....	71
รูปที่ 4.29 ชุดทดสอบก่อนการทดสอบความร้อน (1) ชุดทดสอบขณะทำการทดสอบความร้อน (2).....	72
รูปที่ 4.30 ลักษณะภายในกล่องทดสอบความร้อน	73
รูปที่ 4.31 การวัดความร้อนที่ผิววัสดุภายในกล่องทดสอบ (1) การวัดความร้อนที่ผิววัสดุภายนอกกล่องทดสอบ (2).....	73
รูปที่ 4.32 ลักษณะการให้ความร้อนและวัดความร้อนบนแผ่นปูนซีเมนต์ทำด้วยสีตัวอย่าง	74
รูปที่ 4.33 การวัดอุณหภูมิผิวด้านนอกและด้านในบนแผ่นปูนซีเมนต์เปล่า.....	74
รูปที่ 4.34 การวัดอุณหภูมิผิวด้านนอกและด้านในบนแผ่นตัวอย่างที่ทำด้วยสีทาอาคารทั่วไป.....	75
รูปที่ 4.35 ตัวอย่างสีที่ใช้ทาบนแผ่นปูนซีเมนต์สำหรับการทดสอบการสะท้อนความร้อน	76
รูปที่ 4.36 ผลการวัดความร้อนของผงตัวอย่างผสมสีทาอาคารสีเข้ม (สีเทา) สูตร 0.1 wt% Nano-pigment.....	77
รูปที่ 4.37 ผลการวัดความร้อนของผงตัวอย่างผสมสีทาอาคารสีเข้ม (สีเทา) สูตร 0.3 wt% Nano-pigment.....	78
รูปที่ 4.38 ผลการวัดความร้อนของผงตัวอย่างผสมสีทาอาคารสีเข้ม (สีเทา) สูตร 0.5 wt% Nano-pigment.....	78

รูปที่ 4.39 ผลการวัดความร้อนของผงตัวอย่างผสมสีทาอาคารสีอ่อน (สีครีม) สูตร 0.1 wt% Nano-pigment.....	79
รูปที่ 4.40 ผลการวัดความร้อนของผงตัวอย่างผสมสีทาอาคารสีอ่อน (สีครีม) สูตร 0.3 wt% Nano-pigment.....	80
รูปที่ 4.41 ผลการวัดความร้อนของผงตัวอย่างผสมสีทาอาคารสีอ่อน (สีครีม) สูตร 0.5 wt% Nano-pigment.....	80
รูปที่ 4.42 ผลการวัดความร้อนของผงตัวอย่างผสมสีทาอาคารสีขาวสูตร 0.1 wt% Nano-pigment .	81
รูปที่ 4.43 ผลการวัดความร้อนของผงตัวอย่างผสมสีทาอาคารสีขาวสูตร 0.3 wt% Nano-pigment .	82
รูปที่ 4.44 ผลการวัดความร้อนของผงตัวอย่างผสมสีทาอาคารสีขาวสูตร 0.5 wt% Nano-pigment .	82
รูปที่ 4.45 ผลการวัดความร้อนของเม็ดสีวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดนไตรออกไซด์ ผสมซิงค์ออกไซด์ในสีทาอาคารสีขาวสูตร 0.1 wt% ZnO/Nano-pigment	84
รูปที่ 4.46 ผลการวัดความร้อนของเม็ดสีวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดนไตรออกไซด์ ผสมซิงค์ออกไซด์ในสีทาอาคารสีขาวสูตร 0.3 wt% ZnO/Nano-pigment	85
รูปที่ 4.47 ผลการวัดความร้อนของเม็ดสีวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดนไตรออกไซด์ ผสมซิงค์ออกไซด์ในสีทาอาคารสีขาวสูตร 0.5 wt% ZnO/Nano-pigment	85
รูปที่ 4.48 ผลการฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ของเม็ดสีเทอร์โมโครมิกผสมซิงค์ออกไซด์สูตรต่าง ๆ ภายใต้เวลารับแสงยูวี 60 นาที	87
รูปที่ 4.49 ผลการฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> ของเม็ดสีเทอร์โมโครมิกผสมซิงค์ออกไซด์ สูตร 0.5 wt% ZnO-Nano-pigment ภายใต้เวลารับแสงยูวี 60 นาที	88
รูปที่ 4.50 ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ <i>E.coli</i> สูตรต่าง ๆ ภายใต้การรับแสงยูวี 60 นาที	88

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

A	พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ (m^2)
CFU/ml	โคโลนีต่อมิลลิลิตร
DSC	Differential scanning calorimetry
<i>E.coli</i>	<i>Escherichia coli</i>
EDS	Energy Dispersive X-ray Spectrometer
FT-IR	Fourier-transformed infrared spectrophotometer
h_c	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มอากาศ ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
M	Monoclinic phase
Q	พลังงานการนำความร้อน (W)
R	Rutile phase
SEM	Scanning Electron Microscope
TEM	Transmission Electron Microscope
T_s	อุณหภูมิผิวของวัสดุ ($^\circ C$)
T_r	อุณหภูมิอากาศภายในอาคาร ($^\circ C$)
U	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
XPS	X-ray Photoelectron Spectroscopy
XRD	X-Ray Diffractometry
ΔT	ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในและภายนอกอาคาร ($^\circ C$)
ε	การคายรังสีความร้อน
σ	ค่าคงที่ของสเตฟานและ โบลซ์แมน ($W/m^2 K^4$)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

ภาวะโลกร้อน (Global Warming) หรือภาวะภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง (Climate Change) คือ การที่อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกเพิ่มขึ้นจากผลของภาวะเรือนกระจก หรือที่เรา รู้จักกันดีในชื่อว่า Greenhouse Effect โดยภาวะโลกร้อน ซึ่งมีต้นเหตุจากการที่มนุษย์ได้เพิ่มปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงต่าง ๆ การขนส่งและการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม นอกจากนี้มนุษย์เรายังได้เพิ่มก๊าซกลุ่มไนตรัสออกไซด์ และคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) เข้าไปอีกด้วยพร้อม ๆ กับการที่เราตัดและทำลายป่าไม้จำนวนมากเพื่อสร้างสิ่งอำนวยความสะดวกให้แก่มนุษย์ทำให้กลไกในการดึงเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปจากระบบบรรยากาศถูกลดทอนประสิทธิภาพลง และก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนนอกจากนี้มียูเอชเอชหลายปัจจัยที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนหนึ่งในนั้นคือเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ปล่อยมลพิษได้หลากหลายวิธีที่ส่งผลกระทบต่อโลกค่อนข้างมาก ซึ่งส่วนใหญ่เชื้อเพลิงฟอสซิลจะถูกเผาผลาญเพื่อเป็นพลังงานไฟฟ้า เชื้อเพลิงฟอสซิลถูกผลิตจากซากพืชและสัตว์ ยกตัวอย่างเช่น น้ำมันและปิโตรเลียม จะมีสารพิษบางอย่างที่ถูกปล่อยขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศในขณะที่เชื้อเพลิงฟอสซิลเหล่านี้ถูกเผาผลาญ สารเคมีนี้ถูกเรียกว่า ก๊าซเรือนกระจกเราใช้แหล่งพลังงานนี้มากกว่าจากแหล่งพลังงานที่ปล่อยมลพิษน้อยกว่าปิโตรเลียมหนึ่งในแหล่งพลังงานที่ใช้กันเป็นจำนวนมากเพื่อการคมนาคม ผลิตกระแสไฟฟ้าและผลิตสิ่งต่างๆอีกมากมาย แม้ว่าปิโตรเลียมจะปล่อยมลพิษสู่ชั้นบรรยากาศเป็นจำนวนมาก

จากสถิติข้อมูลการผลิตไฟฟ้า ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยและผู้ผลิตรายอื่นที่ผลิตให้ประเทศไทยได้มีการสรุปสถิติการผลิตไฟฟ้าในแต่ละปีดังนี้

ตารางที่ 1.1 แสดงประมาณการกำลังการผลิตไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย แยกตามผู้ผลิตไฟฟ้า (หน่วย:เมกะวัตต์)

ผู้ผลิต	ปี 2540	ปี 2542	ปี 2544	ปี 2549	ปี 2554
กฟผ.	14,687	16,738	19,588	19,168	18,869
บริษัทผลิตไฟฟ้าจำกัด	2,056	2,056	2,056	2,056	2,056
ผู้ผลิตเอกชนรายใหญ่ (IPP)	-	700	1,400	4,597	12,444
ผู้ผลิตเอกชนรายเล็ก (SPP)	224	1,407	1,807	2,097	2,097
กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน	13	13	13	13	13
ประเทศเพื่อนบ้าน	-	313	613	613	3,913
รวม	16,980	21,227	25,477	28,544	39,392

(ที่มา : <http://www.eppo.go.th/doc/doc-AlterFuel.html>)

ตารางที่ 1.1 แสดงให้เห็นว่าตั้งแต่ปี 2540 เป็นต้นมา ประเทศได้ได้มีการผลิตไฟฟ้าใช้โดยตรงจาก การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยและขณะเดียวกันได้อาศัยผู้ผลิตรายอื่นซึ่งเมื่อเทียบอัตราการผลิตแล้วนั้นพบว่าการใช้พลังงานไฟฟ้ามีอัตราเพิ่มสูงขึ้นทุก ๆ ปี โดยอัตราการใช้ไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศดังแสดงในตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 แสดงอัตราการใช้ไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศ

Type	Btu/h	Watt	จำนวนหน่วยที่ใช้/ 1 ชั่วโมง	ระยะเวลา/ วัน	หน่วย/เดือน	ค่าไฟ (บาท)
ติดหน้าต่าง	9000	920	0.92	8 ชั่วโมงคอม เพรสเซอร์ ทำงาน 6 ชั่วโมง	165.6	418.97
	12000	1150	1.15		207	523.71
	24000	2900	2.99		538.2	1,361.71
ติดผนัง	9000	680	0.68		122.4	309.67
	12000	1130	1.13		203.4	514.6
	24000	2490	2.49		448.2	1,133.92
ตั้ง/แขวน	12000	1330	1.33		239.4	605.68
	24000	2710	2.71		487.8	1,234.13

(ที่มา : กรมอุตุนิยมวิทยา และสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน 2554)

สำหรับเครื่องปรับอากาศขนาด 12000 BTU ถ้าปรับอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศา (นับจาก 25 องศา) เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง/วัน ช่วยชาติประหยัดไฟได้วันละ 2 บาท/วัน 60 บาท/เดือน คิดเป็น 720 บาท/ปี ต่อครัวเรือน

ภาวะโลกร้อนในปัจจุบันส่งผลให้มีการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นแม้กระทั่งความเป็นอยู่ของประชาชน จึงมีแนวความคิดที่จะลดอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าในระดับครัวเรือนสำหรับการลดความร้อนให้แก่อาคารสามารถทำได้หลายวิธี การติดตั้งเครื่องปรับอากาศเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมสูงสุดแต่ก็เป็นวิธีที่สูญเสียพลังงานมากที่สุด ดังนั้นการลดหรือป้องกันไม่ให้ความร้อนเข้าสู่อาคารจึงมีส่วนช่วยอย่างสำคัญในการที่จะทำให้อาคารเย็นและสามารถลดขนาดของเครื่องปรับอากาศที่ใช้ ทำให้เกิดการประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ สำหรับวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบันเพื่อลดความร้อนให้แก่อาคารมีดังนี้

การลดปริมาณรังสีความร้อนที่จะผ่านเข้าทางกระจกหน้าต่างโดยการใช้อุปกรณ์เครื่องบังแดดภายนอกอาคารเพื่อมิให้กระจกถูกแสงแดดโดยตรงหรือการปลูกต้นไม้เพื่อให้ร่มเงาแก่อาคารบ้านเรือน

การลดการนำความร้อนผ่านผนังทึบ โดยการใช้นวนกันความร้อนบุหุ้มที่ด้านนอกของผนังเพื่อป้องกันมิให้ความร้อนเข้ามาภายในอาคาร หรือการทำที่บังแดดเพื่อให้กำแพงอาคารนั้นอยู่ภายใต้ร่มเงาตลอดทั้งวันจะทำให้ลดการสะสมของความร้อนที่เกิดขึ้น

การลดการนำความร้อนผ่านหลังคา โดยใช้วิธีการทำหลังคาบังแดด ซึ่งอาจเป็นหลังคาชนิดเบาอีกชั้นหนึ่ง เพื่อให้อากาศสามารถถ่ายเทระหว่างกลางได้สะดวกเป็นการป้องกันมิให้หลังคาอาคารถูกแดดโดยตรง

การลดความร้อนจากเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในอาคาร โดยการปิดไฟแสงสว่างและเครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ เมื่อเลิกใช้

การลดอัตราการรั่วซึมของอากาศเย็นออกภายนอกให้น้อยลง โดยการตรวจสอบรอยต่อต่าง ๆ ของบริเวณบ้าน เช่น ตามวงกบบานหน้าต่าง และประตูกับกำแพงระหว่างผนังกับฐานราก ระหว่างกำแพงกับหลังคา รอยต่อระหว่างผนัง หรือช่องเจาะเตรียมไว้ที่พื้นผนังหรือหลังคา สำหรับการเดินท่อต่าง ๆ ต้องอุดให้สนิทด้วยซีเมนต์และซิลิโคน (Silicone) เพื่อป้องกันการรั่วซึมของอากาศและกการไหลเข้าของอากาศร้อนจากภายนอก

การลดอัตราการระบายอากาศโดยอาคารที่มีการปรับอากาศที่หลังคาต้องนำอากาศบริสุทธิ์ภายนอกส่วนหนึ่งเข้ามาเพื่อระบายกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ จากสารเคมีที่เกิดจากสิ่งตกแต่งอาคารและอุปกรณ์เครื่องใช้ โดยเหตุที่อากาศภายนอกที่เข้ามานี้ทั้งร้อนและชื้น หากนำอากาศภายนอกเข้ามามากจะทำให้เครื่องปรับอากาศทำงานหนักขึ้นและสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ามากขึ้น

การใช้งานเครื่องทำน้ำเย็นอย่างถูกวิธี โดยการปรับตั้งอุณหภูมิน้ำเย็นที่ออกจากเครื่องทำน้ำเย็นให้สูงขึ้นได้โดยไม่ทำให้เกิดผลเสียแก่อุณหภูมิที่ต้องการควบคุมภายในอาคาร สามารถประหยัดพลังงานของเครื่องทำน้ำเย็นได้ 1.5-2.0 เปอร์เซ็นต์ สำหรับทุก ๆ 0.5 องศาเซลเซียสของอุณหภูมิน้ำเย็นที่เพิ่มสูงขึ้น

การติดตั้งและการใช้งานเครื่องปรับอากาศอย่างถูกวิธี โดยการปรับตั้งอุณหภูมิภายในอาคารให้อยู่ที่ 25 องศาเซลเซียส และเลือกใช้เครื่องปรับอากาศที่มีขนาดให้เหมาะสมกับขนาดห้องที่ติดตั้ง

การใช้เทคโนโลยีสีทาบ้านที่มีสมบัติเทอร์โมโครมิกหรือหมึกที่ทำจากสารที่เรียกว่าเทอร์โมโครมิก (Thermochromic) นั้น เป็นสารที่มีสมบัติพิเศษสามารถเปลี่ยนสีได้เมื่ออุณหภูมิของสารเปลี่ยนแปลงและอีกทั้งยังช่วยสะท้อนรังสีจากแสงอาทิตย์ทำให้พลังงานความร้อนที่มากับแสงอาทิตย์นั้นผ่านผนังอาคารเข้าสู่ภายในอาคารได้น้อยลงทำให้อุณหภูมิภายในอาคารเย็นลงส่งผลให้อัตราการใช้เครื่องปรับอากาศน้อยลงและช่วยประหยัดค่าใช้จ่าย สารที่มีสมบัติเทอร์โมโครมิกที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันคือ วานเดียมไดออกไซด์ (VO₂) ด้วยสมบัติที่เด่นชัดทางเทอร์โมโครมิกกับการเปลี่ยนสีของตัววานเดียมไดออกไซด์เองที่อุณหภูมิ 68 องศาเซลเซียส (Frédéric Guiméton และคณะ (2004))

ปัจจุบันมีการคิดค้นเทคโนโลยีใหม่ ๆ เพื่อพัฒนาสีทาบ้านให้มีสมบัติที่ดี เช่น สะท้อนความร้อน คายความร้อนมีการวิจัยการผลิตสีทาบ้านที่มีส่วนประกอบของนาโนไทเทเนียมที่มีสมบัติในการทำความสะอาดตัวเองได้ เป็นสีทาบ้านสามารถฆ่าเชื้อโรค เช่น เชื้อราและแบคทีเรียเมื่อได้รับการกระตุ้นจากแสงฟลูออเรสเซนต์และเป็นสีทาบ้านที่ลดการสะสมเชื้อโรคเหล่านี้ได้ปกติสีทาบ้านที่วางขายอยู่ในท้องตลาดจะมีส่วนผสมของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดรูทิวล์ เพื่อให้สีทาบ้านมีความขาวและมีความสว่างขึ้นแต่การใช้ซิงค์ออกไซด์ซึ่งมีสมบัติคล้ายคลึงกับไทเทเนียมไดออกไซด์ในด้านนี้แต่ราคาถูกกว่าและยังไม่ค่อยแพร่หลายนัก ดังนั้นหากใช้อนุภาคซิงค์ออกไซด์ระดับอนุภาคนาโนเมตรผสมลงไปจะทำให้สีทาบ้านเหล่านั้นมีสมบัติที่สามารถทำความสะอาดตัวเองได้รวมทั้งสามารถกำจัดฝุ่นละอองและแบคทีเรียได้อีกด้วย การวิจัยนี้จึงมีการพัฒนาสีทาผนังที่มีสมบัติหลายหน้าที่สำหรับอาคารด้านนอกที่ต้องสัมผัสกับสภาวะอากาศและมลพิษรวมถึงฝุ่นควันต่าง ๆ และผนังอาคารภายใน เช่น โรงพยาบาล หรือบ้านเรือนเพื่อลดการสะสมของเชื้อโรคและป้องกันการแพร่กระจายของเชื้อต่าง ๆ เนื่องจากสีนาโนจะสามารถกำจัดเชื้อโรคได้เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสง เช่น แสงจากหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ เท่านั้น สำหรับการประหยัดพลังงานในอาคารนั้นจะใช้สมบัติเทอร์โมโครมิกของสีที่จะพัฒนา โดยวัสดุเทอร์โมโครมิกที่เป็นองค์ประกอบหนึ่งของสีมีหน้าที่เปลี่ยนโครงสร้างตามเงื่อนไขของอุณหภูมิและสามารถทำ

ให้สะท้อนความร้อนออกจากอาคารทำให้ภายในอาคารเย็นลงได้ ซึ่งจะช่วยประหยัดการใช้เครื่องปรับอากาศได้

จากข้อมูลวิธีการลดความร้อนให้แก่อาคารที่กล่าวมาข้างต้น แสดงให้เห็นว่า สีทาบ้านที่มีสมบัติเทอร์โมโครมิก เป็นวิธีการที่น่าสนใจวิธีหนึ่ง ที่จะทำให้เราสามารถลดอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าลงทำให้เกิดการประหยัดพลังงาน จึงเป็นแนวทางที่จะปรับและประยุกต์ใช้สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ และการสังเคราะห์เม็ดสีเทอร์โมโครมิกระดับนาโนของวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ เป็นแนวความคิดสำหรับงานวิจัยนี้ที่จะผลิตเม็ดสีที่มีสมบัติเทอร์โมโครมิกและสมบัติอื่น ๆ รวมทั้งการประยุกต์ใช้ซิงค์ออกไซด์ร่วมกันในระบบจะทำให้เม็ดสีเทอร์โมโครมิกที่สังเคราะห์ได้นั้น มีความสามารถในการทำความสะอาดตัวเองเนื่องจากซิงค์ออกไซด์สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรีย และสามารถป้องกันรังสี UV-A และ UV-B ระงับกลิ่นอันไม่พึงประสงค์ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. สังเคราะห์อนุภาคระดับนาโนของวานาเดียมไดออกไซด์ที่มีการเปลี่ยนโครงสร้างจากการถูกกระตุ้นด้วยความร้อน
2. ศึกษาการเติมสารเจือทั้งสแตนไดรออกไซด์ (WO_3) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเปลี่ยนโครงสร้างของวานาเดียมไดออกไซด์เมื่อ กระตุ้นด้วยความร้อน
3. เพื่อศึกษาผลของการเติมซิงค์ออกไซด์ลงในวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์ต่อสมบัติเทอร์โมโครมิก สมบัติการทำความสะอาดตัวเองและด้านการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับสังเคราะห์อนุภาคเม็ดสีเทอร์โมโครมิกระดับนาโนที่มีประสิทธิภาพที่ดีในการเปลี่ยนโครงสร้างเมื่อถูกกระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิห้อง
2. ทราบถึงอิทธิพลของสารเจือที่มีผลต่อสมบัติเทอร์โมโครมิกและสมบัติทำความสะอาดตัวเอง
3. สามารถนำอนุภาคระดับนาโนของวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนผสมซิงค์ออกไซด์ไปประยุกต์ใช้เป็นส่วนผสมในสีทาอาคารบ้านเรือนได้

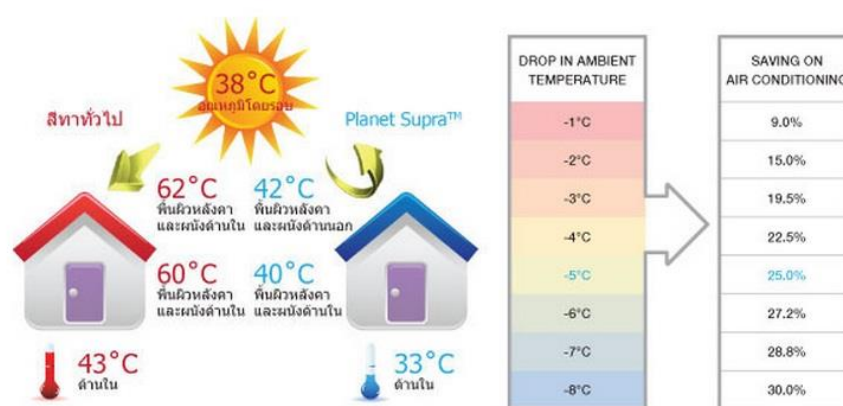
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

ในการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิธีการสังเคราะห์อนุภาคระดับนาโนของวานเนเดียมไดออกไซด์ที่สามารถเปลี่ยนโครงสร้างได้ตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป โดยการใช้แอมโมเนียมเมตาวานาเตตเป็นสารตั้งต้นและทำการเจือสารด้วยทั้งสแตนไดรออกไซด์โดยการใช้สารละลายแอมโมเนียม (พารา) ทั้งสเตรต ผสมกับวานเนเดียมไดออกไซด์ด้วยวิธีทางเคมี ศึกษาภาวะในการสังเคราะห์วานเนเดียมไดออกไซด์ ได้แก่ อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และสารออกซิเดชัน คือ กรดออกซาลิก นอกจากนั้นยังศึกษาผลของการเจือซิงค์ออกไซด์ลงในวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์โดยแปรค่าภาวะต่างๆ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณของสารเจือต่อสมบัติเทอร์โมโครมิกและสมบัติการทำมาความสะอาดตัวเอง

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาสีที่มีสมบัติในการลดอุณหภูมิภายในอาคาร เช่น สีกันความร้อนนาโน (รูปที่ 2.1) โดยสีกันความร้อนชนิดนี้สามารถสะท้อนการแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์ได้ทันทีถึง 94.6% ทำให้เราสามารถประหยัดพลังงานและยังได้รับรองการลดเขตรอบการปล่อยก๊าซคาร์บอนอีกด้วย สีกันความร้อนและกันน้ำ (ชนิดยัดหยุ่น) ซึ่งมีสมบัติเป็นฉนวนสุญญากาศป้องกันความร้อน พร้อมทั้งยังสามารถปกปิดรอยแตกร้าวต่างๆได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาและทำการสังเคราะห์เม็ดสีระดับนาโนที่มีสมบัติเทอร์โมโครมิกใช้สำหรับเป็นส่วนผสมในสีทาผนังอาคาร รวมถึงสีเคลือบหลังคา เพื่อลดปริมาณ รังสีอินฟราเรดที่จะผ่านเข้าไปในอาคาร เมื่อผนังได้รับความร้อนและแสงจากดวงอาทิตย์ ก็ จะเกิดสมบัติเทอร์โมโครมิกเปลี่ยน โทนสีให้จางลง เนื่องจากวัสดุที่มีสีอ่อนนั้นความสามารถในการดูดกลืนความร้อนได้ต่ำกว่าวัสดุสีเข้ม จึงเป็นแนวทางที่สามารถลดการใช้พลังงานจากภายในอาคารให้น้อยลงได้และหลักการทำงานเพื่อประหยัดพลังงานของสีกันความร้อนนั้น เมื่ออุณหภูมิภายในของตัวอาคารมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับหลังคาและผนังจากการวิเคราะห์พบว่า เมื่อเปรียบเทียบกับสีทาบ้านทั่วไปที่อุณหภูมิภายนอกเท่ากัน เมื่ออุณหภูมิลดลง 1 องศาเซลเซียส อัตราการประหยัดพลังงานของเครื่องปรับอากาศสามารถประหยัดการใช้พลังงานได้ถึง 9 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.1 อุณหภูมิภายในอาคารภายหลังการใช้สีที่มีสมบัติกันความร้อน

(ที่มา : <http://www.greennio.com/th/product.php?productId=16>)

2.1 วัสดุเทอร์โมโครมิก (Thermochromic)

วัสดุโครมิก (Chromic) หรือ โครมิซึม (Chromism) เป็นปรากฏการณ์หรือกระบวนการที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของสารทั้งจากไม่มีสีเป็นมีสีหรือจากสีหนึ่งเป็นอีกสีหนึ่ง เมื่อถูกกระตุ้นโดยสิ่งเร้าภายนอกประเภทต่าง ๆ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสีนี้มักจะเกิดขึ้นอย่างถาวรแต่สามารถผันกลับได้ ปัจจุบันพบสารที่มีสมบัติโครมิกมากมายทั้งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรือถูกสังเคราะห์ขึ้น โดยเฉพาะเพื่อให้มีสมบัติตามที่ต้องการ สารดังกล่าวนี้เป็นได้ทั้งสารประกอบอินทรีย์ สารประกอบอนินทรีย์

2.2 การเปลี่ยนสีและโครงสร้างของวัสดุเทอร์โมโครมิก

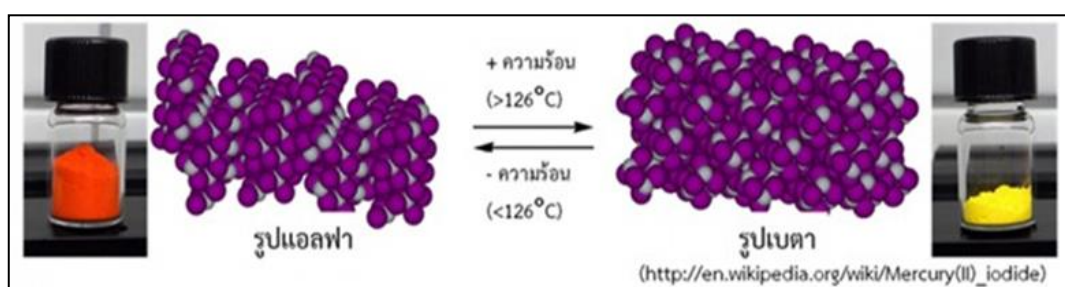
วัสดุอินทรีย์และอนินทรีย์ มีความสามารถในการแสดงสมบัติเทอร์โมโครมิกได้ โดยสามารถตอบสนองต่ออุณหภูมิ สารที่สามารถเกิดปรากฏการณ์เทอร์โมโครมิกที่หลากหลาย เช่น วานาเดียมไดออกไซด์ (Vanadium Dioxide) โครเมียม (III) ออกไซด์ อะลูมิเนียม(III) ออกไซด์ (Chromium (III) oxide :Aluminium (III) oxide) ในอัตราส่วน 1:9 นิกเกิลซัลเฟต (Nickel Sulfate) คิวปรัสเมอร์คิวไรโอไอไดด์ (Cuprous mercury iodide) ซิลเวอร์เมอร์คิวไรโอไอไดด์ (Silver Mercury iodide) บิส(ไดเอทิลแอมโมเนียม)เตตราคลอโรคิวเพรต (Bis (Diethylammonium) Tetrachlorocuprate) และ บิส (ไดเมทิลแอมโมเนียม)เตตราคลอโรนิกเกเลต (Bis(Dimethylammonium) Tetrachloronickelate) เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงสีของสารประกอบอนินทรีย์เหล่านี้จะเกิดผ่านการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในออร์บิทัล d และ f หรือการถ่ายโอนประจุแล้วเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงแสงที่มองเห็น การเกิดเทอร์โมโครมิกในสารอนินทรีย์และสารโลหะอินทรีย์ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างได้แก่

1) การเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของวานาเดียมไดออกไซด์ จากโครงสร้างโมโนคลินิกเป็นโครงสร้างรูไทล์เมื่อถูกกระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 68 องศาเซลเซียส มอร์คิวไรโอไอไดด์ (Mercury (II) iodide) จะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากรูปผลึกแอลฟา (สีแดง) เป็นรูปเบตา (สีเหลือง) ดังรูปที่ 2.2 นอกจากนี้การเปลี่ยนเฟส หรือโครงสร้างผลึก Cu_2HgI_4 มีสีแดงที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เปลี่ยนเป็นสีดำที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส หรือ $\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3$ มีสีแดงที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสและมีสีเทาที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเนื่องจากรูปผลึกที่ต่างกัน

2) การลดช่องว่างพลังงานเมื่อถูกกระตุ้นด้วยความร้อนในสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิงค์ออกไซด์มีลักษณะสีขาวเมื่อถูกกระตุ้นด้วยอุณหภูมิสูงจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง In_2O_3 มีสีเหลืองที่อุณหภูมิต่ำจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองน้ำตาลเมื่อถูกกระตุ้นด้วยอุณหภูมิสูง

3) การเปลี่ยนแปลงของลิแกนด์ เช่น $(Et_2NH_2)_2CuCl_4$ มีสีเขียวใสที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มีสีเหลืองที่อุณหภูมิ 43 องศาเซลเซียส

4) การเปลี่ยนค่าโคออดิเนชันนัมเบอร์ (Coordination number) เช่น Isopropanolic $CoCl_2$ โครงสร้างผลึกเป็น Octahedral มีสีชมพูที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส โครงสร้างผลึกเป็น Tetrahedral ซึ่งมีค่าโคออดิเนชันนัมเบอร์ต่างกัน



รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงสีของเมอร์คิวรี (II) ไอโอไดด์จากรูปผลึกแอลฟาไปเป็นรูปผลึกเบตาเมื่อมีการให้หรือลดความร้อน (ที่มา: <http://www.kmutt.ac.th/hynae/>)

นอกจากสารอนินทรีย์ที่กล่าวมาแล้ว ยังมีสารอนินทรีย์ชนิดอื่นที่มีสมบัติเทอร์โมโครมิก เช่น $Ni(NH_4)PO_4 \cdot 6H_2O$, $Cu(CNS)_2 \cdot 2\text{-pyridine}$, $(NH_4)_3PO_4 \cdot 12MoO_3$, $Co(NH_4)PO_4 \cdot H_2O$, NH_4VO_3 , $[Co(NH_3)_6]PO_4$, $(NH_4)_2U_2O_7$, $[Co(NH_3)_6](C_2O_4)_3$, $Mn(NH_4)P_2O_7$, $Cu_2(Hgl_4)$

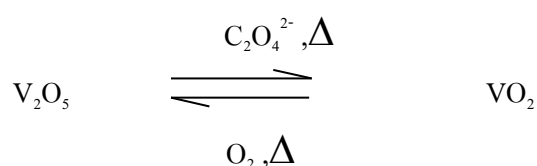
วานเนเดียมออกไซด์ (Vanadium oxide)

วานเนเดียมออกไซด์ คือ สารประกอบที่มีลักษณะเป็นผงสีเหลือง มีสูตรทางเคมี (V_2O_5) ซึ่งรู้จักกันดีในชื่อของวานเนเดียมเพนทอกไซด์ (Vanadiumpentoxide) สามารถแสดงสมบัติทางเทอร์โมโครมิกได้เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างเป็นผลึกชนิดออร์โธโรอมบิก (Orthorhombic) มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่อุณหภูมิ 690 องศาเซลเซียส วานเนเดียมออกไซด์หรือวานเนเดียมเพนทอกไซด์ นิยมใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้กับสารอินทรีย์และยังใช้เป็นสารตั้งต้นของเกลือวานเนเดียมธาตุกลุ่มนี้ ได้แก่ วานเนเดียม ไนโอเบียม และแทนทาลัม ธาตุทุกตัวมีเลขออกซิเดชันหลายค่า คือ วานเนเดียมมีเลขออกซิเดชันได้แก่ +2, +3, +4, และ +5 ส่วนไนโอเบียมและแทนทาลัมมีเลขออกซิเดชันเฉพาะ +3 และ +5 เท่านั้นที่สำคัญ

สมบัติทางเคมีของวานเนเดียมคล้ายกับของไทเทเนียม แต่มีปริมาณในธรรมชาติน้อยกว่าโลหะวานเนเดียมอาจเตรียมได้จากการรีดิวซ์ VCl_4 ด้วยแมกนีเซียม หรือรีดิวซ์ V_2O_5 ด้วยอะลูมิเนียม ในธรรมชาติมักเกิดปนกับโลหะอื่น สินแร่ที่สำคัญได้แก่ พาโทรไนต์ (Patronite) ซึ่ง

เป็นพวกซัลไฟด์ที่ซับซ้อน วานาดีไนต์ (Vanadinite, $Pb_5(VO_4)_3$) และคาร์โนไทต์ (Carnotite, $K(UO_2VO_4) \cdot 3/2 H_2O$)

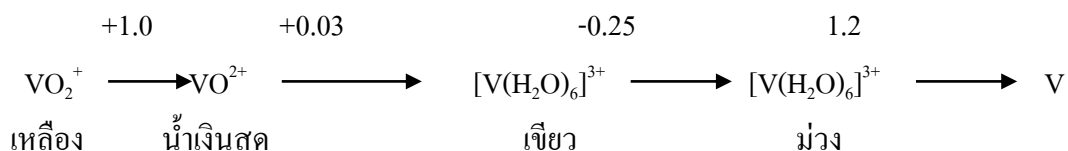
สำหรับคาร์โนไทต์มีความสำคัญในการผลิตยูเรเนียมมากกว่า แต่มีวานาเดียมเป็นผลพลอยได้ สารประกอบของวานาเดียมที่มีเลขออกซิเดชัน +5 มีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ จะถูกรีดิวซ์ได้สารประกอบที่มีเลขออกซิเดชันต่ำลงเป็นค่าต่างๆ แล้วแต่ความแรงของตัวรีดิวซ์ที่ใช้ ตัวรีดิวซ์ที่ค่อนข้างอ่อน เช่น SO_2 , Fe^{2+} , Sn^{2+} , $C_2O_4^{2-}$ และ I จะรีดิวซ์ V (V) ให้เป็น V(V)

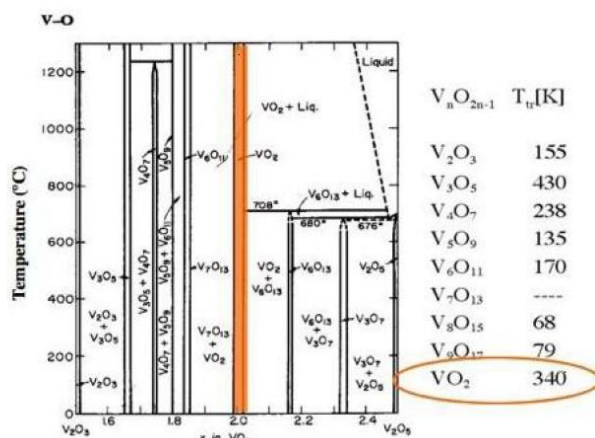


วานาเดียมไดออกไซด์มีสมบัติเป็นได้ทั้งกรดและเบส ทำปฏิกิริยากับด่างหลอมเหลว จะได้ไอออนลบต่างๆ เช่น VO_3^{2-} และ VO_4^{4-} เป็นต้น ถ้าให้ทำปฏิกิริยากับกรด จะได้สารละลายสีน้ำเงินของ VO^{2+} สารประกอบเฮไลด์ของ V(IV) ได้แก่ VF_4 , VCl_4 , VBr_4 และ VI_4 เป็นสารประกอบที่ไม่เสถียร

ถ้ารีดิวซ์วานาเดียม ด้วยตัวรีดิวซ์ที่แรงขึ้น เช่น H_2 , CO จะได้ V(III) สำหรับ VO ซึ่งเป็นออกไซด์เบส ทำปฏิกิริยากับกรดได้สารละลายสีเขียวของ $[V(H_2O)_6]^{3+}$ โดยที่สารประกอบ V(II) เป็นตัวรีดิวซ์ที่แรงมาก VO เมื่อละลายในกรดจะได้สารละลายสีม่วงอ่อน หรือสีของ $[V(H_2O)_6]^{3+}$ ซึ่งสามารถรีดิวซ์น้ำได้อย่างช้า ๆ

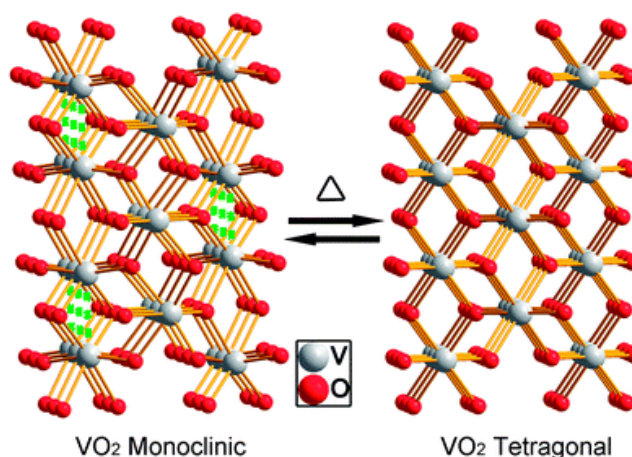
การเปลี่ยนเลขออกซิเดชันต่าง ๆ ของวานาเดียมสามารถติดตามได้โดยปฏิกิริยาของวานาเดียม (+5) กับ Zn/HCl และให้ความร้อนในภาชนะปิดจะเห็นสีของสารละลายเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน (+4) เขียว (+3) ม่วง (+2) ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นไปตามลำดับของค่า E^0 (ในสารละลายกรด)





รูปที่ 2.3 Phase diagram for the vanadium oxygen system (Joyeeta Nag , 2011)

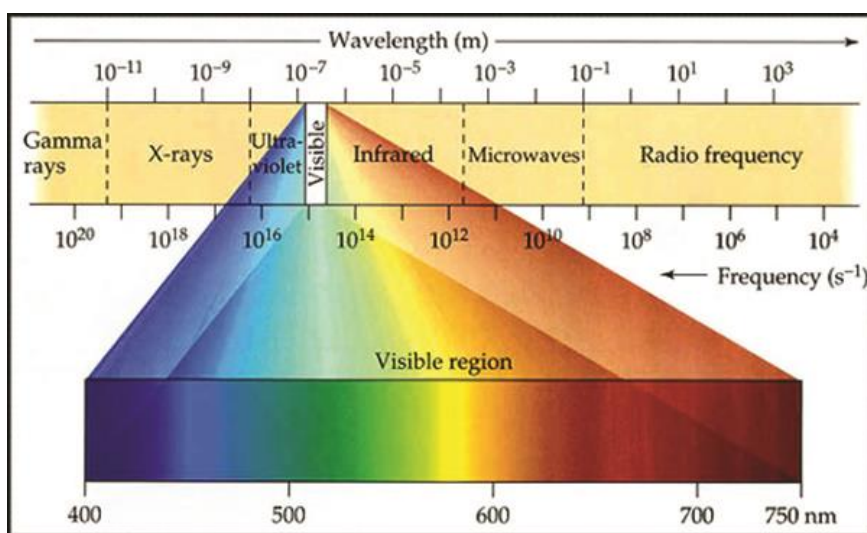
วานเนเดียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิห้องจะมีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ และยอมให้รังสีอินฟราเรดส่องผ่านได้มาก เมื่อวานเนเดียมไดออกไซด์ได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิทรานซิชันสมบัติของวานเนเดียมไดออกไซด์จะเปลี่ยนเป็นโลหะนำไฟฟ้า และจะสะท้อนหรือดูดซับรังสีอินฟราเรดไว้ ข้อมูลจาก Joyeeta Nag รูปที่ 2.3 แสดงถึงการเปลี่ยนโครงสร้างของวานเนเดียมไดออกไซด์พบว่า เมื่ออุณหภูมิอยู่ที่ 340 องศาเซลเซียส หรือประมาณ 68 องศาเซลเซียส วานเนเดียมไดออกไซด์จะมีสมบัติเทอร์โมโครมิกและสามารถเปลี่ยนสีได้ที่อุณหภูมินั้น ๆ



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของวานเนเดียมไดออกไซด์ ชนิดโมโนคลินิกและเตตระโกนอล (Zhenda Lu, 2011)

2.3 สมบัติทางแสง

แสง (Light) เป็นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า มีความยาวคลื่น (λ) อยู่ในช่วง 0.4-0.7 μm และมีความถี่ (f) อยู่ในช่วง $4-8 \times 10^{14}$ Hz โดยคลื่นแสงสามารถแบ่งออกเป็นหลายประเภทดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ความยาวคลื่นแสงประเภทต่างๆ

(ที่มา <http://biology.ipst.ac.th/wp-content/uploads/sites/16/2015/light%20Kae/k1.jpg>)

2.3.1 แสงที่ไม่สามารถมองเห็น (Near infrared-NIR)

แสงที่ไม่สามารถมองเห็นได้จะมีความยาวคลื่นมากกว่า 780 นาโนเมตร ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า หรือที่เรียกว่าอินฟราเรด ในพลังงานแสงอาทิตย์จะมีแสงที่ไม่สามารถมองเห็นได้ประกอบอยู่ประมาณ 53 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมนุษย์ไม่สามารถมองเห็นรังสี ที่มีพลังงานสูงเกินแสงสีม่วงขึ้นไป หรือแสงอัลตราไวโอเล็ต อันได้แก่ รังสีเอกซ์ หรือเอกซเรย์ รังสีแกมมา และรังสีคอสมิก อีกด้านหนึ่ง มนุษย์ไม่สามารถมองเห็น รังสีที่เป็นพลังงานต่ำกว่ารังสีได้แดง ซึ่งเรามักนิยมเรียกกันว่า เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อันได้แก่ คลื่นโทรทัศน์ คลื่นไมโครคลื่นวิทยุ และคลื่นเรดาร์

รังสีแกมมา (Gamma ray) คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ที่มีช่วงความยาวคลื่นสั้นกว่ารังสีเอกซ์ (X-ray) ที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 10^{-13} ถึง 10^{-17} หรือคลื่นที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 10^{-13} นั่นเอง การที่ความยาวคลื่นสั้นหมายถึงความถี่ที่สูง และพลังงานที่สูง ดังนั้นรังสีแกมมาถือเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงที่สุดในบรรดาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ที่เหลือทั้งหมด

รังสีเอกซ์ (X-ray) เป็นรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นในช่วง 0.01 ถึง 10 นาโนเมตร มีความถี่ในช่วง 30 ถึง 30,000 พีต้าเฮิรตซ์ (10^{15} เฮิรตซ์) ในเบื้องต้นมีการใช้รังสีเอกซ์สำหรับถ่ายภาพเพื่อการวินิจฉัยโรค และงานผลึกศาสตร์ (Crystallography) รังสีเอกซ์เป็นการแผ่รังสีแบบแตกตัวเป็นไอออน และมีอันตรายต่อมนุษย์

รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet Radiation:UV) หรือรังสีเหนือม่วง เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการแผ่ของดวงอาทิตย์ ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 100–400 นาโนเมตร ความถี่ 1015-1217 เฮิรตซ์ ซึ่งตาของมนุษย์ไม่สามารถมองเห็นได้ มีสมบัติไม่แตกตัว (Non-ionizing) รังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นช่วงรังสีที่อยู่ระหว่างชนิดรังสีที่แตกตัวได้ และแตกตัวไม่ได้ ประกอบด้วย 3 ชนิดความยาวคลื่น คือ

-UVA หรือเรียกชื่ออื่นว่า Long wave UVR หรือ Black light ความยาวคลื่น 315 – 400 นาโนเมตร มีระดับพลังงาน 3.10-3.94 อิเล็กตรอนโวลต์

-UVB หรือเรียกชื่ออื่นว่า Middle UVR หรือ Sunburn radiation ความยาวคลื่น 280 – 315 นาโนเมตร มีระดับพลังงาน 3.94-4.43 อิเล็กตรอนโวลต์

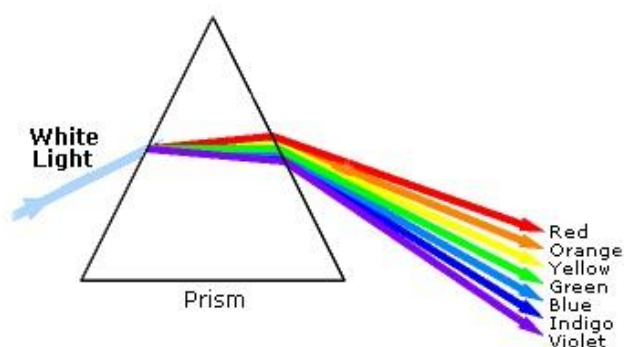
-UVC หรือเรียกชื่ออื่นว่า Short wave UVR หรือ Germicidal radiation ความยาวคลื่น 100 – 280 นาโนเมตร มีระดับพลังงาน 4.43-12.4 อิเล็กตรอนโวลต์ ช่วงความยาวคลื่นที่มากกว่ารังสีอัลตราไวโอเล็ต คือช่วงคลื่นที่ตามองเห็น Visible Radiation (Light) ความยาวคลื่น 400 – 760 นาโนเมตร

รังสีอินฟราเรด (Infrared (IR)) หรือเรียกอีกชื่อว่า รังสีใต้แดง คือรังสีที่มีความร้อนเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่างคลื่นวิทยุและแสงมีความถี่ในช่วง 1011– 1014 เฮิรตซ์ มีความถี่ในช่วงเดียวกับไมโครเวฟ มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่างแสงสีแดงกับคลื่นวิทยุสื่อสารทุกชนิดที่มีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง -200 องศาเซลเซียสถึง 4,000 องศาเซลเซียส จะปล่อยรังสีอินฟราเรดออกมา สมบัติเฉพาะตัวของรังสีอินฟราเรด คือ ไม่เบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แตกต่างกันเป็นสมบัติที่ขึ้นอยู่กับความถี่ คือยิ่งความถี่สูงมากขึ้น พลังงานก็สูงขึ้น (ที่มา <http://www.nst.or.th/article/notes01/article002.htm>)

2.3.2 แสงที่มองเห็นได้ (Visible light)

ในธรรมชาติแสงขาวประกอบด้วยแสงสีที่รวมกันเรียกว่า สเปกตรัม (Spectrum) ประกอบด้วย 7 สีได้แก่ ม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง ส้ม และ แดง โดยสีม่วงจะมีพลังงานมากที่สุด (ความยาวคลื่นสั้น) และพลังงานจะลดลงเรื่อยๆ ตามลำดับ จนกระทั่งสีแดงที่มีพลังงานต่ำสุด (ความยาวคลื่นยาว) ซึ่งมีความยาวคลื่นระหว่าง 380-780 นาโนเมตร เป็นความยาวคลื่นที่สามารถ

มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า โดยจะเห็นเป็นแสงสีขาว ซึ่งสีที่แสดงออกมานั้นประกอบไปด้วยสี 7 สี หรือสีรุ้ง สามารถทดสอบได้โดยใช้ปริซึมให้พลังงานแสงอาทิตย์จะมีแสงที่สามารถมองเห็นได้ ประกอบอยู่ 47 เปอร์เซ็นต์ ปรากฏการณ์การเกิดสเปกตรัมของแสงขาว ยกตัวอย่างถ้านำปริซึมไปวาง ให้แสงส่องผ่าน เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหแตกต่างกัน ความยาวคลื่นที่ต่างกัน จะหักเหด้วยมุมที่ไม่เท่ากัน สามารถจึงมองเห็นสีแสงขาวแยกสเปกตรัมเป็นสีต่าง ๆ ได้เมื่อนำฉากไปปรับตั้งแสดงในรูปที่ 2.6 (ที่มา http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/color-light/page1_4.html)



รูปที่ 2.6 การหักเหของแสงเมื่อเดินทางผ่านปริซึม

(ที่มา: http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/color-light/page1_4.html)

สำหรับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะศึกษาและทำการทดลองโดยใช้ความร้อนที่เกิดจากแหล่งกำเนิดที่ให้ความร้อนใกล้เคียงกับความร้อนที่เกิดจากแสงอาทิตย์ เพื่อใช้ทดสอบความสามารถในการสะท้อนความร้อนของเม็ดสีเทอร์โมโครมิกที่สังเคราะห์ได้

2.4 ความร้อน อุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อน

สสารทั้งหลายจะประกอบด้วยอะตอมรวมตัวกันเป็นโมเลกุล การเคลื่อนที่ของอะตอมหรือการสั่นของโมเลกุล ทำให้เกิดรูปแบบของพลังงานจลน์ ซึ่งเรียกว่า “ความร้อน” (Heat) โดยพิจารณาพลังงานความร้อน (Heat energy) จากพลังงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของอะตอมหรือโมเลกุลทั้งหมดของสสาร อุณหภูมิ (Temperature) หมายถึง การวัดค่าเฉลี่ยของพลังงานจลน์ซึ่งเกิดขึ้นจากอะตอมแต่ละตัว หรือแต่ละโมเลกุลของสสาร เมื่อเพิ่มพลังงานความร้อนให้กับสสาร อะตอมของสารก็จะเคลื่อนที่เร็วขึ้น ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น แต่เมื่อลดพลังงานความร้อน อะตอมของสารจะเคลื่อนที่ช้าลง ทำให้อุณหภูมิลดต่ำลง ยกตัวอย่าง เช่น การต้มน้ำด้วยถ้วย

และหม้อบนเตาเดียวกัน จะเห็นได้ว่าน้ำในถ้วยจะมีอุณหภูมิสูงกว่า แต่จะมีพลังงานความร้อนน้อยกว่าในหม้อ เนื่องจากปริมาณความร้อนขึ้นอยู่กับมวลทั้งหมดของสาร แต่อุณหภูมิเป็นเพียงค่าเฉลี่ยของพลังงานในแต่ละอะตอม ดังนั้นบรรยากาศชั้นบนของโลก (ชั้นเทอร์โมสเฟียร์) จึงมีอุณหภูมิสูง แต่มีพลังงานความร้อนน้อย เนื่องจากมีมวลอากาศอยู่อย่างเบาบาง

กลไกการถ่ายเทความร้อน

กลไกการถ่ายเทความร้อนแบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน แต่ในธรรมชาติการถ่ายเทความร้อนทั้งสามชนิดนี้อาจเกิดขึ้นรวดเร็วและอาจเกิดขึ้นพร้อมกันอย่างแยกไม่ออก ตัวอย่างเช่น การถ่ายเทความร้อนจากภายนอกผ่านผนังเข้าสู่ภายในอาคาร ดังแสดงในรูปที่ 2.7

-การนำความร้อน (Conduction) เกิดจากการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากโมเลกุลที่มีอุณหภูมิสูงไปยังโมเลกุลที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งจะเกิดขึ้นในสสารที่มีสภาพเป็นของแข็งที่มีการสัมผัสกัน โดยวัสดุแต่ละชนิดมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของแต่ละวัสดุนั้นต่างกัน ซึ่งการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนสามารถอธิบายดังสมการที่ 2.1

$$Q = UA\Delta T \quad (2.1)$$

กำหนดให้ Q = พลังงานการนำความร้อน (วัตต์)

U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (วัตต์ต่อตารางเมตรองศาเซลเซียส)

A = พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ (ตารางเมตร)

ΔT = ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในและภายนอกอาคาร (องศาเซลเซียส)

-การพาความร้อน (Convection) เกิดขึ้นโดยอาศัยการพาความร้อนระหว่างผิวของแข็งและของไหลในบริเวณใกล้เคียงกัน โดยมีอุณหภูมิต่างกัน การพาความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้ 2 แบบ คือ

1) การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) เกิดขึ้นเมื่อของไหลพาความร้อนผ่านผิวของแข็งด้วยแรงภายนอก

2) การพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection) เกิดขึ้นเมื่อของไหลพาความร้อนไหลผ่านผิวของของแข็งด้วยแรงลอยตัวที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของความหนาแน่นในของไหล โดยมีอุณหภูมิต่างกัน ซึ่งสามารถอธิบายการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนดังสมการที่ 2.2

$$Q = hcA(T_s - T_r) \quad (2.2)$$

กำหนดให้ Q = พลังงานการนำความร้อน (วัตต์)

h_c = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มอากาศ (วัตต์ต่อตารางเมตรองศาเซลเซียส)

A = พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ (ตารางเมตร)

T_s = อุณหภูมิผิวของวัสดุ (องศาเซลเซียส)

T_r = อุณหภูมิอากาศภายในอาคาร (องศาเซลเซียส)

-การแผ่รังสี (Radiation) คือ กลไกการถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างจากการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำและการพาความร้อน เนื่องจากการแผ่รังสีสามารถเคลื่อนที่ได้โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง ซึ่งถ่ายเทความร้อนในรูปแบบของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า การแผ่รังสีความร้อนที่เกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่นที่ 0.1-100 ไมโครเมตรจึงเป็นรังสีความร้อน (Thermal radiation) ซึ่งสามารถอธิบายการถ่ายเทความร้อนแบบการแผ่รังสีดังสมการที่ 2.3

$$Q = \varepsilon A \sigma (T_s^4 - T_r^4) \quad (2.3)$$

กำหนดให้ Q = พลังงานการนำความร้อน (วัตต์)

ε = ค่าการคายรังสีความร้อน

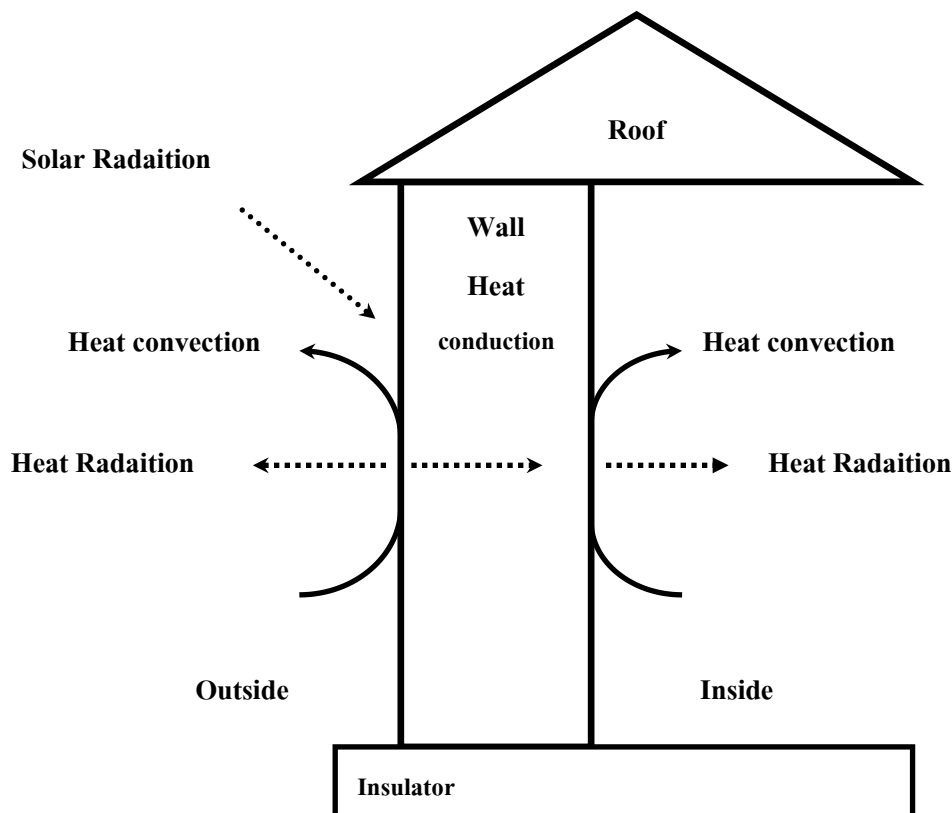
A = พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ (ตารางเมตร)

σ = ค่าคงที่ของสเตฟานและโบลซ์แมน (วัตต์ต่อตารางเมตรเคลวิน)

T_s = อุณหภูมิผิวของวัสดุ (องศาเซลเซียส)

T_r = อุณหภูมิอากาศภายในอาคาร

(ที่มา: http://mte.kmutt.ac.th/elearning/Thermal%20Engineering/information2_52.htm)



รูปที่ 2.7 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเข้าสู่ภายในอาคาร

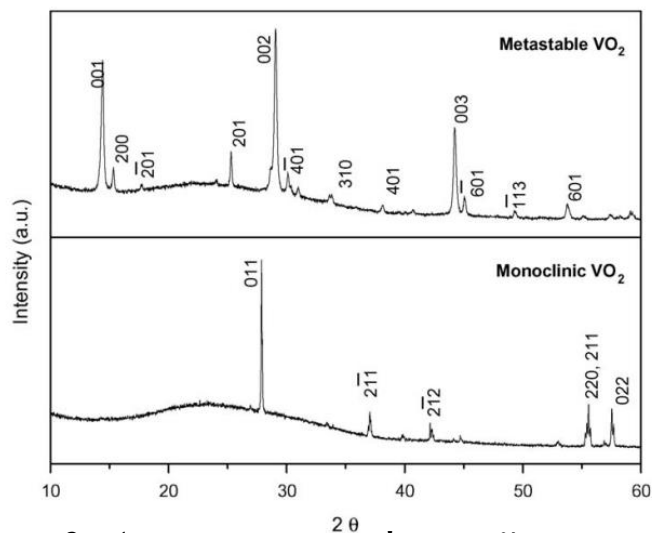
(ที่มา: <http://digi.library.tu.ac.th/thesis/ra/0225/03CHAPTER2>)

2.5 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 การสังเคราะห์วัสดุเทอร์โมโครมิกชนิดวานเดียมไดออกไซด์

V.Manivanan และ J.B Goodenough (1998) ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ วานเดียมไดออกไซด์ ชนิดรูไทล์ จากแอมโมเนียมเมตาตะวานาเตท โดยใช้สารละลาย Hydroxylamine hydrochloride ($\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$) 1.737 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ปรับ pH=10 ด้วย NaOH จากนั้นเตรียมสารละลายใส่ในบิวรต หยดลงใน สารละลาย Ammonium metavanadate (NH_4VO_3) 2.925 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ปรับ pH=4 ด้วย HCL กวนสารละลายทั้งสองตลอดเวลาและปรับสถานะให้เป็นกรด ที่ pH=4 จากนั้นทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จะได้ตะกอนสีเขียวกรองตะกอนและล้างด้วยน้ำกลั่น นำสารที่ได้ไปเผาที่ อุณหภูมิ 300 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เกิด เฟส V_2O_5 และ VO_2 ส่วนที่ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เกิดเฟส VO_2

Kinson และคณะ (2006) ได้ทำการสังเคราะห์ ท่อนาโนวานาเดียมไดออกไซด์ โดยการให้ความร้อนเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนเฟส จากการวิเคราะห์สมบัติพบว่าสมบัติเทอร์โมโครมิคเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 75-80 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าวานาเดียมไดออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นผง



รูปที่ 2.8 XRD การเกิดเฟสของ VO_2 nanorods ก่อนและหลังกระบวนการทางความร้อน (Kinson และคณะ (2006))

ข้อมูลจากรูปที่ 2.8 แสดงผล XRD ของการเกิดเฟสวานาเดียมไดออกไซด์ที่มีอนุภาคเป็นแท่งพบว่า ที่ตำแหน่ง 2θ อยู่ที่ประมาณ 27 แสดงระนาบ 011 โดยวานาเดียมไดออกไซด์เฟสที่เกิดขึ้นจะมีโครงสร้างเป็นโมโนคลินิก

Fre'deric Guinneton และคณะ (2004) ได้ศึกษาหาแนวทางในการพัฒนาการควบคุมสมบัติเทอร์โมโครมิคจากการกระตุ้นด้วยรังสีอินฟราเรด โดยเคลือบฟิล์ม วานาเดียมไดออกไซด์ บนพื้นผิวซิลิกาที่มีโครงสร้างเป็นอะมอร์ฟัส ด้วยวิธีการสปัตเตอริง (Sputtering) และเลือกภาวะที่ดีที่สุดในแต่ละตัวแปร ได้แก่ ความหนาของฟิล์ม อัตราส่วนของก๊าซ อุณหภูมิของพื้นผิวเคลือบ วิเคราะห์สมบัติเทอร์โมโครมิคด้วยเครื่องมือทดสอบแบบอินฟราเรดโดยปล่อยคลื่นแสงในช่วงกลาง (Mid-IR) วัดค่าการส่งผ่าน การสะท้อน และการปลดปล่อยคลื่นแสงที่อุณหภูมิ 68 องศาเซลเซียส จากสมบัติที่ได้นำไปใช้ในการผลิตกระจกเปลี่ยนสี

ตารางที่ 2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการเปลี่ยนสีของตัวอย่าง

Sample references	Substrate temperature (°C)	Color
V1	380	Dark blue
V2	395	Blue
V3	410	Blue
V4	425	Bronze
V5	440	Bronze
V6	455	Bronze
V7	470	Bronze

(ที่มา:Fre´de´ric Guinneton , 2004)

ข้อมูลจากตารางที่ 2.3 พบว่า สีที่เกิดขึ้นจากตัวอย่างอ้างอิงนั้นมีผลจากจากอุณหภูมิของวัสดุฐานหรือมาจากอุณหภูมิที่ตัวอย่างอ้างอิงได้รับ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป การแสดงสีของตัวอย่างก็จะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมินั้นๆ

Jeong-Ho Cho และคณะ (2012) ได้ศึกษาและสังเคราะห์ฟิล์มบางของวานาเดียมไดออกไซด์บนอะลูมินาด้วยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง โดยการเตรียมสารละลายวานาเดียมเพนทอกไซด์ (V_2O_5) ด้วยกระบวนการ โซล- เจล ภายหลังจากการเคลือบสารละลายวานาเดียมเพนทอกไซด์ (V_2O_5) บนอะลูมินาแล้วทำการเปลี่ยนฟิล์มบางของวานาเดียมเพนทอกไซด์ (V_2O_5) ให้เป็นวานาเดียมไดออกไซด์ด้วย การให้ความร้อนภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนและไฮโดรเจน โดยฟิล์มวานาเดียมไดออกไซด์ที่ได้จะมีสมบัติเทอร์โมโครมิกในช่วงอุณหภูมิ 64-72 องศาเซลเซียส

2.5.2 การเพิ่มประสิทธิภาพเทอร์โมโครมิก

การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับสารเทอร์โมโครมิกนั้นสามารถทำได้โดยการเจือสาร จะต้องมีการควบคุมปริมาณของสารเจืออย่างเคร่งครัด Jeong-Ho Cho และคณะ (2011) ได้ทำการเจือทั้งสแตงลงบนฟิล์มบางของวานาเดียมไดออกไซด์โดยการควบคุมปริมาณสารที่เติมลงไปพบว่า ที่ 2.7 โมลเปอร์เซ็นต์ทั้งสแตงออกไซด์ วานาเดียมไดออกไซด์จะแสดงสมบัติเทอร์โมโครมิกได้ที่อุณหภูมิห้อง

Yifu Zhang และคณะ (2013) ได้เจือสาร W, Mo, Sn และ Fe เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่ VO_2 ในขั้นตอนการสังเคราะห์ด้วยวิธีการ ไฮโดรเทอร์มอล โดยการนำสารตัวเติมใส่ลงไป ในขั้นตอนของการสังเคราะห์ จากผลการทดลองโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ XRD, XPS, SEM และ DSC พบว่า W และ Mo สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการสังเคราะห์เพื่อให้เกิดเฟส $VO_2(M)$ ได้ดีกว่า Fe และ Sn

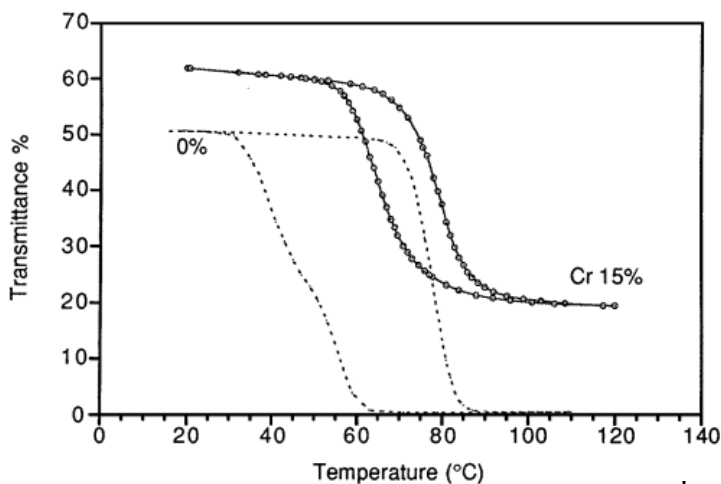
2.5.3 สารเทอร์โมโครมิกชนิด VO₂ เจือด้วยสารต่าง ๆ

Mlyuka Niklasson และคณะ (2009) ได้ทำการศึกษาสมบัติเทอร์โมโครมิกของฟิล์มหลายชั้นระหว่าง VO₂-TiO₂ โดยขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการสเปคโตรริง และทดสอบการส่งผ่านแสงและการสะท้อนแสงที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส และ 120 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่า การส่งผ่านแสงของฟิล์มที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส จะน้อยกว่าเมื่อเทียบกับฟิล์มที่ได้รับแสงที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส ส่วนการสะท้อนแสงจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การทำฟิล์มบางหลายชั้นด้วย VO₂-TiO₂ นั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของสมบัติเทอร์โมโครมิกให้กับฟิล์มได้อีกด้วย

Sebastien Saitzek และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์ม 2 ชั้น จาก VO₂ และ CeO₂ ให้มีสมบัติเทอร์โมโครมิก ด้วยการเคลือบ VO₂ ให้มีความหนา 120 นาโนเมตร บนแผ่นรองรับซิลิกาที่เป็นแบบอะมอร์ฟัสด้วยเทคนิค Reactive Sputtering หลังจากนั้นเคลือบ CeO₂ ในชั้นที่ 2 ด้วยเทคนิค RF-sputtering งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นในการพัฒนาระบบฟิล์ม 2 ชั้น ของ VO₂-CeO₂ ให้มีสมบัติทางด้านแสง จากสมบัติของ VO₂ การเกิดสมบัติเทอร์โมโครมิกที่ อุณหภูมิ 68 องศาเซลเซียส เนื่องมาจากเกิดการเปลี่ยนแปลงระหว่างสมบัติการเป็น โลหะกับฉนวน (Metal-insulator Transition) โดยเมื่อถูกกระตุ้นในช่วงความยาวคลื่นของรังสีอินฟราเรด จากการวิจัยพบว่าสมบัติทางแสง เช่น การสะท้อน และการแผ่รังสี ขึ้นอยู่กับความหนาของฟิล์มไม่เกิน 160 นาโนเมตร เมื่อเปรียบเทียบการส่งผ่านของแสงที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และ 100 องศาเซลเซียส พบว่าการส่งผ่านของแสงที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

การเจือวานาเดียมไดออกไซด์ด้วยโครเมียม (Cr)

Beteille และ Livage (1998) ได้ศึกษาฟิล์มบางของวานาเดียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโครเมียม พบว่าเมื่อปริมาณโครเมียมเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิแทรนซิชันเพิ่มสูงขึ้น และปริมาณการส่งผ่านของแสง ทั้งก่อนและหลังได้รับความร้อนเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.9 อุณหภูมิแทรนซิชันและฮิสเทอริซิสของวานาเดียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโครเมียม (Beteille และคณะ(1998))

ข้อมูลจากรูปที่ 2.9 พบว่าโครเมียมที่ใช้เจือลงในวานาเดียมไดออกไซด์มีผลทำให้ อุณหภูมิแทรนซิชันมีค่าลดลงและช่วยส่งผลให้ลูปฮิสเทอริซิส (Hysteresis loop) แคบขึ้นเมื่อเจือ 15 เปอร์เซ็นต์

การเจือวานาเดียมไดออกไซด์ด้วยไทเทเนียม (Ti)

Isao Tsuyumoto และ คณะ (2008) ได้สังเคราะห์ฟิล์มไทเทเนียม-วานาเดียมไดออกไซด์ จากสารละลาย Peroxotitanate และ Peroxovanadate ซึ่งฟิล์มที่ได้ แสดงสมบัติเทอร์โมโครมิกที่อุณหภูมิ ประมาณ 45 องศาเซลเซียส

การเจือวานาเดียมไดออกไซด์ด้วยอะลูมิเนียม (Al)

Beteille และ Livage (1998) ได้สังเคราะห์ฟิล์มบางของวานาเดียมไดออกไซด์เจือด้วยอะลูมิเนียมพบว่า เมื่อปริมาณสารเจือเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิแทรนซิชันเพิ่มสูงขึ้นและปริมาณการส่องผ่านของแสงเมื่อได้รับความร้อนเพิ่มมากขึ้น

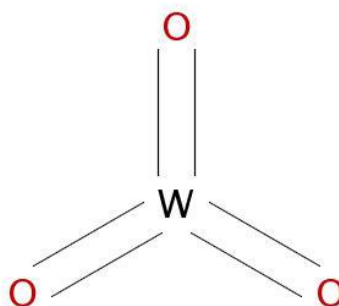
การเจือวานาเดียมไดออกไซด์ด้วยทังสเทนและทังสเทนไดรอกไซด์ (W, WO_3)

ทังสเทนออกไซด์หรือสารประกอบทังสติก (Tungstic) มีสมบัติทางกายภาพดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลทั่วไปของทังสเตนออกไซด์

ข้อมูล	รายละเอียด
สูตรเคมี	WO ₃
น้ำหนักโมเลกุล	231.85
ความถ่วงจำเพาะ	7.16 g/cc
จุดเดือด	1837 องศาเซลเซียส
จุดหลอมเหลว	1473 องศาเซลเซียส
รูปร่าง	ผลึกเดี่ยวสีเหลือง

(ที่มา <http://www.tungsten-trioxide.com/thai/tungsten-trioxide-physical-properties.html>)



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของทังสเตนออกไซด์

(ที่มา <http://www.tungsten-trioxide.com/thai/tungsten-trioxide-physical-properties.html>)

Jeao-Ho Cho และคณะ (2010) ได้ศึกษาฟิล์มบางของวานาเดียมไดออกไซด์เจือด้วยทังสเตนผลปรากฏว่า ฟิล์มที่ได้แสดงสมบัติเทอร์โมโครมิกที่อุณหภูมิต่ำลง เมื่อมีการเจือทังสเตนเพิ่มขึ้น และที่ปริมาณ 2.7 โมลเปอร์เซ็นต์ของทังสเตนออกไซด์จะสามารถแสดงสมบัติเทอร์โมโครมิกได้ที่อุณหภูมิต่ำลง เช่นเดียวกับ Jianqiu และคณะ (2007) ได้สังเคราะห์อนุภาคของวานาเดียมไดออกไซด์ ที่เจือด้วยทังสเตน จากวาเคนดิลซัลเฟต (VOSO₄) ผสมกับโซเดียมทังสเตนดีไฮดรต ด้วยวิธีการไฮโดรไลซิส จากนั้นนำตะกอนที่สังเคราะห์ได้ไปเผา จากผลการทดลองพบว่าการเจือด้วยทังสเตนจะทำให้อุณหภูมิทรานซิชันมีค่าลดลง

G.Karaoglan-Bebek และคณะ (2014) ได้ศึกษาการเจือทั้งสเดนบนฟิล์มของวานเนเดียมไดออกไซด์บนผิวของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีทางเคมี พบว่าทั้งสเดนมีผลทำให้อุณหภูมิทรานซิชันของฟิล์มวานเนเดียมไดออกไซด์มีพฤติกรรมการเปลี่ยนเฟสที่ประมาณ 40 องศาเซลเซียส และที่ 35 องศาเซลเซียสเมื่อมีการเจือทั้งสเดนเพิ่มขึ้น

Xiaogany Tan และคณะ (2012) ได้ศึกษากลไกของสารเจือทั้งสเดนที่มีผลต่ออุณหภูมิทรานซิชันของวานเนเดียมไดออกไซด์พบว่าโครงสร้างของสารจะเปลี่ยนเตตระโกนอลเมื่อวานเนเดียมไดออกไซด์ได้รับความร้อนและสมบัติจะเปลี่ยนเป็นสารนำไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิเกินจุดทรานซิชันของสารที่ปริมาณสารเจือทั้งสเดน 0.54 at% อุณหภูมิทรานซิชันของสารลดลงมาที่ 54.1 องศาเซลเซียส

Lihua Chen และคณะ (2012) ได้สังเคราะห์วานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดนไตรออกไซด์ด้วยวิธีอย่างง่ายผสมแอมโมเนียมเมตะวานาเคตด้วย แอมโมเนียมพาราทั้งสเดท และเผา 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมงภายใต้ บรรยากาศไนโตรเจนผลการวิจัยพบว่า ที่ปริมาณสารเจือ ≤ 2.5 at% โครงสร้างของสารที่เกิดขึ้นจะเป็นชนิดโมโนคลินิกและเมื่อปริมาณสารเจือมากกว่า 3 at% โครงสร้างของสารจะเป็นรูไทล์หรือเตตระโกนอล และที่ปริมาณทั้งสเดนไตรออกไซด์ 0.03 at% อุณหภูมิทรานซิชันของวานเนเดียมไดออกไซด์ลดลงมาที่ 35 องศาเซลเซียส

ข้อมูลจากตารางที่ 2.4 เป็นอิทธิพลของทั้งสเดนและทั้งสเดนไตรออกไซด์ต่ออุณหภูมิทรานซิชันของวานเนเดียมไดออกไซด์ ซึ่งแต่ละงานวิจัยจะใช้ระยะเวลาในการเผาผงตัวอย่างที่ 500-700 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 8-24 ชั่วโมงซึ่งเป็นการเผาตัวอย่างที่ใช้พลังงานสูงและระยะเวลาในการเผาเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาและเครื่องมือมีราคาแพง ดังนั้นสำหรับงานวิจัยนี้จะศึกษาปริมาณของสารเจือที่มีผลต่อสมบัติเทอร์โมโครมิกของวานเนเดียมไดออกไซด์ที่ปริมาณน้อย และศึกษาถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดสมบัติเทอร์โมโครมิกและใช้พลังงานให้น้อยที่สุดเพื่อเป็นการประหยัดพลังงานในการสังเคราะห์รวมถึงระยะเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์จะสั้นลง ผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้วิธีทางเคมีในการสังเคราะห์ผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดนไตรออกไซด์และซิงค์ออกไซด์

ตารางที่ 2.3 อิทธิพลของสารเจือทั้งสแตนเลสและทั้งสแตนเลสไร้โครเมียมที่มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิแทรกนชิชั้นของนักวิจัยต่าง ๆ

นักวิจัย	สารเจือ	อุณหภูมิแทรกนชิชั้น (องศาเซลเซียส)
Jeao-Ho Cho et al.(2010)	W-0.75mol%	41
G.Karaoglan-Bebek et al.(2014)	W	35
Jianqiu (2007)	W-0.75 %	41.8
	W-1.79 %	15.3
	W-2.8 %	4.1
Xiaogany Tan et.al.(2012)	W-0.54 at%	54.1
	W-0.95 at%	39.5
	W-1.45 at%	4.7
	W-2.38 at%	50
Lihua Chen et al.(2012)	WO ₃ -0.01 at%	54
	WO ₃ -0.015 at%	49
	WO ₃ -0.02 at%	44
	WO ₃ -0.03 at%	35
Qiang Song et al.(2014)	WO ₃ -1at%	37.3

การประยุกต์ใช้วัสดุเทอร์โมโครมิก

ปัจจุบันมีการนำวัสดุที่มีสมบัติเทอร์โมโครมิกมาประยุกต์ใช้ในงานหลายๆด้าน เพื่อเป็นการเพิ่มสมบัติให้แก่งานต่างๆดังนี้

1) หมึกพิมพ์ หมึกพิมพ์เทอร์โมโครมิกหรือสีย้อมมีการนำมาใช้ทั้งในรูปของผลึกเหลว (Liquid crystal) และ สารลูโคคาย (Leuco dye) ผลึกเหลวถูกนำมาใช้ในการทำแหวนบอกอารมณ์ สารลูโคคายนำมาผลิตเป็น เครื่องวัดอุณหภูมิ เครื่องทดสอบแบตเตอรี่ เสื้อผ้า และขวดบรรจุยา อาหาร และเครื่องดื่ม

2) สีผลิตเป็นเม็ดสีนำไปใช้ทั้งในรูปของผลึกเหลว และสารลูโคคาย สามารถเปลี่ยนสีกลับไปกลับมาได้ เช่น การไปใช้เป็นสีเคลือบแก้วน้ำ เม็ดสี (Pigment) เป็นสารที่ทำให้เกิดสีและทำให้เกิดปรากฏการณ์เปลี่ยนสีในสารเคลือบ

3) กระจก เช่น กระจกพิมพ์ชนิดความร้อน กระจกใบเสร็จ

4) วัสดุอื่น ๆ เช่น สีทาแบตเตอรี่ สีทาแก้วเพื่อใช้วัดอุณหภูมิ น้ำ และ เทอร์มอมิเตอร์วัดไข้

5) เม็ดสีเทอร์โมโครมิกเป็นวัสดุที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานสีทาอาคารได้ ซึ่ง เม็ดสีแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ เม็ดสีอินทรีย์ (Organic pigment) และเม็ดสีอนินทรีย์ (Inorganic pigment) (ตารางที่ 2.5) เม็ดสีอนินทรีย์จะทนความร้อนได้ดีกว่าเม็ดสีอินทรีย์ จึงเหมาะกับการใช้งานกลางแจ้ง เม็ดสีอนินทรีย์กระจายตัวได้ดีกว่าเพราะมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า มีการเคลื่อนตัวออกจากเนื้อพลาสติกได้ยากกว่า มีความทึบแสงมากกว่าและยังมีราคาถูกกว่า แต่มีสีสดใส น้อยกว่าเม็ดสีอินทรีย์ ตัวอย่างเม็ดสีอนินทรีย์ เช่น Iron oxide ซึ่งมีตั้งแต่สีเหลือง, สีแดง, จนถึงสีดำ Lead chromate เม็ดสีอาจประกอบด้วย Lead sulfate มีสีตั้งแต่สีเหลืองสดอ่อนอมเขียว จนกระทั่งสีเหลืองเข้มอมแดง Molybdate orange เม็ดสีกลุ่มนี้จะมี Lead molybdate ผสมกับ Lead chromate จึงมีสีตั้งแต่แดงสดเข้มจนถึงสีส้มอมแดง

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างเม็ดสีจากสารอินทรีย์และอนินทรีย์

Organic pigments		Inorganic pigments
Polycyclic pigments	Azo pigments	Titanium dioxide white
Phthalocyanine	Monoazo yellow and orange	Carbon and vegetable black
Quinacridone	Diazo	Iron oxide
Perylene and perinone	Naphthol	Cadmium
Thioindigo	Naphthol AS	Lead chromate
Anthraquinone	Azo lakes	Chromium oxide green
Dioxazine	Benzimidazolone	Ultramarine blue
Isoindolinone and isoindoline	Diazo condensation	Iron blue
Diketo-pyrrolo-pyrrole (DPP)	Metal complex	Chrome green
Triarylcarbonium		Phthalo chrome green
Quinophthalone		Mixed metal oxide
		Bi-vanadate
		Manganese oxide (MnO)

(ที่มา : http://www.dispersions-pigments.basf.com/portal/basf/ien/dt.jsp?setCursor=1_561069)

สารเทอร์โมโครมิกแต่ละประเภทนั้นมีสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างกันไม่ว่าจะเป็นในส่วนของคุณสมบัติการสะท้อนแสง อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสี รวมไปถึงความสามารถในการเปลี่ยนสีไปกลับของสารเทอร์โมโครมิกแต่ละชนิดซึ่งจะมีความแตกต่างกันทั้งชนิดที่เป็นสารประกอบอินทรีย์และสารประกอบอนินทรีย์ ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ของสารเทอร์โมโครมิกแต่ละชนิด

Material property	Inorganic pigments	Organic microcapsules	Conjugated polymers
Switching temperature	70-500°C	0-130°C	-
Thermostability	Stability at 500°C possible	<200°C	<200°C
Light stability	Suitable for outdoor applications	Insufficient	Insufficient
Multiswitching between different colours possible?	Reversible: no; only two colours Irreversible: yes	Yes	No
Switching temperature adjustable	Fixed transition temperatures	Switching temperature is adjustable	Fixed transition temperatures
Colour variable at constant switching temperature?	Fixed colours	Colour variable by changing dye component	Fixed colours

(ที่มา : <http://www.globalspec.com/reference/51422/203279/3-2-inorganic-pigments>)

2.5.4 สารที่มีสมบัติการทำความสะอาดตัวเองและการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย

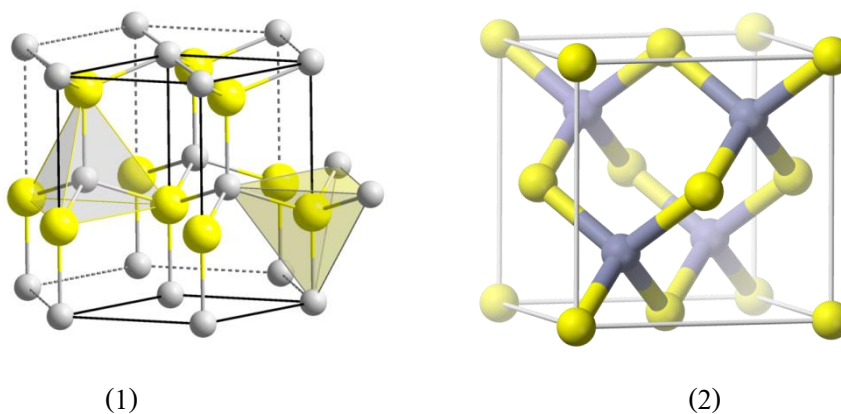
การประยุกต์ใช้สารที่มีสมบัติเทอร์โมโครมิกร่วมกับซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ในการต้านแบคทีเรียโดยซิงค์ออกไซด์เป็นสาร โฟโตแคตะลิสต์ที่มีเสถียรภาพต่อสารเคมี มีความคงตัว ประสิทธิภาพสูง ไม่ติดไฟ ไม่มีความเป็นพิษ (Daneshvar และคณะ, 2007) และมีช่องว่างพลังงาน ประมาณ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเป็นค่าที่ไม่สูงมากนักและสามารถดูดซับแสงที่ความยาวคลื่นต่ำได้

ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide)

ซิงค์ออกไซด์เป็นที่รู้จักในนาม กาลาไมต์ ซึ่งเป็นภาษาอียิปต์โบราณ เป็นธาตุธรรมชาติจากสินแร่ สมิทโซไนต์ (Smithsonite) มนุษย์ใช้ซิงค์ออกไซด์ในการรักษาโรคตั้งแต่ในยุคอียิปต์โบราณ ซิงค์ออกไซด์มีลักษณะเป็นผงอนุภาคละเอียดสีขาวเป็นสารที่ช่วยยับยั้งแบคทีเรีย (Anti-bacteria) ไม่มีความเป็นพิษต่อร่างกาย นอกจากนี้ฆ่าแบคทีเรียแล้วยังช่วยป้องกันและยับยั้งการแบ่งเซลล์ของแบคทีเรีย ด้วยเหตุผลนี้ซิงค์ออกไซด์จึงเป็นหนึ่งในสารที่สำคัญในการเป็นยาต้านแบคทีเรีย และยังสามารถป้องกันรังสี UV-A และ UV-B รวมทั้งสามารถระงับกลิ่นอันไม่พึงประสงค์ได้อีกด้วย

ซิงค์ออกไซด์นาโน หรือ ZnO Nano

ซิงค์ออกไซด์นาโนเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเปลี่ยนขนาดอนุภาคซิงค์ออกไซด์ให้มีขนาดเล็กลงอยู่ในระดับอนุภาคนาโนเมตร ซึ่งมีสมบัติเฉพาะตัวดังแสดงในตารางที่ 2.1 และมีลักษณะเป็นผงอนุภาคละเอียดมีขนาดอนุภาคเล็กระดับนาโนเมตร (10 – 9 เมตร) มีความบริสุทธิ์สูง มีสีขาวและไม่เปลี่ยนสี สามารถป้องกันรังสี UV-A และ UV-B ต้านทานแบคทีเรีย (Anti-bacteria) ระงับกลิ่นอันไม่พึงประสงค์นำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้ ซึ่งโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ภายหลังกระบวนการเปลี่ยนขนาดอนุภาคนั้นจะมี โครงสร้าง 2 ชนิดคือชนิด Wurtzite และ Zinc blende ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.11 โครงสร้าง ZnO ชนิด Wurtzite (1), โครงสร้าง ZnO ชนิด Zinc blende (2)

(ที่มา <http://www.nanomaterials.co.th/index2.asp?CType=4>)

ตารางที่ 2.6 สมบัติของซิงค์ออกไซด์นาโน

Product Name	Zinc oxide nano particles	
Molecular formula	ZnO	-
Molecular Weight	81.39	g/mole
Appearance	White powder	-
Crystal Phase	Zincite (hexagonal)	-
Purity	99.5+	%
Average Particles Size	20-40	Nm
Specefic Surface Area	26.22	M2/g
Bulk Density	0.14	g/cc
True Density	5.6	g/cc
P.H.	7-8	-
Boiling Point	-	°C
Melting Point	1975	°C

(ที่มา: <http://www.nanomaterials.co.th/index2.asp?CType=4>)

ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของได้แก่ P. Dhandapani และคณะ (2014) ได้สังเคราะห์อนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์บนเส้นใยฝ้ายเพื่อใช้สร้างเป็นเสื้อกันกระสุน โดยอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะรูปร่างเป็น Nanoflower และมีความสามารถในการต้านการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย ชนิด *E.coli* และ *S. aureus*

M.Nirmala และคณะ (2010) ได้ทำการศึกษาสมบัติด้านโฟโตแคตะลิสต์อนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยวิธีการ DC Thermal plasma และได้ตรวจสอบสมบัติด้วย XRD, UV-Vis ซึ่งผลที่ได้จาก XRD พบว่าซิงค์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นมีโครงสร้างชนิด Wurtzite ซึ่งทำให้การเกิดสมบัติ โฟโตแคตะไลติกได้ดี โดยการทดสอบการย่อยสลายสารเมทิลีนบลูในน้ำ พบว่านาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ สามารถย่อยสลายเมทิลีนบลูได้ดีภายใต้แสงยูวี

Prashant Kamat และคณะ(2002) จากมหาวิทยาลัยนอเตรอดาม (Notre Dam) ได้ศึกษาหาวิธีการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียด้วยสารเคมีที่ไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ พบว่า โมเลกุลของซิงค์ออกไซด์ สามารถเป็นทั้งวัสดุตรวจสอบและกำจัดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียได้ในเวลาเดียวกัน จากการทดสอบกับน้ำเสียที่มีสารคลอรีเนท ฟีนอล (Chlorinated phenol) ซึ่งถูกใช้เป็น

สารกันบูดและสารกำจัดจุลินทรีย์ รวมทั้งเป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมหลายประเภท จึงเป็นสารมลพิษที่พบกันได้ทั่วไปในน้ำเสียจากแหล่งต่างๆ จากการทดลองพบว่าในสภาพปกติ ซิงค์ออกไซด์สามารถแปลงรังสีในช่วงที่ตามองเห็นได้ออกมา แต่เมื่อแช่ซิงค์ออกไซด์ในน้ำเสียที่มีสารคลอรีนที่ฟีนอล การเปล่งแสงของซิงค์ออกไซด์จะลดลงอย่างชัดเจน ขณะเดียวกันก็ทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลคลอรีนที่ฟีนอล ทำให้ความเข้มข้นลดลงอย่างรวดเร็ว เหลือเพียง 1 ในล้านส่วนภายในเวลาไม่ถึงนาที นอกจากนั้นแล้ว เมื่อผ่านแสงอัลตราไวโอเลตในน้ำเสียที่มีซิงค์ออกไซด์ จะช่วยให้สามารถกำจัดสารอินทรีย์ ที่ทำให้เกิดการขุ่นมัวในน้ำได้เป็นอย่างดีอีกด้วย และเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดฟิล์มของซิงค์ออกไซด์ก็จะกลับสู่สภาพโปร่งใสขึ้นเช่นเดิม
(ที่มา: <http://www.material.chula.ac.th/RADIO45/October/radio10-3.htm>)

นาโนซิงค์ออกไซด์เป็นสารที่สามารถเติมในอาหารได้โดยมีความปลอดภัยสูง สามารถใช้ได้ทั้งในอาหารคนและอาหารสัตว์ เนื่องจากธาตุสังกะสีเป็นธาตุที่จำเป็นต่อร่างกาย โดยปกติร่างกายผู้ใหญ่ต้องการสังกะสีวันละ 15 มิลลิกรัม และเพิ่มขึ้นเป็น 25 มิลลิกรัม ในสตรีที่ให้นมบุตร ซิงค์ออกไซด์เป็นยาสมุนไพร ลดการอักเสบ และยับยั้งแบคทีเรียได้ดี โดยนำมาใช้เป็นยาสมุนไพรและรักษาโรคติดเชื้อที่ผิวหนังบางชนิด เช่น โรคเรื้อนกวาง โรคผิวหนังเป็นตุ่มพุพองจากเชื้อแบคทีเรีย โรคกลากเกลื้อน ฝี อาการคันตามผิวหนังและผิวหนังอักเสบ โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ใช้จะอยู่ประมาณ 10 ถึง 20 นาโนเมตร จากการสังเกตภายใต้กล้องกำลังขยายสูง พบว่ามีลักษณะเป็นผงอนุภาคละเอียดมีความบริสุทธิ์สูง มีสีขาวและไม่เปลี่ยน (ที่มา: <http://www.nanomaterials.co.th/index2.asp?CType=3>)

นาโนซิงค์ออกไซด์มีประสิทธิภาพสูงในการป้องกันรังสี UVA และ UVB นอกจากนั้นยังมีอนุภาคเล็กละเอียด มีความบริสุทธิ์สูง และปลอดภัย เหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์กันแดด สำหรับผิวเพื่อป้องกันรังสี UV ซิงค์ออกไซด์มีความปลอดภัยและอ่อนโยนต่อร่างกาย โดยได้รับการยืนยันจาก Food and Drug Administration (FDA) ของสหรัฐอเมริกาว่าเป็น 1 ใน 2 ชนิดของสารกันแดดที่เป็นส่วนผสมในประเภทผลิตภัณฑ์ดูแลผิวซึ่งสามารถป้องกันได้ทั้ง UVA และ UVB เช่นเดียวกับ Australian Commonwealth Scientific & Industrial Research Organization (CSIRO) พบว่านาโนซิงค์ออกไซด์เมื่อนำมาใช้เป็นส่วนผสมของครีมหรือโลชั่นกันแดดจะให้สัมผัสนุ่มลื่น โปร่งใส และไม่มีสีหลังจากที่ทาลงบนผิว นาโนซิงค์ออกไซด์จึงเหมาะที่จะนำมาผสมเป็นสารกันแดดในเครื่องสำอาง

ในอุตสาหกรรมสี นาโนซิงค์ออกไซด์เป็นสารป้องกันไฟฟ้าสถิตตัวใหม่ ซึ่งมีความสามารถเป็นสารกึ่งตัวนำ การเติมนาโนซิงค์ออกไซด์ในเรซินจะสามารถนำมาใช้ป้องกันไฟฟ้าสถิตได้ทั้งยังสามารถผลิตสีป้องกันรังสี UV สีที่สามารถทำความสะอาดตัวเองได้
(ที่มา: <http://www.nanomaterials.co.th/index2.asp?CType=3>)

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการสังเคราะห์และการนำวัสดุเทอร์โมโครมิกไปใช้ในการช่วยลดการใช้พลังงานในอาคารซึ่งสมบัติเด่นของเทอร์โมโครมิกนั้นมีประโยชน์ต่อสถานการณ์ของโลก ปัจจุบันการลดความร้อนให้กับอาคารเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่เราสามารถนำเทอร์โมโครมิกไปประยุกต์ใช้ได้ สีทาอาคารหรือสีทาบานเป็นอีกทางเลือกที่มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถประยุกต์นำเอาวัสดุเทอร์โมโครมิกไปผสมเพื่อใช้ในการลดความร้อนภายในอาคารและด้วยความสามารถในด้านการทำความสะอาดตัวเองของซิงค์ออกไซด์จึงเป็นสารที่มีความน่าสนใจที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ร่วมกับเม็ดสีเทอร์โมโครมิกระดับนาโนของวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์ซึ่งระบบที่กล่าวถึงในข้างต้น เป็นการนำสมบัติเด่นของสารที่มีสมบัติเทอร์โมโครมิกมาประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาเป็นเม็ดสีระดับนาโน โดยทำหน้าที่เป็นสารที่ช่วยสะท้อนความร้อนออกจากอาคารตลอดจนทำความสะอาดผิวตัวเองและป้องกันการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ด้วย

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 วิธีการวิจัย

การศึกษาแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การสังเคราะห์และเตรียมสารวานิลาไดออกไซด์และสารวานิลาไดออกไซด์ที่มีสารเจือด้วยวิธีทางเคมี นำสารที่สังเคราะห์ได้ไปเผาภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เพื่อให้ได้สารในรูปแบบผง แล้วนำไปวิเคราะห์คุณลักษณะด้วยเทคนิค XRD, DSC, SEM, EDS, TEM, FT-IR และ XPS

ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาอิทธิพลของสารเจือทั้งสแตโน ไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่มีผลต่อการลดอุณหภูมิทรานซิชันของวานิลาไดออกไซด์เฟสโมโนคลินิก

ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาผลของผงตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ต่อการประยุกต์ใช้เป็นส่วนผสมในสีทาอาคาร โดยการทดสอบความสามารถในการสะท้อนความร้อนความสามารถในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียชนิด *E.coli* และสมบัติการทำความสะอาดตัวเองของสีทาอาคาร

3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์สารวานิลาไดออกไซด์เฟสโมโนคลินิก

ในการสังเคราะห์สารวานิลาไดออกไซด์ จะใช้สารตั้งต้นแอมโมเนียมเมตาวานเดท (NH_4VO_3 , Ajax Finechem Pty Ltd) ปริมาณ 0.5 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 50 มิลลิลิตร ผสมด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็กด้วยความเร็ว 600 รอบต่อนาที และให้ความร้อน 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เมื่อสารตั้งต้นละลายหมดมีลักษณะเป็นสารละลายสีเหลืองใส จากนั้นเติมกรดออกซาลิก ($(\text{COOH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, Ajax Finechem Pty Ltd) ปริมาตร 0.7 กรัม กวนต่อเนื่องจนสารละลายเปลี่ยนสีจากสีส้มเป็นสีน้ำเงินใส ระยะเวลาประมาณ 15 นาที จากนั้นนำแท่งแม่เหล็กออกจากบีกเกอร์และเพิ่มความร้อนเป็น 85 องศาเซลเซียสเพื่อให้น้ำระเหยออกจากสารละลายทิ้งไว้ 120 นาที จะได้ตะกอนของสารสีดำ นำไปบดเพื่อให้ได้ลักษณะผง จากนั้นนำผงตัวอย่างที่ได้ไปเผาที่ความร้อน 700 องศาเซลเซียส การอัตราการให้ความร้อนที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาทีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ขั้นตอนนี้เป็นการตรวจสอบคุณลักษณะพื้นฐานของสารเพื่อให้ได้เฟสโมโนคลินิกด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) โดยมีขั้นตอนการสังเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 3.1

3.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์สารวานเดียมไดออกไซด์เฟสโมโนคลินิกด้วยสารเจือທັงสแตนไดรออกไซด์และซิงค์ออกไซด์

จากขั้นตอนการสังเคราะห์ที่ 3.2 เมื่อผงตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้เป็นวานเดียมไดออกไซด์ชนิดเฟสโมโนคลินิก จึงเริ่มขั้นตอนการเจือสารลงไปในการสังเคราะห์ดังนี้

3.3.1 การสังเคราะห์สารวานเดียมไดออกไซด์เฟสโมโนคลินิกเจือด้วยທັงสแตนไดรออกไซด์

เริ่มจากใช้ แอม โมเนียมเมตาวานาเดท (NH_4VO_3 , Ajax Finechem Pty Ltd) ปริมาณ 0.5 กรัมเป็นสารตั้งต้นละลายในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร กวนผสมด้วยความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที ด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็กจากนั้นให้ความร้อน 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที จนสารตั้งต้นละลายหมดและมีลักษณะเป็นสีเหลืองใส จากนั้นเติมแอม โมเนียม พารา ทังสแตน ($(\text{NH}_4)_{10}(\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{42})\cdot 4\text{H}_2\text{O}$, Aldrich Chemistry) ปริมาณ 0.025 ถึง 0.250 at% (ปริมาณการเติมสารเจือดังแสดงในตารางที่ 3.1) เมื่อสารเจือละลายหมด เติมกรดออกซาลิก ($(\text{COOH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, Ajax Finechem Pty Ltd) ปริมาณ 0.7 กรัม กวนต่อเนื่องจนสารละลายเปลี่ยนสีจากสีส้มภายหลังการเติมจนเป็นสีน้ำเงินใส ระยะเวลาประมาณ 15 นาที จากนั้นระเหยน้ำออกที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสบนแผ่นให้ความร้อนจนได้เป็นผง นำไปบดและเผาภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่ความร้อน 700 องศาเซลเซียสด้วยอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาทีและทิ้งไว้ที่อุณหภูมิดังกล่าวเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ขั้นตอนนี้เป็น การตรวจสอบคุณลักษณะของผงตัวอย่างด้วยเทคนิคต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนระหว่างสารตั้งต้นแอมโมเนียมเมตาวานาเดทและสารเจือแอมโมเนียม พาราທັงสแตน

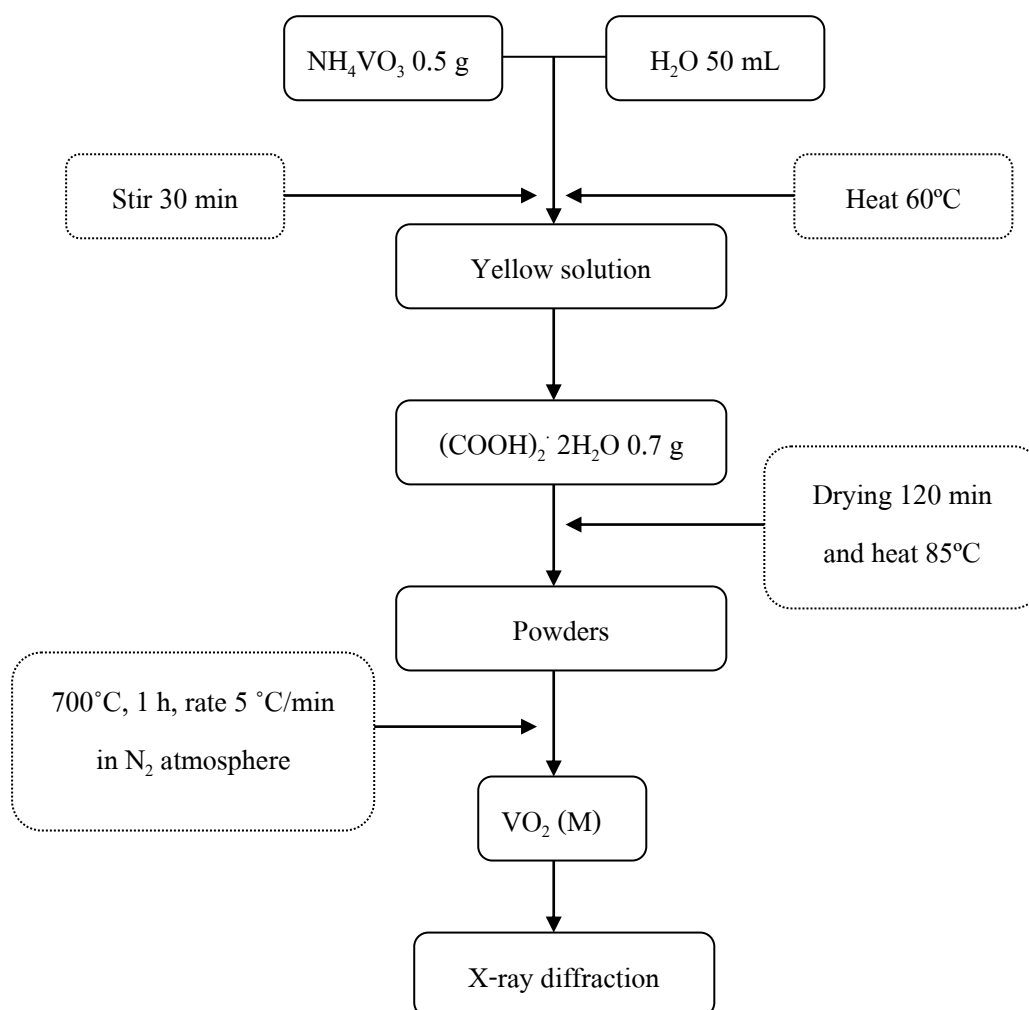
ตัวอย่าง	NH_4VO_3 (กรัม)	$(\text{NH}_4)_{10}(\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{42})\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	
		at%	กรัม
Pure VO_2	0.5	0	0
0.0175 at% WO_3/VO_2	0.5	0.0175	0.00135
0.025 at% WO_3/VO_2	0.5	0.025	0.0027
0.100 at% WO_3/VO_2	0.5	0.100	0.0108
0.175 at% WO_3/VO_2	0.5	0.175	0.0189
0.250 at% WO_3/VO_2	0.5	0.250	0.0270

3.3.2 อัตราส่วนระหว่างสารตั้งต้นแอมโมเนียมเมตาวานาเดทเจือแอมโมเนียม พาราทังสเตนและซิงค์ออกไซด์

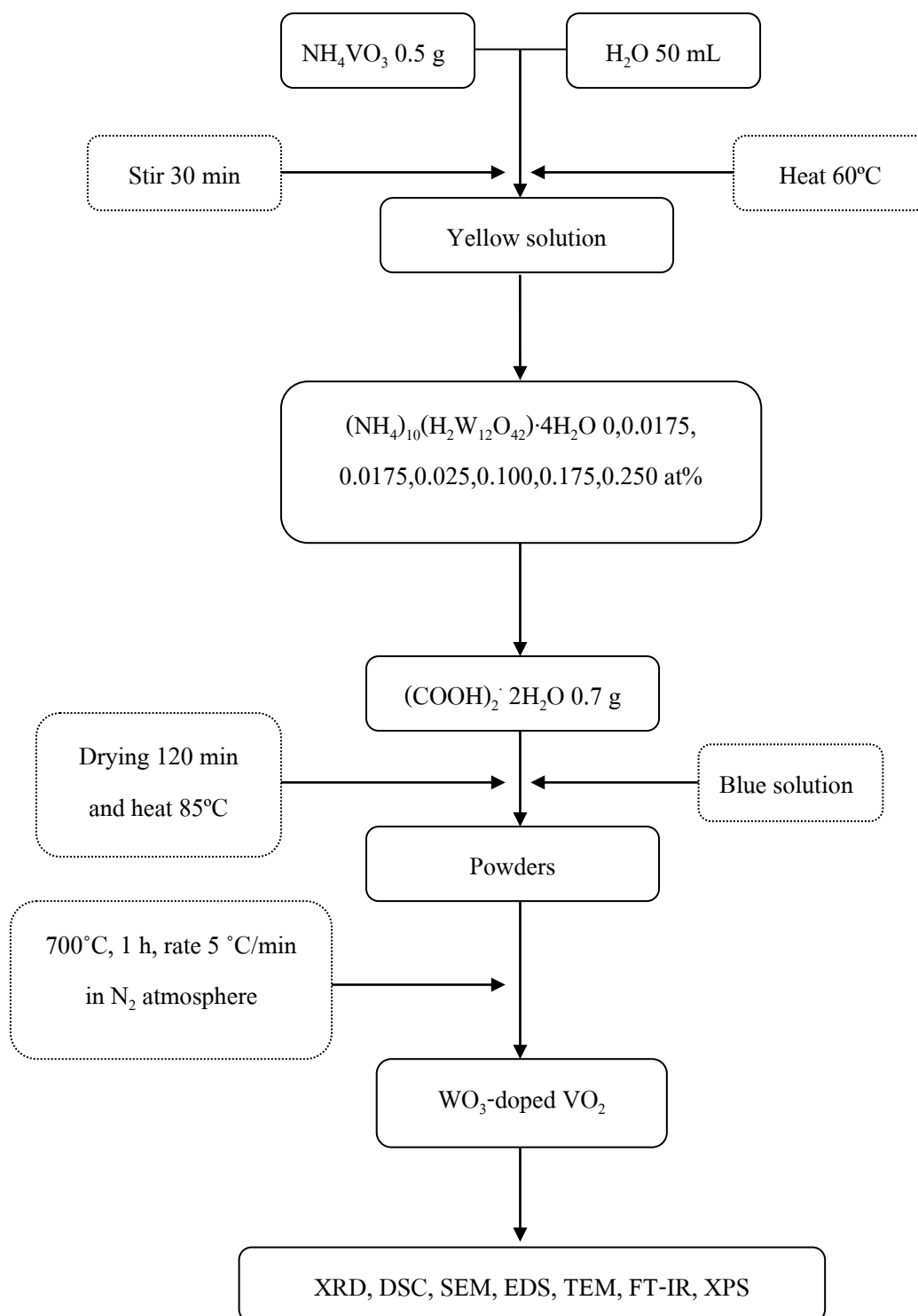
เริ่มจากการใช้ แอมโมเนียมเมตาวานาเดท (NH_4VO_3 , Ajax Finechem Pty Ltd) ปริมาณ 0.5 กรัมเป็นสารตั้งต้นละลายในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร กวนผสมด้วยความเร็วรอบ 600 รอบ ต่อมาที่ด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็กจากนั้นให้ความร้อน 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที จนสารตั้งต้นละลายหมดและมีลักษณะเป็นสีเหลืองใส เติมแอมโมเนียม พารา ทังสเตน ($(\text{NH}_4)_{10}(\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{42})\cdot 4\text{H}_2\text{O}$, Aldrich Chemistry) โดยพิจารณาเลือกปริมาณที่ให้สมบัติที่ดีที่สุดจากการสังเคราะห์ในขั้นตอนที่ 3.2 ที่ปริมาณแอมโมเนียมพาราทังสเตน 0.0027 กรัม มาเป็นสารตั้งต้นตัวที่สองในการเจือ พร้อมกับการเติมซิงค์ออกไซด์ (ZnO , Zinkoxide Zur Analyse, MERCK) (ปริมาณการเติมสารเจือทั้งสองชนิดดังแสดงในตารางที่ 3.2) เมื่อสารเจือละลายหมด เติมกรดออกซาลิก ($(\text{COOH})_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, Ajax Finechem Pty Ltd) ปริมาณ 0.7 กรัม กวนต่อเนื่องจนสารละลายเปลี่ยนสีจากสีส้มภายหลังการเติมจนเป็นสีน้ำเงินใส ระยะเวลาประมาณ 15 นาที จากนั้นระเหยน้ำออกที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส บนเครื่องให้ความร้อนระยะเวลา 120 นาทีจนได้เป็นตะกอนสารนำไปอบและเผาที่ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมงภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ขั้นตอนนี้เป็น การตรวจสอบคุณลักษณะของผงตัวอย่างด้วยเทคนิคต่างๆดังแสดงในรูปที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนระหว่างสารตั้งต้นแอมโมเนียมเมตาวานาเดท เจือแอมโมเนียม พารา ทังสเตนและซิงค์ออกไซด์

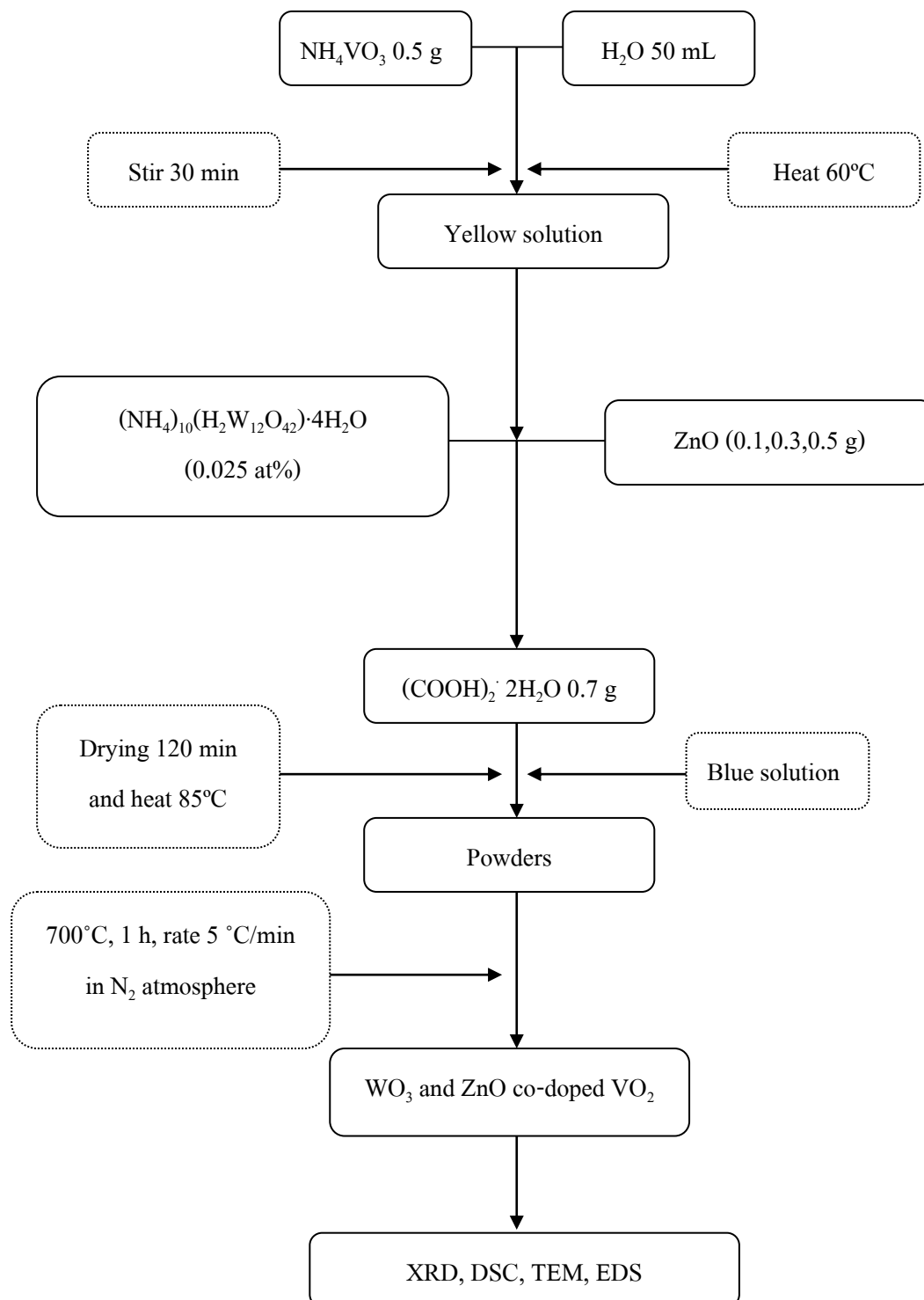
ตัวอย่าง	NH_4VO_3 (กรัม)	$(\text{NH}_4)_{10}(\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{42})\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (กรัม)	ZnO (กรัม)
Pure VO_2	0.5	0	0
0.1 wt% ZnO/ WO_3 / VO_2	0.5	0.0027	0.1
0.3 wt% ZnO/ WO_3 / VO_2	0.5	0.0027	0.3
0.5 wt% ZnO/ WO_3 / VO_2	0.5	0.0027	0.5



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการสังเคราะห์สารวานาเดียมไดออกไซด์เฟสโมโนคลินิก



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์สารวานาเดียมไดออกไซด์เฟสโมนอคลินิกเจือด้วย
ทั้งสแตนไดรออกไซด์

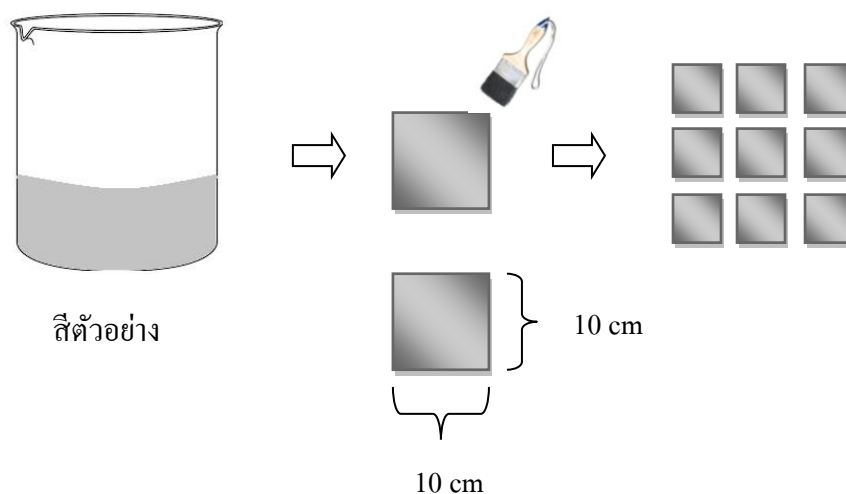


รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์สารวานาเดียมไดออกไซด์เฟสโมนอคลิกเจือด้วย
ทั้งสแตนไดรออกไซด์และซิงค์ออกไซด์

3.4 ขั้นตอนการเตรียมสีทาที่ผสมด้วยเม็ดสีวานิเลียมไดออกไซด์เพื่อทดสอบความสามารถในการสะท้อนความร้อน

เตรียมผงตัวอย่างโดยใช้สารวานิเลียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนไดรออกไซด์ผสมในสีทาอาคารโดยใช้ ปริมาณสี 10 มิลลิลิตร ผสมด้วยน้ำเปล่า 20 เปอร์เซ็นต์ คนให้เข้ากันและเติมผงวานิเลียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ (ปริมาณการเติมสารเจือดังแสดงในตาราง 3.3) เมื่อผงวานิเลียมไดออกไซด์ผสมเข้ากับสีตัวอย่างแล้ว นำไปทาบบนผิวคอนกรีตขนาด 10x10 ตารางเซนติเมตร โดยควบคุมความหนาของชั้นสี 1 ชั้นและ 2 ชั้นภายหลังการทำสีรองพื้นบนวัสดุและทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงเพื่อให้สีแห้ง ขั้นตอนนี้เป็น การตรวจสอบสมบัติการสะท้อนความร้อนของของสารตัวอย่างที่ผสมอยู่ในสีทาอาคาร โดยอาศัยหลักการทดสอบการสะท้อนความร้อนด้วยหลอดไฟฟ้าขนาด 100 วัตต์ ขั้นตอนการเตรียมดังแสดงในรูปที่ 3.4

สำหรับการทดสอบการสะท้อนความร้อนนั้นภายหลังจากการทดสอบด้วยเม็ดสีวานิเลียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตน จะนำสูตรที่ดีที่สุดของการทดสอบไปผสมกับซิงค์ออกไซด์เพื่อศึกษาอิทธิพลของซิงค์ออกไซด์ต่อความสามารถในการสะท้อนความร้อนของเม็ดสีความสามารถในการทำความสะดวกตัวเองและการต้านการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย



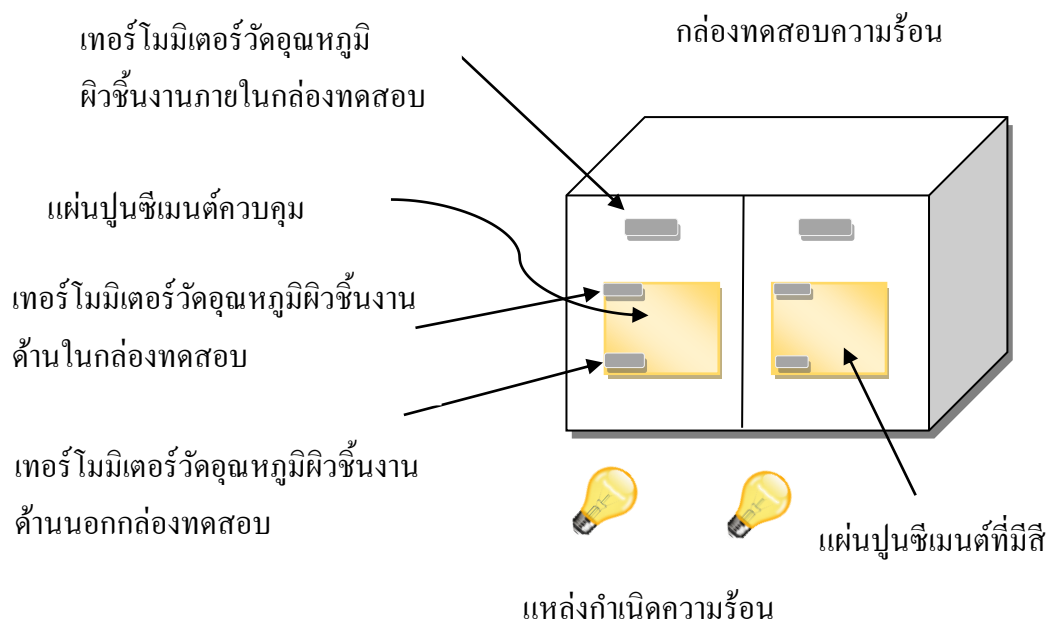
รูปที่ 3.4 การทาสีตัวอย่างลงบนวัสดุฐาน (แผ่นปูนซีเมนต์)

สำหรับแผ่นทดสอบมาตรฐานที่ใช้เตรียมโดยการผสมปูนซีเมนต์สำเร็จรูปกับน้ำเปล่าในอัตราส่วน ปูนซีเมนต์ 5 กิโลกรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ผสมให้เข้ากันและเทลงบนพิมพ์สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 10x10 เซนติเมตร ควบคุมความหนาของแผ่นปูนที่ 0.5, 1 และ 1.5 เซนติเมตร ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงเพื่อให้แผ่นปูนแห้งและพร้อมสำหรับการทดสอบต่อไป

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนผสมระหว่างสัททาอากาศกับผงวานเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดร ออกไซด์

ตัวอย่าง	สี (%)	น้ำ (%)	WO ₃ -doped VO ₂ (wt%)
Pure VO ₂	84.0	16.0	0
0.1% WO ₃ -dopedVO ₂	82.7	16.5	0.8
0.3% WO ₃ -dopedVO ₂	81.4	16.2	2.4
0.5% WO ₃ -dopedVO ₂	80.0	16.0	4.0

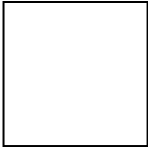
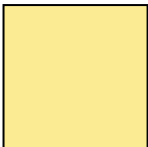
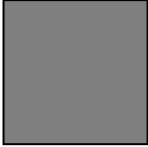
การเตรียมตัวอย่างในแต่ละครั้งสามารถใช้ทาลงบนแผ่นวัสดุฐาน 10 มิลลิเมตรต่อพื้นที่ 30x30 ตารางเซนติเมตร ความหนาของแผ่นวัสดุฐานกำหนดให้มีขนาดแตกต่างกัน 3 ขนาดโดยแยกตามความหนาของแผ่นทดสอบที่ความหนา 0.5, 1 และ 1.5 เซนติเมตร ดังแสดงในตารางที่ 3.4 วิธีการทดสอบการสะท้อนความร้อน โดยใช้ชุดทดสอบความร้อนวัดอุณหภูมิผิวที่ได้ได้รับความร้อนจากหลอดไฟขนาด 100 วัตต์ เปรียบเทียบกับความร้อนที่ผิวด้านในที่ไม่ได้รับความร้อน โดยการบันทึกผลทุกๆ 5 นาที ระยะเวลาต่อเนื่อง 120 นาที เก็บข้อมูลซ้ำ 10 ครั้งต่อตัวอย่าง และนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อรวบรวมข้อมูล ซึ่งลักษณะการทดสอบการสะท้อนความร้อนของแผ่นวัสดุฐานดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์การทดสอบการสะท้อนความร้อนของแผ่นวัสดุฐาน

อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบการสะท้อนความร้อนมีขนาด กว้าง 30 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร และ ยาว 60 เซนติเมตร วัสดุที่ใช้เป็นแผ่นอะคริลิก ภายในชุดทดสอบประกอบด้วยแผ่นพรอยด์ป้องกันความร้อนและ แท่งเทอร์โมมิเตอร์ โดยแบ่งกล่องทดสอบออกเป็น 2 ห้องเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบขณะทำการทดสอบการสะท้อนความร้อน โดยการทดสอบนั้นจะใช้แผ่นทดสอบที่ไม่มีสี พร้อมกับแผ่นทดสอบที่มีสีสูตรต่างๆ และปล่อยความร้อนจะแหล่งกำเนิดความร้อนเข้าสู่แผ่นทดสอบทั้งสอง วัสดุอุณหภูมิที่ผิวด้านนอกและด้านในเพื่อเปรียบเทียบ

ตารางที่ 3.4 ลักษณะแผ่นวัสดุฐานและตัวอย่างสีที่ใช้ในการทดลอง

ตัวอย่าง	ขนาดแผ่นวัสดุฐาน (เซนติเมตร) (กว้าง x ยาว x สูง)	ระยะเวลาที่ทดสอบ (นาที)	สีที่ใช้ทดสอบ
Pure VO ₂	0.5x10x10	120	 สีขาว
	1x10x10		
	1.5x10x10		
0.1wt%WO ₃ -doped VO ₂	0.5x10x10	120	 สีครีม
	1x10x10		
	1.5x10x10		
0.3wt%WO ₃ -doped VO ₂	0.5x10x10	120	 สีเทา
	1x10x10		
	1.5x10x10		
0.5wt%WO ₃ -doped VO ₂	0.5x10x10	120	
	1x10x10		
	1.5x10x10		

สำหรับการทดสอบความสามารถในการสะท้อนความร้อนของเม็ดสีผู้วิจัยจะศึกษาและทดสอบด้วยการใช้เม็ดสีแต่ละสูตรผสมลงในสีตัวอย่าง 3 สีได้แก่ สีเข้ม สีอ่อน และสีขาว ตัวอย่างของเม็ดสีดังแสดงในตารางที่ 3.4 และจะนำสูตรที่ดีที่สุดของการทดลองไปผสมด้วยซิงค์ออกไซด์และศึกษาความสามารถในการสะท้อนความร้อนต่อไป

3.5 การทดสอบการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของสารวานิเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดนไตรออกไซด์ผสมซิงค์ออกไซด์

สำหรับการทดสอบการฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยเม็ดสีเทอร์โมโครมิกจะศึกษาอิทธิพลของซิงค์ออกไซด์ที่ผสมร่วมกับเม็ดสีเทอร์โมโครมิกของวานิเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดนไตรออกไซด์ในสีทาอาคาร โดยสัดส่วนของการผสมซิงค์ออกไซด์ร่วมกับเม็ดสีเทอร์โมโครมิกในสีทาอาคารดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 อัตราส่วนผสมระหว่างสีทาอาคารกับผงวานิเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดนไตรออกไซด์และซิงค์ออกไซด์

ตัวอย่าง	สี (%)	น้ำ (%)	ZnO (wt%)	WO ₃ -doped VO ₂ (wt%)
pure	83.3	16.60	0	0
0.1% Nano-pigment	82.0	16.40	0.82	0.82
0.3% Nano-pigment	79.6	15.80	2.30	2.30
0.5% Nano-pigment	77.1	15.30	3.80	3.80

ชนิดแบคทีเรียที่ใช้ในการทดสอบคือ *Escherichia coli* (*E.coli*) เริ่มต้นโดยการนำเชื้อใส่ลงในหลอดทดลองที่มีอาหารเหลวชนิด Trypticase soy broth จากนั้นปิดหลอดทดลอง แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำเชื้อแบคทีเรีย เดิมลงใน NaCl ความเข้มข้น 0.85 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณ 9 มิลลิลิตร ด้วยวิธี Serial dilution แล้วนำไปหยดบนอาหารแข็ง Nutrient agar (NA) จากนั้นทำการกระจายเชื้อด้วยเทคนิค Spread plate แล้วนำไปเก็บไว้ในที่มืด 24 ชั่วโมง แล้วนับจำนวนเชื้อให้อยู่ในช่วง 30-300 โคโลนี เมื่อได้จำนวนเชื้อตั้งต้นที่ต้องการ เตรียมเชื้อให้ได้ปริมาตร 10 มิลลิลิตร โดยมีความเข้มข้นเชื้อประมาณ 10⁷ CFC/ml จากนั้นใช้ปิเปตเชื้อปริมาณ 0.1 มิลลิลิตร หยดลงบนแผ่นกระจกเคลือบด้วยสีทาบ้านสูตรต่าง ๆ ดังที่เตรียมในขั้นตอนที่ 3.3.2 นำไปปรับแสงยูวี ขนาด 50 วัตต์ กำหนดเวลาเริ่มต้นที่ 0, 20, 40 และ 60 นาที จากนั้นดูดตัวอย่างที่ผ่านการรับแสงที่เวลาต่าง ๆ มาตัวอย่างละ 0.1 มิลลิลิตร หยดลงบนอาหารแข็งที่เตรียมไว้ และเกลี่ยเชื้อให้กระจายทั่วจานเพาะเชื้อ นำไปบ่มไว้ที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงหลังจากบ่มเชื้อแล้ว บันทึกผลโดยการนับโคโลนีของเชื้อแบคทีเรียที่เจริญเติบโตบนอาหาร และถ่ายรูปจำนวนเชื้อที่เหลืออยู่

3.6 การตรวจสอบคุณลักษณะของผงตัวอย่าง

3.6.1 X-Ray Diffractometry (XRD)

XRD เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่ใช้ศึกษาชนิดของสารประกอบที่อยู่ในสารตัวอย่าง สามารถใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกของสารประกอบ การคำนวณหาขนาดผลึกของเฟสที่เกิดขึ้นด้วยสมการ Scherer's ดังสมการที่ 3.1

$$t = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (3.1)$$

กำหนดให้ t คือ ขนาดของผลึก (นาโนเมตร)

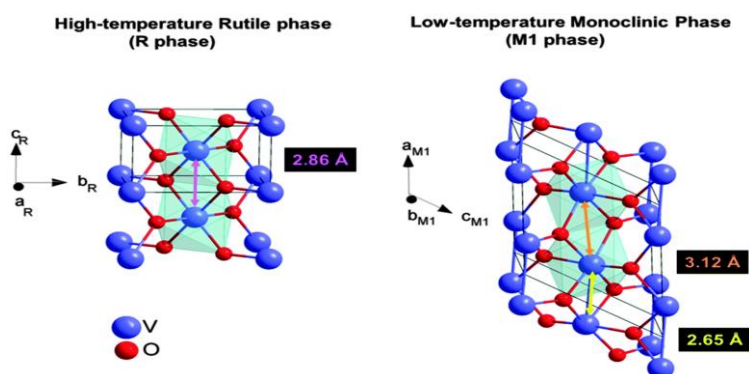
λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ ($\text{CuK}\alpha = 0.15406$ นาโนเมตร)

β คือ Line width at half maximum height (เรเดียน)

θ คือ มุมสะท้อน (องศา)

3.6.2 Differential scanning calorimetry (DSC)

DSC เป็นเทคนิคสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสารตัวอย่าง โดยการศึกษาค่าพลังงานทางความร้อนและอุณหภูมิของสารตัวอย่างเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน โดยอาศัยการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอุณหภูมิภายใต้บรรยากาศที่ถูกควบคุม ซึ่งในงานวิจัยนี้ นำเทคนิค DSC มาใช้วิเคราะห์หาอุณหภูมิทรานซิชันที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างจากโมโนคลินิกไปเป็นโครงสร้างรูไทล์ของสารวานาเดียมไดออกไซด์ เพื่อแสดงถึงสมบัติเทอร์โมโครมิกของสารวานาเดียมดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 โครงสร้างรูไทล์ (R phase) และ โมโนคลินิก (M phase) ของวานาเดียมไดออกไซด์

(ที่มา Yanfei Wu et al., 2014)

3.6.3 Scanning Electron Microscope (SEM)

SEM หรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด คือเครื่องมือที่มีประโยชน์สำหรับการใช้งานวิจัยเป็นอย่างมากในการใช้อธิบายและการวิเคราะห์ถึงลักษณะ รูปร่าง ขนาด และพื้นผิวของตัวอย่าง เนื่องจากเป็นเทคนิคที่สามารถแสดงภาพที่ความละเอียดสูง กล่าวคือสามารถแสดงภาพในระดับนาโนเมตรได้ โดยในบางรุ่นของเครื่องมือสามารถแสดงภาพที่กำลังขยายสูงถึง 100,000 เท่า และภาพที่ได้จะมองเห็นความชัดเจน และมิติของตัวอย่าง สำหรับงานวิจัยนี้ศึกษาถึงรูปร่างและลักษณะอนุภาคของผงตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง SEM รุ่น FEI Quanta 400

3.6.4 Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS)

EDS หรือ EDX เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ เพื่อวิเคราะห์หาธาตุที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่างด้วยอุปกรณ์นี้ โดยส่วนใหญ่จะคู่กับ SEM สามารถดูลักษณะรูปร่างพร้อมกับตรวจสอบธาตุได้ในขั้นตอนเดียว ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้ EDS file emission ของเครื่อง SEM รุ่น FEI Quanta 400

3.6.5 Transmission Electron Microscope (TEM)

TEM หรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เป็นเครื่องมือที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยอีกเครื่องหนึ่ง เนื่องจากภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้ ทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างวิเคราะห์ ซึ่งเหมาะสำหรับการศึกษารายละเอียดองค์ประกอบภายในของตัวอย่างที่มีขนาดเล็ก โดยความสามารถของกล้องจะมีกำลังขยายและประสิทธิภาพที่สามารถแสดงรายละเอียดของ ตัวอย่างที่ระดับ 0.1 นาโนเมตรได้ สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ TEM รุ่น JEOL JEM-2010 เป็นเครื่องมือดูลักษณะอนุภาคของผงสารที่สังเคราะห์ได้ในระดับนาโนเมตร

3.6.6 การวัดสมบัติการนำไฟฟ้า

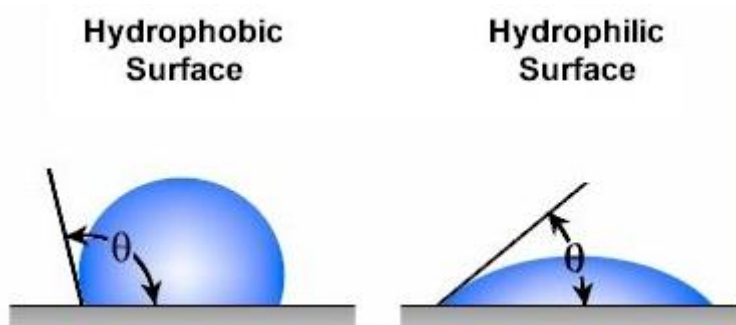
การนำไฟฟ้า (Conductivity) เป็นวิธีการวัดความสามารถในการนำไฟฟ้าของสารตัวอย่าง โดยสารที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้มีสมบัติของความเป็นโลหะหรือสารตัวนำและสมบัติของสารกึ่งตัวนำ โดยจะศึกษาถึงภาวะและอุณหภูมิที่ทำให้สมบัติของสารเปลี่ยนไป รวมถึงความสามารถในการนำไฟฟ้าของสาร โดยใช้เทคนิค 2-Probe Conductivity Measurement

3.6.7 Fourier-Transformed Infrared Spectrophotometer (FT-IR)

FT-IR เป็นเทคนิคการวิเคราะห์สารในเชิงคุณภาพ เพื่อยืนยันสูตรโครงสร้างของสารตัวอย่างโดยการพิจารณาเปรียบเทียบกับอินฟราเรด สเปกตรัมของสารตัวอย่างกับสารประกอบมาตรฐาน วัดโดยใช้ตัวกลางชนิดเดียวกัน การแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่น (Wavenumber) กับค่าการส่องผ่าน (Transmittance) ซึ่งเรียกว่า Infrared spectrum ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่อง FT-IT (Vertex70) ค่าเลขคลื่นที่ใช้อยู่ในช่วง $4000-400\text{ cm}^{-1}$

3.6.8 Contact angle measurement

การวัดมุมสัมผัสของเหลวบนผิววัตถุ แสดงให้เห็นถึงสภาพเปียกน้ำของผิว (Wetting) หรือความสามารถของของเหลวในการรักษาหน้าสัมผัสกับพื้นผิวของแข็ง ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเมกุลโดยระดับชั้นของภาวะ การเปียกขึ้นกับความสมดุลระหว่าง แอดฮีชัน (Adhesion) และ โคฮีชัน (Cohesion) โดยทั่วไปแบ่งการวัดมุมสัมผัสเป็น 2 ประเภท คือ สภาพเปียกน้ำของผิวดี (Hydrophilic) โดยมุมสัมผัสมีค่าน้อยกว่า 90 องศา ของเหลวจะกระจายออกไปเป็นบริเวณกว้าง และสภาพเปียกน้ำของผิวไม่ดี (Hydrophobic) ของเหลวจะสัมผัสกับพื้นผิวของเหลวเพียงเล็กน้อยและจะก่อตัวเป็นทรงหยดน้ำค้างบนผิววัตถุ สำหรับงานวิจัยนี้ทดสอบด้วยการหยดน้ำลงบนผิวของฮีเทอร์โมโครมิกที่เคลือบอยู่บนกระจก เพื่อตรวจสอบความสามารถในการเปียกน้ำโดยพิจารณาจากมุมสัมผัสของหยดน้ำ มุมสัมผัสที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูป 3.7



รูปที่ 3.7 มุมสัมผัสที่เกิดขึ้นจากของเหลวที่สัมผัสของแข็ง

(ที่มา <http://awesci.com/super-hydrophobic-surfaces-unbelievable>)

3.6.9 X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)

XPS เป็นเทคนิควิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ที่สามารถให้ข้อมูลสมบัติทางเคมีที่ระดับผิวของวัสดุในหลายแง่มุม เช่น ชนิดและจำนวนธาตุองค์ประกอบ โครงสร้างทางเคมี ชนิดพันธะทางเคมี และสถานะออกซิเดชันของอะตอม เป็นต้น นอกจากนี้ยังรวมถึงความสม่ำเสมอของธาตุองค์ประกอบ สภาพทางเคมีของผิวที่เปลี่ยนไป หลังถูกกระทบด้วยความร้อน สารเคมี ลำโพงไอออน พลาสมา หรือรังสี UV ใช้วิเคราะห์วัสดุได้มากมายหลายชนิด ทั้งสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ โลหะผสม สารกึ่งตัวนำ พอลิเมอร์ แก้ว เซรามิกส์ สี สารเคลือบ กระจก ฉนวน ไม้ เครื่องสำอาง ฟัน และกระดูก เป็นต้น จึงมีอุตสาหกรรมหลายประเภทที่ต้องอาศัยเครื่อง XPS เช่น อุตสาหกรรมรถยนต์ แบตเตอรี่ สารเคมี คอมพิวเตอร์ เครื่องสำอาง ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สิ่งทอ อาหาร แก้ว กาว น้ำมันหล่อลื่น หลอดไฟฟ้า บรรจุภัณฑ์ กระจกและไม้ พอลิเมอร์และพลาสติก สิ่งพิมพ์ โลหะ เป็นต้น

บทที่ 4

ผลและการอภิปรายผล

4.1 ผลการสังเคราะห์สารวานิเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรอกไซด์และซิงค์ออกไซด์

จากผลการวิจัยและผลการศึกษาการสังเคราะห์สารวานิเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรอกไซด์และซิงค์ออกไซด์ ด้วยวิธีทางเคมี และทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศ ในโตรเจน จะได้ผงตัวอย่างมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีน้ำเงินเข้ม (Dark blue) และนำมาวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ดังนี้

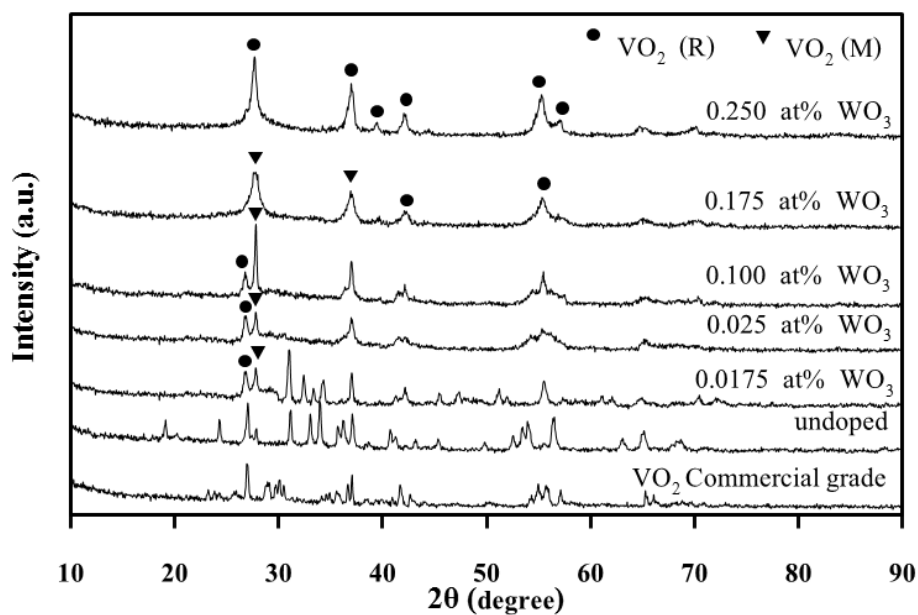
4.1.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเฟสของสารที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค XRD

จากรูปที่ 4.1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของผงวานิเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรอกไซด์ หลังจากการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศในโตรเจนที่ปริมาณ 0, 0.0175, 0.025, 0.100, 0.175 และ 0.250 at% ของทั้งสแตนไดรอกไซด์ที่เจือลงในวานิเดียมไดออกไซด์ พบว่า โครงสร้างของวานิเดียมไดออกไซด์มีเฟส โมโนคลินิกเกิดขึ้นที่ตำแหน่งมุม $2\theta = 27.7^\circ$, 37° , 42.2° และ 55.4° โดยที่ตำแหน่งมุม $2\theta = 27.7^\circ$ ตรงกับระนาบ (011) ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐาน JCPDS 79-1655 และมีเฟสรูไทล์เกิดขึ้นที่ตำแหน่งมุม $2\theta = 39.42^\circ$, 57.08° , และ 66.99° โดยที่ตำแหน่งมุม $2\theta = 39.42^\circ$ ตรงกับระนาบ (110) ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐาน JCPDS 01-082 เมื่อพิจารณาขนาดผลึกของวานิเดียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนไดรอกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ ด้วยสมการ Scherrer พบว่าขนาดผลึกของวานิเดียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยทั้งสแตนไดรอกไซด์ที่ปริมาณ 0, 0.0175, 0.025, 0.100, 0.0175 และ 0.250 at% ได้ มีขนาด 53.8, 55.8, 13.8, 55.5, 55.4, 16.6 และ 20.8 นาโนเมตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณของทั้งสแตนไดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ขนาดผลึกของวานิเดียมเล็กลง นอกจากนี้ การเจือวานิเดียมไดออกไซด์ด้วยทั้งสแตนไดรอกไซด์ยังมีผลต่อเปอร์เซ็นต์เฟสของวานิเดียมไดออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ขนาดผลึกเปอร์เซนต์เฟสและร้อยละผลผลิตของสารวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์สูตรต่าง ๆ

ตัวอย่างผง	เปอร์เซนต์เฟส		ขนาดผลึก (นาโนเมตร)		ร้อยละผลผลิต
	โมนอคลินิก	รูไทล์	โมนอคลินิก	รูไทล์	
VO ₂ commercial grade	98	2	53.8	33.2	-
Undoped VO ₂	84	16	55.8	34.1	74.0
0.0175 at% WO ₃ /VO ₂	62	38	13.8	28.4	74.0
0.025at%WO ₃ /VO ₂	51	49	55.5	34.1	74.5
0.100at%WO ₃ /VO ₂	55	45	55.4	34.1	75.0
0.175at%WO ₃ /VO ₂	48	52	16.6	17.0	75.5
0.250at%WO ₃ /VO ₂	-	100	20.8	21.3	76.0

จากรูปที่ 4.1 พบว่าเฟสของวานาเดียมไดออกไซด์ก่อนการเจือด้วยทั้งสแตนไดรออกไซด์เปรียบเทียบกับตัวอย่าง วานาเดียมไดออกไซด์มาตรฐาน มีฟังก์ชันของเฟสใกล้เคียงกัน และเมื่อเจือสารด้วยทั้งสแตนไดรออกไซด์พบว่าสารตัวอย่างเกิดเฟสร่วมกันสองชนิดคือ โมนอคลินิกและเตตระโกนอล หรือ รูไทล์ โดยสัดส่วนเปอร์เซนต์ในตารางข้างต้น แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเพิ่มสารเจือทั้งสแตนไดรออกไซด์จะทำให้สารตัวอย่างวานาเดียมไดออกไซด์มีขนาดโตขึ้นและเมื่อปริมาณสารเจือสูงกว่า 0.250 at% โครงสร้างเฟสที่พบจะเป็นรูไทล์ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีความสอดคล้องกับลักษณะฟังก์ชันที่แสดงโดยพิจารณาด้วย สมการ Scherrer โดยคำนวณความกว้างของฟังก์ชันตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความสูงจะได้ ขนาดผลึกของสารดังแสดงในตารางที่ 4.1

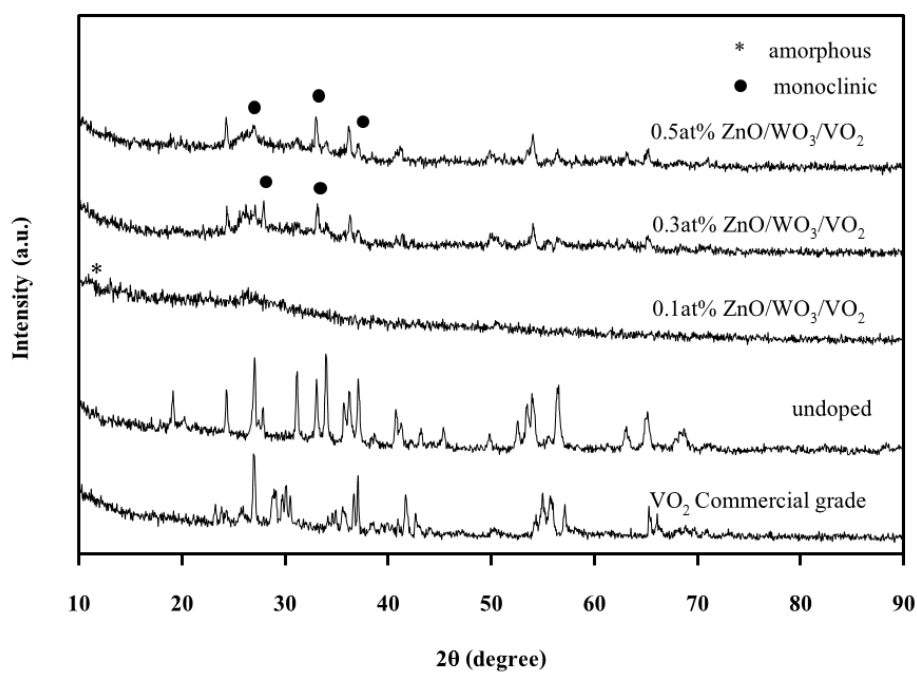


รูปที่ 4.1 XRD สเปกตรัมของผงวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์ผสมซิงค์ออกไซด์

ผงวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์ผสมซิงค์ออกไซด์ ผลการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค XRD พบว่าผงวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์ผสมซิงค์ออกไซด์ มีเฟสโมโนคลินิกเกิดขึ้นที่ตำแหน่งมุม $2\theta = 27.8^\circ$, 32.9° และ 36.2° เมื่อพิจารณาขนาดผลึกของผงตัวอย่างด้วยสมการ Scherrer จากพีคที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD (รูปที่ 4.2) พบว่า มีขนาดใกล้เคียงกับการสังเคราะห์ผงตัวอย่างด้วยการเจือทั้งสแตนไดรออกไซด์เพียงสารเดียว ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ซิงค์ออกไซด์ไม่ส่งผลต่อขนาดอนุภาคของวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์ดังแสดงในตารางที่ 4.2 นอกจากนี้ จากการห่าร้อยละของผลผลิตของวานาเดียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้พบว่าร้อยละของผลผลิตที่สังเคราะห์ได้มีปริมาณ 74-76 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.2 ขนาดผลึกและร้อยละผลผลิตของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์และซิงค์ออกไซด์สูตรต่าง ๆ

ตัวอย่างผง	ขนาดผลึกของเฟสโมโนคลินิก (นาโนเมตร)	ร้อยละผลผลิต
VO ₂ commercial grade	33.2	100
Undoped	55.5	74
0.1at%ZnO/WO ₃ /VO ₂	Amorphous	75
0.3at%ZnO/WO ₃ /VO ₂	33.7	75
0.5at%ZnO/WO ₃ /VO ₂	41.1	76

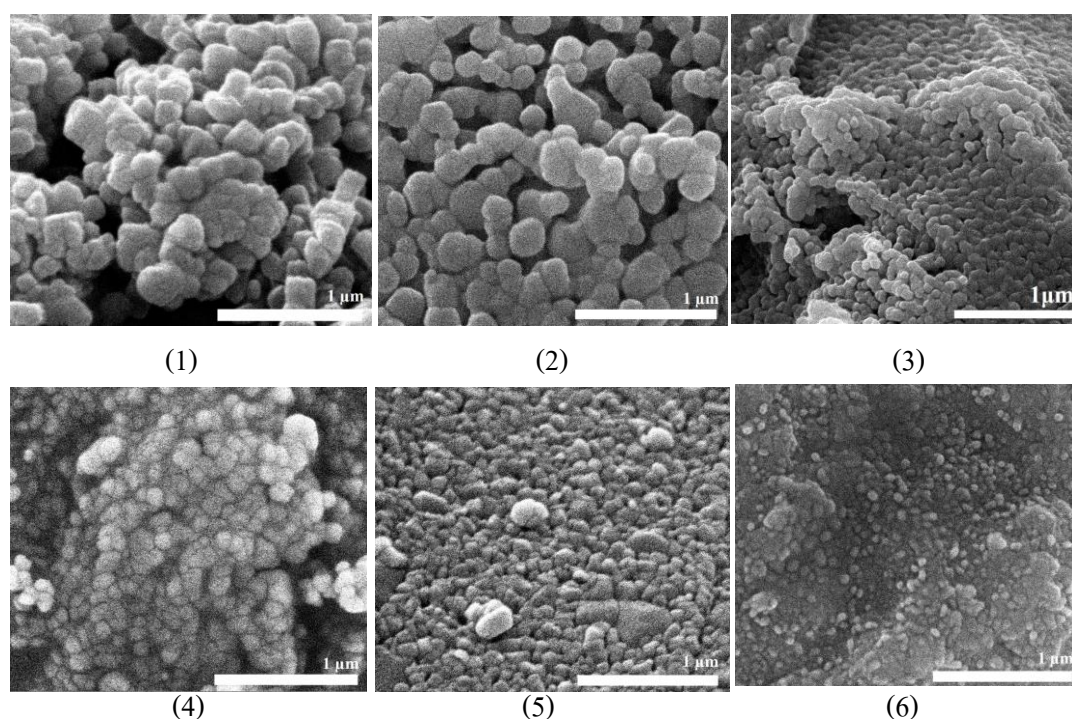


รูปที่ 4.2 XRD สเปคตรัมของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์ผสมซิงค์ออกไซด์

4.1.2 การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology) ของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือ

ด้วยทั้งสแตนไดรออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

รูปที่ 4.3 เป็นการศึกษารูปร่างและขนาดอนุภาคของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เกรดทางการค้า และผงวานเนเดียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยทั้งสแตนที่ปริมาณต่าง ๆ หลังการเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ซึ่งผงที่ได้มีลักษณะเป็นผงสีน้ำเงินเข้มละเอียด จากการศึกษพบว่าขนาดอนุภาคของวานเนเดียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มีขนาดอยู่ในช่วง 40-100 นาโนเมตร โดยขึ้นอยู่กับปริมาณของทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่เจือ



รูปที่ 4.3 SEM ของผงวานเนเดียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ (1) VO_2 Commercial grade (2) undoped (3) 0.0175 at% WO_3 (4) 0.025 at% WO_3 (5) 0.100 at% WO_3 (6) 0.175 at% ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า

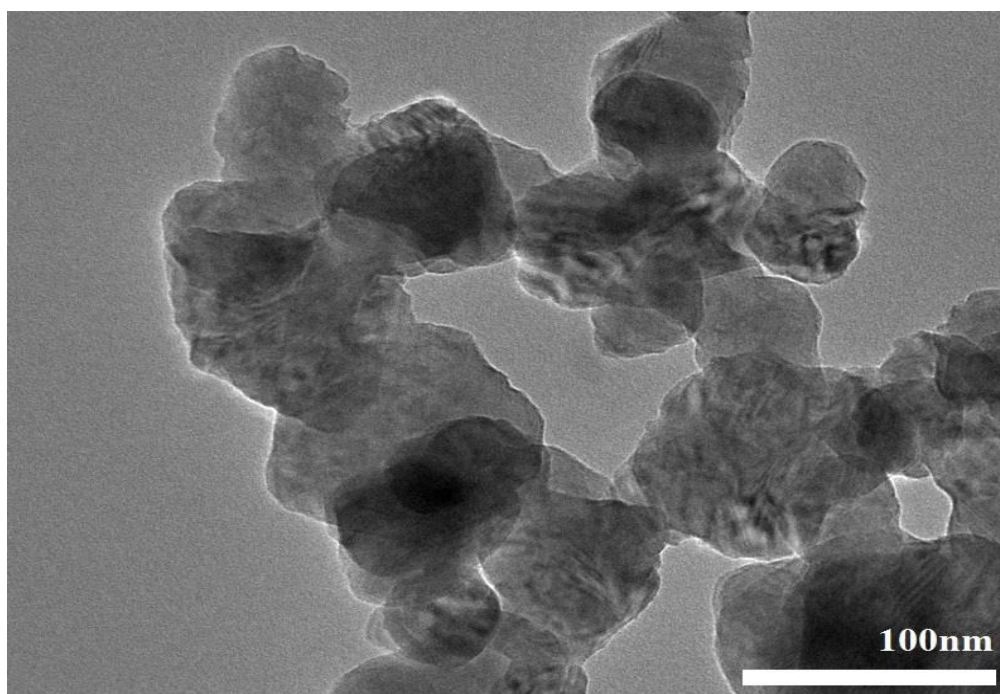
(หมายเหตุ ตัวอย่าง 0.250 at% WO_3 ไม่นำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้เพราะไม่มีสมบัติเทอร์โมโครมิก)

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าวานเนเดียมไดออกไซด์เกรดทางการค้าและวานเนเดียมไดออกไซด์ที่ไม่เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์มีรูปร่างอนุภาคเป็นทรงกลม (Spherical) ขนาดใหญ่ แต่เมื่อทำการเจือวานเนเดียมไดออกไซด์ด้วยทั้งสแตนไดรออกไซด์ มีผลทำให้รูปร่างอนุภาคของวานเนเดียมไดออกไซด์เป็นทรงกลมเช่นกัน แต่มีขนาดอนุภาคเล็กลงเมื่อเทียบกับวานเนเดียมไดออกไซด์เกรดทางการค้าและวานเนเดียมไดออกไซด์ที่ไม่เจือทั้งสแตน โดยเมื่อปริมาณของทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่

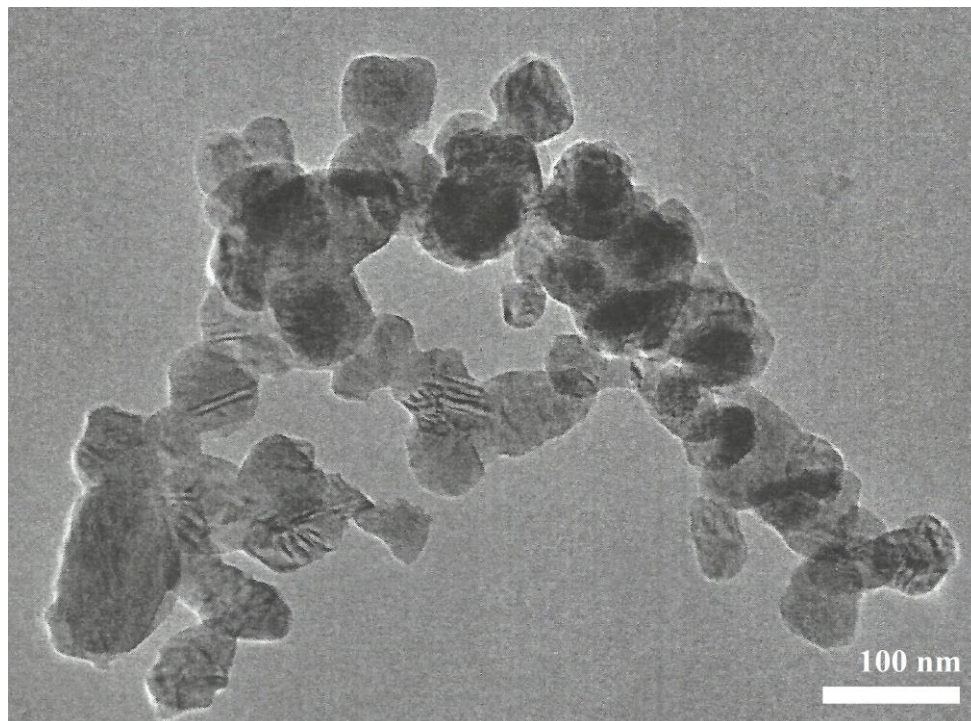
เมื่อลงในวานเนเดียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจะเกิดการรวมตัวกัน (Agglomerate) ของอนุภาควานเนเดียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นตามปริมาณของทังสเตนไดรอกไซด์ที่เจือ โดยขนาดอนุภาคของวานเนเดียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มีขนาดในช่วง 40-100 นาโนเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับ ขนาดผลึก (Crystalline) ที่คำนวณโดยสมการ Scherrer ดังในตารางที่ 4.1

4.1.3 การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology) ของวานเนเดียมไดออกไซด์ที่เจือด้วย ทังสเตนผสมซิงค์ออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 เป็นภาพถ่าย TEM แสดงรูปร่างอนุภาคและขนาดอนุภาคของวานเนเดียมไดออกไซด์เจือด้วยทังสเตนที่ปริมาณ 0.025 at% และวานเนเดียมไดออกไซด์เจือด้วย ทังสเตนไดรอกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่ 5% ตามลำดับ พบว่ารูปร่างอนุภาคของวานเนเดียมไดออกไซด์ทั้ง 2 ตัวอย่างมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนซึ่งเกิดจากการจับตัวกัน โดยขนาดอนุภาคของ อนุภาควานเนเดียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้อยู่ในช่วง 40-100 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับการ ถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และใกล้เคียงกับขนาดผลึกที่คำนวณ ได้จากสมการ Scherrer ในเทคนิค XRD



รูปที่ 4.4 TEM ของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทังสเตนไดรอกไซด์ (0.025 at% WO_3)



รูปที่ 4.5 TEM ของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์ผสมซิงค์ออกไซด์ (0.5at% ZnO/WO₃/VO₂)

4.1.4 การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDS

การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ ของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนไดรออกไซด์ ปริมาณ 0.025, 0.100 และ 0.175 at% ด้วยเทคนิค EDS (รูปที่ 4.6-4.8)โดยใช้วิธี X-ray mapping ตัวอย่างในผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนพบว่า ที่ 0.025 at% ทั้งสแตนไดรออกไซด์ ปรากฏธาตุประกอบหลักคือ วานเนเดียม (V) ออกซิเจน (O) ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบหลักของวานเนเดียมไดออกไซด์ นอกจากนั้นยังปรากฏธาตุทั้งสแตน (W) ซึ่งเป็นธาตุที่ใช้ในการเจือลงในวานเนเดียมไดออกไซด์โดยจะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของทั้งสแตนที่เจือ 0.025 at% กระจายตัวได้ดีและสม่ำเสมอโดยสัดส่วนของธาตุองค์ประกอบแสดงในตารางที่ 4.3- 4.5 ในขณะที่เดียวกันเมื่อมีการเพิ่มสารเจือทั้งสแตนไดรออกไซด์ลงในวานเนเดียมไดออกไซด์ในปริมาณ 0.100 และ 0.175 at% มีการเกาะกลุ่มกันของอะตอมของธาตุทั้งสแตนมากกว่า 0.025 at% ซึ่งการเกาะกลุ่มหรือการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอนั้นมีผลทำให้สมบัติเทอร์โมโครมิกของสารลดลง สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC และมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Marina Ratov ในปี 2013 ซึ่งผลการกระจายตัวของธาตุในปริมาณของสารเจือต่างๆดังรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.3 ปริมาณธาตุประกอบในผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรอกไซด์ที่ 0.025 at%

ธาตุ	wt%
V	88.2
O	9.2
W	2.6

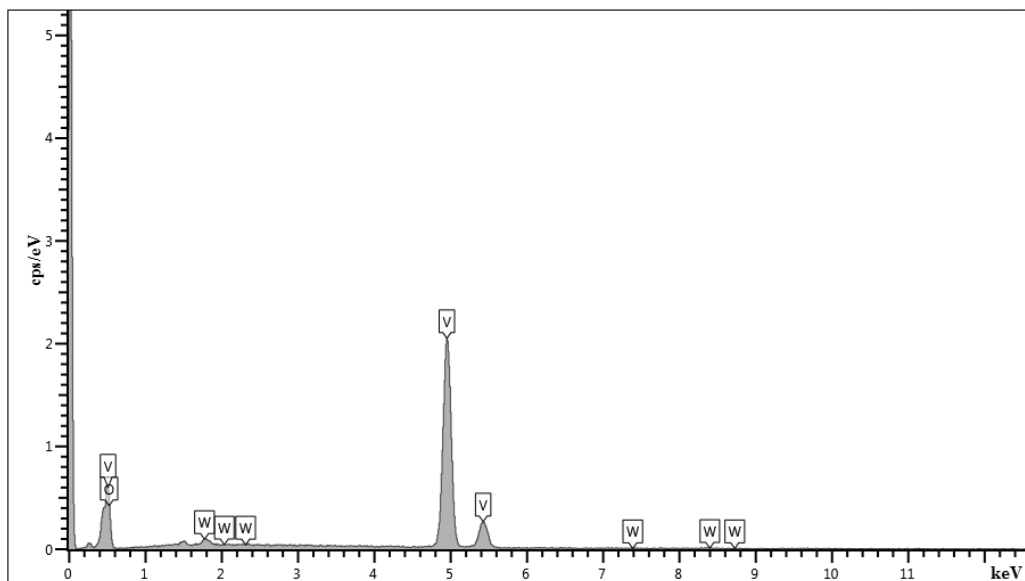
ตารางที่ 4.4 ปริมาณธาตุประกอบในผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรอกไซด์ที่ 0.100 at%

ธาตุ	wt%
V	66.5
O	27.9
W	5.6

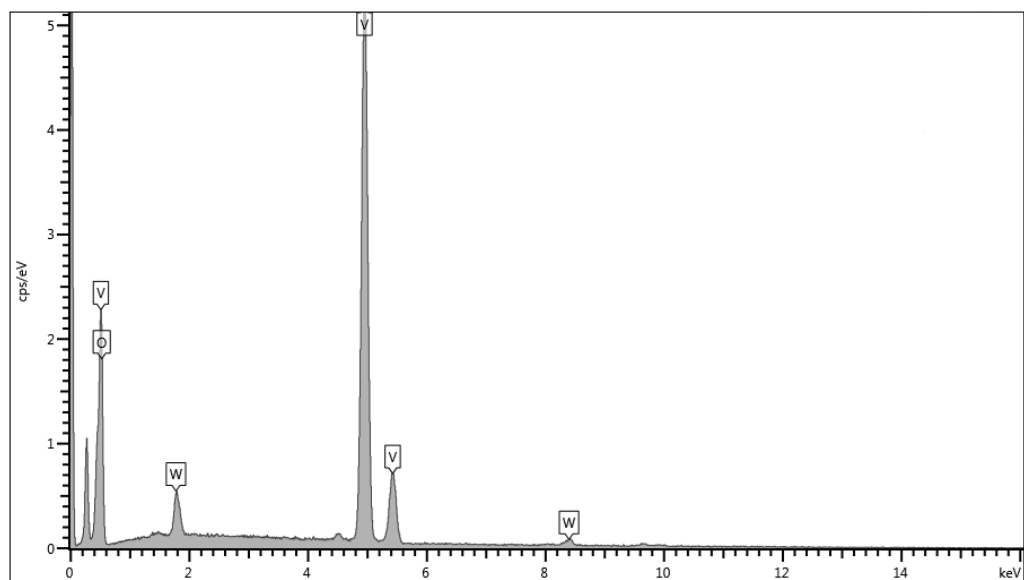
ตารางที่ 4.5 ปริมาณธาตุประกอบในผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรอกไซด์ที่ 0.175 at%

ธาตุ	wt%
V	68.1
O	24.4
W	7.6

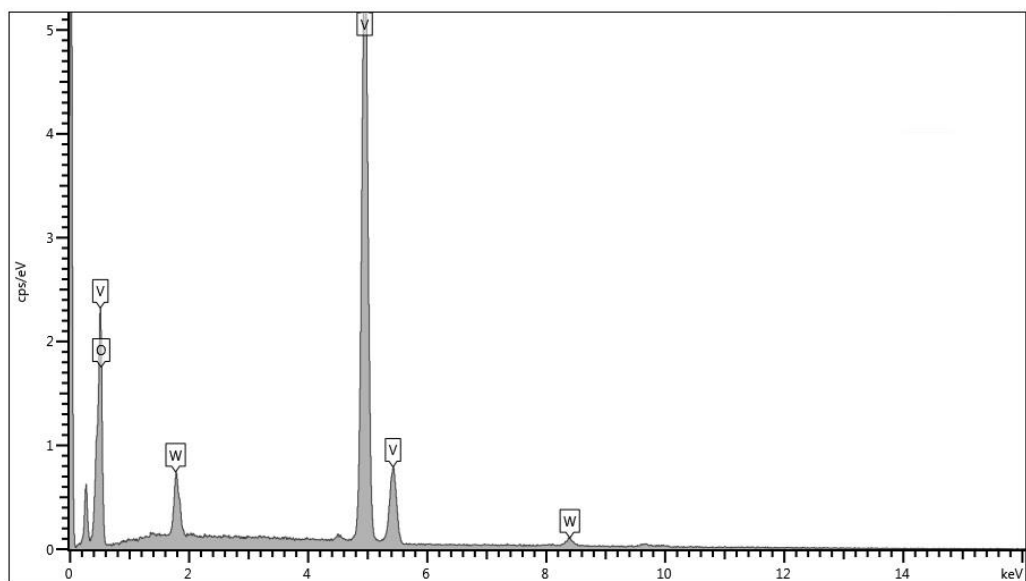
ผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนไดรอกไซด์ 0.0175 at% ไม่นำมาวิเคราะห์หาปริมาณธาตุด้วยเทคนิคนี้เนื่องจาก อุณหภูมิแตรนซิชัน หรือสมบัติเทอร์โมโครมิกยังสูงอยู่ ผู้วิจัยจึงเลือกวิเคราะห์เริ่มต้นที่ 0.025 at% เป็นต้นไปดังข้อมูลที่แสดงข้างต้น



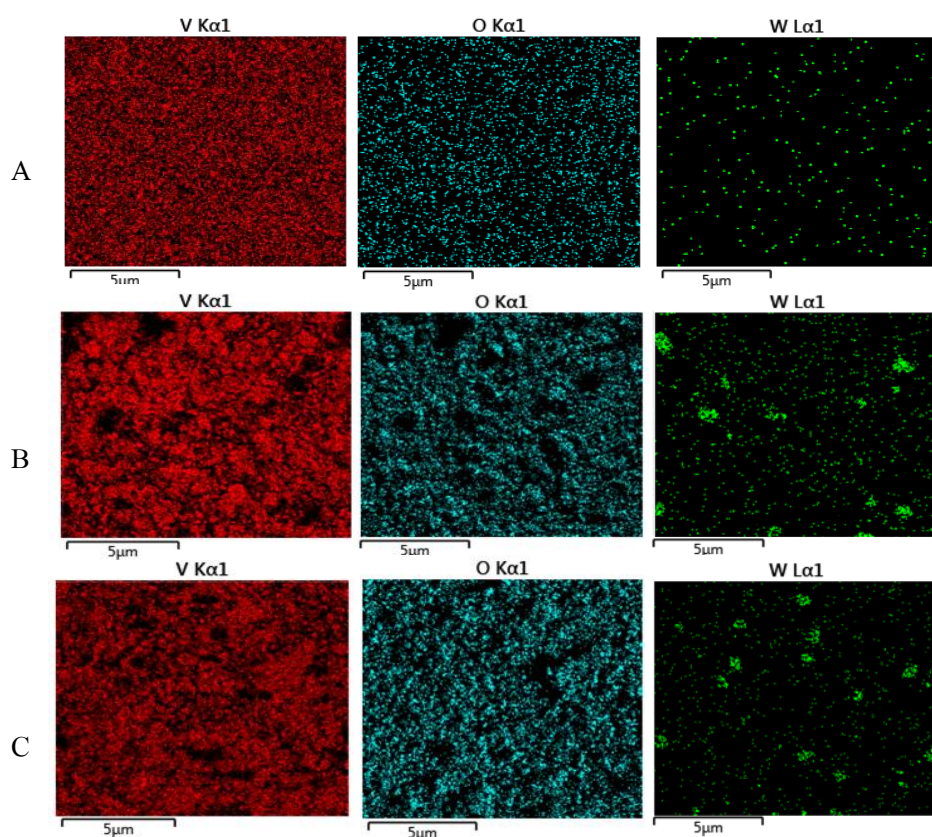
รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ธาตุของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์
ที่ 0.025 at% WO₃



รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ธาตุของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์
ที่ 0.100 at% WO₃



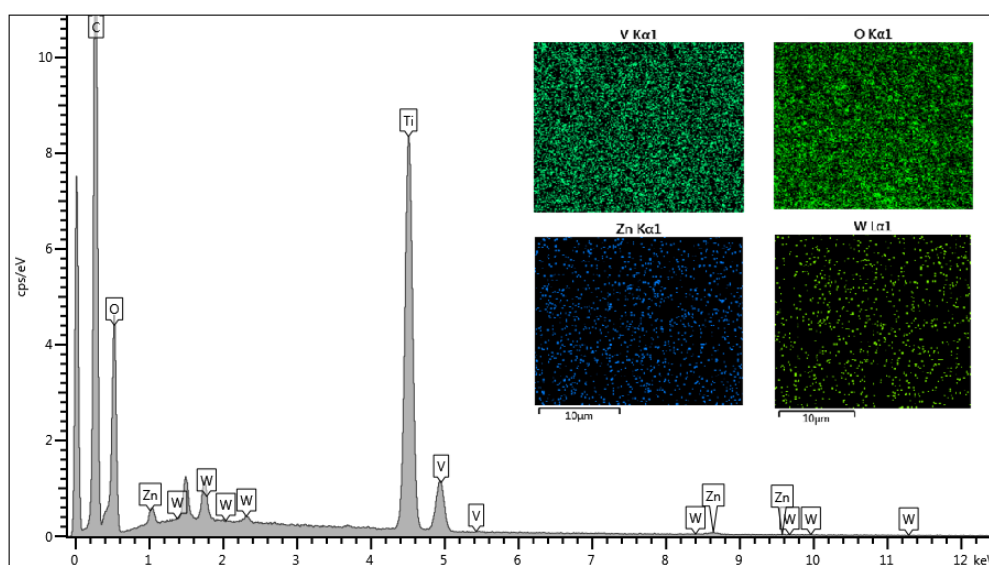
รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ธาตุของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรอกไซด์
ที่ 0.175 at% WO_3



รูปที่ 4.9 EDS- mapping แสดงการกระจายตัวธาตุต่างๆของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรอกไซด์ที่ปริมาณ 0.025 (A), 0.100 (B), 0.175 (C) at%

4.1.5 การศึกษาการกระจายตัวของผงวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดร ออกไซด์ผสมซิงค์ออกไซด์ที่ผสมในสีทาอาคารด้วยเทคนิค EDS

รูปที่ 4.10 แสดงธาตุองค์ประกอบและการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบของ วานาเดียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนไดรออกไซด์ผสมซิงค์ออกไซด์ ที่ผสมลงในสีทาบ้านใน อัตราส่วน 0.5 wt% ของเม็ดสีเทอร์โมโครมิก พบว่าปรากฏธาตุองค์ประกอบได้แก่ ไทเทเนียมซึ่งเป็นธาตุที่อยู่ในไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งเป็นส่วนผสมหลักในสีทาอาคาร นอกจากนั้นยังปรากฏ ธาตุคาร์บอน (C) ซึ่งเป็นธาตุที่อยู่ในพอลิเมอร์ทำหน้าที่เป็น Binder ในส่วนผสมของสีทาอาคาร และนอกจากนั้นยังปรากฏธาตุวานาเดียม (V) และ ออกซิเจน (O) ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบของเม็ดสี เทอร์โมโครมิกวานาเดียมไดออกไซด์ และยังปรากฏธาตุทั้งสแตน (W) และสังกะสี (Zn) ซึ่งเป็นธาตุ องค์ประกอบของสารเจือ เห็นได้ว่าธาตุ วานาเดียม ทั้งสแตน สังกะสี กระจายตัวได้ดีและสม่ำเสมอ ในสีทาอาคาร

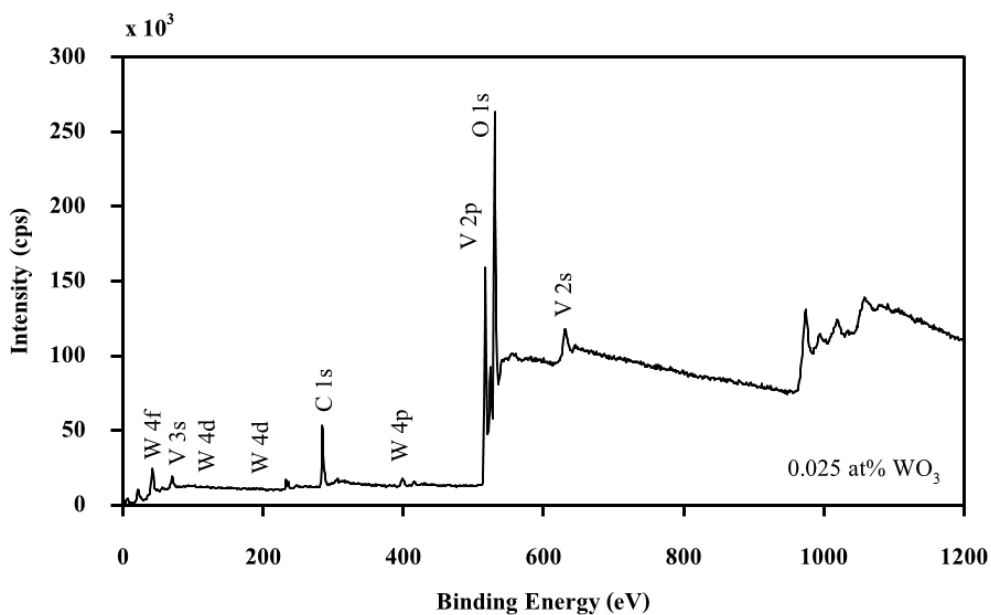


รูปที่ 4.10 การกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ ของผงวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์ผสมซิงค์ออกไซด์ที่ผสมอยู่ในสีทาอาคาร

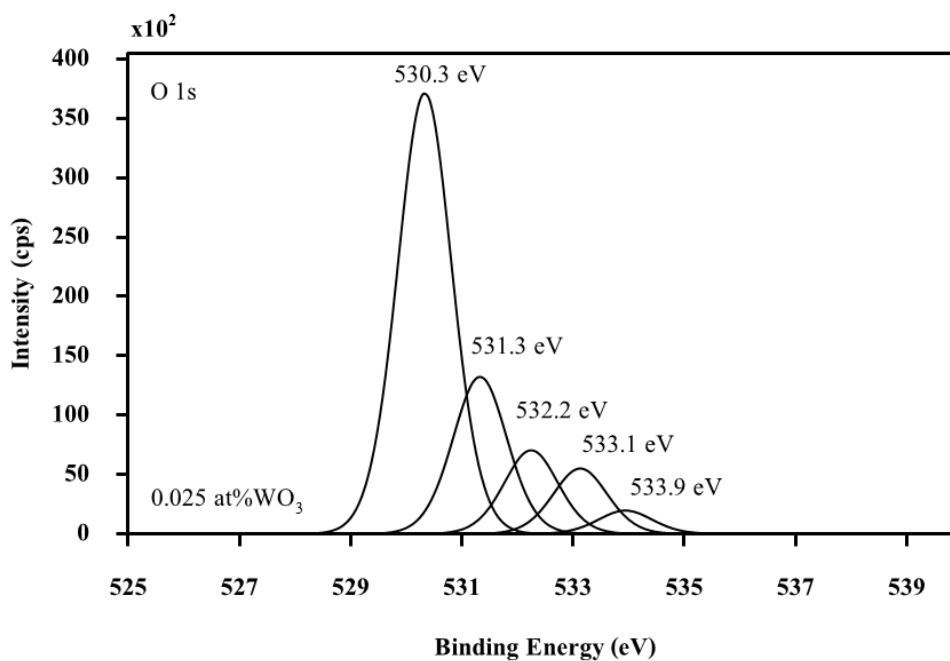
4.1.6 ผลการศึกษาองค์ประกอบและโครงสร้างเคมีของผงวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนด้วยเทคนิค XPS

จากการวิเคราะห์ผงวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ 0.025 at% ดังรูปที่ 4.11 แสดงสเปกตรัมของผงวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์จะปรากฏพีก

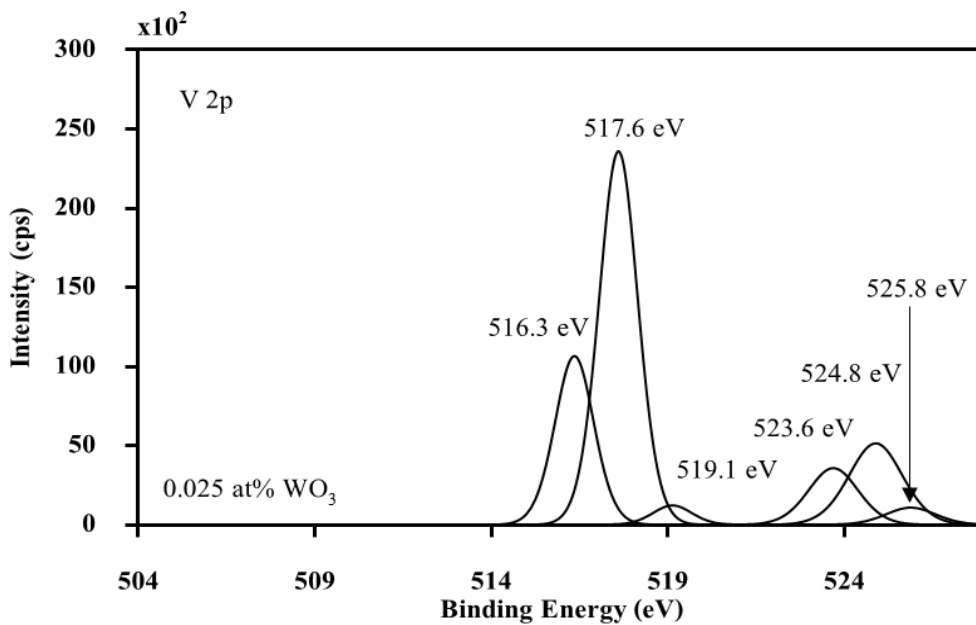
ของธาตุประกอบได้แก่ W4f, W4d, W4p, C1s, V3s, V2p, V2s และ O1s ซึ่งสารดังกล่าวเป็นสารตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง ขณะเดียวกันพบฟิสิกของออกซิเจนในปริมาณสูงและคาร์บอนในปริมาณน้อย ซึ่งหมายถึงผลสารตัวอย่างมีโอกาสเป็นสารประกอบของออกไซด์เป็นส่วนใหญ่และคาร์ไบด์เป็นส่วนน้อยแต่คาร์ไบด์เป็นสารประกอบที่ไม่ต้องการ จึงได้ทำการ ตรวจสอบแบบ High resolution ของธาตุ และทำการเปรียบเทียบระดับพลังงานของผงตัวอย่าง ดังแสดงรูปที่ 4.12-4.14



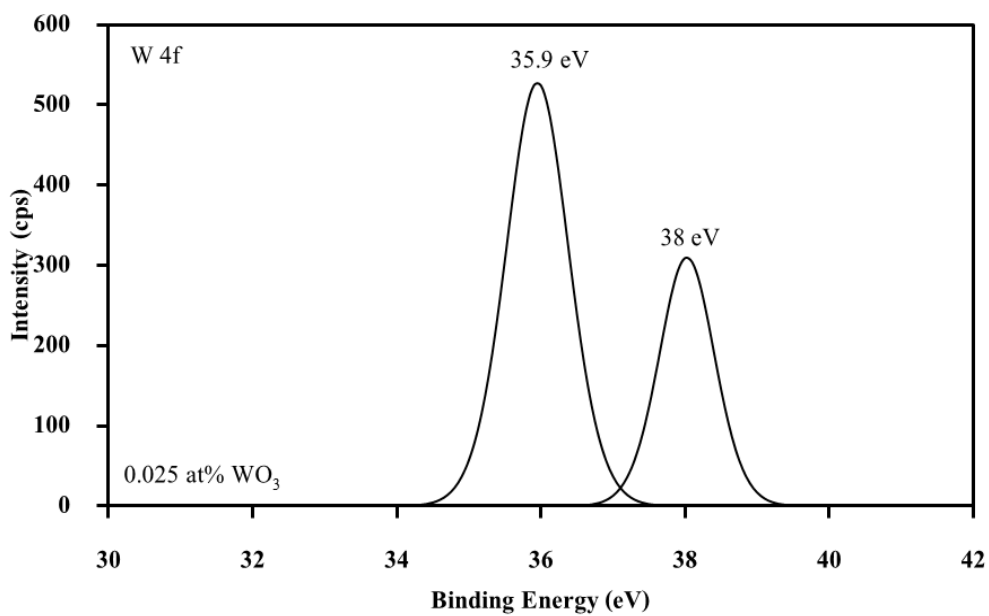
รูปที่ 4.11 สเปกตรัมแบบ Survey ของผงวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ 0.025 at%



รูปที่ 4.12 สเปกตรัมแบบ High resolution ของธาตุ O1s



รูปที่ 4.13 สเปกตรัมแบบ High resolution ของธาตุ V2p



รูปที่ 4.14 สเปกตรัมแบบ High resolution ของธาตุ W4f

จากสเปกตรัมแบบ High resolution ของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดน ไตรออกไซด์ พบว่าความเข้มส่วนใหญ่ของ O1s เกิดที่ 530.3, 531.3, 532.1, 533.1 และ 533.9 eV (Xu, Ma และคณะ 2004) ตามลำดับและเมื่อพิจารณาสเปกตรัมแบบ High resolution ของธาตุ V2p จะเกิดพีคที่ระดับพลังงาน 517.6 eV (Cao.C และคณะ 2008) เป็นส่วนใหญ่และ 516.3, 525.8, 524.8, 523.6, และ 519.1 eV ตามลำดับ (Whittaker และคณะ 2011) และธาตุ W4f จะเกิดพีคที่ระดับพลังงาน 35.9 และ 38 eV ในโครงสร้างของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดน ไตรออกไซด์ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Junwei Ye ในปี 2010

จากการวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยเทคนิค XPS พบว่า ตัวอย่างผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดน ไตรออกไซด์ ซึ่งเตรียมด้วยวิธีทางเคมี และเผาที่ 700 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศในโตรเจน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ประกอบด้วยธาตุ วานเนเดียม ออกซิเจน และทั้งสเดน ซึ่งมีความสอดคล้องกับการวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิค EDS ในหัวข้อที่ 4.1.4 พบการกระจายตัวของธาตุทั้ง 3 อย่างสม่ำเสมอในตัวอย่างวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดน ไตรออกไซด์ที่ 0.025 at%

4.2 สมบัติเทอร์โมโครมิกของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดน ไตรออกไซด์ผสมซิงค์ออกไซด์

4.2.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดนด้วยเทคนิค DSC

โดยทั่วไปวานเนเดียมไดออกไซด์เป็นธาตุแทรนซิชั่นที่สามารถเปลี่ยนโครงสร้างจากสารกึ่งตัวนำเป็นสารนำไฟฟ้า หรือ สารเคมีที่สามารถเปลี่ยนโครงสร้างจากโมโนคลินิกเป็นรูไทล์ เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 68 องศาเซลเซียส ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของสารเจือที่ผสมลงในขั้นตอนการสังเคราะห์ พบว่า ทั้งสเดน ไตรออกไซด์และซิงค์ออกไซด์สามารถลดอุณหภูมิแทรนซิชั่นของวานเนเดียมได้ จากทดลองภายหลังการเผาที่ 700 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศในโตรเจน ผงตัวอย่างที่ได้มีลักษณะเป็นน้ำเงินเข้ม และทำการวิเคราะห์โดยการควบคุมปริมาณของสารเจือทั้งสองชนิดดังแสดงในตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็น โดยแบ่ง 2 ตัวอย่างดังนี้

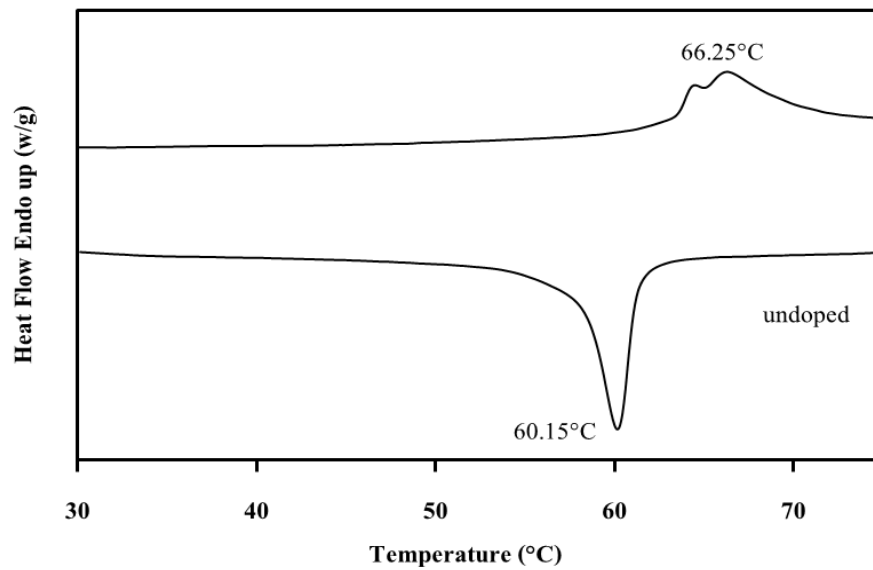
- 1.) ผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดน ไตรออกไซด์ อุณหภูมิแทรนซิชั่นของสารเมื่อไม่มีสารเจือ พบตำแหน่งพีคที่ 66.25 องศาเซลเซียส ซึ่งใกล้เคียงกับสารวานเนเดียมมาตรฐานที่ 68 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.15 และเมื่อมีการเจือทั้งสเดน ไตรออกไซด์ พบว่าอุณหภูมิแทรนซิชั่นของสารลดต่ำลงเมื่อปริมาณสารเจือที่ใช้น้อยลง ในงานวิจัยนี้เริ่มศึกษาปริมาณสารเจือทั้งสเดนที่ 0.250 at% และลดปริมาณลงตามลำดับพบว่าที่ปริมาณ 0.250 at% โครงสร้างของวานเนเดียมไดออกไซด์เป็นชนิดเป็นชนิดรูไทล์ ซึ่งไม่แสดงอุณหภูมิแทรนซิชั่นหรือสมบัติเทอร์โม

โครมิก จากนั้นได้ทำการลดปริมาณสารเจือลง พบว่าที่ 0.1 at% อุณหภูมิทรานซิชันของสารลดลง พบฟีกที่ตำแหน่ง 47.08 องศาเซลเซียส และเมื่อลดสารเจือลงอยู่ที่ 0.025 at% พบฟีกที่ตำแหน่ง 40 องศาเซลเซียสและเมื่อลดปริมาณทั้งสแตนไดรออกไซด์ลงมาที่ 0.0175 at% พบว่า อุณหภูมิทรานซิชันของผงวานาเดียมไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นเป็น 54.83 องศาเซลเซียสซึ่งชี้ให้เห็นว่า ทั้งสแตนไดรออกไซด์มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิทรานซิชันของวานาเดียมไดออกไซด์และปริมาณที่ทำให้สมบัติเทอร์โมโครมิกของวานาเดียมไดออกไซด์ดีที่สุดคือ 0.025 at% ดังแสดงในตารางที่ 4.7

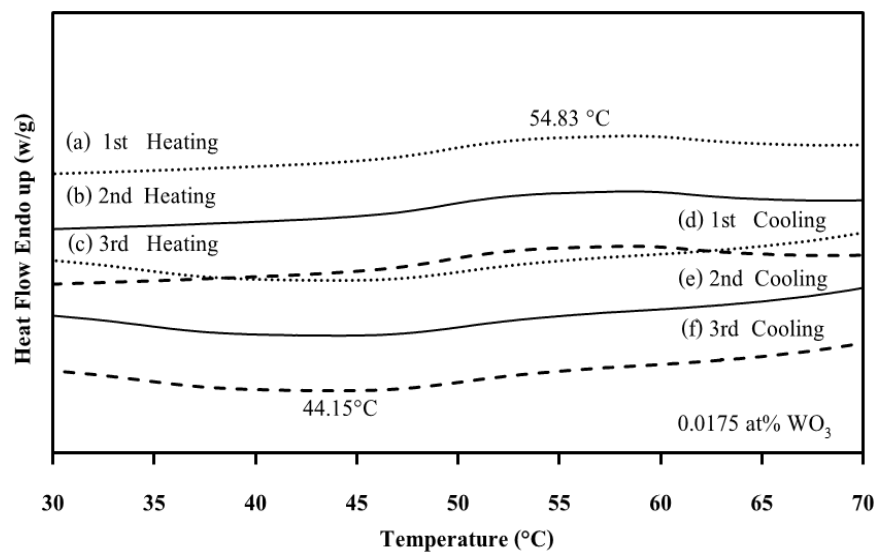
ตารางที่ 4.6 ปริมาณสารเจือทั้งสแตนไดรออกไซด์และซิงค์ออกไซด์สูตรต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง

ผงตัวอย่าง	สารเจือ	
	ทั้งสแตนไดรออกไซด์ (at%)	ซิงค์ออกไซด์ (wt%)
0.0175 at% WO ₃	0.0175	-
0.025 at% WO ₃	0.025	-
0.100 at% WO ₃	0.100	-
0.175 at% WO ₃	0.175	-
0.250 at% WO ₃	0.250	-
0.1 at% ZnO/WO ₃ /VO ₂	0.025	0.1
0.3 at% ZnO/WO ₃ /VO ₂	0.025	0.3
0.5 at% ZnO/WO ₃ /VO ₂	0.025	0.5

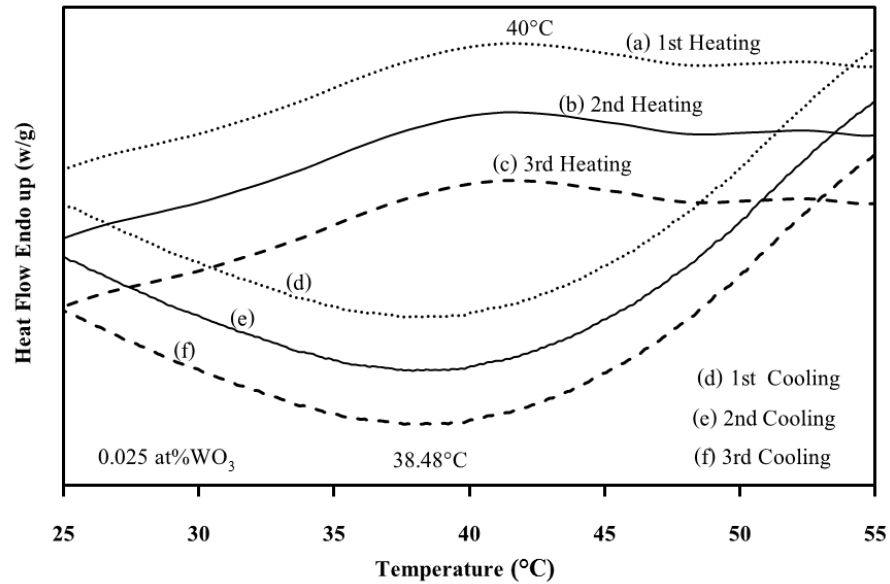
2.) ผงวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ ภายหลังจากการเผาสารที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน 1 ชั่วโมง ผงตัวอย่างที่ได้มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีน้ำเงินเข้ม (Dark blue) นำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC พบว่าเมื่อปริมาณสารเจือซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้นอุณหภูมิทรานซิชันของวานาเดียมไดออกไซด์ลดลง ในงานวิจัยนี้เลือกใช้สารเจือทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ 0.025 at% เพราะเป็นปริมาณที่ทำให้อุณหภูมิทรานซิชันของวานาเดียมลดลงดีที่สุดผสมกับซิงค์ออกไซด์ที่ ปริมาณ 0.1, 0.3 และ 0.5 at% พบว่าเมื่อปริมาณของซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้นอุณหภูมิทรานซิชันของสารลดลง โดยที่ 0.5 at% พบฟีกที่ตำแหน่ง 52 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.19 แต่อุณหภูมิที่พบนั้นยังสูงกว่าการเจือด้วยทั้งสแตนไดรออกไซด์เพียงอย่างเดียว ผู้วิจัยจึงได้ทดลองเพิ่มในปริมาณที่สูงกว่า 0.5 at% ซึ่งผลที่ได้ นั้น วานาเดียมไดออกไซด์มีโครงสร้างเป็นรูโกล์ จึงไม่สามารถแสดงสมบัติเทอร์โมโครมิกของสารได้



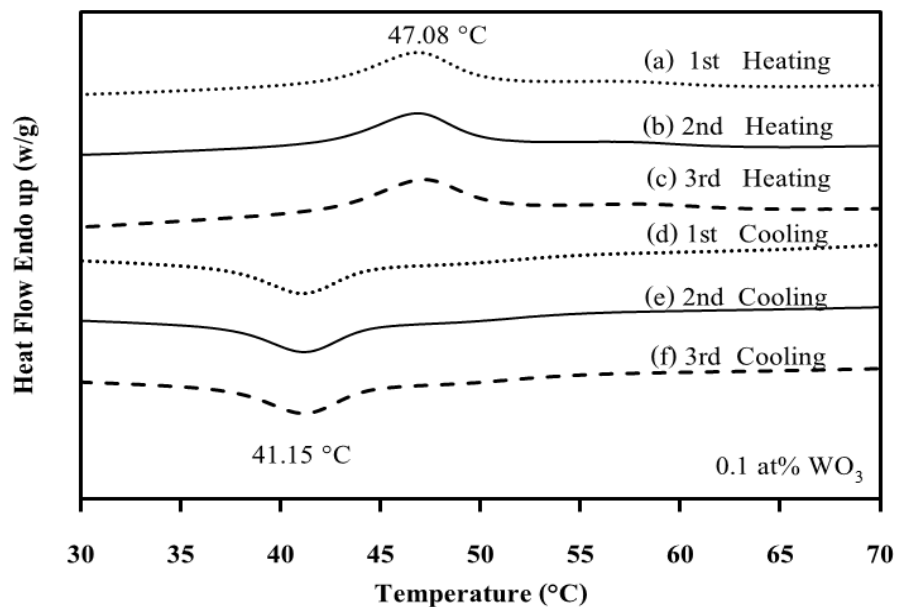
รูปที่ 4.15 ผลวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน ของวานเนเดียมไดออกไซด์ที่ไม่มีสารเจือ
ภายหลังการเผาที่ 700 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมงภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน



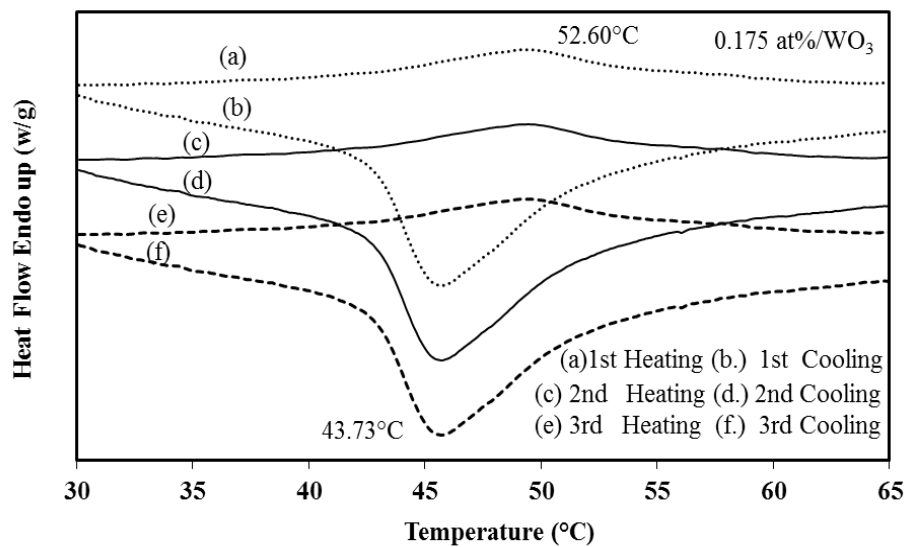
รูปที่ 4.16 ผลวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของวานเนเดียมไดออกไซด์
เจือด้วย 0.0175at% WO_3 แบบ Three-cycles of heating and cooling curves



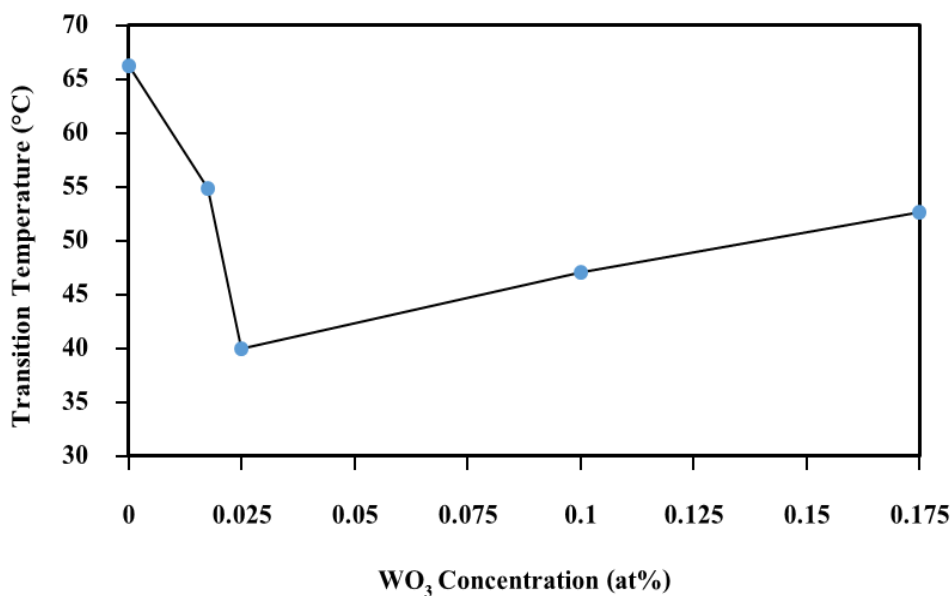
รูปที่ 4.17 ผลวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของวานาเดียมไดออกไซด์เจือด้วย 0.025at% WO_3 แบบ Three-cycles of heating and cooling curves



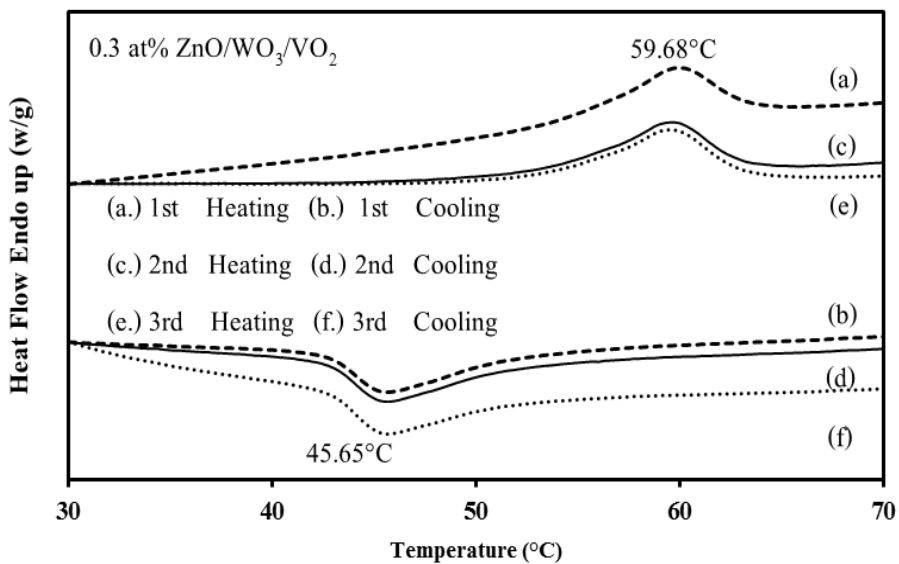
รูปที่ 4.18 ผลวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของวานาเดียมไดออกไซด์เจือด้วย 0.1at% WO_3 แบบ Three-cycles of heating and cooling curves



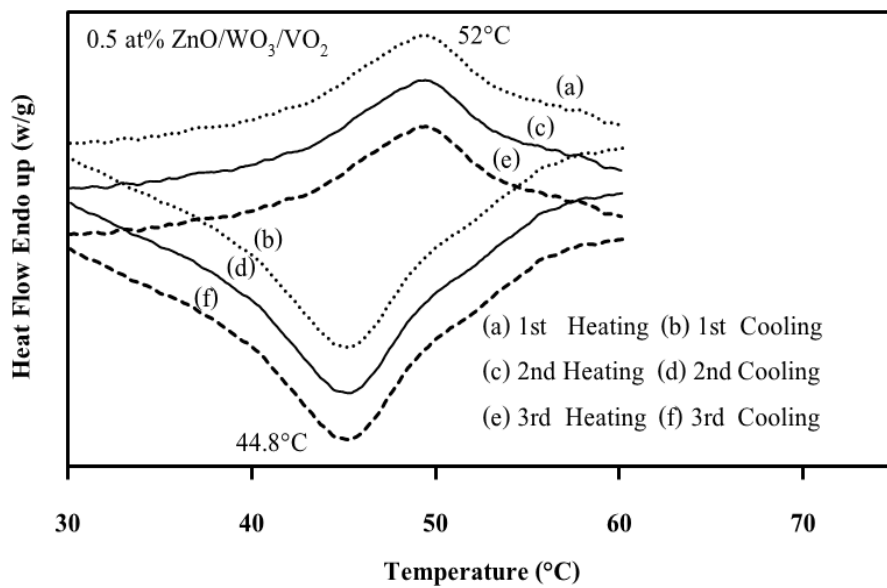
รูปที่ 4.19 ผลวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของวานเนเดียมไดออกไซด์เจือด้วย 0.175 at% WO₃ แบบ Three-cycles of heating and cooling curves



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารเจือทั้งสแกนไดรอกไซด์กับอุณหภูมิทรานซิชันของวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแกนไดรอกไซด์



รูปที่ 4.21 ผลวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของวานาเดียมไดออกไซด์เจือด้วย 0.3 at% ZnO/WO₃/VO₂ แบบ Three-cycles of heating and cooling curves



รูปที่ 4.22 ผลวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของวานาเดียมไดออกไซด์เจือด้วย 0.5 at% ZnO/WO₃/VO₂ แบบ Three-cycles of heating and cooling curves

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC สามารถสรุปเบื้องต้นได้ว่า การเจือวานเนเดียมไดออกไซด์ด้วยสารเจือทั้งสแตนไดรออกไซด์เพียงชนิดเดียวเป็นสูตรที่ดีที่สุดที่ทำให้อุณหภูมิทรานซิชันลดลงเทียบเท่าอุณหภูมิของภายนอกอาคารที่สัมผัสแสงและความร้อนจากดวงอาทิตย์โดยตรง กล่าวคือ ทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ 0.025 at% สามารถทำให้โครงสร้างของวานเนเดียมไดออกไซด์เปลี่ยนเป็นโลหะทรานซิชัน หรือโครงสร้างชนิดรูไทล์ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส นั่นคือเมื่อผนังอาคารได้รับความร้อนที่ 40 องศาเซลเซียสผิวผนังอาคารที่ทำด้วยวัสดุที่ส่วนผสมของเมคัสเทอร์โมโครมิกจะทำหน้าที่สะท้อนความร้อนได้ดีขึ้น โดยอุณหภูมิทรานซิชันของวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์ดังแสดงในรูปที่ 4.15-4.20 และอุณหภูมิทรานซิชันของวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์และซิงค์ออกไซด์แสดงในรูปที่ 4.21 และ 4.22

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิทรานซิชันของวานเนเดียมไดออกไซด์และสารสังเคราะห์ของผงสูตรต่าง ๆ

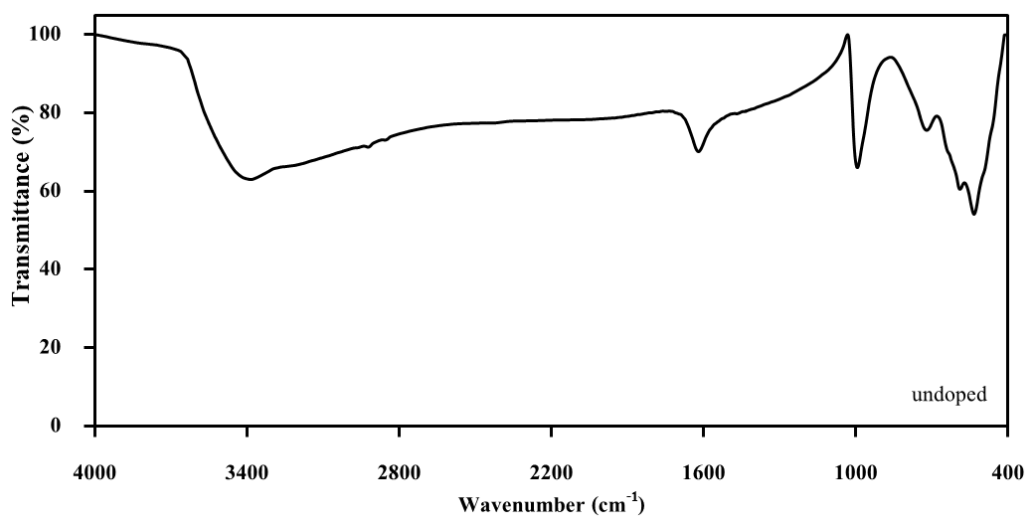
ผงตัวอย่าง	อุณหภูมิทรานซิชัน(°C)	
	Heating	Cooling
VO ₂ Commercial grade	66.25	64.8
Undoped	66.25	60.15
0.250 at% WO ₃	Rutile	Rutile
0.175 at% WO ₃	52.60	43.73
0.100 at% WO ₃	47.08	41.15
0.025 at% WO ₃	40.00	38.48
0.0175 at% WO ₃	54.83	44.15
0.5 at% ZnO/WO ₃ /VO ₂	52.00	44.80
0.3 at% ZnO/WO ₃ /VO ₂	59.68	45.65
0.1 at% ZnO/WO ₃ /VO ₂	amorphous	amorphous

หมายเหตุ Three-cycles of heating and cooling curves คือการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC โดยการทดสอบตัวอย่างซ้ำ 3 ครั้งเพื่อตรวจสอบความถูกต้องพิกที่ที่เกิดขึ้นในการทดลองนี้ พบว่าตัวอย่างมีสมบัติเทอร์โมโครมิกที่ดีอุณหภูมิที่เกิดขึ้นคงที่ในทุกรอบการทดสอบ

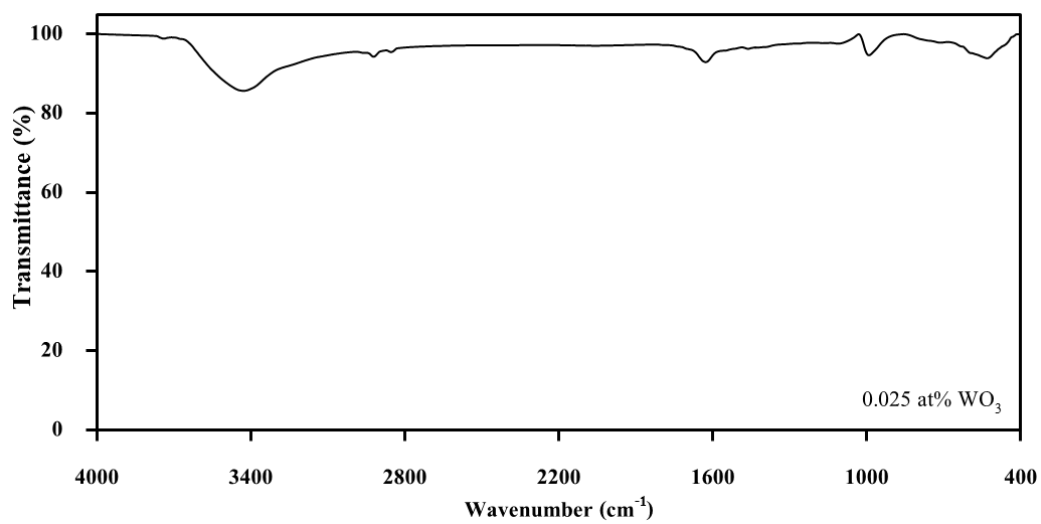
4.2.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผงวานเนเดียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค FT-IR

จากการวิเคราะห์ผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรอกไซด์ด้วยเทคนิค FT-IR เพื่อศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารที่มีอยู่ในโมเลกุล โดยจะมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างทางเคมี อาศัยหลักการดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรดทำให้เกิดการสั่นของพันธะเคมีภายในโมเลกุลที่มีความถี่ต่าง ๆ ในการสั่นของสเปกตรัมนั้น สามารถทราบถึงชนิดการสั่นของโมเลกุล เพื่อยืนยันองค์ประกอบและชนิดของสาร ผลการทดลองพบว่าที่ 0.025 at% ทั้งสแตนไดรอกไซด์ เกิดการสั่นที่เลขคลื่น $2900-3600\text{ cm}^{-1}$ จะมีกลุ่มของ O-H Stretching เกิดขึ้นแสดงถึงพันธะของไฮโดรเจนของฟิคมีลักษณะกว้าง ที่เลขคลื่น $712-1020\text{ cm}^{-1}$ จะเป็นฟิคของ V-O Stretching ที่ ตำแหน่งฟิค $400-1300\text{ cm}^{-1}$ จะเป็นกลุ่มของ W-OH Stretching และที่ตำแหน่ง 530 เป็นฟิคของ VO_2 ดังแสดงในรูปที่ 4.23 และ 4.24

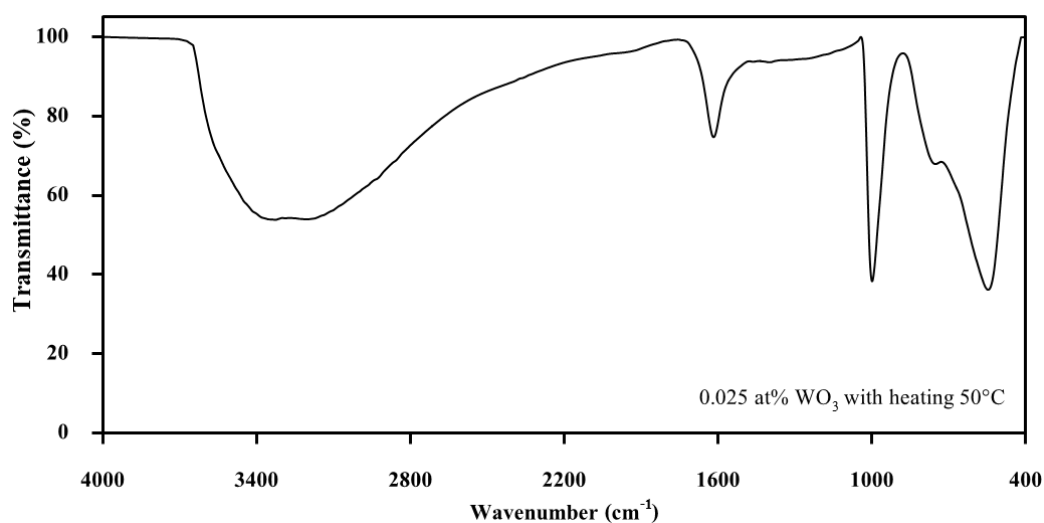
นอกจากนั้นจากการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนที่ปริมาณ 0.025 at% ที่ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR ดังรูปที่ 4.25 พบว่าหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นมีตำแหน่งเดิมเช่นเดียวกับตัวอย่างผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนที่ปริมาณ 0.025 at% ที่วิเคราะห์ที่อุณหภูมิห้องและนอกจากนั้น ภายหลังจากให้ความร้อนพบว่า เปอร์เซ็นต์การส่องผ่าน (% Transmittance) ของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนที่เลขคลื่นทุกตำแหน่งมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับวานเนเดียมไดออกไซด์ซึ่งทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีความสอดคล้องกับการวิเคราะห์สมบัติการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ในหัวข้อที่ 4.2.1 กล่าวคือวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรอกไซด์ 0.025 at% เกิดสมบัติเทอร์โมโครมิกเมื่อได้รับความร้อนตั้งแต่ 40 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.23 FT-IR สเปกตรัมของผงวานาเดียมไดออกไซด์โดยไม่มีการเจือทั้งสแตนไดรอกไซด์



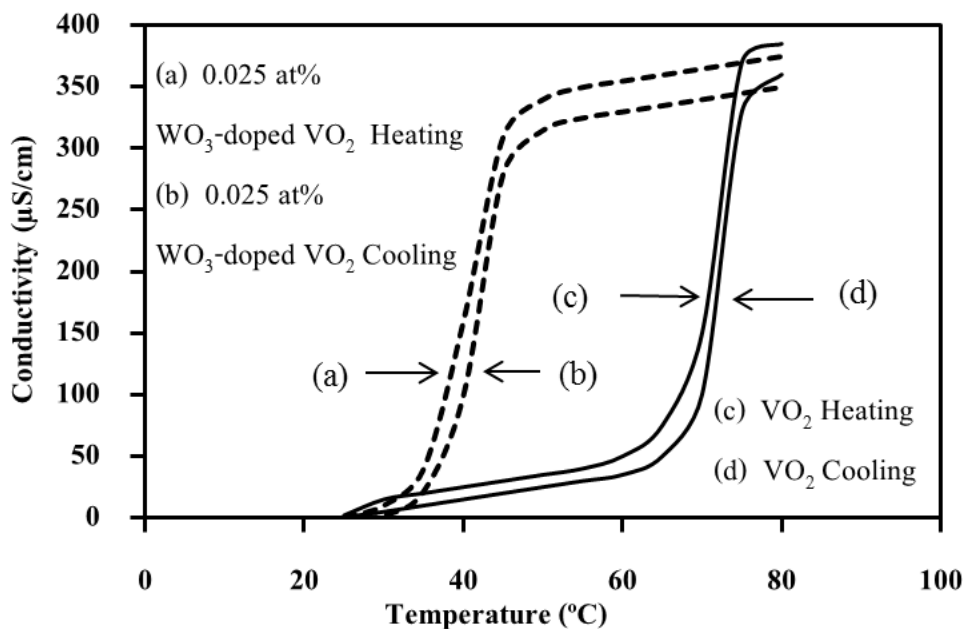
รูปที่ 4.24 FT-IR สเปกตรัมของผงวานาเดียมไดออกไซด์โดยเจือทั้งสแตนไดรอกไซด์ที่ 0.025 at% WO_3



รูปที่ 4.25 FT-IR สเปกตรัมของผงวานาเดียมไดออกไซด์โดยเจือทั้งสแตนไดรอกไซด์ที่ 0.025 at% WO_3 ภายหลังจากได้รับความร้อนที่ 50 องศาเซลเซียส

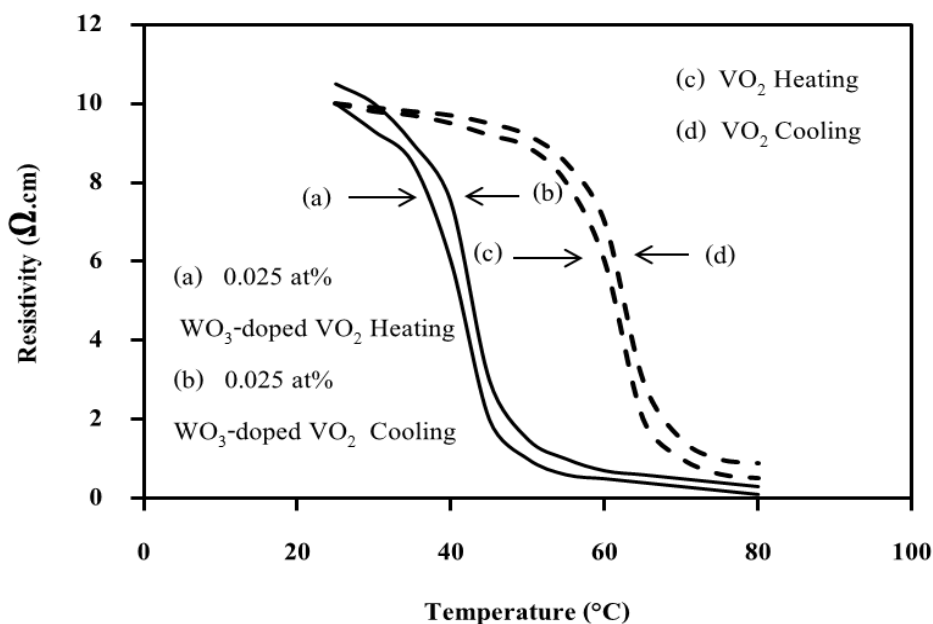
4.2.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของผงวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรอกไซด์

1) การวิเคราะห์สมบัติการนำไฟฟ้า วานาเดียมไดออกไซด์เป็นธาตุเคมีที่อยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชันและมีความสามารถในการเปลี่ยนสภาพจากฉนวนไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องเป็นสารที่มีสมบัตินำไฟฟ้าได้ที่อุณหภูมิ 68 องศาเซลเซียส งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของสารเจือทั้งสแตนไดรอกไซด์ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทรานซิชันของวานาเดียมไดออกไซด์ พบว่าที่ 0.025 at% ของทั้งสแตนไดรอกไซด์ให้อุณหภูมิทรานซิชันลดลงอยู่ที่ 40 องศาเซลเซียสดังแสดงในผล DSC รูปที่ 4.17 ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำสารตัวอย่างไปทดสอบการนำไฟฟ้าด้วยเทคนิค 2-Probe Conductivity Measurement พบว่าค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเริ่มต้นที่ ประมาณ 40 องศาเซลเซียสเมื่อเปรียบเทียบกับวานาเดียมไดออกไซด์ที่ไม่มีสารเจือพบว่า ค่าการนำไฟฟ้าเริ่มสูงขึ้นที่อุณหภูมิ ประมาณ 66 องศาเซลเซียส รูปที่ 4.26 ซึ่งสอดคล้องกับการวัดการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสารหรือ DSC ที่แสดงในตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.26 การนำไฟฟ้าของผงวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรอกไซด์

2) การวิเคราะห์สมบัติการต้านทานไฟฟ้า วานาเดียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิห้องหรือสถานะที่อุณหภูมิต่ำกว่า อุณหภูมิแทรนซิชันของสารจะมีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำหรือฉนวนไฟฟ้า ซึ่งจากการทดสอบการต้านทานไฟฟ้าพบว่าที่อุณหภูมิปกติ ค่าการต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างจะมีค่าสูงและเมื่อตัวอย่างได้รับความร้อนที่อุณหภูมิแทรนซิชัน ค่าต้านทานไฟฟ้าจะลดลง นั่นหมายถึง ผงวานาเดียมไดออกไซด์จะเปลี่ยนสภาพเป็นโลหะแทรนซิชันยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ จากการวิจัยพบว่าที่ 0.025 at% ของทั้งสแตนไดรอกไซด์เจือลงในวานาเดียมไดออกไซด์ สามารถช่วยลดอุณหภูมิแทรนซิชันของสารได้อยู่ที่ 40 องศาเซลเซียส และเมื่อวิเคราะห์ความต้านทานไฟฟ้าพบว่า ที่อุณหภูมิประมาณ 40 องศา ค่าความต้านทานไฟฟ้าจะลดลง เปรียบเทียบกับผงตัวอย่างที่ไม่มีการเจือสารทั้งสแตนค่าความต้านทานไฟฟ้าจะต่ำลงที่อุณหภูมิประมาณ 66 องศาเซลเซียสดังแสดงในรูปที่ 4.27 ซึ่งมีความสอดคล้องกับการวัดสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC



รูปที่ 4.27 การต้านทานไฟฟ้าของผงวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์

4.3 ผลการประยุกต์ใช้ผงวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสแตนไดรออกไซด์ผสมซิงค์ออกไซด์ในงาน ทางด้านการสะท้อนความร้อน

หลังจากการสังเคราะห์ผงตัวอย่างและวัดสมบัติโดยทั่วไปเรียบร้อยแล้ว พบว่าการสังเคราะห์วานาเดียมไดออกไซด์โดยการเจือทั้งสแตนไดรออกไซด์เพียงชนิดเดียวให้ผลทางด้านเทอร์โมโครมิกที่ดีกว่าการสังเคราะห์ร่วมกับซิงค์ออกไซด์ กล่าวคือที่ 0.025 at% ของทั้งสแตนไดรออกไซด์ทำให้ อุณหภูมิทรานซิชันของสารลดลงอยู่ที่ 40 องศาเซลเซียสในขณะเดียวกันเมื่อมีการเพิ่มซิงค์ออกไซด์ร่วมลงไปในการทดลองพบว่า ปริมาณที่ดีที่สุดคือ 0.5 wt% ทำให้อุณหภูมิทรานซิชันหรือสมบัติเทอร์โมโครมิกของสารลดลงอยู่ที่ 52 องศาเซลเซียส แต่เนื่องจากอุณหภูมิที่เกิดขึ้นสูงกว่าอุณหภูมิที่ผิวของผนังเมื่อได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ ที่ส่งมาถึงโลก (ประกาศจากกรมอุตุนิยมวิทยา เมื่อวันที่ 28 มีนาคม 2558) โดยอุณหภูมิทั่วประเทศมีความร้อนสูงที่ประมาณ 37-44 องศาเซลเซียส ทำให้การเจือวานาเดียมไดออกไซด์ด้วยทั้งสแตนไดรออกไซด์ร่วมกับซิงค์ออกไซด์ยังให้ผลทางด้านการสะท้อนความร้อนที่ไม่ดีนัก แต่ในขณะเดียวกันเมื่อศึกษาถึงสมบัติพื้นฐานของซิงค์ออกไซด์ พบว่ามีซิงค์ออกไซด์จะเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกเมื่อได้รับ หรือมีแสงมากระตุ้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ซิงค์ออกไซด์ ผสมร่วมกับเม็ดดีเทอร์โมโครมิกของวานาเดียมไดออกไซด์เจือด้วยทั้งสแตนไดรออกไซด์ ประยุกต์ใช้ผสมรวมกันในสีทาอาคาร เพื่อให้สีเทอร์โมโครมิกมีสมบัติในการสะท้อนความร้อน ในขณะเดียวกันเม็ดดีเทอร์โมโครมิกยังสามารถด้านการเจริญเติบโตของเชื้อ

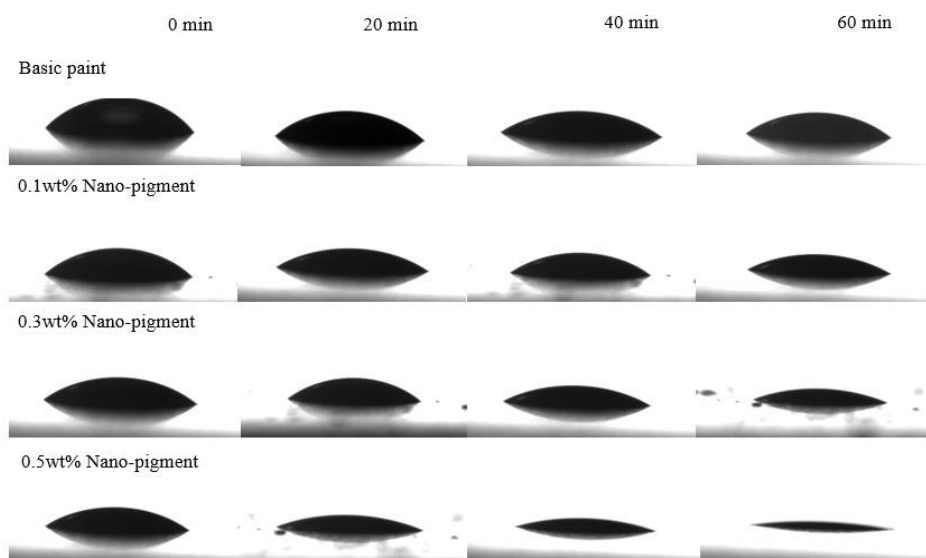
แบบที่เรียบและมีสมบัติการทำความสะอาดตัวเองร่วมด้วย อัตราส่วนผสมของเม็ดสีเทอร์โมโครมิก และซิงค์ออกไซด์ในสีทาอาคารดังแสดงในตารางที่ 3.5

4.3.1 ผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองของผงวานเนเดียมไดออกไซด์ เจือทั้งสทนั้ตรออกไซด์ที่ผสมซิงค์ออกไซด์ผสมในสีทาอาคาร

สมบัติการทำความสะอาดตัวเองของเม็ดสีเทอร์โมโครมิก ทำการวิเคราะห์โดยการเคลือบสีบนกระจกสไลด์แล้วนำไปวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำที่เกิดขึ้นภายใต้การรับรังสียูวีที่ 0-60 นาที พบว่าผิวของกระจกที่เคลือบด้วยสีเทอร์โมโครมิกมีสภาพผิวเปียกที่ดี ที่เปรียบเทียบกับสีธรรมดาที่ไม่มีเม็ดสี และเมื่อวางตัวอย่างไว้ภายใต้รังสียูวี มุมสัมผัสของผิวมีค่าต่ำลงซึ่งแสดงให้เห็นถึงสมบัติการทำความสะอาดตัวเองโดยอาศัยสมบัติ Hydrophilic ตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.28

ตารางที่ 4.8 ค่ามุมสัมผัสของผิวสีเทอร์โมโครมิกสูตรต่าง ๆ เมื่อได้รับแสงยูวี

Samples	Contact angle after UV irradiation (degree)			
	0 min	20 min	40 min	60 min
Basic paint	49.40	46.56	43.72	41.60
0.1 wt% Nano-pigment	41.15	38.81	32.25	26.86
0.3 wt% Nano-pigment	37.90	36.60	28.60	24.43
0.5 wt% Nano-pigment	32.10	20.60	16.80	10.20

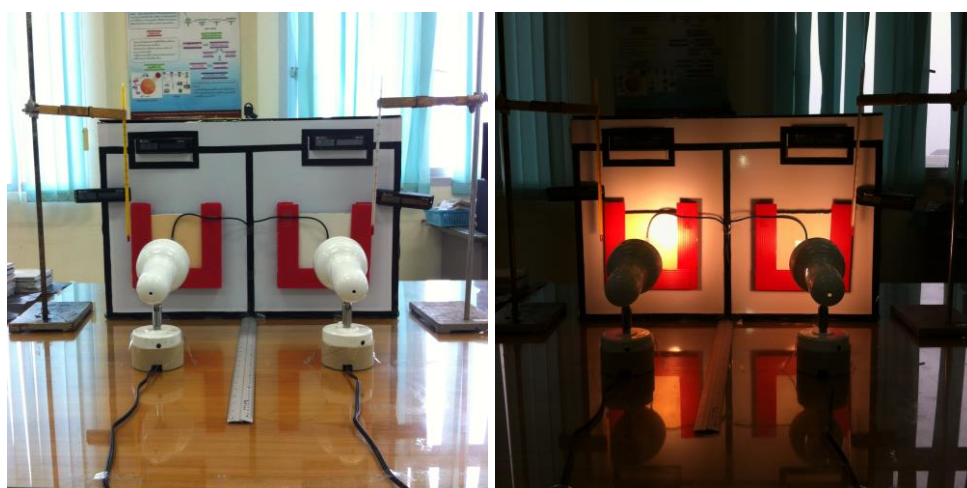


รูปที่ 4.28 การวัดมุมสัมผัสของผิวสีเทอร์โมโครมิกสูตรต่าง ๆ ที่เวลาต่างกันภายใต้แสงยูวี

4.3.2 การทดสอบการสะท้อนความร้อนของแผ่นปูนซีเมนต์เปล้าและแผ่นปูนทาด้วยสีสำหรับทาอาคารทั่วไป

การเตรียมแผ่นปูนซีเมนต์เปล้าก่อนการทดสอบเพื่อให้ได้ผลที่มีความใกล้เคียงกับการประยุกต์ใช้ที่สุด ทางผู้วิจัยได้เตรียมแผ่นปูนซีเมนต์จากปูนซีเมนต์สำเร็จรูปโดยการผสมในสัดส่วน ปูน 5 กิโลกรัมต่อน้ำ 1000-1100 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันและเทปูน ลงในพิมพ์ ขนาด 10x10 เซนติเมตร โดยควบคุมความหนา ที่ 0.5, 1 และ 1.5 เซนติเมตร จากนั้นทิ้งไว้ให้แผ่นปูนแห้งสนิท เป็นระยะเวลา 1-2 วัน ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศในช่วงนั้น ๆ เมื่อแผ่นปูนแห้งสนิทจะได้แผ่นปูนมาตรฐานที่จะนำมาใช้ในการทดสอบและก่อนการทดสอบจะต้องทำความสะอาดผิวปูนด้วยฟองน้ำแห้งเช็ดทำความสะอาดและผึ่งผึ่งที่อยู่นบนผิวปูน จากนั้นใช้สีรองพื้นสำหรับผนังบ้านทาเคลือบบนผิวปูนและทิ้งไว้ระยะเวลา 1 วันเพื่อให้สีรองพื้นแห้ง และพร้อมสำหรับการทาด้วยสีผสมเม็ดสีเทอร์โมโครมิกสำหรับการทดสอบการสะท้อนความร้อนต่อไป

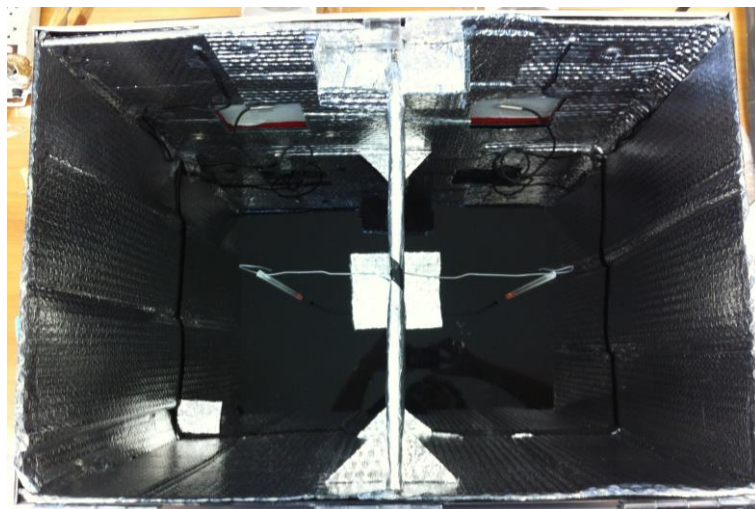
สำหรับการทดสอบการสะท้อนความร้อน โดยการเตรียมตัวอย่างผสมกับสีทาอาคารในอัตราส่วนต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.3 และ 3.4 ผลการทดสอบโดยการวัดความร้อนบนผิวของวัสดุทั้งด้านที่ได้รับความร้อนและด้านที่ไม่โดนความร้อน โดยใช้กล่องทดสอบ พบว่า ที่ปริมาณ 0.5 wt% WO_3 -doped VO_2 สีเทอร์โมโครมิก สามารถสะท้อนความร้อนที่มากกระทบผิวได้ดีที่สุด การเก็บข้อมูลบันทึกผลโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบดิจิตอล วัดอุณหภูมิ ทุก ๆ 5 นาทีเป็นระยะเวลาต่อเนื่อง 120 นาที กำหนด ระยะห่างของแผ่นวัสดุฐานกับแหล่งกำเนิดความร้อนที่ 20 เซนติเมตรที่สภาวะอุณหภูมิห้อง โดยใช้หลอดไฟทั้งสแตนขนาด 100 วัตต์ ความร้อนภายนอกนอกกล่องทดสอบตลอด 120 นาที อยู่ที่ 45 องศาเซลเซียส ตัวอย่างกล่องทดสอบแสดงในรูปที่ 4.29-4.32



(1)

(2)

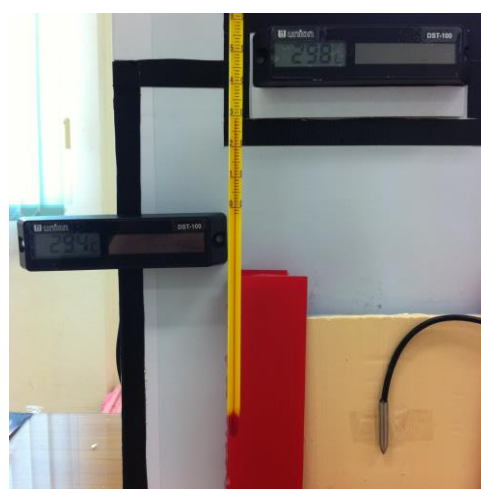
รูปที่ 4.29 ชุดทดสอบก่อนการทดสอบความร้อน (1) ชุดทดสอบขณะทำการทดสอบความร้อน (2)



รูปที่ 4.30 ลักษณะภายในกล่องทดสอบความร้อน



(1)



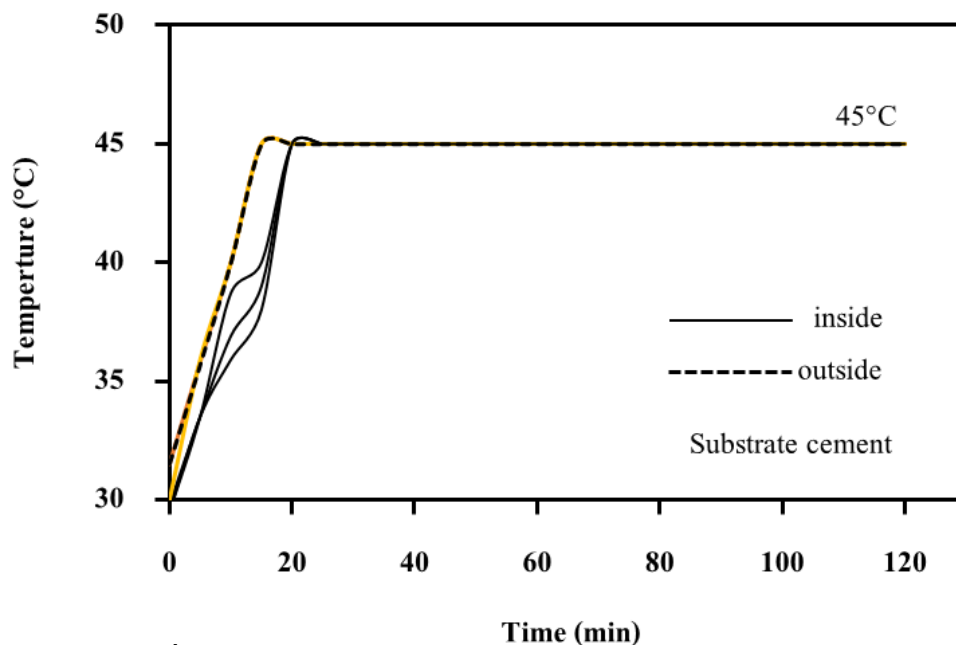
(2)

รูปที่ 4.31 การวัดความร้อนที่ผิววัสดุภายในกล่องทดสอบ (1)
การวัดความร้อนที่ผิววัสดุภายนอกกล่องทดสอบ(2)



รูปที่ 4.32 ลักษณะการให้ความร้อนและวัดความร้อนบนแผ่นปูนซีเมนต์ทำด้วยตัวอย่าง

การเก็บข้อมูลการวัดความร้อนจะเก็บต่อเนื่องเป็นระยะ เวลา 10 ครั้งต่อ 1 ตัวอย่าง และนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อรายงานผล พบว่า ในแต่ละครั้งการวัดอุณหภูมิของตัวอย่างแต่ละชนิดไม่แตกต่างกันค่าโดยมีอุณหภูมิคงที่ และจะแตกต่างกันอยู่ที่ประมาณ 1-2 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศที่ทำการทดสอบในแต่ละวัน



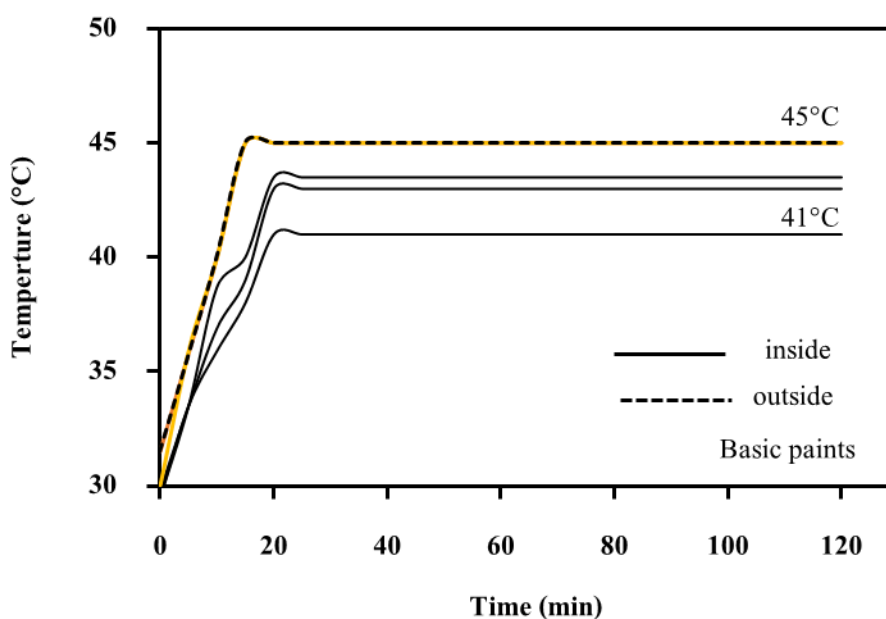
รูปที่ 4.33 การวัดอุณหภูมิผิวด้านนอกและด้านในบนแผ่นปูนซีเมนต์เปล่า

การวัดอุณหภูมิเริ่มต้นใช้ ปูนซีเมนต์โดยการกำหนดขนาด 10 x 10 เซนติเมตร ที่ความหนา 0.5, 1.0 และ 1.5 เซนติเมตรพบว่าที่เวลา 15 นาที อุณหภูมิด้านนอก และด้านใน อยู่ที่ 45 องศาเท่ากันและต่อเนื่องไปจนถึงระยะเวลา 120 นาที ความสามารถในการคายความร้อนของแผ่นปูนซีเมนต์จาก 45 องศาเซลเซียส ลงมาอยู่ที่ อุณหภูมิห้อง ใช้เวลา 15 นาที ข้อมูลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.34

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบความร้อนที่ผิวตัวอย่างที่เวลา 120 นาที

ความหนาตัวอย่าง (cm)	อุณหภูมิที่ 120 นาที		อุณหภูมิภายในกล่องทดสอบ (°C)
	ผิวนอก (°C)	ผิวใน (°C)	
ซีเมนต์เปล้า			
0.5	45	45	39
1	45	45	39
1.5	45	45	39

ผลการวัดความร้อนบนแผ่นปูนซีเมนต์ที่ทำด้วยสีทาอาคาร โดยไม่ผสมเม็ดสีเทอร์โมโครมิก พบว่าการทาสีชั้นไม่ส่งผลต่อการสะท้อนความร้อน อุณหภูมิที่ได้ จากการทดลองมีค่าเท่ากันงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้การทาการสีบนแผ่นวัสดุเพียง 1 ครั้ง จากผลการทดลองพบว่า ที่ความหนาต่างกันมีอุณหภูมิแตกต่างกันโดยจะเริ่มคงที่ภายหลังการได้รับความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อน ที่ 20 นาที และคงที่จนถึง 120 นาทีดังแสดงในรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 การวัดอุณหภูมิผิวด้านนอกและด้านในบนแผ่นตัวอย่างที่ทำด้วยสีทาอาคารทั่วไป

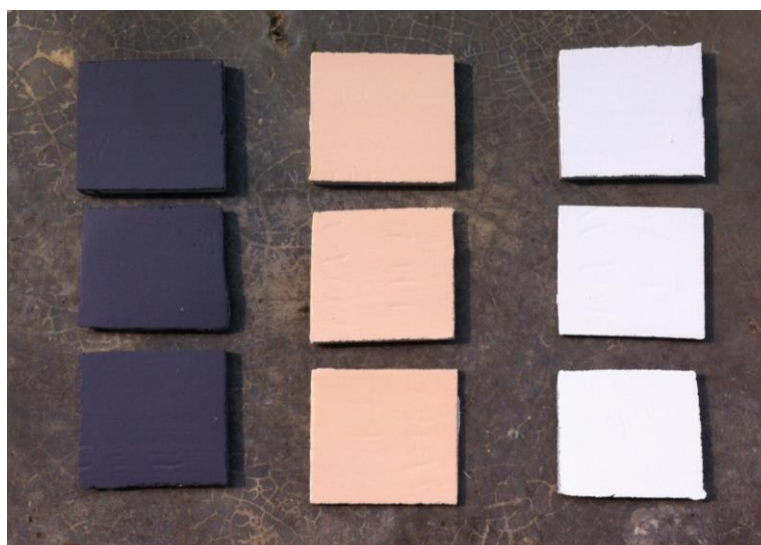
ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบความร้อนที่ผิวตัวอย่างที่ทำด้วยสีทาอาคารทั่วไปที่เวลา 120 นาที

ความหนาตัวอย่าง (cm)	อุณหภูมิที่ 120 นาที		อุณหภูมิภายในกล่องทดสอบ (°C)
	ผิวใน (°C)	ผิวนอก (°C)	
0.5	43	45	37
1	42	45	37
1.5	41	45	37

จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้สีทาอาคารทั่วไปทาบนแผ่นปูนซีเมนต์และทดสอบความร้อนระยะเวลาที่ทำให้ความร้อนบนแผ่นตัวอย่างคงที่ ของปูนซีเมนต์เปล่าอยู่ที่ 15 นาทีและทาสีอยู่ที่ 15 นาทีแสดงให้เห็นสีทั่วไปสามารถสะท้อนความร้อนได้เล็กน้อยเมื่อวัด อุณหภูมิที่ผิวพบว่าความร้อนที่ผิวนอกต่างกัน เพียง 2 องศาเซลเซียสที่ ความหนา 0.5 เซนติเมตร

4.3.3 การทดสอบการสะท้อนความร้อนของผงวานิเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเต็ม ไตรออกไซด์ผสมในสีสำหรับทาอาคาร

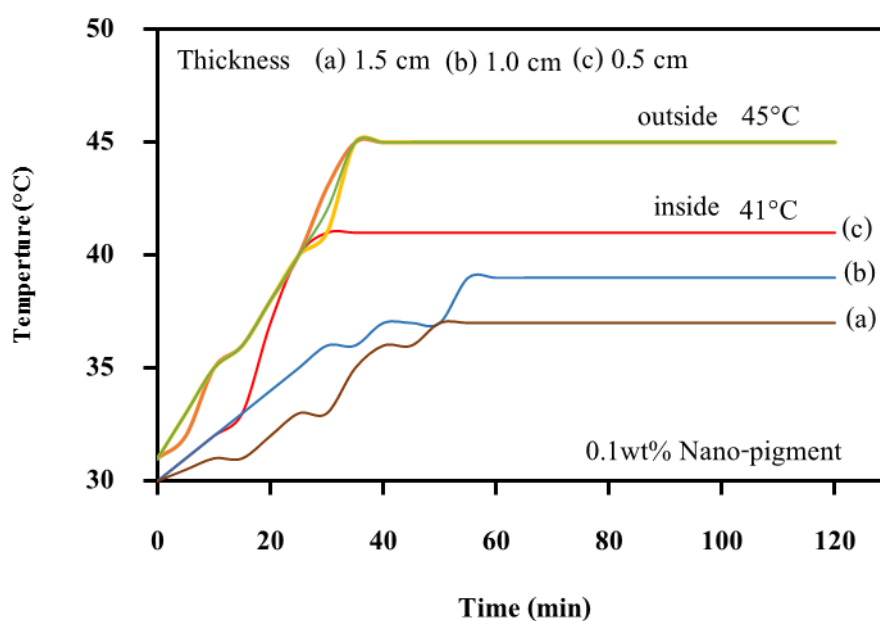
ผลการทดสอบตัวอย่างที่ผสมด้วยเม็ดสีเทอร์โมโครมิกสูตรต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.11-4.13 ทำการทดสอบโดยการศึกษาปริมาณของเม็ดสีและสีที่ใช้ทดสอบ พบว่าที่ 0.5wt% เม็ดสีผสมร่วมกับสีขาว ให้ผลการสะท้อนความร้อนดีที่สุด ความสามารถในการคายความร้อนของแผ่นตัวอย่างอยู่ที่ 15 นาที ผลการทดลองดังแสดงในตาราง 4.13



รูปที่ 4.35 ตัวอย่างสีที่ใช้ทาบนแผ่นปูนซีเมนต์สำหรับการทดสอบการสะท้อนความร้อน

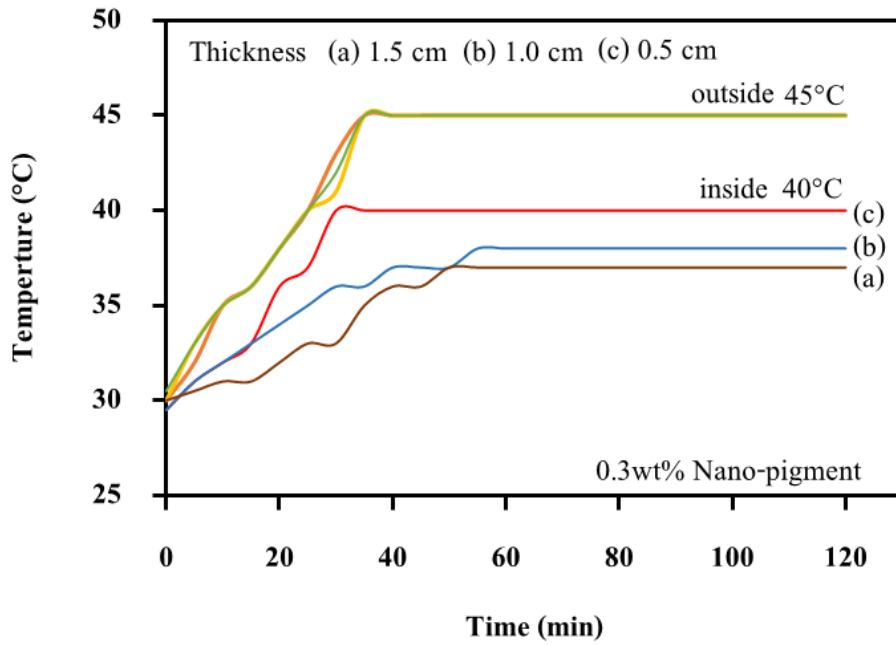
ตารางที่ 4.11 ผลการวัดความร้อนของเม็ดสีผสมในสีทาอาคารสีเข้ม (สีเทา)

ตัวอย่างสีเข้ม	อุณหภูมิที่ 120 นาที		อุณหภูมิภายในกล่องทดสอบ (°C)
	ผิวนอก (°C)	ผิวใน (°C)	
0.1wt% nano-pigment			
Thickness 0.5 cm	45	41	38
Thickness 1.0 cm	45	39	38
Thickness 1.5 cm	45	37	37
0.3 wt% nano-pigment			
Thickness 0.5 cm	45	40	37
Thickness 1.0 cm	45	38	37
Thickness 1.5 cm	45	37	37
0.5wt% nano-pigment			
Thickness 0.5 cm	45	39	36.5
Thickness 1.0 cm	45	37	36
Thickness 1.5 cm	45	36	36



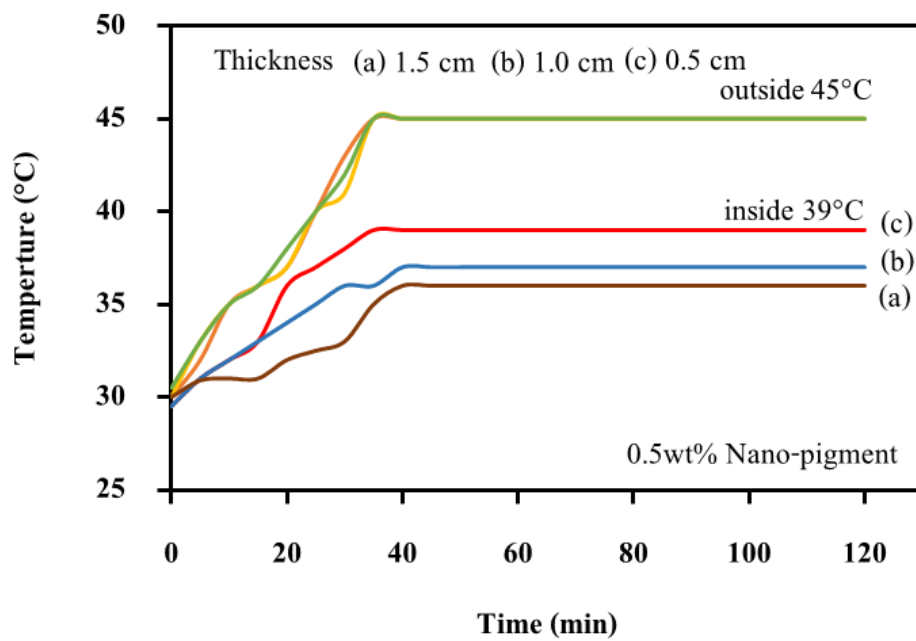
รูปที่ 4.36 ผลการวัดความร้อนของผงตัวอย่างผสมสีทาอาคารสีเข้ม (สีเทา)

สูตร 0.1 wt% Nano-pigment



รูปที่ 4.37 ผลการวัดความร้อนของผงตัวอย่างผสมสีทาอาคารสีเข้ม (สีเทา)

สูตร 0.3 wt% Nano-pigment

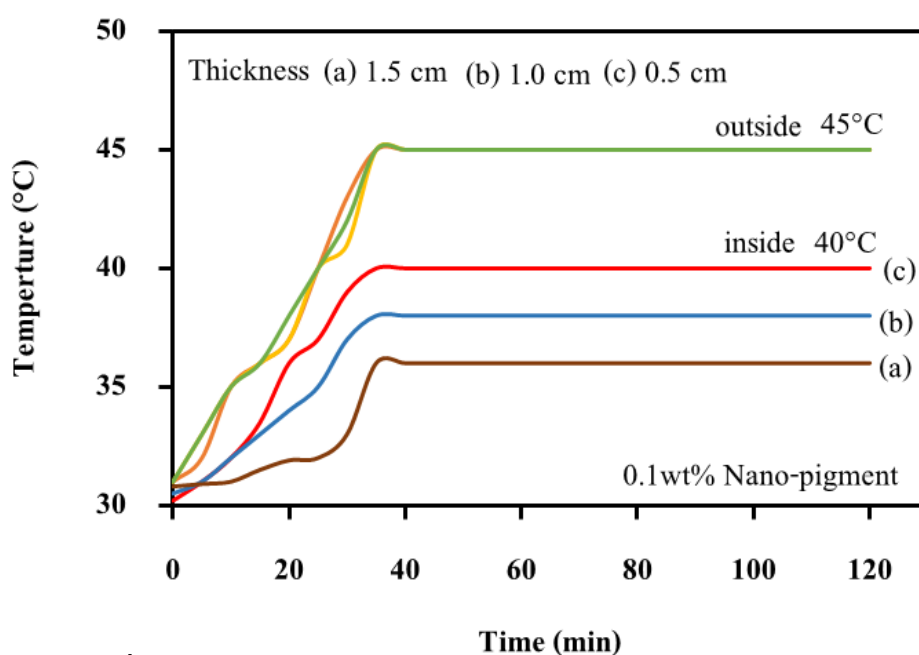


รูปที่ 4.38 ผลการวัดความร้อนของผงตัวอย่างผสมสีทาอาคารสีเข้ม (สีเทา)

สูตร 0.5 wt% Nano-pigment

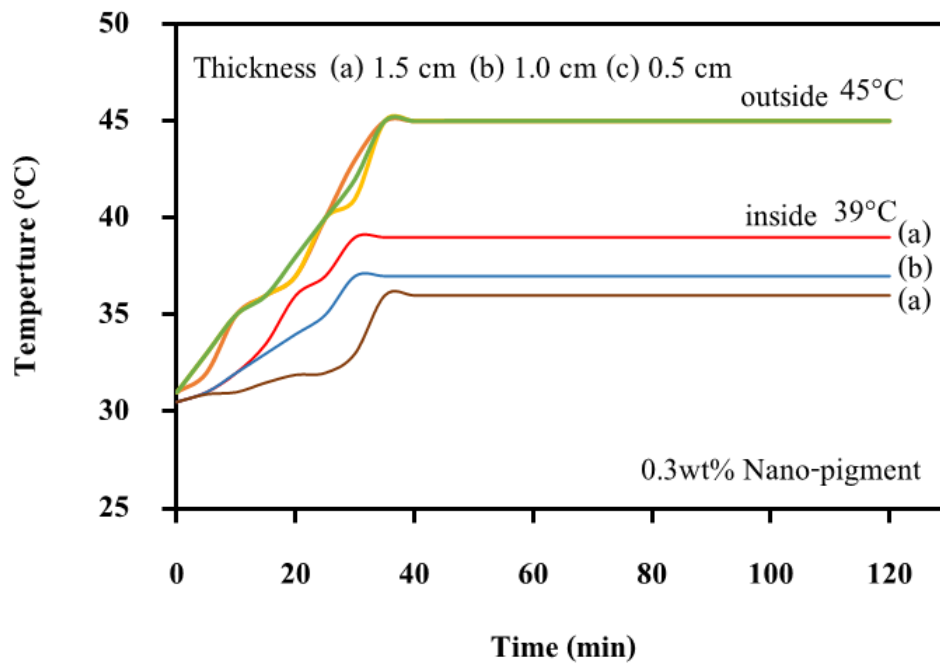
ตารางที่ 4.12 ผลการวัดความร้อนของเม็ดสีผสมในสีทาอาคารสีอ่อน (สีครีม)

ตัวอย่างสีอ่อน	อุณหภูมิที่ 120 นาที		อุณหภูมิภายในกล่องทดสอบ (°C)
	ผิวนอก (°C)	ผิวใน (°C)	
0.1wt% nano-pigment			
Thickness 0.5 cm	45	40	36
Thickness 1.0 cm	45	38	36
Thickness 1.5 cm	45	36	35
0.3 wt% nano-pigment			
Thickness 0.5 cm	45	39	36
Thickness 1.0 cm	45	37	35
Thickness 1.5 cm	45	36	34
0.5wt% nano-pigment			
Thickness 0.5 cm	45	38.5	35
Thickness 1.0 cm	45	37	34
Thickness 1.5 cm	45	35	34

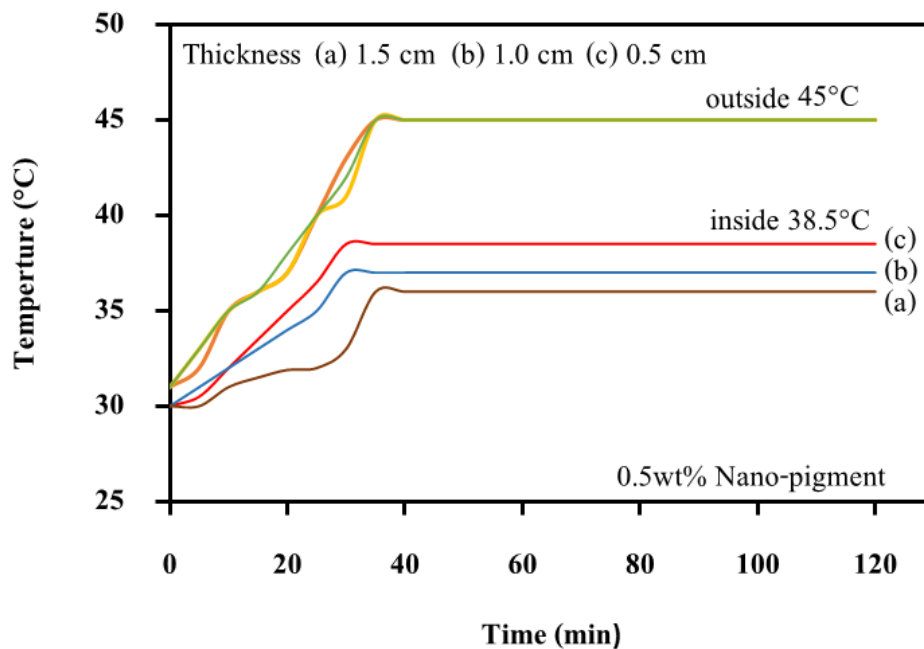


รูปที่ 4.39 ผลการวัดความร้อนของผงตัวอย่างผสมสีทาอาคารสีอ่อน (สีครีม)

สูตร 0.1 wt% Nano-pigment



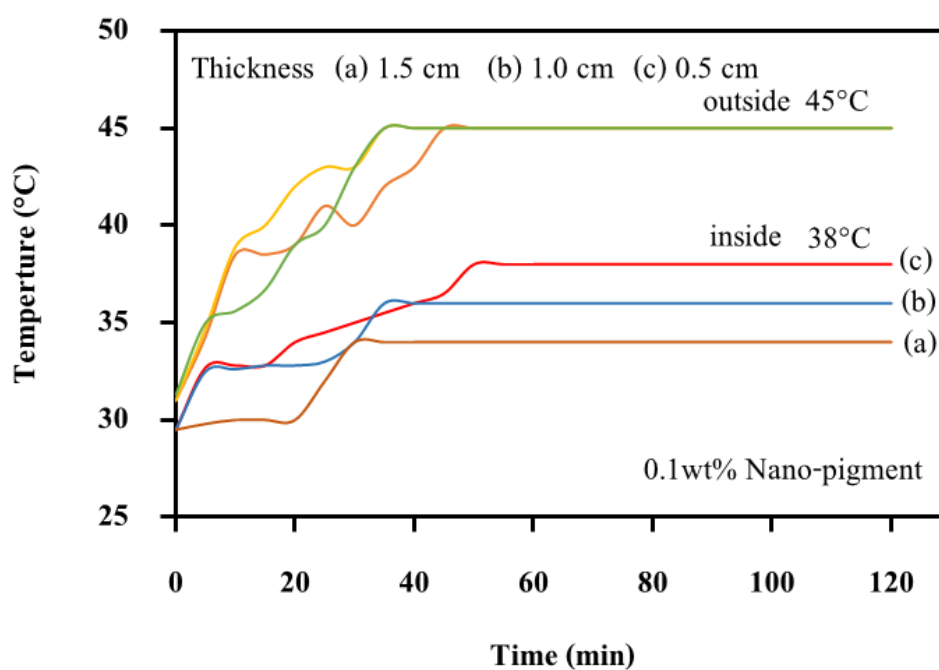
รูปที่ 4.40 ผลการวัดความร้อนของผนังตัวอย่างผสมสีทาอาคารสีอ่อน (สีครีม)
สูตร 0.3 wt% Nano-pigment



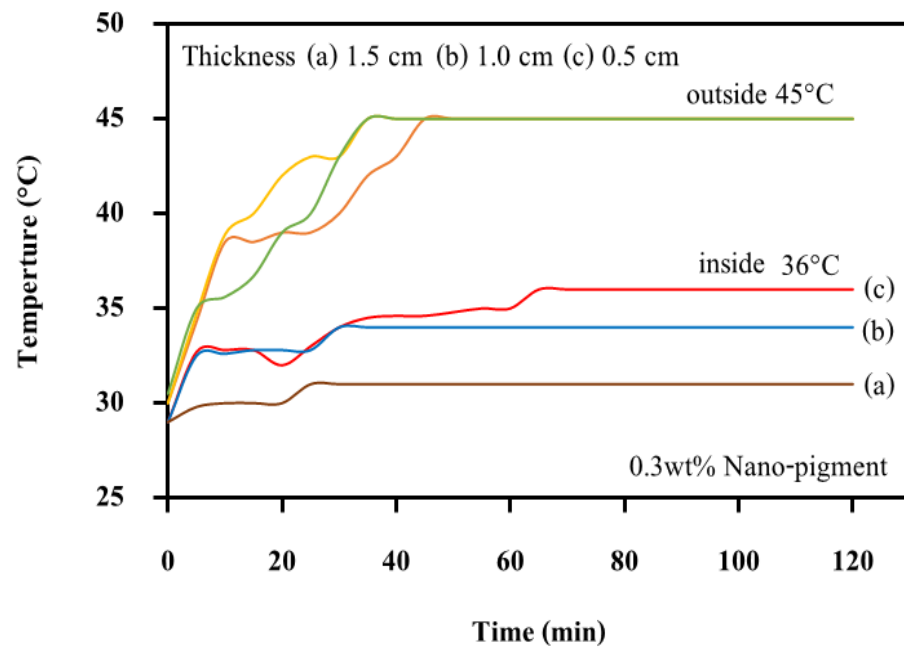
รูปที่ 4.41 ผลการวัดความร้อนของผนังตัวอย่างผสมสีทาอาคารสีอ่อน (สีครีม)
สูตร 0.5 wt% Nano-pigment

ตารางที่ 4.13 ผลการวัดความร้อนของเม็ดสีผสมในสีทาอาคารสีขาว

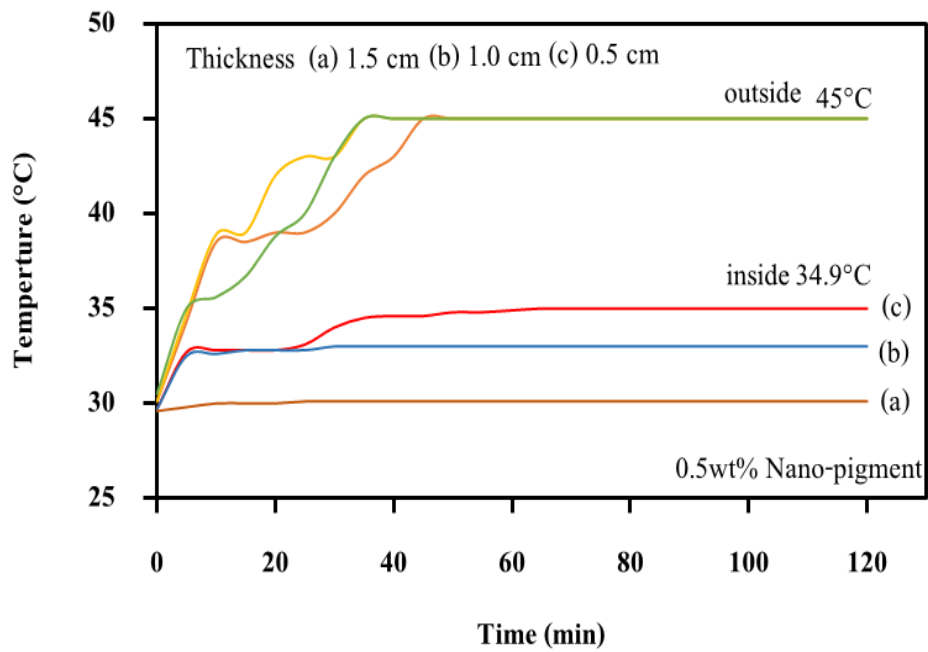
ตัวอย่างสีขาว	อุณหภูมิที่ 120 นาที		อุณหภูมิภายในกล่องทดสอบ (°C)
	ผิวนอก (°C)	ผิวใน (°C)	
0.1wt% nano-pigment			
Thickness 0.5 cm	45	38	36
Thickness 1.0 cm	45	36	35
Thickness 1.5 cm	45	34	35
0.3 wt% nano-pigment			
Thickness 0.5 cm	45	36	34
Thickness 1.0 cm	45	34	34
Thickness 1.5 cm	45	31	33
0.5wt% nano-pigment			
Thickness 0.5 cm	45	34.9	32
Thickness 1.0 cm	45	32	30
Thickness 1.5 cm	45	31	30



รูปที่ 4.42 ผลการวัดความร้อนของผงตัวอย่างผสมสีทาอาคารสีขาวสูตร 0.1 wt% Nano-pigment



รูปที่ 4.43 ผลการวัดความร้อนของผงตัวอย่างผสมสีทาอาคารสีขาวสูตร 0.3 wt% Nano-pigment



รูปที่ 4.44 ผลการวัดความร้อนของผงตัวอย่างผสมสีทาอาคารสีขาวสูตร 0.5 wt% Nano-pigment

จากการทดสอบการสะท้อนความร้อนของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดน ไตรออกไซด์พบว่าที่ปริมาณ 0.5 wt% ของเม็ดสีมีความสามารถในการสะท้อนความร้อนได้ดีที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณของเม็ดสีเท่ากัน โดยผสมในสีที่มีเจดสีต่างกัน พบว่าสีที่สามารถสะท้อนความร้อนได้ดีที่สุดคือสีขาวเพราะสีขาวมีความสามารถในการดูดกลืนแสงได้ดีกว่าสีเข้ม กล่าวคือ สีขาวสามารถสะท้อนความร้อนได้ดีกว่าสีเข้มและเมื่อผสมด้วยเม็ดสีเทอร์โมโครมิกทำให้สีทาบานมีความสามารถในการสะท้อนความร้อนเพิ่มมากขึ้นช่วยให้ความร้อนที่จะผ่านผนังเข้าสู่อาคารบ้านเรือนลดน้อยลง ช่วยทำให้ประหยัดค่าไฟฟ้าสำหรับเครื่องปรับอากาศ เม็ดสีเทอร์โมโครมิก จึงมีความน่าสนใจในการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมสี เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่สีทาอาคารเพิ่มมากขึ้น

4.3.4 การทดสอบการสะท้อนความร้อนของผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดนผสมซิงค์ออกไซด์ในสีสำหรับทาอาคาร

จากการทดสอบการสะท้อนความร้อนในหัวข้อที่ 4.3.3 พบว่าปริมาณ 0.5 wt% ของเม็ดสีวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดน ไตรออกไซด์สามารถสะท้อนความร้อนได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับปริมาณ 0.1 และ 0.3 wt% โดยความหนาที่ทดสอบคือ 0.5, 1.0 และ 1.5 เซนติเมตร ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ศึกษาการผสมซิงค์ออกไซด์ลงในสีทาอาคารพร้อมกับเม็ดสีวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดนร่วมกับปริมาณที่ดีที่สุดของการทดสอบการสะท้อนความร้อนในหัวข้อ 4.3.3 นั่นคือ 0.5 wt% Nano-pigment เพื่อทดสอบความสามารถในการสะท้อนความร้อนเพิ่มเติมโดยปริมาณที่ผสมลงไป ในสีทาอาคารดังแสดงในตารางที่ 4.14

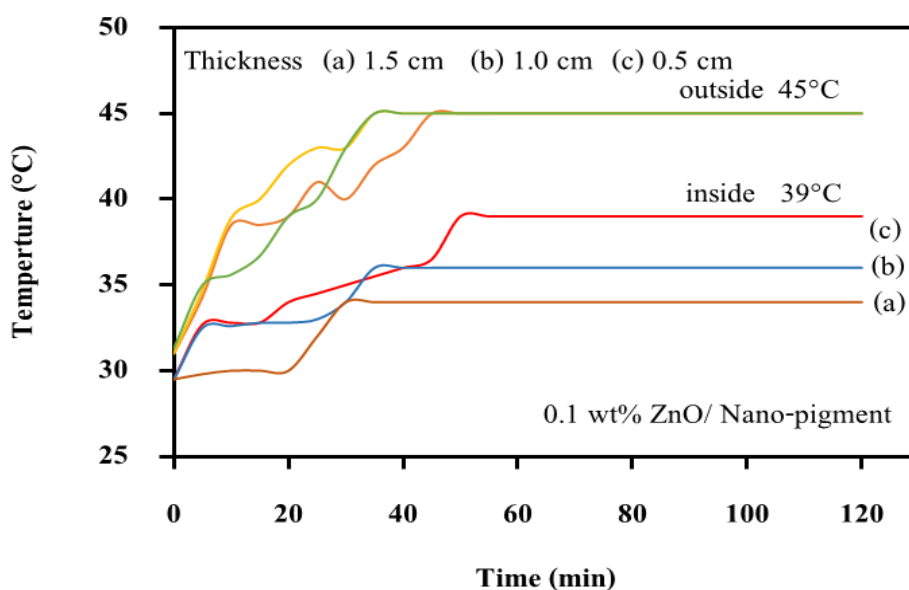
ตารางที่ 4.14 อัตราส่วนผสมระหว่างสีทาอาคารกับผงวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดน ไตรออกไซด์ผสมซิงค์ออกไซด์

ตัวอย่าง	สี (%)	น้ำ (%)	Nano-pigment (wt%)	ZnO (wt%)
Pure VO ₂	84.0	16.0	0	0
0.1 wt% ZnO/Nano-pigment	79.3	15.9	4.0	0.8
0.3 wt% ZnO/Nano-pigment	78.0	15.6	3.9	2.4
0.5 wt% ZnO/Nano-pigment	77.1	15.3	3.8	3.8

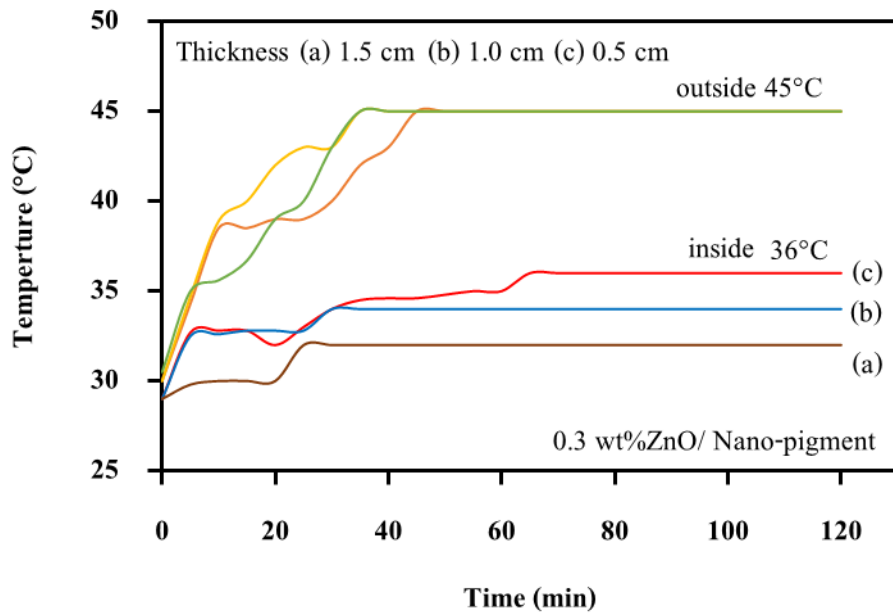
สำหรับการทดสอบการสะท้อนความร้อน ผู้วิจัยใช้ชุดทดสอบชุดเดียวกับการทดสอบการสะท้อนความร้อนของเม็ดสีวานเนเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดน โดยเลือกสูตรที่ดีที่สุดไปทำการทดสอบและใช้สีขาวในการทดสอบโดยผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ผลการวัดความร้อนของเม็ดสีวานเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสทนผสมซิงค์ออกไซด์ในสีทาอาคาร (สีขาว)

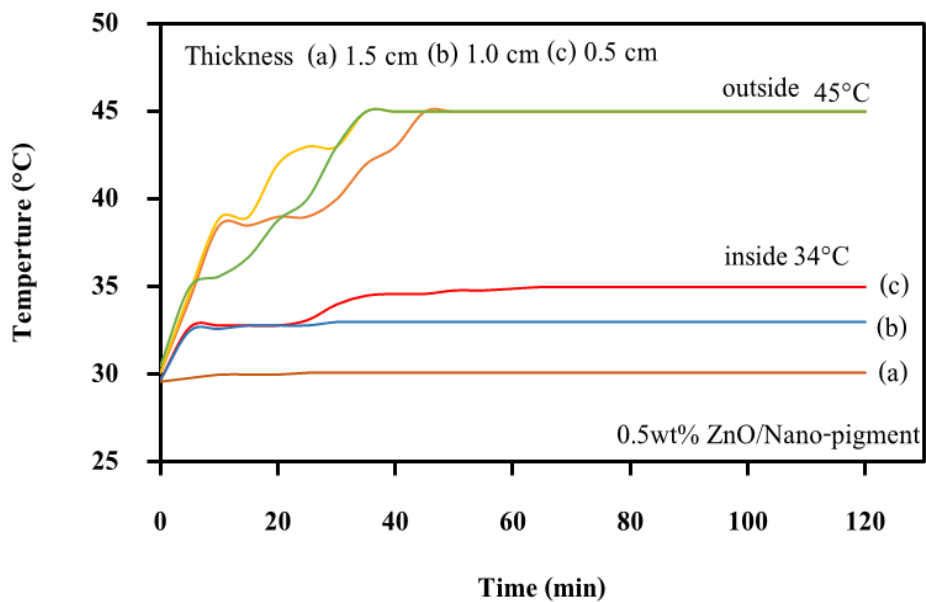
ตัวอย่างสีขาว	อุณหภูมิที่ 120 นาที		อุณหภูมิภายในกล่องทดสอบ(°C)
	ผิวนอก (°C)	ผิวใน (°C)	
0.1 wt% ZnO/Nano-pigment			
Thickness 0.5 cm	45	39	37
Thickness 1.0 cm	45	36	35
Thickness 1.5 cm	45	34	35
0.3 wt% ZnO/Nano-pigment			
Thickness 0.5 cm	45	36	35
Thickness 1.0 cm	45	34	34
Thickness 1.5 cm	45	32	33
0.5 wt% ZnO/Nano-pigment			
Thickness 0.5 cm	45	34	32
Thickness 1.0 cm	45	33.5	31
Thickness 1.5 cm	45	32	31



รูปที่ 4.45 ผลการวัดความร้อนของเม็ดสีวานเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสทนไตรออกไซด์ผสมซิงค์ออกไซด์ในสีทาอาคารสีขาวสูตร 0.1 wt% ZnO/Nano-pigment



รูปที่ 4.46 ผลการวัดความร้อนของเม็ดสีวานเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสทนัไตรออกไซด์ผสมซิงค์ออกไซด์ในสีทาอาคารสีขาวสูตร 0.3 wt% ZnO/Nano-pigment



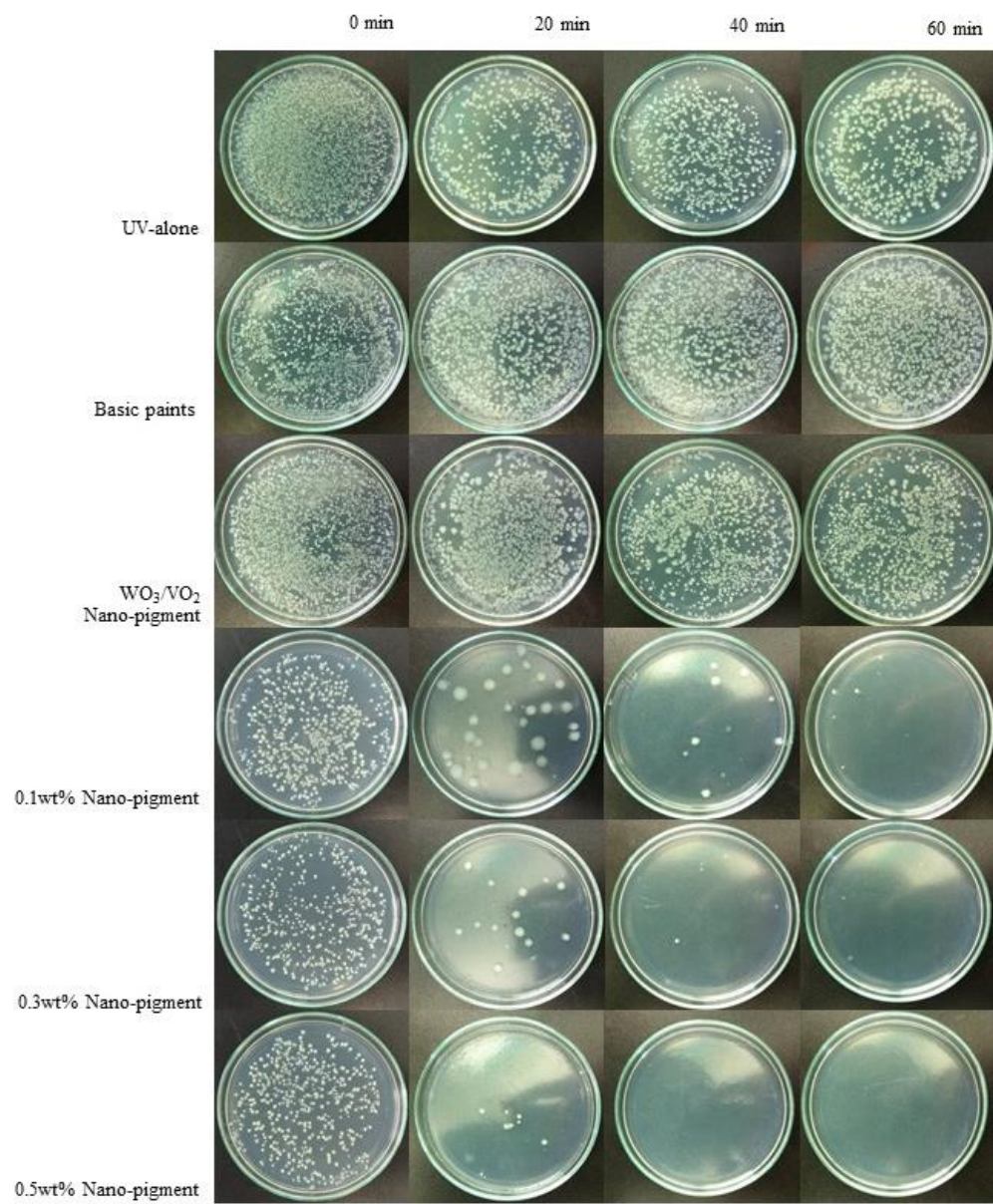
รูปที่ 4.47 ผลการวัดความร้อนของเม็ดสีวานเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสทนัไตรออกไซด์ผสมซิงค์ออกไซด์ในสีทาอาคารสีขาวสูตร 0.5 wt% ZnO/Nano-pigment

จากผลทดสอบการสะท้อนความร้อนของเม็ดสีวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดน ไตรออกไซด์ผสมซิงค์ออกไซด์ พบว่าความสามารถในการสะท้อนความร้อนของเม็ดสีที่ผสมลงในสีทาอาคารมีความใกล้เคียงกับเม็ดสีวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดน ไตรออกไซด์กล่าวคือสามารถสะท้อนความร้อนได้ดีเท่ากันที่ 0.5 wt% ZnO ผสมร่วมกับเม็ดสีวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดน ไตรออกไซด์ ความร้อนที่ผิวด้านในแผ่นทดสอบต่ำกว่าผิวด้านนอกประมาณ 13 องศาเซลเซียส ซึ่งมีความใกล้เคียงกันกับเม็ดสีวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดน ไตรออกไซด์ จึงเป็นสิ่งที่มีความน่าสนใจในการประยุกต์ใช้ซิงค์ออกไซด์ร่วมกับเม็ดสีเทอร์โมโครมิกในการสะท้อนความร้อนและความสามารถในการต้านการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียของเม็ดสี

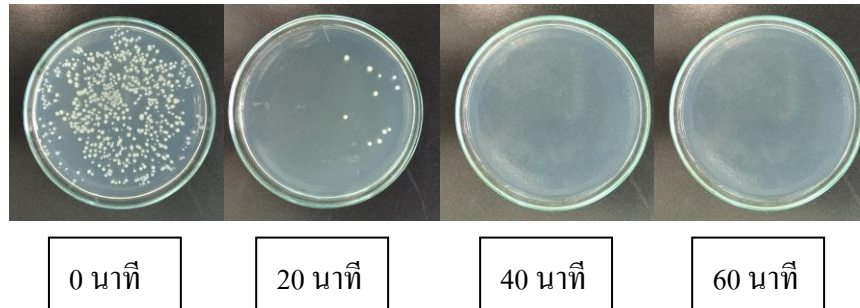
4.3.5 ผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของผงวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดน ไตรออกไซด์ผสม

ซิงค์ออกไซด์

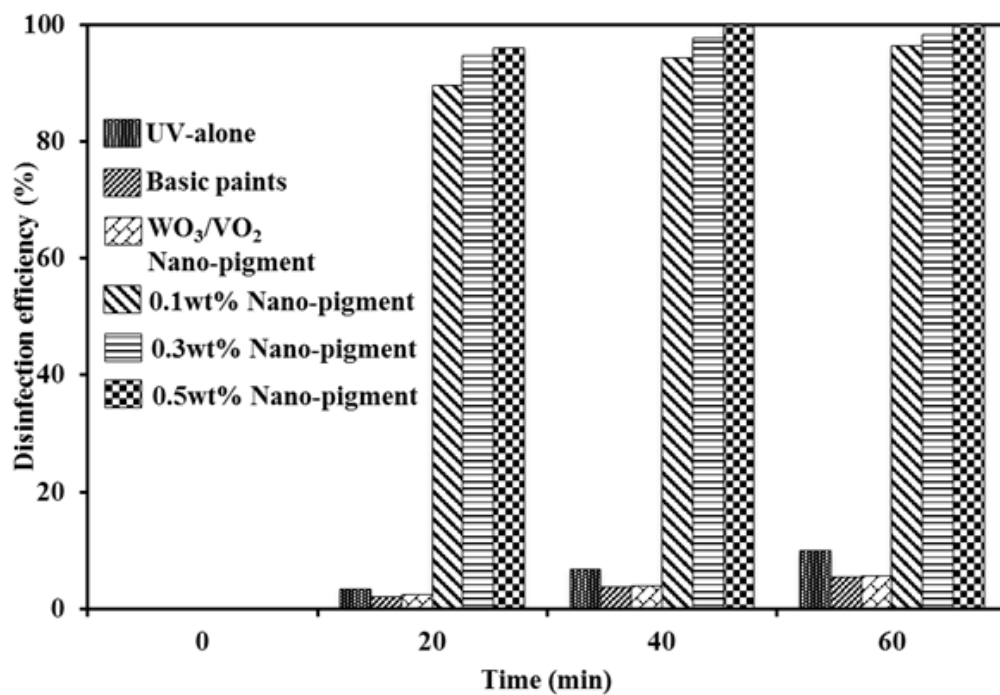
จากผลการวิเคราะห์สมบัติเทอร์โมโครมิกของสาร พบว่าเมื่อเจือซิงค์ออกไซด์ลงไปการสังเคราะห์วานาเดียมไดออกไซด์ มีผลทำให้อุณหภูมิแตรนซิชั่นของวานาเดียมไดออกไซด์ลดลงแต่ เนื่องจากอุณหภูมิที่สังเคราะห์ได้นั้นสูงกว่า การเจือด้วยทั้งสเดน ไตรออกไซด์เพียงชนิดเดียว จึงไม่เหมาะสมสำหรับงานทางด้านการสะท้อนความร้อน งานวิจัยนี้ จึงได้ทำการศึกษาสมบัติอื่น ๆ ของซิงค์ออกไซด์เพื่อนำมาใช้ร่วมกับเม็ดสีเทอร์โมโครมิกที่สังเคราะห์ได้ พบว่าซิงค์ออกไซด์มีสมบัติเด่นในด้านการฆ่าเชื้อโรค จึงนำซิงค์ออกไซด์ มาประยุกต์ใช้ร่วมกับสีทาบ้านผสมเม็ดสีเทอร์โมโครมิก จากการทดลอง ผลที่ดีที่สุดทางด้านเทอร์โมโครมิกของวานาเดียมไดออกไซด์เจือทั้งสเดน อยู่ที่ 0.025 at% จึงได้เลือกนำเอาสูตรสังเคราะห์สูตรนี้ (0.025at% WO_3 -doped VO_2) มาผสมร่วมกับซิงค์ออกไซด์ ด้วยอัตราส่วนโดยมวลน้ำของสาร ที่ 0.1:0.1, 0.3:0.3 และ 0.5:0.5 wt% โดยการทดสอบการฆ่าเชื้อโรคพบว่า ที่ 0.5:0.5 wt% (0.5 wt% nano-pigment) ทำการทดลองด้วยการเคลือบบนกระจกสไลด์และทดสอบภายใต้แสงยูวี พบว่าที่ 40 นาที 0.5wt% nano-pigment สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียชนิด *E.coli* ได้ 99.99 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับเม็ดสีเทอร์โมโครมิกที่ไม่มีการผสมกับซิงค์ออกไซด์และตัวควบคุมอื่นซึ่งไม่สามารถฆ่าเชื้อโรคได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.48 และเมื่อนำเม็ดสีวานาเดียมไดออกไซด์ที่เจือร่วมกับซิงค์ออกไซด์มาทดสอบสมบัติการฆ่าเชื้อโรค โดยเลือกใช้สูตร 0.5 wt% ZnO-Nano-pigment พบว่าสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้ถึง 99.99 เปอร์เซ็นต์ภายใต้แสงยูวี 40 นาที เช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.49 โดยประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของเม็ดสีเทอร์โมโครมิกคังรูปที่ 4.50



รูปที่ 4.48 ผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของเมดสีเทอร์โมโครมิกผสมซิงค์ออกไซด์สูตรต่าง ๆ ภายใต้อุณหภูมิแสงยูวี 60 นาที



รูปที่ 4.49 ผลการฆ่าเชื้อ *E.coli* ของเม็ดสีเทอร์โมโครมิกผสมซิงค์ออกไซด์
สูตร 0.5 wt% ZnO-Nano-pigment ภายใต้เวลารับแสงยูวี 60 นาที



รูปที่ 4.50 ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ *E.coli* สูตรต่าง ๆ ภายใต้การรับแสงยูวี 60 นาที

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์เม็ดสีเทอร์โมโครมิกของวานิเลียไดออกไซด์เจือทั้งสเดน ไตรออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ ด้วยวิธีทางเคมี ภายหลังจากเผาที่ 700 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมงภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน พบว่าปริมาณของทั้งสเดน ไตรออกไซด์มีผลต่อการเปลี่ยนโครงสร้างของสารซึ่งส่งผลต่อสมบัติเทอร์โมโครมิกของสารดังนี้

ปริมาณของทั้งสเดน ไตรออกไซด์มีผลต่อการลดอุณหภูมิแทรนซิชันของวานิเลียไดออกไซด์จาก 68 องศาเซลเซียส ลงมาที่ 40 องศาเซลเซียส ด้วยการเจือทั้งสเดนที่ปริมาณ 0.025 at% ขนาดอนุภาคของสารที่สังเคราะห์ได้มีขนาด 40-100 นาโนเมตร โครงสร้างของสารที่พบมี 2 ชนิดคือโครงสร้างโมโนคลินิกและเตตระโกนอล จากการวิจัยพบว่าเมื่อปริมาณของทั้งสเดน ไตรออกไซด์เพิ่มขึ้น โครงสร้างเตตระโกนอลจะเกิดขึ้นตามลำดับทำให้สมบัติเทอร์โมโครมิกของสารต่ำลงและที่ปริมาณ 0.25 at% ทั้งสเดน ไตรออกไซด์จะเกิดโครงสร้างเตตระโกนอลซึ่งไม่แสดงสมบัติเทอร์โมโครมิก

อิทธิพลของซิงค์ออกไซด์ที่เจือร่วมกับทั้งสเดน ไตรออกไซด์ในการสังเคราะห์เม็ดสีเทอร์โมโครมิกระดับนาโนของวานิเลียไดออกไซด์ พบว่าอุณหภูมิแทรนซิชันของวานิเลียไดออกไซด์ลดต่ำลงที่ 0.5 wt% ของซิงค์ออกไซด์ สามารถลดอุณหภูมิลงมาที่ 52 องศาเซลเซียส แต่เนื่องจากอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิแสงอาทิตย์ทำให้การประยุกต์ใช้เม็ดสีเทอร์โมโครมิกในงานด้านการสะท้อนความร้อน จึงเลือกใช้การเจือทั้งสเดน ไตรออกไซด์เพียงชนิดเดียว

การประยุกต์ใช้เป็นเม็ดสีเทอร์โมโครมิกผสมในสีทาอาคารพบว่า ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 0.5 % ของเม็ดสีคิดเป็น 3.8% ของปริมาณสีสามารถช่วยสะท้อนความร้อนที่ได้รับได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเปรียบเทียบกับสีทาอาคารทั่วไปและแผ่นทดสอบที่ไม่มีสี ซึ่งเป็นข้อดีของการประยุกต์ใช้สารที่มีสมบัติเทอร์โมโครมิกมาเป็นส่วนผสมในสีทาอาคาร เพื่อช่วยลดและสะท้อนความร้อนที่จะผ่านผนังเข้าสู่ภายในอาคารได้

เมื่อศึกษาการใช้ซิงค์ออกไซด์ร่วมกับเม็ดสีเทอร์โมโครมิกผสมในสีทาอาคาร สำหรับการประยุกต์ใช้ในด้านการศึกษาการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียชนิด *E.coli* พบว่า ที่ 0.5wt% ของเม็ดสีทดสอบโดยการเคลือบบนกระจกสไลด์สามารถฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้ถึง 99.99% ภายในเวลา 40 นาทีภายใต้แสงยูวีและเม็ดสีเทอร์โมโครมิกที่สังเคราะห์ได้มีสมบัติการทำความสะอาดตัวเองร่วมด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาสารเจือตัวอื่นที่สามารถทำให้อุณหภูมิทรานซิชันของสารลดลงและสามารถสังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิต่ำ
2. ศึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถประยุกต์สารที่สังเคราะห์ได้ในงานอุตสาหกรรมอื่นเช่น สีเคลือบรถยนต์
3. ศึกษาเพิ่มเติมเพื่อนำเม็ดสีเทอร์โมโครมิกระดับนาโนที่มีความสามารถในการทำความสะอาดตัวเองและฆ่าเชื้อโรคไปประยุกต์ใช้เคลือบกระจกหน้าต่างและอาคารเพื่อลดอุณหภูมิที่จะผ่านเข้าสู่อาคารและมีสมบัติที่กล่าวมาข้างต้น

บรรณานุกรม

- Beteille, F. and Livage, J. (1998). Optical Switching in VO₂ Thin Films. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 13(1-3), 915-921.
- Cao, C., Gao, Y. and Luo, H. (2008). Pure Single-Crystal Rutile Vanadium Dioxide Powders: Synthesis, Mechanism and Phase-Transformation Property. *The Journal of Physical Chemistry C*, 112(48), 18810-18814
- Chen, L., Huang, C., Xu, G., Miao, L., Shi, J., Zhou, J. and Xiao, X. (2012). Synthesis of thermochromic W-doped VO₂ (M/R) nanopowders by a simple solution-based process. *Journal of Nanomaterials*, 2012, 3
- Cho, J.-H., Byun, Y.-J., Kim, J.-H., Lee, Y.-J., Jeong, Y.-H., Chun, M.-P., Paik, J.-H. and Sung T.H., (2012). Thermochromic characteristics of WO₃-doped vanadium dioxide thin films prepared by sol-gel method. *Ceramics International* 38, Supplement 1, S589-S593.
- Daneshvar, N., M.H. Rasoulifard, A.R. Khataee. and F. Hosseinzadeh., (2007). Removal of C.I. acid orange 7 from aqueous solution by UV irradiation in the presence of ZnO nanopowder, *Journal of Hazardous Materials* 143, no. 1-2 (May 8, 2007): 95-101. doi:10.1016/j.jhazmat.2006.08.072.
- Dhandapani, P., Siddarth, A. S., Kamalasekaran, S., Maruthamuthu, S. and Rajagopal, G. (2014). Bio-approach: Ureolytic bacteria mediated synthesis of ZnO nanocrystals on cotton fabric and evaluation of their antibacterial properties. *Carbohydrate Polymers*, 103, 448-455.
- Guinneton, F., Sauques, L., Valmalette, J.-C., Cros, F. and Gavarrri, J.-R. (2004). Optimized infrared switching properties in thermochromic vanadium dioxide thin films: role of deposition process and microstructure, *Thin Solid Films* 446, 287-295.
- Hosono, E., Shinobu, F. and Toshio, K. (2004). Synthesis, structure and photoelectrochemical performance of micro/nano-textured ZnO/eosin Y electrodes, *Electrochimica Acta* 49, no. 14 (June 15, 2004): 2287-2293.
- Jesse, H. (1968). Thermochromism of inorganic compound, *Chemical Review* 68(6), 649-657.
- JingBing, L., Hao, W., Shu, W. and Hui, Y. (2003). Hydrothermal preparation of BiVO₄ Powders, *Materials Science and Engineering B104*, 36-39.

- Kam, K.C. and Cheetham, A.K. (2006). Thermochromic VO₂ nanorods and other vanadium oxides nanostructures, *Materials Research Bulletin* 41, 1015–1021.
- Karaoglan B.G., Hoque, M. N. F., Holtz, M., Fan, Z. and Bernussi, A. A. (2014). Continuous tuning of W-doped VO₂ optical properties for terahertz analog applications. *Applied Physics Letters*, 105(20), 201902.
- Keis, K., Magnusson, E., Lindström, H., Lindquist, S.-E. and Hagfeldt, A. (2002). A 5% efficient photoelectrochemical solar cell based on nanostructured ZnO electrodes, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 73, 51–58.
- Kuroda, M. and Araki, M. (1992). Thermochromic composite oxide and for detecting temperature therewith, United State Patent US005165797A Morin FJ. 1959. *Physical Review Letters* 3, 34–6.
- Li, L., Xin, B.F. (2010). Photogenerated carrier transfer mechanism and photocatalysis properties of TiO₂ sensitized by Zn(II) phthalocyanine, *Journal of Central South University of Technology*.17, 218-222.
- Ma, Z.Q., Xu, F., Tang, X., Zhou, C.Y., He, B. and Li, F.,(2008). Hybrid photovoltaic device based on Na-doped ZnO nanowires and zinc phthalocyanines (ZnPc), *Solar Energy Materials & Solar Cells* 9, 343-348.
- Manivannan, V. and Goodenough, J.B. (1998). Low-temperature synthesis of rutile VO₂ in aqueous solution using NH₂OH.HCl as reducing agent. *Materials Research Bulletin* 33, 1353–1357.
- Mlyuka, N.R., Niklasson, G.A. and Granqvist, C.G. (2009). Thermochromic multilayer films of VO₂ and TiO₂ with enhanced transmittance, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 93, 1685–1687.
- Nag, J. (2011). The solid-solid phase transition in vanadium dioxide thin films. synthesis, physics and application. Vanderbilt University.
- Nirmala, M. Manjula, Nair,G, Rekha.K, Anukaliani.A, Samdarshi and Ranjith.S.K. and Nair,G. (2010). Photocatalytic activity of ZnO Nanopowders synthesized by DC thermal plasma, *African Journal of Basic & Applied Sciences* 2 (5-6), 161-166.
- Quevedo-Lopez, M.A., Reidy, R.F., and Orozco-Teran, R.A. (2000). Enhancement of the photochromic and thermochromic properties of molybdenum oxide thin films by a cadmium sulfide underlayer, *Journal of materials science: materials in electronics* 11, 251-155.
- Ritzer, B., Villegas, M.A. and Navarro, J.M.F. (1997). Influence of temperature and time on the stability of silver in silica sol-gel glasses, *Journal of Sol-Gel Science and Technology* 8:917-921.

- Saitzek, S., Guinneton, F. Sauques, L., Aguir, K. and Gavarri, J.-R. (2007). Thermo-chromic $\text{CeO}_2\text{-VO}_2$ bilayers: Role of ceria coating in optical switching properties, *Optical Materials* 30, 407–415.
- Shi, J., Zhou, S., You, B. and Wu, L. (2007). Preparation and thermo-chromic property of tungsten-doped vanadium dioxide particles, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 91, 1856–1862.
- Tan, X., Yao, T., Long, R., Sun, Z., Feng, Y., Cheng, H. and Wei, S. (2012). Unraveling Metal-insulator Transition Mechanism of VO_2 Triggered by Tungsten Doping. *Scientific Reports*, 2, 466
- Thomas, N. (1991). Energy conserving coatings-pigment research, Naval Civil Engineering Laboratory: Port Hueneme, CA 93043-5003
- Whittaker, L., Wu, T.-L., Patridge, C. J., Sambandamurthy, G. and Banerjee, S. (2011). Distinctive finite size effects on the phase diagram and metal-insulator transitions of tungsten-doped vanadium(iv) oxide. *Journal of Materials Chemistry*, 21(15), 5580-5592.
- Wu, Y., Fan, L., Huang, W., Chen, S., Chen, S., Chen, F. and Wu, Z. (2014). Depressed transition temperature of $\text{W}_x\text{V}_{1-x}\text{O}_2$ mechanistic insights from the X-ray absorption fine structure (XAFS) spectroscopy. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 16(33), 17705-17714.
- Xu, C.I., Ma, L., Liu, X., Qiu, W.y. and Su, Z.-x. (2004). A novel reduction–hydrolysis method of preparing VO_2 nanopowders. *Materials Research Bulletin*, 39(7–8), 881-886
- Ye, J., Zhou, L., Liu, F., Qi, J., Gong, W., Lin, Y. and Ning, G. (2010). Preparation, characterization and properties of thermo-chromic tungsten-doped vanadium dioxide by thermal reduction and annealing. *Journal of Alloys and Compounds*, 504(2), 503-507
- Zhao L, Miao L, Tanemura S, Zhou J, Chen L, Xiao X. and Xu G.(2013). A low cost preparation of VO_2 thin films with improved thermo-chromic properties from a solution-based process. *Thin Solid Films* (543), 157–161.
- Zhang, Y.F., Fan, M.J., Zhou, M., Huang, C., Chen, C.G., Cao, Y.L., Xie, G.Y., Li, H.B. and Liu X.G. (2012). Controlled synthesis and electrochemical properties of vanadium oxide with different nanostructures. *Bulletin of Materials Science* (35), 369-376.
- <http://www.vessel-chemical.com/Default.aspx?pageid=4> (สืบค้นเมื่อ 25/6/56).
- <http://www.engr.colostate.edu/ECE505/SP09/CdSquantumstructuresReview.pdf> (สืบค้นเมื่อ 25/6/56).
- <http://www.dstuns.iitm.ac.in/teaching-and-presentations/teaching/Nano-The-essentials/CHP9.pdf> (สืบค้นเมื่อ 26/6/56).

- http://en.wikipedia.org/wiki/Core%E2%80%93shell_semiconductor_nanocrystal
(สืบค้นเมื่อ 26/6/56).
- http://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_CB9853531.htm
(สืบค้นเมื่อ 27/7/56).
- <http://www.nanomaterials.co.th/index2.asp?CType=3> (สืบค้นเมื่อ 27/7/56)
- <http://www.thaiall.com/globalwarming/> (สืบค้นเมื่อ 14/7/56)
- <http://www.beger.co.th/show.php?id=81> (สืบค้นเมื่อ 14/7/56)
- <http://www.rung-ruengair.com/new/InformationAir.html> (สืบค้นเมื่อ 14/7/56)
- http://www.mne.eng.psu.ac.th/staff/lek_files/ceramic/u2-5.htm#pre (สืบค้นเมื่อ 25/8/56)
- <http://www.greenio.com/th/product.php?productId=16> (สืบค้นเมื่อ 26/8/56)
- http://www.dispersions-pigments.basf.com/portal/basf/ien/dt.jsp?setCursor=1_561069
(สืบค้นเมื่อ 27/8/2556).
- <http://www.tpia.org/faq/answer.asp?no=7> (สืบค้นเมื่อ 27/8/56).
- http://www.tungsten-powder.com/thai/ammonium_paratungstate.html (สืบค้นเมื่อ 27/8/56).
- <http://service.nso.go.th/nso/nsopublish/citizen/pollglobal.jsp> (สืบค้นเมื่อ 20/9/56).
- <http://thaipublica.org/2013/02/thailand-energy-joysticks/> (สืบค้นเมื่อ 20/9/56).
- <http://www2.dede.go.th/bhrd/old/dataenergy/data2.html> (สืบค้นเมื่อ 23/9/56)
- <http://xn--o3cec6dxbb7n.net> (สืบค้นเมื่อ 23/9/56).
- <http://www.kmutt.ac.th/hynae/> (สืบค้นเมื่อ 23/9/56)
- <http://www.globalspec.com/reference/51422/203279/3-2-inorganic-pigments>
(สืบค้นเมื่อ 23/9/56).
- <http://www.material.chula.ac.th/RADIO45/October/radio10-3.htm> (สืบค้นเมื่อ 5/10/2556).
- <http://www.air.in.th/TiO2.htm> (สืบค้นเมื่อ 5/10/2556).
- <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/oldnews/0/286/3/science/physics/index1.htm>
(สืบค้นเมื่อ 1/11/2558).
- http://www.myfirstbrain.com/student_view.aspx?ID=29923 (สืบค้นเมื่อ 1/11/2558).
- http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?pageid=6&bookID=1043&read=true&count=true
(สืบค้นเมื่อ 1/11/2558).
- <http://www.lesa.biz/earth/atmosphere/heat-transfer> (สืบค้นเมื่อ 9/11/2558).
- http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/102/1/nuclear1/nuclear_9.htm (สืบค้นเมื่อ 22/22/2558).

<http://www. http://physics.science.cmu.ac.th/courses/210351> (สืบค้นเมื่อ 22/11/2558).

<http://biology.ipst.ac.th/wp-content/uploads/sites/16/2015/light%20Kae/k1.jpg> (สืบค้นเมื่อ 28/11/2558).

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. จำนวนเชื้อเฉลี่ยของ *E.coli* ภายหลังจากได้รับแสงยูวี จำนวนเชื้อเริ่มต้น (N_0) เท่ากับ จำนวนเชื้อเริ่มต้น 10^5 โคโลนีต่อมิลลิเมตร และจำนวนเชื้อของ *E.coli* ที่รอดชีวิตหลังจากได้รับแสงยูวี (N)

ตาราง ก. แสดงอัตราการรอดชีวิตของเชื้อ *E.coli* ของเม็ดสีเทอร์โมโครมิกสูตรต่างๆ ภายใต้อายุแสงยูวี

ตัวอย่างทดสอบ	(N/N ₀)			
	0 นาที	20 นาที	40 นาที	60 นาที
UV-alone	1	0.966667	0.933333	0.9
Glass slide	1	0.98	0.963333	0.946667
Control	1	0.976667	0.96	0.943333
1ZnO/0.025WO ₃ /VO ₂	1	0.103333	0.056667	0.036667
3ZnO/0.025WO ₃ /VO ₂	1	0.053333	0.023333	0.016667
5ZnO/0.025WO ₃ /VO ₂	1	0.04	0	0

ภาคผนวก ข อุณหภูมิการทดสอบความร้อนของเม็ดสีเทอร์โมโครมิกโดยเฉลี่ยจากการเก็บข้อมูล 10 ครั้ง ต่อตัวอย่าง

ตาราง ข.1 อุณหภูมิการทดสอบความร้อนของเม็ดสีเทอร์โมโครมิกสูตร 0.1 wt% nano-pigment (สีเทา)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)					
	แผ่นทดสอบ 0.5 cm		แผ่นทดสอบ 1.0 cm		แผ่นทดสอบ 1.5 cm	
	ผิวใน	ผิวนอก	ผิวใน	ผิวนอก	ผิวใน	ผิวนอก
0	30	31	30	31	30	31
5	31	32	31	33	30.5	33
10	32	35	32	35	31	35
15	33	36	33	36	31	36
20	37	38	34	38	32	38
25	40	40	35	40	33	40
30	41	43	36	41	33	42
35	41	45	36	45	35	45
40	41	45	37	45	36	45
45	41	45	37	45	36	45
50	41	45	37	45	37	45
55	41	45	39	45	37	45
60	41	45	39	45	37	45
65	41	45	39	45	37	45
70	41	45	39	45	37	45
75	41	45	39	45	37	45
80	41	45	39	45	37	45
85	41	45	39	45	37	45
90	41	45	39	45	37	45
95	41	45	39	45	37	45
100	41	45	39	45	37	45
105	41	45	39	45	37	45
110	41	45	39	45	37	45
115	41	45	39	45	37	45
120	41	45	39	45	37	45

ตาราง ข.2 อุณหภูมิการทดสอบความร้อนของเม็ดสีเทอร์โมโครมิกสูตร 0.3 wt% nano-pigment (สีเทา)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)					
	แผ่นทดสอบ 0.5 cm		แผ่นทดสอบ 1.0 cm		แผ่นทดสอบ 1.5 cm	
	ผิวใน	ผิวนอก	ผิวใน	ผิวนอก	ผิวใน	ผิวนอก
0	29.5	30	29.5	30	30	30.5
5	31	32	31	33	30.5	33
10	32	35	32	35	31	35
15	33	36	33	36	31	36
20	36	38	34	38	32	38
25	37	40	35	40	33	40
30	40	43	36	41	33	42
35	40	45	36	45	35	45
40	40	45	37	45	36	45
45	40	45	37	45	36	45
50	40	45	37	45	37	45
55	40	45	38	45	37	45
60	40	45	38	45	37	45
65	40	45	38	45	37	45
70	40	45	38	45	37	45
75	40	45	38	45	37	45
80	40	45	38	45	37	45
85	40	45	38	45	37	45
90	40	45	38	45	37	45
95	40	45	38	45	37	45
100	40	45	38	45	37	45
105	40	45	38	45	37	45
110	40	45	38	45	37	45
115	40	45	38	45	37	45
120	40	45	38	45	37	45

ตาราง ข.3 อุณหภูมิการทดสอบความร้อนของเม็ดสีเทอร์โมโครมิกสูตร 0.5 wt% nano-pigment (สีเทา)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)					
	แผ่นทดสอบ 0.5 cm		แผ่นทดสอบ 1.0 cm		แผ่นทดสอบ 1.5 cm	
	ผิวใน	ผิวนอก	ผิวใน	ผิวนอก	ผิวใน	ผิวนอก
0	29.5	30	29.5	30	30	30.5
5	31	32	31	33	30.9	33
10	32	35	32	35	31	35
15	33	36	33	36	31	36
20	36	37	34	37	32	38
25	37	40	35	40	32.5	40
30	38	43	36	41	33	42
35	39	45	36	45	35	45
40	39	45	37	45	36	45
45	39	45	37	45	36	45
50	39	45	37	45	36	45
55	39	45	37	45	36	45
60	39	45	37	45	36	45
65	39	45	37	45	36	45
70	39	45	37	45	36	45
75	39	45	37	45	36	45
80	39	45	37	45	36	45
85	39	45	37	45	36	45
90	39	45	37	45	36	45
95	39	45	37	45	36	45
100	39	45	37	45	36	45
105	39	45	37	45	36	45
110	39	45	37	45	36	45
115	39	45	37	45	36	45
120	39	45	37	45	36	45

ตาราง ข.4 อุณหภูมิการทดสอบความร้อนของเม็ดสีเทอร์โมโครมิกสูตร 0.1 wt% nano-pigment (สีเหลือง)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)					
	แผ่นทดสอบ 0.5 cm		แผ่นทดสอบ 1.0 cm		แผ่นทดสอบ 1.5 cm	
	ผิวใน	ผิวนอก	ผิวใน	ผิวนอก	ผิวใน	ผิวนอก
0	30.2	31	30.5	31	30.8	31
5	31	32	31	33	30.9	33
10	32	35	32	35	31	35
15	33.5	36	33	36	31.5	36
20	36	37	34	37	31.9	38
25	37	40	35	40	32.	40
30	39	43	37	41	33	42
35	40	45	38	45	36	45
40	40	45	38	45	36	45
45	40	45	38	45	36	45
50	40	45	38	45	36	45
55	40	45	38	45	36	45
60	40	45	38	45	36	45
65	40	45	38	45	36	45
70	40	45	38	45	36	45
75	40	45	38	45	36	45
80	40	45	38	45	36	45
85	40	45	38	45	36	45
90	40	45	38	45	36	45
95	40	45	38	45	36	45
100	40	45	38	45	36	45
105	40	45	38	45	36	45
110	40	45	38	45	36	45
115	40	45	38	45	36	45
120	40	45	38	45	36	45

ตาราง ข.5 อุณหภูมิการทดสอบความร้อนของเม็ดสีเทอร์โมโครมิกสูตร 0.3 wt% nano-pigment (สีเหลือง)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)					
	แผ่นทดสอบ 0.5 cm		แผ่นทดสอบ 1.0 cm		แผ่นทดสอบ 1.5 cm	
	ผิวใน	ผิวนอก	ผิวใน	ผิวนอก	ผิวใน	ผิวนอก
0	30.5	31	30.5	31	30.5	31
5	31	32	31	33	30.9	33
10	32	35	32	35	31	35
15	33.5	36	33	36	31.5	36
20	36	37	34	37	31.9	38
25	37	40	35	40	32	40
30	39	43	37	41	33	42
35	39	45	37	45	36	45
40	39	45	37	45	36	45
45	39	45	37	45	36	45
50	39	45	37	45	36	45
55	39	45	37	45	36	45
60	39	45	37	45	36	45
65	39	45	37	45	36	45
70	39	45	37	45	36	45
75	39	45	37	45	36	45
80	39	45	37	45	36	45
85	39	45	37	45	36	45
90	39	45	37	45	36	45
95	39	45	37	45	36	45
100	39	45	37	45	36	45
105	39	45	37	45	36	45
110	39	45	37	45	36	45
115	39	45	37	45	36	45
120	39	45	37	45	36	45

ตาราง ข.6 อุณหภูมิการทดสอบความร้อนของเม็ดสีเทอร์โมโครมิกสูตร 0.5 wt% nano-pigment (สีเหลือง)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)					
	แผ่นทดสอบ 0.5 cm		แผ่นทดสอบ 1.0 cm		แผ่นทดสอบ 1.5 cm	
	ผิวใน	ผิวนอก	ผิวใน	ผิวนอก	ผิวใน	ผิวนอก
0	30	31	30	31	30	31
5	30.5	32	31	33	30	33
10	32	35	32	35	31	35
15	33.5	36	33	36	31.5	36
20	35	37	34	37	31.9	38
25	36.5	40	35	40	32	40
30	38.5	43	37	41	33	42
35	39	45	37	45	36	45
40	39	45	37	45	36	45
45	39	45	37	45	36	45
50	39	45	37	45	36	45
55	39	45	37	45	36	45
60	39	45	37	45	36	45
65	39	45	37	45	36	45
70	39	45	37	45	36	45
75	39	45	37	45	36	45
80	39	45	37	45	36	45
85	39	45	37	45	36	45
90	39	45	37	45	36	45
95	39	45	37	45	36	45
100	39	45	37	45	36	45
105	39	45	37	45	36	45
110	39	45	37	45	36	45
115	39	45	37	45	36	45
120	39	45	37	45	36	45

ตาราง ข.7 แสดงอุณหภูมิการทดสอบความร้อนของเม็ดสีเทอร์โมโครมิกสูตร 0.1 wt% nano-pigment (สีเขียว)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)					
	แผ่นทดสอบ 0.5 cm		แผ่นทดสอบ 1.0 cm		แผ่นทดสอบ 1.5 cm	
	ผิวใน	ผิวนอก	ผิวใน	ผิวนอก	ผิวใน	ผิวนอก
0	29.5	31	29.5	31	29.5	31.3
5	32.7	34.5	32.5	34.7	29.8	35
10	32.8	38.5	32.6	38.9	30	35.6
15	32.8	38.5	32.8	40	30	36.7
20	34	39	32.8	42	30	39
25	34.5	40	33	43	32	40
30	35	41	34	43	34	43
35	35.5	42	36	45	34	45
40	36	43	36	45	34	45
45	36.5	45	36	45	34	45
50	39	45	36	45	34	45
55	39	45	36	45	34	45
60	39	45	36	45	34	45
65	39	45	36	45	34	45
70	39	45	36	45	34	45
75	39	45	36	45	34	45
80	39	45	36	45	34	45
85	39	45	36	45	34	45
90	39	45	36	45	34	45
95	39	45	36	45	34	45
100	39	45	36	45	34	45
105	39	45	36	45	34	45
110	39	45	36	45	34	45
115	39	45	36	45	34	45
120	39	45	36	45	34	45

ตาราง ข.8 อุณหภูมิการทดสอบความร้อนของเม็ดสีเทอร์โมโครมิกสูตร 0.3 wt% nano-pigment (สีเทา)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)					
	แผ่นทดสอบ 0.5 cm		แผ่นทดสอบ 1.0 cm		แผ่นทดสอบ 1.5 cm	
	ผิวใน	ผิวนอก	ผิวใน	ผิวนอก	ผิวใน	ผิวนอก
0	29	30.1	29	30	29	30.5
5	32.7	34.3	32.5	34.7	329.8	35
10	32.8	38.5	32.6	38.9	30	35.6
15	32.8	38.5	32.8	40	30	36.7
20	33	39	32.8	42	30	39
25	33	39	32.8	40	32	40
30	34	40	34	43	32	43
35	34.5	42	34	43	32	45
40	34.6	43	34	45	32	45
45	34.6	45	34	45	32	45
50	34.8	45	34	45	32	45
55	35	45	34	45	32	45
60	35	45	34	45	32	45
65	36	45	34	45	32	45
70	36	45	34	45	32	45
75	36	45	34	45	32	45
80	36	45	34	45	32	45
85	36	45	34	45	32	45
90	36	45	34	45	32	45
95	36	45	34	45	32	45
100	36	45	34	45	32	45
105	36	45	34	45	32	45
110	36	45	34	45	32	45
115	36	45	34	45	32	45
120	36	45	34	45	32	45

ตาราง ข.9 อุณหภูมิการทดสอบความร้อนของเม็ดสีเทอร์โมโครมิกสูตร 0.5 wt% nano-pigment (สีขาว)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)					
	แผ่นทดสอบ 0.5 cm		แผ่นทดสอบ 1.0 cm		แผ่นทดสอบ 1.5 cm	
	ผิวใน	ผิวนอก	ผิวใน	ผิวนอก	ผิวใน	ผิวนอก
0	29.7	30.1	29.7	30.1	29.6	30.5
5	32.7	34.3	32.5	34.7	29.8	35
10	32.8	38.5	32.6	38.9	30	35.6
15	32.8	38.5	32.8	39	30	36.7
20	32.8	39	32.8	42	30	38.8
25	33.1	39	33	43	30.1	40
30	34	40	33	43	31	43
35	34.5	42	33	45	31	45
40	34.6	43	33	45	31	45
45	34.6	45	33	45	31	45
50	34.8	45	33	45	31	45
55	34.8	45	33	45	31	45
60	34.9	45	33	45	31	45
65	35	45	33	45	31	45
70	35	45	33	45	31	45
75	35	45	33	45	31	45
80	35	45	33	45	31	45
85	35	45	33	45	31	45
90	35	45	33	45	31	45
95	35	45	33	45	31	45
100	35	45	33	45	31	45
105	35	45	33	45	31	45
110	35	45	33	45	31	45
115	35	45	33	45	31	45
120	35	45	33	45	31	45

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายวิทยา พรหมมินทร์
 รหัสประจำตัวนักศึกษา 5610120071
 วุฒิกการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2555

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

- ทุนอุดหนุนการวิจัยจากสถานวิจัยความเป็นเลิศด้านนาโนเทคโนโลยีเพื่อการพลังงาน มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Vittaya Prommin, Lek Sikong, Kalayanee Kooptarmond. (2015), "Self-cleaning and Antibacterial Properties of Paint Containing ZnO and WO₃ Co-doped VO₂ Thermochromic Nanopigment" The 2015 2nd International Conference on Advanced Engineering Technology (ICAET 2015), Songdo Convensia, Incheon, South Korea, 45.