

การพัฒนาผงสีแดงสะท้อนรังสีอินฟราเรดจากเหล็กออกไซด์
DEVELOPMENT OF INFRARED REFLECTIVE RED PIGMENT
FROM Fe_2O_3



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การพัฒนาผงสีแดงสะท้อนรังสีอินฟราเรดจากเหล็กออกไซด์
DEVELOPMENT OF INFRARED REFLECTIVE RED PIGMENT
FROM Fe₂O₃



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

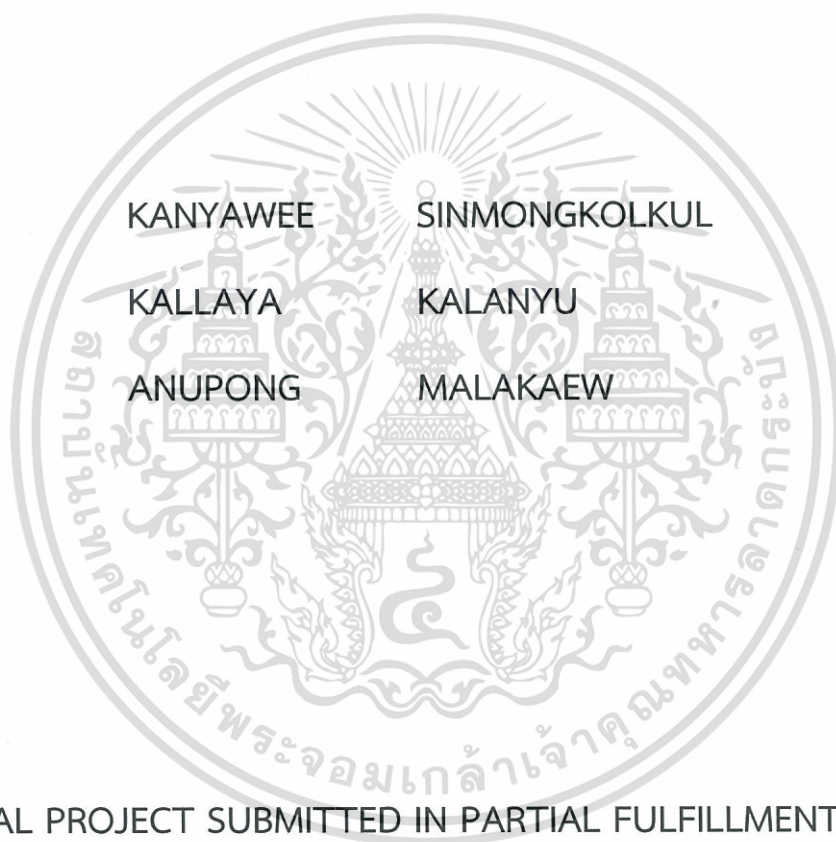
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF INFRARED REFLECTIVE RED PIGMENT

FROM Fe_2O_3



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENT FOR

THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)

DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การพัฒนาผงสีแดงสะท้อนรังสีอินฟราเรดจากเหล็กออกไซด์ Development of Infrared reflective red pigment from Fe ₂ O ₃		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกัญญาวีร์	สินมงคลกุล	รหัสนักศึกษา 57050373
	นางสาวกัลยา	กาลัญญู	รหัสนักศึกษา 57050374
	นายอนุพงษ์	มาลาแก้ว	รหัสนักศึกษา 57050549
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2560		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช		

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2560

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.นราธิป วิทยาการ ประธานกรรมการ	
ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ กรรมการ	
ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การพัฒนาผงสีแดงสะท้อนรังสีอินฟราเรดจากเหล็กออกไซด์			
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกัญญาวีร์	สินมงคลกุล	รหัสนักศึกษา	57050373
	นางสาวกัลยา	กัลัญญา	รหัสนักศึกษา	57050374
	นายอนุพงษ์	มาลาแก้ว	รหัสนักศึกษา	57050549
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต เคมีอุตสาหกรรม			
ภาควิชา	เคมี			
คณะ	วิทยาศาสตร์			
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)			
ปีการศึกษา	2560			
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช			

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการพัฒนาผงสีแดงที่มีคุณสมบัติสะท้อนรังสีอินฟราเรดโดยใช้เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) เป็นองค์ประกอบพื้นฐาน โดยได้ศึกษาผลของการเติมโลหะออกไซด์ชนิดและอัตราส่วนต่าง ๆ การเติมตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยา (mineralizer) โซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการเผาแคลไซน์ ที่มีผลต่อค่าพิกัดสีและค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดใกล้ (NIR) การเตรียมผงสีทำโดยใช้วิธีการบดละเอียดด้วยลูกบด (mechanical ball milling) เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 6 และ 12 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่าสภาวะการเตรียมผงสีแดงที่เหมาะสม คือ การใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละ 25 เซอร์โคเนียมซิลิเกต (ZrSiO_4) ร้อยละ 45 และ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 30 (25Fe/45Zr/30Al) ใช้ NaF เป็นตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยา และเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยให้ผงสีแดงที่มีความเสถียร มีค่าพิกัดสี ความสว่าง (L^*) ที่ 47.57 ค่าสีแดง (a^*) ที่ 30.35 และค่าสีเหลือง (b^*) ที่ 24.12 และค่าสะท้อนรังสี (NIR) ที่ร้อยละ 74 จากการศึกษาโครงสร้างผลึกและธาตุองค์ประกอบพบว่าผงสีแดงที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคของเซอร์โคเนียมซิลิเกตจากเตตระโกนอล (tetragonal) เป็นโมโนคลินิก (monoclinic) และการศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่าผงสีแดงมีขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเผาแคลไซน์เพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ผงสีแดงมีขนาดอนุภาคอยู่ที่ 5.16 ± 0.85 ไมโครเมตร

คำสำคัญ: ผงสีแดง เหล็กออกไซด์ ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง ตัวช่วยหลอม ค่าการสะท้อน พิกัดสี

Title	Development of infrared reflective red pigment from iron oxide		
Student	Kanyawee	Sinmongkolkul	Student ID 57050373
	Kallaya	Kalanyu	Student ID 57050374
	Anupong	Malakeaw	Student ID 57050549
Degree	Bachelor of Science in Industrial Chemistry		
Department	Chemistry		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic	2017		
Advisor	Asst.Prof.Dr. Panpailin Seeharaj		

Abstract

This special project developed infrared reflective red pigment powders from iron oxide (Fe_2O_3). The effects of adding various metal oxides and sodium fluoride (NaF) as mineralizer and calcination temperatures and times on colour coordinates and near infrared (NIR) reflectance were investigated. The red pigment powders were prepared by mechanical ball milling for 30 minutes followed by calcining in air at 900, 1000 and 1100 °C for 3, 6 and 12 hours. The results showed that the optimum condition for preparing stable red pigment powders was using weight percent (%wt) of 25wt% iron oxide (Fe_2O_3) /45wt% zirconium silicate (ZrSiO_4) /30wt% aluminium oxide (Al_2O_3) (25Fe/45Zr/30Al) with NaF and calcination at 1000 °C for 3 h. The red pigment powders had colour coordinates of brightness (L^*) 47.57 red (a^*) 30.35 yellow (b^*) 24.12 and NIR reflectance of 74 %. The XRD and XRF study showed phase transition of ZrSiO_4 from tetragonal to monoclinic phase. SEM images showed that the average particle size increased with increasing the calcination temperature and the particle size was $5.16 \pm 0.85 \mu\text{m}$ at 1000 °C.

Keywords: Red pigment, Iron oxide, Solid state reaction, Mineralizer, Reflection, Colour coordinate

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีจากความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช ผู้ซึ่งคอยให้คำปรึกษา สละเวลาในการชี้แนะแนวทาง แก้ไข ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นและถ่ายทอดองค์ความรู้ที่เพื่อเป็นประโยชน์ในการคิดวิเคราะห์ และการวางแผนการทำงาน ในงานวิจัยนี้ ตลอดจนสนับสนุนในการหาประสบการณ์ความรู้จากแหล่งศึกษาภายนอกเพื่อเป็น ประโยชน์นอกเหนือจากโครงการพิเศษนี้ โดยข้าพเจ้าขอกล่าวขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ในการจัดทำโครงการพิเศษนี้ผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณ รศ.ดร.นราธิป วิทยากร ประธาน- กรรมการ และ ดร.ชาวลย์ ศรีวงษ์ กรรมการโครงการพิเศษ ผู้ซึ่งเสียสละเวลามาเป็นคณะกรรมการใน การสอบโครงการพิเศษนี้ และเป็นอาจารย์ผู้ซึ่งมอบความรู้ในด้านต่าง ๆ ให้แก่พวกข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ในแขนงวิชาวัสดุศาสตร์ และคณาจารย์ท่านอื่นในภาควิชาเคมี คณะ- วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้ซึ่งสั่งสอนและมอบความรู้ ให้แก่ตัวของพวกข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณนักวิจัยและผู้ช่วยนักวิจัย ที่ห้องปฏิบัติการเคมีเซรามิก ศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และ วัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำหรับการให้คำแนะนำและสารเคมีที่ใช้ในการทำโครงการพิเศษครั้งนี้

ขอขอบพระคุณขอบคุณนักวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่เอื้อเฟื้อและอำนวยความสะดวก ในด้านอุปกรณ์และสารเคมีอย่างเต็มประสิทธิภาพ ตลอดจนถ่ายทอดความรู้และแนะนำการใช้ เครื่องมือ

ขอขอบคุณบุคคลผู้อยู่เบื้องหลังการทำวิจัยนี้ เพื่อนักศึกษาปริญญาตรี พี่ปริญญาโท พี่ ๆ หน่วย วิจัยและพัฒนาวัสดุขั้นสูง (advanced materials research unit) ที่คอยให้คำแนะนำและกำลังใจใน การทำงาน ท้ายที่สุดนี้พวกข้าพเจ้าขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และขอขอบคุณสมาชิกในครอบครัวที่ มอบความรักอันเป็นกำลังใจที่ดีสำหรับข้าพเจ้า จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

กัญญาวิร์ สินมงคลกุล

กัลยา กาลัญญ

อนุพงษ์ มาลาแก้ว

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การสะท้อนความร้อน.....	4
2.1.1 แสงอาทิตย์.....	5
2.1.1.1 รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet light; UV).....	5
2.1.1.2 แสงที่ตามองเห็น (visible light; VIS).....	5
2.1.1.3 รังสีอินฟราเรด (infrared light; IR).....	5
2.1.2 การถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคาและผนังอาคาร.....	6
2.2.3 วิธีป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคาร.....	6
2.2 ผงสีแดง.....	7
2.2.1 แอลฟา-เหล็กออกไซด์ (Alpha iron(III) oxide; α -Fe ₂ O ₃).....	8
2.2.2 ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide; SiO ₂).....	9
2.2.3 เซอร์โคเนียมซิลิเกต (Zirconium silicate; ZrSiO ₄).....	9
2.2.4 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum oxide; Al ₂ O ₃).....	10
2.2.5 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide; ZnO).....	10
2.2.6 ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide; TiO ₂).....	11
2.2.7 แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide; MgO).....	12
2.2.8 ซีเรียมออกไซด์ (Cerium(IV) oxide; CeO ₂).....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 การวัดสี (Color Measuring).....	13
2.4 ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid state reaction).....	13
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.5.1 การสังเคราะห์ผงสีแดงอนินทรีย์ สำหรับงานเคลือบบนเซรามิค.....	15
2.5.2 การทดลองศึกษาเปรียบเทียบค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรด (IR) ของสีสะท้อน ความร้อนสีต่าง ๆ 4 ตัวอย่าง (cool pigment) และสีสูตรมาตรฐาน 4 ตัวอย่าง..	18
2.5.3 การศึกษาผลกระทบของการเติมซิลิกอนไดออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ในการ สังเคราะห์ผงสีแดงจากเหล็กออกไซด์ โดยทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีการปฏิกิริยา สถานะของแข็ง (solid state reaction).....	22
2.5.4 การศึกษาการพัฒนาผงสี Fe - ZrSiO ₄ ที่เผาอุณหภูมิสูง โดยจะทำการพัฒนาให้ผง สีเป็นผงละเอียดและเป็นเนื้อเดียวกันโดยวิธีโซล - เจล.....	24
2.5.5 การศึกษาการสังเคราะห์ผงสีแดงอนินทรีย์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ที่เตรียมจาก วิธีการไฮโดรเทอร์มอล โดยการใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl ₃) กับแอปตาพูไกท์ (ATP) มาผ่านเคลือบด้วยวิธีการสเปรย์โดยทดลองพ่นเคลือบลงวัสดุ.....	27
2.5.6 ศึกษาการสังเคราะห์สีแดงไฮบริดจากดินสอพอไลท์ (Sep) กับฮอลลอยด์ไซท์ (HNTs) ที่มีราคาถูกและให้สีแดงที่สดและเสถียร สังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอ..	29
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	32
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	32
3.2 สารเคมี.....	33
3.3 กระบวนการสังเคราะห์ผงสีแดง.....	33
3.3.1 ขั้นตอนในการสังเคราะห์ผงสีแดง.....	33
3.4 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติของผงสีแดง.....	38
3.4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD).....	38
3.4.2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)	39
3.4.3 การวัดค่าของสีด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer).....	41

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.4 การตรวจสอบวัดค่าการสะท้อนด้วยเครื่องยูวี วิซิเบิล เอ็นไออาร์ สเปกโทรโฟโต- มิเตอร์ (UV-VIS-NIR spectrophotometer).....	42
3.4.5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Fourier Trans- form infrared spectroscopy, FT-IR).....	43
3.4.6 การวิเคราะห์ธาตุและปริมาณของธาตุด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence, XRF).....	44
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	46
4.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนของสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ผงสีแดง.....	46
4.2 การศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการเผาแคลไซน์ที่มีผลต่อสมบัติของผงสีแดง.....	52
4.2.1 ศึกษาค่าพิกัดสีและการสะท้อนรังสี NIR.....	52
4.2.2 ศึกษาโครงสร้างผลึกและโครงสร้างโมเลกุล.....	56
4.2.3 ศึกษาปริมาณของธาตุองค์ประกอบ.....	64
4.2.4 ศึกษาสัณฐานวิทยา.....	68
4.3 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	73
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	74
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	74
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	75
เอกสารอ้างอิง.....	76
ภาคผนวก.....	80
ภาคผนวก ก.....	81
ภาคผนวก ข.....	83

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลการวิเคราะห์ค่าพิกัดสีด้วยวิธี CIELab ของผงสีที่มีส่วนผสมระหว่างคริสโตแบไลต์ (SiO ₂) เหล็กฮีมาไทต์ (Fe ₂ O ₃) เซอร์โคเนียมซิลิเกต (ZrSiO ₄) และเคลือบชนิดต่าง ๆ	17
2.2 อัตราส่วนของสีที่ผลิตในห้องปฏิบัติการ.....	19
2.3 ผลการวิเคราะห์ค่าพิกัดสีของสีสะท้อนรังสีอินฟราเรด (IR) และสีแบบมาตรฐานด้วยวิธี CIE- Lab	20
2.4 ผลของอุณหภูมิหลังการฉายรังสีอินฟราเรด.....	21
2.5 การสะท้อนรังสีและการแผ่รังสีของสี.....	22
2.6 อัตราส่วนโดยโมลขององค์ประกอบ.....	22
2.7 การวัดพิกัดสีของผงสีแดงสูตร FA2 ที่เผาอุณหภูมิต่าง ๆ.....	23
2.8 การวัดพิกัดสีของผงสีแดง.....	24
2.9 องค์ประกอบของสารตั้งต้น (อัตราส่วนโดยโมล).....	24
2.10 ผงสีและสีเคลือบที่มีอัตราส่วนเหล็กต่างกันเผาที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส.....	25
2.11 ค่าพิกัดสีของผงสีแดงไฮบริดจ์.....	29
2.12 เปรียบเทียบค่า L *, a * และ b * ของเม็ดสีและสารต่าง ๆ.....	31
3.1 อัตราส่วนสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ผงสีแดง.....	34
4.1 ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์.....	47
4.2 ค่าพิกัดสีและค่าการสะท้อนรังสี NIR ของผงสีแดงเกรดการค้าและเหล็กออกไซด์.....	48
4.3 ค่าพิกัดสีและค่าการสะท้อนรังสี NIR ของผงสีแดงที่สังเคราะห์จากเหล็กออกไซด์และโลหะ ออกไซด์ 1 ชนิด.....	49
4.4 ค่าพิกัดสีและค่าการสะท้อนรังสี NIR ของผงสีแดงที่สังเคราะห์จากเหล็กออกไซด์และโลหะ ออกไซด์ 2 ชนิด	50
4.5 ค่าพิกัดสีและค่าการสะท้อนรังสี NIR ของผงสีแดงที่สังเคราะห์จากเหล็กออกไซด์ และโลหะ ออกไซด์ 3 ชนิด.....	50
4.6 ค่าพิกัดสีและค่าการสะท้อนรังสี NIR ของผงสีแดงที่สังเคราะห์จากเหล็กออกไซด์ และโลหะ ออกไซด์ 4 ชนิด.....	51

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.7 ค่าพิกัดสีและค่าการสะท้อนรังสี NIR ของผงสีแดงที่สังเคราะห์จากเหล็กออกไซด์ และโลหะออกไซด์ 5 ชนิด.....	51
4.8 ค่าพิกัดสี และค่าการสะท้อนรังสี NIR ของผงสีแดงสูตร 19 (25Fe/20Si/45Zr/10Al).....	52
4.9 ค่าพิกัดสี และค่าการสะท้อนรังสี NIR ของผงสีแดงสูตร 11 (25Fe/45Zr/30Al).....	54
4.10 องค์ประกอบผงสีแดงสูตร 19 (25Fe/20Si/45Zr/10Al) และสูตร 11 (25Fe/45Zr/30Al)....	64
4.11 รูปร่างและขนาดอนุภาคเฉลี่ยของของสารตั้งต้น.....	68
4.12 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงสีสูตร 25Fe/20Si/ 45Zr/10Al เมื่อเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	70
4.13 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงสีแดงสูตร 25Fe/20Si/ 45Zr/10Al เมื่อเติมและไม่เติมโซเดียมฟลูออไรด์.....	71
4.14 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงสีสูตร 25Fe/45Zr/30Al.....	72



สารบัญรูปลภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 อัตราส่วนของรังสีชนิดต่าง ๆ ในแสงอาทิตย์.....	4
2.2 แสดงภาพสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ.....	5
2.3 เมื่อมีการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์มากระทบกับพื้นผิวภายนอกของหลังคาและผนังอาคารทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคาและผนังเข้าสู่ตัวอาคาร ทำให้ตัวอาคารมีอุณหภูมิสูงขึ้นภายในอาคารจึงรู้สึกว่าร้อนขึ้น.....	6
2.4 อุณหภูมิภายในอาคารที่ลดลงจากการเคลือบทามังหรือทาด้วยสีสะท้อนความร้อน.....	7
2.5 ลักษณะแร่เหล็กฮีมาไทต์.....	8
2.6 โครงสร้างผลึกแบบบรอมโบฮีตรอลของแอลฟา - เหล็กออกไซด์ (ลูกบอลสีเขียว คือ Fe^{3+} และลูกบอลสีแดง คือ O^{2-})	8
2.7 การจัดเรียงตัวแบบเตตระฮีตรอลของซิลิกอนไดออกไซด์.....	9
2.8 โครงสร้างผลึกของเซอร์โคเนียมซิลิเกต (ลูกบอลสีเทา คือ Zr^{4+} ลูกบอลสีเหลือง คือ Si^{4+} และลูกบอลสีแดง คือ O^{2-})	9
2.9 โครงสร้างผลึกของอะลูมิเนียมออกไซด์ (ลูกบอลสีเขียว คือ Al^{3+} และลูกบอลฟ้า คือ O^{2-}).....	10
2.10 การจัดเรียงตัวแบบเฮกซะโกนอลของซิงค์ออกไซด์.....	11
2.11 โครงสร้างผลึกของไททานเนียมออกไซด์.....	11
2.12 โครงสร้างผลึกแมกนีเซียมออกไซด์ (ลูกบอลสีฟ้า คือ Mg^{2+} และลูกบอลสีแดง คือ O^{2-}).....	12
2.13 โครงสร้างผลึกของซีเรียมออกไซด์.....	12
2.14 การบรรยายสีในระบบ CIE Lab มองในระยะ 3 มิติ โดย H_{ab} (Hue) บรรยายถึงเฉดสีและ C^*_{ab} (Chroma) บรรยายถึงความมันวาวหรือความเข้มของโทนสี.....	13
2.15 แสดงการแพร่ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของสารตั้งต้น.....	14
2.16 ผล XRD ของผงสีแดงจาก 0.5 โมล SiO_2 - 0.5 โมล $ZrSiO_4$ - 0.2 โมล Fe_2O_3 (a) ก่อนเผาและหลังเผาแคลไซน์ (b)	15
2.17 ผล XRD ของผงสีแดงจาก 1 โมล SiO_2 - 0.2 โมล Fe_2O_3 หลังจากเผาแคลไซน์.....	16
2.18 ผล XRD ของผงสีแดงจาก 1 โมล $ZrSiO_4$ - 0.2 โมล Fe_2O_3 หลังจากเผาแคลไซน์.....	16
2.19 ภาพถ่ายจาก TEM ของผงสีแดง (a) Fe_2O_3 - SiO_2 - $ZrSiO_4$ (b) Fe_2O_3 - $ZrSiO_4$ และ(c) Fe_2O_3 - SiO_2	18

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.20 ภาพถ่ายจาก SEM ของผงสีต่าง ๆ ที่เผาพร้อมกับสี่เคลือบ (a) Fe ₂ O ₃ - SiO ₂ - ZrSiO ₄ (b) Fe ₂ O ₃ - ZrSiO ₄ และ (c) Fe ₂ O ₃ - SiO ₂ (c)	18
2.21 การทดลองการสะท้อนแสงสีอินฟราเรดของเม็ดสี.....	19
2.22 ค่าสะท้อนรังสี UV วิสิเบิล และ NIR (a) สีเหลือง (b) สีน้ำตาล 1, (c) สีน้ำตาล 2 และ (d) สีดำ.....	21
2.23 การดูดกลืนแสงของผงสีแดงสูตร FA2 ที่เผาอุณหภูมิต่าง ๆ (a) 1250 °C, (b) 1300 °C, (c) 1350 °C และ (d) 1450 °C	23
2.24 การวัดการดูดกลืนแสงของ 0.2 M - FeCl ₃ ที่เผา ณ อุณหภูมิต่าง ๆ	25
2.25 ภาพ XRD ของ (Fe) _x - ZrO ₂ - SiO ₂ โดยมีอัตราส่วนโดยโมลของเหล็กที่ต่างกัน เมื่อ Z: เซอร์โคเนียมซิลิเกต m: โมโนคลินิก t: เตตระโกนอล H: ฮีมาไทต์ C: คริสโตบาไรต์.....	26
2.26 ภาพ IR ของผงสีอัตราส่วนโดยโมล 0.2 M ของเหล็ก ที่เผาช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ.....	27
2.27 การทดลองพ่นเม็ดสีแดงไฮบริดจ์วัสดุต่าง ๆ	27
2.28 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะสัญญาณวิทยาและสีของผงสีแดงไฮบริดจ์.....	28
2.29 ภาพ SEM ของ Sep (a), Sep/ Fe ₂ O ₃ (b), HNTs (c), HNTs/ Fe ₂ O ₃ (d) และ Fe ₂ O ₃ (e); รูป TEM ของ Sep (f), Sep/ Fe ₂ O ₃ (g), HNTs (h), and HNTs/ Fe ₂ O ₃ (i).....	29
2.30 ภาพสเปกตรัมของ Sep, HNTs และเม็ดสีแดงไฮบริดจ์ Sep/Fe ₂ O ₃ และ HNTs/Fe ₂ O ₃	30
3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนกระบวนการสังเคราะห์ผงสีแดงโดยวิธีการทำปฏิกิริยาของแข็ง.....	37
3.2 การตกกระทบและการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์.....	38
3.3 เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	39
3.4 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	40
3.5 หลักการเกิดรังสีเอ็กซ์จากการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุด้วยเทคนิค EDS	40
3.6 หลักการเกิดแสงสีต่าง ๆ ของการมองเห็นผ่านปริซึม.....	41
3.7 เครื่องวัดสี	42
3.8 ช่วงความยาวคลื่นของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า.....	42
3.9 เครื่องยูวี วิสิเบิล เอ็นไออาร์ สเปกโทรโฟโตมิเตอร์	43
3.10 เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์.....	44
3.11 หลักการคายพลังงานของรังสีเอ็กซ์	44

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์.....	45
4.1 สเปกตรากการสะท้อนรังสีอาทิพย์ของสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์.....	47
4.2 สเปกตรากการสะท้อนรังสีอาทิพย์ของผงสีแดงสูตร 19 (25Fe/20Si/45Zr/10Al).....	53
4.3 สเปกตราสะท้อนของผงสีแดงสูตร 11 ที่มีองค์ประกอบ คือ (25Fe/45Zr/30Al).....	55
4.4 ผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผงสีแดง a) สูตร 19 (25Fe/20Si/45Zr/10Al) b) สูตร 11 (25Fe/45Zr/30Al) และ JCPDS ของ Fe ₂ O ₃ , SiO ₂ , ZrSiO ₄ , Al ₂ O ₃ และ NaF.....	56
4.5 ผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผงสีแดงสูตร 19 (25Fe/20Si/45Zr/10Al) a) ไม่เผาแคลไซน์ และเผาที่ b) 900 °C c) 1000 °C และ d) 1100 °C.....	58
4.6 ผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงสีแดงสูตร 19 (25Fe/20Si/45Zr/10Al) ที่เผาอุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา a) 3 ชั่วโมง b) 6 ชั่วโมง และ c) 12 ชั่วโมง.....	59
4.7 ผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงสีแดงสูตร 19 (25Fe/20Si/45Zr/10Al) a) ไม่เผาแคลไซน์ และเผาที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง b) NaF และ c) ไม่เติม NaF.....	60
4.8 ผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงสีแดงสูตร 11 (25Fe/45Zr/30Al) a) ไม่เผาแคลไซน์ และเผาที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง b) เติม NaF และ c) ไม่เติม NaF.....	61
4.9 อินฟราเรดสเปกตราของผงสีแดงสูตร 19 (25Fe/20Si/45Zr/10Al) a) ไม่เผาแคลไซน์ และเผาที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง b) เติม NaF และ c) ไม่เติม NaF.....	62
4.10 อินฟราเรดสเปกตราของผงสีแดงสูตร 11 (25Fe/45Zr/30Al) a) ไม่เผาแคลไซน์ และเผาที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง b) เติม NaF และ c) ไม่เติม NaF.....	63
4.11 รูปภาพและ XRF สเปกตรัมของผงสีสูตร 19 (25Fe/20Si/45Zr/10Al) ไม่เผาแคลไซน์.....	65
4.12 รูปภาพและ XRF สเปกตรัมของผงสีสูตร 19 (25Fe/20Si/45Zr/10Al) เผาที่ 1000 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แบบเติม NaF.....	66
4.13 รูปภาพและ XRF สเปกตรัมของผงสีสูตร 19 (25Fe/20Si/45Zr/10Al) เผาที่ 1000 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แบบไม่เติม NaF.....	66
4.14 รูปภาพและ XRF สเปกตรัมของผงสีสูตร 11 (25Fe/45Zr/30Al) ไม่เผาแคลไซน์.....	67
4.15 รูปภาพและ XRF สเปกตรัมของผงสีสูตร 11 (25Fe/45Zr/30Al) เผาที่ 1000 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แบบเติม NaF.....	67
4.16 รูปภาพและ XRF สเปกตรัมของผงสีสูตร 11 (25Fe/45Zr/30Al) เผาที่ 1000 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แบบไม่เติม NaF.....	68

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 ภาพถ่าย SEM a) Fe_2O_3 b) SiO_2 , c) ZrSiO_4 และ d) Al_2O_3	69
4.18 ภาพถ่าย SEM ของผงสีสูตร 19 (25Fe/20Si/45Zr/10Al) a) ไม่เผาแคลไซน์, b) 900 °C, c) 1000 °C และ d) 1100 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....	70
4.19 ภาพถ่าย SEM ของผงสีแดงสูตร 19 (25Fe/20Si/45Zr/10Al) a) เต็ม NaF b.) ไม่เต็ม NaF.....	71
4.20 ภาพถ่าย SEM ของผงสีแดงสูตร 11 (25Fe/45Zr/30Al) a) ไม่เผาแคลไซน์ และเผาที่ 1000 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง b) เต็ม NaF และ c) ไม่เต็ม NaF.....	72



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เนื่องด้วยประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนใกล้เส้นศูนย์สูตร ทำให้ภูมิอากาศมีลักษณะเป็นแบบร้อนชื้น ส่งผลให้มีการใช้เครื่องปรับอากาศเพื่อลดอุณหภูมิภายในอาคารเป็นจำนวนมาก โดยพบว่าประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและผู้ส่งออกเครื่องปรับอากาศและเครื่องทำความเย็นที่ใหญ่ที่สุดในอาเซียนและติดอันดับ 1 ใน 3 ของโลก [1] โดยเครื่องปรับอากาศที่ใช้อยู่ในปัจจุบันนั้นทำหน้าที่ดึงเอาความร้อนจากคนที่อาศัยอยู่ในห้องไม่ถึงร้อยละ 10 แต่จะดึงเอาความร้อนจากภายนอกที่ถ่ายเทเข้ามาตามฝาผนัง หลังคา ฝ้าเพดาน หน้าต่าง กระจก และรอยรั่วของประตูหน้าต่างถึงประมาณร้อยละ 80-90 [2] ดังนั้นหากมีความร้อนที่ถ่ายเทจากผิวด้านนอกอาคารเข้าสู่อาคารที่มาก จะทำให้เครื่องปรับอากาศทำงานหนัก ซึ่งต้องใช้พลังงานไฟฟ้าที่สูงตามไปด้วย วิธีที่สามารถลดการถ่ายเทความร้อนจากผนังสามารถทำได้โดยการทาสีสะท้อนความร้อนซึ่งจะช่วยเป็นฉนวนที่ป้องกันความร้อนและอุณหภูมิจากแสงอาทิตย์ในตอนกลางวัน อีกทั้งในตอนกลางคืนยังสามารถช่วยให้ความร้อนจากภายนอกที่มีอุณหภูมิสูงกว่าถ่ายเทเข้าไปในอาคารได้น้อยลง เมื่อสามารถลดความร้อนที่ถ่ายเทจากผนัง หลังคาและฝ้าเพดานที่เข้าสู่ภายในอาคารซึ่งเป็นพื้นที่ส่วนใหญ่ลงได้แล้ว ทำให้สามารถลดขนาดของเครื่องปรับอากาศและลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ โครงการพิเศษนี้จึงได้ศึกษาและพัฒนาสังเคราะห์ผงสีแดงที่มีคุณสมบัติสะท้อนรังสีอินฟราเรด โดยมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาผงสีแดงที่มีเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) เป็นองค์ประกอบพื้นฐาน [3] เนื่องจากมีราคาไม่แพงและสังเคราะห์ได้ง่าย และยังเป็นองค์ประกอบหลักของสีแดงที่ใช้กันอยู่ทั่วไป โดยการเตรียมผงสีแดงสามารถทำได้หลายวิธี เช่น โซลเจล (sol-gel) [4] และไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal) [5] เป็นต้น โดยในโครงการพิเศษนี้ได้เลือกใช้วิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) [6] ซึ่งเป็นวิธีที่ทำได้โดยการอาศัยการสลายตัวของสารตั้งต้นที่มีสถานะของแข็งหลังจากได้รับความร้อน เกิดเป็นของแข็งใหม่ที่มักอยู่ในรูปของออกไซด์ เนื่องจากมีข้อดี คือ ทำให้ได้โครงสร้างจุลภาคที่ละเอียดและเป็นเนื้อเดียวกัน [6] และเป็นที่ยอมรับมากในอุตสาหกรรมเพราะสามารถเตรียมได้ในปริมาณที่มากและเป็นกระบวนการที่ไม่ยุ่งยาก สำหรับวิธีการปรับปรุงผงสีแดงให้มีค่า-เฉดสี (shade) ที่หลากหลายและใกล้เคียงกับสีแดงทางการค้ามากขึ้น สามารถทำได้โดยการเจือสารเติมแต่งอื่น (additive) ลงไป เช่น ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) [7] เซอร์โคเนียมซิลิเกต (ZrSiO_4) [8] และอะลูมินา (Al_2O_3) [9] เป็นต้น ส่วนการปรับปรุงสมบัติการสะท้อนรังสีอินฟราเรดสามารถทำได้โดยการเติมสารประกอบออกไซด์ เช่น ไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และซิงค์ออกไซด์ (ZnO) [11] ดังนั้นในโครงการพิเศษนี้จึงได้ศึกษาการพัฒนาผงสีแดงที่สะท้อนรังสีอินฟราเรดจากองค์ประกอบหลัก คือ เหล็กออกไซด์โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง โดยได้ศึกษาผลของการเติมสารองค์ประกอบโลหะออกไซด์ชนิดต่าง ๆ อุณหภูมิและเวลาในการเผาแคลไซน์ที่มีผลต่อค่าพิกต์สี และสมบัติการสะท้อนรังสีอินฟราเรด เพื่อนำผงสีแดงที่ได้ไปใช้เป็นสีทาเพื่อลดความร้อนภายในอาคาร

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาการพัฒนาผงสีแดงสะท้อนรังสีอินฟราเรดโดยใช้เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลักจากวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง
- 2) เพื่อศึกษาผลของปัจจัยที่ใช้ในการสังเคราะห์ผงสีแดง อันประกอบไปด้วย ชนิดและอัตราส่วนของสารตั้งต้น อุณหภูมิและเวลาในการเผาแคลไซน์ ที่มีผลต่อโครงสร้างผลึก โครงสร้างจุลภาค ค่าพิกต์สี และสมบัติการสะท้อนรังสีอินฟราเรด

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. การสังเคราะห์ผงสีแดงโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง โดยได้ศึกษาปัจจัยในการสังเคราะห์ที่มีผลต่อโครงสร้างผลึก โครงสร้างจุลภาค ค่าพิกต์สี และสมบัติการสะท้อนรังสีอินฟราเรด
 - 1.1 ชนิดของสารตั้งต้น คือ เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เซอร์โคเนียมซิลิเกต ($ZrSiO_4$) อะลูมินา (Al_2O_3) ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และซีเรียมไดออกไซด์ (CeO_2)
 - 1.2 อัตราส่วนของสารตั้งต้น
 - 1.3 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแคลไซน์ คือ 900 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส
 - 1.4 ระยะเวลาที่ใช้ในการเผาแคลไซน์ คือ 3 6 และ 12 ชั่วโมง
2. การตรวจสอบคุณสมบัติและสมบัติต่าง ๆ ด้วยเทคนิคดังนี้
 - 2.1 การตรวจสอบคุณสมบัติด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer; XRD)
 - 2.2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM)
 - 2.3 การตรวจสอบค่าพิกต์สีด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer)
 - 2.4 การตรวจสอบวัดค่าการสะท้อนรังสีด้วยเครื่องยูวี วิซิเบิล เอ็นไออาร์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS-NIR spectrophotometer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy; FT-IR)

2.6 การวิเคราะห์ธาตุและปริมาณของธาตุด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence; XRF)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถพัฒนาผงสีแดงสะท้อนรังสีอินฟราเรดจากเหล็กออกไซด์โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง
- 2) สามารถนำผงสีแดงที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์ได้



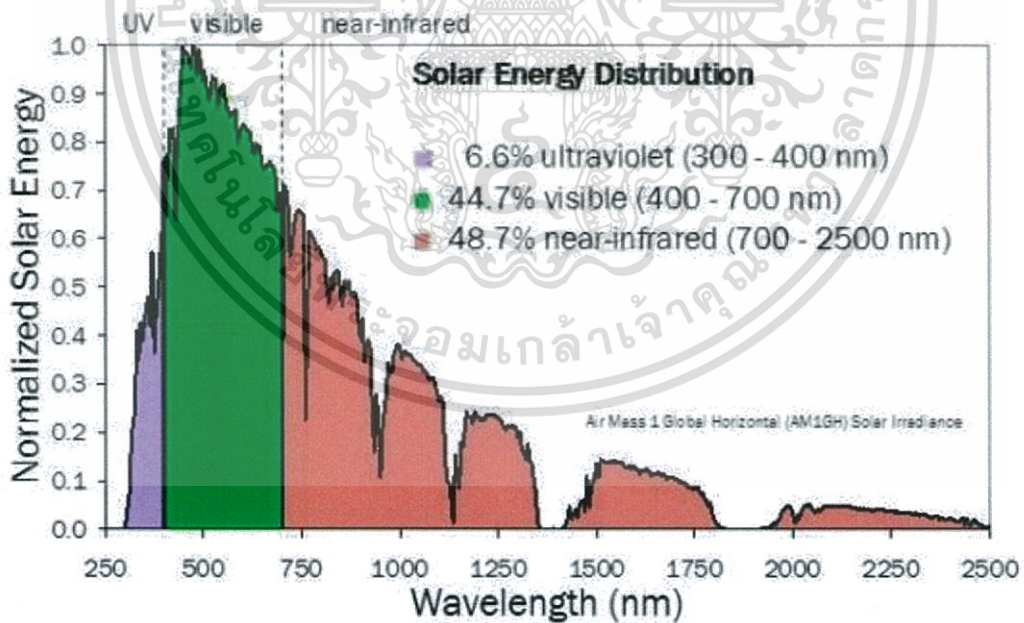
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การสะท้อนความร้อน

ปริมาณความร้อนที่สะสมภายในตัวอาคารมาจากหลายสาเหตุด้วยกัน เช่น ความร้อนจากบุคคล ความร้อนที่เกิดจากภายในของตัวอาคารและความร้อนที่เกิดภายนอกอาคาร โดยความร้อนที่เกิดจากภายนอกอาคารสามารถผ่านเข้ามาสู่อาคารได้โดยผ่านเข้ามาทางหลังคาและผนังของอาคาร แหล่งที่ก่อให้เกิดความร้อนจากภายนอก ได้แก่ “ดวงอาทิตย์” เมื่อพลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากดวงอาทิตย์ถูกปลดปล่อยและเดินทางมาสู่โลก รังสีบางส่วน คือ รังสีเอ็กซ์ รังสีแกมมา และรังสีคอสมิก จะถูกดูดกลืนเอาไว้โดยชั้นบรรยากาศของโลก ส่วนที่ผ่านเข้ามาสู่โลก คือ รังสีอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet light; UV) รังสีที่ตามองเห็น (visible light; VIS) และรังสีอินฟราเรด (infrared; IR) ซึ่งก่อให้เกิดความร้อนและทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุเนื่องจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ [12] ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 อัตราส่วนของรังสีชนิดต่าง ๆ ในแสงอาทิตย์ [13]

2.1.1 แสงอาทิตย์ (Solar Light)

แสงอาทิตย์ประกอบด้วยสเปกตรัมของรังสี UV, VIS และ IR ที่สามารถผ่านเข้ามาสู่โลกได้ ซึ่งรังสีทั้ง 3 ส่วนดังกล่าวมีคุณสมบัติซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบกับวัสดุที่แตกต่างกัน ดังนี้

2.1.1.1 รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet light; UV)

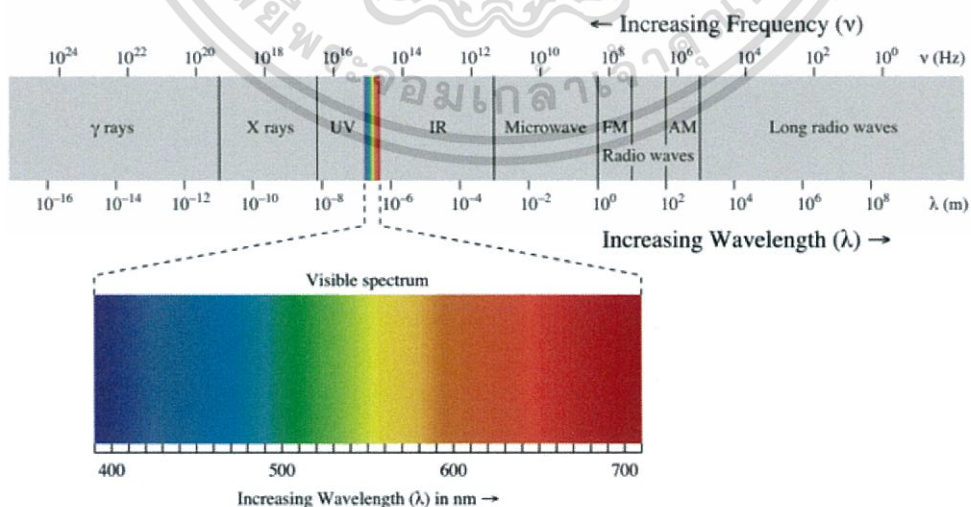
รังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นรังสีที่มีอยู่ในแสงอาทิตย์ โดยมีลักษณะเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ (solar spectrum) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงตั้งแต่ 300 – 400 นาโนเมตร รังสี UV เมื่อตกกระทบถูกพื้นผิวของวัสดุใด ๆ จะไม่ก่อให้เกิดความร้อน แต่จะทำให้วัตถุนั้นเกิดการเสื่อมสภาพได้

2.1.1.2 แสงที่ตามองเห็น (visible light; VIS)

รังสีที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เป็นรังสีที่มีอยู่ในสเปกตรัมของแสงอาทิตย์เช่นกัน มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงตั้งแต่ 410 - 722 นาโนเมตร โดยเมื่อรังสี VIS นี้ตกกระทบกับพื้นผิวของวัสดุใด ๆ รังสี VIS นี้จะเปลี่ยนจากพลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อน พลังงานความร้อนดังกล่าวนี้จะทำให้วัตถุนั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้น

2.1.1.3 รังสีอินฟราเรด (infrared light; IR)

รังสีอินฟราเรดใกล้ (near infrared; NIR) คือ รังสีที่มีอยู่ในสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ โดยมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงตั้งแต่ 724 - 2500 นาโนเมตร รังสีอินฟราเรดเป็นรังสีที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าเช่นเดียวกับรังสี UV และเมื่อรังสีอินฟราเรดนี้ตกกระทบกับพื้นผิวของวัสดุใด ๆ รังสีดังกล่าวจะเปลี่ยนจากพลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนทำให้วัตถุนั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างมาก [12] ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงภาพสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 การถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคาและผนังอาคาร

เมื่อหลังคาหรือผนังของอาคารได้รับพลังงานจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์จะดูดกลืนพลังงานของแสงอาทิตย์ และเปลี่ยนสภาพเป็นพลังงานความร้อนทำให้พื้นผิวภายนอกของหลังคาหรือผนังอาคารมีอุณหภูมิสูงขึ้นมาก และเมื่อพื้นผิวภายนอกมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดผลต่างของอุณหภูมิตั้งแต่ระหว่างพื้นผิวภายนอกและภายในของหลังคาหรือผนังอาคารทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อน (heat transfer) ในลักษณะของการนำความร้อน (heat conduction) ขึ้นระหว่างพื้นผิวทั้งสอง เป็นผลให้ตัวอาคารร้อนขึ้น จึงมีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สูงขึ้นเพื่อการรักษาอุณหภูมิภายในห้องปรับอากาศให้เหมาะสม

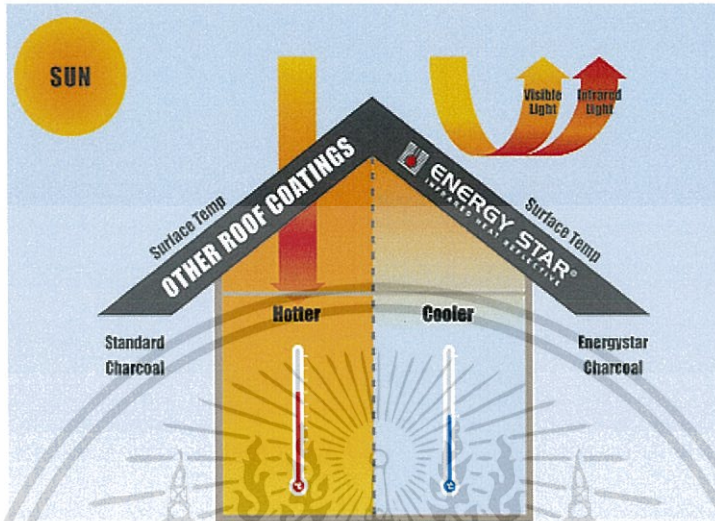


รูปที่ 2.3 เมื่อมีการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์มากกระทบกับพื้นผิวภายนอกของหลังคาและ ผนังอาคาร ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคาและผนังเข้าสู่ตัวอาคาร ทำให้ตัวอาคารมีอุณหภูมิสูงขึ้น ภายในอาคารจึงรู้สึกว่ "ร้อนขึ้น" [12]

2.2.3 วิธีป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคาร

การป้องกันความร้อนไม่ให้ผ่านเข้ามาสู่ตัวอาคาร เป็นการป้องกันไม่ให้พลังงานจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์กระทบกับพื้นผิวของหลังคาหรือผนังอาคารหรือให้กระทบน้อยที่สุดอาจทำได้หลายวิธี คือ การออกแบบอาคาร การใช้ร่มเงาบังแสงอาทิตย์ หรือการใช้ฉนวนป้องกันความร้อนเคลือบที่ผิวด้านนอกของอาคาร โดยการป้องกันความร้อนจากการใช้ฉนวนกันความร้อนชนิดสะท้อนรังสีความร้อน (ceramic coating insulation) เคลือบหรือทาไว้ที่ผิวด้านนอกของอาคารหรือโรงงานบริเวณหลังคาหรือผนังอาคารเกิดจากการที่เมื่อฉนวนได้รับรังสีความร้อนจากการแผ่รังสีของแสงอาทิตย์จะทำหน้าที่ในการสะท้อนรังสีดังกล่าวออกไป (มากกว่าร้อยละ 85) คงเหลือความร้อนเพียงบางส่วนทำให้ผิวของหลังคาหรือผนังอาคารมีอุณหภูมิต่ำลงมาก ดังนั้นปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจากผิวด้านนอกของอาคารไปยังผิวด้านในของอาคารก็จะมีปริมาณน้อยลง ทำให้ภายในตัวอาคารเย็นขึ้น โดยวิธีนี้เป็นวิธีที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการ

ป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคาร ช่วยประหยัดพลังงานและลดค่าใช้จ่ายจากการใช้เครื่องปรับอากาศ [14] ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 อุณหภูมิภายในอาคารที่ลดลงจากการเคลือบผนังหรือทาด้วยสีสะท้อนความร้อน [15]

2.2 ผงสีแดง

ผงสีแดงในปัจจุบันสามารถผลิตได้จากสินแร่ฮีมาไทต์ (hematite หรือ haematite) โดยแร่ฮีมาไทต์ มีชื่อแร่มาจากภาษากรีก "haima" แปลว่าเลือดเพราะมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีแดงเลือดหมู [16] แสดงในรูปที่ 2.5 โดยผงสีแดงที่นิยมใช้มีองค์ประกอบหลักคือเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) หรือที่เรียกว่าเฟอร์ริกออกไซด์ (ferric oxide) ซึ่งเป็นสารประกอบอนินทรีย์ มีสีแดงเข้ม และมีคุณสมบัติเป็นผงสีที่ดี มีความคงตัวทางเคมีและความคงตัวทางกายภาพสูง ซึ่งพบว่าในอุตสาหกรรมทั่วไปนั้นมีการใช้เหล็กออกไซด์เป็นองค์ประกอบอย่างแพร่หลาย โดยได้นำไปประยุกต์ใช้ในงานในงานวัสดุก่อสร้างซึ่งส่วนใหญ่จะใช้สำหรับปูนซีเมนต์ สีกระเบื้องปูนซีเมนต์ สีกระเบื้องเลียนแบบกระเบื้อง คอนกรีตปูนขาวสียางมะตอยสีหินขัด กระเบื้องโมเสคหินอ่อนเทียมและล้าผนัง สำหรับการ-ปรับความหลากหลายของสีและการป้องกันมลภาวะต่าง ๆ ที่ใช้ตกแต่งภายในและภายนอก สามารถใช้ผงสีแดงจากเหล็กออกไซด์ร่วมกับสีน้ำมัน รวมทั้งอีพอกซี สีอัลคิต สีตกแต่ง สีเฟอร์นิเจอร์ และสีเคลือบพื้น [3] โดยในอุตสาหกรรมการผลิตสีแดงทำได้จากการใช้วัตถุดิบเริ่มต้นคือ เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และเตม-เซอร์โคเนียมซิลิเกต (ZrSiO_4) หรือเซอร์คอน (zircon) ลงไปเล็กน้อยเพื่อให้เกิดสี ซึ่งเหมาะสำหรับใช้กับบรรยากาศในการเผาแบบออกซิเดชั่น ทำให้มีความเสถียรของสีที่ดีมาก โดยผงสีแดงจากเหล็กออกไซด์จะใช้ได้ดีกับเคลือบที่ทับแสงจากเซอร์คอน และถ้าในเคลือบมีซิงค์ออกไซด์ (ZnO) อยู่ในอัตราส่วนที่สูงจะสามารถปรับปรุงสีให้มีความสดขึ้นมีสีออกแดงมากขึ้น [17]

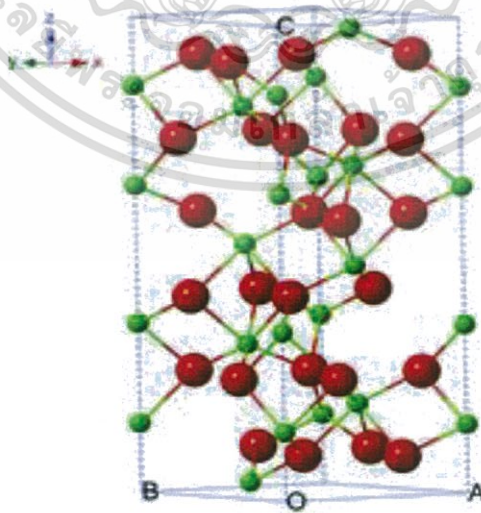
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ลักษณะแร่เหล็กฮีมาไทต์ [18]

2.2.1 แอลฟา-เหล็กออกไซด์ (Alpha iron(III) oxide; α - Fe_2O_3)

แอลฟา - เหล็กออกไซด์ (α - Fe_2O_3) มีรูปแบบผลึกแบบรอมโบฮีดรอล (rhombohedral) มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 159.69 กรัมต่อโมล แสดงดังรูปที่ 2.6 ซึ่งเป็นรูปแบบของเหล็กออกไซด์ที่พบมากที่สุด มีอุณหภูมิการหลอมเหลวอยู่ที่ 1539 – 1565 องศาเซลเซียส เกิดขึ้นจากแร่ฮีมาไทต์ ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบหลัก มีสมบัติเป็นแม่เหล็กไม่ถาวร ในการเตรียมแอลฟา-เหล็กออกไซด์ โดยทั่วไปสามารถทำได้โดยใช้การสลายตัวทางความร้อนและการตกตะกอนในขั้นตอนของเหลว โดยสมบัติทางแม่เหล็กของเหล็กออกไซด์จะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความดัน, ขนาดของอนุภาคและความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก [19]

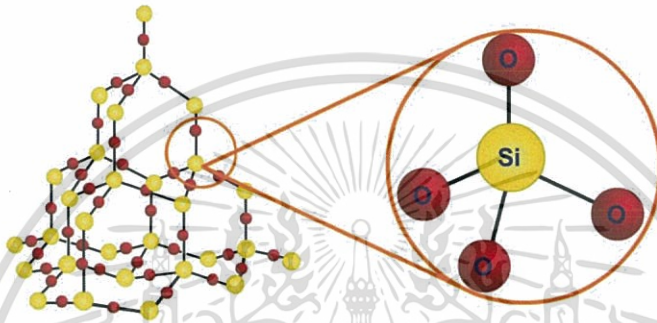


รูปที่ 2.6 โครงสร้างผลึกแบบรอมโบฮีดรอลของแอลฟา - เหล็กออกไซด์ (ลูกบอลสีเขียว คือ Fe^{3+} และลูกบอลสีแดง คือ O^{2-}) [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide; SiO_2)

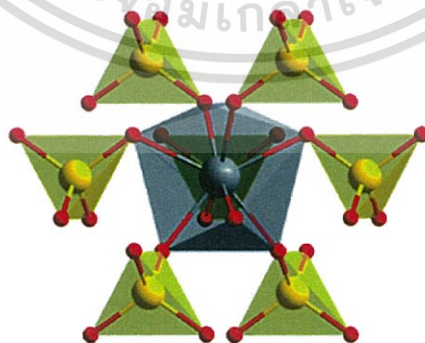
SiO_2 เป็นสารประกอบของซิลิกอน และออกซิเจน มีลักษณะเป็นผลึก ไม่มีสี หรือเป็นผลึกสีขาว และไม่มีกลิ่น มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 60.08 กรัมต่อโมล ส่วนมากพบในดินและหินและเป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับ 2 บนเปลือกโลกรองจากออกซิเจน ซิลิกอนไดออกไซด์มีการจัดเรียงตัวแบบเตตระฮีดรอล (tetrahedral) มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 1710 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 2.2 [21] และ ซิลิกอนไดออกไซด์เป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่นในอุตสาหกรรมแก้ว และ ซีเมนต์ [22] ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การจัดเรียงตัวแบบเตตระฮีดรอลของซิลิกอนไดออกไซด์ [21]

2.2.3 เซอร์โคเนียมซิลิเกต (Zirconium silicate; ZrSiO_4)

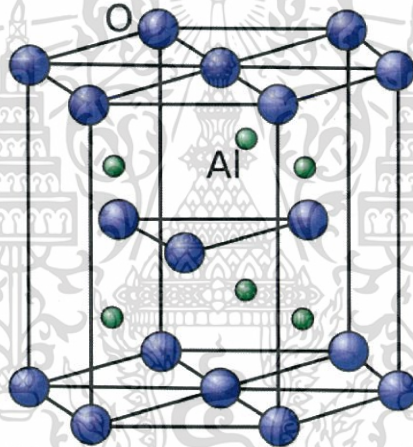
เซอร์โคเนียมซิลิเกตเรียกหรือเซอร์คอน (Zircon) มีสูตรเคมีคือ ZrSiO_4 มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 183.305 กรัมต่อโมล มีความหนาแน่น 6.505 เมกะกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีจุดหลอมเหลว 2200 - 2550 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างผลึกระบบเตตระโกนอล (tetragonal) แสดงดังรูปที่ 2.8 เซอร์โคเนียมซิลิเกตมีลักษณะเป็นผงสีขาว มีความแวววาว สะท้อนแสงอัลตราไวโอเลตคลื่นสั้น เซอร์โคเนียมซิลิเกตถูกนำมาใช้เป็นวัสดุฉนวนในการสังเคราะห์ผงสี สารเคลือบเซรามิก และวัสดุทนไฟ เป็นต้น [8]



รูปที่ 2.8 โครงสร้างผลึกของเซอร์โคเนียมซิลิเกต (ลูกบอลสีเทา คือ Zr^{4+} ลูกบอลสีเหลือง คือ Si^{4+} และลูกบอลสีแดง คือ O^{2-}) [23]

2.2.4 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum oxide; Al_2O_3)

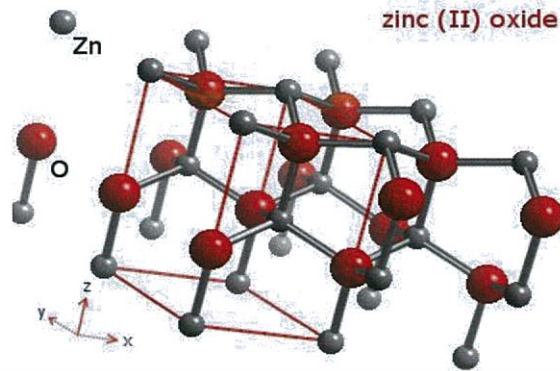
อะลูมิเนียมออกไซด์เป็นสารประกอบเคมีของอะลูมิเนียมและออกซิเจนมีสูตรเคมี คือ Al_2O_3 หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าอะลูมินา (alumina) อะลูมิเนียมออกไซด์เป็นส่วนประกอบหลักของแร่บอกไซต์ (bauxite) หรือแร่อะลูมิเนียมมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 101.96 กรัมต่อโมล มีความหนาแน่นเท่ากับ 3.97 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดหลอมเหลวเท่ากับ 2054 องศาเซลเซียส มีจุดเดือดเท่ากับ 3000 องศาเซลเซียส มีการจัดเรียงตัวแบบออกตระฮีดรอล (octahedral) แสดงดังรูปที่ 2.9 อะลูมิเนียมออกไซด์พบในธรรมชาติในรูปของแร่คอร์ันดัม (corundum) โดยปกติจะมีสีขาวหรือไม่มีสี โครงสร้างของอะลูมินาประกอบด้วยพันธะระหว่างอะลูมิเนียมกับออกซิเจนที่มีความแข็งแรงมาก การทำลายพันธะดังกล่าว ต้องใช้พลังงานสูงทำให้อะลูมินามีความแข็งแรงมาก โดยวัสดุที่แข็งแรงมากกว่าอะลูมินามีเพียงเพชรเท่านั้น นอกจากนั้นแล้วอะลูมินายังทนความร้อนและการกัดกร่อนจากสารเคมีชนิดต่าง ๆ ได้ดีอย่างยิ่งและมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี [9]



รูปที่ 2.9 โครงสร้างผลึกของอะลูมิเนียมออกไซด์ (ลูกบอลสีเขียว คือ Al^{3+} และลูกบอลฟ้า คือ O^{2-}) [9]

2.2.5 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide; ZnO)

ซิงค์ออกไซด์เป็นสารประกอบที่มีสูตรเคมี ZnO มีมวลโมเลกุล 81.38 กรัมต่อโมล มีความหนาแน่น 5.606 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดหลอมเหลว 1975 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (hexagonal) แสดงดังรูปที่ 2.6 สารประกอบมีลักษณะเป็นผลึกสีขาว ไม่มีสี ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายในกรด ซิงค์ออกไซด์ถูกนำมาใช้เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีในอุตสาหกรรมยางและใช้ในการผลิตเครื่องสำอาง ยา การผลิตเม็ดสี เร่งการสังเคราะห์เมทanol เป็นสารยับยั้งหรือฆ่าเชื้อแบคทีเรีย สารระงับกลิ่นกาย เป็นต้น [11]



รูปที่ 2.10 การจัดเรียงตัวแบบเฮกซะโกนอลของซิงค์ออกไซด์ [24]

2.2.6 ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide; TiO_2)

ไททาเนียมไดออกไซด์หรือไททาเนีย (titania) เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไททาเนียม มีสูตรเคมี TiO_2 มีมวลโมเลกุล 79.9 กรัมต่อโมล มีความหนาแน่น 3.84 - 4.26 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดหลอมเหลว 1850 องศาเซลเซียส มีลักษณะสีขาว ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่ละลายน้ำ มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (tetragonal) แสดงดังรูปที่ 2.11 ไททาเนียมไดออกไซด์ได้มีการนำมาใช้มากในอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ เนื่องจากมีความเสถียรสูง ไม่เป็นพิษและราคา ไททาเนียมไดออกไซด์มีคุณสมบัติแข็งแรง ทนต่อสภาพกัดกร่อนของคลอรีน น้ำทะเล และกรดต่างได้ดี ไททาเนียมไดออกไซด์โดยธรรมชาติจะพบน้อยมากส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแร่ิลเมไนต์ (ilmenite) หรือลิวโซซีน (leucocene) ไททาเนียมไดออกไซด์ส่วนใหญ่ถูกใช้ในอุตสาหกรรมสีทาบ้านด้วยคุณสมบัติให้สารสีขาวสามารถดูดกลืนและหักเหวงแสงที่ตามองเห็นได้สูง ขนาดอนุภาคเล็ก มีความยืดหยุ่นสูงทำให้ปกปิดรอยร้าวรอยตำหนิได้ดีและทนต่อสภาพความเป็นกรดต่าง ทนต่อแสงและความร้อน รวมถึงใช้เป็นส่วนผสมของสีสำหรับงานพิมพ์ งานศิลปะ เนื่องจากมีคุณสมบัติให้สีขาวสว่าง [10]

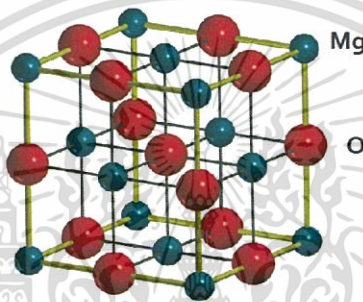


รูปที่ 2.11 โครงสร้างผลึกของไททาเนียมออกไซด์ [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.7 แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide; MgO)

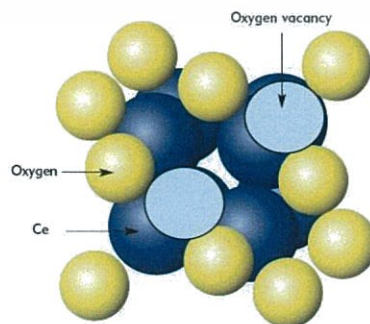
แมกนีเซียมออกไซด์มีสูตรเคมีทั่วไป คือ MgO มวลโมเลกุล 40.3044 กรัมต่อโมล มีความหนาแน่น 3.58 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดหลอมเหลว 2852 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ (cubic) แสดงดังรูปที่ 2.12 มีลักษณะเป็นแร่สีขาวหรือเป็นผลึกไม่มีสีที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ โดยผลิตได้จากการเผาแร่แมกนีเซียมในสภาพที่ใช้ออกซิเจนในการเผาไหม้ ซึ่งในธรรมชาติพบในรูปของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) เป็นส่วนมาก เพราะเป็นแร่ที่ชอบดูดความชื้นได้ดี และละลายน้ำ นอกจากนี้แมกนีเซียมถูกนำมาใช้ประโยชน์ในหลายด้าน อาทิ ใช้เป็นส่วนผสมของซีเมนต์ก่ออิฐทนไฟ ใช้เป็นส่วนผสมในอุตสาหกรรมผลิตยาง อุตสาหกรรมปิโตรเคมี และสารทำความสะอาด เป็นต้น [25]



รูปที่ 2.12 โครงสร้างผลึกแมกนีเซียมออกไซด์ (ลูกบอลสีฟ้า คือ Mg^{2+} และลูกบอลสีแดง คือ O^{2-}) [25]

2.2.8 ซีเรียมออกไซด์ (Cerium(IV) oxide; CeO_2)

ซีเรียมออกไซด์มีสูตรเคมีทั่วไป คือ CeO_2 มีมวลโมเลกุล 172.11 กรัมต่อโมล มีความหนาแน่น 7.65 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดหลอมเหลว 2400 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ (cubic) แสดงดังรูปที่ 2.13 มีลักษณะเป็นผงสีเหลืองซีด ไม่ละลายน้ำและไม่ติดไฟ ซีเรียมออกไซด์ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ตั้งแต่การใช้ผสมในเหล็กหล่อชนิดพิเศษ การผลิตผงขัดเลนส์ การเติมให้เกิดสีในแก้ว การเติมในสีทนแสงยูวี การผลิตสารเร่งปฏิกิริยาในการกลั่นน้ำมัน และการลดมลพิษจากท่อไอเสียรถยนต์ เป็นต้น [26]

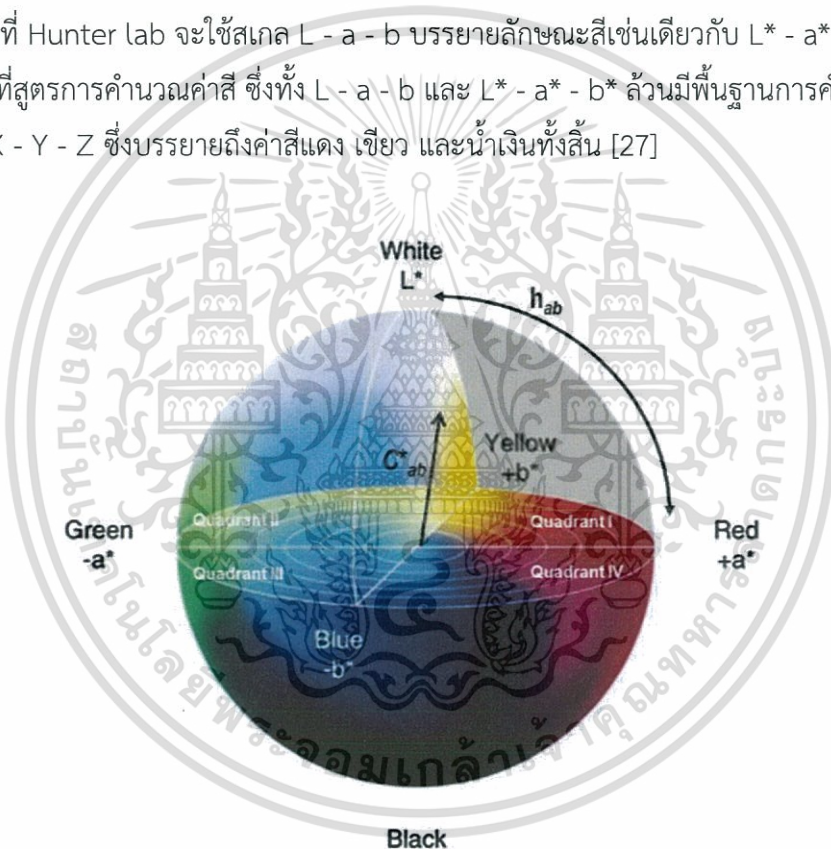


รูปที่ 2.13 โครงสร้างผลึกของซีเรียมออกไซด์ [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การวัดสี (Color Measuring)

องค์กร Commission International de l'Eclairage (CIE) หรือในชื่ออังกฤษว่า International Commission on Illumination ได้กำหนดมาตรฐานการวัดสีซึ่งเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างในวงการวิชาการและการวิจัย คือ ระบบ CIELab scale $L^* - a^* - b^*$ ซึ่งเป็นระบบการบรรยายสีแบบ 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 โดยที่แกน L^* บรรยายถึงความสว่าง (lightness) จากค่า $(-L^*)$ แสดงถึงสีดำจนไปถึง $(+L^*)$ แสดงถึงสีขาว แกน a^* จะบรรยายถึงแกนสีจากเขียว $(-a^*)$ ไปจนถึงแดง $(+a^*)$ ส่วนแกน b^* บรรยายถึงแกนสีจากน้ำเงิน $(-b^*)$ ไปจนถึงเหลือง $(+b^*)$ นอกจากนี้ยังมีบริษัท Hunter lab ในอเมริกาทำการวิจัยและพัฒนาการวัดสีเรียกว่า การวัดสีระบบ Hunter lab scale ซึ่งบรรยายแกนใน 3 มิติเช่นเดียวกับระบบ CIE โดยที่ Hunter lab จะใช้สเกล $L - a - b$ บรรยายลักษณะสีเช่นเดียวกับ $L^* - a^* - b^*$ ของ CIE แต่แตกต่างกันที่สูตรการคำนวณค่าสี ซึ่งทั้ง $L - a - b$ และ $L^* - a^* - b^*$ ล้วนมีพื้นฐานการคำนวณมาจากค่าจากระบบ $X - Y - Z$ ซึ่งบรรยายถึงค่าสีแดง เขียว และน้ำเงินทั้งสิ้น [27]



รูปที่ 2.14 การบรรยายสีในระบบ CIELab มองในระนาบ 3 มิติ โดย H_{ab} (Hue) บรรยายถึงเฉดสีและ C^*_{ab} (Chroma) บรรยายถึงความมันวาวหรือความเข้มของโทนสี [27]

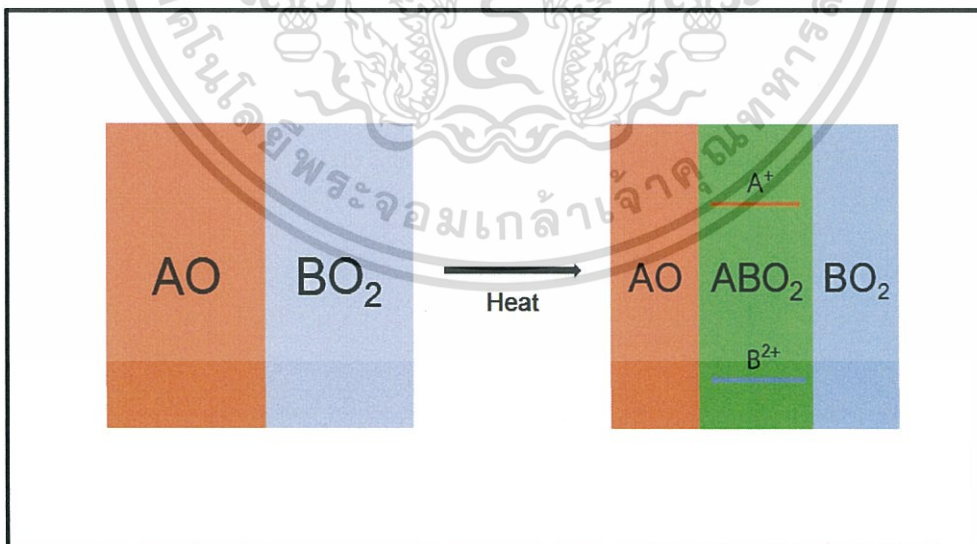
2.4 ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid state reaction)

การเตรียมวัสดุผงจากปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid state reaction) เป็นปฏิกิริยาเคมีที่อาศัยการสลายตัวของสารตั้งต้นที่มีสถานะของแข็งหลังจากได้รับความร้อนเกิดเป็นของแข็งใหม่ ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปออกไซด์หรือเกลือของโลหะ มีปัจจัยอยู่หลายประการที่มีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาสถานะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแข็งระหว่างอนุภาคผงของตัวทำปฏิกิริยา เช่น ธรรมชาติทางเคมีของตัวทำปฏิกิริยา และสารที่เกิดขึ้นใหม่ ขนาดของอนุภาค ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาค ความแตกต่างของอนุภาคในวัสดุผงผสม ความเป็นเนื้อเดียวกันของผงผสม สภาวะของบรรยากาศ อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา โดยทั่วไปแล้วถ้าใช้อนุภาคของวัสดุผงที่มีขนาดใหญ่อัตราการเกิดปฏิกิริยาในวัสดุผงผสมจะลดลงเนื่องจากอนุภาคของวัสดุผงต้องเคลื่อนที่ด้วยระยะทางที่ไกลขึ้น นอกจากนี้คุณภาพของการผสมอนุภาคของตัวทำปฏิกิริยายังเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อระยะทางในการแพร่และปริมาณพื้นที่ผิวที่อนุภาคสัมผัสกัน [6]

วิธีการเตรียมสารโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งสามารถเตรียมได้โดยการบดย่อยด้วยลูกบดแบบเปียก (wet ball milling) หรือบดแห้ง (dry ball milling) แล้วจึงทำให้สารละลายแห้งจนกลายเป็นของแข็ง หลังจากนั้นให้ความร้อนเพื่อให้เกิดการสลายตัวหรือเกิดปฏิกิริยากันระหว่างสารตั้งต้นต่างชนิดกันแล้วเกิดเป็นสารชนิดใหม่ขึ้นโดยกระบวนการดังกล่าวเรียกว่าการเผาแคลไซน์ (calcination) ในกระบวนการนี้จะอาศัยการแพร่โดยใช้ความร้อนเป็นหลัก เนื่องจากสารตั้งต้นส่วนใหญ่อยู่ในรูปของโลหะออกไซด์ ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาที่บริเวณพื้นผิวอนุภาคก่อนและแพร่เข้าไปสู่แกนกลางของอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ดังนั้นการเตรียมวัสดุผงจากปฏิกิริยาสถานะของแข็งนั้นจึงทำได้ง่ายและมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างน้อย แต่วัสดุผงที่เตรียมได้มักจะมีปัญหาเรื่องการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนโต (agglomeration) ทำให้ต้องมีการบดย่อยเพื่อลดขนาด เนื่องจากการบดย่อยต้องมีการใช้ลูกบด (media ball) จึงมีโอกาสทำให้วัสดุผงที่เตรียมได้มีสารแปลกปลอม (contamination) ปะปนมาด้วยและเมื่อนำไปใช้อาจจะทำให้เกิดวัฏภาคที่ไม่ต้องการเกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ได้ [6]



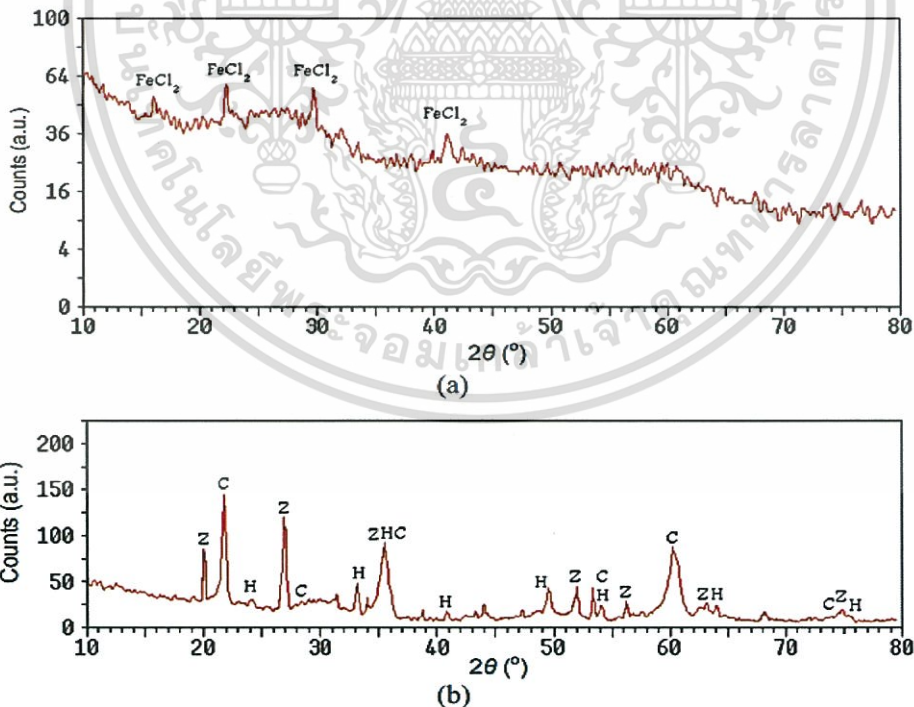
รูปที่ 2.15 แสดงการแพร่ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของสารตั้งต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

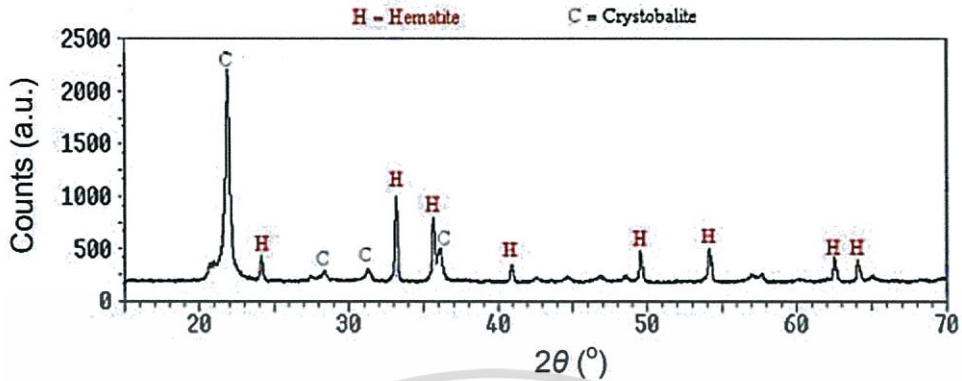
งานวิจัยของ Maryam Hosseini-Zorl [28] ได้ทำการสังเคราะห์ผงสีแดงอนินทรีย์ สำหรับงานเคลือบบนเซรามิก เนื่องจากผงสีแดงจากเหล็กฮีมาไทต์ที่ใช้ในงานเคลือบเซรามิกที่ใช้ในปัจจุบัน มีความเสถียรภาพทางความร้อนค่อนข้างต่ำ เมื่อทำการเผาพร้อมกับเคลือบแล้วจะเกิดการหลอม โดยได้ศึกษาการเตรียมผงสีแดงด้วยวิธีโซลเจล (sol-gel) โดยเตรียมคริสโตแบไลต์ (SiO_2) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และเซอร์คอน (ZrSiO_4) ในอัตราส่วนต่าง ๆ ดังนี้ 1 โมล SiO_2 – 0.2 โมล Fe_2O_3 , 1 โมล ZrSiO_4 – 0.2 โมล Fe_2O_3 และ 0.5 โมล SiO_2 – 0.5 โมล ZrSiO_4 – 0.2 โมล Fe_2O_3 โดยเติม 2 โมล โซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวช่วยหลอม (mineralizer) จากนั้นนำสารตัวอย่างสารตัวอย่างมากรองและอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส และทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

ผลจากการตรวจสอบโครงสร้างของผลึกโดยใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer ; XRD) พบว่าวัตถุดิบก่อนเผาแคลไซน์จะพบโครงสร้างผลึกของเหล็กคลอไรด์ (FeCl_2) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (a) และเมื่อนำสารตัวอย่างทั้ง 3 ตัวอย่าง ทำการเผาที่เวลา 3 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 2.16 (b), 2.17 และ 2.18 พบว่าสารที่ได้หลังการเผาจะเปลี่ยนเป็นสารประกอบออกไซด์ตามองค์ประกอบของสารตั้งต้นที่ใช้

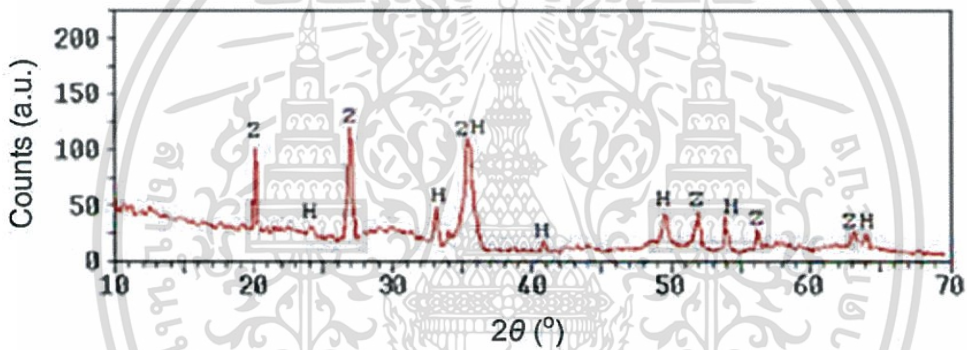


รูปที่ 2.16 ผล XRD ของผงสีแดงจาก 0.5 โมล SiO_2 - 0.5 โมล ZrSiO_4 - 0.2 โมล Fe_2O_3 (a) ก่อนเผา และหลังเผาแคลไซน์ (b) [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 ผล XRD ของผงสีแดงจาก 1 โมล SiO_2 - 0.2 โมล Fe_2O_3 หลังจากเผาแคลไซน์ [28]



รูปที่ 2.18 ผล XRD ของผงสีแดงจาก 1 โมล ZrSiO_4 - 0.2 โมล Fe_2O_3 หลังจากเผาแคลไซน์ [28]

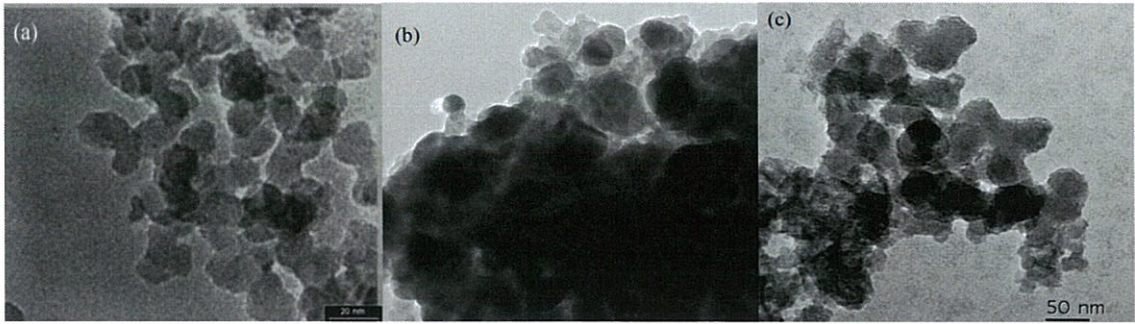
จากผลการวิเคราะห์ค่าพิกัดสีของผงสีที่สังเคราะห์ได้หลังการเผาพร้อมกับเคลือบชนิดต่าง ๆ ด้วยวิธี CIELab ผลที่ได้พบว่า เมดสีจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมี ขนาดอนุภาค และการทำปฏิกิริยากับเคลือบ โดยผงสีที่มีอัตราส่วนของ SiO_2 - Fe_2O_3 - ZrSiO_4 จะได้สีแดงและแดงเข้ม ส่วนผงสีที่มีส่วนผสมของ SiO_2 - Fe_2O_3 จะได้สีน้ำตาลและน้ำตาลเข้ม และผงสีที่มีส่วนผสมของ Fe_2O_3 - ZrSiO_4 ได้ผงสีชมพูปะการัง (coral) โดยผงสีที่มีส่วนผสมระหว่าง SiO_2 - Fe_2O_3 - ZrSiO_4 เมื่อทำการเผาพร้อมกับเคลือบที่มีองค์ประกอบของอัลคาไลน์เอิร์ธ ทำให้ได้ค่า a^* ที่สูงสุด คือ 30.62 ซึ่งมีค่า a^* มากกว่าสูตรอื่นและผงสีที่ยังคงมีสีแดง ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลการวิเคราะห์ค่าพิกัดสีด้วยวิธี CIELab ของผงสีที่มีส่วนผสมระหว่างคริสโตแบไลต์ (SiO_2) เหล็กฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) เซอร์โคเนียมซิลิเกต (ZrSiO_4) และเคลือบชนิดต่าง ๆ [28]

Code of frit	Color	L^*	a^*	b^*	c^*	h^*
Hematite-silica pigment						
E	Red	39.92	26.59	18.40	32.33	34.69
L	Light red	45.21	27.49	18.80	33.30	34.36
A	Brown	39.26	13.99	11.87	18.35	40.33
B	Brown	41.60	11.51	9.23	14.76	38.72
Hematite-silica-zircon (ternary) pigment						
E	Red	39.46	30.62	23.61	38.67	37.63
L	Red	47.40	30.24	27.34	40.77	42.12
A	Red	45.83	27.45	19.58	33.72	35.50
B	Red (dark)	48.50	27.55	24.41	36.80	41.54
Hematite-zircon pigment						
E	Coral	33.13	17.65	9.92	20.25	29.34
L	Coral	36.79	16.67	10.67	19.80	32.63
A	Coral	33.56	14.82	8.45	17.06	29.69
B	Coral	34.03	17.55	9.54	19.98	28.52

จากการวิเคราะห์สารตัวอย่างโดยใช้เทคนิคการตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ดังแสดงในรูปที่ 2.19 และ 2.20 ตามลำดับ พบกลุ่มอนุภาคของเหล็กฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) จำนวนมากปกคลุมที่บริเวณพื้นผิวของของคริสโตแบไลต์ (SiO_2) และเซอร์โคเนียมซิลิเกต (ZrSiO_4) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่ากลุ่มอนุภาคของเหล็กฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) ที่ปกคลุมบริเวณพื้นผิวของคริสโตแบไลต์ (SiO_2) และเซอร์คอน (ZrSiO_4) จะส่งผลให้ได้ผงสีแดงที่เข้มขึ้น จากผล SEM แสดงให้เห็นว่าผงสีที่มีอัตราส่วนระหว่างเหล็กฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) กับคริสโตแบไลต์ (SiO_2) ที่เผาพร้อมกับเคลือบแล้วพบว่าจะเกิดเฟสแก้วเกิดขึ้นแสดงในรูป ซึ่งไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน นอกจากนี้ผงสีที่มีอัตราส่วนระหว่างเหล็กฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) กับเซอร์คอน (ZrSiO_4) พบว่าหลังเผาพร้อมกับเคลือบแล้ววัฏภาคฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) จะเกิดการหลอม จากผลทั้งหมดสรุปได้ว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดคือ ผงสีที่มีอัตราส่วนระหว่างคริสโตแบไลต์ (SiO_2) เซอร์คอน (ZrSiO_4) และเหล็กฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) เพราะว่ามีเฉดสีแดง มีการกระจายตัวที่ดีและผงสีที่ได้จะมีความเสถียรภาพทางความร้อนสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 ภาพถ่ายจาก TEM ของผงสีแดง (a) $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{ZrSiO}_4$ (b) $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{ZrSiO}_4$ และ (c) $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ [28]



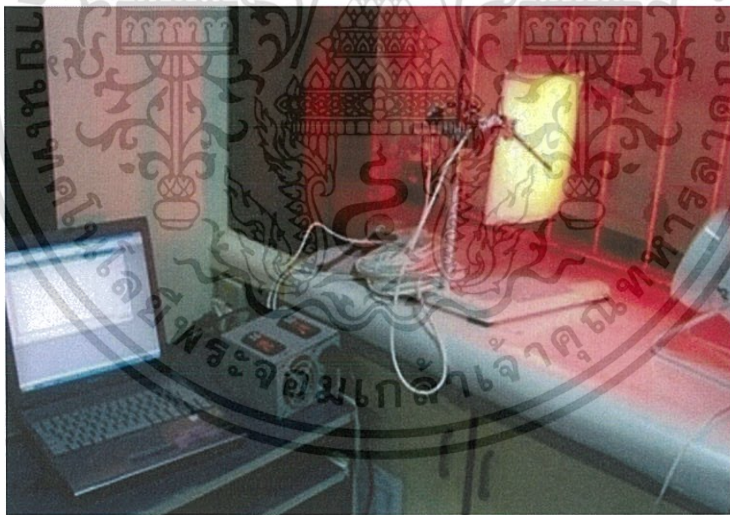
รูปที่ 2.20 ภาพถ่ายจาก SEM ของผงสีแดง ๆ ที่เผาพร้อมกับสีเคลือบ (a) $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{ZrSiO}_4$ (b) $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{ZrSiO}_4$ และ (c) $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ [28]

งานวิจัยของ Eliane Coser และคณะ [29] ได้ทำการทดลองศึกษาเปรียบเทียบค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรด (IR) ของสีสะท้อนความร้อนสีต่าง ๆ 4 ตัวอย่าง (cool pigment) และสีสูตรมาตรฐาน 4 ตัวอย่าง โดยได้ทำการเตรียมสีสูตรต่าง ๆ โดยการผสมกับเรซิน ตัวทำละลายและสารเติมแต่งอื่น ๆ ตามอัตราส่วนต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 โดยนำสีตัวอย่างที่ทำการผสมแล้วมาทดลองทาลงบนแผ่นซีเมนต์ขนาด $20 \times 20 \times 0.8$ เซนติเมตร. จากนั้นนำสีตัวอย่างที่เคลือบลงบนแผ่นซีเมนต์และทดลองการสะท้อนรังสีอินฟราเรดเป็นเวลา 1 ชั่วโมงจากนั้นวัดอุณหภูมิด้านที่ฉายรังสีอินฟราเรด (IR) และด้านหลังแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์เพื่อศึกษาความแตกต่างของอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 2.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 อัตราส่วนของสีที่ผลิตในห้องปฏิบัติการ [29]

COMPONENT 1		PARTS (%)
Resins	Hydroxylated acrylic	50.00
Solvent	Organic: Ethyl glycol acetate, Ethyl acetate and Xylene	27.50
Thickener	Tixogel	0.20
Dispersant	Additive BYK 108	0.30
Pigment	TiO ₂	22.00
Total		100.00
COMPONENT 2		PARTS (%)
Catalyst	Isocyanate AQ - 6008	38.00
Solvent	Organic	62.00
Total		100.00



รูปที่ 2.21 การทดลองการสะท้อนแสงสีอินฟราเรดของเม็ดสี [29]

ผลการวิเคราะห์ค่าพิกัดสีของสีสะท้อนรังสีอินฟราเรด (IR) และสีแบบมาตรฐานด้วยวิธี CIELab แสดงในตารางที่ 2.3 พบว่าค่า L* ของสีเหลืองสะท้อนความร้อน (cool yellow) มีค่าเท่ากับ 64.35 ± 0.16 ซึ่งมีค่ามากกว่าสีเหลืองมาตรฐาน (standard yellow) และยังมีค่า b* สูงถึง 53.19 ± 0.15 ซึ่งคล้ายกับสีตัวอย่างอื่น ๆ นอกจากนี้ค่า ΔE ยังมีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยที่ค่า ΔE จะบอกถึงความแตกต่างของเฉดสี

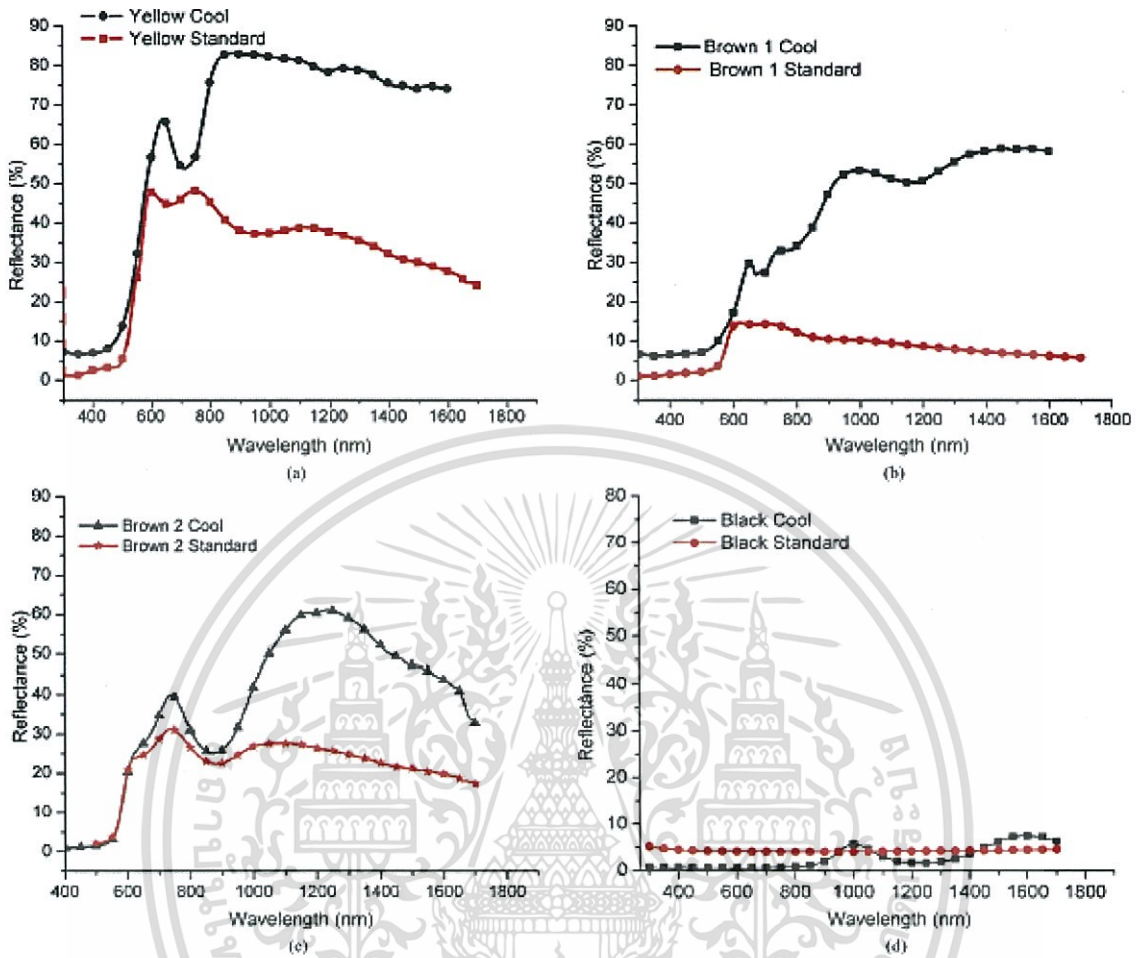
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ผลการวิเคราะห์ค่าพิกัดสีของสีสะท้อนรังสีอินฟราเรด (IR) และสีแบบมาตรฐานด้วยวิธี CIE-Lab [29]

Sample	Colour coordinates			ΔE
	L*	a*	b*	
Standard	61.74±0,32	20.62±0,18	52.52±0,22	3.05 ± 0.37
Yellow	64.35±0,16	22.64±0,15	53.19±0,15	
Cool Yellow				
Standard Black	28.48±0,17	-0.75±0,05	-0.99±0,10	0.85 ± 0.10
Cool Black	28.11±0,22	-0.85±0,07	-0.72±0,08	
Standard Brown 1	37.84±0,11	18.44±0,11	16.44±0,05	1.51 ± 0.18
Cool Brown 1	38.23±0,04	19.65±0,12	17.73±0,11	
Standard Brown 2	41.20±0,28	27.61±0,09	22.84±0,20	2.51 ± 0.30
Cool Brown 2	44.63 ±0,06	29.75±0,16	23.15±0,015	

ผลการวัดค่าสะท้อนรังสีในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (UV) วิสิเบิล และ อินฟราเรดใกล้ (NIR) แสดงในรูปแบบที่ 2.22 (a - c) พบว่าสีสะท้อนรังสีอินฟราเรด (IR) จะมีค่าการสะท้อนรังสีสูงกว่าสีสูตรมาตรฐาน โดยจะสะท้อนรังสี UV และวิสิเบิลได้สูงถึงประมาณร้อยละ 28 - 80 ส่วนสีแบบมาตรฐานสะท้อนรังสีวิสิเบิลและรังสีอินฟราเรดใกล้ (NIR) ได้ค่อนข้างต่ำ ส่วนสีดำในรูปแบบที่ 2.22 (d) จะมีค่าการสะท้อนรังสีวิสิเบิลที่ต่ำมาก โดยสีเหลืองและสีน้ำตาลมีค่าการสะท้อนรังสีที่ค่อนข้างสูง

ผลการทดลองการสะท้อนแสงสีอินฟราเรดของสีพบว่าหลังฉายรังสีอินฟราเรด (IR) ลงบนแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ที่เคลือบด้วยสีสูตรต่าง ๆ และเมื่อวัดอุณหภูมิทั้งสองด้านโดย ΔT_1 คืออุณหภูมิด้านหน้าสีเคลือบ และ ΔT_2 คืออุณหภูมิด้านหลังสีเคลือบดังแสดงในตารางที่ 2.4 พบว่าอุณหภูมิของสีสะท้อนความร้อนหลังแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์มีค่าต่ำกว่าสีสูตรมาตรฐาน โดยสีสะท้อนความร้อนสีน้ำตาลจะมีอุณหภูมิหน้าแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์สูงที่สุดถึง 45.8 องศาเซลเซียส และสีเหลืองสะท้อนความร้อนมีค่าอุณหภูมิหลังแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์เท่ากับ 39.4 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าต่ำสุดและเป็นทางเลือกที่ดีในการเลือกใช้ทำสีสะท้อนความร้อนที่ใช้ตามอาคารบ้านเรือน นอกจากนี้ค่าความอึดตัวของสี (E) พบว่าค่าความอึดตัว (E) ของสีทั้งหมดอยู่ในช่วง 0.87 - 0.92 ดังแสดงในตารางที่ 2.5 ซึ่งสีสะท้อนความร้อนจะมีค่าการสะท้อนรังสีในช่วง UV วิสิเบิลและ NIR ได้ดีกว่าสีสูตรมาตรฐาน แสดงให้เห็นว่าสีสะท้อนความร้อนเหมาะสมกับการนำมาใช้ในงานเคลือบสะท้อนความร้อนตามอาคารบ้านเรือน



รูปที่ 2.22 ค่าสะท้อนรังสี UV วิสิเบิล และ NIR (a) สีเหลือง (b) สีนํ้าตาล 1, (c) สีนํ้าตาล 2 และ (d) สีดำ [29]

ตารางที่ 2.4 ผลของอุณหภูมิหลังการฉายรังสีอินฟราเรด [29]

Sample	Front of Panel (°C)	Behind Panel (°C)	ΔT_1 (°C)	ΔT_2 (°C)
Uncoated	51.3 ± 0.21	40.8 ± 0.12	10.5	
Standard	56.2 ± 0.77	40.3 ± 0.78	15.7	
Yellow				
Cool	51.7 ± 0.3	39.4 ± 0.10	12.3	-0.9
Yellow				
Standard Black	61.6 ± 0.07	45.8 ± 0.20	15.8	
Cool Black	59.5 ± 0.14	45.3 ± 0.15	14.3	-0.5
Standard Brown 1	60.3 ± 0.70	40.3 ± 0.21	20.0	
Cool Brown 1	54.3 ± 1.20	41.3 ± 0.85	13.1	+1.0
Standard Brown 2	58.6 ± 0.07	44.6 ± 0.07	14.0	
Cool Brown 2	53.9 ± 0.08	41.9 ± 0.07	12.0	-2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 การสะท้อนรังสีและการแผ่รังสีของสี [29]

Sample	Emissivity	Solar reflectance
Cool Yellow	0.92	0.52
Standard Yellow	0.87	0.31
Cool Black	0.90	0.06
Standard Black	0.91	0.05
Cool Brown 1	0.90	0.29
Standard Brown 1	0.92	0.85
Cool Brown 2	0.89	0.24
Standard Brown 2	0.89	0.18

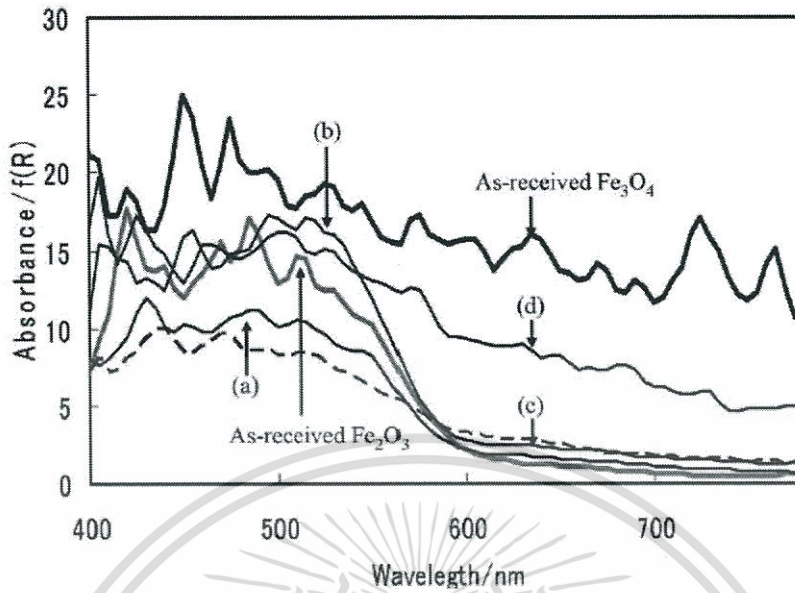
งานวิจัยของ Mei Kikumoto [30] และคณะได้ศึกษาผลกระทบของการเติมซิลิกอนไดออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ในการสังเคราะห์ผงสีแดงจากเหล็กออกไซด์ โดยทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีการปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid state reaction) โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลขององค์ประกอบต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 อัตราส่วนโดยโมลขององค์ประกอบ [30]

Sample No.	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
F2A	2	1	0
FA	1	1	0
FA2	1	2	0
F2AS3	2	1	3
FAS2	1	1	2
FA2S3	1	2	3

จากการศึกษาการดูดกลืนแสงโดยการนำสูตร FA2 ที่เผาที่อุณหภูมิต่างกันไปทำการวัดการดูดกลืนแสงผลที่ได้แสดงในรูปที่ 2.23 [30] พบว่ามีการดูดกลืนแสงในช่วง 410 – 560 นาโนเมตรในการเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส เมื่อที่เผาอุณหภูมิสูงขึ้นจะได้ผงสีแดงจะเป็นสีน้ำตาลแดง และเหล็กฮีมาไทต์ (Fe₂O₃) เกิดการเปลี่ยนเป็นสารประกอบแมกนีไทต์ (Fe₃O₄) ที่อุณหภูมิที่ 1450 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงให้เห็นได้จากช่วงการดูดกลืนแสงที่เห็นเพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 การดูดกลืนแสงของผงสีแดงสูตร FA2 ที่เผาอุณหภูมิต่าง ๆ (a) 1250 °C, (b) 1300 °C, (c) 1350 °C และ (d) 1450 °C [30]

จากการวัดฟลักซ์สีของผงสีแดงสูตร FA2 พบว่า ผงสีที่เผา 1300 องศาเซลเซียส มีค่าความเป็นสีแดงสูงที่สุด เมื่อเทียบกับผงสีจากการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.7 และได้ทำการวัดฟลักซ์สีของผงสีแดงทุกสูตรจากตารางที่ 2.8 พบว่าเมื่อใส่ซิลิกอนไดออกไซด์ลงไปแล้วทำให้ค่าความเป็นสีแดงเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แสดงว่าซิลิกอนไดออกไซด์มีผลต่อสีของผงสีแดงทำให้ผงสีแดงมีความสดมากขึ้น โดยพบว่าสูตร FA2S3 เป็นสูตรที่ให้ค่าสีแดง (a^*) มากที่สุด

ตารางที่ 2.7 การวัดฟลักซ์สีของผงสีแดงสูตร FA2 ที่เผาอุณหภูมิต่างๆ [30]

Synthesized temperature	L*	a*	b*	C*
1,250°C	35.10	22.86	17.14	28.57
1,300 °C	30.56	24.37	16.34	29.34
1,350 °C	34.17	13.40	12.42	18.27
1,450 °C	22.90	6.210	3.780	7.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 การวัดพิกัดสีของผงสีแดง [30]

	L*	a*	b*	C*
As-received Fe ₂ O ₃	33.79	29.13	21.07	35.95
F2A	24.68	18.63	10.88	21.57
FA	26.55	21.47	13.80	25.52
FA2	30.56	24.37	16.34	29.34
F2AS3	31.89	25.87	21.84	33.85
FAS2	32.82	28.12	25.37	37.87
FA2S3	36.72	28.97	28.48	40.62

จากการงานวิจัยครั้งนี้พบว่าเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้เหล็กเปลี่ยนวัฏภาคจากฮีมาไทต์เป็นแมกนีไทต์ โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการเผาอยู่ที่ 1300 องศาเซลเซียส เมื่อใส่อะลูมิเนียมออกไซด์ลงไปมากขึ้นจะทำให้ผงสีเหล็กออกไซด์มีสีแดงมากขึ้น และเมื่อใส่ซิลิกอนไดออกไซด์รวมลงไปจะพบว่าสีแดงจะเป็นสีแดงสว่างมากขึ้น รวมถึงเมื่อปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์มากขึ้นจะทำให้ผงสีแดงเป็นสีแดงสดมากขึ้น ซึ่งสูตรที่ดีที่สุดคือ FA2S3

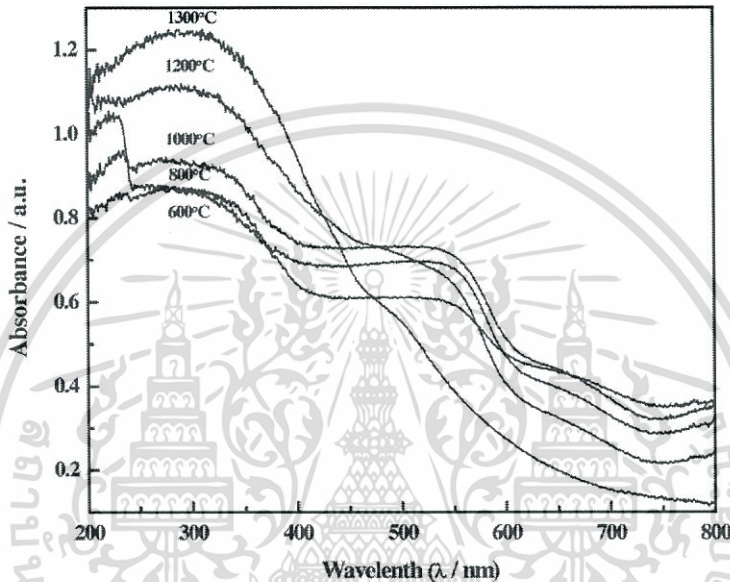
งานวิจัยของ Kyu-ri Pyon และ Byung-ha Lee [31] ได้ศึกษาการพัฒนาผงสี Fe - ZrSiO₄ ที่เผาอุณหภูมิสูง โดยจะทำการพัฒนาให้ผงสีเป็นผงละเอียดและเป็นเนื้อเดียวกันโดยวิธีโซล - เจล ที่เผาที่อุณหภูมิต่ำ โดยใช้องค์ประกอบเริ่มต้นในการสังเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 2.9 ซึ่งได้มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของเหล็กและทำการวิเคราะห์ลักษณะผงสีที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยสีที่ดีที่สุดที่สังเคราะห์ได้เป็นสีชมพูปะการัง (coral)

ตารางที่ 2.9 องค์ประกอบของสารตั้งต้น (อัตราส่วนโดยโมล) [31]

Samples	Si (OC ₂ H ₅) ₄	ZrOCl ₂ · 8H ₂ O	FeCl ₃ · 6H ₂ O	H ₂ O	HCl	C ₂ H ₅ OH
0.1 Molar	1	1	0.1	S/ZR: H ₂ O = 20:20	0.2	2
0.15 Molar	1	1	0.15	S/ZR: H ₂ O = 20:20	0.2	2
0.2 Molar	1	1	0.2	S/ZR: H ₂ O = 20:20	0.2	2
0.3 Molar	1	1	0.3	S/ZR: H ₂ O = 20:20	0.2	2
0.5 Molar	1	1	0.5	S/ZR: H ₂ O = 20:20	0.2	2
0.6 Molar	1	1	0.6	S/ZR: H ₂ O = 20:20	0.2	2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองเมื่อวัดสมบัติสีของผงสีด้วยเครื่องยูวี - วิซิเบิล สเปกโตรมิเตอร์ โดยนำผงสีที่เตรียมจากสารตั้งต้น (FeCl_3) 0.2 โมลาร์ เผาที่อุณหภูมิ 600, 800, 1000, 1200 และ 1300 องศาเซลเซียส มาทำการวัดสีด้วยเครื่องยูวี - วิซิเบิล สเปกโตรมิเตอร์ สเปกตรัมที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.24 พบว่าผงที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 1000 – 1300 องศาเซลเซียส เริ่มเกิดโครงสร้างเซอร์โคเนียมซิลิเกต (ZrSiO_4) เกิดขึ้น และผงสีเป็นสีชมพูปะการัง เมื่อทำการวัดค่าพิกัดสีของและผงสีที่ผสมกับเคลือบที่เผาผลที่ได้ดังตารางที่ 2.10 [31]



รูปที่ 2.24 การวัดการดูดกลืนแสงของ 0.2 M - FeCl_3 ที่เผา ณ อุณหภูมิต่าง ๆ [31]

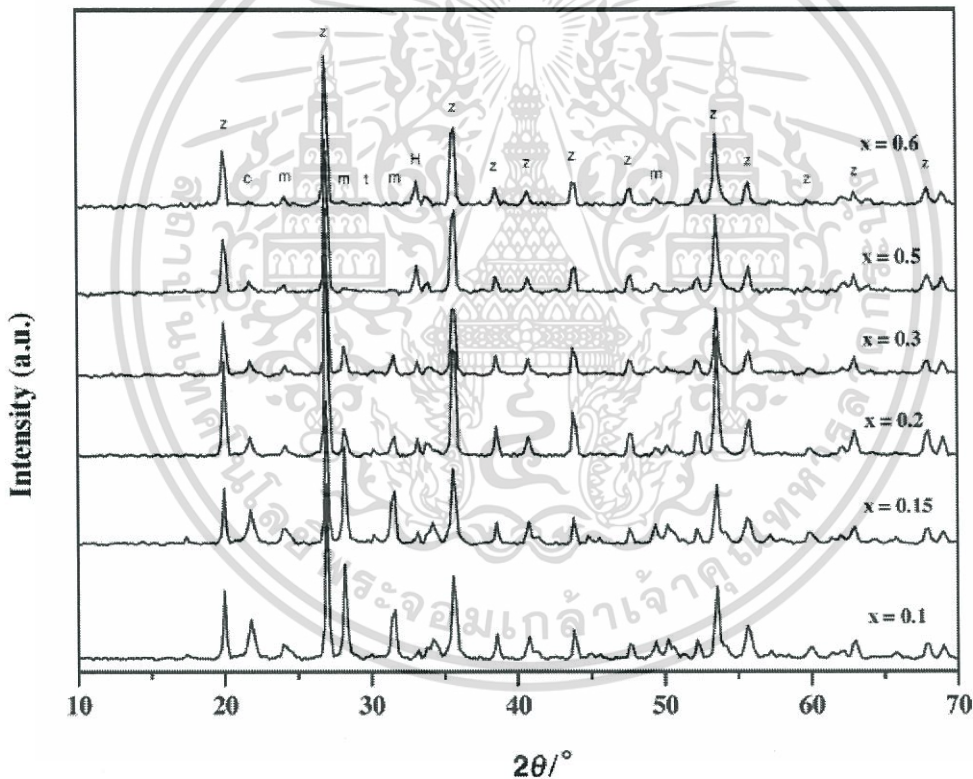
ตารางที่ 2.10 ผงสีและสีเคลือบที่มีอัตราส่วนหลักต่างกันเผาที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส [31]

samples	pigment powders			glazed tiles (10%)		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
Commercial	54.33	15.68	9.43	67.87	12.50	18.42
1M-1300	60.31	12.71	7.08	76.60	6.54	14.63
1.5M-1300	59.63	13.11	6.16	78.39	4.51	16.69
2M-1300	59.31	8.68	5.64	68.63	17.13	24.09
3M-1300	55.73	10.32	6.58	63.66	14.90	21.07
5M-1300	41.31	11.56	5.27	54.83	18.89	22.91
6M-1300	47.74	8.94	3.53	44.09	17.49	20.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อใช้ความเข้มข้นของเฟอร์ริกคลอไรด์เริ่มต้นที่ 0.1 และ 0.15 โมลาร์จะได้ผงสีที่มีสีชมพูสว่างและมีค่าใกล้เคียงกับผงสีทางการค้ามากที่สุด เมื่อผงสีนำมาทำเป็นสีเคลือบ สีของผงสีจะเปลี่ยนไปจากเดิมโดยผงสีที่เตรียมจากการใช้ความเข้มข้นของเฟอร์ริกคลอไรด์ที่ 0.3, 0.5 และ 0.6 โมลาร์มีค่าใกล้เคียงกับสีเคลือบทางการค้ามากที่สุด

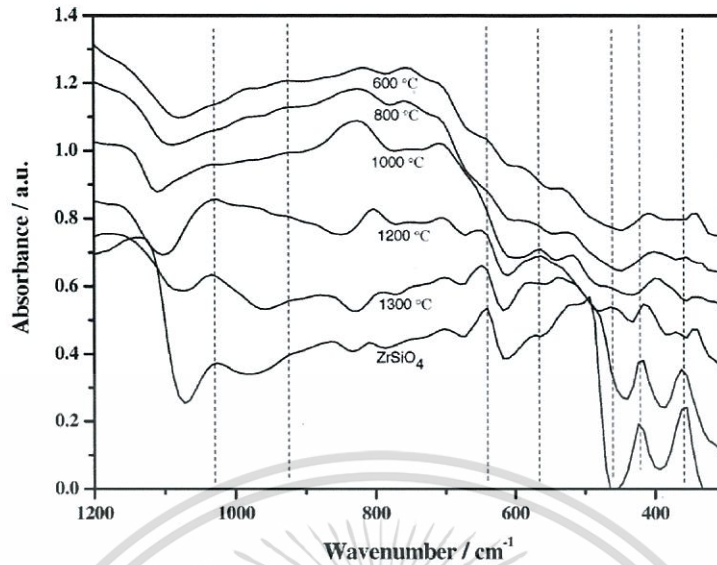
การศึกษาผลของทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงสี Fe – ZrSiO₄ โดยการเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลของเหล็ก ที่เผาอุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2.25 พบว่าผงสีที่เตรียมได้จากเฟอร์ริกคลอไรด์ที่อัตราส่วน 0.5 - 0.6 โมลาร์ มีการเติบโตของเหล็กฮีมาไทต์ (Fe₂O₃) ส่งผลให้วัฏภาคโมนอกลิติกและเตตระโกนอนลดลงและมีฟิซของเซอร์โคเนียมซิลิเกตที่เพิ่มขึ้นจึงเกิดเป็นสารประกอบ Fe – ZrSiO₄ ซึ่งเป็นผงสีชมพูปะการัง



รูปที่ 2.25 ภาพ XRD ของ (Fe)_x - ZrO₂ - SiO₂ โดยมีอัตราส่วนโดยโมลของเหล็กที่ต่างกัน เมื่อ Z: เซอร์โคเนียม- ซิลิเกต m: โมนอกลิติก t: เตตระโกนอน H: ฮีมาไทต์ C: คริสโตบาไรต์ [31]

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี โดยใช้ผงสีที่เตรียมได้จากเฟอร์ริกคลอไรด์ 0.2 โมลาร์ ของเหล็กที่เผาช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ พบว่า เซอร์โคเนียมซิลิเกต มีแถบเฉพาะที่ 1025, 920, 640, 420 และ 360 cm⁻¹ และฮีมาไทต์ มีช่วงการดูดกลืนแสงอยู่ที่ 565, 460 และ 370 cm⁻¹ แสดงดังรูปที่ 2.26 [31]

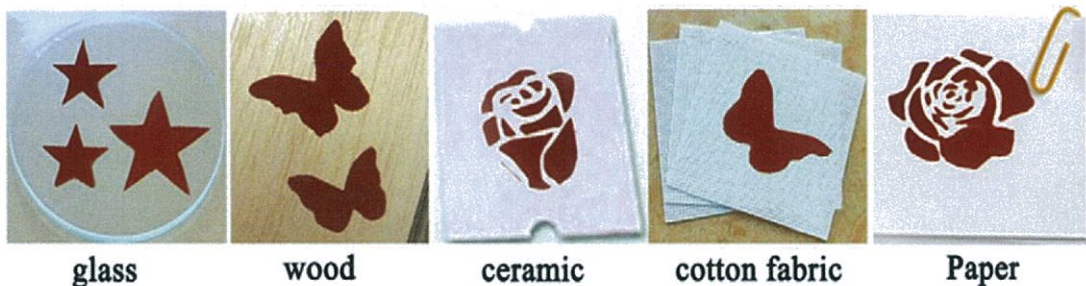
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 ภาพ IR ของผงซิลิเกตส่วนโดยโมล 0.2 M ของเหล็ก ที่เผาช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ [31]

จากงานวิจัยนี้พบว่าอุณหภูมิในการเผาและอัตราส่วนโดยโมลของเหล็กมีผลต่อการเกิดสีของผงสีชมพูปะการัง โดยอุณหภูมิการเผาที่ดีที่สุดอยู่ที่ 1000 – 1300 องศาเซลเซียส และการเตรียมโดยใช้สารตั้งต้นเฟอร์ริกคลอไรด์ อัตราส่วน 0.2 โมลาร์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุดที่ทำให้ได้สีชมพูปะการังที่มีความสว่างและสด

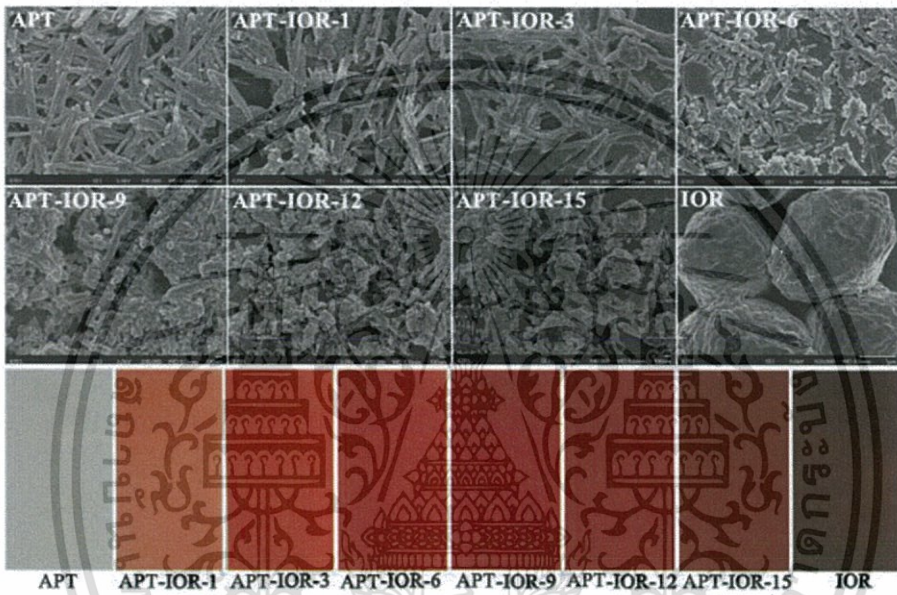
งานวิจัยของ Guangyan Tian และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ผงสีแดงอนินทรีย์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ที่เตรียมจากวิธีการไฮโดรเทอร์มอลที่เวลาต่าง ๆ ตั้งแต่ 2 - 24 ชั่วโมง โดยการใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_2) กับแอสต้าพูโกท์ (ATP) จากนั้นนำมาทำการทดลองพ่นเคลือบด้วยวิธีการสเปรย์ โดยทดลองพ่นเคลือบลงวัสดุต่างๆ เช่น แก้ว เซรามิก กระดาษ ผ้าฝ้าย ดังแสดงในรูปที่รูป 2.27 โดยใช้เครื่องพ่นแบบแอร์บรัช (airbrush) โดยพบว่าเมื่ออัตราส่วนของเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_2) เพิ่มขึ้นจะทำให้ผงสีมีเฉดแดงมากขึ้น [5]



รูปที่ 2.27 การทดลองพ่นเม็ดสีแดงไฮบริดจลวัสดุต่าง ๆ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะส่องกราด (SEM) สรุปได้ว่าแอปต้าพูโกท์ (ATP) จะช่วยป้องกันการรวมตัวของอนุภาคเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ได้อย่างมีประสิทธิภาพและยังส่งผลให้ได้อนุภาคในระดับนาโนของเหล็กออกไซด์ ทำให้การกระจายตัวของเหล็กออกไซด์ สม่าเสมอมากขึ้น ซึ่งสารตัวอย่างที่เหมาะสมที่สุดของงานวิจัยนี้คือสารตัวอย่าง (APT-IOR-12) ซึ่งมีอัตราส่วนแอปต้าพูโกท์ (ATP) ต่อเฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_2$) เท่ากับร้อยละ 29.61 : 68.37 เนื่องจากการกระจายตัวของอนุภาคเหล็กออกไซด์ที่ดีที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.28



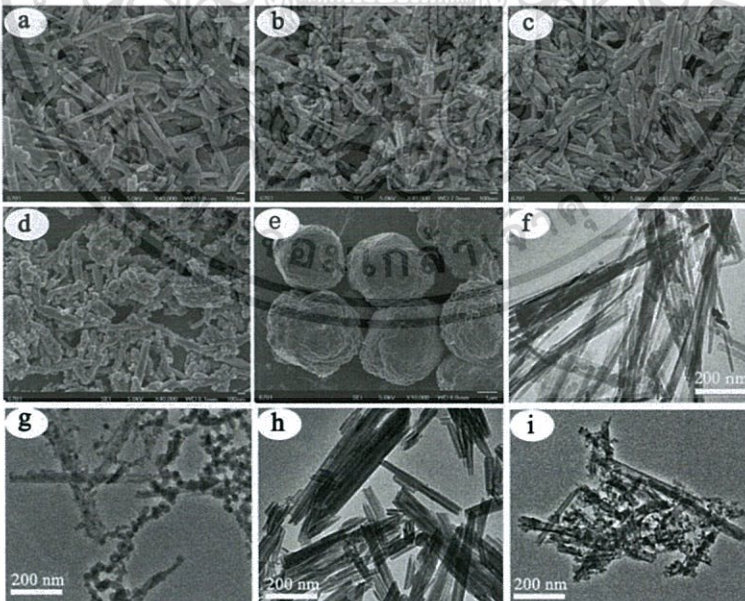
รูปที่ 2.28 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาและสีของผงสีแดงไฮบริดจ์ [5]

จากการศึกษาค่าพิกัดสีของผงสีแดงไฮบริดจ์ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 2.11 พบว่า APT - IOR - 12 คือ แสดงค่าพิกัด L^* เท่ากับ +41.1 และมีค่า a^* ที่สูงสุดเท่ากับ +36.3 ค่าพิกัด b^* เท่ากับ +14.8 ซึ่งผงสีที่สังเคราะห์ได้สีจะออกไปในเฉดสีแดงโดยค่า a^* จะเพิ่มขึ้นและค่าพิกัด b^* จะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_2$) และเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล โดยเม็ดสีที่สังเคราะห์ได้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานเคลือบบนเซรามิก กระดาษ ผ้าฝ้าย เป็นต้น นอกจากนี้ยังราคาถูกและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 2.11 ค่าพิกัดสีของผงสีแดงไฮบริดจ์ [5]

Samples	L^*	a^*	b^*
APT	+ 88.0	-0.3	-1.2
APT-IOR-1	+ 65.9	+ 16.3	+ 27.2
APT-IOR-3	+ 51.3	+ 24.2	+ 22.0
APT-IOR-6	+ 44.1	+ 34.2	+ 19.0
APT-IOR-9	+ 42.2	+ 36.1	+ 16.3
APT-IOR-12	+ 41.1	+ 36.3	+ 14.8
APT-IOR-15	+ 39.8	+ 33.1	+ 11.8
Fe_2O_3	+ 34.2	+ 1.2	-4.3

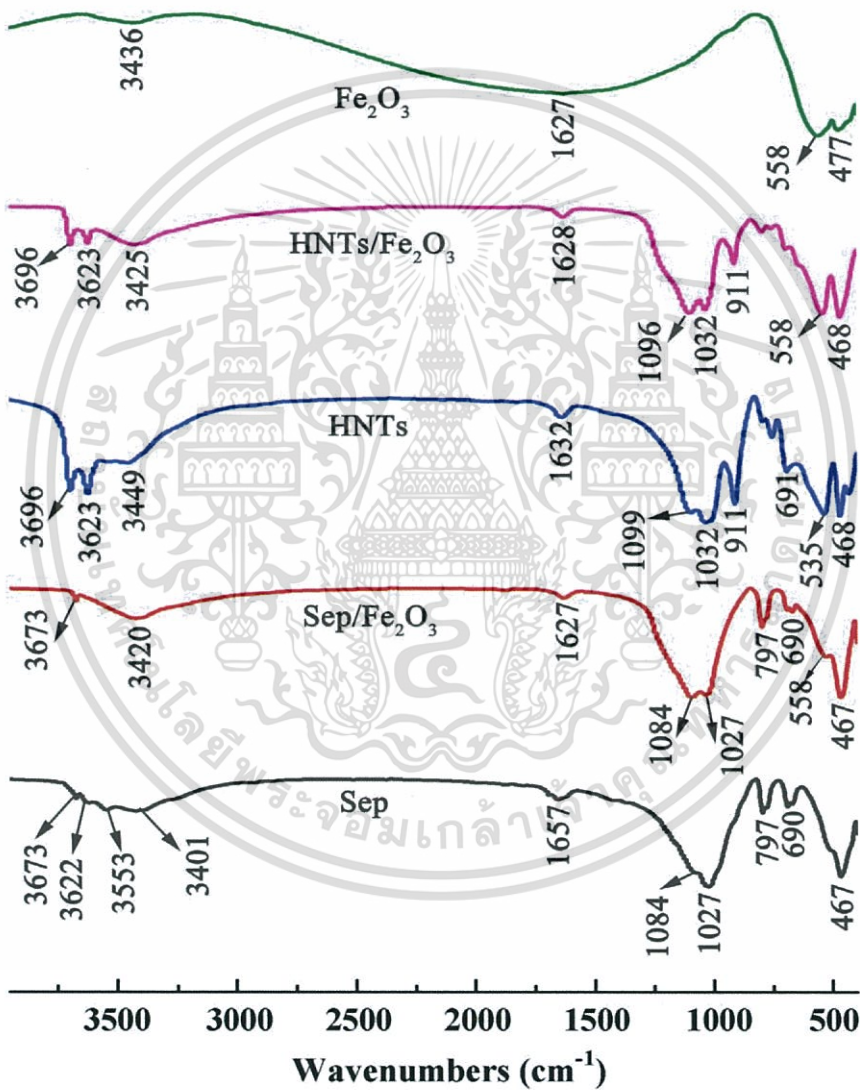
งานวิจัยของ Guangyan Tian [32] และคณะได้ศึกษาการสังเคราะห์สีแดงไฮบริดจ์จากดินสอพอ-ไลท์ (Sep) กับฮอลลอยด์ไลท์ (HNTs) ที่มีราคาถูกและให้สีแดงที่สดและเสถียร ซึ่งดินทั้งสองชนิดนี้มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลโดยใช้ดินสอพอไลท์ (Sep) หรือฮอลลอยด์ไลท์ (HNTs) กับเฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($FeCl_2 \cdot 6H_2O$) ได้เป็น Sep/ Fe_2O_3 และ HNTs/ Fe_2O_3 ซึ่งเป็นเม็ดสีแดงไฮบริดจ์ และพบว่าความเข้มของสีแดงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของเหล็กออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.29 ซึ่งทั้ง Sep/ Fe_2O_3 และ HNTs/ Fe_2O_3 มีการกระจายตัวของเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) บนดินสอพอไลท์ (Sep) และฮอลลอยด์ไลท์ (HNTs) ที่ดีทำให้ได้ผงสีที่ดี



รูปที่ 2.29 ภาพ SEM ของ Sep (a), Sep/ Fe_2O_3 (b), HNTs (c), HNTs/ Fe_2O_3 (d) และ Fe_2O_3 (e); รูป TEM ของ Sep (f), Sep/ Fe_2O_3 (g), HNTs (h), and HNTs/ Fe_2O_3 (i). [32]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) พบว่าจากการสังเคราะห์เกิดวัฏภาคเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ในเมมตีสแดงไฮบริดจ์ Sep/ Fe_2O_3 และ HNTs/ Fe_2O_3 และทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคป (FTIR) จะพบว่าช่วงการดูดกลืนแสงของ Fe-O-Fe ที่ 555 cm^{-1} (stretching) และ 474 cm^{-1} (bending) และ Si-O-Si ที่ $1200\text{-}1000\text{ cm}^{-1}$ (stretching) และ 535 cm^{-1} (bending) ดังแสดงในรูปที่ 2.30 [32]



รูปที่ 2.30 ภาพสเปกตร้าของ Sep, HNTs และเมมตีสแดงไฮบริดจ์ Sep/ Fe_2O_3 และ HNTs/ Fe_2O_3 [32]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.12 เปรียบเทียบค่า L^* , a^* และ b^* ของเม็ดสีและสารต่าง ๆ [32]

Pigments	L^*	a^*	b^*
Sep/ Fe_2O_3	39.2	25.1	17.6
HNTs/ Fe_2O_3	33.6	34.4	24.9
Al/ SiO_2/Fe_2O_3	113.2	22.8	78.6
$SiO_2-0.2Fe_2O_3$	35.0–44.0	10.0–37.0	3.0–27.0
$Ce_{0.95}Mn_xPr_{0.05x}O_2$ (Si 2)	50.7	25.8	24.7
Fe_2O_3	33.8	29.1	21.1
$Fe_2O_3/Silica$	35–50	9–16	–
$Ce_{0.95}Zr_{0.02}Pr_{0.03}O_2$	47.6	22.6	22.1
COUR-1-1100 °C	58.5	22.8	34.1
$Ce_{0.8}Fe_{0.08}Pr_{0.12}O_{1.9}$	43.0	18.7	17.4
$Ba_{0.5}Sr_{0.5}Zn_{2x}Ni_xSi_2O_7$	60.1–70.8	17.7–22.5	–28.9–4.9
$YAl_{0.97}Cr_{0.03}O_3$	40.7	30.0	23.9
Fe_2O_3	37.4	27.5	19.8
Fe_2O_3	46.9	14.6	8.9
Fe_2O_3 coated quartz	60.8	25.2	24.5

จากการศึกษาและเปรียบเทียบค่าพิกัดสีดังแสดงในตารางที่ 2.12 พบว่าค่า a^* ของผงสีแดงไฮบริดจ์ Sep/ Fe_2O_3 และ HNTs/ Fe_2O_3 เท่ากับ 25.10 และ 34.4 ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกัน ค่า b^* ของเม็ดสีแดงไฮบริดจ์ Sep/ Fe_2O_3 และ HNTs/ Fe_2O_3 เท่ากับ 17.6 และ 24.9 ตามลำดับ แสดงให้ว่าเม็ดสีทั้งสองเป็นสีแดง แต่เม็ดสีแดงไฮบริดจ์ HNTs/ Fe_2O_3 จะเห็นเป็นสีเหลืองมากกว่า Sep/ Fe_2O_3 ซึ่งผงสีแดงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดไฮบริดจ์ของ Sep และ HNTs ร่วมกับเหล็กออกไซด์ จากการทดสอบความเสถียรของเม็ดสีแดงไฮบริดจ์ โดยการนำไปทดสอบความต้านทานทางแสง ทดสอบกรด-เบส ทดสอบสารละลายอินทรีย์ทั้งแบบมีขี้ผึ้งและไม่มีขี้ผึ้ง พบว่าค่าพิกัดสีของผงสีและค่าการสะท้อนสีนั้นไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนักแสดงให้เห็นว่าผงสีที่สังเคราะห์ได้นั้นมีเสถียรภาพสูง

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.1 ขวดพลาสติกโพลีโพรพิลีน ขนาด 240 มิลลิลิตร

3.1.2 ซ้อนตักสารอะลูมิเนียม

3.1.3 แผ่นอะลูมิเนียมฟลอยด์

3.1.4 ลูกบดอะลูมินาขนาด 5 มิลลิเมตรและ 10 มิลลิเมตร

3.1.5 ปีกเกอร์

3.1.6 เครื่องบดความเร็วสูง (planetary ball mill)

3.1.7 ตะแกรงพลาสติก

3.1.8 กระจบอทวงสาร

3.1.9 ตู้อบ

3.1.10 โกร่งบดสาร

3.1.11 ครูชีเปิดอะลูมินา

3.1.12 เครื่องอัลตราโซนิค (ultrasonic cleaner)

3.1.13 กระจบอทน้ำกลั่น

3.1.14 เครื่องชั่งทศนิยมสี่ตำแหน่ง

3.1.15 เครื่องตรวจวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer; XRD) รุ่น XRD-6100

บริษัท SHIMADZU

3.1.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy; SEM) รุ่น QUANTA 250 บริษัท FEI

3.1.17 เครื่องตรวจวัดสี (spectrophotometer) รุ่น CM – 2600d บริษัท Konica Minota

3.1.18 เครื่องตรวจวัดค่าการสะท้อนรังสี (UV-VIS-NIR spectrophotometer) รุ่น Solidspec-3700 บริษัท SHIMADZU

3.1.19 เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (fourier transform infrared spectrometer; FT-IR) รุ่น IR Tracer-100 บริษัท SHIMADZU

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.20 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence; XRF) รุ่น MESA-500W Periodic05 Detector บริษัท HORIBA

3.2 สารเคมี

- 3.2.1 เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) บริสุทธิ์ 99% บริษัท Himedia
- 3.2.2 ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) บริสุทธิ์ 99% บริษัท Carlo Erba
- 3.2.3 เซอร์โคเนียมซิลิเกต (ZrSiO_4) บริสุทธิ์ 98% บริษัท Acros Organics
- 3.2.4 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) บริสุทธิ์ 99% บริษัท Carlo Erba
- 3.2.5 ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) บริสุทธิ์ 99% บริษัท Carlo Erba
- 3.2.6 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) บริสุทธิ์ 99% บริษัท Carlo Erba
- 3.2.7 โซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) บริสุทธิ์ 99% บริษัท Carlo Erba
- 3.2.8 อะซิโตน ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) บริสุทธิ์ 99% บริษัท Carlo Erba
- 3.2.9 น้ำกลั่น

3.3 กระบวนการสังเคราะห์ผงสีแดง

ในงานวิจัยนี้จะทำการสังเคราะห์ผงสีแดงโดยวิธีการปฏิกิริยาสถานะของแข็ง โดยใช้สารตั้งต้นอัตราส่วนต่าง ๆ และโซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) เป็นตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยา (mineralizer) ซึ่งจะช่วยให้อุณหภูมิในการหลอมของสารต่ำลง ซึ่งจะทำให้การปรับเปลี่ยนอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ที่ 900, 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3, 6 และ 12 ชั่วโมง เพื่อหาสภาวะในการสังเคราะห์สีแดงที่ให้ค่าพิกัดสีและสะท้อนรังสีอินฟราเรดที่เหมาะสม

3.3.1 ขั้นตอนในการสังเคราะห์ผงสีแดง

โครงการานพิเศษนี้ได้ใช้เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก และใช้ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และเซอร์โคเนียมซิลิเกต (ZrSiO_4) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และซีเรียมออกไซด์ (CeO_2) เป็นสารเติมแต่ง และมีโซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) เป็นตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยา แสดงแผนภาพในการสังเคราะห์เม็ดสีแดงในรูปที่ 3.1

1. ชั่งเหล็กออกไซด์ ซิลิกอนไดออกไซด์ เซอร์โคเนียมซิลิเกต อะลูมิเนียมออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ และซีเรียมออกไซด์ ตามอัตราส่วนต่าง ๆ และตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยาโซเดียมฟลูออไรด์ นำมาผสมกันในขวดบดโพลีโพรพิลีน ขนาด 240 มิลลิลิตร

2. นำลูกบดหลายขนาดบรรจุลงในยังขวดบดพลาสติกโพลีโพรพิลีนประมาณ 1/2 ของขวด และเติมอะซิโตนปริมาตร 100 มิลลิลิตร และเขย่าให้เข้ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำไปบดด้วยเครื่องบดความเร็วสูง เป็นเวลา 30 นาที
4. นำสารออกมาจากขวดพลาสติกโพลีโพรพิลีนและใช้อะซิโตนล้างสารที่ติดอยู่ที่ลูกบดและขวดพลาสติกออก
5. นำสารที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที
6. นำสารที่ได้ไปบดให้ละเอียดก่อนจะนำไปเผาที่อุณหภูมิ 900, 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยใช้อัตราในการเพิ่มและลดอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที
7. นำสารที่ได้มาจากการเผาทำการบดและล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อกำจัดวัฏภาคที่ไม่ต้องการหลังจากนั้นอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสและนำมาบดให้ละเอียด
8. นำสารที่สังเคราะห์ได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติด้วยด้วยเทคนิคต่าง ๆ

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ผงสีแดง

สูตร	องค์ประกอบ	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	ZrSiO ₄	TiO ₂	Al ₂ O ₃	ZnO	MgO	CeO ₂	รวม	NaF
		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	25Fe/75Si	25	75	-	-	-	-	-	-	100	8
2	25Fe/75Zr	25	-	75	-	-	-	-	-	100	8
3	25Fe/75Ti	25	-	-	75	-	-	-	-	100	8
4	25Fe/75Al	25	-	-	-	75	-	-	-	100	8
5	25Fe/75Zn	25	-	-	-	-	75	-	-	100	8
6	25Fe/75Mg	25	-	-	-	-	-	75	-	100	8
7	25Fe/75Ce	25	-	-	-	-	-	-	75	100	8
8	35Fe/65Si	35	65	-	-	-	-	-	-	100	8
9	15Fe/85Zr	15	-	85	-	-	-	-	-	100	8
10	25Fe/20Si/55Zr	25	20	55	-	-	-	-	-	100	8
11	25Fe/45Zr/30Al	25	-	45	-	30	-	-	-	100	8
		25	-	45	-	30	-	-	-	100	-

หมายเหตุ เติมนโซเดียมฟลูออไรด์ร้อยละ 8 โดยน้ำหนักของสารตั้งต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) อัตราส่วนสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ผงสีแดง

สูตร	องค์ประกอบ	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	ZrSiO ₄	TiO ₂	Al ₂ O ₃	ZnO	MgO	CeO ₂	รวม	NaF
		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
12	15Fe/55Zr/30Al	15	-	55	-	30	-	-	-	100	8
13	25Fe/20Si/50Zr/5Ti	25	20	50	5	-	-	-	-	100	8
14	25Fe/20Si/50Zr/5Al	25	20	50	-	5	-	-	-	100	8
15	25Fe/20Si/50Zr/5Zn	25	20	50	-	-	5	-	-	100	8
16	25Fe/20Si/50Zr/5Mg	25	-	-	-	-	-	5	-	100	8
17	25Fe/20Si/50Zr/5Ce	25	-	-	-	-	-	-	5	100	8
18	25Fe/20Si/45Zr/10Ti	25	20	45	10	-	-	-	-	100	8
19	25Fe/20Si/45Zr/10Al	25	20	45	-	10	-	-	-	100	8
20	25Fe/20Si/45Zr/10Zn	25	20	45	-	-	10	-	-	100	8
21	25Fe/20Si/45Zr/10Mg	25	20	45	-	-	-	10	-	100	8
22	25Fe/20Si/45Zr/10Ce	25	20	45	-	-	-	-	10	100	8
23	25Fe/10Si/45Zr/20Mg	25	10	45	-	-	-	20	-	100	8
24	25Fe/10Si/45Zr/20Al	25	10	45	-	20	-	-	-	100	8
25	15Fe/10Si/55Zr/20Al	15	10	55	-	20	-	-	-	100	8

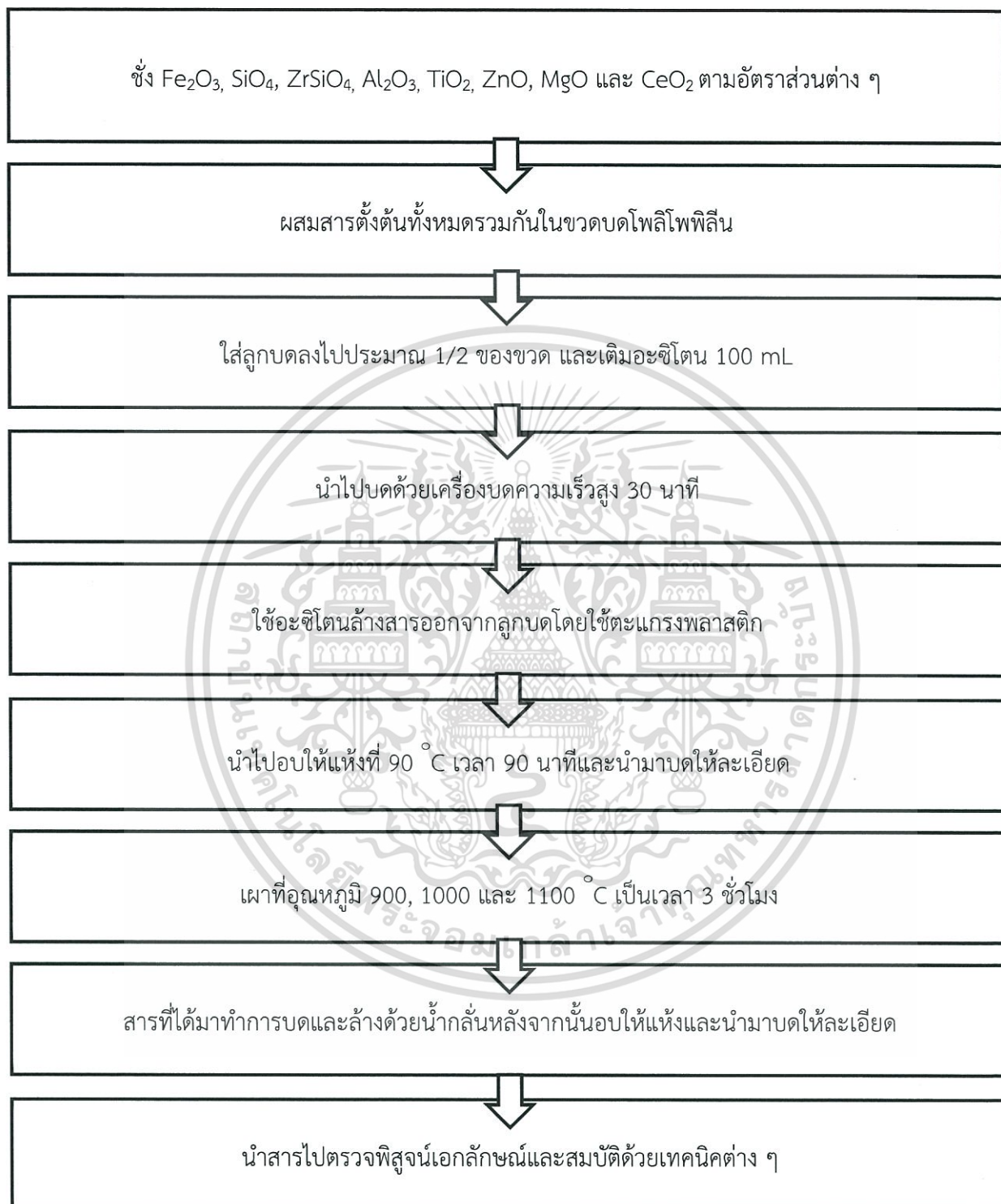
หมายเหตุ เติมนโซเดียมฟลูออไรด์ร้อยละ 8 โดยน้ำหนักของสารตั้งต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) อัตราส่วนสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ผงสีแดง

สูตร	องค์ประกอบ	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	ZrSiO ₄	TiO ₂	Al ₂ O ₃	ZnO	MgO	CeO ₂	รวม	NaF
		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
26	25Fe/18Si/45Zr/10Al/2Ti	25	18	45	2	10	-	-	-	100	8
27	25Fe/18Si/45Zr/10Al/2Zn	25	18	45	-	10	2	-	-	100	8
28	25Fe/18Si/45Zr/10Al/ 2Mg	25	18	45	-	10	-	2	-	100	8
29	25Fe/15Si/45Zr/10Al/ 5Mg	25	15	45	-	10	-	5	-	100	8
30	25Fe/45Zr/20Al/5Zn/ 5Mg	25	-	45	-	20	5	5	-	100	8
31	25Fe/13Si/45Zr/10Al/ 5Mg/2Ti	25	13	45	2	10	-	5	-	100	8

หมายเหตุ เติมนโซเดียมฟลูออไรด์ร้อยละ 8 โดยน้ำหนักของสารตั้งต้น



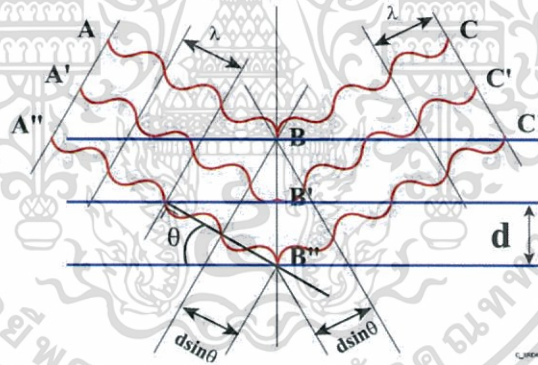
รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนกระบวนการสังเคราะห์ผงสีแดงโดยวิธีการทำปฏิกิริยาของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติของผงสีแดง

3.4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD)

การวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เป็นเทคนิควิเคราะห์เชิงคุณภาพที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของวัสดุและระบุนิตของวัสดุจากรูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อผ่านระนาบผลึกของวัสดุ ซึ่งเทคนิคนี้มีข้อจำกัดของการใช้งานคือ สามารถใช้กับวัสดุที่มีโครงสร้างผลึกเท่านั้น โดยหลักการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ คือ เมื่อลำของรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของรังสีและเกิดการสะท้อนของรังสีออกมาทางมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบดังแสดงในรูปที่ 3.2 [33] โดยมุมของการตกกระทบและการสะท้อนของรังสีสามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้จากสมการของ Bragg's Law แสดงดังสมการที่ 3.1 [34] เทคนิคนี้เป็นที่นิยมในการระบุนิตของวัสดุเนื่องจากมีข้อดี คือ เป็นเทคนิคที่ใช้ตัวอย่างปริมาณน้อยและไม่ยุ่งยากในการเตรียม วิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็ว และสามารถบ่งชี้ถึงองค์ประกอบและโครงสร้างผลึกของธาตุในตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ได้



รูปที่ 3.2 การตกกระทบและการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ [33]

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (3.1)$$

โดยที่ λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ ($\text{Cu } K\alpha = 1.5406 \text{ \AA}$)

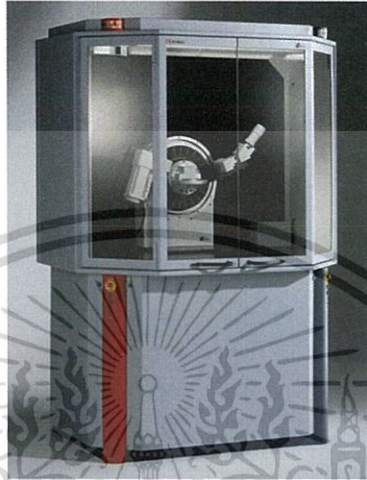
n คือ ลำดับการสะท้อน

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ

θ คือ ค่ามุมจากการตกกระทบหรือสะท้อนของรังสีเอ็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อรังสีเอ็กซ์เกิดการเลี้ยวเบนเครื่องมือจะเก็บข้อมูลและแสดงผลเป็นรูปแบบของการเลี้ยวเบน (XRD pattern) ทำให้สามารถระบุชนิดของสารได้โดยการนำรูปแบบของการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นเทียบกับฐานข้อมูล เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 [34]



รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ [34]

3.4.2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

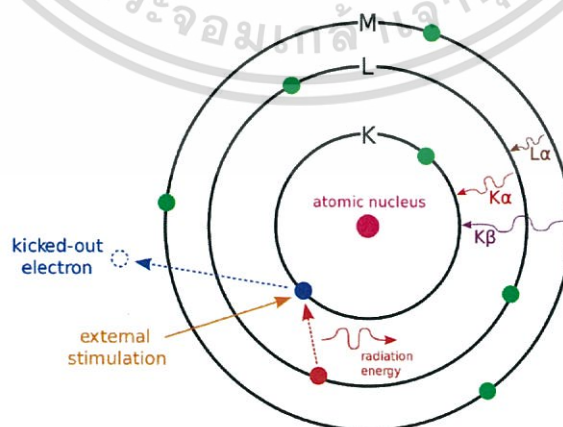
นำวัสดุผสมที่เตรียมได้ไปทำการศึกษาสัณฐานวิทยา โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยหลักการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนให้ใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา เมื่อลำอิเล็กตรอนถูกส่องกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น โดยอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะย้อนกลับไปทีตัวรับสัญญาณแปลงออกมาเป็นภาพบนเครื่องมือ โดยลักษณะของภาพจะขึ้นกับความสูงต่ำของพื้นผิวที่ส่งผลต่ออัตราการย้อนกลับมาของอิเล็กตรอนทุติยภูมิสู่ตัวรับสัญญาณได้มากน้อยแตกต่างกัน หากบริเวณที่มีความสูงจะทำให้อิเล็กตรอนทุติยภูมิสามารถย้อนกลับมาที่ตัวรับสัญญาณได้มากทำให้ภาพในบริเวณนั้นก็สว่าง รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุผสม สามารถทำการวิเคราะห์ที่ได้โดยอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (energy dispersive X-ray spectrometer, EDS) โดยการวิเคราะห์นี้จะวัดพลังงานจากรังสีเอ็กซ์ที่เกิดจากการคายพลังงานของตัวอย่าง โดยเมื่ออิเล็กตรอนจากเครื่อง SEM เข้าชนอิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงาน K หรือ L ของตัวอย่างแล้วเกิดการถ่ายโอนพลังงานสู่อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนในชั้นที่ได้รับพลังงานมีค่าพลังงานมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นขึ้นไปยังระดับชั้นพลังงานที่สูงกว่าในระยะเวลาดัง ๆ แล้วจึงตกกลับลงมาในระดับชั้นพลังงานเดิม โดยอิเล็กตรอนของวงโคจรชั้นถัดออกไปจะลดระดับพลังงานลงมาให้เท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยวของวงโคจรที่เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอน โดยการปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปแบบของรังสีเอ็กซ์ การคายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ในระดับชั้นอิเล็กตรอนดังแสดงในรูปที่ 3.5 [36] จากค่าการคายพลังงานในรูปแบบรังสีเอ็กซ์ของธาตุแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน ทำให้สามารถระบุได้ถึงชนิดของธาตุที่อยู่ในตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS



รูปที่ 3.4 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [3]



รูปที่ 3.5 หลักการเกิดรังสีเอ็กซ์จากการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุด้วยเทคนิค EDS [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การตรวจสอบค่าของสีด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

หลักการวัดค่าสีนั้นอาศัยหลักการมองเห็นของมนุษย์ เกิดจากการที่แสงที่สะท้อนจากวัตถุนั้น ๆ มากระทบตาเราและส่งไปสมองเพื่อแปลออกมาเป็นสีที่เห็น อาจสรุปได้ว่าการมองเห็นมีปัจจัยอยู่ 3 อย่าง คือ แหล่งกำเนิดแสง วัตถุที่มีสี และสายตาของคนเรา [37] แหล่งกำเนิดแสงสามารถแบ่งเป็น 2 แหล่งคือ แหล่งกำเนิดแสงตามธรรมชาติ และ แหล่งกำเนิดแสงที่ถูกสร้างขึ้นโดยมนุษย์

1. แหล่งกำเนิดแสงจากธรรมชาติ ได้แก่ แสงจากดวงอาทิตย์ที่ส่องมายังพื้นโลกเป็นแสงสีขาว เมื่อผ่านปริซึมจะเกิดเป็นแสงสีต่าง ๆ 7 สี ดังแสดงรูปที่ 3.6 โดยแต่ละสีจะมีความยาวคลื่นต่างกันอยู่ระหว่าง 400 - 780 นาโนเมตร จากการสำรวจพบว่าแสงแดดในแต่ละประเทศก็มีการกระจายพลังงานที่แตกต่างกันไปตามภูมิประเทศ ภูมิอากาศ ฤดูกาล และช่วงเวลา ทำให้การมองเห็นสีแตกต่างกันไปด้วย



รูปที่ 3.6 หลักการเกิดแสงสีต่าง ๆ ของการมองเห็นผ่านปริซึม [37]

2. แหล่งกำเนิดแสงจากการประดิษฐ์ ได้แก่ หลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ (incandescence) หลอดไฟทังสเตน (tungsten filament lamp) หลอดฟลูออเรสเซนต์ หลอดไฟซีนอนอาร์ค (xenon arc lamp) เป็นต้น

วัตถุที่มีสีเมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดแสงตกกระทบกับวัตถุที่มีสีจะเกิดการสะท้อนแสงที่ผิว ของวัตถุที่มีความเงา เรียกว่า การสะท้อนแสงที่สมบูรณ์ (specular reflect) ถ้าผิวไม่เรียบและไม่มีความเงาเมื่อแสงตกกระทบกับวัตถุจะเกิดการกระเจิงของแสง อนุภาคของแสงในบางช่วงคลื่นจะถูกดูดกลืนไว้ บางช่วงคลื่นถูกสะท้อนออกมา ทำให้เห็นสีที่แตกต่างกันตามความยาวช่วงคลื่นที่สะท้อนออกมา เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การสะท้อนตัวกลางที่มีพื้นผิวไม่เรียบ (diffuse reflection) นอกจากนี้จะมีการสะท้อนและการดูดกลืนของแสงแล้ว ยังมีการส่องผ่านบนวัตถุโปร่งแสงและเกิดการกระเจิงแสงที่พื้นผิว ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การทะลุผ่านตัวกลางที่มีพื้นผิวไม่เรียบ (diffuse transmission) แต่ถ้าเป็นวัตถุโปร่งใส เช่นกระจกใส จะเกิดการส่องผ่านทะลุวัตถุ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การทะลุผ่านที่สมบูรณ์ (regular transmission)

โดยเครื่องวัดสี ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ใช้แสงจากแหล่งประดิษฐ์ (illuminant) คือ แสงที่แต่งค่าความเข้มแสง (intensity) หรืออุณหภูมิของสี (color temperature) แล้ว ตัวอย่างของแหล่งแสงประดิษฐ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

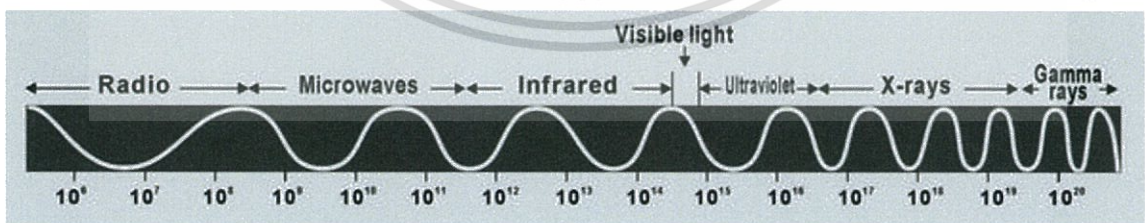
ได้แก่ D65 – แสงเที่ยงวัน (noon daylight) A- แสงส้มจากหลอดทั้งสแตน C – แสงกลางวันเฉลี่ย (average daylight), CWF – แสงขาวเย็นจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ (cooled white fluorescent) โครงการงานพิเศษนี้ได้ตรวจวัดค่าพิกัดสีตามวิธีมาตรฐาน CIE L* a* b* ที่ความยาวคลื่น 380 – 780 นาโน-เมตร



รูปที่ 3.7 เครื่องวัดสี [38]

3.4.4 การตรวจสอบวัดค่าการสะท้อนด้วยเครื่องยูวี วิซิเบิล เอ็นไออาร์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS-NIR spectrophotometer)

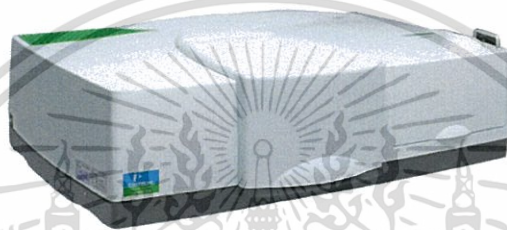
เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มแสง ในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet; UV) ช่วงตามองเห็น (visible) และช่วงใกล้อินฟราเรด (near infrared; NIR) ที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนหรือสะท้อนแสงโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ [39] โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่างซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ช่วงความยาวคลื่นของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า [39]

คุณสมบัติในการดูดสะท้อนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet; UV) หรือช่วงตามองเห็น (visible) หรือช่วงใกล้อินฟราเรด (near infrared; NIR) ที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีเอกซาร์นี้เป็นเอกซาร์ที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาติให้หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

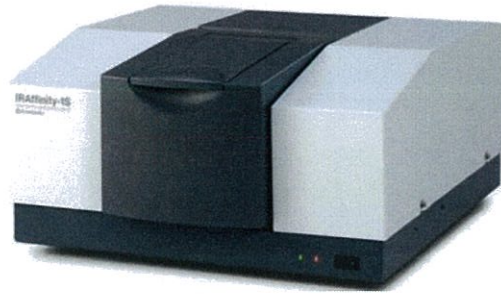
ระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่าง ๆ ตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง [40] รูปที่ 3.9 แสดงเครื่องยูวี วิซิเบิล เอ็นไออาร์ สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ โครงการงานพิเศษนี้ได้ตรวจค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นนาโนเมตร โดยได้คำนวณค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์ช่วงอินฟราเรดใกล้ (NIR) ที่ความยาวคลื่น 700 – 2500 นาโนเมตร ตามมาตรฐาน ASTM E903 – 87 (Standard test method for solar absorptance, reflectance and transmittance of materials using integrating spheres)



รูปที่ 3.9 เครื่องยูวี วิซิเบิล เอ็นไออาร์ สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ [40]

3.4.5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR)

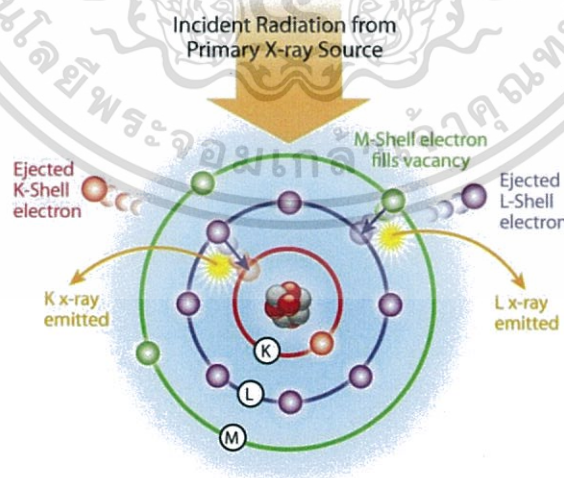
เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปีเป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารโดยการพิจารณาจากพลังงานที่สารดูดกลืน (absorption) เพื่อใช้ในการสั่น (vibration) ของโมเลกุลในรูปแบบต่าง ๆ โดยที่โมเลกุลจะทำการดูดกลืนพลังงานเมื่อค่าพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าเท่ากับค่าความถี่ของการสั่น ความยาวของคลื่นอินฟราเรดอยู่ในช่วงเลขคลื่น 4000 ถึง 12800 cm^{-1} โดยการวิเคราะห์สารจะใช้ความยาวคลื่นในช่วงเลขคลื่น 200 ถึง 4000 cm^{-1} ซึ่งเป็นย่านอินฟราเรดกลาง (middle infrared region) เนื่องจากมีความถี่ที่ตรงกับค่าความถี่ของการสั่นของพันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุล เมื่อสารตัวอย่างได้รับพลังงานจากคลื่นรังสีอินฟราเรดที่เหมาะสมจะดูดกลืนแสงเพื่อเกิดการสั่นหรือการหมุนของพันธะโมเลกุล ทำให้โมเลกุลเกิดการดูดกลืนแสง จากนั้นเครื่องจะวัดค่าพลังงานแสงที่ผ่านออกมาแสดงผลเป็นความสัมพันธ์ของความถี่ (เลขคลื่น) กับค่าความเข้มการส่งผ่านของแสงเรียกว่า อินฟราเรดสเปกตรัม (IR spectrum) โดยรูปแบบของอินฟราเรดสเปกตรัมจัดเป็นข้อมูลเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิด [41] ซึ่งสามารถนำผลอินฟราเรดสเปกตรัมที่วิเคราะห์ได้ไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลเพื่อระบุถึงหมู่ฟังก์ชันของการที่ทำการวิเคราะห์ เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ [41]

3.4.6 การวิเคราะห์ธาตุและปริมาณของธาตุด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence, XRF)

เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการที่อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม เปลี่ยนระดับชั้นที่มีพลังงานสูงไปยังชั้นที่มีพลังงานต่ำกว่า และคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานจำเพาะ (characteristic X ray) ของแต่ละธาตุ ดังแสดงในรูปที่ 3.11 โดยเทคนิคที่เลือกใช้คือเทคนิค energy-dispersive X-ray fluorescence (ED - XRF) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุในสารตัวอย่างจากการตรวจวัดพลังงานของรังสีเอ็กซ์ โดยที่รังสีเอ็กซ์ที่ให้ออกมาจากแต่ละธาตุในตัวอย่าง สามารถวิเคราะห์พลังงานของรังสี เพื่อหาชนิดของธาตุ และวิเคราะห์ความเข้มของรังสีเพื่อหาปริมาณธาตุ [42] เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ แสดงดังรูป 3.12



รูปที่ 3.11 หลักการคายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ [42]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ [43]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาการพัฒนาผงสีแดงสะท้อนรังสีอินฟราเรดจากเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ที่เป็นองค์ประกอบพื้นฐาน โดยใช้กระบวนการปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid state reaction) ในการสังเคราะห์ ซึ่งประกอบไปด้วยผลค่าพิกัดสี ค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรด การตรวจสอบเอกลักษณ์ สันฐานวิทยาและสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

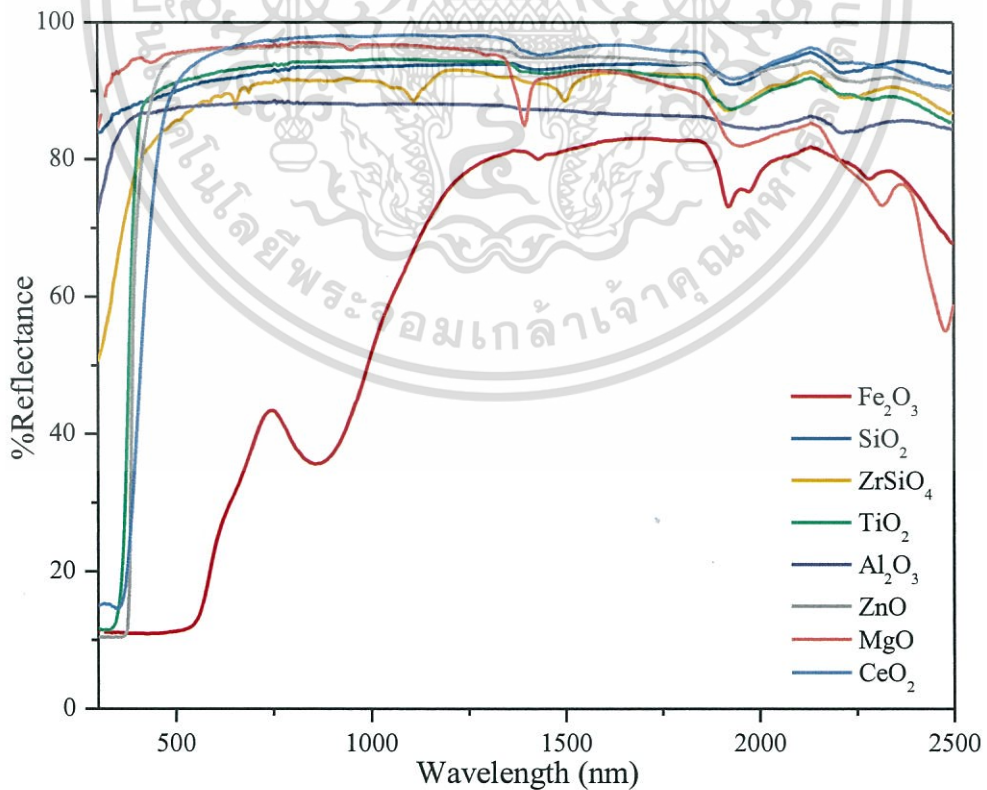
4.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนของสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ผงสีแดง

ในขั้นต้นได้ทำการศึกษาค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสารตั้งต้น คือ ผงเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เซอร์โคเนียมซิลิเกต (ZrSiO_4) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และซีเรียมไดออกไซด์ (CeO_2) ซึ่งผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 โดยได้แบ่งค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ (solar) ในช่วงความยาวคลื่น 300 – 2500 นาโนเมตร ออกเป็น 3 ช่วง คือ ค่าการสะท้อนในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (UV) 300 – 400 นาโนเมตร ช่วงแสงที่ตามองเห็น (visible) 400 – 700 นาโนเมตร และช่วงอินฟราเรดใกล้ (near infrared, NIR) 700 – 2500 นาโนเมตร โดยค่าการสะท้อนรังสีในช่วง NIR ได้จากการคำนวณตามมาตรฐาน ASTM E903-87

ผลที่ได้พบว่าค่าการสะท้อนของรังสี NIR ของเหล็กออกไซด์ซึ่งมีสีแดงส้มมีค่าเป็นร้อยละ 57.7 ส่วนสารตั้งต้นโลหะออกไซด์ตัวอื่น ๆ คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ เซอร์โคเนียมซิลิเกต ไทเทเนียมไดออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ และซีเรียมไดออกไซด์ ซึ่งมีสีขาว มีค่าการสะท้อนรังสี NIR อยู่ในช่วงร้อยละ 87.8 – 97.4 ซึ่งจากผลเบื้องต้นคาดว่า การผสมโลหะออกไซด์ชนิดต่าง ๆ ลงในเหล็กออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบพื้นฐานจะสามารถปรับปรุงค่าพิกัดสี และสามารถเพิ่มค่าการสะท้อนรังสี NIR ให้กับผงสีแดงที่สังเคราะห์ได้

ตารางที่ 4.1 ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์

สูตร	ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์			
	AM1GH_R_Solar	AM1GH_R_UV	AM1GH_R_Vis	AM1GH_R_NIR
	300-2500 nm	300-400 nm	400-700nm	700-2500 nm
เหล็กออกไซด์	41.3	11	19.2	57.7
ซิลิกอนไดออกไซด์	92.2	87.2	90.7	93.5
เซอร์โคเนียมซิลิเกต	89.1	70.3	86.9	91.5
ไทเทเนียมไดออกไซด์	91.4	40.2	91.6	93.7
อะลูมิเนียมออกไซด์	87.6	84.2	87.7	87.8
ซิงค์ออกไซด์	93.2	27.1	94.1	95.9
แมกนีเซียมออกไซด์	95.1	93.2	95.8	94.0
ซีเรียมไดออกไซด์	92.2	22.7	89.6	97.4






รูปที่ 4.1 สเปกตรากการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าพิกัดสีและค่าการสะท้อนรังสี NIR ของผงสีแดงเกรดการค้าและเหล็กออกไซด์ที่ใช้เป็นองค์ประกอบพื้นบานของสารตั้งต้น ซึ่งพบว่าผงสีแดงเกรดการค้าจากบริษัท OBASF ซึ่งเป็นผงสีแดงสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์มีค่าพิกัดสีของค่าความสว่าง (L^*) เท่ากับ 32.75 สีแดง (a^*) เท่ากับ 23.64 สีเหลือง (b^*) เท่ากับ 14.98 และค่าการสะท้อนรังสี NIR อยู่ที่ร้อยละ 36 และผงสีแดงทั่วไปจากบริษัท SAR มีค่าพิกัดสี L^* เท่ากับ 39.21 a^* เท่ากับ 25.68, b^* เท่ากับ 18.98 และค่าการสะท้อนอยู่ที่ร้อยละ 48.1 ส่วนผงเหล็กออกไซด์มีค่าพิกัดสี L^* เท่ากับ 48.45 a^* เท่ากับ 33.42 b^* เท่ากับ 31.56 และค่าการสะท้อนรังสี NIR อยู่ที่ร้อยละ 57.7 จากค่าที่ได้ทำให้โครงการพิเศษนี้มุ่งหวังที่จะพัฒนาผงสีแดงจากการใช้เหล็กออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบพื้นฐานให้มีค่าพิกัดสีดังนี้ คือ L^* อยู่ในช่วง 40.0 - 45.0 a^* อยู่ในช่วง 25.0 - 35.0 และ b^* อยู่ในช่วง 20.0 - 25.0 และมีค่าการสะท้อนรังสี NIR ร้อยละ 60 ขึ้นไป เพื่อพัฒนาให้ได้ผงสีแดงที่มีค่าพิกัดสีและค่าการสะท้อนรังสี NIR ที่สูงกว่าผงสีแดงเกรดการค้าที่มาจากทั้ง 2 บริษัทที่กล่าวมา

หมายเหตุ : สีแดงในอุดมคติที่เป็นสีแดงสดนั้นมีค่า L^* อยู่ที่ 42.63 a^* อยู่ที่ 49.23 และ b^* อยู่ที่ 27.05 โดยใช้สารตั้งต้น คือ เซเลเนียม (Se) แคดเมียม (Cd) และเซอร์โคเนียมซิลิเกต ซึ่งเซเลเนียมและแคดเมียม เป็นโลหะหนักที่มีเป็นพิษ ในโครงการพิเศษนี้จึงได้สังเคราะห์ผงสีแดงจากเหล็กออกไซด์เป็นองค์ประกอบพื้นฐานเนื่องจากมีราคาถูกและไม่อันตราย [28]

ตารางที่ 4.2 ค่าพิกัดสีและค่าการสะท้อนรังสี NIR ของผงสีแดงเกรดการค้าและเหล็กออกไซด์





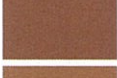
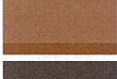


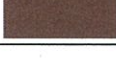
ลำดับ	ชื่อ	อุณหภูมิ (°C) /เวลา (h)	ค่าพิกัดสี			รูป	สีที่ตามองเห็น	%R (NIR)
			L^*	a^*	b^*			
1	ผงสีแดง บริษัท BASF	N/A	32.75	23.64	14.98		แดง	36.0
2	ผงสีแดง บริษัท RAS	N/A	39.21	25.68	18.98		แดง	48.1
3	เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3)	N/A	48.45	33.42	31.56		แดงส้ม	57.7

ตารางที่ 4.3 - 4.7 แสดงค่าพิกัดสีและค่าการสะท้อนรังสี NIR ของผงสีแดงที่สังเคราะห์ได้จากการใช้เหล็กออกไซด์ และโลหะออกไซด์ชนิดและอัตราส่วนต่าง ๆ โดยการใช้โซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) เป็นตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยา (mineralizer) และเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์แสดงในตารางที่ 3.1 ผลที่ได้พบว่าจากสูตรที่ใช้ในการสังเคราะห์ผงสีแดงทั้งหมด 31 สูตร ให้ค่าพิกัดสีและค่าการสะท้อนรังสี NIR ที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




โดยให้ผงสีที่มีทั้งสีเหลือง ส้ม ชมพู แดง และน้ำตาล และให้ค่าการสะท้อนรังสี NIR ในช่วงร้อยละ 38.8 – 74.0 โดยสูตรที่ให้ค่าพิกัดสีแดงที่ดีที่สุดและค่าการสะท้อนที่สูงที่สุด คือ สูตร 11 และสูตร 19 โดยสูตร 11 มีองค์ประกอบร้อยละโดยน้ำหนัก คือ 25 : 45 : 30 ของ Fe_2O_3 : ZrSiO_4 : Al_2O_3 (25Fe/45Zr/30Al) ได้ผงสีแดงที่มีค่าพิกัดสี คือ L^* เท่ากับ 47.57 a^* เท่ากับ 30.35 b^* เท่ากับ 24.12 และค่าสะท้อนรังสี NIR ร้อยละ 74.0 ส่วนสูตร 19 ที่มีองค์ประกอบร้อยละโดยน้ำหนัก คือ 25 : 20 : 45 : 10 ของ Fe_2O_3 : SiO_2 : ZrSiO_4 : Al_2O_3 (25Fe/20Si/45Zr/10Al) ได้ผงสีแดงที่มีค่าพิกัดสี คือ L^* เท่ากับ 37.31 a^* เท่ากับ 27.45 b^* เท่ากับ 21.46 และค่าสะท้อนรังสี NIR ร้อยละ 71.0 ดังนั้นจึงได้เลือกอัตราส่วนในการสังเคราะห์ผงสีแดงสูตรที่ 11 (25Fe/45Zr/30Al) และสูตรที่ 19 (25Fe/20Si/45Zr/10Al) ไปทำการศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการเผาแคลไซน์ที่มีผลต่อสมบัติของผงสีแดงต่อไป

ตารางที่ 4.3 ค่าพิกัดสีและค่าการสะท้อนรังสี NIR ของผงสีแดงที่สังเคราะห์จากเหล็กออกไซด์และโลหะออกไซด์ 1 ชนิด

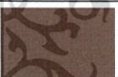
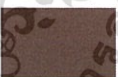

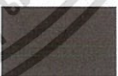

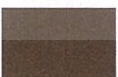




สูตร	องค์ประกอบ	อุณหภูมิ (°C) /เวลา (h)	NaF	ค่าพิกัดสี			รูป	สีที่ตามองเห็น	%R (NIR)
				L^*	a^*	b^*			
1	25Fe/75Si	1000/3	8	40.26	14.05	7.40		น้ำตาล	-
2	25Fe/75Zr	1000/3	8	42.30	15.02	7.40		น้ำตาล	-
3	25Fe/75Ti	1000/3	8	61.17	14.84	40.18		เหลือง	-
4	25Fe/75Al	1000/3	8	57.26	22.77	16.08		ส้ม	-
5	25Fe/75Zn	1000/3	8	47.29	25.79	29.75		น้ำตาล	-
6	25Fe/75Mg	1000/3	8	54.29	24.16	31.77		ส้ม	-
7	25Fe/75Ce	1000/3	8	46.54	11.06	4.52		น้ำตาล	-
8	35Fe/65Si	1000/3	8	30.54	13.21	6.13		ชมพู	-
9	15Fe/85Zr	1000/3	8	48.55	16.17	8.07		แดง น้ำตาล	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ค่าพิกัดสีและค่าการสะท้อนรังสี NIR ของผงสีแดงที่สังเคราะห์จากเหล็กออกไซด์ และโลหะออกไซด์ 2 ชนิด




สูตร	องค์ประกอบ	อุณหภูมิ (°C) /เวลา (h)	NaF	ค่าพิกัดสี			รูป	สีที่ตามองเห็น	%R (NIR)
				L*	a*	b*			
10	25Fe/20Si/ 55Zr	1000/3	8	33.56	14.25	6.97		น้ำตาล	38.9
11	25Fe/45Zr/ 30Al	1000/3	8	47.57	30.35	24.12		แดงส้ม	74.0
12	15Fe/55Zr/ 30Al	1000/3	8	56.34	24.82	17.94		ส้ม	71.0

ตารางที่ 4.5 ค่าพิกัดสีและค่าการสะท้อนรังสี NIR ของผงสีแดงที่สังเคราะห์จากเหล็กออกไซด์ และโลหะออกไซด์ 3 ชนิด





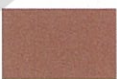
สูตร	องค์ประกอบ	อุณหภูมิ (°C) /เวลา (h)	NaF	ค่าพิกัดสี			รูป	สีที่ตามองเห็น	%R (NIR)
				L*	a*	b*			
13	25Fe/20Si/ 50Zr/5Ti	1000/3	8	34.52	15.90	11.74		น้ำตาล	41.4
14	25Fe/20Si/ 50Zr/5Al	1000/3	8	33.30	19.93	11.52		แดง เลือดหมู	51.07
15	25Fe/20Si/ 50Zr/5Zn	1000/3	8	34.74	13.04	11.99		น้ำตาล	38.8
16	25Fe/20Si/ 45Zr/5Mg	1000/3	8	30.78	11.42	4.25		น้ำตาล	-
17	25Fe/20Si/ 45Zr/5Ce	1000/3	8	27.83	8.35	3.34		น้ำตาล	-
18	25Fe/20Si/ 45Zr/10Ti	1000/3	8	45.60	13.38	10.89		น้ำตาล แดง	-
19	25Fe/20Si/ 45Zr/10Al	1000/3	8	37.31	27.45	21.46		แดงส้ม	71.0
20	25Fe/20Si/ 45Zr/10Zn	1000/3	8	42.59	20.36	23.91		แดงส้ม	43.7
21	25Fe/20Si/ 45Zr/10Mg	1000/3	8	38.39	18.82	9.57		แดง	-
22	25Fe/20Si/ 45Zr/10Ce	1000/3	8	35.76	18.13	9.06		น้ำตาล	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


ตารางที่ 4.5 (ต่อ) ค่าพิกัดสีและค่าการสะท้อนรังสี NIR ของผงสีแดงที่สังเคราะห์จากเหล็กออกไซด์ และโลหะออกไซด์ 3 ชนิด

สูตร	องค์ประกอบ	อุณหภูมิ (°C) /เวลา (h)	NaF	ค่าพิกัดสี			รูป	สีที่ตา มองเห็น	%R (NIR)
				L*	a*	b*			
23	25Fe/10Si/ 45Zr/20Mg	1000/3	8	46.08	20.79	21.45		น้ำตาล ส้ม	-
24	25Fe/10Si/ 45Zr/20Al	1000/3	8	47.01	29.50	26.70		แดงส้ม	66.8
25	15Fe/10Si/ 55Zr/20Al	1000/3	8	53.23	25.98	23.21		ส้ม	-

ตารางที่ 4.6 ค่าพิกัดสีและค่าการสะท้อนรังสี NIR ของผงสีแดงที่สังเคราะห์จากเหล็กออกไซด์ และโลหะออกไซด์ 4 ชนิด

สูตร	องค์ประกอบ	อุณหภูมิ (°C) /เวลา (h)	NaF	ค่าพิกัดสี			รูป	สีที่ตา มองเห็น	%R (NIR)
				L*	a*	b*			
26	25Fe/18Si/45Zr/ 10Al/2Ti	1000/3	8	45.23	27.94	23.87		แดงส้ม	60.4
27	25Fe/18Si/45Zr/ 10Al/2Zn	1000/3	8	41.66	28.50	22.67		แดงส้ม	66.5
28	25Fe/18Si/45Zr/ 10Al/2Mg	1000/3	8	46.20	28.99	24.39		แดงส้ม	68.1
29	25Fe/15Si/45Zr/ 10Al/5Mg	1000/3	8	48.01	24.61	21.52		แดงส้ม	65.0
30	25Fe/45Zr/20Al/ 5Zn/5Mg	1000/3	8	54.19	25.51	20.66		แดงส้ม	69.6

ตารางที่ 4.7 ค่าพิกัดสีและค่าการสะท้อนรังสี NIR ของผงสีแดงที่สังเคราะห์จากเหล็กออกไซด์ และโลหะออกไซด์ 5 ชนิด

สูตร	องค์ประกอบ	อุณหภูมิ (°C) /เวลา (h)	NaF	ค่าพิกัดสี			รูป	สีที่ตา มองเห็น	%R (NIR)
				L*	a*	b*			
31	25Fe/13Si/45Zr/ 10Al/5Mg/2Ti	1000/3	8	47.38	26.24	20.80		แดง	65.6


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการเผาแคลไซน์ที่มีผลต่อสมบัติของผงสีแดง

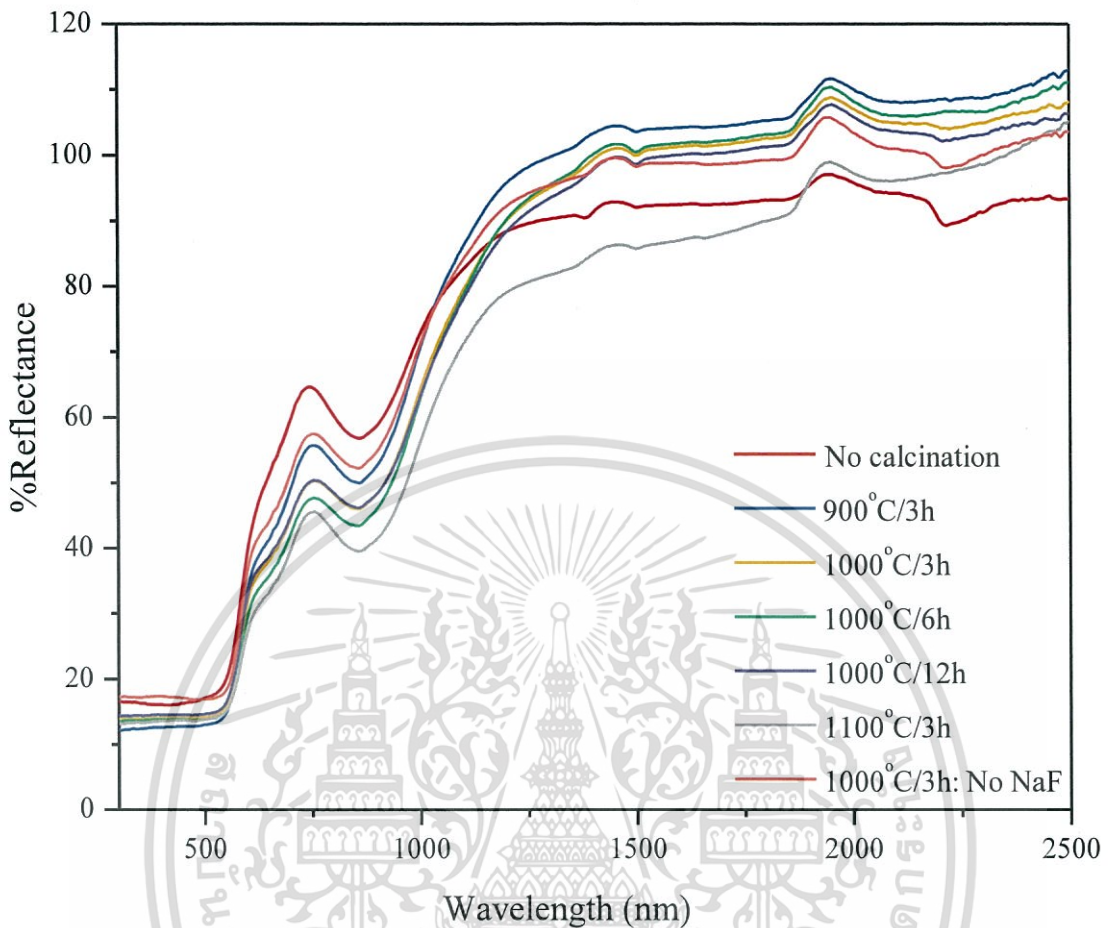
4.2.1 ศึกษาค่าพิกัดสีและการสะท้อนรังสี NIR

จากผงสีแดงที่สังเคราะห์ได้โดยใช้เหล็กออกไซด์และโลหะออกไซด์ชนิดและอัตราส่วนต่าง ๆ รวมถึงการใช้โซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) เป็นตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยาและเผาแคลไซน์ พบว่าสูตรที่ให้ค่าพิกัดสีและค่าการสะท้อนรังสี NIR ที่ดีที่สุด คือ สูตร 19 และสูตร 11 ที่มีองค์ประกอบ คือ 25Fe/20Si/45Zr/10Al และ 25Fe/45Zr/30Al ตามลำดับ จึงได้นำผงสีแดงทั้งสองสูตรมาเผาในช่วงที่อุณหภูมิ 900 – 1100 องศาเซลเซียส และเวลาต่างกัน 6 – 12 ชั่วโมง เพื่อปรับปรุงค่าพิกัดสีและค่าการสะท้อน โดยได้นำผงสีแดงที่ได้ไปทำการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์วัดค่าพิกัดสีและวัดค่าการสะท้อนรังสี NIR ให้ผลลัพธ์ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.8 ค่าพิกัดสี และค่าการสะท้อนรังสี NIR ของผงสีแดงสูตร 19 (25Fe/20Si/45Zr/10Al)

สูตร	องค์ประกอบ	อุณหภูมิ (°C) / เวลา (h)	NaF	ค่าพิกัดสี			รูป	สีที่ตามองเห็น	%R (NIR)
				L*	a*	b*			
19	25Fe/20Si/45Zr/10Al	-	8	58.90	25.76	23.80		ส้ม	71.0
		900/3	8	42.62	32.03	26.94		แดง	75.8
		1000/3	8	37.31	27.45	21.46		แดง	71.0
		1100/3	8	37.62	24.34	18.95		น้ำตาล	62.5
		1000/6	8	40.11	26.43	19.40		แดง	69.9
		1000/12	8	39.60	25.86	20.13		แดงส้ม	70.3
		1000/3	-	47.18	27.86	18.67		ส้ม	74.7

หมายเหตุ : จุดหลอมเหลวของโซเดียมฟลูออไรด์อยู่ที่ 993 องศาเซลเซียส




รูปที่ 4.2 สเปกตรากการสะท้อนรังสีอินฟราเรดของผงสีแดงสูตร 19 (25Fe/20Si/45Zr/10Al)

ในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.2 แสดงค่าพิกัดสีและค่าการสะท้อนรังสี NIR ของผงสีแดงที่สังเคราะห์ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 900, 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส ที่เวลา 3, 6 และ 12 ชั่วโมงของสูตร 19 ที่มีองค์ประกอบ คือ 25Fe/ 20Si/45Zr/10Al พบว่าเมื่อไม่เผาผงสีที่ได้จะมีสีส้ม เมื่อทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ผงสีที่สังเคราะห์ได้มีสีแดง โดยผงสีแดงที่ได้มีแนวโน้มที่มีค่าพิกัดสีทั้ง L^* , a^* และ b^* และค่าการสะท้อนรังสี NIR ที่ลดต่ำลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจาก 900 เป็น 1000 องศาเซลเซียส โดยมีค่าลดลงจากร้อยละ 75.8 เป็น 71.0 เมื่อทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส พบว่าตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยาโซเดียม-ฟลูออไรด์และเกิดการหลอมตัวและเกิดปฏิกิริยาส่งผลให้ได้ผงสีที่มีสีน้ำตาลที่มีลักษณะเกาะกลุ่มเป็นก้อนขนาดใหญ่ ค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดที่ลดต่ำลงเป็นร้อยละ 62.5 โดยผงสีน้ำตาลที่เกิดจากการเปลี่ยนวัฏภาคของเหล็กออกไซด์จากฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) เป็นแมกนีไทต์ (Fe_3O_4) [30] ส่วนการศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการเผาแคลไซน์นั้นพบว่า การเพิ่มเวลาในการเผาแคลไซน์ในช่วง 3, 6 และ 12 ชั่วโมงส่งผลให้ได้ผงสีแดงที่มีค่าพิกัดสีที่ไม่แตกต่างกันมากนัก และมีค่าการสะท้อนรังสี NIR ที่มีแนวโน้มที่ลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

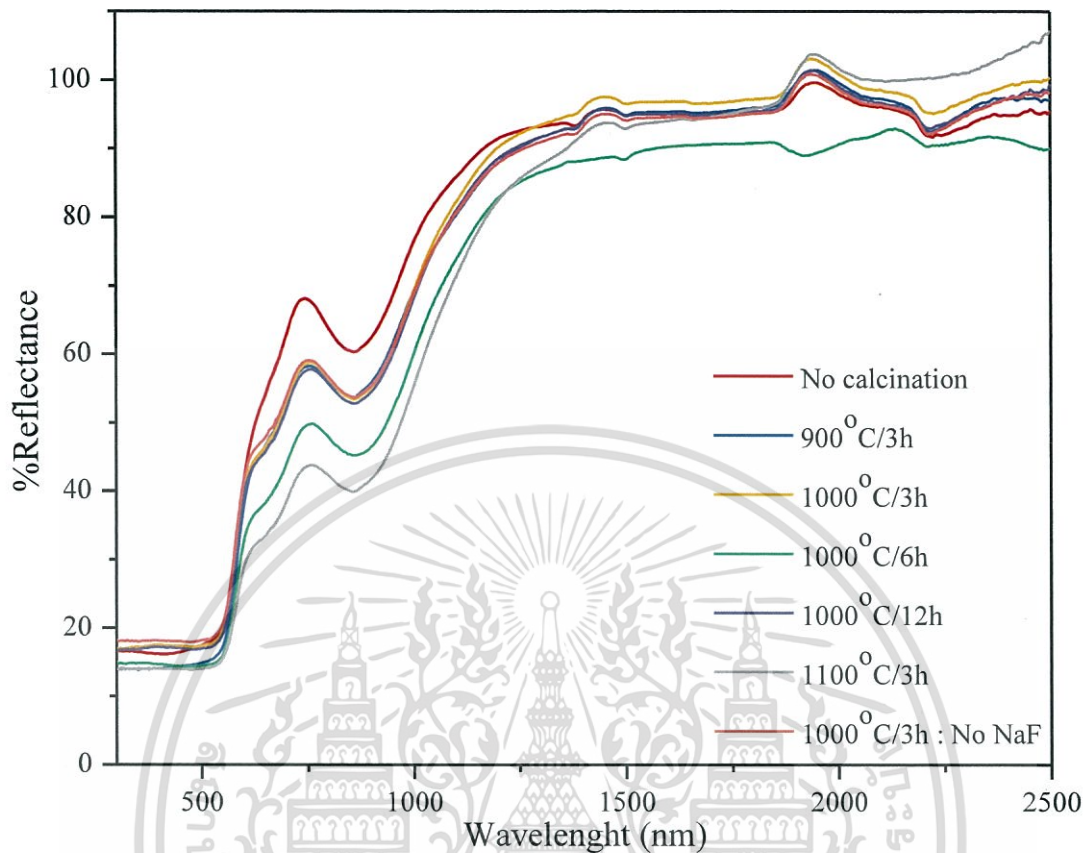
ต่ำลงเล็กน้อยโดยมี ค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 69.9 – 71.1 และการศึกษาผลของการเติมและไม่เติมตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยาโซเดียมฟลูออไรด์พบว่าผงสีที่ได้จากการเผาแคลไซน์ที่สภาวะเดียวกันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส และเวลา 3 ชั่วโมง ที่ไม่เติมโซเดียมฟลูออไรด์จะให้สีส้ม ส่วนที่มีการเติมโซเดียมฟลูออไรด์จะให้สีแดงที่มีค่าการสะท้อนรังสี NIR ที่ต่ำลงเล็กน้อยจากร้อยละ 74.7 เป็น 71.1

ตารางที่ 4.9 ค่าพิกัดสี และค่าการสะท้อนรังสี NIR ของผงสีแดงสูตร 11 (25Fe/45Zr/30Al)

สูตร	องค์ประกอบ	อุณหภูมิ (°C) /เวลา (h)	NaF	ค่าพิกัดสี			รูป	สีที่ตามองเห็น	%R (NIR)
				L*	a*	b*			
11	25Fe/45Zr/ 30Al	-	8	52.30	28.86	26.35		ส้ม	78.2
		900/3	8	46.14	30.05	26.80		แดง	73.2
		1000/3	8	47.57	30.35	24.12		แดง	74.0
		1100/3	8	39.60	23.78	18.11		น้ำตาล	64.1
		1000/6	8	50.91	29.1	22.93		แดงส้ม	65.9
		1000/12	8	50.76	29.1	22.93		แดงส้ม	72.8
		1000/3	-	53.12	26.91	21.88		ส้ม	73.1

หมายเหตุ : จุดหลอมเหลวของโซเดียมฟลูออไรด์อยู่ที่ 993 องศาเซลเซียส

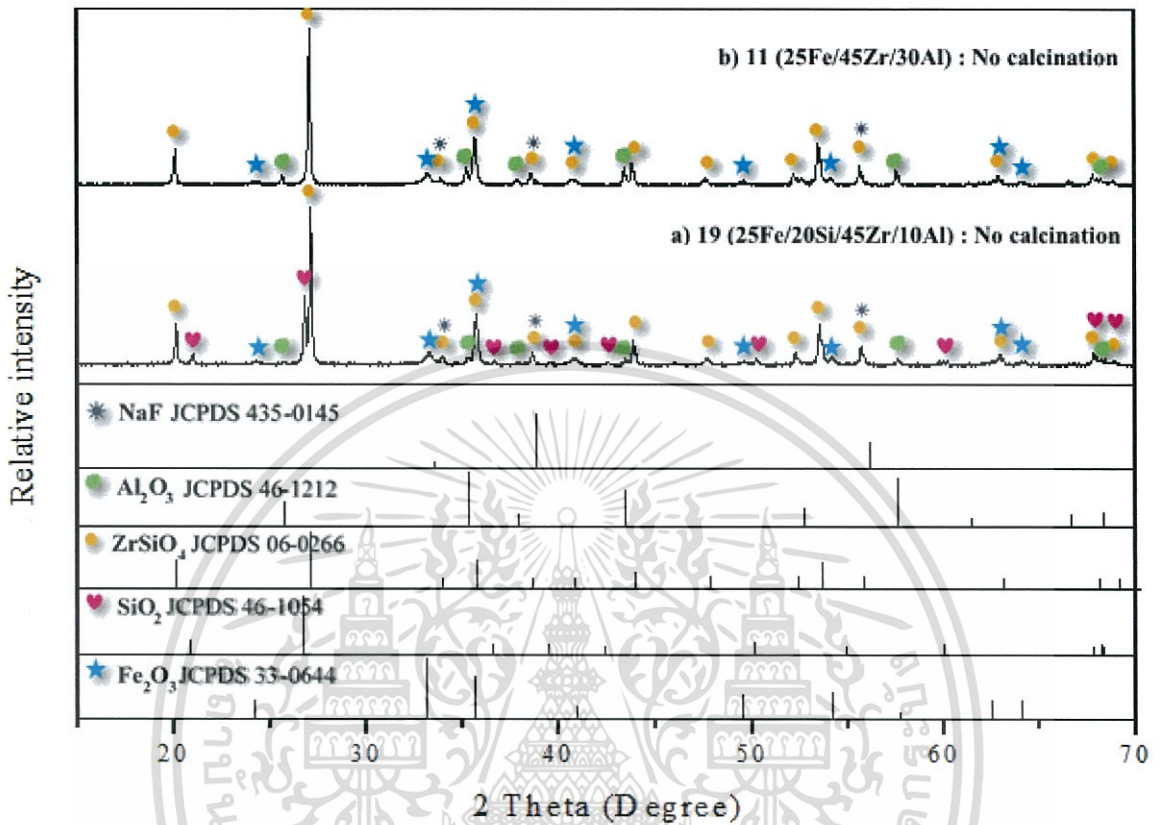
ตารางที่ 4.9 และ รูปที่ 4.3 แสดงค่าพิกัดสีและค่าการสะท้อนรังสี NIR ของผงสีแดงที่สังเคราะห์ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 900, 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3, 6 และ 12 ชั่วโมงของสูตร 11 ที่มีองค์ประกอบคือ 25Fe/45Zr/30Al พบว่าผลการศึกษาเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแคลไซน์ให้แนวโน้มที่คล้ายคลึงกับสูตร 19 ที่มีองค์ประกอบคือ 25Fe/20Si/45Zr/10Al แต่ให้ค่าพิกัดสีความสว่าง (L*) และสีแดง (a*) ที่สว่างกว่าเล็กน้อย อีกทั้งยังให้ค่าการสะท้อนรังสี NIR ที่สูงกว่าเล็กน้อย โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 64.1 – 74.0 และผงสีแดงที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ให้ค่าพิกัดสี L* 47.57 และค่าการสะท้อนรังสี NIR ร้อยละ 74



รูปที่ 4.3 สเปกตรารสะท้อนของผงสีแดงสูตร 11 ที่มีองค์ประกอบ คือ 25Fe/45Zr/30Al

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ในช่วง 900 ถึง 1100 องศาเซลเซียส ส่งผลทำให้ค่าความสว่างของผงสีแดงลดลงและมีค่าการสะท้อนรังสี NIR ที่ลดลงส่วนเวลาในการเผาแคลไซน์ในช่วง 3 ถึง 12 ชั่วโมง ไม่ส่งผลที่ชัดเจนต่อการเปลี่ยนแปลงค่าฟักตสีและการสะท้อนรังสี NIR และการศึกษาผลของการเติมและไม่เติมตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยาโซเดียมฟลูออไรด์พบว่าผงสีที่ไม่เติมโซเดียมฟลูออไรด์จะให้สีส้ม ส่วนผงสีที่เติมโซเดียมฟลูออไรด์จะให้สีแดงที่มีค่าการสะท้อนรังสี NIR ที่ไม่ต่างกันมากนัก ซึ่งผลที่ได้ทั้งหมดเกิดการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคของโลหะออกไซด์ชนิดต่าง ๆ ซึ่งเกิดจากการที่อนุภาคสารตั้งต้นทำปฏิกิริยากันผ่านกระบวนการปฏิกิริยาสถานะของแข็ง ซึ่งจะได้ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกของผงสีแดงต่อไป

4.2.2 ศึกษาโครงสร้างผลึกและโครงสร้างโมเลกุล



รูปที่ 4.4 ผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผงสีแดง a) สูตร 19 (25Fe/20Si/45Zr/10Al) b) สูตร 11 (25Fe/45Zr/30Al) และ JCPDS ของ Fe_2O_3 , SiO_2 , ZrSiO_4 , Al_2O_3 และ NaF

รูปที่ 4.4 แสดงการตรวจวัดผงสีแดงด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของผงสีที่ไม่ผ่านการเผาแคลไซน์ของสูตร 19 คือ 25Fe/20Si/45Zr/10Al และสูตร 11 คือ 25Fe/45Zr/30Al เมื่อเทียบกับข้อมูลมาตรฐาน พบว่าโดยผงสีแดงสูตร 25Fe/20Si/45Zr/10Al มีพีคที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 2-theta ที่ 20.0, 26.9, 35.6, 38.5, 43.7, 47.6, 52.2, 53.5, 55.6 และ 67.8 ซึ่งตรงกับการเลี้ยวเบนของระนาบ (101), (200), (112), (220), (301), (103), (321), (312), (400), และ (332) ตามลำดับ ซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนตามข้อมูลมาตรฐานของเซอร์โคเนียมซิลิเกต วัฏภาคแบบเตตระโกนอล (tetragonal) (ZrSiO_4 , JCPDS เลขที่ 06 - 0266) และพีคที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 2-theta ที่ 24.1, 33.15, 35.61, 40.9, 49.5, 64 และ 66.0 ซึ่งตรงกับการเลี้ยวเบนของระนาบ (012), (104), (110), (113), (024), (214) และ (300) ตามลำดับ ซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนตามข้อมูลมาตรฐานของเหล็กออกไซด์ที่มีวัฏภาคแบบรอมโบฮีดรอล (rhombohedral) (Fe_2O_3 , JCPDS เลขที่ 33 - 0664) และพบพีคที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 2-theta ที่ 20.9, 26.6, 36.5, 39.5, 42.3, 50.1, 59.9, 68.1 และ 68.3 ซึ่งตรงกับการเลี้ยวเบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

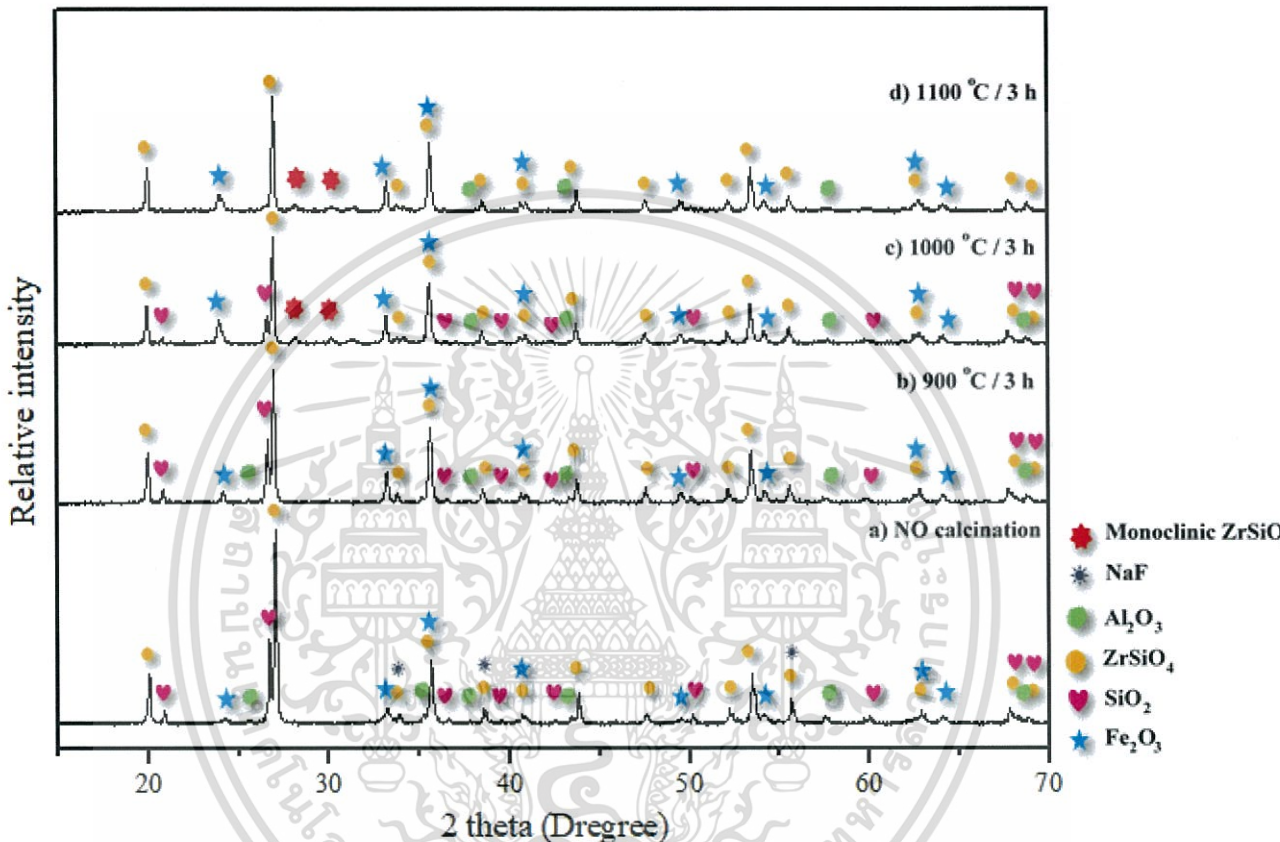
ของระนาบ (100), (101), (110), (102), (200), (112), (211), (203) และ (301) ตามลำดับ ซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนตามข้อมูลมาตรฐานของซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีวัฏภาคแบบเฮกซะโกนอล (hexagonal) (SiO_2 , JCPDS เลขที่ 46 - 1045) และพบ และพบพีคที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 2-theta ที่ 25.6, 35.2, 37.8, 43.4, 52.5, 57.5, 66.5 และ 68.2 ซึ่งตรงกับการเลี้ยวเบนของระนาบ (012), (104), (110), (113), (024), (116), (214) และ (300) ตามลำดับ ซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนตามข้อมูลมาตรฐานของอะลูมิเนียมไดออกไซด์ วัฏภาคแบบรอมโบฮีดรอล (rhombohedral) (Al_2O_3 , JCPDS เลขที่ 46 - 1212) และพบพีคที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 2-theta ที่ 33.5, 38.8 และ 56.1 ซึ่งตรงกับการเลี้ยวเบนของระนาบ (111), (200) และ (220) ตามลำดับ ซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนตามข้อมูลมาตรฐานของโซเดียมฟลูออไรด์ (NaF , JCPDS เลขที่ 435 - 0145) ผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบของสารตั้งต้นทั้งหมด คือ เหล็กออกไซด์ ซิลิกอนไดออกไซด์ เซอร์โคเนียมซิลิเกต อะลูมิเนียมไดออกไซด์ และโซเดียมฟลูออไรด์ที่อยู่ในผงสีแดงสูตร $25\text{Fe}/20\text{Si}/45\text{Zr}/10\text{Al}$ ก่อนเผา ส่วนรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงสีแดงสูตร $25\text{Fe}/45\text{Zr}/30\text{Al}$ ก่อนเผา พบพีคที่แสดงองค์ประกอบของสารตั้งต้นทั้งหมด คือ เหล็กออกไซด์ เซอร์โคเนียมซิลิเกต อะลูมิเนียมไดออกไซด์ และโซเดียมฟลูออไรด์

หลังจากนั้นได้ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกของผงสีแดงสูตร 19 คือ $25\text{Fe}/20\text{Si}/45\text{Zr}/10\text{Al}$ โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900, 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าเมื่อทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900, 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส พีคการเลี้ยวเบนของตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยาโซเดียมฟลูออไรด์หายไปและความเข้มของพีคการเลี้ยวเบนของซิลิกอนไดออกไซด์ มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้นจาก 900 เป็น 1000 องศาเซลเซียส และหายไปที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส อีกทั้งยังพบพีคการเลี้ยวเบนเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 2-theta ที่ 28 และ 32 เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคของสารตั้งต้นเซอร์โคเนียมซิลิเกตบางส่วนจากวัฏภาค เตตระโกนอลไปเป็นโมโนคลินิก (monoclinic) [31] ที่เกิดเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

จากการศึกษารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้นพีคการเลี้ยวเบนหลักระนาบ (200) ที่เป็นของเซอร์โคเนียมซิลิเกต วัฏภาคเตตระโกนอล มีการเคลื่อนไปทางซ้ายจากที่ตำแหน่ง 2-theta ที่ 26.98 ไปยังตำแหน่งที่ต่ำลง แสดงดังรูปที่ 4.5 ซึ่งจากสมการของแบรกก์ (Bragg's equation) แสดงดังสมการที่ 3.1 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างมุมการเลี้ยวเบนที่ต่ำลงมีผลทำให้ระยะห่างระหว่างระนาบ (d) มีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าแลตติซพารามิเตอร์ a ที่มีค่า 6.604 อังสตรอม และ c ที่มีค่า 5.59 อังสตรอม (ZrSiO_4 , JCPDS เลขที่ 06 - 0266) มีค่าเปลี่ยนแปลงไป โดยการเปลี่ยนแปลงของค่าแลตติซพารามิเตอร์เป็นผลมาจากการแทรกตัวของ Fe^{3+} ที่มีรัศมีไอออน 77 พิโคเมตร เข้าไปในโครงสร้างของเซอร์โคเนียมซิลิเกต ที่มีรัศมีไอออนของ Zr^{4+} เป็น 72 พิโคเมตร และ Si^{4+} เป็น 63 พิโคเมตร นอกจากนี้ยังพบพีคการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง 2-theta ที่ 33.15 ตรงกับการเลี้ยวเบนของระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(104) ของเหล็กออกไซด์ มีความเข้มข้นที่สูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิการเผาแคลไซน์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเกิดการเปลี่ยนวิภูภาคจากฮีมาไทต์ที่ให้สีแดง เป็นแมกนีไทต์ที่ให้สีดำ ส่งผลให้ค่าฟิสิกส์และค่าการสะท้อนที่ต่ำลง แสดงดังตารางที่ 4.8

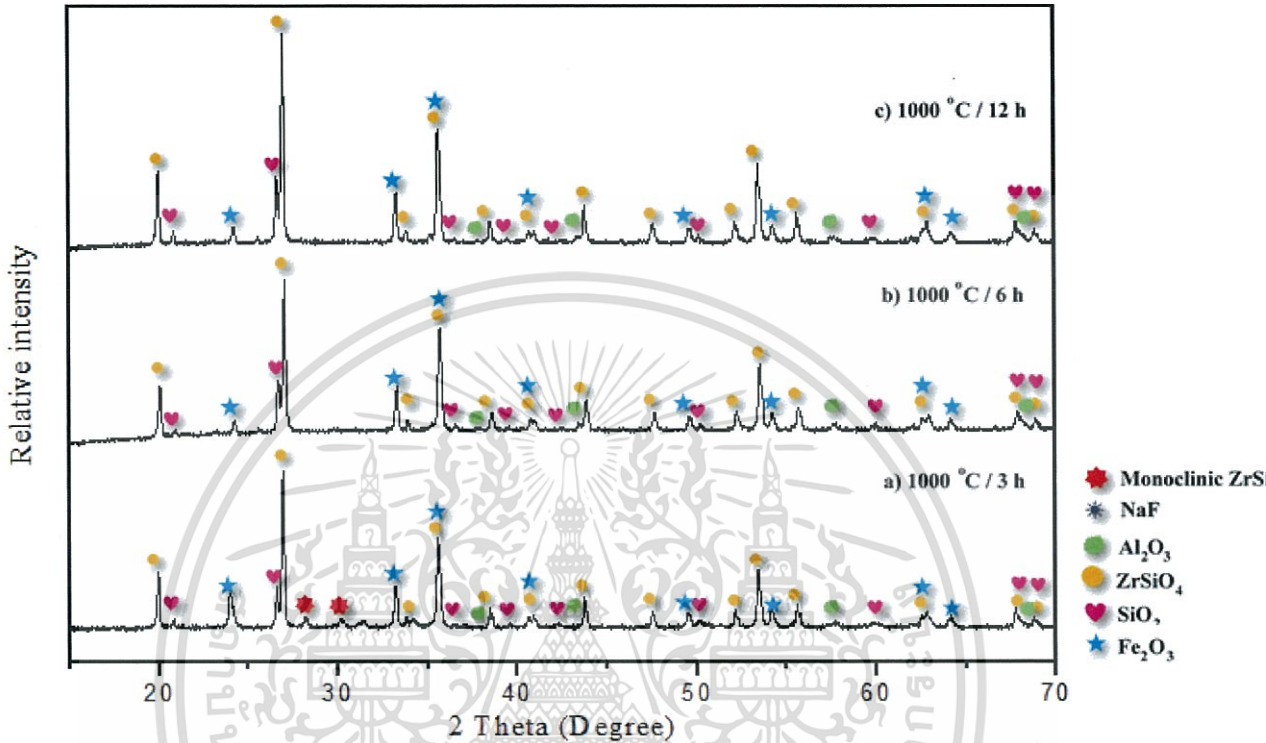


รูปที่ 4.5 ผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผงสีแดงสูตร 19 (25Fe/20Si/45Zr/10Al) a) ไม่เผาแคลไซน์ และเผาที่ b) 900 °C c) 1000 °C และ d) 1100 °C

จากนั้นได้ศึกษาผลของอิทธิพลของเวลาในการเผาแคลไซน์ เมื่อเผาผงสีแดงสูตร 19 คือ 25Fe/20Si/45Zr/10Al ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3, 6 และ 12 ชั่วโมง ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.6 พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผงสีที่เผาที่เวลาต่างกัน มีลักษณะที่คล้ายกันโดยมีความแตกต่างกันเล็กน้อยที่เผาผงสีแดงที่ได้ทำการเผาเป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบพิคการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง 2-theta ที่ 28 และ 32 ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงวิภูภาคของเซอร์โคเนียมซิลิเกตบางส่วนจากวิภูภาคเตตระโกนอล ไปเป็นโมนอคลินิก [31] เมื่อทำการเพิ่มเวลาในการเผาเป็นเวลา 6 และ 12 ชั่วโมง พบว่าพิคการเลี้ยวเบนของเซอร์โคเนียมซิลิเกตแบบโมนอคลินิกหายไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

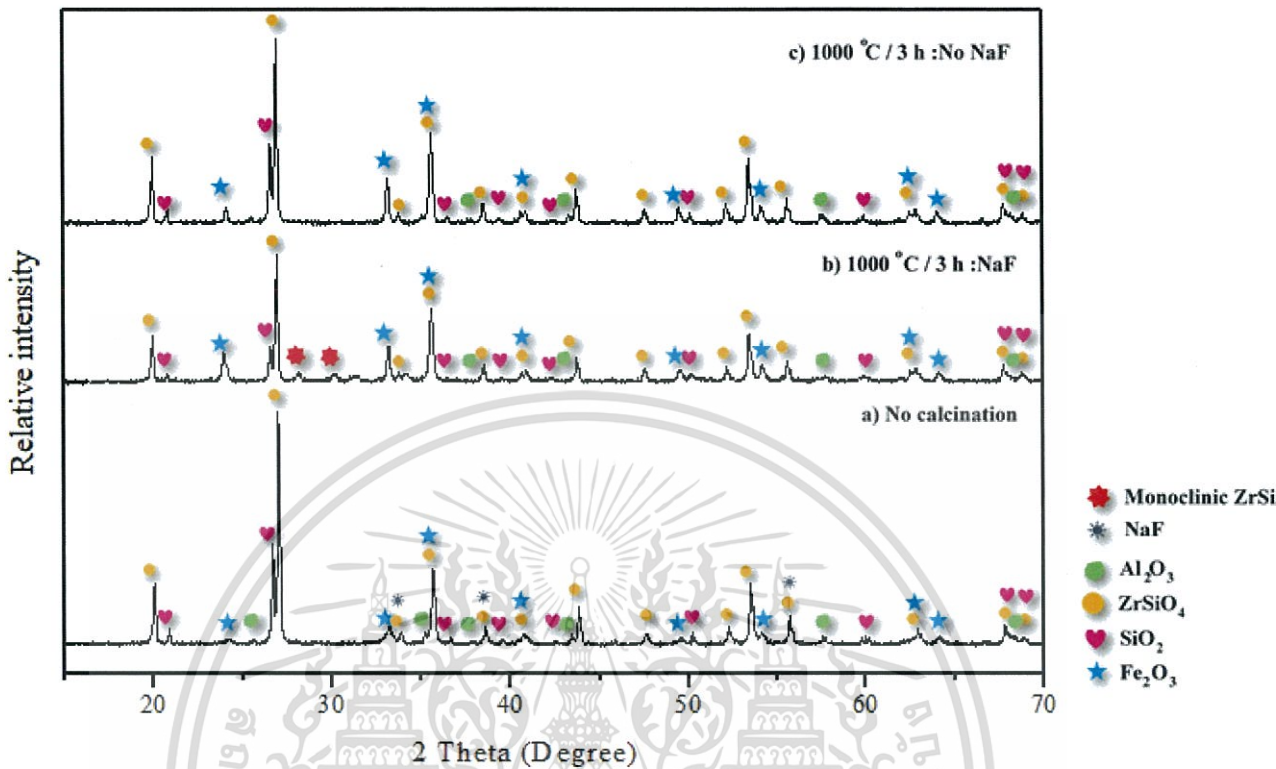
ซึ่งการเกิดวัฏภาคโมโนคลินิกส่งผลทำให้ได้ผงสีที่มีค่าความสว่าง (L^*) ต่ำลง ค่าสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) มีค่าสูงขึ้น และได้ค่าการสะท้อนที่สูงขึ้น แสดงดังตารางที่ 4.8



รูปที่ 4.6 ผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงสีแดงสูตร 19 (25Fe/20Si/45Zr/10Al) ที่เผาอุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา a) 3 ชั่วโมง b) 6 ชั่วโมง และ c) 12 ชั่วโมง

ต่อมาได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการเติมตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยาโซเดียมฟลูออไรด์ เมื่อทำการเผาผงสีแดงสูตร 25Fe/20Si/45Zr/10Al ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยการเติมและไม่เติมโซเดียมฟลูออไรด์ ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าแบบผงสีแดงที่ได้จากการเตรียมโดยไม่เติมโซเดียมฟลูออไรด์ มีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ใกล้เคียงกับผงสีแดงที่ไม่ผ่านการเผาแคลไซน์ แต่มีพีคการเลี้ยวเบนของเหล็กออกไซด์ที่มีความเข้มเพิ่มขึ้นและไม่พบพีคการเลี้ยวเบนของโซเดียมฟลูออไรด์ ส่วนรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผงสีแดงที่เตรียมโดยการเติมโซเดียมฟลูออไรด์ที่เผา 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่ความเข้มของพีคการเลี้ยวเบนซิลิกอนไดออกไซด์ที่ลดลงและพบพีคเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 2-theta ที่ 28 และ 32 ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคของสารตั้งต้นเซอร์โคเนียมซิลิกเกตจากวัฏภาคเตตระโกนอลไปเป็นโมโนคลินิก [31] ซึ่งทำให้ได้ผงสีที่มีค่าความสว่าง (L^*) ต่ำลง และค่าสีเหลือง (b^*) มีค่าสูงขึ้น และได้ค่าการสะท้อนที่ต่ำลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

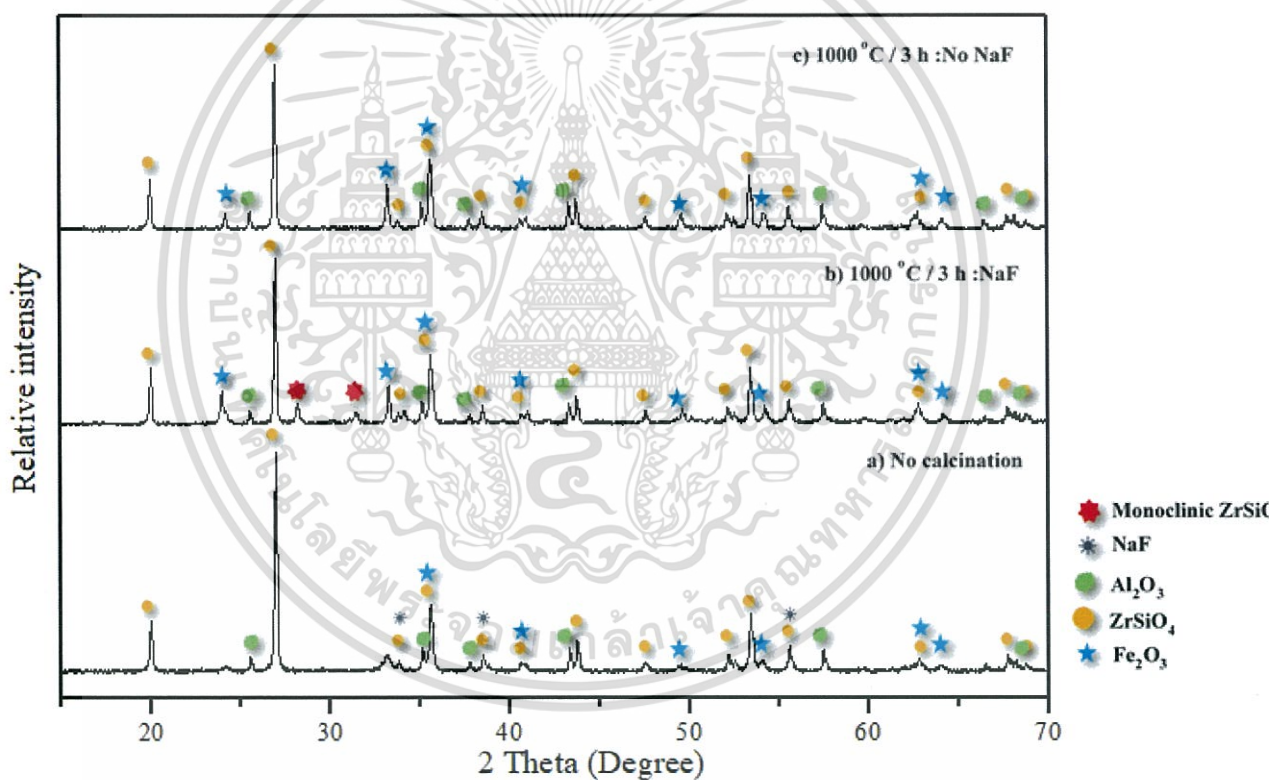


รูปที่ 4.7 ผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงสีแดงสูตร 19 (25Fe/20Si/45Zr/10Al) a) ไม่เผาแคลไซน์ และเผาที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง b) NaF และ c) ไม่เติม NaF

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกของผงสีแดงสูตร 19 คือ 25Fe/20Si/45Zr/10Al ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ พบว่าการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และเติมตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยาโซเดียมฟลูออไรด์ เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็งและยังทำให้ได้ผงสีแดงที่มีค่าพิกัดสีและค่าการสะท้อนที่เหมาะสม จึงได้ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกของผงสีแดงสูตร 11 คือ 25Fe/45Zr/30Al โดยศึกษาอิทธิพลของการเติมและไม่เติมตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยาโซเดียมฟลูออไรด์ และเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าผงสีแดงที่ได้จากการเตรียมโดยไม่เติมโซเดียมฟลูออไรด์ มีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ใกล้เคียงกับผงสีแดงที่ไม่เผาแคลไซน์ แต่มีความเข้มของพีคการเลี้ยวเบนของเหล็กออกไซด์ที่สูงกว่า และไม่พบพีคการเลี้ยวเบนของโซเดียมฟลูออไรด์ ส่วนผงสีแดงที่เตรียมจากการเติมโซเดียมฟลูออไรด์ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ ไม่แสดงพีคการเลี้ยวเบนของโซเดียมฟลูออไรด์ และมีพีคการเลี้ยวเบนเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 2-theta ที่ 28 และ 32 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคจากเตตระโกนอลเป็นโมโนคลินิกของเซอร์โคเนียมซิลิเกต [31] ทำการศึกษาพีคการเลี้ยวเบน พบว่าเมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส พีคการเลี้ยวเบนหลักระนาบ (200) ที่เป็นของเซอร์โคเนียมซิลิเกต วัฏภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตตระโกนอล มีการเคลื่อนไปทางซ้ายจากตำแหน่ง 2-theta ที่ 26.98 ไปยังตำแหน่งที่ต่ำลง แสดงดังรูปที่ 4.8 ซึ่งแสดงถึงการแทรกตัวของ Fe^{3+} เข้าไปในโครงสร้างของเซอร์โคเนียมซิลิเกต ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว และยังพบว่าพีคการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง 2-theta ที่ 33.15 ตรงกับการเลี้ยวเบนของระนาบ (104) ของเหล็กออกไซด์ มีความเข้มที่สูงขึ้น เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนวัสดุจากฮีมาไทต์มาให้สีแดงเป็นแมกนีไทต์ที่ให้สีดำ จากการศึกษาผลของการเติมตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยาโซเดียมฟลูออไรด์ พบว่าการผสมสีแดงที่เตรียมขึ้นจากการเติมตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยาโซเดียมฟลูออไรด์ สามารถช่วยให้เกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็งได้ดีกว่าผสมสีแดงที่ไม่เติมตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยาโซเดียมฟลูออไรด์ ส่งผลให้จะทำให้ค่าความสว่าง (L^*) และค่าสีเหลือง (b^*) มีค่าต่ำลง ค่าสีแดง (a^*) มีค่าสูงขึ้น และได้ค่าการสะท้อนที่ต่ำลง แสดงดังตารางที่ 4.8

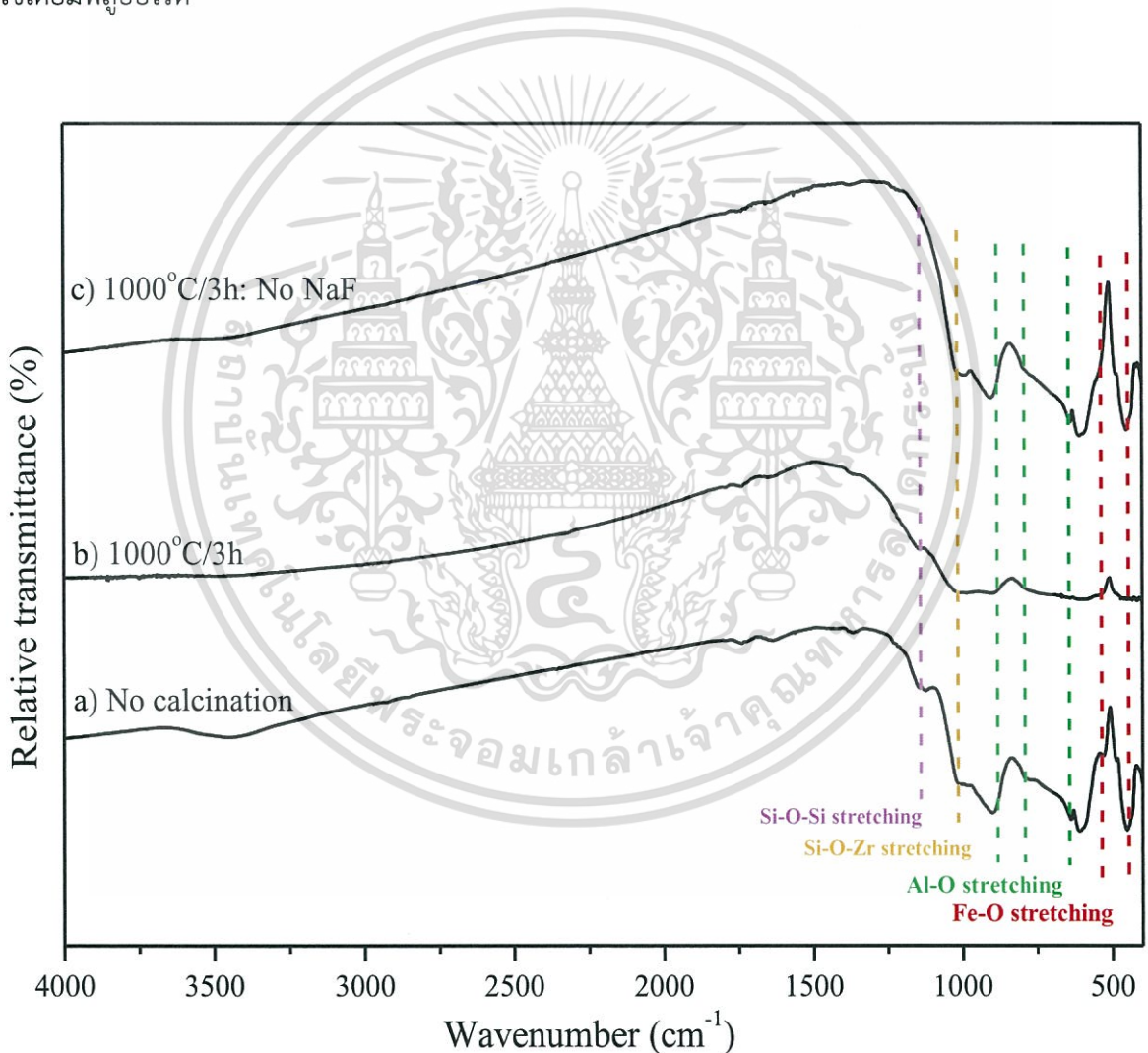


รูปที่ 4.8 ผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงสีแดงสูตร 11 (25Fe/45Zr/30Al) a) ไม่เผาแคลไซน์ และเผาที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง b) เติม NaF และ c) ไม่เติม NaF

จากการศึกษาพีคการเลี้ยวเบนของผงสีแดงสูตร 11 หรือ 25Fe/45Zr/30Al พบพีคของเซอร์โคเนียมซิลิเกตเกิดการเคลื่อนไปทางซ้าย เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เกิดจากการแทรกของเหล็กออกไซด์ที่เป็น Fe^{3+} แทรกเข้าไปในโครงสร้างของเซอร์โคเนียมซิลิเกตแบบเตตระโกนอล และ

เซอร์โคเนียมซิลิเกตบางส่วนเกิดเป็นเซอร์โคเนียมซิลิเกตที่มีวัฏภาคเป็นโมนอกlinik และในการเผาที่ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมงแบบใส่ตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยา คือ โซเดียมฟลูออไรด์ ให้ค่าพิกัดสีและค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเทียบกับแบบที่ไม่ใส่ตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยา

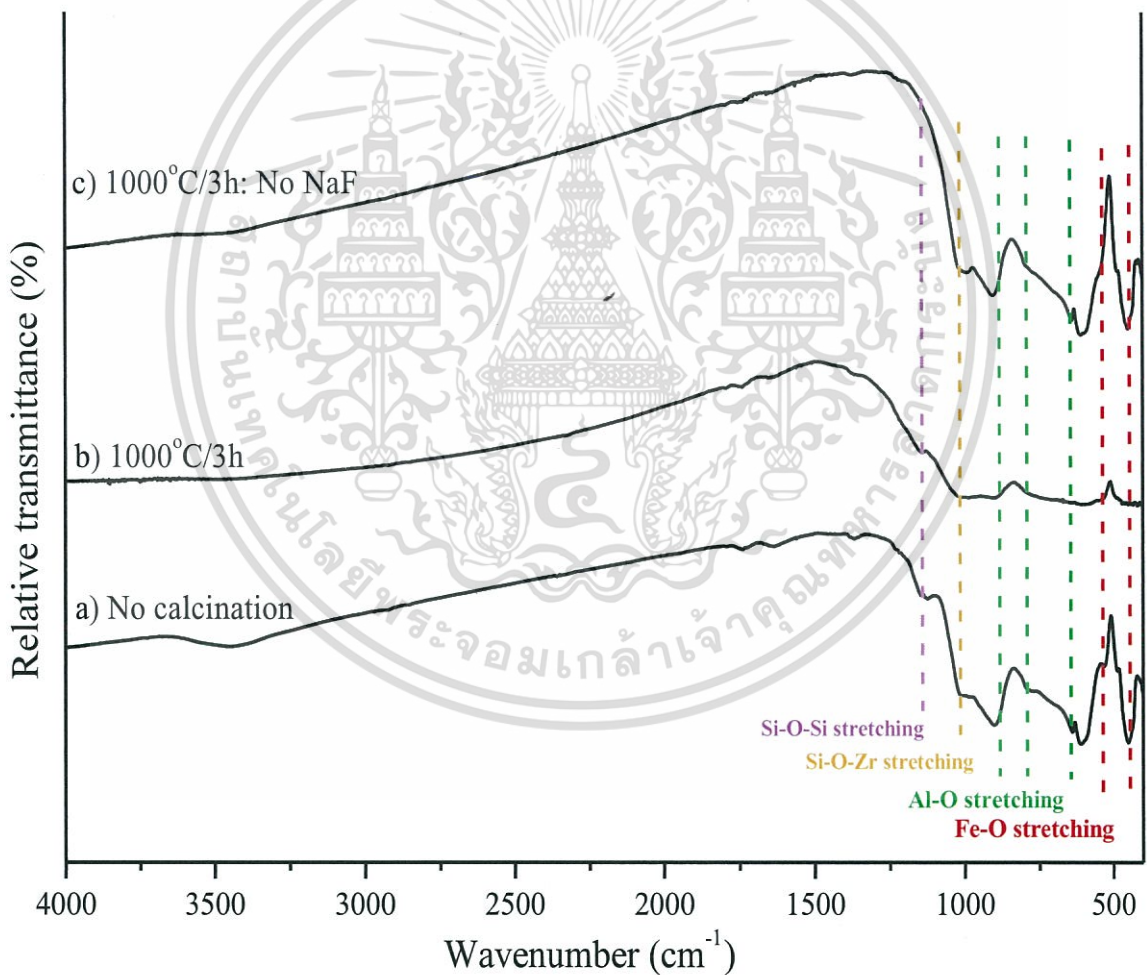
จากนั้นได้ทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างโมเลกุลด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ FT-IR ของผงสีแดงสูตร 19 คือ 25Fe/20Si/45Zr/10Al และผงสีแดงสูตร 11 คือ 25Fe/45Zr/30Al โดยทำการศึกษาผงสีแดงโดยเทียบระหว่างผงสีแดงที่ไม่ผ่านการเผาแคลไซน์ และเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แบบเติมตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยาโซเดียมฟลูออไรด์ และไม่เติมโซเดียมฟลูออไรด์



รูปที่ 4.9 อินฟราเรดสเปกตรัมของผงสีแดงสูตร 19 (25Fe/20Si/45Zr/10Al) a) ไม่เผาแคลไซน์ และเผาที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง b) เติม NaF และ c) ไม่เติม NaF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 พบว่าอินฟราเรดสเปกตรัมของผงสีแดงสูตร 25Fe/20Si/45Zr/10Al และ 25Fe/45Zr/30Al ที่เตรียมจากสภาวะต่าง ๆ แสดงช่วงการดูดกลืนแสงในลักษณะเดียวกัน โดยพบช่วงการดูดกลืนแสงที่แสดงเอกลักษณ์เฉพาะขององค์ประกอบต่าง ๆ คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1080 cm^{-1} ซึ่งตรงกับการสั่นของพันธะ Si-O-Si แบบยืดหด (stretching) ในเซอร์โคเนียมซิลิเกต ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1046 cm^{-1} ซึ่งตรงกับการสั่นของพันธะ Si-O-Zr แบบยืดหด อะลูมิเนียมไดออกไซด์ ที่ตำแหน่งเลขคลื่น $899, 796$ และ 695 cm^{-1} ซึ่งตรงกับการสั่นของพันธะ Al-O แบบยืดหด และเหล็กออกไซด์ ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 524 และ 417 cm^{-1} ซึ่งตรงกับการสั่นของพันธะ Fe-O แบบยืดหด [32]



รูปที่ 4.10 อินฟราเรดสเปกตรัมของผงสีแดงสูตร 11 (25Fe/45Zr/30Al) a) ไม่เผาแคลไซน์ และเผาที่อุณหภูมิ $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง b) เติม NaF และ c) ไม่เติม NaF

4.2.3 ศึกษาปริมาณของธาตุองค์ประกอบ

ตารางที่ 4.10 องค์ประกอบผงสีแดงสูตร 19 (25Fe/20Si/45Zr/10Al) และสูตร 11 (25Fe/45Zr/30Al)

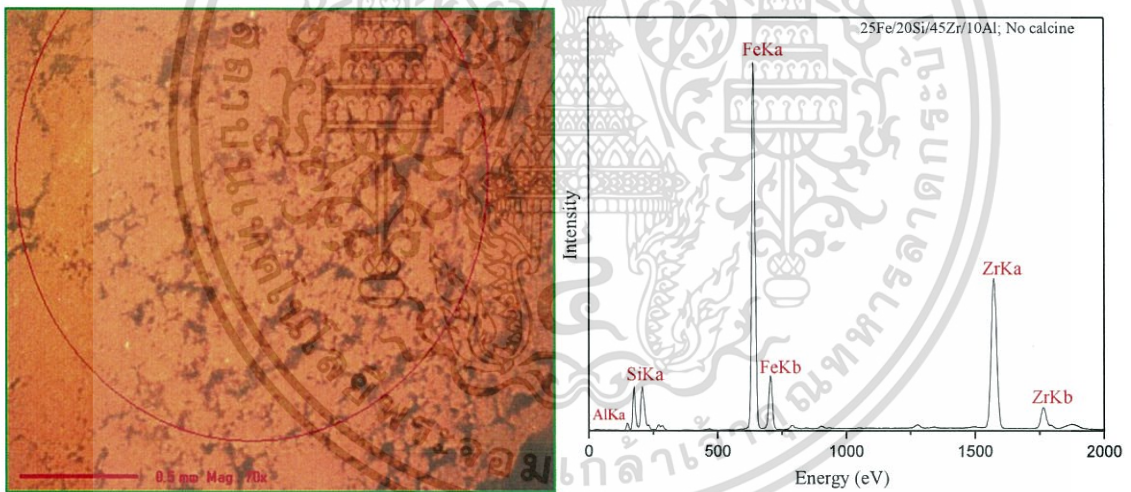
สูตร	องค์ประกอบ	อุณหภูมิ		องค์ประกอบออกไซด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)							
		(°C) /	NaF	Fe ₂ O ₃		SiO ₂		ZrSiO ₄		Al ₂ O ₃	
		เวลา		%ทาง	%การ	%ทาง	%การ	%ทาง	%การ	%ทาง	%การ
(h)	ทฤษฎี	ทดลอง	ทฤษฎี	ทดลอง	ทฤษฎี	ทดลอง	ทฤษฎี	ทดลอง			
19	25Fe/20Si/ 45Zr/10Al	-	8	23.14	25.41	18.51	20.66	41.66	42.01	9.25	11.92
		1000/3	8	25.0	25.32	20.0	14.38	45.0	50.77	10.0	9.35
		1000/3	-	25.0	23.70	20.0	16.58	45.0	50.63	10.0	9.09
11	25Fe/45Zr/ 30Al	-	8	23.14	25.96	-	-	41.66	47.68	27.77	26.36
		1000/3	8	25.0	21.58	-	-	45.0	54.25	30.0	24.18
		1000/3	-	25.0	31.46	-	-	45.0	48.36	30.0	20.18

หมายเหตุ : การคำนวณร้อยละโดยน้ำหนักทางทฤษฎีของผงสีที่เตรียมจากการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมงโดยการเติม NaF ได้ค่าคำนวณจากการไม่นับรวมปริมาณของ NaF เนื่องจากถูกกำจัดออกในขั้นตอนการเผาแคลไซน์และการล้างผงสี

จากศึกษาปริมาณของธาตุองค์ประกอบโดยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทสโกปี (XRF) ของผงสีแดงสูตร 25Fe/20Si/45Zr/10Al และ 25Fe/45Zr/30Al ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 - 4.16 พบว่าผงสีแดงทั้งสองสูตรก่อนการเผาแคลไซน์มีองค์ประกอบที่ใกล้เคียงกับองค์ประกอบของสารตั้งต้น โดยผงสีแดงสูตร 25Fe/20Si/45Zr/10Al เผาที่ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แบบเติมและไม่เติมตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดียมฟลูออไรด์ มีร้อยละโดยน้ำหนักของเหล็กออกไซด์ และอะลูมิเนียมไดออกไซด์ ที่ใกล้เคียงกับองค์ประกอบสารตั้งต้นแต่มีร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกอนไดออกไซด์ที่ลดลง และเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องจากผลของเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ที่เมื่อทำการเผาแคลไซน์จะทำให้วัฏภาคซิลิกอนไดออกไซด์ลดลง และเกิดวัฏภาคใหม่ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคบางส่วนของเซอร์โคเนียมซิลิเกตจากเตตระโกนอลเป็นโมโนคลินิก [31] และการแทรกตัวของเหล็กออกไซด์ในโครงสร้างของเซอร์โคเนียมซิลิเกต ให้ค่าพิกัดสีและค่าการสะท้อนที่ต่ำลง ส่วนผงสีแดงสูตร 25Fe/45Zr/30Al เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แบบไม่เติมตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดียมฟลูออไรด์ มีร้อยละโดยน้ำหนักของสารตั้ง

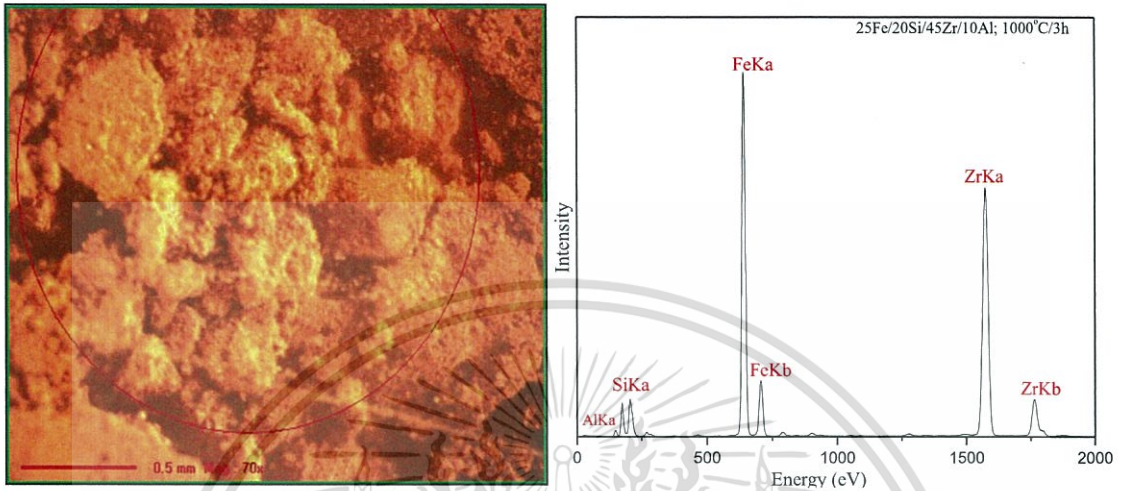
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้นทั้งหมด คือ เหล็กออกไซด์ เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ และอะลูมิเนียมไดออกไซด์ ใกล้เคียงกับสารตั้งต้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่พีคการเลี้ยวเบนมีตำแหน่งที่ใกล้เคียงผงสีแดงก่อนเผา ได้ค่าพิกัดใกล้เคียงกันแต่ค่าการสะท้อนต่ำกว่าผงสีก่อนเผา ส่วนผงสีแดงสูตร $25\text{Fe}/45\text{Zr}/30\text{Al}$ ที่ทำการเผาที่ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แบบเติมโซเดียมฟลูออไรด์ มีปริมาณองค์ประกอบของเหล็กออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์ ใกล้เคียงกับองค์ประกอบของสารตั้งต้น แต่มีองค์ประกอบของเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลของเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ที่เมื่อทำการเผาแคลไซน์จะทำให้เกิดวัฏภาคใหม่ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคของเซอร์โคเนียมซิลิเกตแบบเตตระโกนอลเป็นแบบโมโนคลินิก [31] เกิดการแทรกตัวของ Fe^{3+} ในโครงสร้างของเซอร์โคเนียมซิลิเกตและได้ค่าพิกัดคือ $L^* b^*$ ลดลง ส่วน a^* นั้นเพิ่มสูงขึ้นและค่าการสะท้อนที่ต่ำลงเล็กน้อย

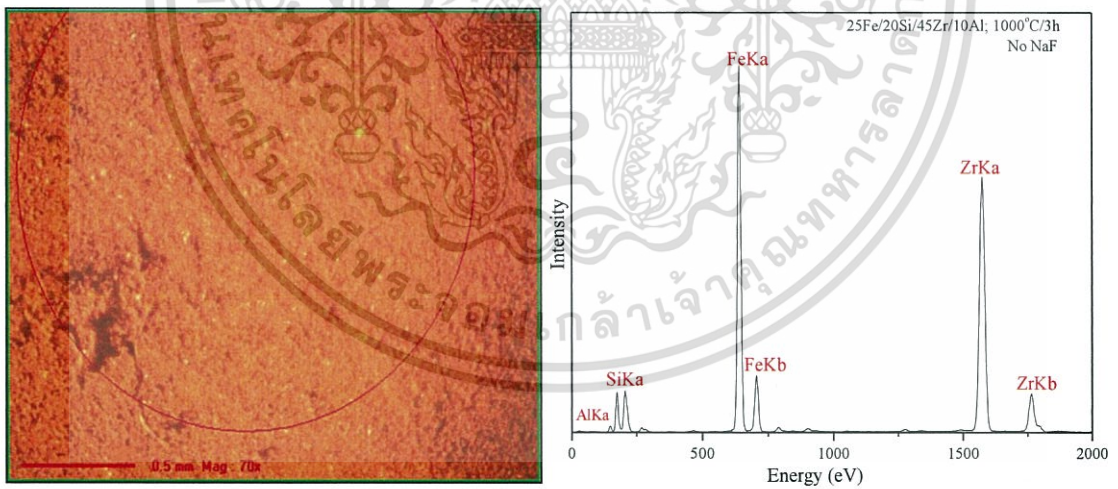


รูปที่ 4.11 รูปภาพและ XRF สเปกตรัมของผงสีสูตร 19 ($25\text{Fe}/20\text{Si}/45\text{Zr}/10\text{Al}$) ไม่เผาแคลไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

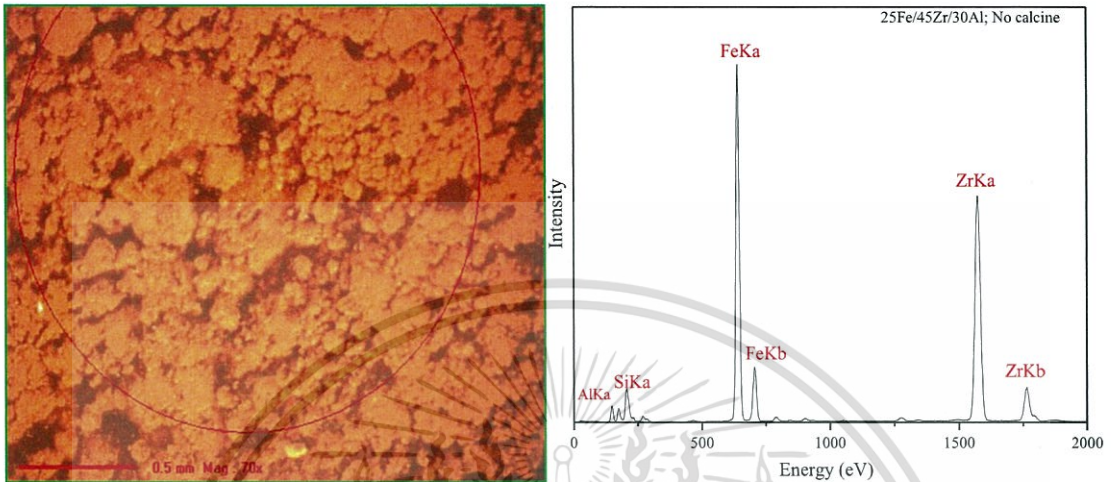


รูปที่ 4.12 รูปภาพและ XRF สเปกตรัมของผงสีสูตร 19 (25Fe/20Si/45Zr/10Al) เผาที่ 1000 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แบบเติม NaF

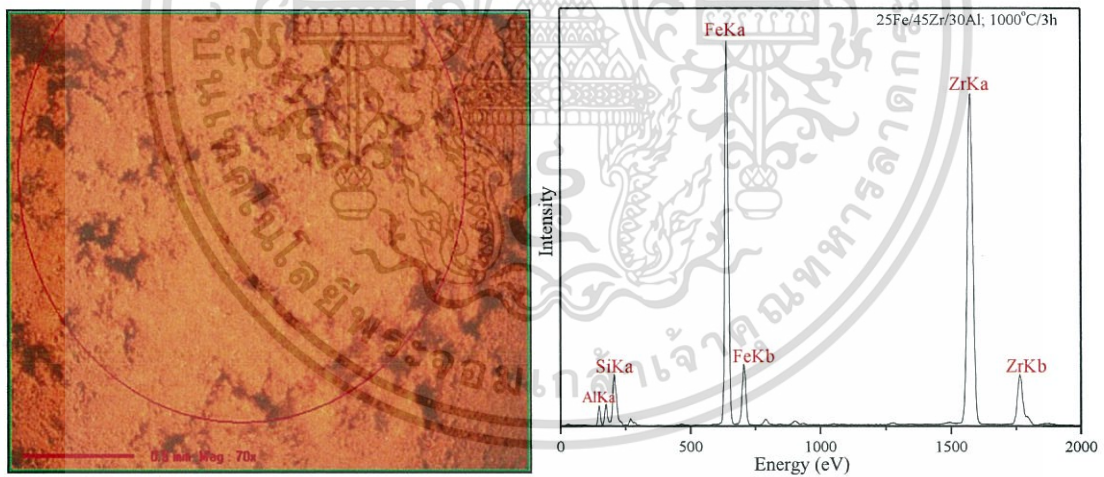


รูปที่ 4.13 รูปภาพและ XRF สเปกตรัมของผงสีสูตร 19 (25Fe/20Si/45Zr/10Al) เผาที่ 1000 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แบบไม่เติม NaF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

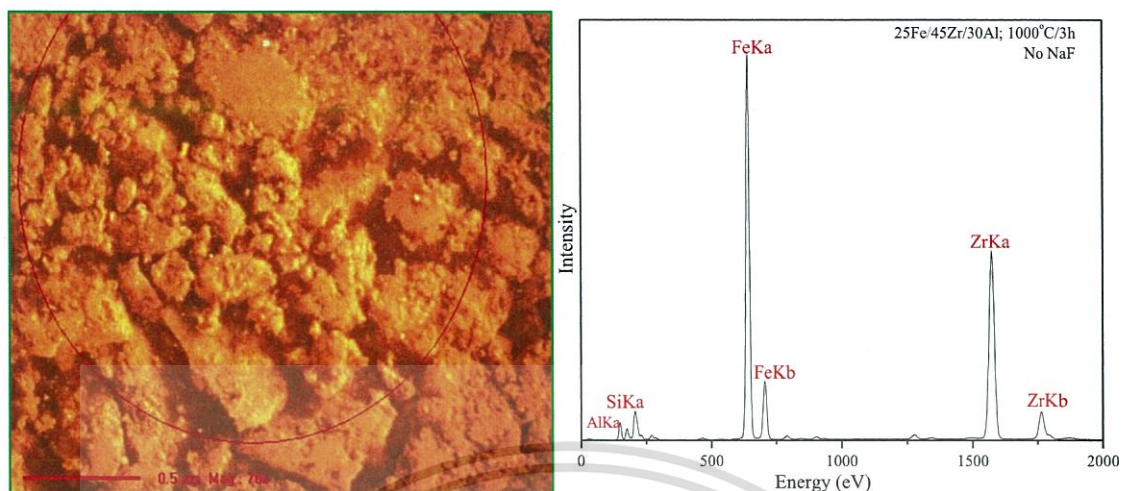


รูปที่ 4.14 รูปภาพและ XRF สเปกตรัมของผงสีสูตร 11 (25Fe/45Zr/30Al) ไม่เผาแคลไซน์



รูปที่ 4.15 รูปภาพและ XRF สเปกตรัมของผงสีสูตร 11 (25Fe/45Zr/30Al) เผาที่ 1000 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แบบเติม NaF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 รูปภาพและ XRF สเปกตรัมของผงสีสูตร 11 (25Fe/45Zr/30Al) เผาที่ 1000 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แบบไม่เติม NaF

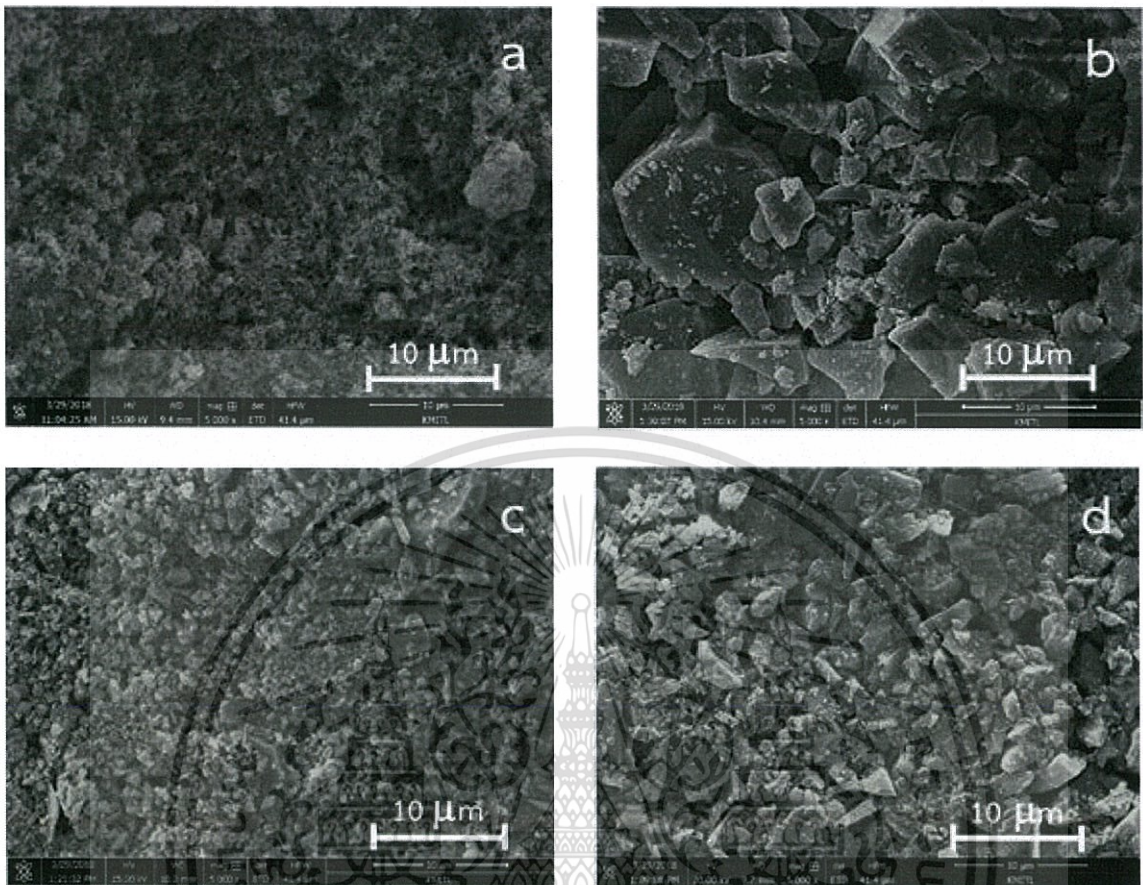
4.2.4 ศึกษาสัณฐานวิทยา

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning- electron microscope, SEM) ร่วมกับการหาค่าอนุภาคเฉลี่ยด้วยการใช้โปรแกรม Image J ของสารตั้งต้นเหล็กออกไซด์ ซิลิกอนไดออกไซด์ เซอร์โคเนียมซิลิเกต และ อะลูมิเนียมออกไซด์ ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.17 และตารางที่ 4.11 โดยการกระจายตัวของอนุภาคแสดงในภาคผนวกพบว่าสารตั้งต้นแต่ละชนิดมีรูปร่างและขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน โดยมีทั้งอนุภาคที่มีรูปร่างแท่งและเหลี่ยม โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยในช่วง 0.7 - 3.5 ไมโครเมตร

ตารางที่ 4.11 รูปร่างและขนาดอนุภาคเฉลี่ยของของสารตั้งต้น

สารตั้งต้น	รูปร่าง	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมโครเมตร) ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
เหล็กออกไซด์	แท่ง	0.7±1.5
ซิลิกอนไดออกไซด์	เหลี่ยม	6.16±0.4
เซอร์โคเนียมซิลิเกต	เหลี่ยม	1.72±0.4
อะลูมิเนียมออกไซด์	เหลี่ยม	3.50±0.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



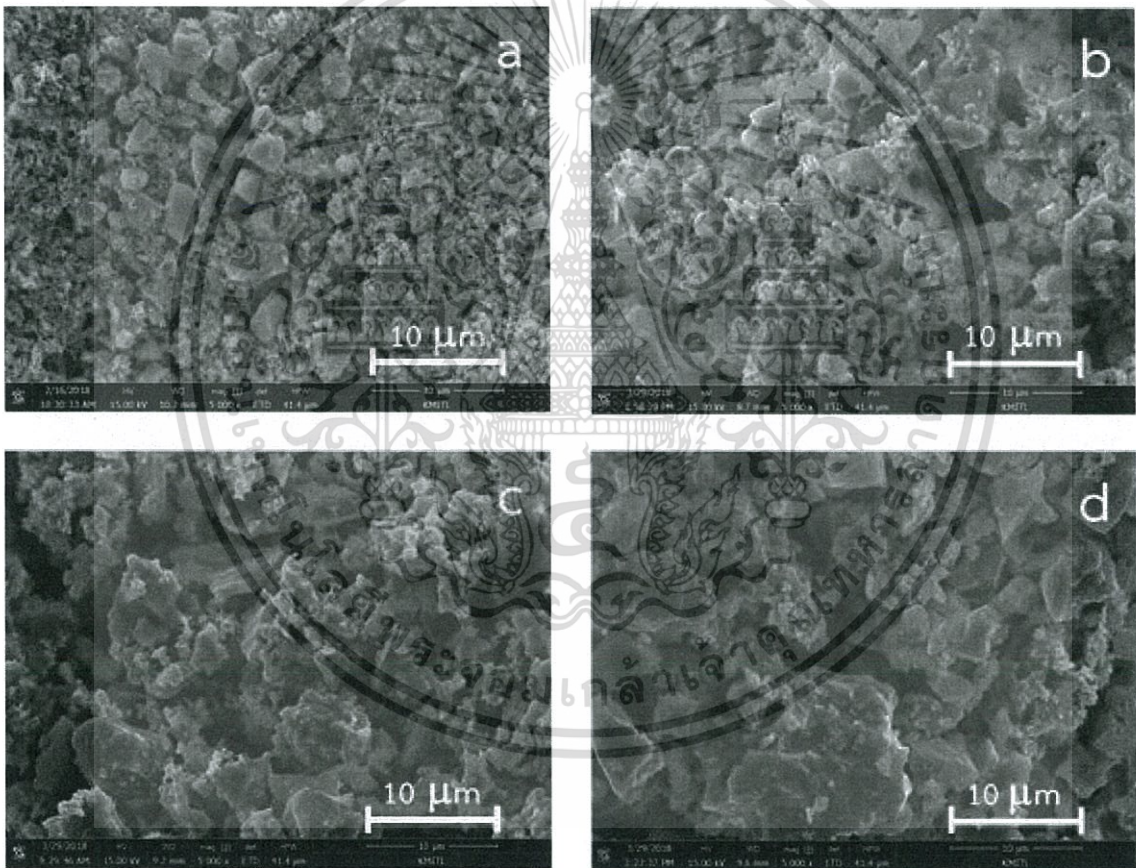
รูปที่ 4.17 ภาพถ่าย SEM a) Fe_2O_3 b) SiO_2 , c) ZrSiO_4 และ d) Al_2O_3

จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเคลือบที่มีต่อลักษณะสัณฐานวิทยา ของผงสีแดง สูตร 19 คือ 25Fe/20Si/45Zr/10Al ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และตารางที่ 4.12 จากภาพถ่าย SEM พบว่าผงสีแดงที่มีองค์ประกอบของเหล็กออกไซด์ ซิลิกอนไดออกไซด์ เซอร์โคเนียมซิลิเกต และอะลูมิเนียมไดออกไซด์ มีการกระจายตัวของอนุภาคต่าง ๆ อย่างสม่ำเสมอ โดยผงสีแดงที่ไม่ผ่านการเผาเคลือบมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 2.48 ± 0.53 ไมโครเมตร ผงสีแดงที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900, 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4.19 ± 0.88 , 4.82 ± 1.14 และ 7.71 ± 1.92 ไมโครเมตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าผงสีแดงที่ผ่านการเผาเคลือบเกิดการรวมตัวกันของอนุภาค ทำให้มีขนาดอนุภาคที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในการเผาที่เพิ่มสูงขึ้น โดยการเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส ทำให้ผงสีที่ได้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นไม่มากนัก แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาเคลือบเป็น 1100 องศาเซลเซียส ส่งผลให้อนุภาคเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงสีสูตร 25Fe/20Si/ 45Zr/10Al เมื่อเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

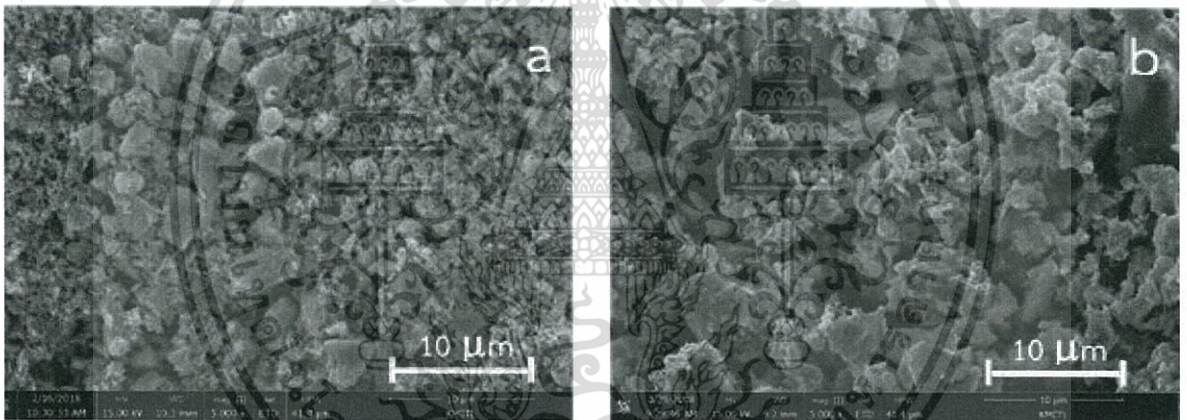
สภาวะการเผาแคล์ไซน์	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมโครเมตร) \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ไม่เผา	2.48 ± 0.53
เผาที่ 900 °C/3 ชั่วโมง เติม NaF	4.19 ± 0.88
เผาที่ 1000 °C/3 ชั่วโมง เติม NaF	4.82 ± 1.14
เผาที่ 1100 °C/3 ชั่วโมง เติม NaF	7.71 ± 1.92



รูปที่ 4.18 ภาพถ่าย SEM ของผงสีสูตร 19 (25Fe/20Si/45Zr/10Al) a) ไม่เผาแคล์ไซน์, b) 900 °C, c) 1000 °C และ d) 1100 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการเติมตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยาโซเดียมฟลูออไรด์ ที่มีต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของผงสีสูตร 25Fe/20Si/45Zr/10Al โดยการเผาแคลไซน์ที่ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ผลแสดงดังรูปที่ 4.19 และตารางที่ 4.13 พบว่าผงสีแดงสูตร 25Fe/20Si/45Zr/10Al ที่เติมโซเดียมฟลูออไรด์ มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ใหญ่กว่าที่ไม่เติมโซเดียมฟลูออไรด์เล็กน้อย โดยมีขนาด 4.82 ± 1.14 และ 3.71 ± 0.87 ตามลำดับ ซึ่งการที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงสีที่มีการเติมโซเดียมฟลูออไรด์ มีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากการที่โซเดียมฟลูออไรด์เกิดการหลอมตัว และทำให้อนุภาคชนิดต่าง ๆ คือ เหล็กออกไซด์ ซิลิกอนไดออกไซด์ เซอร์โคเนียมซิลิเกต และอะลูมิเนียมไดออกไซด์ เกิดปฏิกิริยาและการรวมตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ขึ้น ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าผงสีแดงที่ผ่านการเผาจะเกิดการรวมตัวกันของอนุภาค ทำให้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในการเผาที่สูงขึ้น และผงสีที่เตรียมได้จากการเติมตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยา NaF จะมีอนุภาคเฉลี่ยที่ใหญ่กว่าผงสีแดงที่ไม่เติมโซเดียมฟลูออไรด์ในสภาวะการเผาเดียวกัน



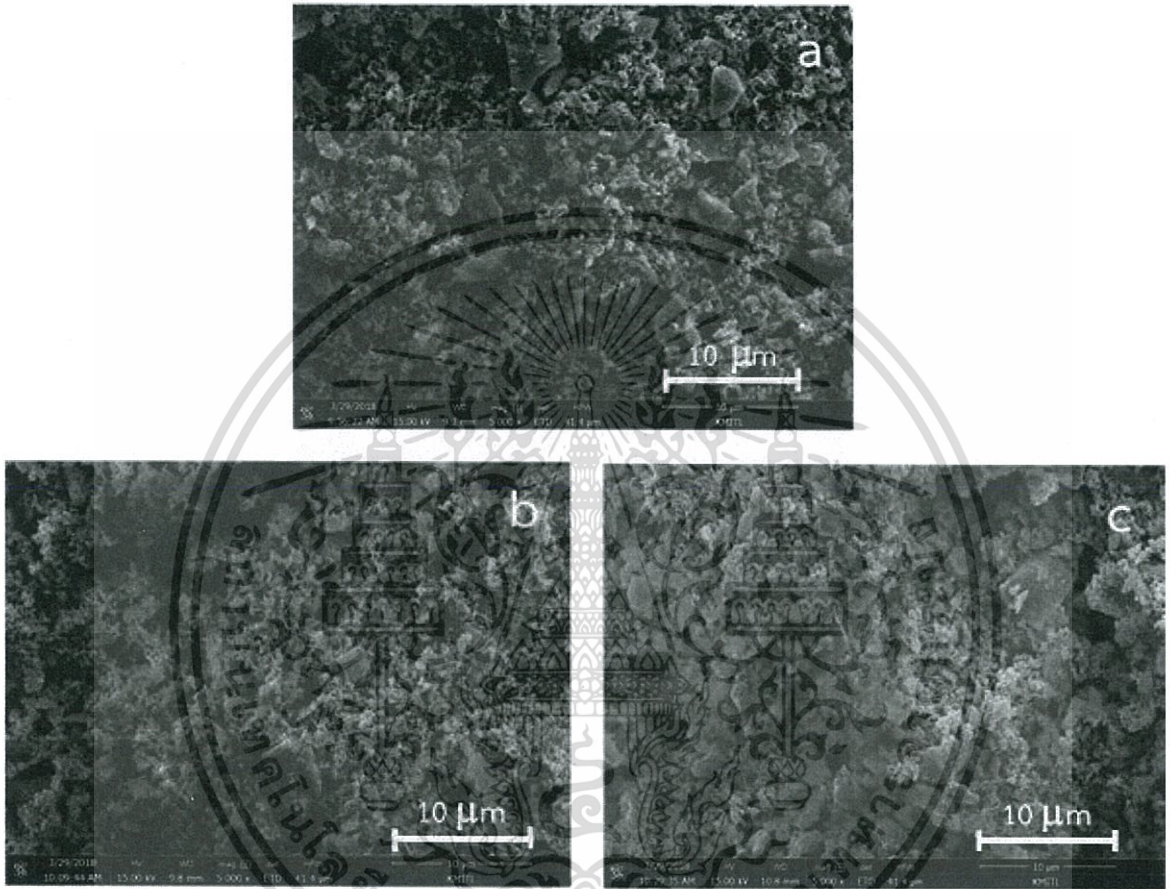
รูปที่ 4.19 ภาพถ่าย SEM ของผงสีแดงสูตร 19 (25Fe/20Si/45Zr/10Al) a) ไม่เติม NaF b.) เติม NaF

ตารางที่ 4.13 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงสีแดงสูตร 25Fe/20Si/ 45Zr/10Al เมื่อเติมและไม่เติมโซเดียมฟลูออไรด์

สภาวะการเผาแคลไซน์	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมโครเมตร) \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
1000 °C/3 ชั่วโมง เติม NaF	4.82 ± 1.14
1000 °C/3 ชั่วโมง ไม่เติม NaF	3.71 ± 0.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของผงสีแดงสูตร 11 คือ 25Fe/45Zr/30Al ที่ไม่ผ่านการเผาแคลไซน์ และเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมงที่เดิมและไม่เติมตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดียมฟลูออไรด์ ผลแสดงดังรูปที่ 4.20 และตารางที่ 4.14



รูปที่ 4.20 ภาพถ่าย SEM ของผงสีแดงสูตร 11 (25Fe/45Zr/30Al) a) ไม่เผาแคลไซน์ และเผาที่ 1000 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง b) เติม NaF และ c) ไม่เติม NaF

ตารางที่ 4.14 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงสีสูตร 25Fe/45Zr/30Al

สถานะการเผาแคลไซน์	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมโครเมตร) \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ไม่เผา	1.71 \pm 0.26
1000 °C/3 ชั่วโมง เติม NaF	5.16 \pm 0.85
1000 °C/3 ชั่วโมง ไม่เติม NaF	3.18 \pm 0.71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าผงสีแดงที่ไม่ผ่านการเผาแคลไซน์มีการกระจายตัวขององค์ประกอบเหล็กออกไซด์ เซอร์โคเนียมซิลิเกต และ อะลูมิเนียมไดออกไซด์ ที่สม่ำเสมอโดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1.71 ± 0.26 ไมโครเมตร ส่วนผงสีแดงที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ใหญ่ขึ้นโดยผงสีแดงที่เตรียมได้จากการเติมโซเดียมฟลูออไรด์ มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเป็น 5.16 ± 0.85 ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าที่ไม่เติมโซเดียมฟลูออไรด์ที่มีขนาด 3.18 ± 0.71 เล็กน้อย ซึ่งเกิดจากการหลอมตัวของโซเดียมฟลูออไรด์ และการเกาะรวมกันของอนุภาคเมื่อทำการเผาแคลไซน์ ซึ่งจากการศึกษาโครงสร้างผลึกและสัณฐานวิทยาพบว่าสภาวะการเผาที่เหมาะสม คือ การเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และการเติมตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยาโซเดียมฟลูออไรด์ เนื่องทำให้ได้ผงสีแดงที่มีค่าพิกัดสีที่เหมาะสมและค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่สูง อีกทั้งยังทำให้ได้ผงสีที่มีความเสถียรเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็งและเกิดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาคต่าง ๆ ที่มีขนาดอนุภาคไม่ใหญ่มากนัก ทำให้สามารถกระจายตัวในตัวกลางได้ดีเมื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นสีเคลือบและสีทาสะท้อนรังสีอาทิตย์ต่อไป

4.3 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการสังเคราะห์ผงสีแดงโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง โดยได้ทำการศึกษาผลขององค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบตั้งต้น และผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผาที่มีต่อค่าพิกัดสี ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ โครงสร้างผลึก และสัณฐานวิทยา พบว่าองค์ประกอบของวัตถุดิบตั้งต้นที่ทำให้ได้ผงสีแดงที่มีค่าพิกัดสีและค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นผงสีสะท้อนรังสีอาทิตย์ คือ สูตร $25\text{Fe}/45\text{Zr}/30\text{Al}$ เนื่องจากสังเคราะห์ได้ง่ายเพราะมีองค์ประกอบของวัตถุดิบตั้งต้นที่น้อยกว่าสูตร $25\text{Fe}/20\text{Si}/45\text{Zr}/10\text{Al}$ ที่ให้ค่าพิกัดสีและค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ใกล้เคียงกัน ผลจากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงสีทั้งสองสูตรพบว่า การเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสขึ้นไป เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยการเติมตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยาโซเดียมฟลูออไรด์ จะพบการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคของเซอร์โคเนียมซิลิเกตจากเตตระโกนอลเป็นโมโนคลินิก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็ง และการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคของสารตั้งต้น จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาผลที่ได้สอดคล้องกับผลจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยพบว่าอนุภาคของผงสีแดงมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเติมโซเดียมฟลูออไรด์และเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเกิดจากการหลอมตัวของโซเดียมฟลูออไรด์เกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็ง โดยสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ผงสีแดงคือการใช้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ที่ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยเติมตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยาโซเดียมฟลูออไรด์ เนื่องจากการทำให้ได้ผงสีแดงที่มีความเสถียรและมีขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของวัตถุดิบที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

โครงการพิเศษนี้ได้ศึกษาการสังเคราะห์ผงสีแดงจากเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ที่เป็นองค์ประกอบหลักผ่านวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid state reaction) โดยได้ศึกษาชนิดและอัตราส่วนของสารตั้งต้น คือ เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เซอร์โคเนียมซิลิเกต (ZrSiO_4) อะลูมินา (Al_2O_3) ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และซีเรียมไดออกไซด์ (CeO_2) และการใช้โซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) เป็นตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยา ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาในช่วง 900 - 1100 องศาเซลเซียสและเวลาที่ใช้ในการเผาในช่วง 3, 6 และ 12 ชั่วโมง โดยพบว่าสถานะในการสังเคราะห์ที่ทำให้ได้ผงสีแดงที่มีค่าพิกัดสีและค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่เหมาะสม คือ การเตรียมผงสีแดงจากสูตร 19 และสูตร 11 ที่มีองค์ประกอบคือ 25Fe/20Si/45Zr/10Al และ 25Fe/45Zr/30Al ตามลำดับ โดยมีค่าพิกัดสีอยู่ในช่วง $L^* 37 - 48$ $a^* 27 - 35$ $b^* 21 - 24$ และค่าการสะท้อนรังสี NIR ร้อยละ 71 - 74

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิและผลของเวลาที่ใช้ในการเผาแคลไซน์ของผงสีทั้งสองสูตรพบว่าหากเผาเพิ่มอุณหภูมิในการเผาที่สูงขึ้นจาก 900 ถึง 1100 องศาเซลเซียส จะทำให้เหล็กออกไซด์เกิดการเปลี่ยนวิภาคจากฮีมาไทต์เป็นแมกนีไทต์ [30] ทำให้โดยมีค่าพิกัดสี L^* และ b^* ที่ลดลง อีกทั้งยังมีค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดที่ลดต่ำลงด้วย ส่วนการเพิ่มเวลาในการเผาแคลไซน์ในช่วง 3, 6 และ 12 ชั่วโมงและการเติมตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยา NaF ส่งผลให้ได้ผงสีแดงที่มีค่าพิกัดสีที่ไม่แตกต่างกันมากนัก

จากผลการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) โครงสร้างโมเลกุลด้วยเทคนิค FT - IR และองค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค XRF พบว่าผงสีแดงสูตร 25Fe/20Si/45Zr/10Al และ 25Fe/45Zr/30Al ที่เตรียมได้จากการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เกิดการเปลี่ยนแปลงวิภาคของ ZrSiO_4 บางส่วนจากเตตระโกนอลเป็นโมนอคลินิก แสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็ง เมื่อศึกษาผลของการเติมตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยาโซเดียมฟลูออไรด์ พบว่าการผงสีแดงที่เตรียมจากการเติมตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยาโซเดียมฟลูออไรด์ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็งได้ดีกว่าผงสีแดงที่ไม่ใส่ตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งกล่าวได้ว่าเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็งระหว่างการเผาแคลไซน์

การศึกษาลักษณะสัณฐานของผงสีแดงที่สังเคราะห์จากเทคนิค SEM พบว่าผงสีที่เตรียมได้ประกอบด้วยอนุภาคของสารตั้งต้น คือ อนุภาคของเหล็กออกไซด์ ซิลิกอนไดออกไซด์ เซอร์โคเนียมซิลิเกต และอะลูมิเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคและรูปร่างที่แตกต่างกัน กระจายตัวสม่ำเสมอ โดยผงสีแดงที่ผ่านการเผาแคลไซน์จะเกิดการรวมตัวกันของอนุภาค ทำให้มีขนาดอนุภาคที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในการเผาที่เพิ่มสูงขึ้น โดยการเพิ่มอุณหภูมิในการเผาจาก 900 เป็น 1000 องศาเซลเซียส ทำให้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนการเผาที่ 1100 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อศึกษาผลของตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยาโซเดียมฟลูออไรด์ จะพบการหลอมรวมกันของอนุภาค

จากผลการศึกษาพัฒนาผงสีแดงสะท้อนรังสีอินฟราเรดจากเหล็กออกไซด์ พบว่าสภาวะในการเตรียมที่ทำให้ได้ผงสีแดงที่ดีที่สุด คือ การใช้อัตราส่วน 25Fe/45Zr/30Al และเติมตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยา NaF ที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ที่ 1000 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง โดยทำให้ผงสีแดงที่มีค่าพิกัดสี $L^* 47.57$ $b^* 30.35$ และ $a^* 24.12$ และค่าการสะท้อนรังสี NIR ที่สูงถึงร้อยละ 74 อีกทั้งสภาวะที่ใช้ยังทำให้ได้ผงสีแดงที่มีความเสถียร เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็ง และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่เหมาะสม คือมีขนาด 5.16 ทำให้สามารถกระจายตัวได้ดีในตัวกลาง เพื่อนำไปประยุกต์เป็นสีเคลือบหรือสีทาสะท้อนรังสีอาทิตย์ต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

- (1) ศึกษาถึงผลของการสังเคราะห์ผงสีแดงด้วยเทคนิคอื่น ๆ เช่น โซล - เจล และไฮโดรเทอร์มอล เป็นต้น ที่มีผลต่อค่าพิกัดสี การสะท้อนรังสี NIR โครงสร้างผลึก และสัณฐานวิทยา
- (2) ศึกษาถึงผลของปัจจัยที่ใช้ในการสังเคราะห์ผงสีแดง คือ ชนิดและอัตราส่วนของสารตั้งต้นเมื่อใช้โลหะออกไซด์ชนิดอื่น ๆ เช่น บิสมัทโทแทสเซียมไททาเนต (BKT) แบเรียมออกไซด์ (BaO) และการปรับอัตราส่วนของเหล็กออกไซด์จากสูตรที่ดีที่สุดที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่น การเพิ่มหรือลดปริมาณอัตราส่วนของเหล็กออกไซด์ เป็นต้น
- (3) ศึกษาการ बदลดขนาดอนุภาคของสารตั้งต้นให้มีขนาดที่เล็กกว่าเดิม ซึ่งอาจส่งผลต่อการเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาและการสะท้อนรังสี NIR

เอกสารอ้างอิง

- [1] ผู้ผลิตและผู้ส่งออกเครื่องปรับอากาศใหญ่ที่สุดในอาเซียน. 2560. [Online]. Available : <http://www.chiangmaiaircare.com/รู้ไหมว่าประเทศไทยเป็น-ผลิตและผู้ส่งออกเครื่องปรับอากาศรายใหญ่ที่สุดในอาเซียน> เข้าถึงเมื่อ 3 ธันวาคม 2560
- [2] ฉนวนกันความร้อน ช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานได้อย่างไร. 2560. [Online]. Available : <https://www.wtg.co.th/index.php/th/news/knowledge-insulated-sandwich-panel/253insulation-helps-reduce-the-cost-of-energy.html>. เข้าถึงเมื่อ 3 ธันวาคม 2560
- [3] เหล็กออกไซด์ธรรมชาติสีแดง. 2560. [Online]. Available : <http://th.csjkchemical.com/info/natural-iron-oxide-red-18843379.html> เข้าถึงเมื่อ 11 มกราคม 2561
- [4] M. F.-M. H. B.M. E. C. Marc Jovan. 2017. “Environmental-friendly red-orange ceramic pigment based on Pr and. Journal of the European Ceramic Society” Journal of the European Ceramic Society. volume 38, Issue 4, Pages 2210-2217.
- [5] D. W. T. W. Aiqin Wang. 2017. “Novel environment friendly inorganic red pigments based on attapulgite” Journal of powder technology, Volume 315, Pages 60-67.
- [6] สุพัตรา วงส์แสนใหม่. 2016. “การพัฒนาวัสดุดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จากผงแบเรียมไททาเนต” คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ.เชียงใหม่.
- [7] ซิลิกอนไดออกไซด์. 2017. [Online]. Available : <http://www.siamchemi.com/ซิลิกา>. เข้าถึงเมื่อ 11 มกราคม 2561
- [8] เซอร์โคเนียมซิลิเกต. 2017. [Online]. Available : <http://www.dmr.go.th/main.php>. เข้าถึงเมื่อ 11 มกราคม 2561
- [9] Transparent Aluminum. 2017. [Online]. Available : http://tikalon.com/blog/blog.php?article=2015/transparent_aluminum. เข้าถึงเมื่อ 13 มกราคม 2561
- [10] ไททาเนียมไดออกไซด์. 2017. [Online]. Available : <http://www.siamchemi.com/ไททาเนียมไดออกไซด์/>. เข้าถึงเมื่อ 13 มกราคม 2561
- [11] สังกะสี 2017. [Online]. Available : <https://www.chemipan.com/1137/1137-zinc-oxide-ซิงค์-ออกไซด์-เคมีภัณฑ์-สารเคมี.html>. เข้าถึงเมื่อ 13 มกราคม 2561
- [12] สีกันความร้อน. 2017. [Online]. Available : <http://www.decorreport.com/a5186-ส-ก-นค-วามร-อน>. เข้าถึงเมื่อ 13 มกราคม 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] **Light frequencies on the electromagnetic spectrum.** 2017 [Online]. Available : <https://www.sciencealert.com/here-s-why-your-future-internet-could-come-through-your-lightbulb>. เข้าถึงเมื่อ 21 มกราคม 2561
- [14] **การป้องกันความร้อนภายในอาคารและผนังอาคาร.** 2017. [Online]. Available : <https://big-powersupply.com/3003/>. เข้าถึงเมื่อ 21 มกราคม 2561
- [15] **Heat reflect paint.** 2017. [Online]. Available : <http://www.astecpaints.com.au/heat-reflective-paint.html>. เข้าถึงเมื่อ 21 มกราคม 2561
- [16] **ฮีมาไทต์(Hematite).** 2017. [Online]. Available : <http://www.dmr.go.th/main.php?filename=hematite>. เข้าถึงเมื่อ 12 มกราคม 2561
- [17] **สีเซรามิก.** 2017. [Online]. Available : http://www.thaiceramicsociety.com/rm_paint_ceramiccolor.php. เข้าถึงเมื่อ 12 มกราคม 2561
- [18] **ฮีมาไทต์ (Hematite)** 2018 [Online]. Available : <http://bliss-luckystone.lnwshop.com/article/38/ฮีมาไทต์-hematite>. เข้าถึงเมื่อ 23 มกราคม 2561
- [19] **แอลฟา-เหล็กออกไซด์.** 2018 [Online]. Available : [https://en.wikipedia.org/wiki/Iron\(III\)_oxide](https://en.wikipedia.org/wiki/Iron(III)_oxide). เข้าถึงเมื่อ 12 มกราคม 2561
- [20] Z. W. T. Y. C. J. a. W.-S. K. Wei Wu. 2558. “Recent progress on magnetic iron oxide nano - particles: synthesis, surface functional strategies and biomedical applications.” Science and Technology of Advanced Materials, Volume 16, Pages 2.
- [21] **Silicon dioxide empirical formula.** 2017. [Online]. Available : <https://socratic.org/questions/silicon-dioxide-empirical-formula-please>. เข้าถึงเมื่อ 23 มกราคม 2561
- [22] **การประยุกต์ใช้ซิลิกอนไดออกไซด์.** 2017. [Online]. Available : <https://www.hielscher.com/th>. เข้าถึงเมื่อ 11 มกราคม 2561
- [23] Q. X. M. X. S. W. a. J. Y. Zirui Wang. 2558. “In situ spectroscopic studies of decomposition of ZrSiO₄ during alkali fusion process using various hydroxides.” RSC advances. Issue 15, Pages 11658-11666.
- [24] **Zinc oxide structure.** 2018. [Online]. Available : https://www.webelements.com/compounds/zinc_oxide.html. เข้าถึงเมื่อ 13 มกราคม 2561
- [25] **Magnesium Oxide.** 2017. [Online]. Available : <http://www.siamchemi.com> แมกนีเซียมออกไซด์ เข้าถึงเมื่อ 15 มีนาคม 2561
- [26] **ซีเรียมออกไซด์.** 2017. [Online]. Available : http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/ce/nanodatabase/info_index.php?cat_id=4. เข้าถึงเมื่อ 15 มีนาคม 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [27] Taphonomy's Rainbow: The Introduction and Application of Chromophoric Variance Analysis. 2017. [Online]. Available : https://www.researchgate.net/figure/CIELab-1976-after-Figure-1-from-SantAnna-et-al-2013-602_311426707. เข้าถึงเมื่อ 11 มกราคม 2561
- [28] Maryam HOSSEINI-ZORI. 2013. "Substitution of a fraction of zircon by cristobalite in nano hematite encapsulated pigment and examination of glaze application." Volume 2, Issue 2, Pages 149–156.
- [29] Eliane Coser. 2013. "Development of paints with infrared radiation reflective properties." Volume 25, Issue 3, Pages 305-310.
- [30] M. Kikumoto, Y. Mizuno, N. Adachi, Y. Iwata และ H. Yokoyama. 2008. "Effect of SiO₂ and Al₂O₃ on the synthesis of Fe₂O₃ red pigment." Journal of Ceramic society of japan, Volume 116, Issue 2, Pages 247-250.
- [31] K. Pyon และ B.yong Lee. 2009. "Effect of iron content and annealing temperature on the color characteristics of Fe-ZrSiO₄ cora pink pigments synthesized by Sol-gel method." Journal of the ceramic society of Japan, Volume 117, Issue 3, Pages 258-263.
- [32] G.T. และคณะ. (2017). "Cost-efficient, vivid and stable red hybrid pigments derived from naturally." Volume 23, Issue 2, Pages 1862-1869.
- [33] เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์. 2017. [Online]. Available : <http://mfu.ac.th/center/stic/index.php/x-ray-analysis-instrument>. เข้าถึงเมื่อ 19 พฤศจิกายน 2560
- [34] สมการของ Bragg's Law. 2017. [Online]. Available <http://202.44.15.99/sic/index.php/>. เข้าถึงเมื่อ 19 พฤศจิกายน 2560
- [35] กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด. 2017. [Online]. Available : <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>. เข้าถึงเมื่อ 19 พฤศจิกายน 2560
- [36] เครื่องมือวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน. 2017. [Online]. Available : http://www.mic.eng.ku.ac.th/facilities.php?id_sub=41. เข้าถึงเมื่อ 19 พฤศจิกายน 2560
- [37] การตรวจวัดค่าของสีด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์. 2017. [Online]. Available : <http://www.scimath.org/lesson-physics/item/7277-2017-06-13-14-42-30>. เข้าถึงเมื่อ 19 พฤศจิกายน 2560
- [38] การวัดค่าสี. 2017. [Online]. Available : สืบค้นจาก : <https://www.pballtechno.com>. เข้าถึงเมื่อ 19 พฤศจิกายน 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [39] เครื่องยูวีวิสิเบิล เอ็นไออาร์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์. 2017. [Online]. Available : <https://www.mri.psu.edu/materialscharacterizationlab/characterizationtechniques/ultraviolet-visible-spectroscopy-uv-vis>. เข้าถึงเมื่อ 19 พฤศจิกายน 2560
- [40] เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี. 2017. [Online]. Available : <http://chemistry.sc.chula.com> เข้าถึงเมื่อ 19 พฤศจิกายน 2560
- [41] ED-XRF. 2017.[Online]. Available : http://cleverich.com/xrf_work.html. เข้าถึงเมื่อ 23 มกราคม 2561
- [42] ED-XRF. 2017. [Online]. Available : <http://cste.sut.ac.th/2014/?p=1947>. เข้าถึงเมื่อ 23 มกราคม 2561



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การคำนวณสารที่ใช้ในการสังเคราะห์

1. การสังเคราะห์ผงสีแดง

1.1 สารเคมีที่เกี่ยวข้อง

- 1.1.1 เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) บริสุทธิ์ 99% น้ำหนักโมเลกุล 159.687 กรัมต่อโมล
- 1.1.2 ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) บริสุทธิ์ 99% น้ำหนักโมเลกุล 60.083 กรัมต่อโมล
- 1.1.3 เซอร์โคเนียมซิลิเกต (ZrSiO_4) บริสุทธิ์ 98% น้ำหนักโมเลกุล 183.305 กรัมต่อโมล
- 1.1.4 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) บริสุทธิ์ 99% น้ำหนักโมเลกุล 101.96 กรัมต่อโมล
- 1.1.5 ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) บริสุทธิ์ 99% น้ำหนักโมเลกุล 81.38 กรัมต่อโมล
- 1.1.6 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) บริสุทธิ์ 99% น้ำหนักโมเลกุล 79.866 กรัมต่อโมล
- 1.1.7 โซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) บริสุทธิ์ 99% น้ำหนักโมเลกุล 41.98817 กรัมต่อโมล

1.2 สูตรที่ใช้ในการคำนวณ ปริมาณสารตั้งต้น

$$g_2 = \frac{x}{100} \times g_1 \quad (n-1)$$

โดยที่ g_1 คือ น้ำหนักรวมสารที่ต้องการเตรียม (กรัม)

g_2 คือ น้ำหนักสารตั้งต้นที่ต้องการเตรียม (กรัม)

x คือ ร้อยละโดยน้ำหนักของสารตั้งต้น

การสังเคราะห์ผงสีแดง สูตร 25Fe/20Si/45Zr/10Al จากสมการ (ก-1)

การคำนวณ ปริมาณสารตั้งต้นของผงสีแดงสูตร 25Fe/20Si/45Zr/10Al จำนวน 10 กรัม

สารตั้งต้น Fe_2O_3

แทนค่า

$$g_2 = \frac{25}{100} \times 10$$

$$g_2 = 2.5 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นต้องเตรียม Fe_2O_3 จำนวน 2.5 กรัม

สารตั้งต้น SiO_2

แทนค่า

$$g_2 = \frac{20}{100} \times 10$$

$$g_2 = 2.0 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นต้องเตรียม SiO_2 จำนวน 2.0 กรัม

สารตั้งต้น ZrSiO_4

แทนค่า

$$g_2 = \frac{45}{100} \times 10$$

$$g_2 = 4.5 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นต้องเตรียม ZrSiO_4 จำนวน 4.5 กรัม

สารตั้งต้น Al_2O_3

แทนค่า

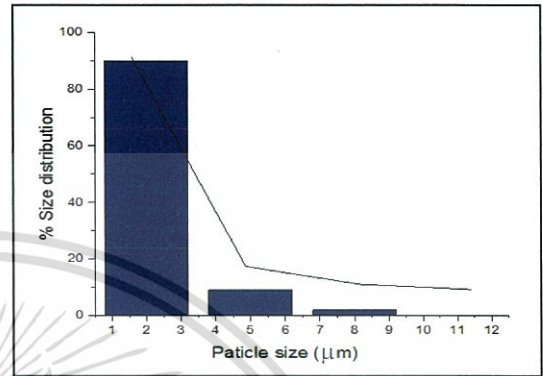
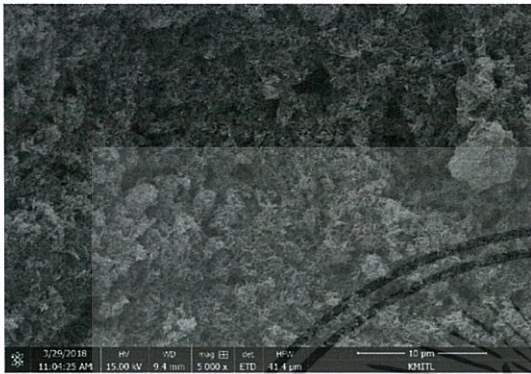
$$g_2 = \frac{10}{100} \times 10$$

$$g_2 = 1.0 \text{ กรัม}$$

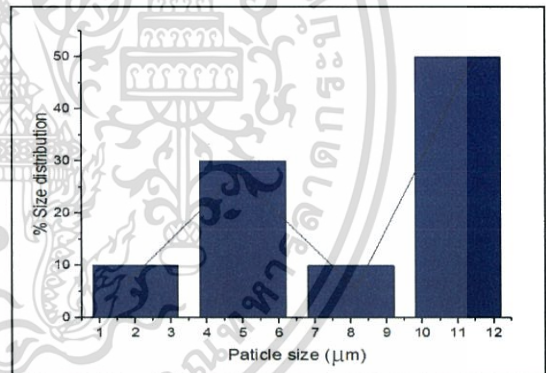
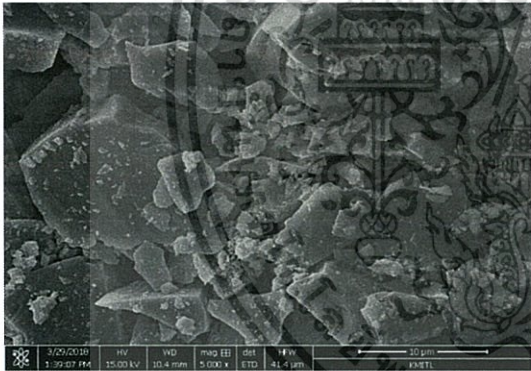
ดังนั้นต้องเตรียม Al_2O_3 จำนวน 1.0 กรัม

ภาคผนวก ข

ลักษณะพื้นฐานวิทยาของผงสีแดง

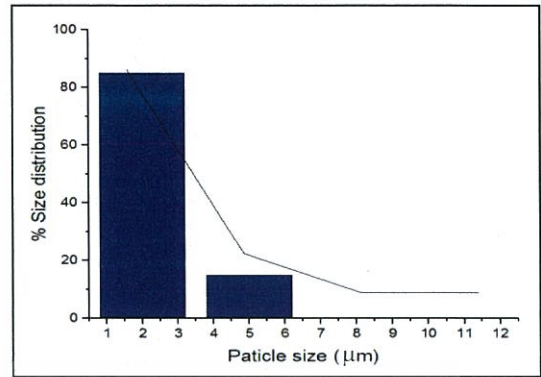


ภาพ SEM และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3)

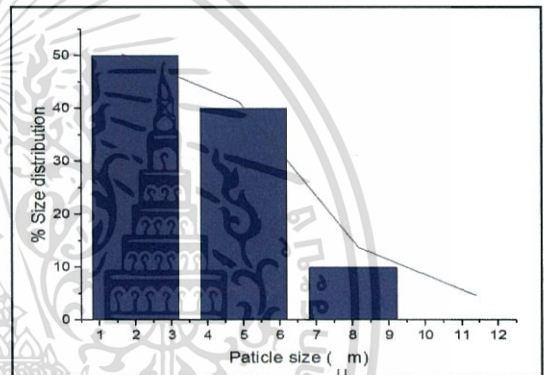


ภาพ SEM และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)

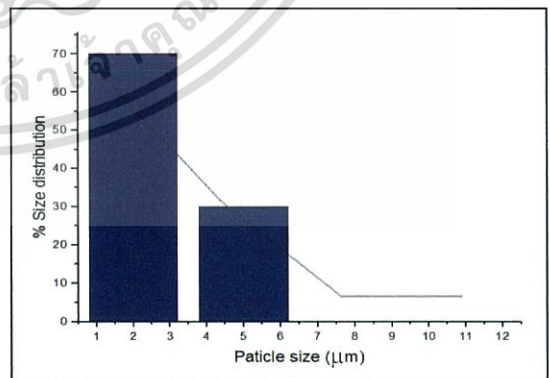
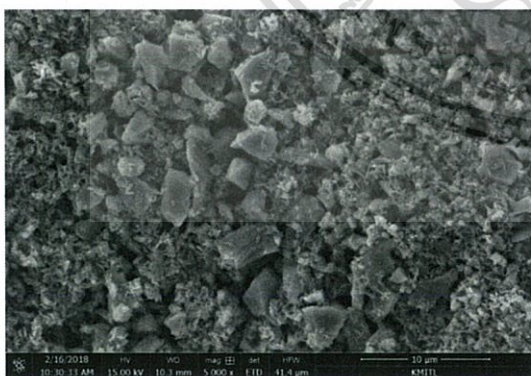
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพ SEM และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของเซอร์โคเนียมซิลิเกต (ZrSiO₄)

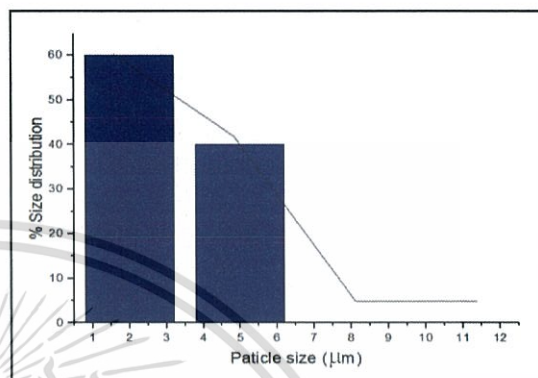
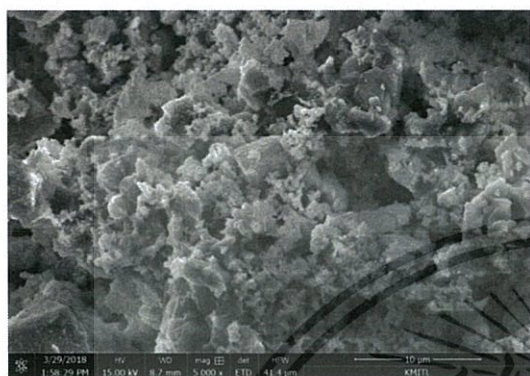


ภาพ SEM และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของอะลูมิเนียมไดออกไซด์ (Al₂O₃)

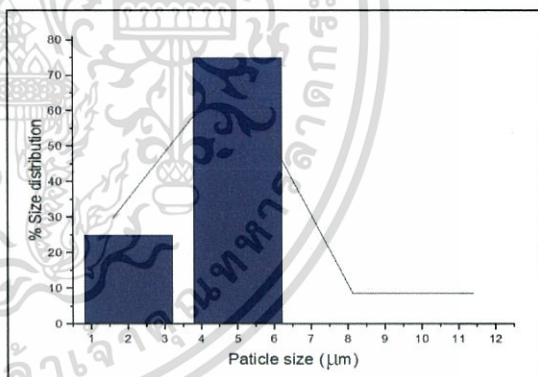
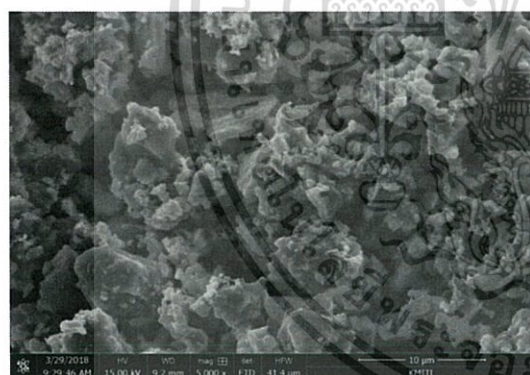


ภาพ SEM และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผงสีสูตร 25Fe/20Si/45Zr/10Al ไม่เผาแคลไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

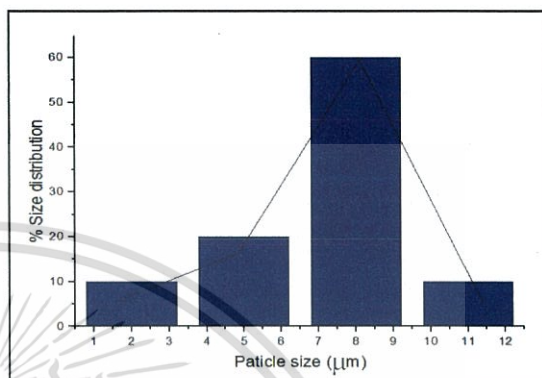
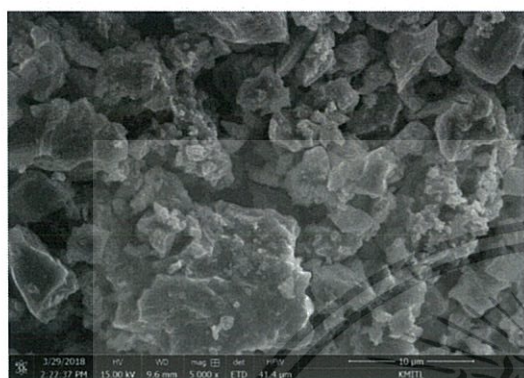


ภาพ SEM และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผงสึสูตร 25Fe/20Si/45Zr/10Al เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

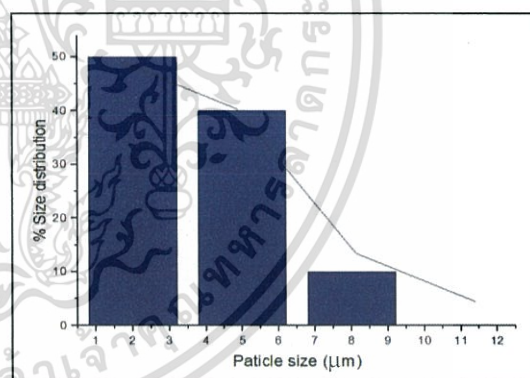
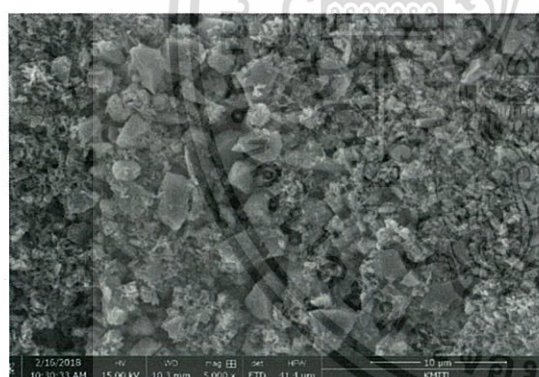


ภาพ SEM และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผงสึสูตร 25Fe/20Si/45Zr/10Al เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

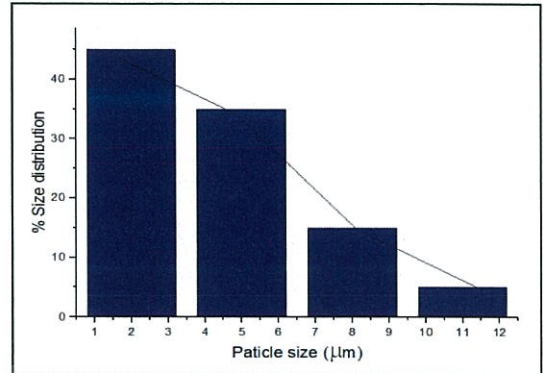
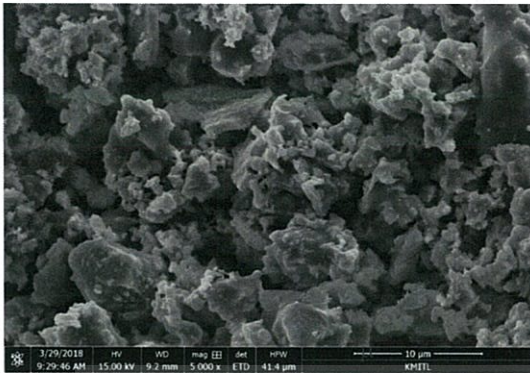


ภาพ SEM และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผงวัสดุ 25Fe/20Si/45Zr/10Al เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

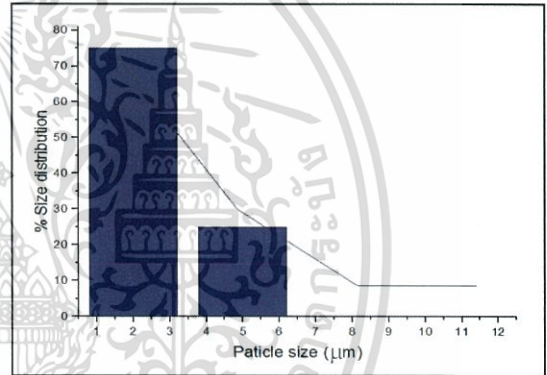
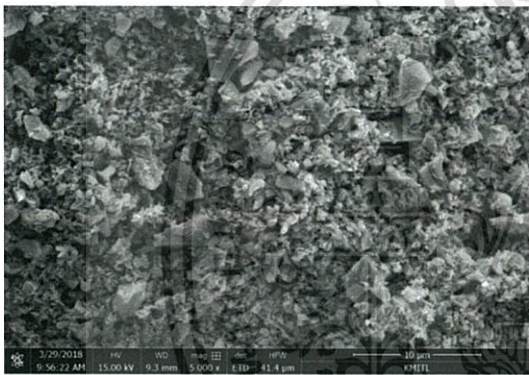


ภาพ SEM และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผงวัสดุ 25Fe/20Si/ 45Zr/10Al เมื่อเติมตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) เผาเคลือบที่ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

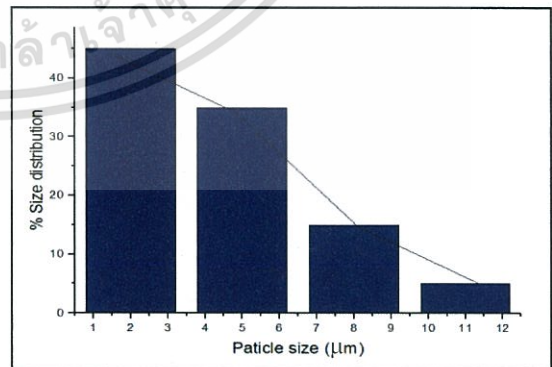
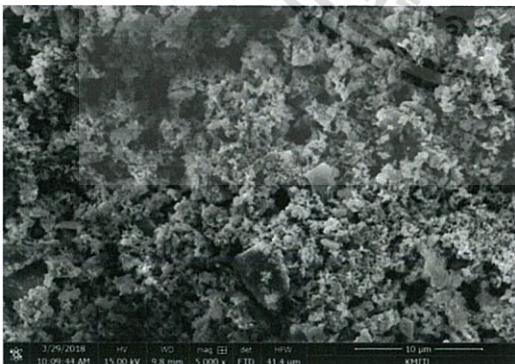
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพ SEM และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผงสัสูตร 25Fe/20Si/45Zr/10Al เมื่อไม่เติมตัวช่วยเร่งปฏิกิริยา เผาแคลไซต์ที่ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

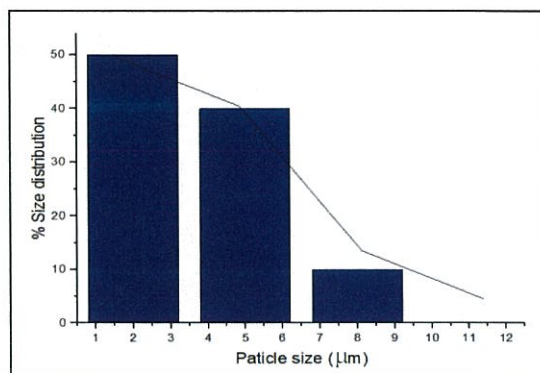


ภาพ SEM และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผงสัสูตร 25Fe/45Zr/30Al ไม่เผาแคลไซต์



ภาพ SEM และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผงสัสูตร 25Fe/45Zr/30Al เติมตัวช่วยเร่งปฏิกิริยา โซเดียมฟลูออไรด์ เผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพ SEM และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผงสัสูตร 25Fe/45Zr/30Al ไม่เติมตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา

วันที่..31..เดือน..พฤษภาคม..พ.ศ..2561

ข้าพเจ้า นาย/นาง/นางสาว.....กัญญาวีร์.....สินมงคลกุล.....รหัสประจำตัว.....57050373.....

นาย/นาง/นางสาว.....กัลยา.....กัลลัญญ์.....รหัสประจำตัว.....57050374.....

นาย/นาง/นางสาว.....อนุพงษ์.....มาลาแก้ว.....รหัสประจำตัว.....57050549.....

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา.....เคมีอุตสาหกรรม.....ภาควิชา.....เคมี.....

ขอรับรองว่าโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา เรื่อง

ชื่อภาษาไทย.....การพัฒนาผงสีแดงสะท้อนรังสีอินฟราเรดจากเหล็กออกไซด์.....

ชื่อภาษาอังกฤษ.....Development of infrared reflective red pigment from iron oxide.....

ปีการศึกษา.....2560.....

เป็นผลงานวิจัยที่มีได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่มโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษามับสมบูรณ์

โปรแกรมอักขราวิสุทธิ์.....0.0.....% หรือโปรแกรม Turnitin.....0.0.....%

ลงชื่อ กัญญาวีร์ สินมงคลกุล (กัญญาวีร์ สินมงคลกุล)

นักศึกษา

ลงชื่อ กัลยา กัลลัญญ์ (กัลยา กัลลัญญ์)

นักศึกษา

ลงชื่อ อนุพงษ์ มาลาแก้ว (อนุพงษ์ มาลาแก้ว)

นักศึกษา

ข้าพเจ้า ศ. / รศ. / ผศ. / ดร. / อ......ปณิวัฒน์ สันทรวิ..... อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา ได้ตรวจสอบโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษาของนักศึกษาข้างต้นแล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษา และมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงขอลงชื่อไว้เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ ปณิวัฒน์ (ปณิวัฒน์) อาจารย์ที่ปรึกษา

ลงชื่อ..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ลงชื่อ..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้