

การพัฒนาผงสีส้มสะท้อนรังสีอินฟราเรดจากเหล็กออกไซด์  
DEVELOPMENT OF INFRARED REFLECTIVE ORANGE  
PIGMENT FROM  $\text{Fe}_2\text{O}_3$



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF INFRARED REFLECTIVE ORANGE  
PIGMENT FROM  $\text{Fe}_2\text{O}_3$



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 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การพัฒนาผงสีส้มสะท้อนรังสีอินฟราเรดจากเหล็กออกไซด์  
Development of Infrared reflective orange pigment from Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

ชื่อนักศึกษา นายธรรมทัศน์ ดวงรัมย์ รหัสนักศึกษา 58050482  
นายอัศวินท์ ดิษสกุล รหัสนักศึกษา 58050575

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชา เคมี  
คณะ วิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)  
ปีการศึกษา 2561  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต  
(เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2561

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์ มอนูญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การพัฒนาผงสีสัมผัสท่อนรังสีอินฟราเรดจากเหล็กออกไซด์			
ชื่อนักศึกษา	นายธรรมทัศน์	ดวงรัศมี	รหัสนักศึกษา	58050482
	นายอัศวินท์	ดิษสกุล	รหัสนักศึกษา	58050575
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต เคมีอุตสาหกรรม			
ภาควิชา	เคมี			
คณะ	วิทยาศาสตร์			
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)			
ปีการศึกษา	2561			
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช			

### บทคัดย่อ

เนื่องจากในปัจจุบันค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของประเทศไทยมีแนวโน้มสูงขึ้นทุกปีซึ่งส่งผลให้มีการใช้พลังงานจากเครื่องปรับอากาศภายในอาคารเพิ่มมากขึ้น และจากการศึกษาพบว่ารังสีที่แผ่มาจากดวงอาทิตย์ประกอบด้วยรังสีอินฟราเรดเป็นส่วนใหญ่ โครงการพิเศษจึงนี้ได้ทำการพัฒนาผงสีสัมผัสที่มีคุณสมบัติสะท้อนรังสีอินฟราเรดโดยใช้เหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) อลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และแมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) เป็นองค์ประกอบพื้นฐาน โดยมีโซเดียมฟลูออไรด์ ( $\text{NaF}$ ) เป็นสารช่วยหลอม การเตรียมผงสีทำโดยใช้วิธีการบดละเอียดด้วยลูกบด (mechanical ball milling) จากนั้นนำผงสีไปเผาแคลไซน์เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid state reaction) โดยทำการศึกษาอัตราส่วนของสารตั้งต้น อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแคลไซน์ คือ 900 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบว่าสภาวะการเตรียมผงสีสัมผัสที่เหมาะสม คือ การใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนัก เหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ร้อยละ 40 อลูมิเนียม ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ร้อยละ 10 และแมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) ร้อยละ 50 (40Fe/10Al/50Mg) และเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยมีค่าพิกิตสีความสว่าง ( $L^*$ ) ที่ 57.58 ค่าสีแดง ( $a^*$ ) ที่ 22.23 และค่าสีเหลือง ( $b^*$ ) ที่ 41.43 และค่าสะท้อนรังสี (NIR) ที่ร้อยละ 81 จากการศึกษาโครงสร้างผลึกและธาตุองค์ประกอบพบว่าผงสีสัมผัสที่เตรียมได้มีการพบวิภาคแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Mg}(\text{Al},\text{Fe})_2\text{O}_4$ ) ที่มีโครงสร้างผลึกแบบสปินเนล (spinel) และแมกนีเซียมออกไซด์ และการศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่าผงสีสัมผัสมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 389 นาโนเมตร

**คำสำคัญ:** ผงสีสัมผัส เหล็กออกไซด์ ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง การสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ ค่าพิกิตสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Development of infrared reflective orange pigment from iron oxide		
<b>Student</b>	Thammatat Duangrassamee	<b>Student ID</b>	58050482
	Akkarawin Dissakul	<b>Student ID</b>	58050575
<b>Degree</b>	Bachelor of Science in Industrial Chemistry		
<b>Department</b>	Chemistry		
<b>Faculty</b>	Science		
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
<b>Academic</b>	2018		
<b>Advisor</b>	Asst.Prof.Dr. Panpailin Seeharaj		

### Abstract

At present, the average temperature of Thailand is increasing every year, which resulted in the demand of energy consumption for air conditioning. Therefore, this special project developed infrared reflective orange pigment by using iron oxide ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), aluminum oxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) and magnesium oxide ( $\text{MgO}$ ) precursors and sodium fluoride ( $\text{NaF}$ ) as a mineralizer. The orange pigments were prepared by mechanical ball milling followed by solid state reaction. The pigment were calcined at 900, 1000 and 1100 °C for 3 hours. The results showed that the optimum condition for preparing stable orange pigment powders was using weight ratio of 40 wt%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ /10 wt%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /50 wt%  $\text{MgO}$  (40Fe/10Al/50Mg) and calcined at 1000 °C for 3 h. The orange pigments had color coordinates of brightness ( $L^*$ ) 57.58, red ( $a^*$ ) 22.23 and yellow ( $b^*$ ) 41.43 and NIR reflectance of 81 %. The XRD and XRF study showed the combined phase of magnisium iron aluminate ( $\text{Mg}(\text{Al},\text{Fe})_2\text{O}_4$ ) and  $\text{MgO}$ . SEM images showed that the average particle size was 389.2 nm

**Keywords:** Orange pigment, Iron oxide, Solid state reaction, NIR Reflection, Colour coordinate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 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

ธรรมทัศน์                      ดวงรัศมี  
อัครวินท์                        ดิษสกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

### หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ซ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>3</b>
2.1 รังสีจากดวงอาทิตย์.....	3
2.1.1 สเปกตรัมของแสงอาทิตย์ (solar light).....	3
2.1.1.1 รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet; UV).....	3
2.1.1.2 แสงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Visual light; VIS).....	3
2.1.1.3 รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation; IR).....	3
2.2 รังสีอินฟราเรด.....	5
2.2.1 ช่วงของรังสีอินฟราเรด.....	5
2.2.1.1 รังสีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near Infrared; NIR).....	5
2.2.1.2 รังสีอินฟราเรดย่านกลาง (Middle Infrared; mid-IR).....	5
2.2.1.3 รังสีอินฟราเรดย่านไกล (Far Infrared; FIR).....	5
2.3 สีสะท้อนความร้อน.....	6
2.4 ผงสีส้ม.....	8
2.5 องค์ประกอบของผงสีที่สังเคราะห์.....	9
2.5.1 เหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ).....	9
2.5.2 อลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ).....	9
2.5.3 แมกนีเซียมออกไซด์ ( $MgO$ ).....	10
2.6 ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction).....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 การวัดสี.....	12
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>32</b>
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	22
3.2 สารเคมี.....	22
3.3 กระบวนการสังเคราะห์ผงสี.....	23
3.4 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติของผงสีส้ม.....	29
3.4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer; XRD).....	29
3.4.2 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน- แบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM).....	30
3.4.3 การทดสอบค่าของสีด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer).....	31
3.4.3.1 แหล่งกำเนิดแสงสำหรับการมองเห็น.....	31
3.4.3.2 วัตถุที่มีสี.....	32
3.4.3.3 ผู้สังเกตการณ์.....	32
3.4.4 การตรวจสอบวัดค่าการสะท้อนด้วยเครื่องยูวี วิซิเบิล เอ็นโออาร์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS-NIR spectrophotometer).....	33
3.4.5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer; FT-IR).....	33
3.4.6 การวิเคราะห์ธาตุและปริมาณของธาตุด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence; XRF).....	34
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....</b>	<b>36</b>
4.1 การศึกษาปัจจัยในการสังเคราะห์ผงสีส้มที่มีผลต่อค่าพิกัดสี.....	36
4.1.1 อัตราส่วนของสารตั้งต้นที่ส่งผลต่อค่าพิกัดสีของผงสีส้ม.....	36
4.1.2 อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ที่ส่งผลต่อค่าพิกัดสีของผงสีส้ม.....	41
4.2 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer; XRD).....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 การศึกษาปริมาณของธาตุองค์ประกอบโดยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโทสโกปี (X-ray Fluorescence; XRF).....	47
4.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างโมเลกุลด้วยเทคนิคอินฟราเรด สเปกโทรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FT-IR).....	49
4.5 การศึกษาสัณฐานวิทยาของผงสีส้มด้วยเทคนิคกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM).....	51
4.6 การทดสอบการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ของผงสีส้ม.....	53
4.7 การนำผงสีส้มไปประยุกต์ใช้งาน.....	56
<b>บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>59</b>
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	59
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	60
เอกสารอ้างอิง.....	61
ภาคผนวก.....	64
ภาคผนวก ก.....	65
ภาคผนวก ข.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าการสะท้อนแสงอาทิตย์ NIR ในช่วงความยาวคลื่นจาก 780-2100 นาโนเมตร ของผงสีตัวอย่าง.....	14
2.2 ดัชนีสี CIE L* a* b* ของผงสีน้ำตาลและ Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	15
2.3 ค่าการสะท้อน NIR ของกระเบื้องดินเผาที่เคลือบด้วยผงสี S31 ในปริมาณที่ต่างกัน.....	16
2.4 สัดส่วนขององค์ประกอบในการเตรียมผงสีตัวอย่าง.....	17
2.5 ค่าพิกัดสีและค่าการสะท้อนรังสี NIR ของผงสีแดงที่สังเคราะห์จากเหล็กออกไซด์ และโลหะออกไซด์.....	18
2.6 ค่าพิกัดสี และค่าการสะท้อนรังสี NIR ของผงสีแดงสูตร11.....	19
2.7 ค่า L* a* b* ของสารประกอบ Mg <sub>1-x</sub> Ni <sub>x</sub> Ti <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ในอัตราส่วนที่ต่างกันและเผาที่อุณหภูมิ 1000 – 1400 องศาเซลเซียส.....	19
2.8 อัตราส่วนขององค์ประกอบทางเคมีของผงสีแดง.....	20
2.9 ค่า L* a* b* และ C* ของผงสีแดงสูตรต่าง ๆ.....	20
3.1 อัตราส่วนสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ผงสีส้ม.....	24
4.1 ค่าพิกัดสีของผงสีสูตรต่าง ๆ ที่เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....	36
4.2 ค่าพิกัดสีของผงสีส้มที่มีปริมาณอัตราส่วนของอลูมิเนียมออกไซด์คงที่ที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก.....	40
4.3 ค่าพิกัดสีของผงสีส้มสูตรที่ 22 (40Fe/10Al/50Mg).....	41
4.4 ค่าพิกัดสีของผงสีส้มสูตรที่ 51 (30Fe/60Al/10Mg).....	41
4.5 องค์ประกอบของผงสีส้มสูตรที่ 22 (40Fe/10Al/50Mg) สูตรที่ 38 (50Fe/30Al/20Mg) สูตรที่ 39 (60Fe/30Al/10Mg) และสูตรที่ 51 (30Fe/60Al/10Mg).....	47
4.6 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงสีส้ม.....	52
4.7 ค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้และรังสีอาทิตย์ของผงสีส้มเกรดการค้าและผงสีส้ม ที่สังเคราะห์ขึ้น.....	55
4.8 ค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดของผงสีส้มสูตรที่ 22 (40Fe/10Al/50Mg) และสูตรที่ 51 (30Fe/60Al/10Mg) ที่อุณหภูมิเผาแคลไซน์ 900 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....	56
4.9 ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ของแผ่นผ้าทาสีแบบต่าง ๆ.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปลูกภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 รังสีที่แผ่จากดวงอาทิตย์มาสู่โลก.....	4
2.2 อัตราส่วนของรังสีชนิดต่าง ๆ ในแสงอาทิตย์.....	4
2.3 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ.....	5
2.4 การถ่ายเทความร้อนจากภายนอกเข้าสู่อาคาร.....	7
2.5 อุณหภูมิภายในอาคารเมื่อทาสีและไม่ได้ทาสีสะท้อนความร้อน.....	8
2.6 ผงสีส้มในอุตสาหกรรม.....	8
2.7 โครงสร้างผลึกแบบบรอมโบฮีตรอลของแอลฟา-เหล็กออกไซด์.....	9
2.8 โครงสร้างผลึกของออลูมิเนียมออกไซด์.....	10
2.9 โครงสร้างผลึกแมกนีเซียมออกไซด์.....	11
2.10 ปฏิกริยาในสถานะของแข็ง.....	12
2.11 ระบบการบรรยายสีแบบ 3 มิติ CIELab.....	12
2.12 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผงสีตัวอย่างโดยภาพ a) กลุ่มผงสีตัวอย่างที่ปริมาณของเหล็กคงที่ และ b) กลุ่มผงสีตัวอย่างที่ปริมาณของพราซีโอไดม์เมียมคงที่.....	17
2.13 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงสีที่เผาที่อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียส a) ผงสีตัวอย่างสูตร P025F025 b) ผงสีตัวอย่างสูตร P035F025.....	17
2.14 ค่าพิกัดสีของผงสีที่เผาพร้อมกับเคลือบแก้ว ผงสีที่เผาพร้อมกับPMMA และผงสีที่เผาพร้อมกับซิลลอกเซน.....	18
2.15 กราฟ XRD ของ $Fe_2O_3-Al_2O_3$ และ $Fe_2O_3-Al_2O_3-SiO_2$ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส.....	21
3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนกระบวนการสังเคราะห์ผงสีส้มโดยวิธีการทำปฏิกริยาในสถานะของแข็ง.....	27
3.2 แผนผังวิศวกรรมขององค์ประกอบที่ใช้ในการสังเคราะห์ผงสีส้ม.....	28
3.3 การตกกระทบและการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์.....	29
3.4 เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	30
3.5 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	31
3.6 ส่วนประกอบและการทำงานของจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	31
3.7 เครื่องวัดสี.....	32
3.8 เครื่องยิวี วิซิเบิล เอ็นไออาร์ สเปกโทรโฟโตมิเตอร์.....	33
3.9 เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์.....	34
3.10 การเกิด characteristic X-ray.....	34
3.11 เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 แนวโน้มของค่าพิกัดสีของผงสีส้ม.....	39
4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผงสีส้มที่คงอัตราส่วนของอลูมิเนียมออกไซด์ที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิเผาแคลไซน์ 1000 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง และ JCPDS ของ Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> และ FeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> .....	43
4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผงสีส้มสูตรที่ 22 (40Fe/10Al/50Mg) ที่เผาที่อุณหภูมิ 900 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส.....	45
4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผงสีส้มสูตรที่ 51 (30Fe/60Al/10Mg) ที่เผาที่อุณหภูมิ 900, 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส.....	46
4.5 รูปภาพและ XRF สเปกตรัมของผงสีส้มสูตรที่ 22 (40Fe/10Al/50Mg) ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....	48
4.6 รูปภาพและ XRF สเปกตรัมของผงสีส้มสูตรที่ 38 (50Fe/30Al/20Mg) ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....	48
4.7 รูปภาพและ XRF สเปกตรัมของผงสีส้มสูตรที่ 39 (60Fe/30Al/10Mg) ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....	48
4.8 รูปภาพและ XRF สเปกตรัมของผงสีส้มสูตรที่ 51 (30Fe/60Al/10Mg) ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....	49
4.9 อินฟราเรดสเปกตรัมของผงสีสูตรที่ 38 (50Fe/30Al/20Mg) และสูตรที่ 39 (60Fe/30Al/10Mg) เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....	49
4.10 อินฟราเรดสเปกตรัมของผงสีส้มสูตรที่ 22 (40Fe/10Al/50Mg) ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส.....	50
4.11 อินฟราเรดสเปกตรัมของผงสีส้มสูตรที่ 51 (30Fe/60Al/10Mg) ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส.....	50
4.12 ภาพถ่าย SEM ของผงสีส้มเกรดการค้าบริษัท ZAR.....	51
4.13 ภาพถ่าย SEM ของผงสีส้มภาพ (a) สูตรที่ 22 (40Fe/10Al/50Mg) ภาพ (b) สูตรที่ 31 (50Fe/30Al/20Mg) และ ภาพ (c) สูตรที่ 51 (30Fe/60Al/10Mg) ที่อุณหภูมิเผาแคลไซน์ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....	52
4.14 สเปกตรัมการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผงสีส้มที่มีอัตราส่วนของอลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก.....	53
4.15 สเปกตรัมการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผงสีส้มสูตรที่ 22 (40Fe/10Al/50Mg).....	54
4.16 สเปกตรัมการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผงสีส้มสูตรที่ 51 (30Fe/60Al/10Mg).....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปรภาพ (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.17 ผลของการทดสอบทาสีลงบนแผ่นผ้า a) แผ่นผ้าเปล่า b) แผ่นผ้าทาสีขาว  
 c) แผ่นผ้าทาสีออกไซด์ผสมสี d) แผ่นผ้าทาสีผสมเกรดการค้ำผสมสีขาว  
 e) แผ่นผ้าทาสีผสมสูตรที่ 22 ผสมสีขาว และ f) แผ่นผ้าทาสีผสมสูตรที่ 51 ผสมสีขาว  
 (ภาพเล็กแสดงถึงผนังสีผสมสูตรต่าง ๆ ที่ยังไม่ทำการผสมสีขาว).....57



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันมีการสำรวจการใช้งานเครื่องปรับอากาศของประชากรไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2549 ถึงปี พ.ศ. 2560 พบว่า มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปี สังเกตได้จากสถิติการขายเครื่องปรับอากาศเพิ่มขึ้นจากหกแสนเครื่องในปี พ.ศ.2549 เป็นหนึ่งล้านแปดแสนเครื่องในปี พ.ศ. 2560 [1] โดยสาเหตุหลักที่ทำให้ประชากรไทยมีการใช้งานเครื่องปรับอากาศเพิ่มขึ้นเกิดจากสภาพอากาศของประเทศไทยที่มีค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิสูงขึ้นในแต่ละปี [2] ส่งผลให้อุณหภูมิภายในอาคารสูงขึ้นเนื่องมาจากดวงอาทิตย์แผ่รังสีความร้อนมาที่หลังคาอาคารและลงมาสู่อากาศที่อยู่ในช่องใต้หลังคามาถึงฝ้าเพดานและส่งผลไปยังห้องต่าง ๆ ภายในตัวอาคาร นอกจากนี้รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์สามารถผ่านเข้าสู่ภายในอาคารผ่านทางผนังได้ [3] ทำให้อุณหภูมิภายในอาคารสูงขึ้น ซึ่งวิธีทำให้ภายในอาคารมีอุณหภูมิต่ำลงนอกจากการติดตั้งเครื่องปรับอากาศภายในอาคารแล้ว การติดตั้งฉนวนกันความร้อนไว้บริเวณภายใต้หลังคาสามารถลดอุณหภูมิภายในอาคารได้ แต่การติดตั้งและซ่อมแซมนั้นทำได้ยาก ดังนั้นวิธีที่สามารถทำได้สะดวกและส่งผลได้ดีคือการหาวัสดุสะท้อนความร้อนบริเวณหลังคาและผนังของตัวอาคาร [4] โดยวัสดุสะท้อนความร้อนเป็นวัสดุที่สามารถสะท้อนความร้อนในช่วงรังสีอินฟราเรดซึ่งเป็นรังสีที่มีองค์ประกอบมากที่สุดในคลื่นแสงจากดวงอาทิตย์ แต่เนื่องจากวัสดุสะท้อนความร้อนที่จำหน่ายในปัจจุบันมีราคาสูงและไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพราะประกอบด้วยธาตุที่เป็นโลหะหนัก เช่น โคบอลต์ โครเมียมและแคดเมียม [5] และมีประสิทธิภาพในการสะท้อนความร้อนที่ไม่ดีนัก ดังนั้นในโครงการพิเศษนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาวัสดุสะท้อนความร้อนที่มีองค์ประกอบหลัก คือ เหล็กออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ โดยทั้งสามองค์ประกอบนี้เป็นสารประกอบที่มีราคาถูก หาได้ง่าย และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยใช้วิธีปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง (solid state reaction) ในการสังเคราะห์ผงสี เนื่องจากเป็นวิธีการสังเคราะห์ผงสีที่สามารถทำได้ง่าย ค่าใช้จ่ายน้อย และสามารถขยายปริมาณการผลิตในระดับอุตสาหกรรมได้ [6] แต่เนื่องจากองค์ประกอบหลักคือเหล็กออกไซด์ สีที่ได้จากการสังเคราะห์จะมีเฉดสีอยู่ในเฉดสีเหลืองจนถึงสีแดง โครงการพิเศษนี้จึงได้มุ่งเน้นการสังเคราะห์ผงสีส้มที่มีค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดที่ดีเนื่องจากเป็นสีที่มีความสดใสและสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เพื่อเป็นหนึ่งในตัวเลือกของผู้บริโภคที่ต้องการนำผงสีไปใช้งานเป็นสีสะท้อนความร้อนเพื่อลดอุณหภูมิภายในอาคาร

#### 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาและพัฒนาผงสีส้มสะท้อนรังสีอินฟราเรดที่สังเคราะห์ขึ้นจากเหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) อลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และแมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ )

1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าพิกัดสีและการสะท้อนรังสีอินฟราเรดของผงสีที่สังเคราะห์ไม่ว่าได้อันประกอบด้วยชนิดและอัตราส่วนของสารตั้งต้น และอุณหภูมิในการเผา สรรทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. การสังเคราะห์ผงสีส้มด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid state reaction) โดยศึกษาปัจจัยในการสังเคราะห์ที่ส่งผลต่อ โครงสร้างผลึก โครงสร้างจุลภาค ค่าพิกัดสี และสมบัติการสะท้อนรังสีอินฟราเรด

1.1 ชนิดของสารตั้งต้น ได้แก่ เหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) อลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และแมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ )

1.2 อัตราส่วนของสารตั้งต้น มี 3 ระบบ คือ  $\text{Fe}_2\text{O}_3 : \text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 : \text{MgO}$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3 : \text{Al}_2\text{O}_3 : \text{MgO}$

1.3 อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ได้แก่ 800 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส

2. การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติต่าง ๆ โดยเทคนิคที่ใช้ในการตรวจพิสูจน์มีดังนี้

2.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction; XRD)

2.2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy; SEM)

2.3 การตรวจสอบค่าพิกัดของสีด้วยเทคนิคสเปกโทรโฟโตเมทรี (spectrophotometry)

2.4 การตรวจสอบค่าการสะท้อนรังสีด้วยเทคนิคยูวี - วิซิเบิล - เอ็นไออาร์ สเปกโทรโฟโตเมทรี (UV-Vis-NIR spectrophotometry)

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

2.6 การวิเคราะห์ธาตุและปริมาณของธาตุด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence; XRF)

3. การนำผงสีส้มที่สังเคราะห์ได้ไปประยุกต์ใช้กับสีทาอาคารเพื่อทดสอบค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรด

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถพัฒนาผงสีส้มสะท้อนรังสีอินฟราเรดจากเหล็กออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

2. สามารถนำผงสีส้มสะท้อนรังสีอินฟราเรดไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมและเชิงพาณิชย์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 รังสีจากดวงอาทิตย์

ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานความร้อนอันมหาศาล เมื่อพลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากดวงอาทิตย์ถูกปลดปล่อยและเดินทางมาสู่โลก รังสีบางส่วน เช่น รังสีเอ็กซ์ รังสีแกมมา และรังสีคอสมิก จะถูกดูดกลืนเอาไว้โดยชั้นบรรยากาศของโลก ส่วนรังสียูวี แสงอาทิตย์ และรังสีอินฟราเรด คือ สเปกตรัมของแสงอาทิตย์ที่ผ่านเข้ามาสู่โลก ซึ่งเป็นส่วนที่ก่อให้เกิดความร้อนและทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุ [7] การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 2.1

#### 2.1.1 สเปกตรัมของแสงอาทิตย์ (Solar light)

แสงอาทิตย์มีสเปกตรัมของแสงหรือรังสีอยู่ 3 ส่วนด้วยกันที่สามารถผ่านเข้ามาสู่โลกได้ ซึ่งแสงและรังสีทั้ง 3 ส่วน ดังกล่าวก็จะมีคุณสมบัติซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบต่อวัสดุที่แตกต่างกัน ดังนี้

##### 2.1.1.1 รังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet; UV)

เป็นรังสีที่มีอยู่ในแสงอาทิตย์ โดยมีลักษณะเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในสเปกตรัมของแสงอาทิตย์มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงตั้งแต่ 300 nm -400 nm รังสีอัลตราไวโอเลตเมื่อตกกระทบถูกพื้นผิวของวัสดุใด ๆ จะไม่ก่อให้เกิดความร้อนแต่จะทำให้วัตถุนั้นเกิดการเสื่อมสลายหรือถูกกัดกร่อนจากรังสีอัลตราไวโอเลต

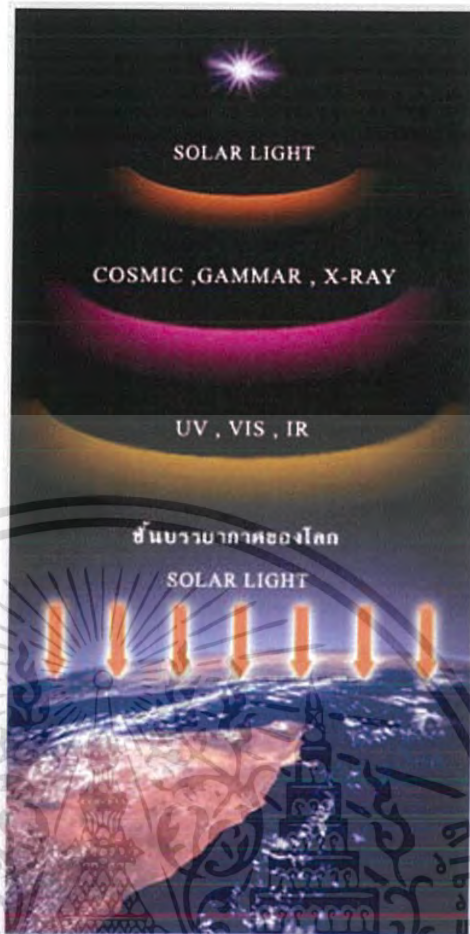
##### 2.1.1.2 แสงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Visual light; VIS)

เป็นแสงที่มีอยู่ในสเปกตรัมของแสงอาทิตย์เช่นกัน มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงตั้งแต่ 410 nm - 722 nm โดยเมื่อแสง VIS นี้ตกกระทบกับพื้นผิวของวัตถุใด ๆ แสง VIS จะเปลี่ยนจากพลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อน พลังงานความร้อนดังกล่าวนี้จะทำให้วัตถุนั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้น

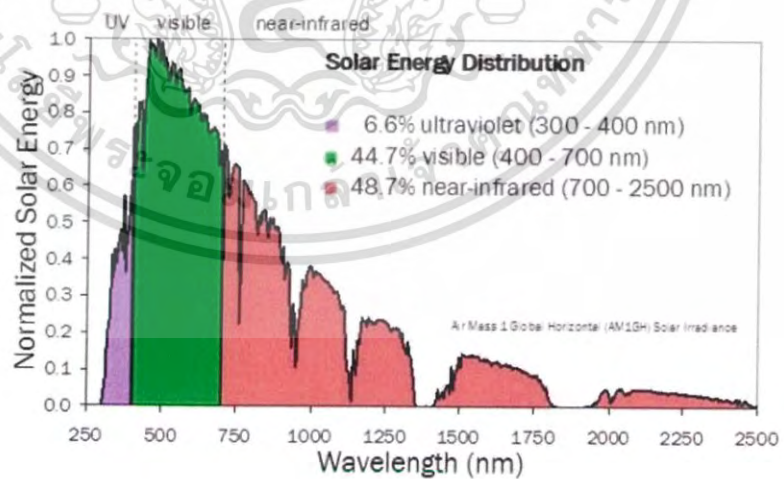
##### 2.1.1.3 รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation; IR)

เป็นรังสีที่มีอยู่ในสเปกตรัมของแสงอาทิตย์เช่นกัน โดยมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงตั้งแต่ 724 nm - 2500 nm รังสีอินฟราเรดเป็นรังสีที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าเช่นเดียวกับรังสีอัลตราไวโอเลตและเมื่อรังสีอินฟราเรดนี้ตกกระทบกับพื้นผิวของวัตถุใด ๆ จะเปลี่ยนจากพลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน พลังงานความร้อนดังกล่าวนี้จะทำให้วัตถุมีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็นอย่างมาก [7] โดยอัตราส่วนของรังสีทั้งสามที่แผ่มาที่ผิวโลกแสดงดังรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 รังสีที่แผ่จากดวงอาทิตย์มาสู่โลก [7]

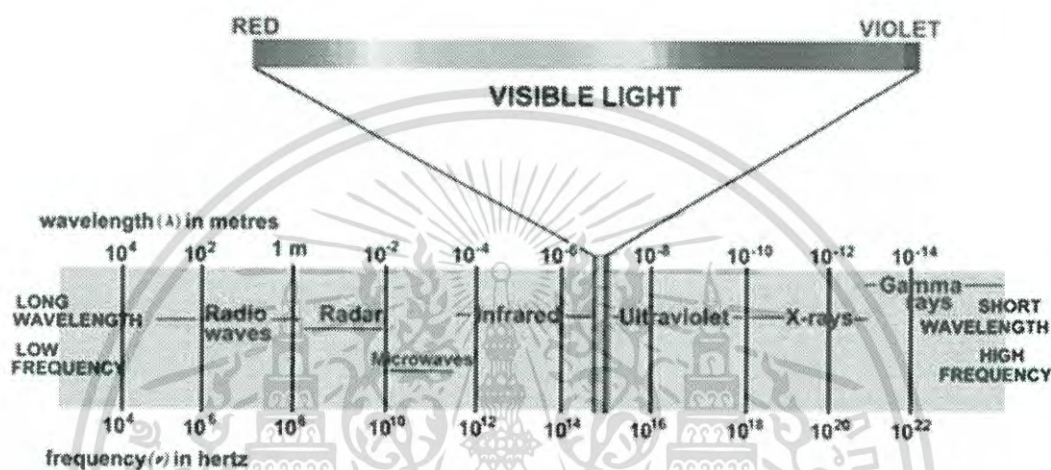


รูปที่ 2.2 อัตราส่วนของรังสีชนิดต่าง ๆ ในแสงอาทิตย์ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 รังสีอินฟราเรด

รังสีอินฟราเรด หรือ รังสีความร้อน (Infrared radiation; IR) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1800 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ ชื่อ Sir William Herschel ซึ่งใช้คำเรียกรังสีอินฟราเรดว่ารังสีใต้แดง หรือรังสีความร้อนมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง  $0.75 - 100 \mu\text{m}$  ในช่วงความถี่  $1,011 - 1,014$  เฮิร์ตซ์ (Hz) และอยู่ในช่วงระหว่างแสงสีแดงกับคลื่นไมโครเวฟดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยคุณสมบัติเด่นเฉพาะตัวของรังสีอินฟราเรด คือ ไม่เพียงเบนในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และหากมีความถี่สูงขึ้น พลังงานก็จะเพิ่มสูงขึ้นด้วย [9]



รูปที่ 2.3 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ [9]

### 2.2.1 ช่วงของรังสีอินฟราเรด

#### 2.2.1.1 รังสีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near Infrared; NIR)

รังสีอินฟราเรดย่านใกล้มีความยาวคลื่นในช่วง  $0.75 - 3 \mu\text{m}$  มีความสามารถในการให้ความร้อนในช่วง  $500 - 2200$  องศาเซลเซียส ให้กำลังความร้อนต่อพื้นที่สูง โดยความร้อนผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุได้ลึกและรวดเร็ว นิยมนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น การอบแห้งผลิตภัณฑ์

#### 2.2.1.2 รังสีอินฟราเรดย่านกลาง (Middle Infrared; mid-IR)

รังสีอินฟราเรดย่านกลางมีความยาวคลื่นในช่วง  $3 - 25 \mu\text{m}$  สามารถให้อุณหภูมิใช้งานในช่วง  $500 - 950$  องศาเซลเซียส สามารถให้ความร้อนได้ปานกลาง และผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุได้ลึกปานกลาง

#### 2.2.1.3 รังสีอินฟราเรดย่านไกล (Far Infrared; FIR)

รังสีอินฟราเรดย่านไกลมีความยาวคลื่นในช่วง  $25 - 100 \mu\text{m}$  มีความสามารถในการให้ความร้อนในช่วง  $300 - 700$  องศาเซลเซียส ให้ความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ได้ต่ำ ความร้อนผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุได้ไม่ลึก เหมาะสำหรับใช้งานประเภทที่ต้องการความร้อนต่ำและจากบริเวณพื้นผิว [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

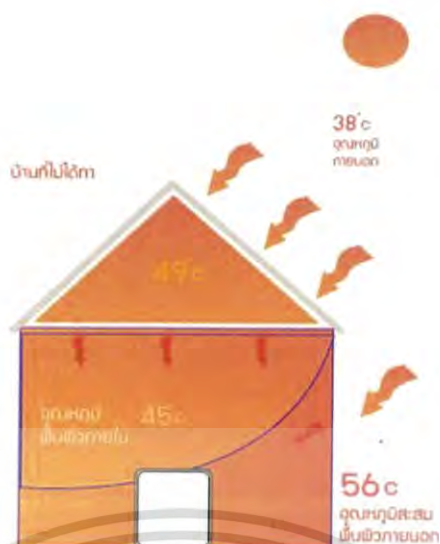
ประโยชน์ของรังสีอินฟราเรด คือ สามารถใช้ในด้านอุตสาหกรรมอาหาร เช่น การแปรรูปอาหารให้สุก การอบแห้งอาหาร รวมไปถึงการอบแห้งในอุตสาหกรรมอื่น เช่น การอบแห้งเฟอร์นิเจอร์ การอบแห้งเครื่องปั้น และเซรามิก การอบแห้งวัสดุยานยนต์สิ่งทอกระดาษ หรือใช้เคลือบสีผลิตภัณฑ์ ฯลฯ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการเกษตรและใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และการสื่อสาร เช่น ใช้เป็นตัวกลางสื่อสารสำหรับอุปกรณ์ไร้สายภาพถ่ายความร้อนด้วยกล้องอินฟราเรด [9]

ผลกระทบจากรังสีอินฟราเรดส่วนใหญ่จะมีผลต่อชั้นบรรยากาศ ทำให้ชั้นบรรยากาศมีความร้อนขึ้น ส่วนในมนุษย์และสัตว์ หากได้รับรังสีอินฟราเรดติดต่อกันเป็นเวลานานจะทำให้ผิวหนังมีอาการแสบร้อน ผิวหมองคล้ำ ดำกร้าน เซลล์ผิวหนังเสื่อมสภาพ และร่างกายขาดน้ำ หากได้รับติดต่อกันนานพร้อมกับมีความชื้นสูงจะทำให้ผิวแสบร้อนรุนแรง และเกิดรอยไหม้ของผิวได้ [9] และจากรูปที่ 2.2 จะเห็นว่ารังสีจากดวงอาทิตย์ที่แผ่มายังพื้นผิวโลกนั้นจะมีอัตราส่วนของรังสีอินฟราเรดมากที่สุด ดังนั้นสาเหตุที่ทำให้อาคารร้อนจึงมาจากรังสีอินฟราเรดเป็นหลัก

### 2.3 สีสะท้อนความร้อน

เมื่อหลังคาหรือผนังของอาคารได้รับพลังงานจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์จะดูดกลืนพลังงานของแสงอาทิตย์และเปลี่ยนสภาพเป็นพลังงานความร้อนส่งผลให้พื้นผิวภายนอกของหลังคาหรือผนังอาคารมีอุณหภูมิสูงขึ้น และเมื่อพื้นผิวภายนอกมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดความต่างของอุณหภูมิระหว่างพื้นผิวภายนอกและภายในของหลังคาหรือผนังอาคาร ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อน (heat transfer) ในลักษณะของการนำความร้อน (heat conduction) ขึ้นระหว่างพื้นผิวทั้งสองดังแสดงในรูปที่ 2.4 เป็นผลให้ตัวอาคารร้อนขึ้นและทำให้เครื่องปรับอากาศใช้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้นเพื่อรักษาอุณหภูมิภายในอาคาร จึงสิ้นเปลืองทรัพยากรจากการใช้พลังงานไฟฟ้าที่มากขึ้นและมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มกำลังและขนาดของเครื่องปรับอากาศเพื่อให้สามารถรักษาอุณหภูมิภายในอาคารไว้ ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นนี้สามารถแก้ไขได้โดยการทาเพดาน หลังคา และผนังของอาคารด้วยสีสะท้อนความร้อน [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

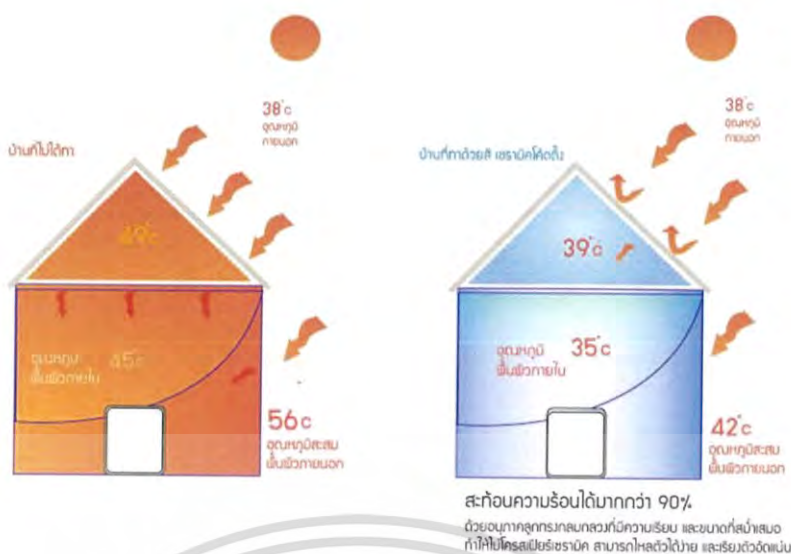


รูปที่ 2.4 การถ่ายเทความร้อนจากภายนอกเข้าสู่อาคาร [10]

สีสะท้อนความร้อน หรือ เซรามิกโค้ตติ้ง (ceramic coating) เป็นฉนวนป้องกันความร้อนที่เริ่มต้นพัฒนาจากผลงานวิจัยในโครงการอวกาศนาซ่า ซึ่งใช้เป็นแผงป้องกันความร้อนด้านล่างของยานกระสวยอวกาศเวลาที่ยานอวกาศพุ่งทะยานผ่านชั้นบรรยากาศจะก่อให้เกิดความร้อนสูงมาก ในเวลาต่อมาเทคโนโลยีป้องกันความร้อนนี้ ได้นำมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ของโครงการแลกเปลี่ยนเทคโนโลยีกับภาคเอกชน และสามารถนำการคิดค้นและพัฒนาเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้กับสีทาบ้านและบนหลังคาเพื่อป้องกันความร้อนให้แก่อาคารบ้านเรือน [10]

โดยปกติผนังอาคารและหลังคาของตัวอาคารภายนอกจะถูกแสงแดดตกกระทบพร้อมดูดกลืนและเก็บสะสมพลังงานความร้อนภายในตลอดเวลา ตอนกลางวันที่อากาศภายนอกร้อนถึง 37 องศาเซลเซียส แต่ผิวอาคารคอนกรีต หรือหลังคากระเบื้องจะมีอุณหภูมิสูงถึง 58 องศาเซลเซียส เนื่องจากการสะสมของความร้อน และความร้อนที่สูงนี้จะถ่ายเทเข้าสู่ภายในอาคาร ทำให้ผู้อยู่อาศัยรู้สึกร้อนผิดปกติ แต่หลังจากทาสีสะท้อนความร้อนความร้อนจะถูกสะท้อนออกทำให้พื้นผิวเย็นลง แสดงดังรูปที่ 2.5 โดยผงสีสะท้อนความร้อนที่มีในอุตสาหกรรมเป็นสีที่ผลิตขึ้นจากไททาเนียมไดออกไซด์และอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นสารที่มีเสถียรภาพความทนทานสูง จึงสามารถต้านทานต่อสภาพอากาศและมลภาวะได้อย่างดี อีกทั้งยังสามารถสะท้อนรังสีอินฟราเรดซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้อาคารร้อนขึ้นได้ [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 อุณหภูมิภายในอาคารเมื่อทำสีและไม่ได้ทำสีสะท้อนความร้อน [10]

## 2.4 ผงสีส้ม

ผงสีส้มที่มีในอุตสาหกรรมนั้นส่วนใหญ่ประกอบด้วยธาตุพราซีโอไดม์เมียม โคบอลต์ โครเมียม และแคดเมียม โดยสามารถสังเคราะห์ได้ทั้งวิธีปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง วิธีโซล – เจล (sol-gel) วิธีตกตะกอน รวมถึงวิธีอื่น ๆ [5] นอกจากนี้ผงสีส้มสามารถเตรียมจากสารตั้งต้นตัวอื่นได้ เช่น เหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) หรือที่เรียกว่าเฟอร์ริกออกไซด์ (ferric oxide) ซึ่งเป็นสารประกอบอนินทรีย์มีสีแดงเข้ม และมีคุณสมบัติเป็นผงสีที่ดี มีความคงตัวทางเคมีและความคงตัวทางกายภาพสูง ซึ่งพบว่าในอุตสาหกรรมทั่วไปนั้นมีการใช้เหล็กออกไซด์เป็นองค์ประกอบในการผลิตอย่างแพร่หลาย ผงสีส้มในอุตสาหกรรมนี้สามารถนำไปทาอาคารบริเวณผนังและหลังคาของอาคารเพื่อใช้สะท้อนรังสีอินฟราเรดและลดความร้อนภายในอาคารได้ โดยผงสีส้มแสดงดังรูปที่ 2.6



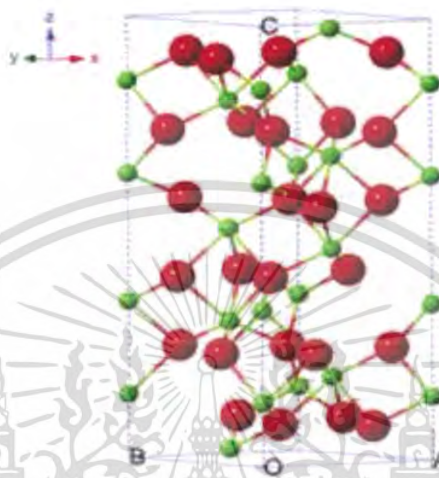
รูปที่ 2.6 ผงสีส้มในอุตสาหกรรม [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 องค์ประกอบของผงสีที่สังเคราะห์

### 2.5.1 เหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )

มีชื่อตามระบบ IUPAC คือ เพอริกออกไซด์ น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 159.68 กรัมต่อโมล ความหนาแน่น 5.24 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีลักษณะเป็นของแข็งผงสีน้ำตาลแดงไม่ละลายน้ำ และไม่ลุกติดไฟ [12] โครงสร้างของเหล็กออกไซด์แสดงดังรูปที่ 2.7



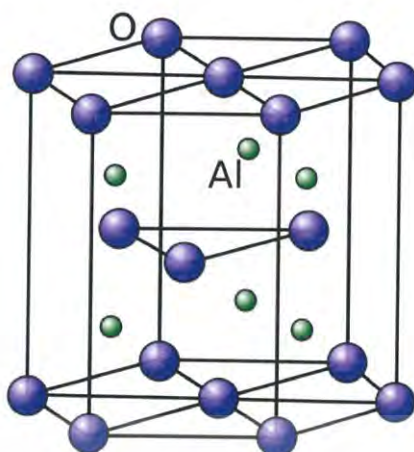
รูปที่ 2.7 โครงสร้างผลึกแบบบรอมโบอีตรอลของแอลฟา-เหล็กออกไซด์ [13]

เหล็กออกไซด์เป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่มีความนิยมในการใช้งานสูงมากโดยเฉพาะด้านการแพทย์ คุณสมบัติของการเป็นวัสดุแม่เหล็กที่เหนียวกว่าวัสดุอื่น ๆ เหล็กออกไซด์หลายชนิดมีในธรรมชาติและสามารถสังเคราะห์สร้างขึ้นมาได้แต่ชนิดที่มีการใช้งานกันมากมีสองชนิด คือ แมกฮีไมต์ (maghemite;  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) และ แมกนีไทต์ (magnetite;  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ซึ่งมีการนำมาใช้งานกันอย่างมากในทางการแพทย์ ซึ่งมาจากคุณสมบัติของการมีโมเมนต์แม่เหล็กสูง การมีเสถียรภาพทางเคมีเมื่ออยู่ในร่างกาย มีความเป็นพิษต่ำ และสามารถใช้งานได้ง่าย [14]

### 2.5.2 อลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

อลูมิเนียมออกไซด์ หรืออลูมินา สูตรทางเคมี คือ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  พบในธรรมชาติในรูปของแร่คอร์ันดัม (corundum) โดยปกติจะมีสีขาวหรือไม่มีสี แต่หากมีสิ่งเจือปนในโครงสร้างของอลูมินา เล็กน้อย จะทำให้เกิดสีต่าง ๆ ทำให้มีความสวยงามมากขึ้น กลายเป็นแร่ที่มีค่า เช่น สีแดงของทับทิม เกิดจากมีธาตุโครเมียมอยู่ในเนื้ออลูมินา เป็นต้น โครงสร้างของอลูมินาประกอบด้วยพันธะระหว่างอะลูมิเนียมกับออกซิเจนที่มีความแข็งแรงมากดังแสดงในรูปที่ 2.8 การทำลายพันธะจะต้องใช้พลังงานสูง ทำให้อลูมินามีความแข็งแรงมาก อลูมินายังทนความร้อนและการกัดกร่อนจากสารเคมีชนิดต่าง ๆ ได้ดีและมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



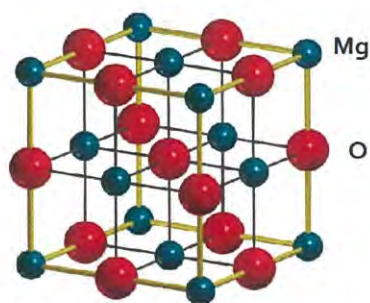
รูปที่ 2.8 โครงสร้างผลึกของอะลูมิเนียมออกไซด์ [16]

อะลูมินาที่ใช้ในอุตสาหกรรม ผลิตขึ้นจากแร่บ็อกไซต์ โดยกระบวนการที่มีชื่อว่ากระบวนการของเบเยอร์ เพื่อกำจัดสิ่งเจือปน และเปลี่ยนอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ให้เป็นอะลูมินา อะลูมินาที่ผลิตได้มากกว่าร้อยละ 90 ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตโลหะอะลูมิเนียม ส่วนที่เหลืออีกประมาณร้อยละ 10 นำไปใช้ในรูปของอะลูมินาโดยตรง ประโยชน์ของอะลูมินานอกจากจะใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์เซรามิกเพื่อให้เกิดความแข็งแรงยังสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น ใช้ทำวัสดุทนไฟในเตาเผาและเตาหลอม วัสดุขัดถู ลูกบิดและผนังกรูหม้ออบสำหรับอุตสาหกรรมเซรามิก ถ้วยเผาสาร (crucible) สำหรับอุตสาหกรรมอัญมณี หัวฟันทรายสำหรับงานตกแต่งผิวโลหะ แผ่นรองวงจรไฟฟ้ารวม (IC) สำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ หัวเทียนสำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ ใช้ทำฝาครอบหลอดไฟโซเดียมที่ให้ความสว่างสูง และยังใช้เป็นชิ้นส่วนของ อวัยวะทดแทน เช่น ข้อต่อกระดูกเทียม [15]

### 2.5.3 แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)

แมกนีเซียมออกไซด์เป็นสารประกอบของแมกนีเซียมมีมวลโมเลกุล 40.3044 กรัมต่อโมล ความหนาแน่น 3.58 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดหลอมเหลว 2852 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ (cubic) แสดงดังรูปที่ 2.9 แมกนีเซียมออกไซด์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในหลายด้าน อาทิ ใช้เป็นส่วนประกอบสำคัญของยาลดกรดในกระเพาะอาหาร ใช้เป็นส่วนผสมของซีเมนต์ก่ออิฐทนไฟ ใช้เป็นส่วนผสมในอุตสาหกรรมผลิตยาง อุตสาหกรรมปิโตรเคมี และสารทำความสะอาด เป็นต้น [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 โครงสร้างผลึกแมกนีเซียมออกไซด์ [18]

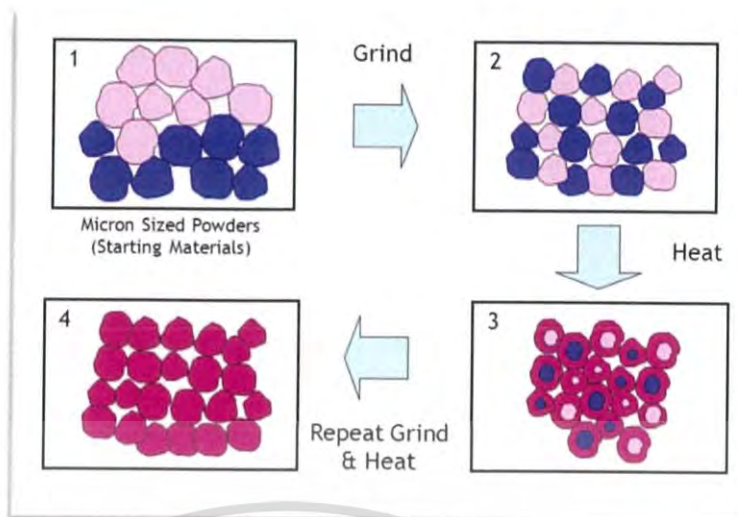
## 2.6 ปฏิกริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction)

กระบวนการปฏิกริยาสถานะของแข็ง หรือกระบวนการผสมออกไซด์ (mixed oxide) หรือกระบวนการดั้งเดิม (conventional method) เป็นปฏิกริยาเคมีที่อาศัยความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องกับกระบวนการ โดยอาศัยการสลายตัวของสารตั้งต้นที่มีสถานะของแข็งหลังจากได้รับความร้อนแล้วเกิดเป็นของแข็งใหม่ และแก๊ส โดยสารตั้งต้นส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ ไนเตรต ซัลเฟต แอซิเตต ออกซาเลต แอลคอกไซด์ คาร์บอเนต หรือเกลือของโลหะ อนุภาคของผงที่เตรียมได้จากกระบวนการนี้จะมีลักษณะเฉพาะ ขึ้นกับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเคมีของสารตั้งต้น กระบวนการอุณหภูมิการสลายตัว เวลาที่ใช้ในกระบวนการ โดยปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้อาศัยการแพร่โดยการใช้ความร้อนเป็นหลัก เนื่องจากสารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการนี้ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของโลหะออกไซด์ และโลหะคาร์บอเนต ซึ่งการเกิดผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกริยาเคมีของกระบวนการนี้ในทางอุณหพลศาสตร์ไม่สามารถเกิดขึ้นเองได้ (spontaneous reaction) เนื่องจากพลังงานเสรีกิ๊บส์ (gibbs free energy) มีค่ามากกว่า 0 ( $\Delta G > 0$ ) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องใช้ความร้อนเพื่อให้เกิดปฏิกริยาที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคก่อน และแพร่เข้าไปสู่แกนกลางของอนุภาค [19] กระบวนการปฏิกริยาสถานะของแข็งเป็นวิธีการเตรียมผงที่เก่าแก่ที่สุด ขั้นตอนไม่ยุ่งยาก และนิยมใช้เตรียมผงเซรามิกขั้นสูงมาจนปัจจุบัน โดยใช้สารตั้งต้นที่เป็นของแข็งตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป เข้ามาผสมกันตามปริมาณสารสัมพันธ์ โดยผสมบดรวมกันโดยใช้ครกหรือบดผสมรวมกันโดยใช้ลูกบด จากนั้นเผาให้ความร้อนแก่สารตั้งต้นทั้งสองภายใต้บรรยากาศ ไนโตรเจน ไฮโดรเจน ออกซิเจน หรือสุญญากาศ สารตั้งต้นทั้งสอง  $A_{(s)}$  และ  $B_{(s)}$  จะเกิดปฏิกริยาเคมีโดยอาศัยการแพร่ และเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์  $C_{(s)}$  และแก๊ส  $D_{(g)}$  ดังสมการที่ 2.1



และเนื่องจากสารตั้งต้นทั้งสองชนิดเป็นของแข็งที่อยู่ในรูปของออกไซด์ หรือคาร์บอเนต ซึ่งมีความเสถียรสูง อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกริยาจะค่อนข้างสูงอยู่ระหว่าง 500 – 2000 องศาเซลเซียส และใช้เวลาระหว่าง 2 – 48 ชั่วโมง ปฏิกริยาสามารถเกิดได้ในบรรยากาศปกติ ออกซิเจน ไนโตรเจน และอื่น ๆ [19] โดยรูปที่ 2.10 แสดงขั้นตอนปฏิกริยาสถานะของแข็งของสารตั้งต้นสองชนิด

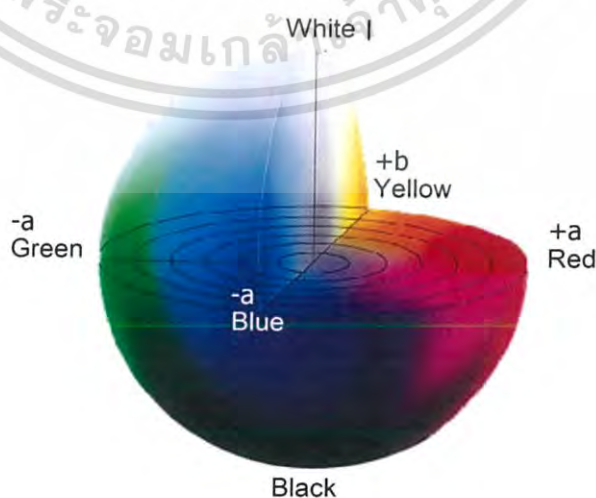
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ปฏิกริยาในสถานะของแข็ง [20]

## 2.7 การวัดสี

องค์กร Commission International de l'Eclairage (CIE) ได้กำหนดมาตรฐานการวัดสีซึ่งเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างในวงการวิชาการและการวิจัย คือ ระบบ CIE Lab scale  $L^*-a^*-b^*$  ซึ่งเป็นระบบการบรรยายสีแบบ 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยที่แกน  $L^*$  บรรยายถึงความสว่าง (lightness) จากค่า  $(-L^*)$  แสดงถึงสีดำจนถึง  $(+L^*)$  แสดงถึงสีขาว แกน  $a^*$  จะบรรยายถึงแกนสีจากเขียว  $(-a^*)$  ไปจนถึงแดง  $(+a^*)$  ส่วนแกน  $b^*$  บรรยายถึงแกนสีจากน้ำเงิน  $(-b^*)$  ไปจนถึงเหลือง  $(+b^*)$  นอกจากนี้ยังมีบริษัท Hunter lab ในอเมริกาทำการวิจัยและพัฒนาาระบบการวัดสีเรียกว่า 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 [21]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.11 ระบบการบรรยายสีแบบ 3 มิติ CIE Lab [22]

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อแหล่งอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตของเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยของ T. Thongkanluanga และคณะ [23] ได้ทำการสังเคราะห์สีทาบ้านหรือหลังคาที่มีสีน้ำตาลและมีคุณสมบัติสะท้อนรังสีอินฟราเรด (NIR) โดยองค์ประกอบของผงสีที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือใช้ เหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก จากนั้นเติม แอนติโมนีออกไซด์ ( $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ) ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และ ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ลงไปตามอัตราส่วนต่าง ๆ โดยในการสังเคราะห์นั้นผู้วิจัยได้คงองค์ประกอบของ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  ไว้ที่ร้อยละ 70 และ 10 โดยน้ำหนัก จากนั้นจึงนำไปผสมกับสารตัวเติมอีกร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้สามารถสังเคราะห์ได้ทั้งหมด 40 สูตรแสดงในตารางที่ 2.1 โดยที่ตัวอย่างทั้งหมดถูกเผาที่อุณหภูมิเดียวกัน คือ 1150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยใช้อัตราการให้ความร้อนเป็น 4 องศาเซลเซียสต่อนาที จากนั้นปล่อยให้อุณหภูมิลดลงโดยธรรมชาติจนถึงอุณหภูมิห้องแล้วนำไปบดในเครื่องบดความเร็วสูงเป็นเวลา 7 นาที ด้วยความเร็ว 250 รอบต่อนาที นำไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเพื่อกำจัดน้ำและความชื้นออกไป ผงสีที่ได้จะมีขนาดอนุภาคอยู่ที่ประมาณ 0.5-2.0 ไมโครเมตร จากนั้นนำผงสีไปวัดค่าการสะท้อน NIR ด้วยเครื่องตรวจวัดค่าการสะท้อนรังสี (UV-Vis-NIR spectrophotometer) ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 300-2100 นาโนเมตร แล้วทำการคำนวณร้อยละการสะท้อนแสงแสดงในตารางที่ 2.1 ในส่วนของค่าดัชนีสี CIE  $L^*$   $a^*$  และ  $b^*$  แสดงในตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ค่าการสะท้อนแสงอาทิตย์ NIR ในช่วงความยาวคลื่นจาก 780-2100 นาโนเมตรของผงสีตัวอย่าง [23]

Sample	Composition (wt%)					Solar Reflectance (%)
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	
S1	70	10	2	16	2	34.0
S2	70	10	4	14	2	34.8
S3	70	10	2	14	4	28.9
S4	70	10	2	12	6	25.0
S5	70	10	4	12	4	28.7
S6	70	10	6	12	2	26.4
S7	70	10	8	10	2	20.2
S8	70	10	6	10	4	22.7
S9	70	10	4	10	6	19.6
S10	70	10	2	10	8	20.9
S11	70	10	2	8	10	28.2
S12	70	10	4	8	8	25.0
S13	70	10	6	8	6	22.3
S14	70	10	8	8	4	29.5
S15	70	10	10	8	2	23.5
S16	70	10	12	6	2	27.7
S17	70	10	10	6	4	24.8
S18	70	10	8	6	6	23.4
S19	70	10	6	6	8	20.5
S20	70	10	4	6	10	21.6
S21	70	10	2	6	12	22.7
S22	70	10	2	4	14	30.5
S23	70	10	4	4	12	25.7
S24	70	10	6	4	10	28.5
S25	70	10	8	4	8	31.2
S26	70	10	10	4	6	33.8
S27	70	10	12	4	4	23.7
S28	70	10	14	4	2	24.3
S29	70	10	16	2	2	30.0
S30	70	10	14	2	4	37.1
S31	70	10	12	2	6	46.7
S32	70	10	10	2	8	41.6
S33	70	10	8	2	10	35.2
S34	70	10	6	2	12	31.6
S35	70	10	4	2	14	33.0
S36	70	10	2	2	16	31.1
S37	70	10	20	-	-	32.8
S38	70	10	-	20	-	37.2
S39	70	10	-	-	20	36.7
S40	70	10	-	-	-	33.8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	100	-	-	-	-	26.3
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	100	-	-	-	-	84.8
SiO <sub>2</sub>	100	-	-	-	-	89.4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	100	-	-	-	-	98.1
TiO <sub>2</sub>	100	-	-	-	-	96.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 2.1 พบว่าตัวอย่างที่ S31 ให้ค่าการสะท้อนสูงถึงร้อยละ 46.7 ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำตัวอย่างที่ S31 มาทำการศึกษาต่อโดยเตรียมตัวอย่างที่ S31 เป็นจำนวน 4, 5, 6, 7 และ 8 กรัม ตามลำดับ และนำไปผสมกับเซรามิกเคลือบเชิงพาณิชย์ 100 กรัม จากนั้นนำไปผสมในน้ำด้วยเครื่องบดแบบใช้ลูกบด (ball mill) เป็นเวลา 10 นาที ด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที เพื่อให้ได้สารละลายที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันละมีความถ่วงจำเพาะอยู่ที่ 1.40 จากนั้นนำตัวอย่างทั้งหมดที่เตรียมได้ไปพ่นบนกระเบื้องดินเผาขนาด 4x5 เซนติเมตร และเผาด้วยความร้อน 1100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาทีโดยใช้อัตราการให้ความร้อน 4 องศาเซลเซียสต่อนาที ทิ้งไว้ให้อุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้องแล้วนำไปทดสอบค่าการสะท้อนในช่วงความยาวคลื่น 300-2100 นาโนเมตร ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 2.3 ผงสีที่ทำการสังเคราะห์จะมีการสะท้อน NIR สูงกว่า  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และผงสี S31 มีค่าการสะท้อน NIR สูงที่สุดและพบว่าค่าดัชนีสี CIE  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  ของผงสีตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกับสีน้ำตาลจากตารางที่ 2.3 พบว่ากระเบื้องดินเผาที่เคลือบด้วยผงสี S31 ปริมาณ 5 กรัมมีค่าการสะท้อนเฉลี่ยสูงสุดที่ร้อยละ 41.3 ผลที่ได้สามารถสรุปได้ว่าผงสี S31 ที่มีองค์ประกอบของ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ :  $\text{Sb}_2\text{O}_3$ :  $\text{SiO}_2$ :  $\text{Al}_2\text{O}_3$ :  $\text{TiO}_2$  เป็น 70 : 10 : 12 : 2 : 6 ให้ค่าการสะท้อน NIR ดีที่สุด คือร้อยละ 46.7 และเมื่อนำผงสี S31 มาเคลือบบนกระเบื้องดินเผาพบว่าผงสี S31 ปริมาณ 5 กรัมที่ผสมกับสารเคลือบเชิงพาณิชย์ 100 กรัม ให้ค่าการสะท้อน NIR ดีที่สุดคือร้อยละ 41.3 [23]

ตารางที่ 2.2 ดัชนีสี CIE  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  ของผงสีน้ำตาลและ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  [23]

Samples	$L^*$	$a^*$	$b^*$	Samples	$L^*$	$a^*$	$b^*$
S1	38.75	10.86	8.74	S20	35.48	9.59	7.38
S2	38.28	13.31	10.04	S21	34.82	9.96	8.84
S3	36.32	12.30	7.96	S22	36.95	12.16	12.56
S4	35.66	9.43	6.59	S23	36.11	11.22	9.88
S5	36.47	12.63	8.18	S24	36.30	12.40	9.33
S6	35.53	10.76	6.78	S25	35.81	14.63	10.33
S7	34.58	8.40	5.19	S26	36.78	14.67	10.23
S8	35.51	12.30	8.10	S27	35.27	11.84	7.61
S9	35.46	8.81	5.78	S28	34.53	11.86	7.38
S10	35.93	7.72	6.01	S29	34.44	14.22	9.04
S11	37.16	10.73	8.47	S30	36.49	14.26	10.03
S12	36.95	9.95	7.47	S31	35.57	15.92	11.23
S13	34.92	9.11	6.25	S32	36.53	14.76	10.61
S14	35.34	12.95	8.71	S33	35.41	14.31	11.16
S15	34.63	10.63	6.59	S34	34.39	12.26	9.63
S16	35.29	12.54	7.91	S35	37.56	13.24	13.93
S17	34.71	11.78	7.66	S36	40.55	13.29	18.27
S18	35.37	10.48	7.00	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	35.75	9.85	3.30
S19	35.46	9.81	6.93				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ค่าการสะท้อน NIR ของกระเบื้องดินเผาที่เคลือบด้วยผงสี S31 ในปริมาณที่ต่างกัน [23]

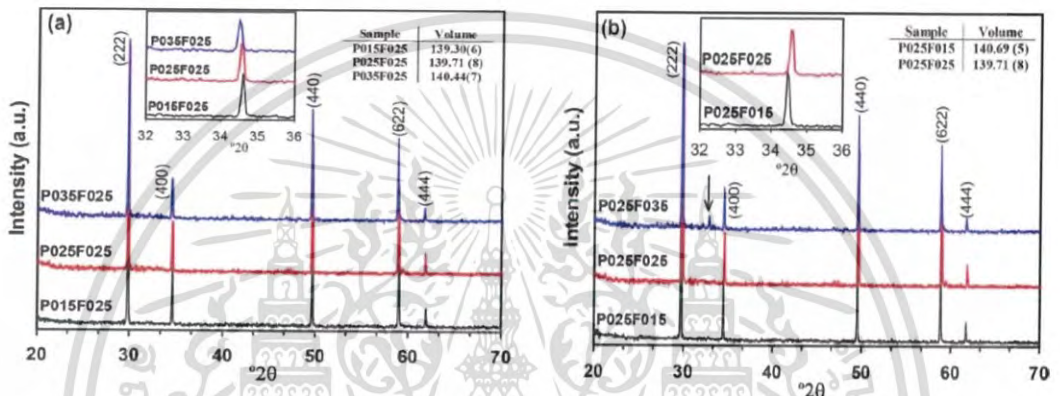
Pigment Amount (g)	Solar Reflectance (%)		
	Sample1	Sample2	Average
4	37.4	37.0	37.2
5	41.0	41.6	41.3
6	41.0	40.8	40.9
7	40.8	40.3	40.6
8	39.6	39.2	39.4

งานวิจัยของ Marc Jovaní และคณะ [24] ได้ศึกษาการสังเคราะห์สีแดง - ส้มที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยมีพราซีโอดีเมียม (Pr) และเหล็ก (Fe) เจือยิตเทรียมเซอร์โคเนต ( $Y_2Zr_2O_7$ ) เป็นองค์ประกอบ ซึ่งการใช้ธาตุพราซีโอดีเมียมนิยมใช้อย่างกว้างขวางเนื่องจากเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีคุณสมบัติทางแสงที่ดี และมีความเสถียรสูง โดยทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีโซล - เจล (sol-gel) ซึ่งใช้เซอร์โคเนียม(IV) โพรพอกไซด์ ( $Zr(OCH_2CH_2CH_3)_4$ ) ยิตเทรียม(III) อะซิเตตไฮเดรต ( $Y(OOCCH_3)_3 \cdot H_2O$ ) ไอรอนไนเตรตโนนไฮเดรต ( $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ ) และ พราซีโอดีเมียม(III) ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต ( $Pr(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ ) เป็นสารตั้งต้น โดยมีเอทานอลเป็นตัวทำละลาย ทำการปั่นกวบเป็นเวลา 10 นาทีแล้วนำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียส โดยในการสังเคราะห์ผงสีตัวอย่างจะแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ปริมาณของพราซีโอดีเมียมคงที่แล้วปรับสัดส่วนของเหล็กกับกลุ่มที่ปริมาณของเหล็กคงที่แล้วปรับสัดส่วนของพราซีโอดีเมียม ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ผลจากการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของผงสีที่มีอัตราส่วนขององค์ประกอบที่แตกต่างกันโดยใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer; XRD) พบว่าผงสีตัวอย่างทั้งหมดยกเว้นผงสี P025F035 มีวัฏภาคเดี่ยวของสารประกอบ  $Y_{2-x}Pr_xZr_2Fe_yO_7 \cdot \delta$  ที่มีโครงสร้างแบบฟลูออไรต์ส่วนผงสี P025F035 นั้นเป็นตัวอย่างที่มีปริมาณของเหล็กสูงที่สุดส่งผลให้มีวัฏภาคทุติยภูมิของออร์โธโรมบิกเฟอไรต์ (orthorhombic ferrite) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ผลการตรวจสอบภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) แสดงถึงภาพขอบเกรนของผงสีตัวอย่างสูตร P025F025 และ P035F025 ที่มีการเผาที่เหมาะสมและมีขนาดเกรนอยู่ในช่วง 0.5 - 2 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และจากการวิเคราะห์ค่าพิกัดสีของผงสีตัวอย่างหลังการเผาพร้อมกับเคลือบชนิดต่าง ๆ และผสมกับโพลีเมทิลเมทาไครเลท (PMMA) และซิลอกเซน (Siloxane) ด้วยวิธี CIE  $L^* a^* b^*$  พบว่าผงสีสูตร P025F025 ให้เฉดสีแดง - ส้มที่ดีที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.14 และเมื่อทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ด้วยเทคนิคยูวี - วิซิเบิล สเปกโทรสโกปี (UV-Visible diffuse reflectance spectroscopy) พบว่าผงสีสูตร P025F025 ผสมกับ PMMA มีประสิทธิภาพการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้อยู่ที่ร้อยละ 50 และเมื่อผสมกับสีทาซิลอกเซน (siloxane paint) มีประสิทธิภาพการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้สูง

เอกสารถึงร้อยละ 80 ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 สัดส่วนขององค์ประกอบในการเตรียมผงสีตัวอย่าง [24]

Reference	Composition
P015F025	$Y_{1.85}Pr_{0.15}Zr_{1.75}Fe_{0.25}O_{6.875}$
P025F025	$Y_{1.75}Pr_{0.25}Zr_{1.75}Fe_{0.25}O_{6.875}$
P035F025	$Y_{1.65}Pr_{0.35}Zr_{1.75}Fe_{0.25}O_{6.875}$
P025F015	$Y_{1.75}Pr_{0.25}Zr_{1.85}Fe_{0.15}O_{6.925}$
P025F035	$Y_{1.75}Pr_{0.25}Zr_{1.65}Fe_{0.35}O_{6.825}$

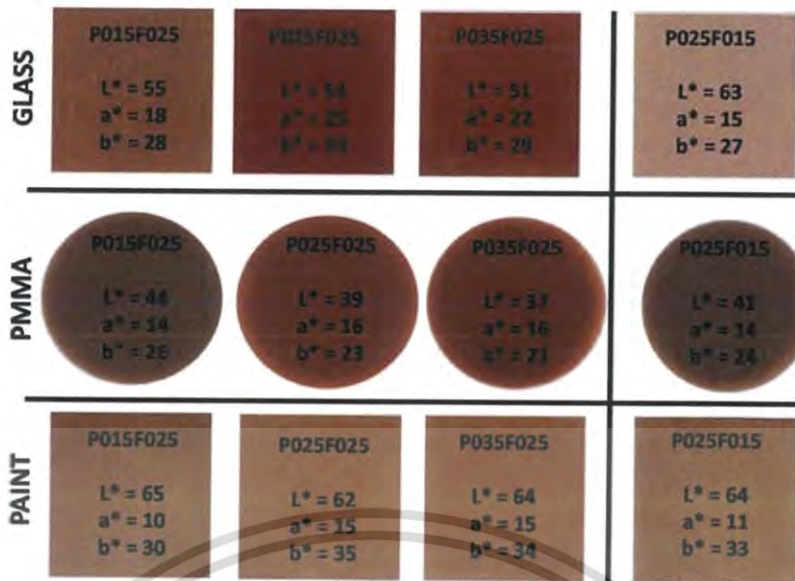


รูปที่ 2.12 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผงสีตัวอย่างโดยภาพ a) กลุ่มผงสีตัวอย่างที่ปริมาณของเหล็กคองที่ และ b) กลุ่มผงสีตัวอย่างที่ปริมาณของพราซีโอดีเมียมคองที่ [24]



รูปที่ 2.13 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงสีที่เผาที่อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียส a) ผงสีตัวอย่างสูตร P025F025 b) ผงสีตัวอย่างสูตร P035F025 [24]


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 ค่าพิกัดสีของผงสีที่เผาพร้อมกับเคลือบแก้ว ผงสีที่เผาพร้อมกับ PMMA และผงสีที่เผาพร้อมกับไซลอคเซน [24]

งานวิจัยของกัญญาวีร์ และคณะ [25] ได้ศึกษาการพัฒนาผงสีแดงสะท้อนรังสีอินฟราเรดจากเหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) เป็นองค์ประกอบพื้นฐาน โดยได้ศึกษาผลของการเติมโลหะออกไซด์ชนิดและอัตราส่วนต่าง ๆ การเติมตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยา (mineralizer) โซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการเผาแคลไซน์ ที่มีผลต่อค่าพิกัดสีและค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ (near infrared) โดยใช้ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง พบว่า สภาวะในการเตรียมที่ทำให้ได้ผงสีแดงที่ดีที่สุด คือ การใช้อัตราส่วนเหล็กออกไซด์ร้อยละ 25 เซอร์โคเนียมซิลิเกตร้อยละ 45 อลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 30 ( $25Fe/45Zr/30Al$ ) และเติมตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยาโซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ที่ 1000 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง โดยทำให้ผงสีแดงที่มีค่าพิกัดสี  $L^* 47.57$   $a^* 30.35$  และ  $b^* 24.12$  แสดงดังตารางที่ 2.5 และค่าการสะท้อนรังสี NIR ที่ร้อยละ 74 แสดงดังตารางที่ 2.6 อีกทั้งยังได้ผงสีแดงที่มีความเสถียรเนื่องจากมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่เหมาะสม คือมีขนาด 5.16 ทำให้สามารถกระจายตัวได้ดี

ตารางที่ 2.5 ค่าพิกัดสีและค่าการสะท้อนรังสี NIR ของผงสีแดงที่สังเคราะห์จากเหล็กออกไซด์ และโลหะออกไซด์ [25]

สูตร	องค์ประกอบ	อุณหภูมิ (°C) / เวลา (h)	NaF	ค่าพิกัดสี			รูป	สีที่ตามองเห็น	%R (NIR)
				L*	a*	b*			
11	25Fe/45Zr/30Al	1000/3	8	47.57	30.35	24.12		แดงส้ม	74.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 ค่าพิกัดสี และค่าการสะท้อนรังสี NIR ของผงสีแดงสูตร11 [25]

สูตร	องค์ประกอบ	อุณหภูมิ (°C) /เวลา (h)	NaF	ค่าพิกัดสี			รูป	สีที่ตา มองเห็น	%R (NIR)
				L*	a*	b*			
11	25Fe/45Zr/ 30Al	-	8	52.30	28.86	26.35	รูป	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

งานวิจัยของ Llusar และคณะ [26] ได้ทำการสังเคราะห์ผงสีส้มจากสารประกอบ  $Mg_{1-x}Ni_xTi_2O_5$  ( $x = 0, 0.03, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$  และ  $1.0$ ) โดยใช้ แมกนีเซียมคาร์บอเนต ( $MgCO_3$ ) นิกเกิลออกไซด์ ( $NiO$ ) และไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $TiO_2$ ) ในวัฏภาคแบบอนาเทสเป็นสารตั้งต้นแล้วทำการเผาที่อุณหภูมิ 1000-1500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากตารางที่ 2.7 พบว่า ผงสีที่มีสีส้มมากที่สุดคือ  $x = 0.4$  โดยมีสูตรโครงสร้างเป็น  $Mg_{0.6}Ni_{0.4}Ti_2O_5$  และเผาที่อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียส โดยมีค่า  $a^*$  และ  $b^*$  เป็น 25.2 และ 49.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.7 ค่า  $L^*$   $a^*$   $b^*$  ของสารประกอบ  $Mg_{1-x}Ni_xTi_2O_5$  ในอัตราส่วนที่ต่างกันและเผาที่อุณหภูมิ 1000 – 1400 องศาเซลเซียส [26]

Composition → (mg T <sub>1</sub> )	Sample type	x=0	x=0.1	x=0.2	x=0.4	x=0.5	x=0.6	x=0.7	x=1.0
1000 °C/3h (direct)	Powder	90.2/-0.0/1	86.7/13.2/6.5	86.0/-2.1/4.4	83.4/-2.0/11.3	83.0/-1.2/8.1	80.7/-0.8/9.1	81.5/-3.0/7.1	77.3/-4.4/7.2
	Glass A	87.1/1.8/3.1	82.1/1.9/10.9	81.2/0.0/17.3	76.3/-0.7/16.1	-	-	71.5/1.1/18.1	68.9/-0.5/17.4
	Glass B	-	-	-	74.0/0.9/13.8	-	-	-	-
1200 °C/3h (direct)	Powder	91.1/-0.7/4.3	78.9/16.5/16.2	73.7/18.2/42.1	68.1/16.7/45.8	65.8/17.3/44.6	69.4/14.3/49.2	71.1/11.3/51.3	64.8/5.1/44.7
	Glass A	89.6/0.8/0.6	79.5/1.6/20.6	73.5/6.9/24.1	72.1/3.9/23.9	-	-	68.1/4.6/21.3	64.2/4.0/20.0
	Glass B	-	76.8/1.4/30.8	72.2/5.3/38.1	67.7/8.0/46.4	-	-	59.2/10.5/30.2	56.5/11.4/51.5
1400 °C/3h (subsequent)	Powder	88.8/0.3/10.0	73.0/15.7/44.1	68.2/21.5/48.1	61.8/25.2/49.3	59.9/24.6/45.9	58.8/24.7/44.4	58.8/23.7/45.5	55.4/5.9/30.8
	Glass B	79.8/-1.0/28.5	73.0/4.7/18.4	68.5/6.7/40.1	63.3/8.4/45.1	60.9/9.4/47.9	60.0/10.8/51.6	57.7/11.3/51.7	57.8/11.2/49.1

งานวิจัยของ Kikumoto และคณะ [27] ได้สังเคราะห์ผงสีแดงจากเหล็กออกไซด์และทำการศึกษามลของการเติมซิลิกอนไดออกไซด์และอลูมิเนียมออกไซด์โดยใช้ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง อัตราส่วนขององค์ประกอบทางเคมีของผงสีแดงที่สังเคราะห์แสดงดังตารางที่ 2.8 และทำการเผาในอุณหภูมิที่ต่างกัน คือ 1250, 1300, 1350, 1450 องศาเซลเซียส จากการสังเคราะห์พบว่า ที่

อัตราส่วนของ  $Fe_2O_3 : Al_2O_3 : SiO_2$  เป็น 1 : 2 : 3 มีเม็ดสีแดงโดยสังเกตุจากค่า  $L^*$   $a^*$   $b^*$  และ C ดังไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงในตารางที่ 2.9 และจากรูปที่ 2.15 สังเกตได้ว่าเมื่อเผาที่อุณหภูมิที่สูงกว่า 1300 องศาเซลเซียส จะทำให้เหล็กออกไซด์ที่มีเฟสฮีมาไทต์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) เกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นแมกนีไทต์ ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ทำให้ได้ผงสีน้ำตาลแดง

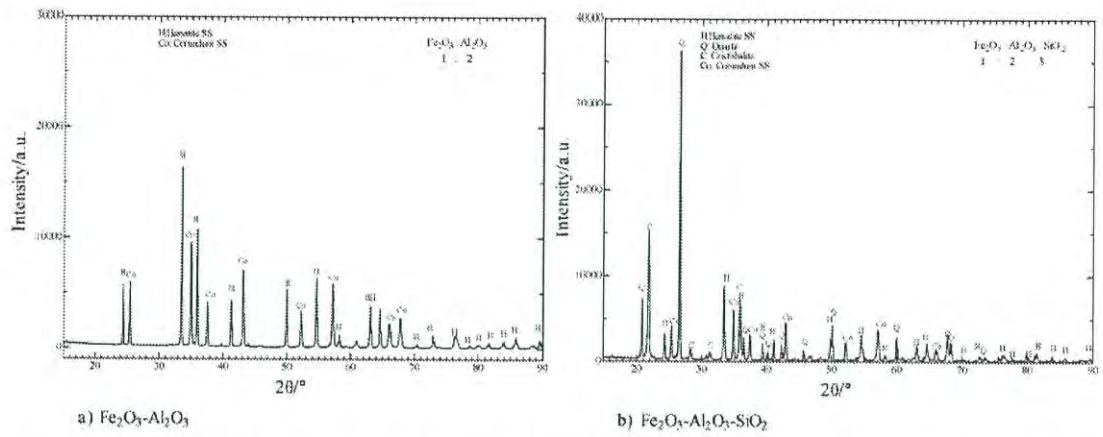
ตารางที่ 2.8 อัตราส่วนขององค์ประกอบทางเคมีของผงสีแดง [27]

Sample No.	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$
F2A	2	1	0
FA	1	1	0
FA2	1	2	0
F2AS3	2	1	3
FAS2	1	1	2
FA2S3	1	2	3

ตารางที่ 2.9 ค่า  $L^*$   $a^*$   $b^*$  และ  $C^*$  ของผงสีแดงสูตรต่าง ๆ [27]

	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$C^*$
As-received $\text{Fe}_2\text{O}_3$	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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 กราฟ XRD ของ  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส [27]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 3.1.1 ขวดพลาสติกโพลีโพรพิลีนขนาด 240 มิลลิลิตร
- 3.1.2 ซ้อนตักสาร
- 3.1.3 ลูกบดขนาด 5 มิลลิเมตร และ 10 มิลลิเมตร
- 3.1.4 ปีกเกอร์
- 3.1.5 เครื่องบดความเร็วสูง
- 3.1.6 ตะแกรงพลาสติก
- 3.1.7 แผ่นอลูมิเนียมฟลอยด์
- 3.1.8 ตู้อบ
- 3.1.9 โกร่งบดสาร
- 3.1.10 ครูซีเบิลอลูมินา
- 3.1.11 กระจกบอกร้ำกลั่น
- 3.1.12 เครื่องชั่งทศนิยมสี่ตำแหน่ง
- 3.1.13 เครื่องตรวจวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer; XRD) รุ่น XRD-6100 บริษัท SHIMADZU
- 3.1.14 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence; XRF) รุ่น MESA-500W Periodic05 Detector บริษัท HORIBA
- 3.1.15 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy; SEM) รุ่น QUANTA 250 บริษัท FEI
- 3.1.16 เครื่องตรวจวัดสี (spectrophotometer) รุ่น CM – 2600d บริษัท KONICA MINOTA
- 3.1.17 เครื่องตรวจวัดค่าการสะท้อนรังสี (UV-VIS-NIR spectrophotometer) รุ่น SolidSpec-3700 บริษัท SHIMADZU
- 3.1.18 เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer; FT-IR) รุ่น IR Tracer-100 บริษัท SHIMADZU

#### 3.2 สารเคมี

- 3.2.1 เหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) บริสุทธิ์ 99% บริษัท Himedia
- 3.2.2 อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) บริสุทธิ์ 99% บริษัท Carlo Erba
- 3.2.3 แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) บริสุทธิ์ 99% บริษัท Carlo Erba
- 3.2.4 โซเดียมฟลูออไรด์ ( $\text{NaF}$ ) บริสุทธิ์ 99% บริษัท Carlo Erba
- 3.2.5 อะซิโตน ( $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ ) บริสุทธิ์ 99% บริษัท Carlo Erba
- 3.2.6 สีนํ้าสำหรับบทบาทภายนอกและภายใน บริษัท Longlife
- 3.2.7 แผ่นฝ้ายปฐุม บริษัท Gyproc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกพันให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 กระบวนการสังเคราะห์ผงสี

ในงานวิจัยนี้จะทำการสังเคราะห์ผงสีโดยวิธีการปฏิกิริยาสถานะของแข็ง โดยใช้สารตั้งต้นตามอัตราส่วนต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ โดยมีโซเดียมฟลูออไรด์ ( $\text{NaF}$ ) เป็นตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยา (mineralizer) ซึ่งจะช่วยให้การลดอุณหภูมิในการหลอมเหลวของสารให้ต่ำลง โดยในงานวิจัยนี้จะทำการปรับอัตราส่วนของสารตั้งต้นทั้ง 3 ชนิด คือ เหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) , อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และแมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ )

#### 3.3.1 ขั้นตอนในการสังเคราะห์ผงสี

1. ชั่งเหล็กออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ และโซเดียมฟลูออไรด์ ตามอัตราส่วนที่กำหนดตามตาราง 3.1 ผสมลงในขวดบดโพลีโพลีลีน
2. นำลูกบดอลูมินาหลายขนาดบรรจุลงในขวดบดพลาสติกโพลีโพลีลีน ปริมาณ 1/2 ของขวด และเติมอะซิโตนปริมาตร 100 มิลลิลิตร และเขย่าให้เข้ากัน
3. นำสารไปบดผสมด้วยเครื่องบดความเร็วสูง เป็นเวลา 30 นาที
4. นำสารออกมาจากขวดบด แยกสารและล้างผ่านตะแกรงด้วยอะซิโตน
5. นำสารที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที
6. นำสารไปบดด้วยโกรังบดสารให้ละเอียดก่อนนำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยใช้อัตราในการเพิ่มและลดอุณหภูมิการเผาที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที
7. นำสารที่ได้จากการเผามาทำการบดและล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อกำจัดวัฏภาคที่ไม่ต้องการออกแล้วทำการกรองผ่านตะแกรงขนาด 325 เมชหลังจากนั้นนำสารไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
8. นำผงสีที่สังเคราะห์ได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติด้วยเทคนิคต่าง ๆ

แผนภาพแสดงขั้นตอนกระบวนการสังเคราะห์ผงสีสัมโดยวิธีการทำปฏิกิริยาในสถานะของแข็งแสดงดังรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 แสดงแผนผังวัฏภาคขององค์ประกอบที่ใช้ในการสังเคราะห์ผงสีสัมตามสูตรที่ระบุไว้ในตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ผงสีส้ม

สูตร	องค์ประกอบ	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก (wt%)				
		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	รวม	NaF
1	10Fe/90Mg	10	-	90	100	8
2	20Fe/80Mg	20	-	80	100	8
3	30Fe/70Mg	30	-	70	100	8
4	40Fe/60Mg	40	-	60	100	8
5	50Fe/50Mg	50	-	50	100	8
6	60Fe/40Mg	60	-	40	100	8
7	70Fe/40Mg	70	-	30	100	8
8	80Fe/20Mg	80	-	20	100	8
9	90Fe/10Mg	90	-	10	100	8
10	10Fe/90Al	10	90	-	100	8
11	20Fe/80Al	20	80	-	100	8
12	30Fe/70Al	30	70	-	100	8
13	40Fe/60Al	40	60	-	100	8
14	50Fe/50Al	50	50	-	100	8
15	60Fe/40Al	60	40	-	100	8
16	70Fe/40Al	70	30	-	100	8
17	80Fe/20Al	80	20	-	100	8
18	90Fe/10Al	90	10	-	100	8
19	10Fe/10Al/80Mg	10	10	80	100	8
20	20Fe/10Al/70Mg	20	10	70	100	8
21	30Fe/10Al/60Mg	30	10	60	100	8
22	40Fe/10Al/50Mg	40	10	50	100	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 22 ใช้ในการศึกษา 10 ปีที่ผ่านมา ไม่ขอให้นำไป 100 ประโยชน์ 8 การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1(ต่อ) อัตราส่วนสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ผงสีส้ม

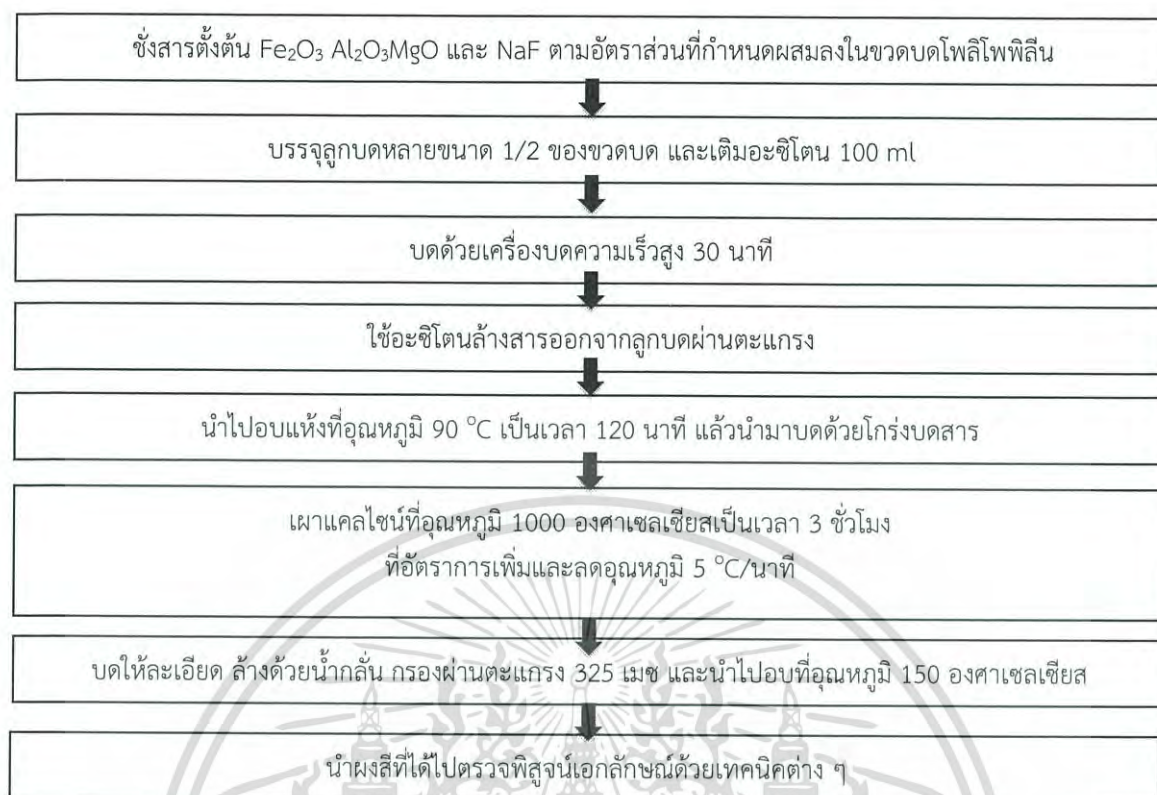
สูตร	องค์ประกอบ	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก (wt%)				
		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	รวม	NaF
23	50Fe/10Al/40Mg	50	10	40	100	8
23	50Fe/10Al/40Mg	50	10	40	100	8
24	60Fe/10Al/30Mg	60	10	30	100	8
25	70Fe/10Al/20Mg	70	10	20	100	8
26	80Fe/10Al/10Mg	80	10	10	100	8
27	10Fe/20Al/70Mg	10	20	70	100	8
28	20Fe/20Al/60Mg	20	20	60	100	8
29	30Fe/20Al/50Mg	30	20	50	100	8
30	40Fe/20Al/40Mg	40	20	40	100	8
31	50Fe/20Al/30Mg	50	20	30	100	8
32	60Fe/20Al/20Mg	60	20	20	100	8
33	70Fe/20Al/10Mg	70	20	10	100	8
34	10Fe/30Al/60Mg	10	30	60	100	8
35	20Fe/30Al/50Mg	20	30	50	100	8
36	30Fe/30Al/40Mg	30	30	40	100	8
37	40Fe/30Al/30Mg	40	30	30	100	8
38	50Fe/30Al/20Mg	50	30	20	100	8
39	60Fe/30Al/10Mg	60	30	10	100	8
40	10Fe/40Al/50Mg	10	40	50	100	8
41	20Fe/40Al/40Mg	20	40	40	100	8
42	30Fe/40Al/30Mg	30	40	30	100	8
43	40Fe/40Al/20Mg	40	40	20	100	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตีพิมพ์และดัดแปลงเนื้อหาดังกล่าวโดยไม่มีข้อจำกัดใดๆ

ตารางที่ 3.1(ต่อ) อัตราส่วนสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ผงสีส้ม

สูตร	องค์ประกอบ	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก (wt%)				
		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	รวม	NaF
36	30Fe/30Al/40Mg	30	30	40	100	8
37	40Fe/30Al/30Mg	40	30	30	100	8
38	50Fe/30Al/20Mg	50	30	20	100	8
39	60Fe/30Al/10Mg	60	30	10	100	8
40	10Fe/40Al/50Mg	10	40	50	100	8
41	20Fe/40Al/40Mg	20	40	40	100	8
42	30Fe/40Al/30Mg	30	40	30	100	8
43	40Fe/40Al/20Mg	40	40	20	100	8
44	50Fe/40Al/10Mg	50	40	10	100	8
45	10Fe/50Al/40Mg	10	50	40	100	8
46	20Fe/50Al/30Mg	20	50	30	100	8
47	30Fe/50Al/20Mg	30	50	20	100	8
48	40Fe/50Al/10Mg	40	50	10	100	8
49	10Fe/60Al/30Mg	10	60	30	100	8
50	20Fe/60Al/20Mg	20	60	20	100	8
51	30Fe/60Al/10Mg	30	60	10	100	8
52	10Fe/70Al/20Mg	10	70	20	100	8
53	20Fe/70Al/10Mg	20	70	10	100	8
54	10Fe/80Al/10Mg	10	80	10	100	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

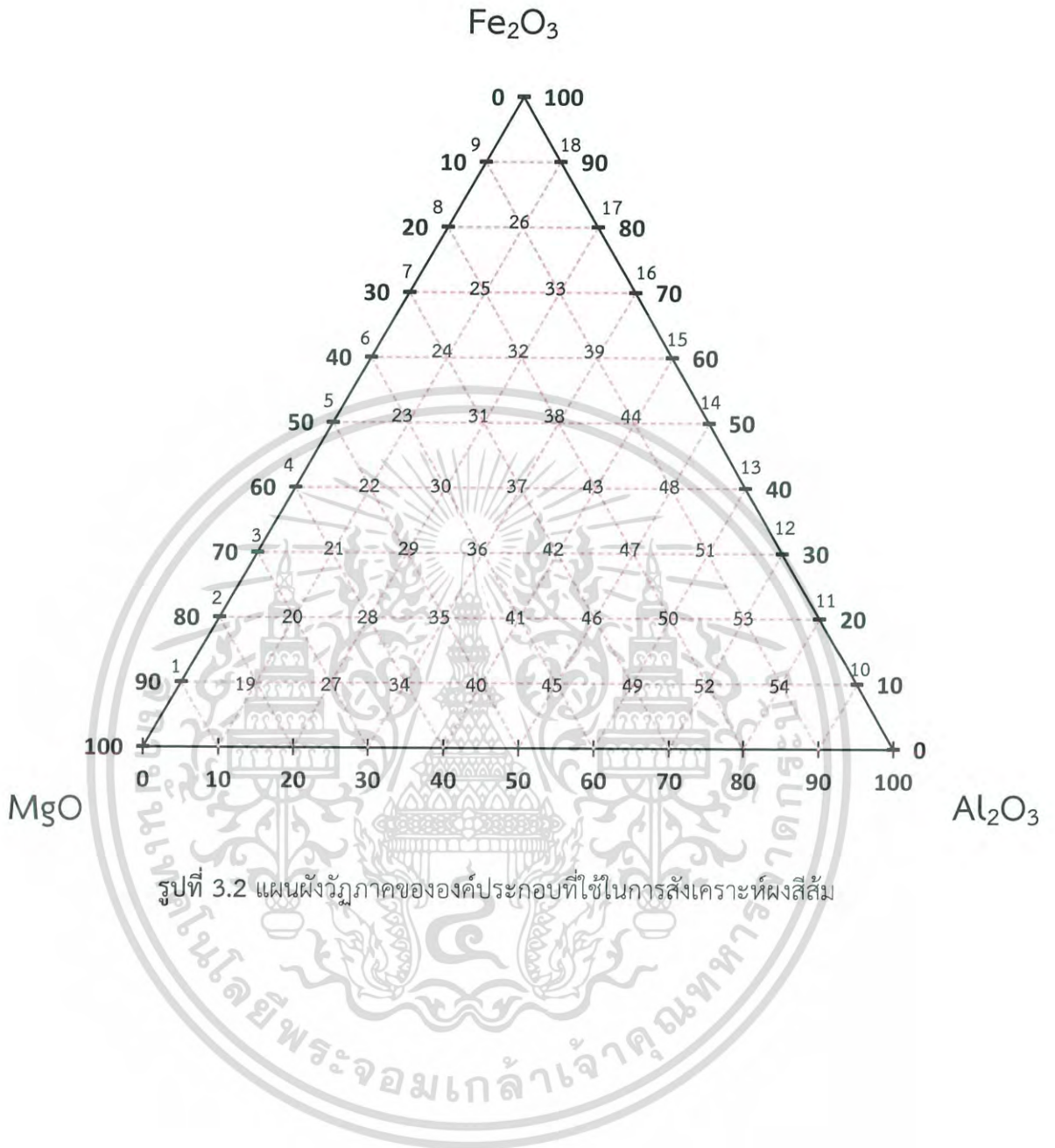


รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนกระบวนการสังเคราะห์ผงสีส้มโดยวิธีการทำปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง

โดยทำการศึกษาดังต่อไปนี้ในการสังเคราะห์ที่มีผลต่อค่าพิกัดสี โครงสร้างผลึก โครงสร้างจุลภาค และค่าการสะท้อนต่อรังสีอินฟราเรด อันประกอบไปด้วย

1. อัตราส่วนที่ต่างกันของเหล็กออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ แสดงดังตารางที่ 3.1
2. อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ ได้แก่ 900 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติของผงสีส้ม

#### 3.4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer; XRD)

เป็นเทคนิคที่นำรังสีเอกซ์ (X-ray) มาใช้วิเคราะห์และระบุชนิดสารประกอบ โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง ทั้งในเชิงคุณภาพ (qualitative) และเชิงปริมาณ (quantitative) โดยอาศัยหลักการของการยิงรังสีเอกซ์ไปกระทบที่ชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนและสะท้อนออกมาที่มุมต่าง ๆ กัน โดยมีหัววัดสัญญาณ (detector) เป็นตัวรับข้อมูล องค์ประกอบและโครงสร้างของสารจะมีองค์ประกอบในการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ในมุมที่แตกต่างกันออกไปขึ้นกับองค์ประกอบ รูปร่างและลักษณะผลึก ซึ่งผลที่ได้จึงสามารถบ่งชี้ชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และสามารถนำมาใช้ใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้น ๆ ได้นอกจากนั้นแล้วยังสามารถศึกษาและวิเคราะห์ ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้นของสารประกอบในสาร [28] โดยมุมของการตกกระทบและการสะท้อนของรังสีสามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้จากสมการของ Bragg's Law แสดงดังสมการที่ 3.1 และรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การตกกระทบและการสะท้อนของรังสีเอกซ์ [29]

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

โดยที่  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ( $\text{Cu } K\alpha = 1.5406 \text{ \AA}$ )

$d$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ

$n$  คือ ลำดับการสะท้อน

$\theta$  คือ ค่ามุมจากการตกกระทบหรือสะท้อนของรังสีเอกซ์

เมื่อรังสีเอกซ์เกิดการเลี้ยวเบนเครื่องมือจะเก็บข้อมูลและแสดงผลเป็นรูปแบบของการเลี้ยวเบน (XRD pattern) ทำให้สามารถระบุชนิดของสารได้โดยการนำรูปแบบของการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นเทียบกับ-ฐานข้อมูล เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แสดงในรูปที่ 3.4 [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ [30]

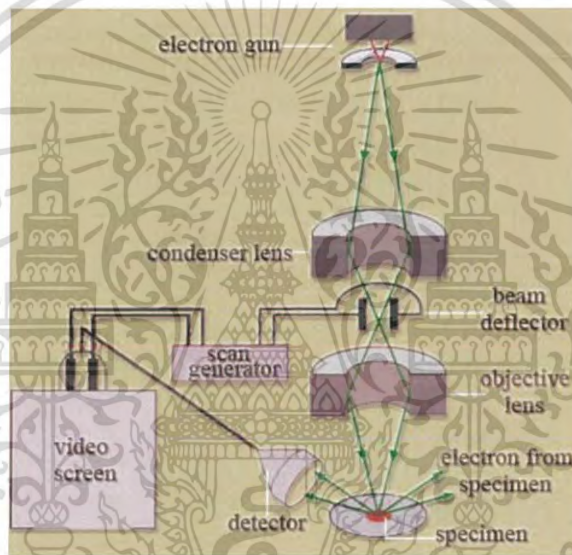
### 3.4.2 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงานสูงในการตรวจสอบวัตถุแทนแสงธรรมดาเนื่องจากความยาวคลื่นของลำอนุภาคอิเล็กตรอนนั้นสั้นกว่าความยาวคลื่นแสงถึง 100,000 เท่า ทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสามารถให้ประสิทธิภาพของกำลังขยายและการแจจจายรายละเอียดได้เหนือกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง โดยสามารถแยจจายรายละเอียดของวัตถุที่เล็กขนาด 10 อังสตรอม หรือ 0.1 นาโนเมตร (กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงจะแจจจายรายละเอียดได้ประมาณ 0.2 ไมโครเมตร) จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีกำลังขยายสูงมากถึง 500,000 เท่า โดยในส่วนของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนั้นเป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างเช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น [31] รูปของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงดังรูปที่ 3.5 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง SEM แสดงดังรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [31]



รูปที่ 3.6 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [31]

### 3.4.3 การทดสอบค่าของสีด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

หลักการวัดสีหรือเปรียบเทียบสีด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์นั้นใช้หลักการวัดสีหรือเปรียบเทียบสีของมนุษย์ โดยมีส่วนประกอบอยู่ 3 ส่วน คือ

#### 3.4.3.1 แหล่งกำเนิดแสงสำหรับการมองเห็น

มีอยู่ 2 แหล่ง คือ แหล่งกำเนิดแสงตามธรรมชาติ และ แหล่งกำเนิดแสงที่ประดิษฐ์ขึ้น โดยแหล่งกำเนิดแสงตามธรรมชาติ ได้แก่ ดวงอาทิตย์ซึ่งให้แสงขาวมายังพื้นโลก และสามารถแยกเป็นแถบสีต่าง ๆ กันได้ 7 สี มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 380-780 นาโนเมตร สำหรับแหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ เป็น แหล่งกำเนิดแสงที่มนุษย์สร้างขึ้นเพื่อใช้ในจุดประสงค์ต่าง ๆ มีหลายชนิด เช่น หลอดทังสเตน หลอดซินอน เป็นต้น แต่ละแบบจะให้คลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.3.2 วัตถุที่มีสี

เมื่อแสงตกกระทบวัตถุหรือแสงเคลื่อนที่จากตัวกลางหนึ่งไปสู่อีกตัวกลางหนึ่ง จะพบว่ามีปรากฏการณ์ต่าง ๆ เกิดขึ้น ได้แก่การดูดกลืน (absorption) การสะท้อน (reflection) และการส่องผ่าน (transmission) การที่เรามองเห็นวัตถุที่มีสีได้เนื่องจากวัตถุมีสีเกิดการดูดกลืนพลังงานของแสงบางความยาวคลื่นไว้และสะท้อนพลังงานของแสงในช่วงความยาวคลื่นของสีของวัตถุนั้นออกมา

### 3.4.3.3 ผู้สังเกตการณ์

เมื่อแสงสะท้อนจากวัตถุที่มีสีเข้าสู่ตาของผู้สังเกตการณ์ แสงจะเดินทางเข้าสู่เรตินาและถูกแยกแยะจากเซลล์ส่วนที่มีความไวต่อแสงต่างกัน 2 ชนิด คือ เซลล์รูปแท่ง (rods cell) เป็นส่วนแยกความแตกต่างระหว่างความมืดกับความสว่างและเซลล์รูปกรวย (cones cell) เป็นส่วนที่แยกความแตกต่างของสี โดยเซลล์รูปกรวยประกอบไปด้วยเซลล์ 3 ชนิด คือเซลล์ที่ไวต่อแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน เมื่อได้รับแสง เซลล์รับแสงทั้งสามจะถูกกระตุ้นในอัตราส่วนที่ต่างกัน ขึ้นกับสีและความเข้มของแสงที่ตกกระทบ จากนั้นสมองก็จะแปลสัญญาณที่แตกต่างกันนั้นทำให้เห็นเป็นสีต่าง ๆ ขึ้นมา [32]

จากหลักการข้างต้นได้มีการประดิษฐ์เครื่องวัดสี spectrophotometer ขึ้นดังรูปที่ 3.7 ซึ่งเป็นเครื่องมือที่สามารถบอกค่าของสีที่ใช้เป็นมาตรฐานสากลได้ ระบบที่สามารถบอกค่าได้คือ ระบบ C.I.E (X,Y และ Z) ระบบ Hunter (L, a, b) และ ระบบ C.I.E. LAB ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) และในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการวัดสีโดยใช้ระบบ C.I.E. LAB ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) ซึ่งค่า  $L^*$  บอกถึงค่าความสว่างโดยถ้าค่า  $L^*$  มีค่าเป็นบวกมากหมายความว่าผงสีมีความสว่างมาก ค่า  $a^*$  บอกค่าความเป็นสีแดงและสีเขียวโดยถ้าค่า  $a^*$  มีค่าเป็นบวกมาก แสดงว่าผงสีมีความเป็นสีแดงมาก ถ้าค่า  $a^*$  เป็นลบมากแสดงว่าผงสีมีความเป็นสีเขียวมาก ค่า  $b^*$  บอกค่าความเป็นสีเหลืองและสีน้ำเงิน โดยถ้าค่า  $b^*$  มีค่าเป็นบวกมาก ผงสีจะมีความเป็นสีเหลืองมาก และถ้าค่า  $b^*$  มีค่าเป็นลบมาก ผงสีจะมีความเป็นสีน้ำเงินมาก



รูปที่ 3.7 เครื่องวัดสี [33]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.4 การตรวจสอบวัดค่าการสะท้อนด้วยเครื่องยูวี วิซิเบิล เอ็นไออาร์ สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS-NIR spectrophotometer)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดการดูดกลืนแสง (absorbance) การส่องผ่านแสง (Transmittance) และการสะท้อนแสง (reflectance) ในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet; UV) ช่วงตามองเห็น (visible) และช่วงใกล้อินฟราเรด (near infrared; NIR) ที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนหรือสะท้อนแสงโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ [34] ซึ่งปริมาณการดูดกลืน จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นของสารตัวอย่าง ทำให้เทคนิค UV-Vis-NIR สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการ วิเคราะห์ทดสอบสารได้อย่างหลากหลายทั้งในกลุ่มสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์และสารประกอบเชิงซ้อนที่ดูดกลืนรังสีในช่วงดังกล่าวได้ [24] ตัวอย่างเครื่องยูวี วิซิเบิล เอ็นไออาร์ สเปกโทรโฟโตมิเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.8 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 3.8 เครื่องยูวี วิซิเบิล เอ็นไออาร์ สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ [35]

### 3.4.5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer; FT-IR)

เทคนิคด้านอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี Infrared (IR) Spectroscopy เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ตรวจสอบเกี่ยวกับโมเลกุลของสาร โดยอาศัยหลักการเกี่ยวกับการสั่น (vibration) ของโมเลกุลแสงอินฟราเรดช่วงกลาง (2.5-25  $\mu\text{m}$ ) มีความถี่ตรงกับความถี่การสั่นของพันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุลของสาร เมื่อตัวอย่างได้รับพลังงานจากคลื่นรังสีอินฟราเรดที่เหมาะสม จะเกิดการสั่นของโมเลกุลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) ของโมเลกุล ทำให้โมเลกุลเกิดการดูดกลืนแสงแล้ววัดแสงที่ส่งผ่านออกมาแล้วแสดงผลเป็นความสัมพันธ์ของความถี่หรือเลขคลื่น (wave number) กับค่าการส่งผ่านของแสงเรียกว่า อินฟราเรดสเปกตรัม (IR spectrum) ซึ่งลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรในสถาบันเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา  
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติเฉพาะโมเลกุลของสาร จึงสามารถดูดกลืน  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

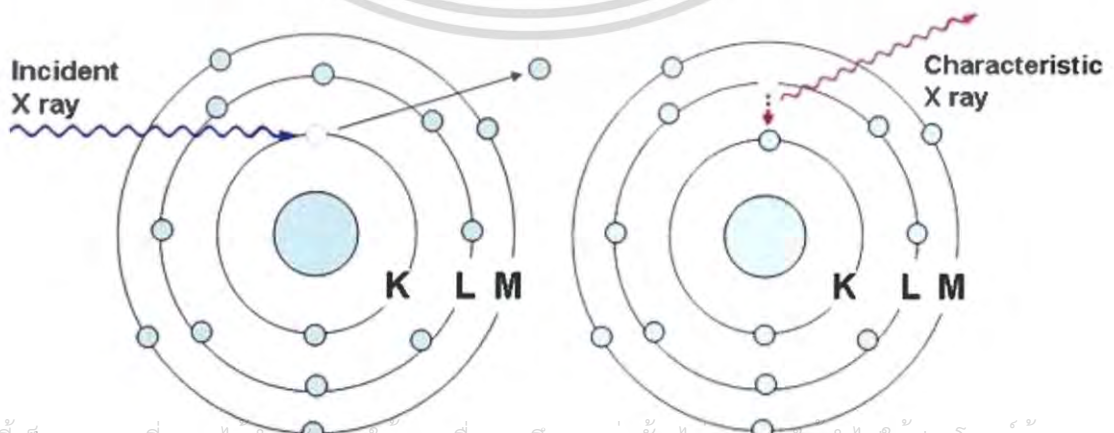
แสงอินฟราเรดได้ที่ความถี่ที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของพันธะและน้ำหนักอะตอมของหมู่ฟังก์ชัน (functional group) ในโมเลกุลนั้น ๆ [36] ตัวอย่างเครื่อง FT-IR แสดงดังรูปที่ 3.9



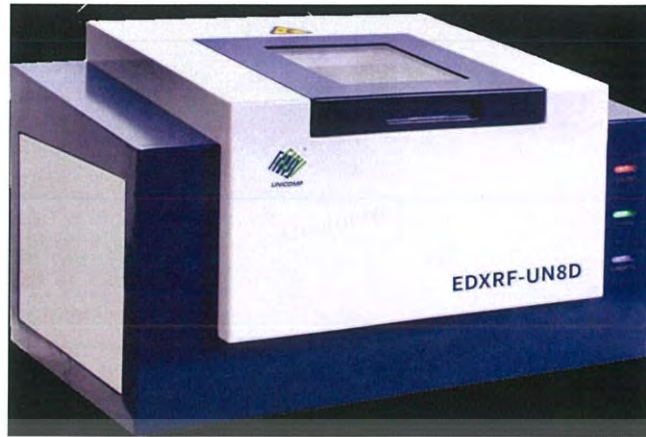
รูปที่ 3.9 เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ [37]

### 3.4.6 การวิเคราะห์ธาตุและปริมาณของธาตุด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence; XRF)

เอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการที่อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม เปลี่ยนระดับชั้นที่มีพลังงานสูงไปยังชั้นที่มีพลังงานต่ำกว่า และคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานจำเพาะ (characteristic X-ray) ของแต่ละธาตุโดยเมื่อรังสีเอ็กซ์ รังสีแกมมา อิเล็กตรอน หรือโปรตอนไปยังอะตอมของธาตุ จะชนกับอิเล็กตรอนในวงโคจรและทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปจากอะตอม ทำให้ตำแหน่งนั้นว่าง อิเล็กตรอนในชั้นที่มีพลังงานสูงกว่าจะเข้ามาแทนที่ เช่น จากชั้น L ไปชั้น K จากชั้น M ไปชั้น K หรือจากชั้น M ไปชั้น L โดยคายพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานจำเพาะของแต่ละธาตุ [38] จากนั้นจึงใช้เครื่องตรวจจับวัดค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์นั้น ๆ โดยหลักการคายพลังงานจำเพาะของรังสีเอ็กซ์แสดงดังรูปที่ 3.10 และรูปเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์แสดงดังรูปที่ 3.11



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามรูปที่ 3.10 การเกิด characteristic X-ray [38] สารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ [39]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาการพัฒนาผงสีส้มสะท้อนรังสีอินฟราเรดจากเหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ที่เป็นองค์ประกอบพื้นฐาน โดยใช้กระบวนการปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid state reaction) ในการสังเคราะห์ ซึ่งประกอบไปด้วยผลค่าพิกัดสี ค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรด การตรวจสอบเอกลักษณ์สัมพัทธ์และสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

#### 4.1 การศึกษาปัจจัยในการสังเคราะห์ผงสีส้มที่มีผลต่อค่าพิกัดสี

##### 4.1.1 อัตราส่วนของสารตั้งต้นที่ส่งผลต่อค่าพิกัดสีของผงสีส้ม

ในการศึกษาผลของอัตราส่วนของสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ผงสีส้มนั้น ได้ทำการปรับอัตราส่วนของเหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) อลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และ แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) ในอัตราส่วนที่ต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 แล้วทำการใส่สารช่วยในการเกิดปฏิกิริยาโซเดียมฟลูออไรด์ ( $\text{NaF}$ ) เท่ากันทั้งหมดคือร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยใช้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเป็น 5 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยได้ศึกษาผลของอัตราส่วนที่ส่งผลต่อแนวโน้มค่าพิกัดสีด้วยเครื่องวัดค่าพิกัดสี (spectrophotometer) แสดงดังตารางที่ 4.1 และนอกจากนี้ยังสามารถแสดงค่าพิกัดสีทั้งหมดในรูปของแผนผังวัฏภาค (three phase diagram) เพื่อสังเกตแนวโน้มของค่าพิกัดสีของผงสีส้มในแต่ละอัตราส่วนองค์ประกอบ แสดงดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าพิกัดสีของผงสีสูตรต่าง ๆ ที่เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

สูตร	องค์ประกอบ	ค่าพิกัดสี			รูปภาพ	สีที่ตามองเห็น
		$L^*$	$a^*$	$b^*$		
การค้า	-	55.67	25.68	38.84		ส้มเหลือง
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Pure $\text{Fe}_2\text{O}_3$	41.94	29.31	24.45		แดง
1	10Fe/90Mg	63.64	20.22	32.67		เหลืองส้ม
2	20Fe/80Mg	54.69	24.76	34.99		ส้ม
3	30Fe/70Mg	53.58	22.05	15.04		ส้ม
4	40Fe/60Mg	49.46	26.66	34.15		ส้ม
5	50Fe/50Mg	42.30	26.79	33.10		ส้ม
6	60Fe/40Mg	43.30	27.44	33.27		ส้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

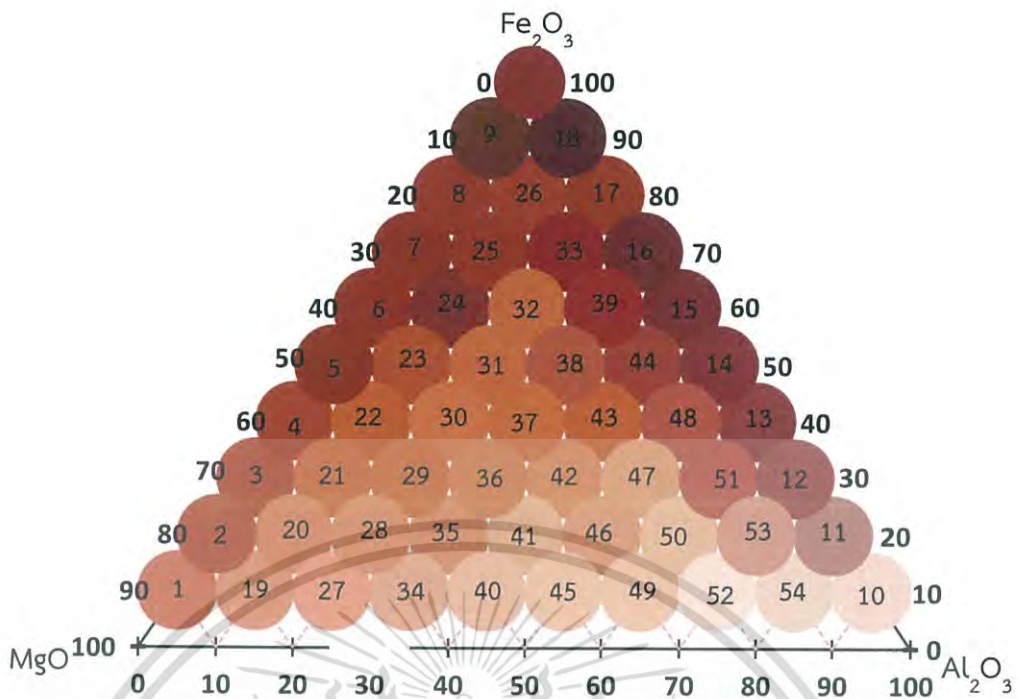
7	70Fe/30Mg	43.17	27.32	31.84		ส้ม
8	80Fe/20Mg	44.69	26.58	33.26		ส้ม
9	90Fe/10Mg	37.13	16.71	18.78		น้ำตาล
10	10Fe/90Al	87.32	4.81	14.91		ครีม
11	20Fe/80Al	67.53	13.08	15.39		น้ำตาลอ่อน
12	30Fe/70Al	53.58	22.05	15.04		น้ำตาลอ่อน
13	40Fe/60Al	48.26	23.93	15.17		น้ำตาล
14	50Fe/50Al	43.52	26.05	16.72		น้ำตาล
15	60Fe/40Al	40.62	25.33	15.47		น้ำตาล
16	70Fe/30Al	37.84	23.30	13.12		ม่วงแดง
17	80Fe/20Al	44.87	25.88	35.92		ส้มเหลือง
18	90Fe/10Al	3.16	16.81	7.04		ม่วง
19	10Fe/10Al/80Mg	73.43	12.96	30.01		เหลืองอ่อน
20	20Fe/10Al/70Mg	68.93	15.46	32.77		เหลืองอ่อน
21	30Fe/10Al/60Mg	60.55	20.77	39.37		เหลืองส้ม
22	40Fe/10Al/50Mg	57.58	22.23	41.43		เหลืองส้ม
23	50Fe/10Al/40Mg	54.00	23.85	41.17		เหลืองส้ม
24	60Fe/10Al/30Mg	41.21	24.30	21.07		ส้มแดง
25	70Fe/10Al/20Mg	49.20	26.85	34.14		ส้มเหลือง
26	80Fe/10Al/10Mg	47.77	26.99	34.20		ส้มเหลือง
27	10Fe/20Al/70Mg	76.77	11.27	28.20		เหลืองอ่อน
28	20Fe/20Al/60Mg	71.37	14.08	33.92		เหลืองส้ม
29	30Fe/20Al/50Mg	61.96	19.16	40.16		เหลืองส้ม
30	40Fe/20Al/40Mg	65.04	17.56	38.49		เหลืองส้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

31	50Fe/20Al/30Mg	61.13	20.12	40.96		เหลืองส้ม
32	60Fe/20Al/20Mg	60.76	19.56	41.21		เหลืองส้ม
33	70Fe/20Al/10Mg	41.85	32.04	25.09		แดงม่วง
34	10Fe/30Al/60Mg	76.77	11.27	28.20		เหลืองอ่อน
35	20Fe/30Al/50Mg	70.75	14.06	32.50		เหลืองอ่อน
36	30Fe/30Al/40Mg	66.54	16.25	36.24		เหลือง
37	40Fe/30Al/30Mg	62.83	18.97	39.72		ส้มเหลือง
38	50Fe/30Al/20Mg	56.25	24.13	30.55		ส้ม
39	60Fe/30Al/10Mg	44.45	32.67	26.09		ส้มแดง
40	10Fe/40Al/50Mg	81.45	8.23	24.38		เหลืองอ่อน
41	20Fe/40Al/40Mg	78.65	7.69	27.23		เหลืองอ่อน
42	30Fe/40Al/30Mg	69.44	14.57	34.89		เหลืองส้ม
43	40Fe/40Al/20Mg	58.24	22.26	40.68		ส้มเหลือง
44	50Fe/40Al/10Mg	49.16	27.13	26.13		ส้มแดง
45	10Fe/50Al/40Mg	82.28	7.89	23.14		เหลืองอ่อน
46	20Fe/50Al/30Mg	73.94	11.76	29.86		เหลือง
47	30Fe/50Al/20Mg	75.82	9.52	30.11		เหลือง
48	40Fe/50Al/10Mg	56.54	24.24	26.23		ส้ม
49	10Fe/60Al/30Mg	83.22	6.95	22.08		เหลืองอ่อน
50	20Fe/60Al/20Mg	73.94	11.76	29.86		เหลืองอ่อน
51	30Fe/60Al/10Mg	57.38	25.40	25.79		ส้ม
52	10Fe/70Al/20Mg	90.15	3.03	13.58		เหลืองอ่อน
53	20Fe/70Al/10Mg	73.58	12.16	20.81		เหลืองอ่อน
54	10Fe/80Al/10Mg	86.60	3.79	15.62		เหลืองอ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แนวโน้มของค่าพิกัดสีของผงสีส้ม

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 สามารถอธิบายแนวโน้มของค่าพิกัดสีของผงสีส้มที่เตรียมได้ตามอัตราส่วนต่าง ๆ ดังนี้ อัตราส่วนของสารตั้งต้นที่มีสององค์ประกอบของเหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) และแมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) ซึ่งคือสูตรที่ 1 ถึงสูตรที่ 9 นั้นจะให้ผงสีที่เตรียมได้มีเฉดสี ส้มเหลือง - ส้ม และน้ำตาล โดยค่าพิกัดของผงสีที่เตรียมได้นั้นจะมีค่าความสว่าง ( $L^*$ ) ลดลง ค่าสีแดง ( $a^*$ ) และค่าสีเหลือง ( $b^*$ ) เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยมีค่า  $a^*$  อยู่ในช่วง 20.22 – 27.44 และค่า  $b^*$  อยู่ในช่วง 15.04 – 34.15 เมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กออกไซด์จากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของเหล็กออกไซด์เป็นร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก (ผงสีสูตรที่ 9 (90Fe/10Al)) พบว่าผงสีที่ได้เป็นสีน้ำตาลโดยค่าสีแดง ( $a^*$ ) และค่าสีเหลือง ( $b^*$ ) จะลดลงอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของสารตั้งต้นที่มีสององค์ประกอบของเหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) และอลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ซึ่งคือสูตรที่ 10 ถึงสูตรที่ 18 พบว่าจะทำให้ผงสีที่เตรียมได้มีเฉดสีครีม - น้ำตาลอ่อน - แดงน้ำตาล - ส้มเหลือง และแดงม่วง โดยมีค่าความสว่าง  $L^*$  ลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณของเหล็กออกไซด์จากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก และส่วนใหญ่มีค่า  $a^*$  ค่อนข้างคงที่ในช่วง 22.05 – 26.05 และมีค่า  $b^*$  ที่ต่ำในช่วง 13.12 – 16.72 จึงทำให้ผงสีในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่ออกไปทางสีน้ำตาล เมื่อพิจารณาผงสีส้มที่สังเคราะห์จากสารตั้งต้นสามองค์ประกอบ พบว่า เมื่อปริมาณของเหล็กออกไซด์เพิ่มขึ้นจะทำให้ผงสีที่สังเคราะห์ได้มีความเป็นเฉดสีแดงมากขึ้นและมีค่าความสว่างลดลงสังเกตได้จากค่าพิกัดสีความสีแดง ( $a^*$ ) ที่เพิ่มขึ้นและค่าความสว่าง ( $L^*$ ) ที่ลดลง โดยเมื่อพิจารณาการคงสัดส่วนของอลูมิเนียมออกไซด์ไว้ที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นสัดส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงของเฉดสีที่ชัดเจน แล้วปรับปริมาณของเหล็กออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ โดยผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อปริมาณของเหล็กออกไซด์มากขึ้นและปริมาณของแมกนีเซียมออกไซด์ลดลงจะทำให้ค่าความสว่าง ( $L^*$ ) ลดลง ค่าสีแดงค่าม่วง ( $a^*$ ) จะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกแล้วลดลงเมื่ออัตราส่วนของ  $\text{Fe}_2\text{O}_3 : \text{Al}_2\text{O}_3 : \text{MgO}$  เป็นร้อยละ 70 : 30 : 0

โดยน้ำหนัก (สูตรที่ 16) ซึ่งไม่มีแมกนีเซียมออกไซด์ในองค์ประกอบ และค่าสีเหลือง ( $b^*$ ) จะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกแล้วลดลงเมื่ออัตราส่วนของ  $\text{Fe}_2\text{O}_3 : \text{Al}_2\text{O}_3 : \text{MgO}$  เป็นร้อยละ 50 : 30 : 20 โดยน้ำหนัก (สูตรที่ 38) และเมื่อคงสัดส่วนของแมกนีเซียมออกไซด์ไว้ที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก แล้วปรับปริมาณของเหล็กออกไซด์และอลูมิเนียมออกไซด์ พบว่าเมื่อปริมาณของเหล็กออกไซด์มากขึ้นและปริมาณของอลูมิเนียมออกไซด์ลดลงจะทำให้ค่าความสว่าง ( $L^*$ ) ลดลง ค่าสีแดง ( $a^*$ ) เพิ่มขึ้น และค่าสีเหลือง ( $b^*$ ) จะเพิ่มขึ้นแล้วลดลงเมื่ออัตราส่วนของ  $\text{Fe}_2\text{O}_3 : \text{Al}_2\text{O}_3 : \text{MgO}$  เป็น 60 : 10 : 30 (สูตรที่ 24) จึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อปริมาณของแมกนีเซียมออกไซด์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ผงสีส้มที่สังเคราะห์ได้มีค่าพิกัดสีเหลือง ( $b^*$ ) เพิ่มขึ้น โดยมีสีอยู่ในกลุ่มสีส้มเหลือง-ส้ม-ส้มแดง ส่วนผงสีส้มที่มีองค์ประกอบของอลูมิเนียมออกไซด์เป็นหลัก (สูตรที่ 45-54) จะมีสีอยู่ในกลุ่มสีเหลืองอ่อน-ส้ม มีค่าความสว่างสูง ค่า  $a^*$  ต่ำ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณของเหล็กออกไซด์ ส่วนค่า  $b^*$  จะขึ้นอยู่กับปริมาณของแมกนีเซียมออกไซด์ นอกจากนี้ได้ทำการวัดค่าพิกัดสีของผงสีส้มเกรดการค้าของบริษัท ZAR ที่มีเหล็กออกไซด์เป็นองค์ประกอบเช่นกัน พบว่าค่าพิกัดสีของผงสีส้มเกรดการค้ามีค่าพิกัดสี  $L^*/a^*/b^*$  เป็น 55.67/25.68/38.84 ตามลำดับ และจากตารางที่ 4.1 พบว่าผงสีสูตรที่มีค่าพิกัดสีใกล้เคียงกับผงสีเกรดการค้ามากที่สุด คือ ผงสีสูตรที่ 22 (40Fe/10Al/50Mg) มีค่า  $L^*/a^*/b^*$  เป็น 57.58/22.23/41.43 ตามลำดับ และผงสีที่มีสีส้มมากที่สุด คือ ผงสีสูตรที่ 51 (30Fe/60Al/10Mg) มีค่า  $L^*/a^*/b^*$  เป็น 57.38/25.40/25.79 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าพิกัดสีใกล้เคียงกับผงสีส้มเกรดการค้าเช่นกัน

ตารางที่ 4.2 ค่าพิกัดสีของผงสีส้มที่มีปริมาณอัตราส่วนของอลูมิเนียมออกไซด์คงที่ที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก


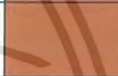
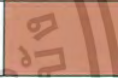
องค์ประกอบ	อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ (°C)	ค่าพิกัดสี			รูปภาพ	สีที่ตามองเห็น
		$L^*$	$a^*$	$b^*$		
0Fe/30Al/70Mg	1000	97.87	0.32	1.32		ขาว
10Fe/30Al/60Mg	1000	76.77	11.27	28.20		เหลืองอ่อน
20Fe/30Al/50Mg	1000	70.75	14.06	32.50		เหลืองอ่อน
30Fe/30Al/40Mg	1000	66.54	16.25	36.24		เหลือง
40Fe/30Al/30Mg	1000	63.83	18.97	39.72		ส้มเหลือง
50Fe/30Al/20Mg	1000	56.25	24.13	30.55		ส้ม
60Fe/30Al/10Mg	1000	44.45	32.67	26.25		ส้มแดง
70Fe/30Al/0Mg	1000	37.84	23.30	13.12		ม่วงแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


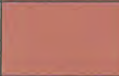
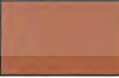
#### 4.1.2 อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ที่ส่งผลต่อค่าพิกัดสีของผงสีส้ม

ในการศึกษาผลของอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์นั้น ได้นำผงสีสูตรที่ 22 (40Fe/10Al/50Mg) และผงสีสูตรที่ 51 (30Fe/60Al/10Mg) ซึ่งเป็นสูตรที่มีค่าพิกัดสีใกล้เคียงกับค่าพิกัดสีของผงสีส้มเกรดการค้าและเป็นสูตรที่ให้ผงสีเฉดสีส้มมากที่สุดมาใช้ในการทดสอบ โดยทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างกัน คือ 900 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยใช้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเป็น 5 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยได้ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนที่ส่งผลต่อแนวโน้มค่าพิกัดสีด้วยเครื่องวัดค่าพิกัดสี (spectrophotometer) แสดงดังตารางที่ 4.3 และ 4.4

ตารางที่ 4.3 ค่าพิกัดสีของผงสีส้มสูตรที่ 22 (40Fe/10Al/50Mg)

องค์ประกอบ	อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ (°C)	ค่าพิกัดสี			รูปภาพ	สีที่ตามองเห็น
		L*	a*	b*		
40Fe/10Al/50Mg	900	60.60	20.81	42.33		ส้มเหลือง
	1000	57.58	22.23	41.43		ส้มอิฐ
	1100	64.59	17.14	30.85		น้ำตาลอ่อน

ตารางที่ 4.4 ค่าพิกัดสีของผงสีส้มสูตรที่ 51 (30Fe/60Al/10Mg)

องค์ประกอบ	อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ (°C)	ค่าพิกัดสี			รูปภาพ	สีที่ตามองเห็น
		L*	a*	b*		
30Fe/60Al/10Mg	900	54.40	28.49	26.30		ส้มแดง
	1000	57.38	25.40	25.79		ส้มแดง
	1100	54.60	21.67	32.17		น้ำตาลส้ม

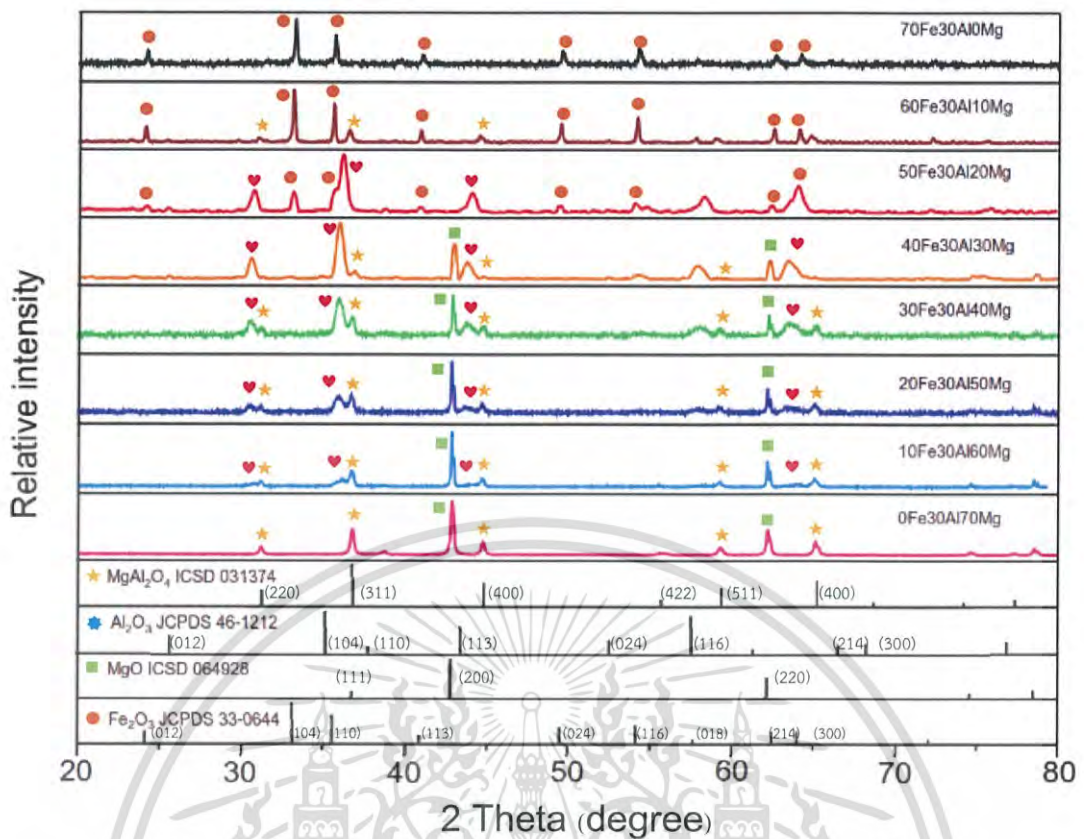
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าพิกัดสีของผงสีทั้ง 2 สูตรมีแนวโน้มใกล้เคียงกันโดยที่เมื่อใช้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส ทำให้ได้ผงสีที่มีค่าพิกัดสีที่ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อใช้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์เป็น 1100 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้ค่าพิกัดสีของผงสีสูตรที่ 22 ค่าความสว่าง ( $L^*$ ) เพิ่มขึ้น ค่าสีแดง ( $a^*$ ) ลดลง และค่าสีเหลือง ( $b^*$ ) ลดลง ทำให้ผงสีสูตรที่ 22 มีเฉดสีส้มที่ลดลงและเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอ่อน ส่วนในผงสีสูตรที่ 51 หลังการเผาแคลไซน์ที่ 1100 °C มีค่าความสว่าง ( $L^*$ ) ลดลง ค่าสีแดง ( $a^*$ ) ลดลง แต่ค่าสีเหลือง ( $b^*$ ) เพิ่มขึ้น ทำให้ผงสีสูตรที่ 51 เปลี่ยนจากสีส้มแดงเป็นสีน้ำตาล ซึ่งผลของอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ที่ส่งผลต่อค่าพิกัดสีของผงสีนั้นอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคขององค์ประกอบที่ใช้ในการสังเคราะห์ผงสีจากปฏิกิริยาสถานะของแข็ง โดยจะทำการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคที่ส่งผลต่อค่าพิกัดสีของผงสีด้วยเทคนิคการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ต่อไป

#### 4.2 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer; XRD)

ในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ได้ทำการศึกษาผงสีส้มที่คงอัตราส่วนของอลูมิเนียมออกไซด์ที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิเผาแคลไซน์ที่ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงเฉดสีชัดเจนที่สุด ผงสีมีค่าพิกัดสีใกล้เคียงกับเกรดการค้ามากที่สุดและผงสีที่มีเฉดสีส้มมากที่สุดทั้งสามอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ คือ ผงสีส้มสูตรที่ 22 (40Fe/10Al/50Mg) และผงสีส้มสูตรที่ 51 (30Fe/60Al/10Mg) ที่อุณหภูมิ 900 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยใช้เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ รุ่น XRD-6100 บริษัท SHIMADZU ในการทดสอบ ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ของผงสีส้มที่คงอัตราส่วนของอลูมิเนียมออกไซด์ที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 4.2 และ ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ของผงสีส้มสูตรที่ 22 (40Fe/10Al/50Mg) และผงสีส้มสูตรที่ 51 (30Fe/60Al/10Mg) ที่อุณหภูมิ 900 1000 และ 1100 องศาเซลเซียสแสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

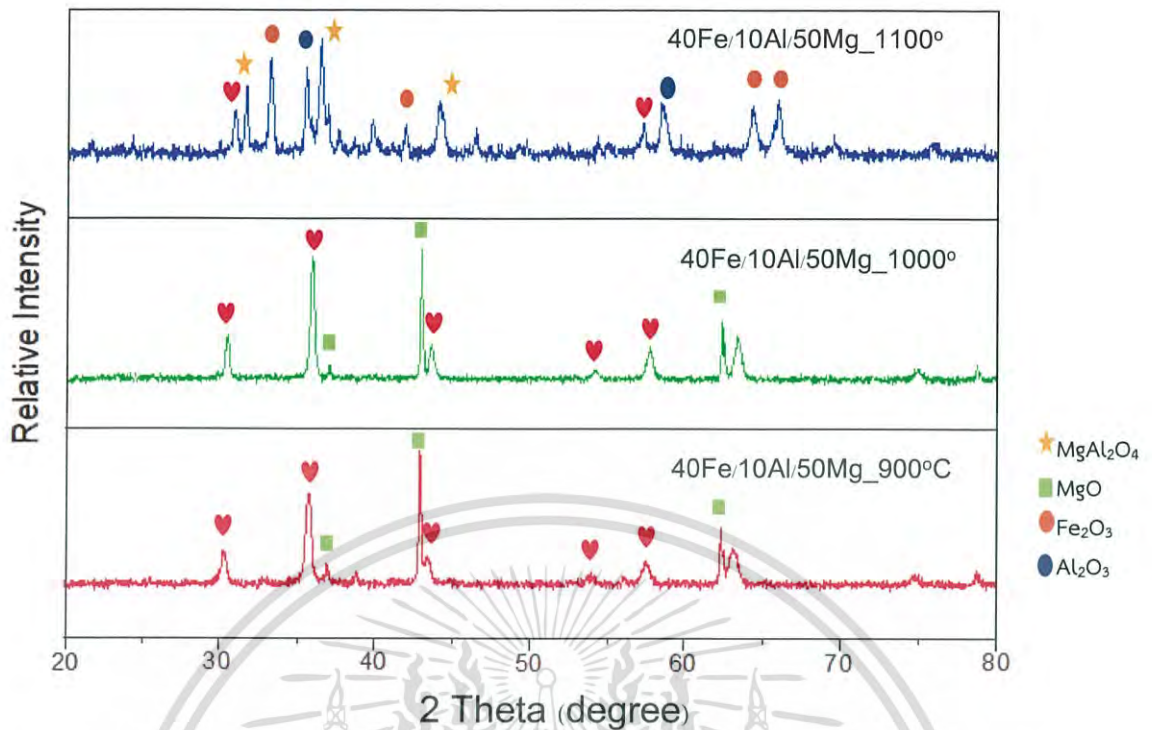


รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงสีส้มที่คงอัตราส่วนของอลูมิเนียมออกไซด์ที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิเผาแคลไซน์ 1000 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง และ JCPDS ของ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> และ FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>

จากรูปที่ 4.2 แสดงการตรวจวัดผงสีส้มด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของผงสีส้มที่คงอัตราส่วนของอลูมิเนียมออกไซด์ที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิเผาแคลไซน์ 1000 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง โดยผงสีที่มีองค์ประกอบเป็นอลูมิเนียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ที่อัตราส่วน 0Fe/30Al/70Mg พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนขึ้นที่ตำแหน่ง 2-theta ที่ 31.3, 36.9, 44.8, 55.7, 59.4 และ 65.3 ซึ่งตรงกับการเลี้ยวเบนของระนาบ (220), (311), (400), (422), (511) และ (440) ตามลำดับ ซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนตามข้อมูลมาตรฐานของวัฏภาคภาคแมกนีเซียมอลูมินต์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบสปินเนล (Spinel) (MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>; ICSD เลขที่ 031374) โดยการเกิดวัฏภาคแมกนีเซียมอลูมินต์ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็งระหว่างอลูมิเนียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ซึ่งอัตราส่วนตามทฤษฎีที่ทำให้เกิดวัฏภาคแมกนีเซียมอลูมินต์ คือ ร้อยละ 72 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : 28 MgO โดยน้ำหนัก [40] และยังพบพิคการเลี้ยวเบนขึ้นที่ตำแหน่ง 2-theta ที่ 36.9, 42.8 และ 62.2 ตรงกับพิคการเลี้ยวเบนของระนาบ (111), (200), และ (220) ตามลำดับ ซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนตามข้อมูลมาตรฐานของวัฏภาคแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO; ICSD เลขที่ 064928) ซึ่งเกิดจากแมกนีเซียมออกไซด์ที่ไม่ทำปฏิกิริยา (สารตั้งต้น) โดยเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเหล็กออกไซด์เป็นไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งหามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และลดอัตราส่วนแมกนีเซียมออกไซด์เป็นร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ซึ่งคือสูตร  $10\text{Fe}/30\text{Al}/60\text{Mg}$  พบว่าพีคการเลี้ยวเบนของวัฏภาคแมกนีเซียมอลูมินेट และวัฏภาคแมกนีเซียมออกไซด์มีความเข้มลดลงและเริ่มพบรูปแบบการเลี้ยวเบนที่คล้ายกับวัฏภาคของแมกนีเซียมอลูมินेट แต่รูปแบบการเลี้ยวเบนที่พบจะมีค่า  $2\theta$  ที่ต่ำลง ( $\heartsuit$ ) ซึ่งจากสมการของ Bragg สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อมุม  $2\theta$  มีค่าลดลงจะส่งผลให้ระยะห่างระหว่างระนาบมากขึ้นซึ่งอาจเกิดจากการเกิดวัฏภาคของ  $\text{Mg}(\text{Al},\text{Fe})_2\text{O}_4$  ที่มีโครงสร้างผลึกแบบสปินเนล เนื่องจาก  $\text{Fe}^{3+}$  ที่มีรัศมีไอออน 60 พิกโตเมตร เข้าไปแทนที่  $\text{Al}^{3+}$  ที่มีรัศมีไอออน 53 พิกโตเมตร [41] ในโครงสร้างของแมกนีเซียมอลูมินेट จากนั้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเหล็กออกไซด์เป็นร้อยละ 20 ถึงร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก และลดอัตราส่วนแมกนีเซียมออกไซด์เป็นร้อยละ 50 ถึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ซึ่งคือสูตร  $20\text{Fe}/30\text{Al}/50\text{Mg}$ ,  $30\text{Fe}/30\text{Al}/40\text{Mg}$  และ  $40\text{Fe}/30\text{Al}/30\text{Mg}$  ตามลำดับ พบว่าพีครูปแบบการเลี้ยวเบนของวัฏภาคแมกนีเซียมอลูมินेट และวัฏภาคแมกนีเซียมออกไซด์มีความเข้มลดลง เนื่องจากเกิดวัฏภาคของ  $\text{Mg}(\text{Al},\text{Fe})_2\text{O}_4$  มากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กออกไซด์เป็นร้อยละ 50 และร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ซึ่งคือสูตร  $50\text{Fe}/30\text{Al}/20\text{Mg}$  และ  $60\text{Fe}/30\text{Al}/10\text{Mg}$  จะพบพีคการเลี้ยวเบนขึ้นที่ตำแหน่ง  $2\theta$  ที่ 24.1, 33.2, 35.6, 40.9, 49.5, 54.1, 57.6, 62.4 และ 64.0 ตรงกับพีคการเลี้ยวเบนของระนาบ (012), (104), (110), (113), (024), (116), (018), (214) และ (300) ตามลำดับ ซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนมาตรฐานของวัฏภาคเหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; JCPDS เลขที่ 33-0644) แสดงให้เห็นถึงการแยกตัวของวัฏภาคเหล็กออกไซด์เมื่อมีปริมาณมากขึ้นทำให้ที่อัตราส่วนนี้ประกอบด้วยวัฏภาคของเหล็กออกไซด์และแมกนีเซียมอลูมินेट ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ) หรือ  $\text{Mg}(\text{Al},\text{Fe})_2\text{O}_4$  เมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กออกไซด์เป็นร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ซึ่งคือสูตร  $70\text{Fe}/30\text{Al}/0\text{Mg}$  จะพบเพียงรูปแบบพีคการเลี้ยวเบนของวัฏภาคเหล็กออกไซด์ ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนวัฏภาคที่มีผลต่อค่าพิกัดสี โดยเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเหล็กออกไซด์เรื่อย ๆ จากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก จะทำให้มีการแทนที่ไอออน  $\text{Al}^{3+}$  ด้วยไอออน  $\text{Fe}^{3+}$  ในวัฏภาคแมกนีเซียมอลูมินेट ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ) ที่มีโครงสร้างผลึกแบบสปินเนลเกิดเป็นวัฏภาคของ  $\text{Mg}(\text{Al},\text{Fe})_2\text{O}_4$  ส่งผลให้วงสีที่เตรียมได้มีค่าความสว่าง ( $L^*$ ) ลดลง ค่าสีแดง ( $a^*$ ) เพิ่มขึ้น และค่าสีเหลือง ( $b^*$ ) เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเหล็กออกไซด์มากกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ค่าสีเหลือง ( $b^*$ ) จะลดลงเนื่องจากเกิดวัฏภาคของเหล็กออกไซด์มากขึ้นและเหล็กอลูมินेटจะเปลี่ยนกลับไปเป็นโครงสร้างแมกนีเซียมอลูมินेट ทำให้วงสีที่เตรียมได้ที่องค์ประกอบนี้มีเม็ดสีตั้งแต่ขาว - เหลืองขาว - เหลืองส้ม - ส้มเหลือง - ส้ม - ส้มแดง และแดงม่วง

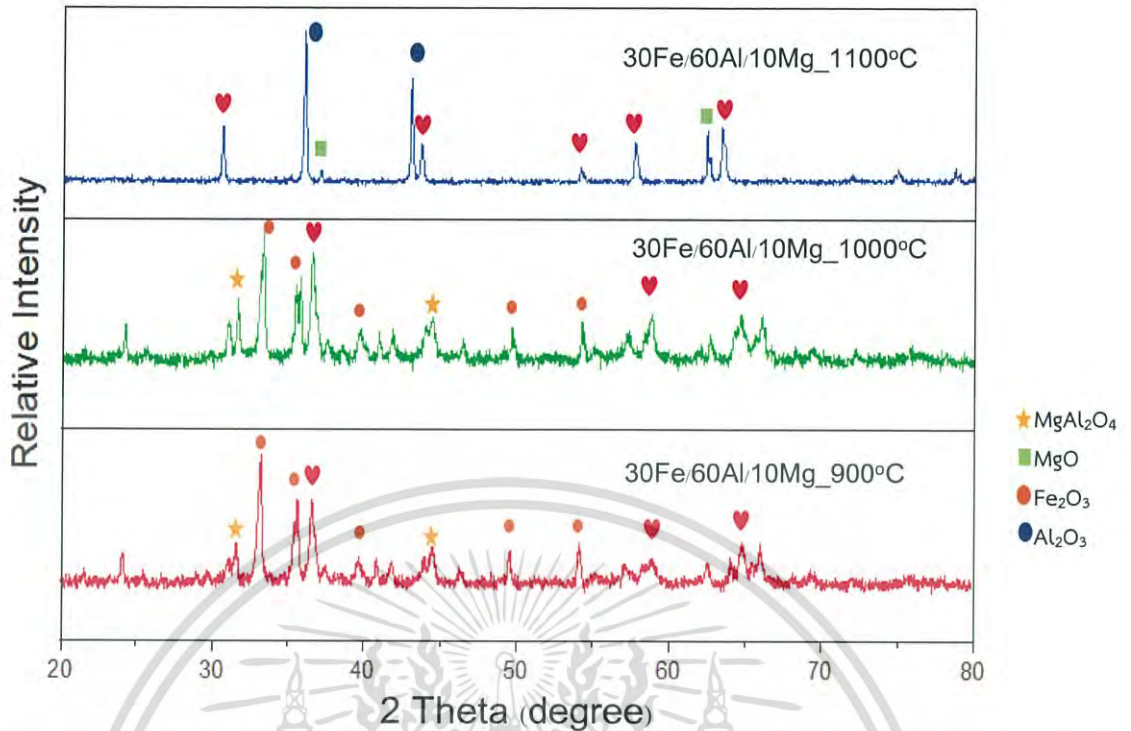
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผงสีผสมสูตรที่ 22 (40Fe/10Al/50Mg) ที่เผาที่อุณหภูมิ 900 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส

จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงสีผสมสูตรที่ 22 (40Fe/10Al/50Mg) ที่ใช้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ 900, 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าเมื่อเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส ผงสีผสมที่สังเคราะห์ได้จะมีผลของรูปแบบพีคการเลี้ยวเบนที่คล้ายกันโดยจะพบรูปแบบพีคการเลี้ยวเบนของวัฏภาค  $Mg(Al,Fe)_2O_4$  และ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เนื่องจากการแทนที่ไอออน  $Al^{3+}$  ด้วยไอออน  $Fe^{3+}$  ในวัฏภาคแมกนีเซียมอลูมิเนต ( $MgAl_2O_4$ ) และยังพบวัฏภาคแมกนีเซียมออกไซด์ที่เป็นสารตั้งต้นเนื่องจากผงสีผสมสูตรที่ 22 มีอัตราส่วนของแมกนีเซียมออกไซด์อยู่มาก โดยที่อุณหภูมิเผาแคลไซน์ 1000 องศาเซลเซียส จะมีความเข้มของพีคการเลี้ยวเบนของวัฏภาค  $Mg(Al,Fe)_2O_4$  ที่สูงกว่าเนื่องจากอุณหภูมิในการเผาที่สูงขึ้นทำให้มีพลังงานกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็งได้มากขึ้น เมื่อเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส พบวัฏภาคของ  $Mg(Al,Fe)_2O_4$  แมกนีเซียมอลูมิเนต อลูมิเนียมออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ เนื่องจากอุณหภูมิในการเผาที่สูงขึ้นทำให้ไอออน  $Fe^{3+}$  ที่แทนที่ในโครงสร้างผลึกแบบสปินเนลเกิดการแยกตัวออกจากวัฏภาค  $Mg(Al,Fe)_2O_4$  ทำให้พบรูปแบบการเลี้ยวเบนของวัฏภาคเหล็กออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์ และแมกนีเซียมอลูมิเนต ส่งผลต่อค่าพิกัดสีค่าความสว่าง ( $L^*$ ) เพิ่มขึ้น ค่าสีแดง ( $a^*$ ) ลดลง และค่าสีเหลือง ( $b^*$ ) ลดลง ทำให้ผงสีที่เตรียมได้มีเฉดสีเปลี่ยนจากสีส้มเป็นสีน้ำตาลอ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผงสีผสมสูตรที่ 51 (30Fe/60Al/10Mg) ที่เผาที่อุณหภูมิ 900, 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส

จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงสีผสมสูตรที่ 51 (30Fe/60Al/10Mg) ที่ใช้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ 900, 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าเมื่อเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส มีผลของรูปแบบฟิสิกการเลี้ยวเบนที่คล้ายกันโดยจะพบรูปแบบฟิสิกการเลี้ยวเบนของวัฏภาคแมกนีเซียมอลูมิเนต ( $MgAl_2O_4$ ) และ เหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) โดยที่อุณหภูมิเผาแคลไซน์ 1000 องศาเซลเซียส จะมีความเข้มของฟิสิกการเลี้ยวเบนของวัฏภาค  $Mg(Al,Fe)_2O_4$  ที่สูงกว่าเนื่องจากอุณหภูมิในการเผาที่สูงขึ้นทำให้มีพลังงานในการเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็งที่มากขึ้น เมื่อเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส พบวัฏภาค  $Mg(Al,Fe)_2O_4$  อลูมิเนียมออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ เนื่องจากอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ที่สูงขึ้นทำให้ไอออน  $Fe^{3+}$  แทนที่ในโครงสร้างผลึกแบบสปินเนล และเกิดการแยกตัวของวัฏภาคแมกนีเซียมออกไซด์และอลูมิเนียมออกไซด์ ส่งผลต่อค่าพิกัดสีค่าความสว่าง ( $L^*$ ) เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ค่าสีแดง ( $a^*$ ) ลดลง และค่าสีเหลือง ( $b^*$ ) เพิ่มขึ้น ทำให้ผงสีที่เตรียมได้มีการเปลี่ยนสีจากส้มแดงเป็นน้ำตาลส้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การศึกษาปริมาณของธาตุองค์ประกอบโดยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทสโกปี (X-ray Fluorescence; XRF)

การศึกษาปริมาณของธาตุองค์ประกอบโดยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทสโกปี (XRF) ของผงสีสูตรที่ 22 (40Fe/10Al/50Mg) สูตรที่ 38 (50Fe/30Al/20Mg) สูตรที่ 39 (60Fe/30Al/10Mg) และสูตรที่ 51 (30Fe/60Al/10Mg) ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.5 ถึงรูปที่ 4.8

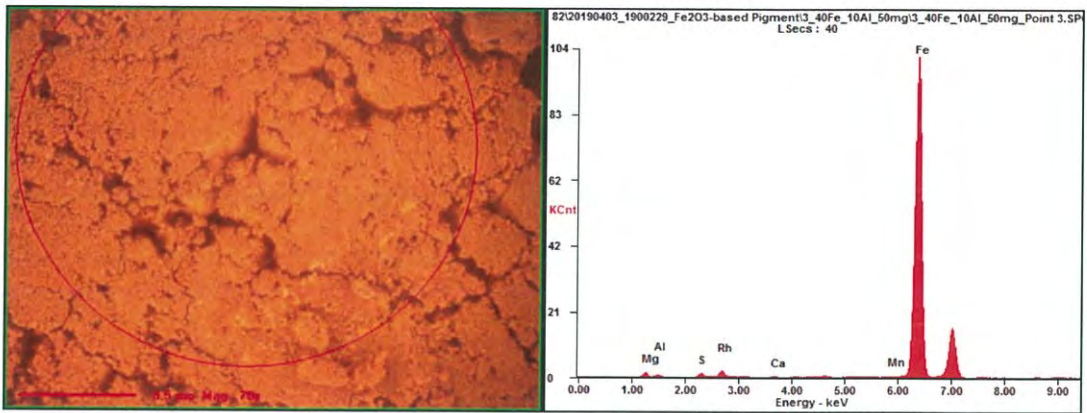
ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบของผงสีสูตรที่ 22 (40Fe/10Al/50Mg) สูตรที่ 38 (50Fe/30Al/20Mg) สูตรที่ 39 (60Fe/30Al/10Mg) และสูตรที่ 51 (30Fe/60Al/10Mg)

สูตร	องค์ประกอบ	อุณหภูมิเผาแคลไซน์ (°C)	องค์ประกอบออกไซด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)					
			Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		MgO	
			% ทางทฤษฎี	% การทดลอง	% ทางทฤษฎี	% การทดลอง	% ทางทฤษฎี	% การทดลอง
22	40Fe/10Al/50Mg	1000	40	39.43	10	9.71	50	50.86
38	50Fe/30Al/20Mg	1000	50	51.41	30	28.23	20	20.36
39	60Fe/30Al/10Mg	1000	60	60.03	30	29.06	10	10.91
51	30Fe/60Al/10Mg	1000	30	28.96	60	61.48	10	9.56

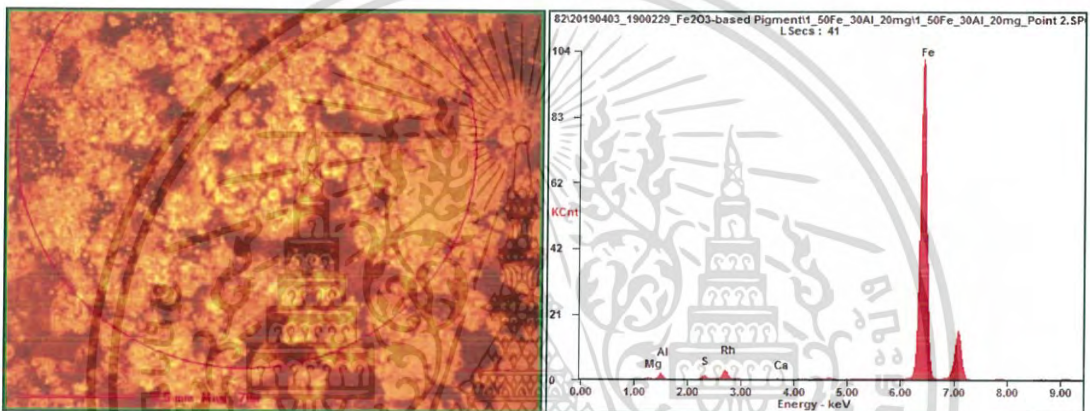
หมายเหตุ : การคำนวณร้อยละโดยน้ำหนักทางทฤษฎีของผงสีได้ค่าคำนวณจากการไม่นับรวมปริมาณของ NaF เนื่องจากถูกกำจัดออกในขั้นตอนการเผาแคลไซน์และการล้างผงสี

จากการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุองค์ประกอบโดยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทสโกปี (XRF) ของผงสีแดงสูตรที่ 22 (40Fe/10Al/50Mg), 38 (50Fe/30Al/20Mg), 39 (60Fe/30Al/10Mg) และสูตรที่ 51 (30Fe/60Al/10Mg) พบว่า ผงสีสูตรทุกสูตรเมื่อเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง มีร้อยละโดยน้ำหนักขององค์ประกอบของเหล็กออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ที่ใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี โดยการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบที่แตกต่างจากค่าทางทฤษฎีอาจเป็นผลมาจากการเกิดวิฤภาคของ Mg(Al,Fe)<sub>2</sub>O<sub>4</sub> และแมกนีเซียมออลูมิเนต (MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบสปินเนล เมื่อทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาปริมาณของธาตุองค์ประกอบโดยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทสโกปี จะสอดคล้องกับผลที่ได้จากการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้เครื่องทดสอบ

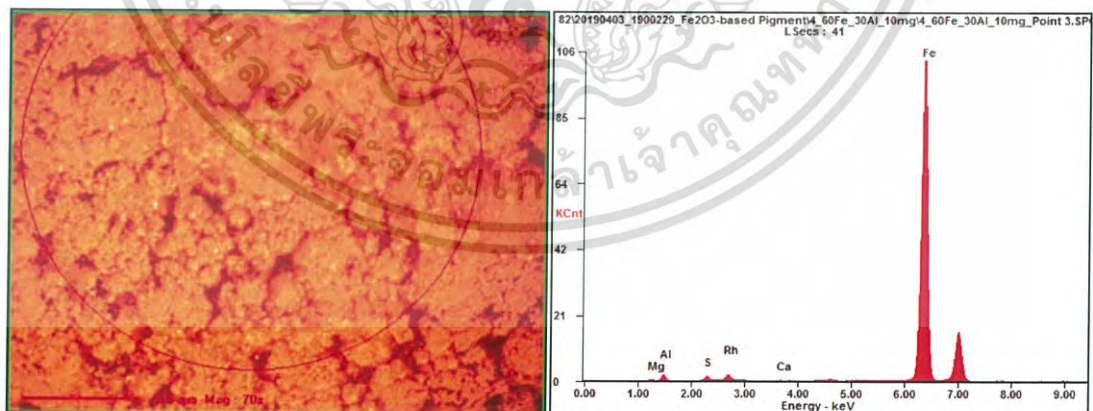
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 รูปภาพและ XRF สเปกตรัมของผงสีผสมสูตรที่ 22 (40Fe/10Al/50Mg) ที่เผาแคลไซน์ที่ อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

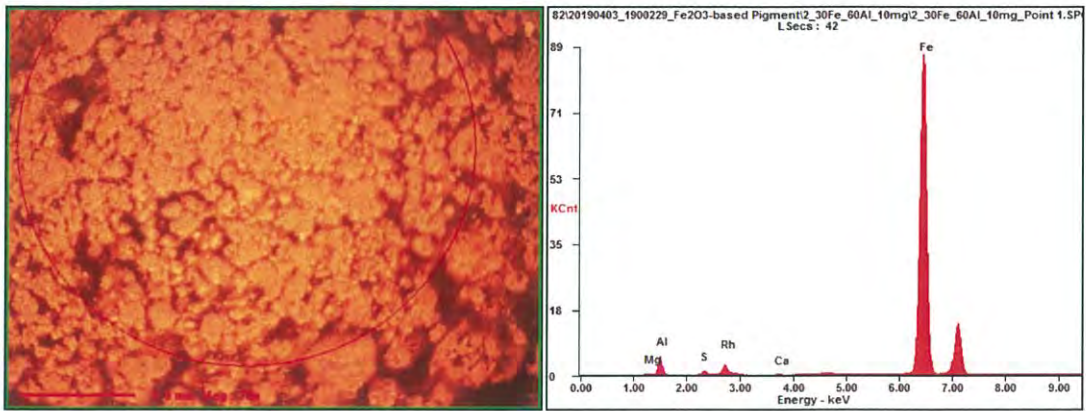


รูปที่ 4.6 รูปภาพและ XRF สเปกตรัมของผงสีผสมสูตรที่ 38 (50Fe/30Al/20Mg) ที่เผาแคลไซน์ที่ อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง



รูปที่ 4.7 รูปภาพและ XRF สเปกตรัมของผงสีผสมสูตรที่ 39 (60Fe/30Al/10Mg) ที่เผาแคลไซน์ที่ อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

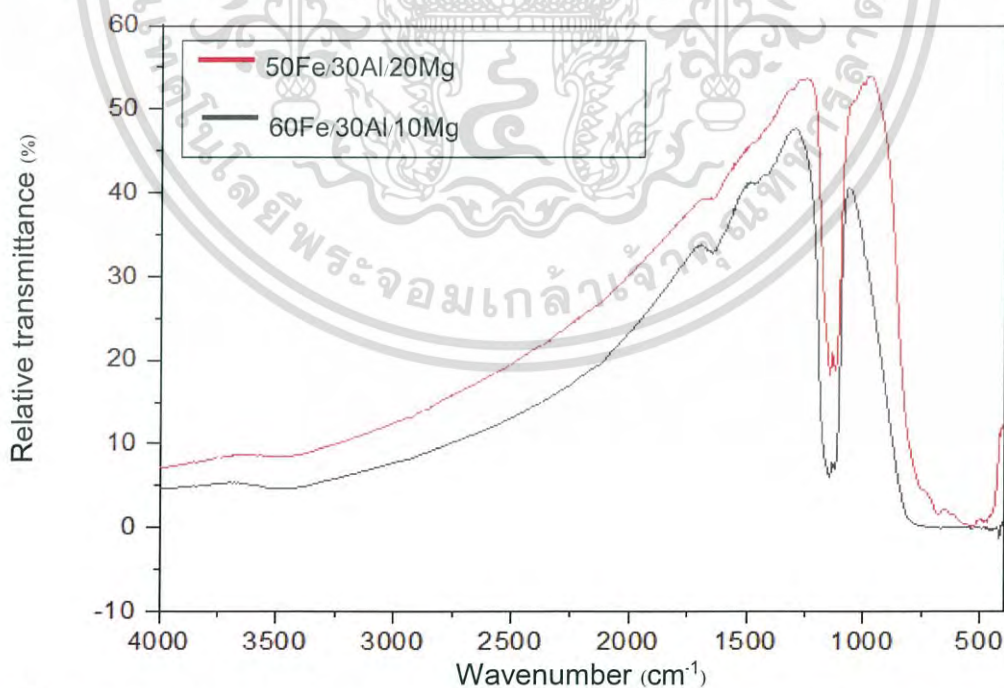
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 รูปภาพและ XRF สเปกตรัมของผงสีสูตรที่ 51 (30Fe/60Al/10Mg) ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

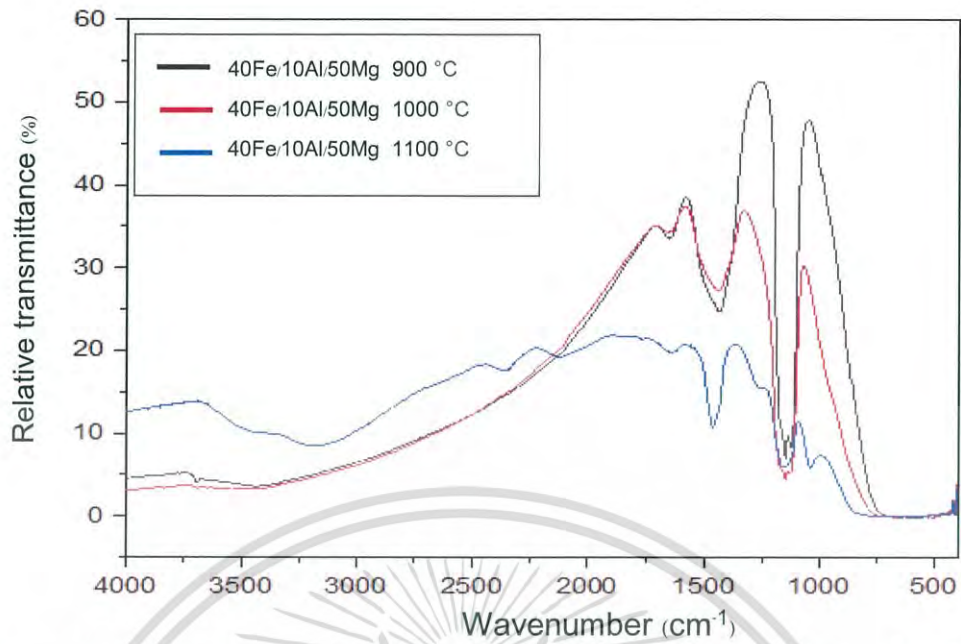
#### 4.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างโมเลกุลด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectroscopy; FT-IR)

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างโมเลกุลด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ FT-IR ของผงสีสูตรที่ 38 (50Fe/30Al/20Mg) สูตรที่ 39 (60Fe/30Al/10Mg) สูตรที่ 22 (40Fe/10Al/50Mg) ซึ่งเป็นสูตรที่มีค่าพิกัดสีใกล้เคียงกับเกรดการค้าและสูตรที่ 51 (30Fe/60Al/10Mg) ซึ่งเป็นสูตรที่มีสีเข้มมากที่สุด ที่ใช้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ 900 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส โดยผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.9 ถึงรูปที่ 4.11

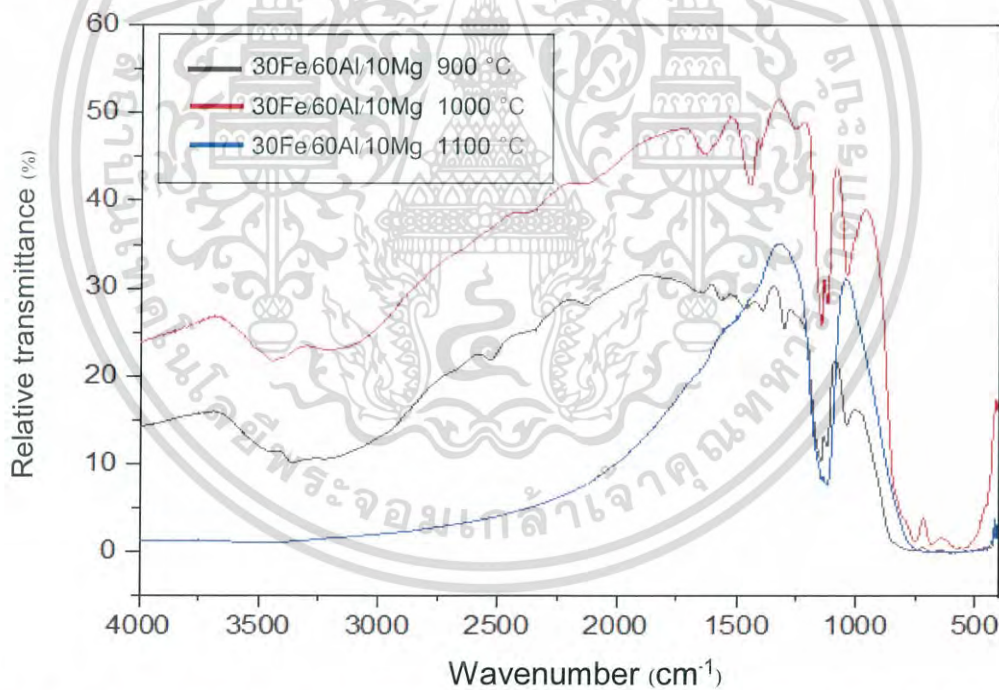


รูปที่ 4.9 อินฟราเรดสเปกตรัมของผงสีสูตรที่ 38 (50Fe/30Al/20Mg) และสูตรที่ 39 (60Fe/30Al/10Mg) เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์สีผงสีสูตรต่างๆ โดยขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการค้า ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 อินฟราเรดสเปกตรัมของผงสีผสมสูตรที่ 22 (40Fe/10Al/50Mg) ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.11 อินฟราเรดสเปกตรัมของผงสีผสมสูตรที่ 51 (30Fe/60Al/10Mg) ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส

ผลจากการวิเคราะห์พบว่าอินฟราเรดสเปกตรัมของผงสีผสมทั้งหมด แสดงช่วงการดูดกลืนแสงในลักษณะเดียวกัน โดยพบช่วงการดูดกลืนแสงที่แสดงเอกลักษณ์เฉพาะขององค์ประกอบต่าง ๆ คือ อะลูมิเนียมออกไซด์ ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 899, 796 และ 695  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งตรงกับการสั่นของพันธะ Al-O เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าแบบยัดหัด แมกนีเซียมออกไซด์ ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 548  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งตรงกับการสั่นของพันธะ Mg-O ไม่วากกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบยึดหด และเหล็กออกไซด์ ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 524 และ  $417\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งตรงกับการสั่นของพันธะ Fe-O แบบยึดหด [42]

#### 4.5 การศึกษาสัณฐานวิทยาของผงสีส้มด้วยเทคนิคกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM)

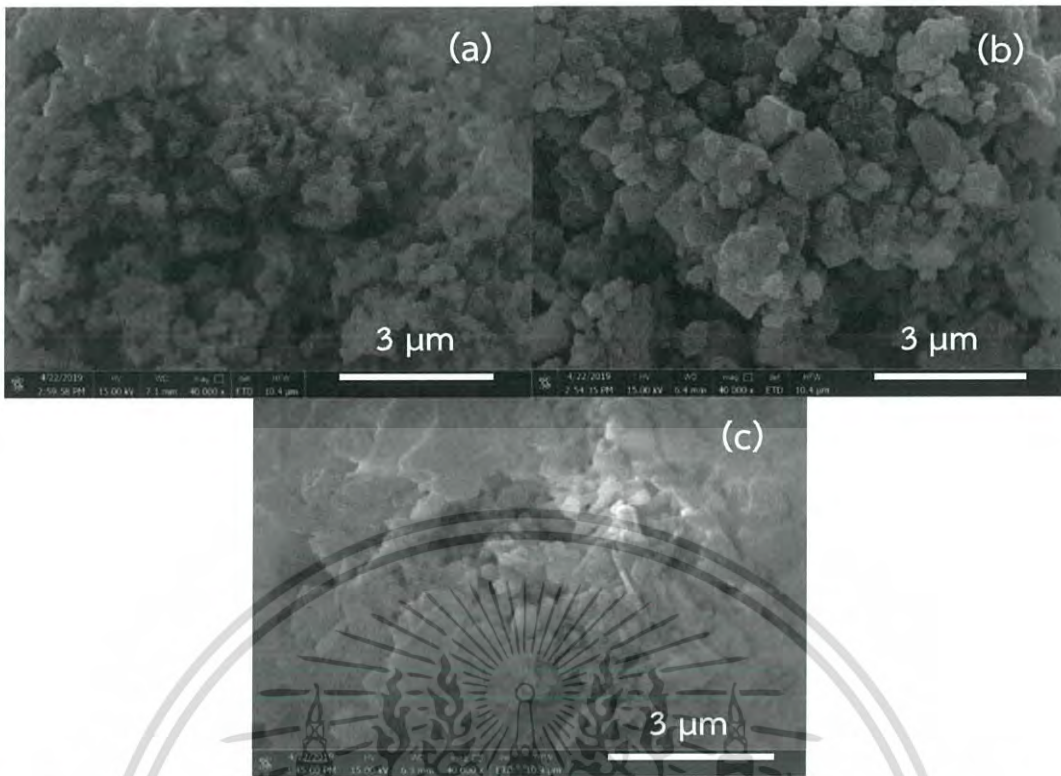
ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ร่วมกับการหาค่าอนุภาคเฉลี่ยด้วยการใช้โปรแกรม Image J ของผงสีส้มเกรดการค้าบริษัท ZAR และผงสีส้มที่สังเคราะห์ขึ้น ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.12 - 4.13 และตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.12 ภาพถ่าย SEM ของผงสีส้มเกรดการค้าบริษัท ZAR

จากรูปที่ 4.12 พบว่าผงสีส้มเกรดการค้าบริษัท ZAR มีรูปร่างของอนุภาคเป็นแบบแท่ง มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยในด้านยาวเท่ากับ 236 นาโนเมตร และมีการกระจายตัวของอนุภาคที่สม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ภาพถ่าย SEM ของผลึกฟิล์มภาพ (a) สูตรที่ 22 (40Fe/10Al/50Mg) ภาพ (b) สูตรที่ 31 (50Fe/30Al/20Mg) และ ภาพ (c) สูตรที่ 51 (30Fe/60Al/10Mg) ที่อุณหภูมิเฟอแคลไซน์ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.13 พบว่า ผลึกฟิล์มสูตรที่ 22 (ภาพ a) มีรูปร่างของอนุภาคเป็นก้อนขนาดเล็กและมีรูปร่างแบนปนเล็กน้อย มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 389 นาโนเมตร และมีการกระจายตัวของอนุภาคที่ค่อนข้างดี ผลึกฟิล์มสูตรที่ 31 (ภาพ b) มีรูปร่างอนุภาคแบนและมีรูปร่างแบนปนเล็กน้อย มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 606 นาโนเมตรและมีอนุภาคบางส่วนที่เกาะกันเป็นก้อน และผลึกฟิล์มสูตรที่ 51 (ภาพ c) มีรูปร่างของอนุภาคเป็นแผ่น มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 824 นาโนเมตร และมีอนุภาคเกาะรวมตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่

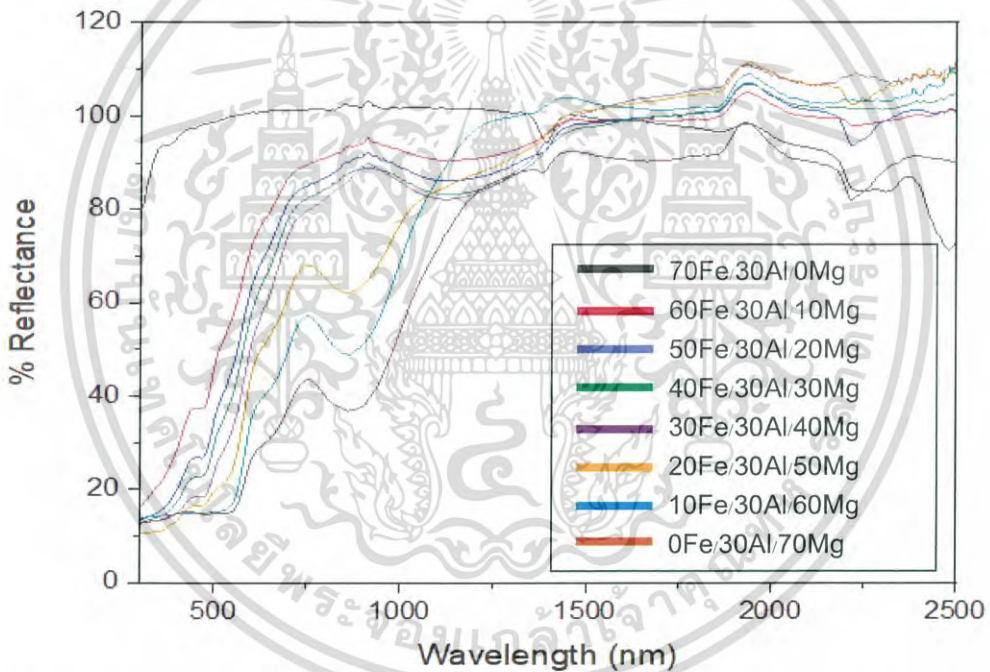
ตารางที่ 4.6 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผลึกฟิล์ม

สูตร	องค์ประกอบ	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (nm)
ZAR	-	236
22	40Fe/10Al/50Mg	389
31	50Fe/30Al/20Mg	606
51	30Fe/60Al/10Mg	824

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

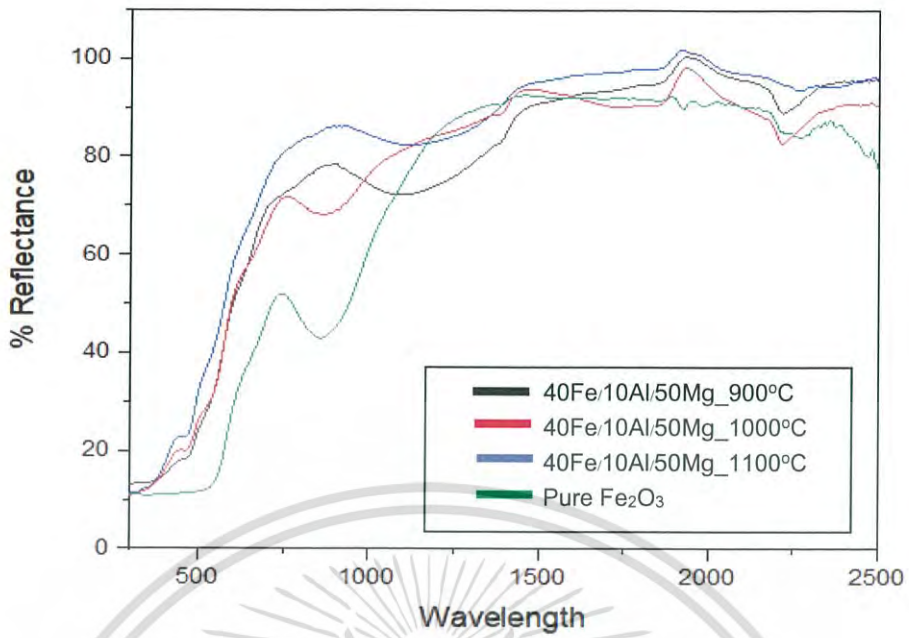
#### 4.6 การทดสอบการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ของผงสีส้ม

ในการทดสอบการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ของผงสีส้ม ได้ทำการศึกษาสัดส่วนขององค์ประกอบของผงสีที่มีองค์ประกอบของอลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของสีที่ชัดเจนที่สุด นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ของผงสีส้มเกรดการค้า ผงสีส้มที่มีค่าพิกัดสีใกล้เคียงกับผงสีส้มเกรดการค้า (สูตรที่ 22 (40Fe/10Al/50Mg)) และผงสีส้มที่มีเฉดสีส้มมากที่สุด (สูตรที่ 51 (30Fe/60Al/10Mg)) แล้วนำไปทดสอบค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดด้วยการคำนวณตามมาตรฐาน ASTM E903-87 เพื่อศึกษาผลของการเพิ่มปริมาณเหล็กออกไซด์และการลดปริมาณของแมกนีเซียมออกไซด์ที่มีผลต่อค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรด ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.7 กราฟสเปกตราแสดงดังรูปที่ 4.14 และได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ของผงสีส้มสูตรที่ 22 และผงสีส้มสูตรที่ 51 ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.8 และกราฟสเปกตราแสดงดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ

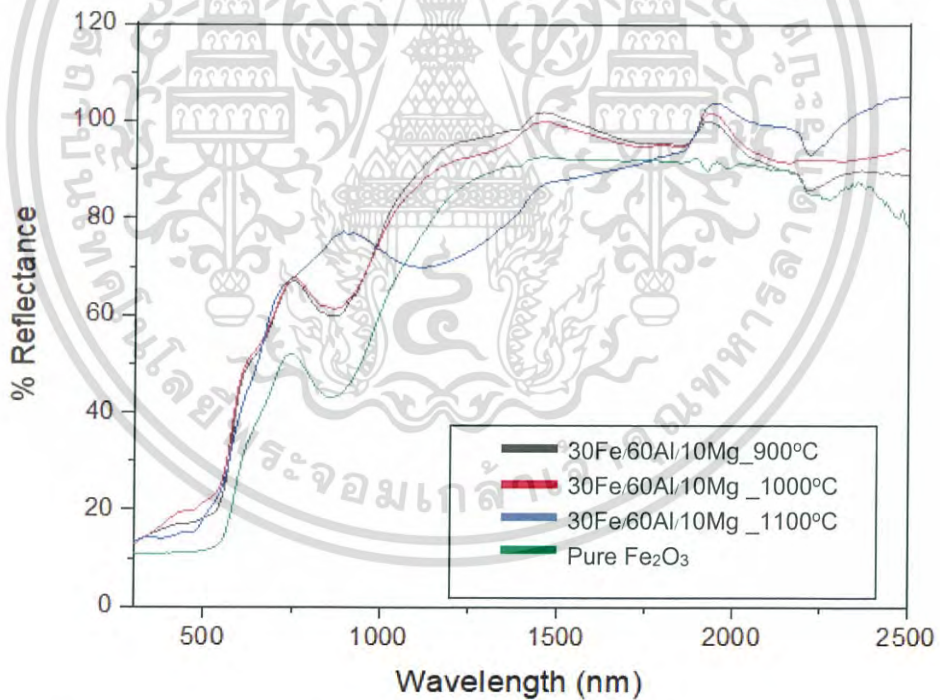


รูปที่ 4.14 สเปกตรากการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผงสีส้มที่มีอัตราส่วนของอลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 สเปกตรากการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของวงสีสัมสูตรที่ 22 (40Fe/10Al/50Mg)



รูปที่ 4.16 สเปกตรากการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของวงสีสัมสูตรที่ 51 (30Fe/60Al/10Mg)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้และรังสีอาทิตย์ของผงสีส้มเกรดการค้ำและผงสีส้มที่สังเคราะห์ขึ้น

สูตร	องค์ประกอบ	อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ (°C)	%R Solar	%R NIR
-	Pure Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Himedia	-	42	66
-	ผงสีส้มเกรดการค้ำ	-	54	69
55	30Al/70Mg	1000	100	100
34	10Fe/30Al/60Mg	1000	73	93
35	20Fe/30Al/50Mg	1000	66	90
36	30Fe/30Al/40Mg	1000	63	88
37	40Fe/30Al/30Mg	1000	60	85
38	50Fe/30Al/20Mg	1000	53	80
39	60Fe/30Al/10Mg	1000	44	75
16	70Fe/30Al	1000	40	62
22	40Fe/10Al/50Mg	1000	62	81
51	30Fe/60Al/10Mg	1000	54	79

จากตารางที่ 4.5 พบว่าเหล็กออกไซด์บริสุทธิ์ (บริษัท Himedia) มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ร้อยละ 42 และค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ที่ร้อยละ 66 ส่วนค่าการสะท้อนรังสีของผงสีส้มที่คงอัตราส่วนของอลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเหล็กออกไซด์จะส่งผลให้ค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ลดลงเนื่องจากค่าความสว่างของผงสีส้ม (L\*) มีค่าลดลง โดยมีค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้อยู่ในช่วงร้อยละ 100 - 62 นอกจากนี้ผงสีส้มสูตรที่ 22 (40Fe/10Al/50Mg) ซึ่งเป็นผงสีส้มที่มีค่าพิคตสีใกล้เคียงกับผงสีส้มเกรดการค้ำมากที่สุด และผงสีส้มสูตรที่ 51 (30Fe/60Al/10Mg) ซึ่งเป็นผงสีส้มที่มีเฉดสีส้มมากที่สุดยังมีค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้มากกว่าค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ของผงสีส้มเกรดการค้ำ โดยค่าการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ของผงสีส้มเกรดการค้า ผงสีส้มสูตรที่ 22 และผงสีส้มสูตรที่ 51 คือ ร้อยละ 69 81 และ 79 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.8 ค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดของผงสีส้มสูตรที่ 22 (40Fe/10Al/50Mg) และสูตรที่ 51 (30Fe/60Al/10Mg) ที่อุณหภูมิเผาแคลไซน์ 900 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

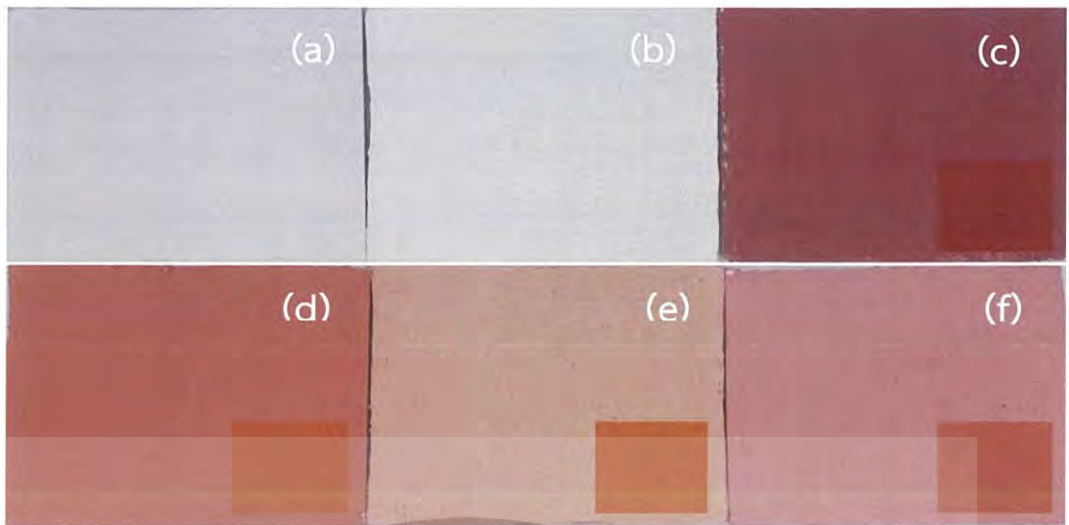
สูตร	องค์ประกอบ	อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ (°C)	%R Solar	%R (NIR)
22	40Fe/10Al/50Mg	900	55	79
		1000	56	81
		1100	55	78
51	30Fe/60Al/10Mg	900	53	79
		1000	54	79
		1100	51	77

จากตารางที่ 4.8 พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์จะทำให้ผงสีส้มที่สังเคราะห์ได้มีค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ลดลงเล็กน้อย เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิในการเผาแคลไซน์สูงขึ้นจะทำให้ขนาดอนุภาคของผงสีส้มใหญ่ขึ้น และ  $Fe^{2+}$  ทำให้ได้ผงสีส้มที่มีเฉดสีและวัฏภาคที่เปลี่ยนไป ส่งผลให้ค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ลดลงเล็กน้อย

#### 4.7 การนำผงสีส้มไปประยุกต์ใช้งาน

ในการประยุกต์ใช้งานผงสีส้มนั้นได้ทำการศึกษาค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ของชั้นสีที่ทาลงบนแผ่นผ้าโดยเตรียมชั้นสีจากการผสมสีน้ำทาผนังสีขาวที่ใช้เป็นตัวกลางซึ่งรูปภาพของชั้นสีที่ทาบนแผ่นผ้าของผงสีสูตรต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.17 และผลของค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้แสดงดังตารางที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ผลของการทดสอบทาสีลงบนแผ่นผ้า a) แผ่นผ้าเปล่า b) แผ่นผ้าทาสีขาว c) แผ่นผ้าทาสีเทาเหล็กออกไซด์ผสมสี d) แผ่นผ้าทาสีผสมเกรดการค้ำผสมสีขาว e) แผ่นผ้าทาสีผสมสูตรที่ 22 ผสมสีขาว และ f) แผ่นผ้าทาสีผสมสูตรที่ 51 ผสมสีขาว (ภาพเล็กแสดงถึงผงสีผสมสูตรต่าง ๆ ที่ยังไม่ทำการผสมสีขาว)

ตารางที่ 4.9 ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ของแผ่นผ้าทาสีแบบต่าง ๆ

ภาพ	สูตรสี	%R Solar	%R nir	สีที่ตามองเห็น
a	แผ่นผ้าเปล่า	76	76	ขาว
b	แผ่นผ้าทาสีขาว	88	88	ขาว
c	แผ่นผ้าเหล็กออกไซด์ผสมสีขาว	52	71	แดง
d	แผ่นผ้าทาสีผสมเกรดการค้ำผสมสีขาว	56	72	ส้ม
e	แผ่นผ้าทาสีผสมสูตรที่ 22 ผสมสีขาว	72	86	เหลืองอ่อน
f	แผ่นผ้าทาสีผสมสูตรที่ 51 ผสมสีขาว	68	82	ชมพู

จากผลการศึกษานำผงสีผสมไปประยุกต์ใช้เป็นสีทาเพื่อสะท้อนรังสีอาทิตย์และรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ พบว่าแผ่นผ้าเปล่าที่ไม่มีการทาสีมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และรังสีอินฟราเรดย่านใกล้อยู่ที่ร้อยละ 76 แผ่นผ้าทาสีขาวมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และรังสีอินฟราเรดย่านใกล้อยู่ที่ร้อยละ 88 แผ่นผ้าเหล็กออกไซด์ผสมสีขาวที่ได้ชั้นสีเป็นสีแดงและมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และรังสีอินฟราเรดย่านใกล้อยู่ที่ร้อยละ 52 และ 71 ตามลำดับ ซึ่งแผ่นผ้าที่ให้ความสนใจในการศึกษาคือ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำไปใช้งานระหว่างแผ่นผ้าทาสีผสมเกรดการค้ำบริษัท ZAR ผสมสีขาวที่ได้ชั้นสีเป็นสีส้มที่มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และรังสีอินฟราเรดย่านใกล้อยู่ที่ร้อยละ 56 และ

72 ตามลำดับ กับแผ่นผ้าทอผงสีผสมสูตรที่ 22 ที่ได้ชั้นสีเป็นสีเหลืองอ่อน และ สูตรที่ 51 ที่ได้ชั้นสีเป็นสีชมพู ซึ่งมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และรังสีอินฟราเรดย่านใกล้อยู่ที่ร้อยละ 72 และ 86 กับ 68 และ 82 ตามลำดับ โดยจากค่าการสะท้อนรังสีทั้งสองประเภทนั้นแสดงให้เห็นถึงแผ่นผ้าที่ได้ทำการทาสีสูตรที่สังเคราะห์ได้จากการทดลองมีค่าการสะท้อนรังสีทั้งสองประเภทที่สูงกว่าการทาสีด้วยผงสีผสมเกรดการค้าซึ่งเป็นผลมาจากการที่ผงสีสูตรที่ 22 และ 51 มีค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ที่ดีกว่าผงสีเกรดการค้า ดังแสดงในตารางที่ 4.7 อีกปัจจัยที่มีผลต่อค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ของชั้นสีทา คือ เฉดสีของชั้นสีที่ได้และการกระจายตัวของผงสีในสีน้ำสีขาวที่ใช้เป็นตัวกลาง โดยผงสีเกรดการค้ามีรูปร่างอนุภาคเป็นแท่งขนาดเล็กจึงมีการกระจายตัวของอนุภาคในตัวกลางที่ดีกว่าและทำให้ได้ชั้นสีทาที่มีสีสม่ำเสมอใกล้เคียงกับสีของผงสี ส่วนผงสีสูตรที่ 22 และ 51 มีการกระจายตัวที่ไม่ดีนักและทำให้ได้ชั้นสีที่มีสีเหลืองอ่อนและสีชมพูต่างจากสีของผงสีที่มีสีส้มเหลืองและส้มแดง ซึ่งมีสาเหตุมาจากขนาดอนุภาคที่ใหญ่และการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคดังที่ได้จากศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยรูปที่ 4.13 สามารถสรุปได้ว่าผงสีผสมที่สามารถกระจายตัวในตัวกลางได้ดีใกล้เคียงกับผงสีผสมเกรดการค้า คือ ผงสีผสมสูตรที่ 22 (40Fe/10Al/50Mg) เนื่องจากมีขนาดอนุภาคที่เล็กและเกาะกลุ่มกันน้อยกว่าสูตรที่ 31 (50Fe/30Al/20Mg) และสูตรที่ 51 (30Fe/60Al/10Mg) ทำให้มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอว่า ทั้งนี้ในการนำผงสีไปประยุกต์ใช้งานจริงควรคำนึงถึงประสิทธิภาพในการกระจายตัวของผงสี ความสวยงามรวมถึงเฉดสีที่เหมาะสม ซึ่งจากการศึกษาพบว่าแผ่นผ้าที่ทาดด้วยผงสีผสมเกรดการค้านั้นมีประสิทธิภาพในการกระจายตัวที่ดีกว่า เมื่อผสมกับสีทาบ้านให้เฉดสีที่เหมาะสมกว่าผงสีที่ได้จากการทดลองนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

โครงการพิเศษนี้ได้ศึกษาการสังเคราะห์ผงสีส้มจากเหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ที่เป็นองค์ประกอบหลักผ่านวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid state reaction) โดยได้ศึกษาชนิดและอัตราส่วนของสารตั้งต้น คือ เหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) อลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และแมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) โดยใช้โซเดียมฟลูออไรด์ ( $\text{NaF}$ ) เป็นตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยา เเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยใช้อัตราในการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเป็น 5 องศาเซลเซียสต่อนาที จากการศึกษาผลของอัตราส่วนของสารตั้งต้นที่มีผลต่อค่าพิกัดสีของผงสีส้ม พบว่าเมื่อคงสัดส่วนของอลูมิเนียมออกไซด์ไว้ที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักแล้วเพิ่มอัตราส่วนของเหล็กออกไซด์ และลดอัตราส่วนของแมกนีเซียมออกไซด์จะส่งผลให้ผงสีที่สังเคราะห์ได้มีค่าความสว่าง ( $L^*$ ) ลดลงจาก 76 เป็น 44 ค่าความเป็นสีแดง ( $a^*$ ) เพิ่มขึ้นจาก 11 เป็น 32 ค่าความเป็นสีเหลือง ( $b^*$ ) จะเพิ่มขึ้นจาก 28 เป็น 39 และค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดจะลดลงจากร้อยละ 93 เป็นร้อยละ 61 ซึ่งเป็นผลมาจากการแทนที่ของไอออน  $\text{Fe}^{2+}$  ในวัฏภาคของแมกนีเซียมอลูมิเนต ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ) เกิดเป็นเหล็กอลูมิเนต ( $\text{FeAl}_2\text{O}_4$ ) และยังพบว่าเมื่ออัตราส่วนของเหล็กออกไซด์เพิ่มขึ้นเกินร้อยละ 60 จะทำให้เกิดการแยกตัวของวัฏภาคของเหล็กออกไซด์ จึงส่งผลให้ค่าความสว่างลดลง และค่าความเป็นสีแดงเพิ่มขึ้น และค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าสภาวะในการสังเคราะห์ที่ทำให้ได้ผงสีส้มที่มีค่าพิกัดสีและค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่เหมาะสม คือ การเตรียมผงสีส้มจากสูตร 22 และสูตร 51 ที่มีองค์ประกอบคือ 40Fe/10Al/50Mg และ 30Fe/60Al/10Mg ตามลำดับ โดยเมื่อนำผงสีไปเผาที่อุณหภูมิ 900 – 1100 องศาเซลเซียส พบว่าค่าพิกัดสีของผงสีสูตรที่ 22 อยู่ในช่วงค่าความสว่าง ( $L^*$ ) 65 – 58 ค่าสีแดง ( $a^*$ ) 17 – 22 ค่าสีเหลือง ( $b^*$ ) 31 – 42 และค่าการสะท้อนรังสี NIR อยู่ในช่วงร้อยละ 78 – 81 และค่าพิกัดสีของผงสีสูตรที่ 51 อยู่ในช่วงค่าความสว่าง ( $L^*$ ) 54 – 57 ค่าสีแดง ( $a^*$ ) 22 – 29 ค่าสีเหลือง ( $b^*$ ) 26 - 32 และค่าการสะท้อนรังสี NIR อยู่ในช่วงร้อยละ 77 - 79 ซึ่งมีค่าพิกัดสีใกล้เคียงกับผงสีส้มเกรดการค้าบริษัท ZAR ที่มีค่าความสว่าง ( $L^*$ ) 55.67 ค่าสีแดง ( $a^*$ ) 25.68 ค่าสีเหลือง ( $b^*$ ) 38.84 และค่าการสะท้อนรังสี NIR ที่ดีกว่าโดยมีค่าการสะท้อนที่ร้อยละ 69

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแคลไซน์ของผงสีส้มสูตรที่ 22 และสูตร 51 ที่มีองค์ประกอบคือ 40Fe/10Al/50Mg และ 30Fe/60Al/10Mg ตามลำดับ พบว่า เมื่อทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส จะเกิดการแทนที่ของไอออน  $\text{Fe}^{3+}$  ในวัฏภาคของแมกนีเซียมอลูมิเนตเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าพิกัดสีและค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส จะพบวัฏภาคของเหล็กออกไซด์และอลูมิเนียมออกไซด์แยกตัวออกจากวัฏภาคแมกนีเซียมอลูมิเนตในผงสีส้มสูตรที่ 22 ส่วนผลของอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ในสูตรที่ 51 จะเกิดการแทนที่ไอออน  $\text{Al}^{3+}$  ด้วยไอออน  $\text{Fe}^{3+}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และใช้เฉพาะในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวัสดุภาคแมกนีเซียมอลูมิเนียมเกิดเป็นวัสดุภาค  $Mg(Al,Fe)_2O_4$  และเกิดการแยกตัวของวัสดุภาคแมกนีเซียมออกไซด์และอลูมิเนียมออกไซด์ ส่งผลให้ค่าพิกัดสีและค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย

การศึกษาลักษณะพื้นฐานของผงสีส้มที่สังเคราะห์จากเทคนิค SEM พบว่าผงสีส้มเกรดการค้ามีรูปร่างอนุภาคเป็นแท่งยาวที่มีการกระจายตัวของอนุภาคที่สม่ำเสมอ ส่วนผงสีส้มที่เตรียมได้จากสารตั้งต้น คือ อนุภาคของเหล็กออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ ซึ่งมีขนาดอนุภาคและรูปร่างที่แตกต่างกัน มีการกระจายตัวของอนุภาคที่สม่ำเสมอ แต่ผงสีสูตรที่ 51 มีการเกาะกลุ่มกันของอนุภาค และพบว่าผงสีส้มที่ผ่านการเผาแคลไซน์จะเกิดการรวมตัวกันของอนุภาค

จากผลการศึกษาพัฒนาผงสีส้มสะท้อนรังสีอินฟราเรดจากเหล็กออกไซด์ พบว่าสภาวะในการเตรียมที่ทำให้ได้ผงสีส้มที่ดีที่สุด คือ การใช้อัตราส่วนสูตรที่ 22 40Fe/10Al/50Mg ที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ที่ 1000 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง โดยทำให้ผงสีส้มที่มีค่าพิกัดสีค่าความสว่าง ( $L^*$ ) 57.58 ค่าสีแดง ( $a^*$ ) 22.23 และค่าสีเหลือง ( $b^*$ ) 30.85 และค่าการสะท้อนรังสี NIR ที่สูงถึงร้อยละ 81 อีกทั้งสภาวะที่ใช้ยังทำให้ได้ผงสีส้มที่มีความเสถียร เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็งและมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 389 นาโนเมตร จากผลการศึกษานำผงสีส้มที่เตรียมได้ไปประยุกต์ในการใช้งานเป็นสีทาสะท้อนรังสีอาทิตย์และรังสีอินฟราเรดย่านใกล้พบว่า ชั้นสีที่เตรียมได้จากการผสมผงสีส้มกับสีน้ำทาผนังสีขาวที่ทาลงบนแผ่นผ้ามีการสะท้อนรังสีที่ดีคือผงสีสูตรที่ 22 มีค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ที่ร้อยละ 86 ซึ่งมีค่าการสะท้อนผงสีส้มเกรดการค้าบริษัท ZAR ที่มีค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ที่ร้อยละ 72 จากผลที่ได้ทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าผงสีส้มที่เตรียมขึ้นจากเหล็กออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ สามารถนำไปประยุกต์เป็นสีทาสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ได้ในอุตสาหกรรม

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- (1) ศึกษาถึงผลของการสังเคราะห์ผงสีส้มด้วยเทคนิคอื่น ๆ เช่น โซล - เจล และไฮโดรเทอร์มอล เป็นต้น ที่มีผลต่อค่าพิกัดสี การสะท้อนรังสี NIR โครงสร้างผลึก และสัณฐานวิทยา
- (2) ศึกษาถึงผลของปัจจัยที่ใช้ในการสังเคราะห์ผงสีส้ม คือ ชนิดและอัตราส่วนของสารตั้งต้นเมื่อใช้โลหะออกไซด์ชนิดอื่น ๆ หรือใช้องค์ประกอบที่ให้ค่าการสะท้อนที่ดีขึ้น เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $TiO_2$ ) และ ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $SiO_2$ )
- (3) ศึกษาการ बदลดขนาดอนุภาคของสารตั้งต้นให้มีขนาดเล็กและมีขนาดอนุภาคที่สม่ำเสมอกว่าเดิม ซึ่งอาจส่งผลต่อการกระจายตัวของผงสีในตัวกลาง เพื่อให้ได้สีทาอาคารที่มีสีใกล้เคียงกับผงสีส้มและมีค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ที่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] คนไทยติดเครื่องปรับอากาศพุ่งใช้ไฟเพิ่มเท่ากับโรงไฟฟ้า 2 แห่ง. 2018 [Online]. Available: <https://www.tcijthai.com/news/2018/06/scoop/7963>. เข้าถึงเมื่อ 15 มกราคม 2562
- [2] ข้อมูลตัวชี้วัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมรายปีของประเทศไทย. 2018 [Online]. Available : [http://www.onep.go.th/env\\_data/2016/01\\_70/](http://www.onep.go.th/env_data/2016/01_70/). เข้าถึงเมื่อ 15 มกราคม 2562
- [3] สาเหตุที่ทำให้บ้านร้อนเกิดจากอะไร. 2012 [Online]. Available : <http://www.clicks4home.com/forums/index.php?showtopic=3226> เข้าถึงเมื่อ 15 มกราคม 2562
- [4] สีสะท้อนความร้อน ประหยัดพลังงาน. 2013 [Online]. Available : <http://astecpaints.co.th/th/service-eco/>. เข้าถึงเมื่อ 15 มกราคม 2562
- [5] Marc Jovaní, Maria Fortuño-Morte, Héctor Beltrán-Mir, Eloísa Cordoncillo. Environmental-friendly red-orange ceramic pigment based on Pr and Fe co-doped -  $Y_2Zr_2O_7$ . Journal of the European Ceramic Society. Pages 2210-2217
- [6] Nopsiri Chaiyo and Naratip Vittayakorn. 2554. Combustion Synthesis. วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังและภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จ.กรุงเทพมหานคร.
- [7] สีกันความร้อน. 2017 [Online]. Available : <http://www.decorreport.com/a5186%E0%B8%AA%E0%B8%81%E0%B8%99%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B8%A3-%E0%B8%AD%E0%B8%99>. เข้าถึงเมื่อ 17 มกราคม 2562
- [8] 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 3 กุมภาพันธ์ 2562
- [9] รังสีอินฟราเรด (Infrared Radiation: IR) ประโยชน์ และอันตรายจากรังสีอินฟราเรด. 2016. [Online]. Available: <https://www.siamchemi.com/%E0%B8%A3%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B8%AA%E0%B8%B5%E0%B8%AD%E0%B8%B4%E0%B8%99%E0%B8%9F%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B9%80%E0%B8%A3%E0%B8%94/>. เข้าถึงเมื่อ 17 มกราคม 2562
- [10] ฉนวนกันความร้อน เซรามิกโค้ดติ้ง. 2012 [Online]. Available : <http://marmb1040.blogspot.com/2012/06/blog-post.html>. เข้าถึงเมื่อ 17 มกราคม 2562
- [11] Orange Pigment. 2019. [Online]. Available: <https://www.indiamart.com/proddetail/orange-pigment-15564352591.html>. เข้าถึงเมื่อ 2 กุมภาพันธ์ 2562
- [12] ลักษณะสมบัติไอรอนออกไซด์. 2010 [Online]. Available : [http://web.eng.nu.ac.th/eng/2012/cei/nanodatabase/info2.php?cat\\_id=6&p\\_id=37](http://web.eng.nu.ac.th/eng/2012/cei/nanodatabase/info2.php?cat_id=6&p_id=37). เข้าถึงเมื่อ 17 มกราคม 2562
- [13] 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [14] ลักษณะสมบัติเฉพาะไอรอนออกไซด์. 2009 [Online]. Mahmoudi et al. : [http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/cei/nanodatabase/info2.php?cat\\_id=6&p\\_id=190](http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/cei/nanodatabase/info2.php?cat_id=6&p_id=190). เข้าถึงเมื่อ 17 มกราคม 2562
- [15] อลูมินา วัสดุสารพัดประโยชน์. 2012 [Online]. สุรศักดิ์ ไวทยวงศ์สกุล : <http://www.material.chula.ac.th/RADIO44/FEBRUARY/RADIO2-5.HTM>. เข้าถึงเมื่อ 17 มกราคม 2562
- [16] Transparent Aluminum. 2017. [Online]. Available: [http://tikalon.com/blog/blog.php?article=2015/transparent\\_aluminum](http://tikalon.com/blog/blog.php?article=2015/transparent_aluminum). เข้าถึงเมื่อ 2 กุมภาพันธ์ 2562
- [17] เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์. 2019 [Online]. <https://www.sri.or.th/bdd/th/22-บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์/71-x-ray-diffractometer-xrd.html>. เข้าถึงเมื่อ 2 กุมภาพันธ์ 2562
- [18] Magnesium Oxide. 2017.[Online]. Available : <http://www.siamchemi.comแมกนีเซียมออกไซด์>. เข้าถึงเมื่อ 17 มกราคม 2562
- [19] นราธิป วิทยากร. (2561). กระบวนการสังเคราะห์ผงละเอียดสำหรับเซรามิกชั้นสูง. โรงพิมพ์มินเซอร์วิส ซัพพลาย: หน่วยวิจัยวัสดุขั้นสูง คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [20] Solid-state synthesis. 2015. [Online]. Available: <http://e13.qaw.ru.net/solid-state-reaction-method-ppt/>. เข้าถึงเมื่อ 3 กุมภาพันธ์ 2562
- [21] 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](https://www.researchgate.net/figure/CIELab -1976-after-Figure-1-from-SantAnna-et-al-2013-602_311426707). เข้าถึงเมื่อ 3 กุมภาพันธ์ 2562
- [22] CIELAB colour chart. 2016. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/CIELAB-colour-chart-Coats-Industrial-2016\\_fig2\\_305424598](https://www.researchgate.net/figure/CIELAB-colour-chart-Coats-Industrial-2016_fig2_305424598) เข้าถึงเมื่อ 3 กุมภาพันธ์ 2562
- [23] T. Thongkanluanga, N. Chirakanphaisarn, P. Limsuwan. 2012. Preparation of NIR Reflective Brown Pigment. *Procedia Engineering* 32. Pages 895 – 901
- [24] Marc Jovaní, Maria Fortuño-Morte, Héctor Beltrán-Mir, Eloísa Cordoncillo. Environmental-friendly red-orange ceramic pigment based on Pr and Fe co-doped  $Y_2Zr_2O_7$ . *Journal of the European Ceramic Society*. Pages 2210-2217
- [25] กัญญาวิรัช สีนมมงคล, กัลยา กาลัญญ, อนุพงษ์ มาลาแก้ว, การพัฒนาผงสีแดงสะท้อนรังสีอินฟราเรดจากเหล็กออกไซด์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จ. กรุงเทพมหานคร.
- [26] Eliane Coser. 2013. "Development of paints with infrared radiation reflective properties". Volume 25, Issue 3, Pages 305-310.
- [27] Kikumoto, M.; Mizuno, Y.; Yokohama, H., Effect of  $SiO_2$  and  $Al_2O_3$  on the synthesis of  $Fe_2O_3$  red pigment. *Journal of Ceramic society of Japan*. (2018) 247-250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [28] เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์. 2019 [Online]. <https://www.sri.or.th/bdd/th/22-บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์/71-x-ray-diffractometer-xrd.html>. เข้าถึงเมื่อ 30 มกราคม 2562
- [29] เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์. 2017. [Online]. Available : <http://mfu.ac.th/center/stic/index.php/x-ray-analysis-instrument>. เข้าถึงเมื่อ 30 มกราคม 2562
- [30] สมการของ Bragg's Law. 2017. [Online]. Available <http://202.44.15.99/sic/index.php/>. เข้าถึงเมื่อ 19 พฤศจิกายน 2560
- [31] กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน. 2010. [Online]. Available : <https://il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>. เข้าถึงเมื่อ 31 มกราคม 2562
- [32] เจริญชัย เหลืองอ่อน “การวัดสีด้วยเทคนิค UV-VIS-NIR SPECTROPHOTOMETRY” ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2553
- [33] การวัดค่าสี. 2017. [Online]. Available: สืบค้นจาก :<https://www.pballtechno.com>. เข้าถึงเมื่อ 1 กุมภาพันธ์ 2562
- [34] เครื่องยูวีวิสิเบิล เอ็นไออาร์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์. 2017. [Online]. Available: <https://www.wmri.psu.edu/materialscharacterizationlab/characterizationtechniques/ultraviolet-visible-spectroscopy-uv-vis>. เข้าถึงเมื่อ 1 กุมภาพันธ์ 2562
- [35] เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง. 2019. [Online]. Available: <https://www.sri.or.th/bdd/th/22บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์/68-uv-vis-spectrophotometer.html>. เข้าถึงเมื่อ 1 กุมภาพันธ์ 2562
- [36] เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี. 2018. [Online]. Available: <https://www.sri.or.th/th/beamline/bl41.html>. เข้าถึงเมื่อ 1 กุมภาพันธ์ 2562
- [37] เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี. 2017.[Online]. Available: <http://chemistry.sc.chula.com>. เข้าถึงเมื่อ 1 กุมภาพันธ์ 2562
- [38] การวิเคราะห์โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์. 2018. [Online]. Available: <http://www.nst.or.th/article/article494/article49418.htm>. เข้าถึงเมื่อ 1 กุมภาพันธ์ 2562
- [39] เครื่องวัดการฟลูออเรสเซนซ์เรย์ของ AC220V / 50Hz สำหรับผง TiO<sub>2</sub> ตรวจสอบสายไฟ. 2019. [Online]. Available: <http://thai.unicompxray.com/sale-10994099-ac220v-50hz-x-ray-fluorescence-instrument-for-tio2-powders-trace-lead.html>. เข้าถึงเมื่อ 1 กุมภาพันธ์ 2562
- [40] Composition of MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> at 1600 °C and 75 wt % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. 2019. [Online]. Available:[https://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/composition-Ak3745PW8yTvK4QX2iQuELWJ06G4-GywSP\\_9m4Y](https://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/composition-Ak3745PW8yTvK4QX2iQuELWJ06G4-GywSP_9m4Y). เข้าถึงเมื่อ 14 พฤษภาคม 2562.
- [41] Metallic, Covalent and Ionic Radii(r)\*. 2019. [Online]. Available: <http://www.wiredchemist.com/chemistry/data/metallic-radii>. เข้าถึงเมื่อ 19 พฤษภาคม 2562
- [42] G.T. และคณะ. (2017). “Cost-efficient, vivid and stable red hybrid pigments derived from naturally.” Volume 23, Issue 2, Pages 1862-1869.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### การคำนวณสารที่ใช้ในการสังเคราะห์

#### 1. การสังเคราะห์ผงสีส้ม

##### 1.1 สารเคมีที่เกี่ยวข้อง

- 1.1.1 เหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) บริสุทธิ์ 99% บริษัท Himedia
- 1.1.2 อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) บริสุทธิ์ 99% บริษัท Carlo Erba
- 1.1.3 แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) บริสุทธิ์ 99% บริษัท Carlo Erba
- 1.1.4 โซเดียมฟลูออไรด์ ( $\text{NaF}$ ) บริสุทธิ์ 99% บริษัท Carlo Erba

##### 1.2 สูตรที่ใช้ในการคำนวณ ปริมาณสารตั้งต้น

$$g_2 = \frac{X}{100} \times g_1 \quad (\text{ก-1})$$

โดยที่  $g_1$  คือ น้ำหนักรวมสารที่ต้องการเตรียม (กรัม)

$g_2$  คือ น้ำหนักสารตั้งต้นที่ต้องการเตรียม (กรัม)

$X$  คือ ร้อยละโดยน้ำหนักของสารตั้งต้น

การสังเคราะห์ผงสีส้ม สูตร  $30\text{Fe}/60\text{Al}/10\text{Mg}$  จากสมการ (ก-1)

การคำนวณ ปริมาณสารตั้งต้นของผงสีส้มสูตร  $30\text{Fe}/60\text{Al}/10\text{Mg}$  จำนวน 10 กรัม

สารตั้งต้น  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

แทนค่า

$$g_2 = \frac{30}{100} \times 10$$

$$g_2 = 3.0 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นต้องเตรียม  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  จำนวน 3.0 กรัม

สารตั้งต้น  $\text{Al}_2\text{O}_3$

แทนค่า

$$g_2 = \frac{60}{100} \times 10$$

$$g_2 = 6.0 \text{ กรัม}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ดังนั้นต้องเตรียม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  จำนวน 6.0 กรัม  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารตั้งต้น MgO

แทนค่า

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

$$g_2 = 1.0 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นต้องเตรียม  $ZrSiO_4$  จำนวน 1.0 กรัม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### ภาพถ่าย SEM ของผงสีส้ม



ภาพถ่าย SEM ของผงสีส้มเกรดการค้าบริษัท ZAR

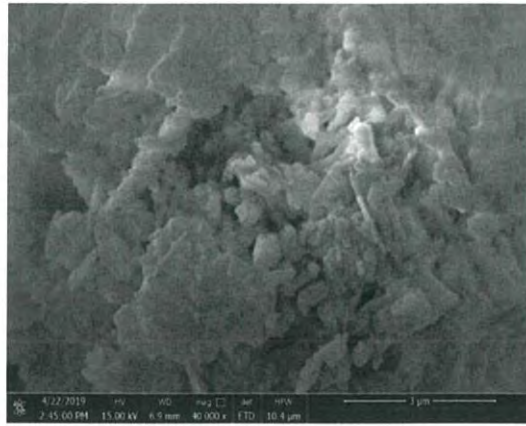


ภาพถ่าย SEM ของผงสีส้มสูตรที่ 22 (40Fe/10Al/50Mg)



ภาพถ่าย SEM ของผงสีส้มสูตรที่ 31 (50Fe/30Al/20Mg)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพถ่าย SEM ของผงสี่ผสมสูตรที่ 51 (30Fe/60Al/10Mg)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้