

การพัฒนาผงสีสะท้อนรังสีอินฟราเรดจากเหล็กออกไซด์
อะลูมิเนียมออกไซด์และเปลือกไข่

DEVELOPMENT OF NIR-REFLECTIVE PIGMENTS FROM
 Fe_2O_3 , Al_2O_3 AND EGG SHELL WASTE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ปีการศึกษา 2565
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF NIR-REFLECTIVE PIGMENTS FROM
 Fe_2O_3 , Al_2O_3 AND EGGHELL WASTE






A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, SCHOOL OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ **ACADEMIC YEAR 2022** ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การพัฒนาผงสีสะท้อนรังสีอินฟราเรดจากเปลือกอกไข่ อะลูมิเนียมออกไซด์และเปลือกไข่ Development of NIR-reflective pigments from Fe ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ and eggshell waste
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกนิษฐา เกลี้ยงเกลา รหัสนักศึกษา 62050254 นางสาวนัฐกานต์ กุลวงศ์ รหัสนักศึกษา 62050296
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา	เคมี
ปีการศึกษา	2565
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. ปานไพลิน สีหาราช

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2565

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ศาสตราจารย์ ดร. นราธิป วิทยาการ ประธานกรรมการ	
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขวาลย์ ศรีวงษ์ กรรมการ	
รองศาสตราจารย์ ดร. ปานไพลิน สีหาราช กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การพัฒนาผงสีสะท้อนรังสีอินฟราเรดจากเหล็กออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์และเปลือกไข่
ชื่อนักศึกษา	นางสาวณิชชญา เกลี้ยงเกลา รหัสนักศึกษา 62050254 นางสาวนัฐกานต์ กุลวงศ์ รหัสนักศึกษา 62050296
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2565
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. ปานไพลิน สีหาราช

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาพัฒนาผงสีสะท้อนรังสีอินฟราเรดจากเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ที่มีการเติมอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นเปลือกไข่ โดยใช้ปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง (solid state reaction) ในการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และใช้โซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) เป็นตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยา โดยได้สังเคราะห์ผงสีที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักที่แตกต่างกัน 6 สูตร คือ สูตรที่ 1 (50Fe/50Ca) สูตรที่ 2 (50Fe/10Al/40Ca) สูตรที่ 3 (50Fe/20Al/30Ca) สูตรที่ 4 (50Fe/30Al/20Ca) สูตรที่ 5 (50Fe/40Al/10Ca) และสูตรที่ 6 (50Fe/50Al) จากการศึกษาพบว่าค่าพิกัดสีของผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นทั้ง 6 สูตรมีค่าความสว่าง (L^*) อยู่ในช่วง 41.07 – 47.53 มีค่า a^* อยู่ในช่วง 6.42 – 14.56 และค่า b^* อยู่ในช่วง 6.13 – 23.84 เมื่อคำนวณหาค่าเฉดสี (hue angle) และค่าความอิ่มตัวของสี (chroma) จะมีค่าอยู่ในช่วง 28.79 – 64.73 และ 8.87 – 26.36 ตามลำดับ ซึ่งมีเฉดสีในกลุ่มสีแดงถึงเหลือง และมีสีโทนน้ำตาล โดยเมื่ออัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของอะลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าเฉดสีมีค่าลดลง จากการศึกษาโครงสร้างของผลึกและธาตุองค์ประกอบพบว่าสูตรที่ 1 และ 2 มีวัฏภาคหลัก คือ สเรโบรโดลสไกต์ ($\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$) ในสูตรที่ 3 พบวัฏภาคหลักคือแคลเซียมเหล็กออกไซด์ (CaFe_2O_4) ซึ่งมีโครงสร้างแบบสปินเนล (spinel) ซึ่งเมื่ออัตราส่วนของแคลเซียมออกไซด์ลดลง และอะลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้นในสูตรที่ 4 จึงทำให้วัฏภาคของแคลเซียมเหล็กออกไซด์ลดลง แต่พบวัฏภาคของเหล็กเหล็กออกไซด์ฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) ที่ไม่ทำปฏิกิริยาเกิดขึ้น และสูตรที่ 5 และ 6 ที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของอะลูมิเนียมออกไซด์มากจะพบวัฏภาคหลักคือเหล็กออกไซด์ฮีมาไทต์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ไม่ทำปฏิกิริยา การศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่าผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นมีรูปร่างที่หลากหลายประกอบด้วยทรงกลม ทรงแท่ง แผ่น และรูปร่างไม่แน่นอน และมีการเกาะกลุ่มกันของอนุภาค ในการวิเคราะห์สมบัติทางแสงพบว่าผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นมีค่าร้อยละการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ (%R NIR) อยู่ในช่วง 21.75 – 50.64 ซึ่งมากกว่าผงสีน้ำตาลทางการค้าที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 9.30 และในการประยุกต์ใช้เป็นสีทาอาคารพบว่าผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นมีค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายในและภายนอกกล่องทดสอบอยู่ในช่วง 17.45 – 23.75 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่ามากกว่าผงสีน้ำตาลทางการค้าซึ่งมีค่าเท่ากับ 17.23 องศาเซลเซียส

แสดงให้เห็นว่าวงสี่ที่สังเคราะห์สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นสีทาอาคารสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านไกลได้ และยังสามารถนำเปลือกไข่ที่เป็นของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ได้

คำสำคัญ : เหล็กออกไซด์ ปฏิกริยาในสถานะของแข็ง การสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านไกล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Development of NIR-reflective pigments from Fe_2O_3 , Al_2O_3 and eggshell waste
Students	Miss Kanitta Kiangklao Student ID 62050254 Miss Natthakarn Kunlawong Student ID 62050296
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)
Department	Chemistry
School	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2022
Advisor	Associate Professor Dr. Panpailin Seeharaj

Abstract

In this study, near-infrared (NIR) reflective pigments were prepared from iron oxide (Fe_2O_3) with the addition of aluminum oxide (Al_2O_3) and calcium oxide (CaO) obtained from eggshell waste by solid state reaction at $1000\text{ }^\circ\text{C}$ for 3 hours and using sodium fluoride (NaF) as mineralizer. The pigments with different weight ratios were synthesized in 6 formulas: 1 (50Fe/50Ca), 2 (50Fe/10Al/40Ca), 3 (50Fe/20Al/30Ca), 4 (50Fe /30Al/20Ca), 5 (50Fe/40Al/10Ca) and 6 (50Fe/50Al). The results showed that all 6 pigments had color coordinates of luminance (L^*) in the range of 41.07 – 47.53, a^* in the range of 6.42 – 14.56 and b^* in the range of 6.13 – 23.84 and the calculated hue angle and chroma values were in the range of 28.79 – 64.73 and 8.87 – 26.36 respectively, which located in the range of red to yellow color and gave brown color. When the %wt of Al_2O_3 increased, the hue angle decreased. The crystal structure and elemental analyses showed that formulas 1 and 2 had the major phase of srebrodolskite ($\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$). In formula 3, the major phase was calcium iron oxide (CaFe_2O_4) with a spinel structure and when calcium oxide decreased to 20 %wt and aluminum oxide increased to 30 %wt in formula 4, the calcium iron oxide phase decreased. The unreacted Al_2O_3 and Fe_2O_3 phases were found when increased Al_2O_3 to 40 and 50 %wt in formula 5 and 6. According to morphology study, the synthesized pigments had various morphologies including spherical, rod, sheet and irregular shape together with an agglomeration of particles. The optical study showed that the synthesized pigments exhibited near-infrared (NIR) reflectance of 21.75 – 50.64 %, which was greater than the commercial brown pigment at 9.30%. The synthesized pigments were applied as a building paint and had the difference inside/outside temperature of test box at 17.45 – 23.75 $^\circ\text{C}$, which was higher than the commercial brown pigment at 17.23 $^\circ\text{C}$. These results suggest that the synthesized pigments from

Fe_2O_3 , Al_2O_3 and eggshell waste can be used as a NIR reflective building paint and it is also a sustainable way to utilize eggshells waste.

Keywords : iron oxide, Solid state reaction, Near-infrared (NIR) reflective



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากความความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช ที่คอยให้คำปรึกษา และชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ รวมทั้งยังถ่ายทอดองค์ความรู้เพื่อเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์ การวางแผนดำเนินงานในโครงการพิเศษนี้

การจัดทำโครงการพิเศษฉบับนี้ผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณ ศ.ดร.นราธิป วิทยากร และ ผศ.ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ ผู้ซึ่งเสียสละเวลามาเป็นคณะกรรมการในการสอบโครงการพิเศษนี้

ขอขอบคุณนักวิจัยและผู้ช่วยนักวิจัย ที่หน่วยวิจัยและพัฒนาวัสดุขั้นสูง (advanced materials research unit) ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำหรับการให้คำแนะนำและสารเคมีที่ใช้ในการทำโครงการพิเศษครั้งนี้

ขอขอบคุณนักวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ที่เอื้อเฟื้อและอำนวยความสะดวกในด้านอุปกรณ์และการตรวจวิเคราะห์ ตลอดจนถ่ายทอดความรู้และแนะนำการใช้เครื่องมือ

ขอขอบคุณครอบครัวและเพื่อนทุกท่านที่คอยให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจให้สามารถดำเนินโครงการพิเศษนี้ผ่านไปได้ด้วยดี

กนิษฐา เกลี้ยงเกลา
นัฐกานต์ กุลวงศ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขต.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 รังสีจากดวงอาทิตย์.....	4
2.1.1 รังสีอัลตราไวโอเล็ต.....	4
2.1.2 แสงที่มองเห็นได้.....	5
2.1.3 รังสีอินฟราเรด.....	5
2.1.3.1 รังสีอินฟราเรดย่านใกล้.....	6
2.1.3.2 รังสีอินฟราเรดย่านกลาง.....	6
2.1.3.3 รังสีอินฟราเรดย่านไกล.....	6
2.2 การถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคาและผนังอาคาร.....	7
2.3 การป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคาร.....	8
2.3.1 การลดปริมาณรังสีความร้อนที่จะผ่านเข้ามาทางกระจกหน้าต่าง.....	8
2.3.2 การลดการนำความร้อนผ่านผนังที่บและหลังคา.....	8
2.4 สีสะท้อนความร้อน.....	9
2.5 องค์ประกอบของผงสีที่สังเคราะห์.....	10
2.5.1 เหล็กออกไซด์.....	10
2.5.2 อะลูมิเนียมออกไซด์.....	10
2.5.3.1 แคลเซียมออกไซด์.....	11
2.5.3.1 เปลือกไข่.....	11
2.6 ปฏิกริยาสถานะของแข็ง.....	12
2.7 การวัดสี.....	13
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	31
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 สารเคมี.....	32
3.3 วิธีการทดลอง.....	32
3.3.1 การเตรียมผงอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่	32
3.3.1.1 การเตรียมเปลือกไข่สด.....	32
3.3.1.2 การบดผงอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่.....	33
3.3.1 การสังเคราะห์ผงสี.....	35
3.4 การทดสอบความสามารถในการสะท้อนความร้อนเมื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นสีทาอาคาร.....	38
3.5 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติของผงสี.....	39
3.5.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์..	39
3.5.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์.....	40
3.5.3 การวิเคราะห์ธาตุและปริมาณของธาตุด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์....	41
3.5.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างโมเลกุลด้วยเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์	42
3.5.5 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	42
3.5.6 การตรวจสอบวัดค่าการสะท้อนด้วยเครื่องยูวี วิซิเบิล เอ็นไออาร์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์.....	44
3.5.7 การวิเคราะห์ค่าแถบพลังงานด้วยเครื่องยูวี วิซิเบิล ดิฟฟิวซ์ รีเฟลด์แทนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์.....	44
3.5.8 การตรวจสอบค่าสีด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์.....	45
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	46
4.1 การศึกษาปริมาณของธาตุองค์ประกอบ	46
4.2 การศึกษาโครงสร้างผลึก.....	49
4.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างโมเลกุล.....	56
4.4 การศึกษาสัณฐานวิทยา	59
4.5 การศึกษาค่าพิกัดสี.....	64
4.6 การวิเคราะห์สมบัติทางแสง.....	66
4.7 การทดสอบการสะท้อนรังสี.....	70
4.8 การนำไปประยุกต์ใช้งาน	72
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	77
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	77
5.2 ข้อเสนอแนะ	79
เอกสารอ้างอิง.....	80

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	86
ภาคผนวก ก	87
ภาคผนวก ข	89
ภาคผนวก ค	90
ภาคผนวก ง	91
ภาคผนวก จ	95
ภาคผนวก ฉ	99
ภาคผนวก ช	101



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ประเภทของรังสีอัลตราไวโอเล็ต	5
2.2 ค่าพิกัดสี ค่าเฉดสี และค่าความอิ่มตัวของสีของผงสีสูตรต่าง ๆ.....	15
2.3 ค่าร้อยละการสะท้อนรังสีอาทิตย์ และรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ของผงสีส้มทางการค้า และผงสีส้มที่สังเคราะห์ขึ้น	17
2.4 ข้อมูลพิกัดสี $L^*a^*b^*$ C h° color coordinate ของ $Ca_{14}(Al_{1-x}Fe_x)_{10}Zn_6O_{35}$ ($0 \leq x \leq 0.25$).....	18
2.5 ค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 780 – 2100 นาโนเมตร ของผงสี S1 – S40 เมื่อเปรียบเทียบกับ Fe_2O_3 , Sb_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , และ TiO_2 บริสุทธิ์.....	20
2.6 ข้อมูลสี CIE $L^*a^*b^*$ ของผงสี และ Fe_2O_3	21
2.7 การสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ของพื้นผิวกระเบื้องดินเผาเคลือบผงสี S31	21
2.8 ชื่อสารประกอบตัวอย่างที่เตรียมขึ้นจากการใช้อัตราส่วนและอุณหภูมิในการเผาต่าง ๆ	25
2.9 ค่าพิกัดสีที่คำนวณได้ตามระบบ CIE $L^* a^* b^*$ และค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ (NIR) ของผงสีแดงที่สังเคราะห์ได้	26
2.10 องค์ประกอบที่เตรียมขึ้นจาก Ca และ/หรือ Zn ซึ่งเติมลงใน $GdFeO_3$ และตัวบ่งชี้ ความเสถียรของโครงสร้างผลึก (t)	37
3.1 อัตราส่วนของสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ผงสี.....	37
3.2 อัตราส่วนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ให้แคลเซียมออกไซด์ตามที่กำหนด	37
3.3 ปริมาณของสารที่ใช้ในการสังเคราะห์ผงสีปริมาณ 20 กรัม.....	38
4.1 องค์ประกอบของสารตั้งต้น.....	47
4.2 องค์ประกอบของผงสีน้ำตาลทางการค้า (Brown 6819)	47
4.3 องค์ประกอบหลักของผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น	47
4.4 องค์ประกอบของสารเจือปนในผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น.....	48
4.5 วัฏภาคที่พบในผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น	55
4.6 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยและรูปร่างของผงสีทางการค้าและผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น.....	60
4.7 ค่าพิกัดสีของผงสีทางการค้าและผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น	64
4.8 ค่าพิกัดสี ค่าเฉดสี และค่าความอิ่มตัวของสีของผงสีสูตรต่าง ๆ.....	65
4.9 ค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของสารตั้งต้น ผงสีทางการค้าและผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น.....	69
4.10 ค่าร้อยละการสะท้อนรังสีอาทิตย์ และรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ของผงสีทางการค้า และผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น	71
4.11 ผลการวัดอุณหภูมิของแผ่นทดสอบที่ทำด้วยชั้นสีสูตรต่าง ๆ.....	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รังสีอัลตราไวโอเล็ต.....	4
2.2 รังสีอินฟราเรด	5
2.3 ภาพแสดงการกระจายพลังงานของรังสีจากดวงอาทิตย์	6
2.4 สาเหตุที่ทำให้เกิดความร้อนภายในบ้าน	7
2.5 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายในอาคารที่ไม่ผ่านการทาสีสะท้อนความร้อน และอาคารที่ทาสีสะท้อนความร้อน	8
2.6 อุณหภูมิภายในอาคารที่ไม่ทาสีสะท้อนความร้อนและอาคารที่ทาสีสะท้อนความร้อน	9
2.7 โครงสร้างผลึกของเหล็กออกไซด์ชนิดแอลฟา-เหล็กออกไซด์	10
2.8 โครงสร้างผลึกของอะลูมิเนียมออกไซด์.....	10
2.9 โครงสร้างผลึกของแคลเซียมออกไซด์	11
2.10 ภาพการเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็ง	12
2.11 ลักษณะของ color space.....	13
2.12 ค่า CIE L* a* b* ของผงสีทางการค้าและผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น.....	15
2.13 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผงสีส้มที่สังเคราะห์ขึ้นทั้ง 5 สูตร และรูปแบบการเลี้ยวเบนของไฟล์มาตรฐาน Fe ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ , Mg(OH) ₂ , TiO ₂ , ZrO ₂ และ (Mg _{0.3} Fe _{0.7} (Mg _{0.73} Fe _{1.27})O ₄)..	16
2.14 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ Ca ₁₄ (Al _{1-x} Fe _x) ₁₀ Zn ₆ O ₃₅ (0 ≤ x ≤ 0.25)	17
2.15 UV-Vis สเปกตร้าของ Ca ₁₄ (Al _{1-x} Fe _x) ₁₀ Zn ₆ O ₃₅ (0 ≤ x ≤ 0.25).....	18
2.16 ภาพถ่ายผงสีของ Ca ₁₄ (Al _{1-x} Fe _x) ₁₀ Zn ₆ O ₃₅ (0 ≤ x ≤ 0.25)	19
2.17 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงสีตัวอย่างที่เผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน....	22
2.18 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงสีตัวอย่างที่เผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 1700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีอัตราส่วน เหล็กออกไซด์ : อะลูมิเนียมออกไซด์ที่ต่างกัน	22
2.19 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงสีตัวอย่างที่เผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 1700 องศาเซลเซียส โดยใช้ระยะเวลาในการเผาที่แตกต่างกัน	23
2.20 ความแตกต่างของอุณหภูมิของตัวอย่างแผ่นโลหะที่เคลือบด้วยผงสีและสีทาภายนอกโดยมีอัตราส่วนที่ต่างกัน	23
2.21 การวิเคราะห์ TGA-DTA ของผงเปลือกไข่.....	24
2.22 FTIR สเปกตร้าของผงเปลือกไข่ที่ไม่ผ่านการเผาและผ่านการเผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	25
2.23 ลักษณะสีของตัวอย่าง S1 – S21	26
2.24 ผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงสีตัวอย่างที่อุณหภูมิการเผา 1200 องศาเซลเซียส มีการเติมแคลเซียม ซิงค์ และแคลเซียมและซิงค์ลงใน GdFeO ₃	28
2.25 UV-Vis สเปกตร้าของ GF, Z5B, C5AZ5B และ C10AZ5B	28
2.26 สเปกตร้าการดูดกลืนแสงของผงสีเผาที่อุณหภูมิ 1200 °C: (a) GF, (b) Z5B, C5AZ5B และ C10AZ5B.....	29
2.27 ภาพถ่ายและค่าพิกัดสีของผงสีและสีเคลือบ.....	29

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.28 สเปกตรากการสะท้อนรังสี NIR ของ (a) ผงสี Z5B, C5AZ5B และ C10AZ5B และ (b) สารผสมระหว่างผงสีดำ-ฟริตริงสีอัลตราไวโอเลต.....	30
3.1 แผนภาพกระบวนการเตรียมผงอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่	34
3.2 แผนภาพกระบวนการสังเคราะห์ผงสีด้วยปฏิกิริยาของแข็ง.....	36
3.3 ชุดอุปกรณ์การทดสอบความสามารถในการสะท้อนความร้อน.....	39
3.4 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์.....	40
3.5 เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์.....	40
3.6 (a) รังสีเอกซ์พลังงานสูงทำให้อิเล็กตรอนในชั้น K หลุดออกไปจากวงโคจร (b) อิเล็กตรอน ในชั้น M หรือ L ที่มีพลังงานสูงกว่าลงมาแทนที่ โดยคายรังสีเอกซ์ที่มีพลังงาน จำเพาะออกมา.....	41
3.7 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์.....	41
3.8 การเกิดรามาน โดยการกระเจิงในลูกศรสีเขียว คือ แสงเลย์โร และสีส้ม คือ ลำแสงรามาน..	42
3.9 เครื่องรามานสเปกโทรมิเตอร์.....	42
3.10 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	43
3.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	43
3.12 เครื่องยิวี วิซิเบิล เอ็นไออาร์ สเปกโทรโฟโตมิเตอร์	44
3.13 เครื่องยิวี วิซิเบิล ดิฟฟิวซ์ รีเฟลคแทนซ์ สเปกโทรโฟโตมิเตอร์	45
3.14 เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์.....	45
4.1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงเปลือกไข่ก่อนเผา และผงเปลือกไข่หลังเผาที่ อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	49
4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงสีทางการค้า Fe ₂ O ₃ และ ผงสีน้ำตาล.....	50
4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นเทียบกับไฟล์มาตรฐาน.....	52
4.4 FT-IR สเปกตรัมของผงสีทางการค้า Fe ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ , CaO และ CaCO ₃	56
4.5 FT-IR สเปกตรัมของผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น	57
4.6 รามานสเปกตรัมของผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น.....	58
4.7 ภาพถ่าย FE-SEM ของผงสีน้ำตาลทางการค้า กำลังขยาย 10,000x และ 20,000x.....	59
4.8 ภาพถ่าย FE-SEM ของผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นที่กำลังขยาย 10,000x.....	61
4.9 ภาพถ่าย FE-SEM ของผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นที่กำลังขยาย 20,000x.....	62
4.10 EDS สเปกตรัมและแผนภาพการกระจายตัวของผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น สูตรที่ 3 และ 4	63
4.11 UV-Vis สเปกตรัมของผงสีทางการค้าและสารตั้งต้น	66
4.12 UV-Vis สเปกตรัมของผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น.....	67
4.13 ค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของผงสีทางการค้าและสารตั้งต้น.....	68
4.14 ค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น	68
4.15 เปรียบเทียบค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของสารตั้งต้น ผงสีทางการค้า และผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 สเปกตรากการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผงสีทางการค้าและสารตั้งต้น	70
4.17 สเปกตรากการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น.....	70
4.18 ชั้นสีทาบนแผ่นผ้า สีน้ำตาลทางการค้า, สีน้ำสำหรับทาอาคาร และแผ่นผ้า	72
4.19 ชั้นสีทาบนแผ่นผ้าด้วยผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นสูตรต่าง ๆ ผสมกับสีน้ำทาอาคารสีขาว.....	72
4.20 ผลการวัดอุณหภูมิของแผ่นทดสอบที่ทำด้วยชั้นสีของสีสูตรต่าง ๆ.....	73
4.21 กราฟแสดงความแตกต่างของอุณหภูมิภายในและภายนอกของกล่องทดสอบ.....	76



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ภาวะโลกร้อน หมายถึงการที่อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกสูงขึ้น เกิดขึ้นเนื่องจากการสะสมของก๊าซเรือนกระจก (greenhouse gases) ในชั้นบรรยากาศมากเกินไปเกินความสมดุล โดยกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม การเผาไหม้เชื้อเพลิงและการดำเนินชีวิตมนุษย์มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งประกอบไปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) มีเทน (CH₄) ไนตรัสออกไซด์ (N₂O) สารทำความเย็นที่ใช้กับตู้เย็น (chlorofluorocarbons; CFCs) สารทำความเย็นในระบบปรับอากาศ (chlorodifluoromethane R22; CHClF₂) เข้าสู่ชั้นบรรยากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของวิกฤตการณ์โลกร้อน ที่ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของทั่วโลกสูงขึ้น [1] ด้วยเหตุนี้เครื่องปรับอากาศจึงกลายเป็นเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีการใช้งานจำนวนมากเพื่อลดอุณหภูมิภายในอาคาร โดยทั่วโลกมีการใช้พลังงานไปกับเครื่องปรับอากาศและตู้เย็นราว ร้อยละ 20 ของปริมาณการใช้พลังงานทั้งหมดภายในอาคาร ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตพลังงานปีละ 100 ล้านตัน [2] ดังนั้นการลดการใช้พลังงานจากการใช้เครื่องปรับอากาศจึงเป็นหนึ่งวิธีในการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนได้ ซึ่งความร้อนภายในบ้านหรืออาคารเกิดขึ้นมาจาก 2 สาเหตุ ประกอบไปด้วยสาเหตุหลักจากความร้อนที่เกิดจากภายนอกอาคาร เนื่องจากรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ (solar radiation) ได้แผ่เข้ามาในอาคารผ่านทางหลังคาและผนังอาคาร และสาเหตุรองที่มาจากความร้อนสะสมที่มีอยู่ภายในอาคารซึ่งมาจากกระบวนการระบายอากาศภายในอาคารที่ไม่สามารถระบายความร้อนที่เข้ามาภายในอาคารออกไปได้ นอกจากนี้ยังมีความร้อนสะสมที่เป็นผลมาจากการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่อยู่ภายในอาคารอีกด้วย [3] วิธีในการลดอุณหภูมิภายในอาคารทำได้หลายวิธี หนึ่งในวิธีนั้นคือการป้องกันความร้อนให้กับพื้นผิวอาคาร ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ การป้องกันความร้อนที่เข้าสู่อาคารทางหลังคาโดยการใชแผ่นฝ้าเพดานสำหรับการสะท้อนรังสีความร้อน หรือการใช้ฉนวนกันความร้อนชนิดต่าง ๆ และวิธีที่สองคือการป้องกันความร้อนที่เข้าสู่อาคารทางผนังอาคารโดยการใชฉนวนกันความร้อน เป็นต้น [4] ซึ่งวิธีที่กล่าวมานั้นจำเป็นต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์กันความร้อนซึ่งมีราคาค่อนข้างสูงและทำได้ยาก โดยวิธีที่สามารถป้องกันความร้อนเข้าสู่ภายในอาคารผ่านทางผนังอาคารที่มีประสิทธิภาพและน่าสนใจอีกหนึ่งวิธี คือ การใช้สีสะท้อนความร้อนทาบนผนังอาคาร เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำได้ง่ายและราคาไม่สูงมาก [5] นอกจากนี้โชนสีที่ใช้ทาบนผนังอาคารนั้นยังมีผลต่อการสะท้อนความร้อนของผนัง โดยสีดำและโชนสีเข้มเป็นสีที่ดูดกลืนรังสีในช่วงที่ตามองเห็น (visible light) และอินฟราเรด (infrared light) ได้ดี ตรงข้ามกับสีขาวและโชนสีอ่อนซึ่งเป็นสีที่ดูดกลืนรังสีเหล่านั้นได้น้อยแต่สะท้อนรังสีได้ดีกว่า [6] ดังนั้นโครงการพิเศษนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาผนังสีสะท้อนความร้อนที่เป็นสีในโชนสีเข้มที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีประสิทธิภาพในการสะท้อนความร้อนสูง จากผลการศึกษาการพัฒนาผนังสีส้มในงานวิจัยของทอฝัน ดำจรและคณะ [7] ที่ได้ทำการพัฒนาผนังสีส้มที่มีสมบัติในการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ (near infrared light; NIR) จากการใช้เหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) อะลูมิเนียม-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นใดได้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไซด์ (Al_2O_3) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO_2) และไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นองค์ประกอบ โดยใช้ปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง (solid state reaction) พบว่าผงสีที่มีอัตราส่วนของอะลูมิเนียมออกไซด์ ที่มากจะให้การสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ที่มาก และพบว่าผงสีส้มที่เตรียมได้มีวัฏภาคหลักเป็นแมกนีไทต์ (Fe_3O_4) ดังนั้นโครงการงานพิเศษนี้จึงได้ศึกษาและพัฒนาสังเคราะห์ผงสีในโทนสีเข้มที่มีคุณสมบัติการสะท้อนรังสีอินฟราเรด โดยมีเหล็กออกไซด์ เป็นองค์ประกอบพื้นฐานเนื่องจากเป็นสารประกอบออกไซด์ที่ไม่เป็นพิษ และได้ใช้สารตั้งต้นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่เพื่อเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า ลดค่าใช้จ่าย และลดขยะที่เป็นหนึ่งในปัญหาของสิ่งแวดล้อมรวมถึงภาวะโลกร้อนอีกด้วย โดยได้เลือกใช้วิธีการสังเคราะห์ผงสีโดยใช้ปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย เตรียมสารได้ปริมาณที่มากและราคาไม่แพง โครงการงานพิเศษนี้ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนของสารตั้งต้น เหล็กออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ ในองค์ประกอบของผงสีที่มีผลต่อค่าพิกัดสีและสมบัติการสะท้อนรังสีอินฟราเรด ย่านใกล้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาและพัฒนาผงสีสะท้อนความร้อนย่านรังสีอินฟราเรดโดยใช้เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากสารตั้งต้นเปลือกไข่
- 2) เพื่อศึกษาถึงผลของอัตราส่วนของสารตั้งต้นที่มีต่อค่าพิกัดสี สมบัติการสะท้อนรังสีอินฟราเรดของผงสีที่สังเคราะห์ได้
- 3) เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้ผงสีสะท้อนความร้อนเป็นสีทาผนังเพื่อลดความร้อนภายในอาคาร

1.3 ขอบเขต

1) การสังเคราะห์ผงสีด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง โดยศึกษาปัจจัยในการสังเคราะห์ที่ส่งผลต่อสมบัติของผงสีที่สังเคราะห์ได้

1.1) ชนิดของสารตั้งต้น ได้แก่ เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3 ; Fe) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3 ; Al) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO ; Ca) จากเปลือกไข่

1.2) อัตราส่วนของสารตั้งต้นโดยน้ำหนัก ประกอบไปด้วย 6 อัตราส่วน ดังนี้ 50Fe/50Ca, 50Fe/10Al/40Ca, 50Fe/20Al/30Ca, 50Fe/30Al/20Ca, 50Fe/40Al/10Ca และ 50Fe/50Al

2) การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติต่าง ๆ โดยเทคนิค ดังนี้

2.1) การวิเคราะห์ธาตุและปริมาณของธาตุด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโกปี (X-ray fluorescence spectroscopy; XRF)

2.2) การตรวจสอบค่าพิกัดสีด้วยเทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรี (spectrophotometry)

2.3) การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometry; XRD)

2.4) การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy; FT-IR) และเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy)

2.5) การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy; SEM)

2.6) การตรวจสอบค่าการสะท้อนรังสีด้วยเทคนิคยูวี-วิซิเบิล-เอ็นไออาร์สเปกโทรสโกปี (UV-Vis-NIR spectroscopy)

2.7) การตรวจสอบสมบัติทางแสงด้วยเทคนิคยูวีวิซิเบิล ดิฟฟิวซ์ รีเฟลคแทนซ์ สเปกโทรสโกปี (UV-visible diffuse reflectance spectroscopy; UV-Vis DRS)

3) การทดสอบการสะท้อนความร้อนของผนังที่สังเคราะห์ขึ้นเมื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นสีทาอาคาร

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) สามารถพัฒนาผนังสะท้อนความร้อนย่านรังสีอินฟราเรดโดยการใช้เหล็กออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ จากสารตั้งต้นเปลือกไข่

2) สามารถลดต้นทุนในการสังเคราะห์ผนังสะท้อนความร้อนจากการใช้แคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากเปลือกไข่

3) เพื่อทราบถึงผลของอัตราส่วนของสารตั้งต้นที่มีต่อค่าพิกัดสี สมบัติการสะท้อนรังสีอินฟราเรดของผนังที่สังเคราะห์ขึ้น

4) สามารถประยุกต์ใช้เป็นผนังสะท้อนความร้อนที่เตรียมได้เป็นสีทาผนังเพื่อลดอุณหภูมิภายในอาคาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

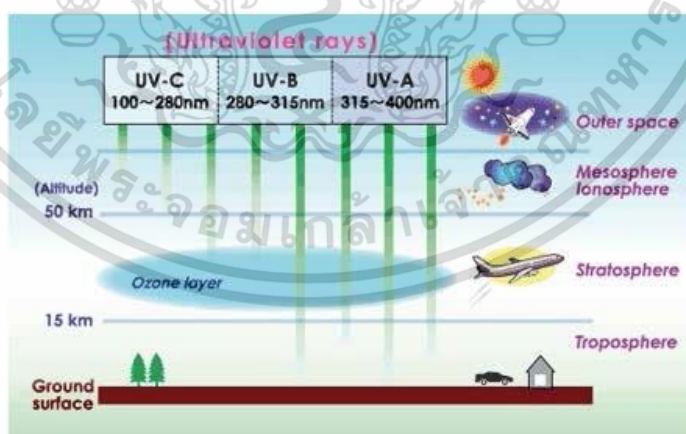
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 รังสีจากดวงอาทิตย์

ดวงอาทิตย์แผ่กระจายพลังงานความร้อนมายังโลก เรียกว่า รังสีดวงอาทิตย์หรือพลังงานแสง ดวงอาทิตย์ (solar radiation หรือ insolation) ซึ่งจะอยู่ในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic waves) และเมื่อรังสีดวงอาทิตย์มาสู่โลกจะแผ่ออกเป็นรังสีต่าง ๆ ส่งผลให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้น โดยผิวโลกจะดูดซับรังสีดวงอาทิตย์ไว้และจะมีการแผ่รังสีให้กับบรรยากาศ สำหรับรังสีดวงอาทิตย์ที่มาถึงพื้นผิวโลกส่วนใหญ่จะมีความยาวคลื่นตั้งแต่ช่วงของรังสียูวี รังสีที่มองเห็นได้ ไปจนถึงรังสีอินฟราเรด กล่าวคือมีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 0.3 ถึง 3.0 ไมโครเมตร โดยทั่วไปจะเรียกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่น 0.1 ถึง 100 ไมโครเมตร ว่ารังสีความร้อน ซึ่งรังสีจากดวงอาทิตย์บางส่วนจัดเป็นรังสีความร้อนโดยสามารถแบ่งช่วงความยาวคลื่นของรังสีจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นโลกได้เป็น 3 ส่วนหลัก ๆ ดังนี้ [10, 11]

2.1.1 รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet ; UV)

เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 100 ถึง 400 นาโนเมตรซึ่งสั้นกว่าแสงสีม่วงหรือมีความถี่มากกว่าแสงสีม่วงในช่วงของแสงที่ตามองเห็น (visible light) จึงเรียกว่า อัลตราไวโอเล็ต เนื่องจากคำว่า อัลตรา (ultra) แปลว่าเหนือ รังสีอัลตราไวโอเล็ตจึงมองไม่เห็นด้วยตาเปล่า โดยแบ่งรังสีอัลตราไวโอเล็ตตามช่วงความยาวคลื่นเป็น 3 ช่วง ได้แก่ UVA UVB และ UVC ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และตารางที่ 2.1 [12]



รูปที่ 2.1 รังสีอัลตราไวโอเล็ต [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ประเภทของรังสีอัลตราไวโอเล็ต [12]

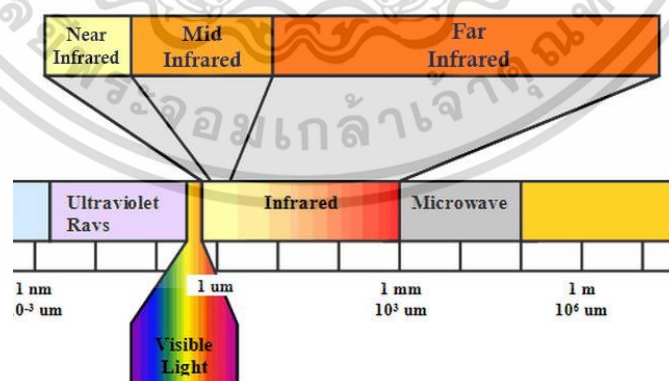
รังสี	ความยาวคลื่น	พลังงาน	รายละเอียด
UVA	320-400 nm	น้อยที่สุด	รังสี UVA สามารถผ่านชั้นบรรยากาศและก้อนเมฆได้ ทำให้รังสีประมาณ 95% ผ่านลงมาสู่ผิวโลกได้
UVB	290-320 nm	ปานกลาง	รังสี UVB ส่วนใหญ่ ถูกดูดซับที่ชั้นโอโซน จึงผ่านมาสู่ผิวโลกประมาณ 5%
UVC	100-290 nm	มากที่สุด	รังสี UVC เป็นอันตรายมาก แต่รังสีทั้งหมดถูกดูดซับที่ชั้นโอโซน จึงไม่ผ่านมาสู่ผิวโลก

2.1.2 แสงที่มองเห็นได้ (Visible light; VIS)

เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400 ถึง 700 นาโนเมตร เป็นช่วงคลื่นที่ตาสามารถมองเห็นได้ โดยแสงในช่วงคลื่นนี้จะประกอบด้วยแสงสีต่าง ๆ ซึ่งประสาทตาของคนปกติสามารถเห็นแสงบางช่วงคลื่นที่ส่องมาจากดวงอาทิตย์ได้แต่ไม่สามารถแยกเป็นสีต่างๆ ได้ จึงมองเห็นเป็นสีรวมกันซึ่งเรียกว่า“แสงขาว” (white light) [13]

2.1.3 รังสีอินฟราเรด (Infrared; IR)

เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นระหว่าง 700 นาโนเมตร ถึง 1 มิลลิเมตร รังสีอินฟราเรดสามารถปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมาได้ โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ สามารถแผ่รังสีความร้อนไปยังวัตถุได้โดยตรง โดยการแบ่งช่วงของรังสีอินฟราเรดจะแบ่งตามความยาวคลื่นในช่วงต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 [14]



รูปที่ 2.2 รังสีอินฟราเรด [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.1. รังสีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near infrared; NIR)

มีความยาวคลื่นในช่วง 0.75 ถึง 3 ไมโครเมตร ให้อุณหภูมิอยู่ในช่วง 500 ถึง 2200 องศาเซลเซียส มีความสามารถในการให้ความร้อนได้สูงเมื่อคิดต่อหน่วยพื้นที่ ความร้อนผ่านเข้าไปในวัสดุได้ลึก สามารถนำรังสีอินฟราเรดย่านใกล้มาใช้ประโยชน์ได้กับอุตสาหกรรมที่ต้องการอุณหภูมิ เช่น อุตสาหกรรมการอบแห้ง

2.1.3.2. รังสีอินฟราเรดย่านกลาง (Middle infrared; MIR)

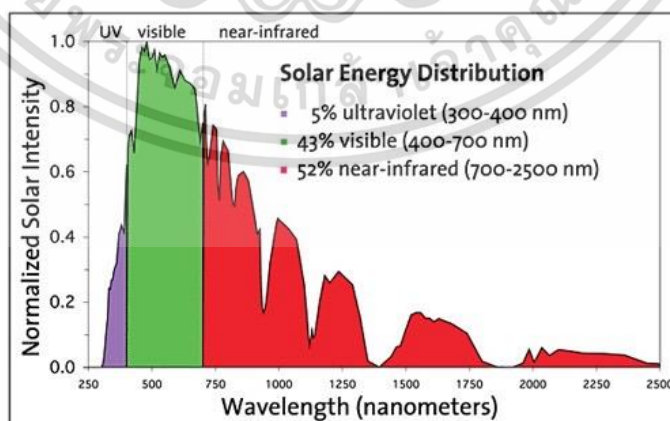
มีความยาวคลื่นในช่วง 3 ถึง 25 ไมโครเมตร ให้อุณหภูมิในช่วง 500 ถึง 950 องศาเซลเซียส ความสามารถในการให้ความร้อนได้ปานกลาง ความร้อนจะผ่านเข้าไปในวัสดุได้ลึกปานกลาง

2.1.3.3. รังสีอินฟราเรดย่านไกล (Far infrared; FIR)

มีความยาวคลื่นในช่วง 25 ถึง 100 ไมโครเมตร ซึ่งจะอยู่ใกล้กับคลื่นไมโครเวฟ โดยจะให้อุณหภูมิอยู่ในช่วง 300 ถึง 700 องศาเซลเซียส มีความสามารถในการให้ความร้อนต่ำต่อหน่วยพื้นที่ ทำให้ความร้อนผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุได้ไม่ลึก

นอกจากนี้ยังมีการแบ่งช่วงของรังสีที่ต่างออกไปโดยมีการกำหนดช่วงคลื่นของรังสีอินฟราเรดเป็น 5 ช่วง คือ อินฟราเรดระยะใกล้ (near infrared; NIR) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงระหว่าง 0.7 ถึง 1.5 ไมโครเมตร อินฟราเรดระยะสั้น (short wavelength infrared; SWIR) มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 1.5 ถึง 3 ไมโครเมตร อินฟราเรดระยะกลาง (mid wavelength infrared; MWIR) ความยาวคลื่นจะอยู่ในช่วงระหว่าง 3 ถึง 8 ไมโครเมตร อินฟราเรดระยะยาว (long wavelength infrared; LWIR) ความยาวคลื่นจะอยู่ในช่วงระหว่าง 8 ถึง 15 ไมโครเมตร และอินฟราเรดระยะไกล (far infrared; FIR) จะมีความยาวคลื่นมากกว่า 15 ไมโครเมตร [16]

โดยรังสีอินฟราเรดเป็นรังสีที่มีมากที่สุดในรังสีดวงอาทิตย์ที่มาถึงพื้นผิวโลก คิดเป็นร้อยละ 52 และรองลงมาเป็นแสงที่ตามองเห็นได้ร้อยละ 43 และรังสี UVA รวมกับรังสี UVB มีเพียงประมาณร้อยละ 5 เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 [17]

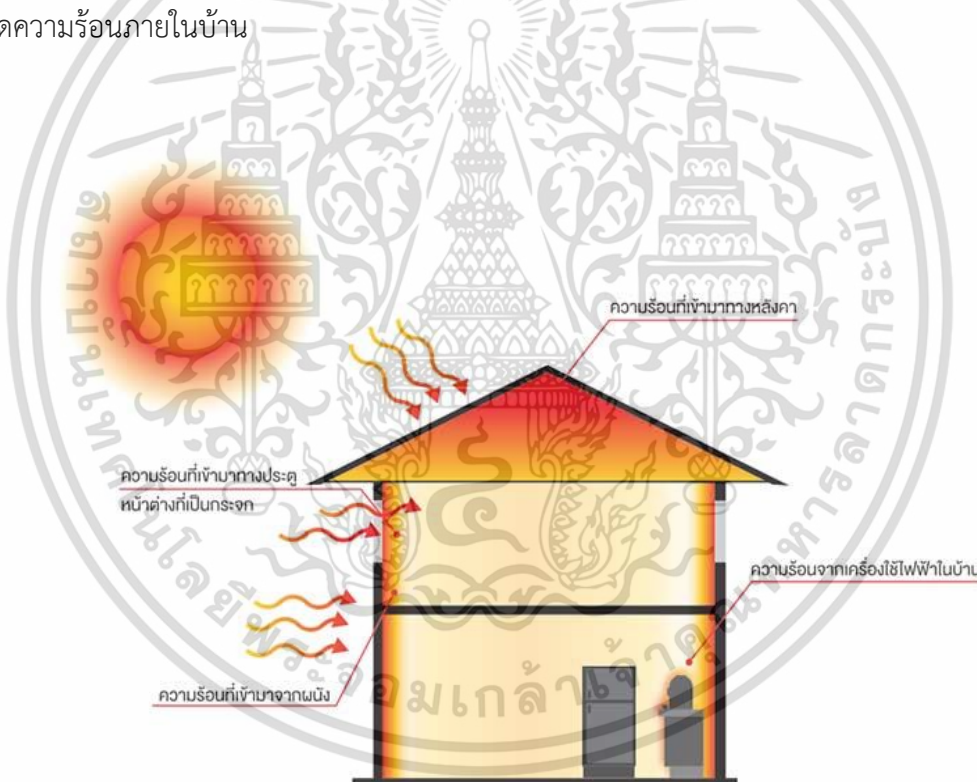


รูปที่ 2.3 ภาพแสดงการกระจายพลังงานของรังสีจากดวงอาทิตย์ [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคาและผนังอาคาร

ความร้อนที่อยู่ภายในอาคารมาจากแหล่งกำเนิดความร้อน 2 ส่วน คือ ความร้อนจากภายนอก และความร้อนที่เกิดขึ้นภายในอาคารเองซึ่งมาจากเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในอาคาร โดยทั่วไป ความร้อนที่อยู่ภายในอาคารมีสาเหตุหลักจากความร้อนจากภายนอกและเป็นความร้อนที่มาจากรังสีดวงอาทิตย์ โดยเมื่อหลังคาหรือผนังของอาคารได้รับพลังงานจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์จึงเกิดการดูดกลืนพลังงานของแสงอาทิตย์ และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนทำให้พื้นผิวภายนอกของหลังคาหรือผนังอาคารมีอุณหภูมิสูงขึ้นมาก และเมื่อพื้นผิวภายนอกมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้เกิดผลต่างของอุณหภูมิระหว่างพื้นผิวภายนอกกับภายในของหลังคาหรือผนังอาคาร ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อน (heat transfer) โดยความร้อนจะเกิดการเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งลักษณะของผนังจะมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านทางผนังเข้าสู่อาคารได้ เช่น ผนังทึบที่มีฉนวนกันความร้อนจะช่วยลดค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังได้ โดยการนำความร้อน (heat conduction) จะเกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวทั้งสอง [4, 19, 20] ดังรูปที่ 2.4 แสดงถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดความร้อนภายในบ้าน



รูปที่ 2.4 สาเหตุที่ทำให้เกิดความร้อนภายในบ้าน [21]

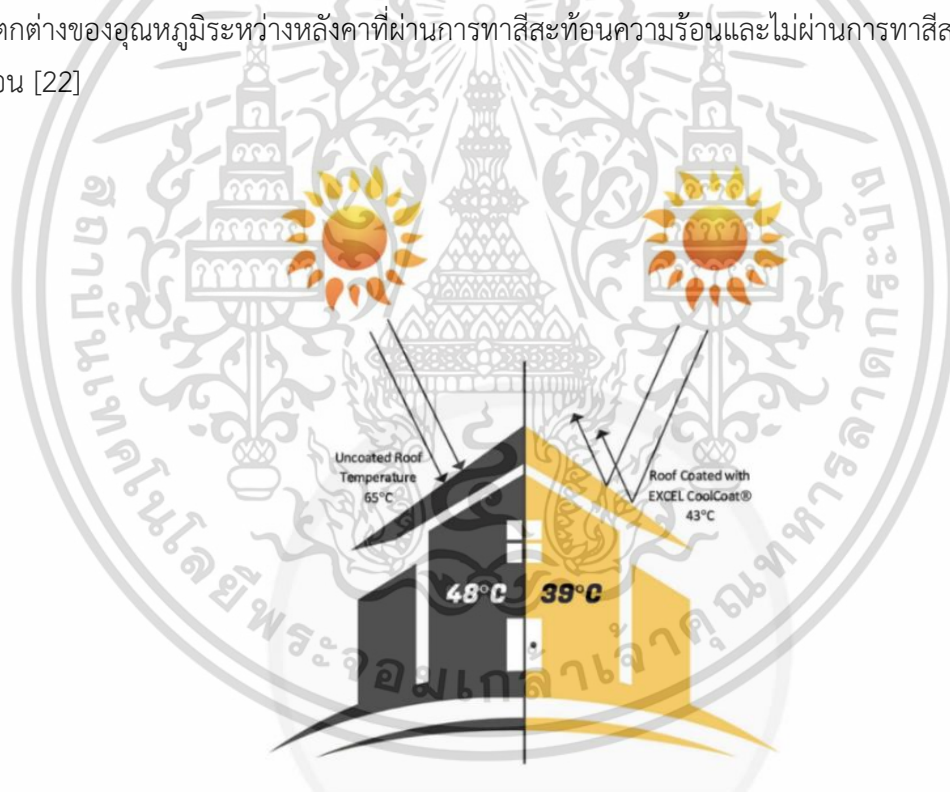
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคาร

ความร้อนภายในอาคารสาเหตุหลักมาจากความร้อนภายนอกที่มาจากการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ แต่วิธีที่นิยมใช้ในการลดอุณหภูมิภายในอาคารส่วนใหญ่คือการติดตั้งเครื่องปรับอากาศ ซึ่งเป็นวิธีที่สิ้นเปลืองพลังงานเป็นอย่างมาก ดังนั้นวิธีการลดหรือป้องกันไม่ให้ความร้อนเข้าสู่อาคาร จึงเป็นวิธีที่ช่วยลดการใช้พลังงาน ทำให้อาคารมีความเย็น และสามารถลดการใช้เครื่องปรับอากาศได้ โดยวิธีป้องกันความร้อนเข้าสู่ภายในอาคารทำได้หลากหลายวิธี คือ

2.3.1 การลดปริมาณรังสีความร้อนที่จะผ่านเข้ามาทางกระจกหน้าต่าง โดยการใช้อุปกรณ์บังแสงแดดภายนอกอาคาร เพื่อไม่ให้หน้าต่าง ประตู หรือผนังที่เป็นกระจกถูกแสงแดดโดยตรง เช่น ติดตั้งผ้าใบ กันสาด ฝ้าม่าน หรือปลูกต้นไม้ เพื่อบังแสงแดด

2.3.2 การลดการนำความร้อนผ่านผนังทึบและหลังคา โดยการใช้นวนกันความร้อน เช่น การบุผนังหรือหลังคาอาคารด้วยวัสดุฉนวนประเภทโพลีเอทิลีนโฟม (polyethylene foam) หรือการทาสีผนังอาคารด้วยสีอ่อนหรือสีสะท้อนความร้อน (ceramic coating) ดังรูปที่ 2.5 ได้แสดงถึงความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างหลังคาที่ผ่านการทาสีสะท้อนความร้อนและไม่ผ่านการทาสีสะท้อนความร้อน [22]

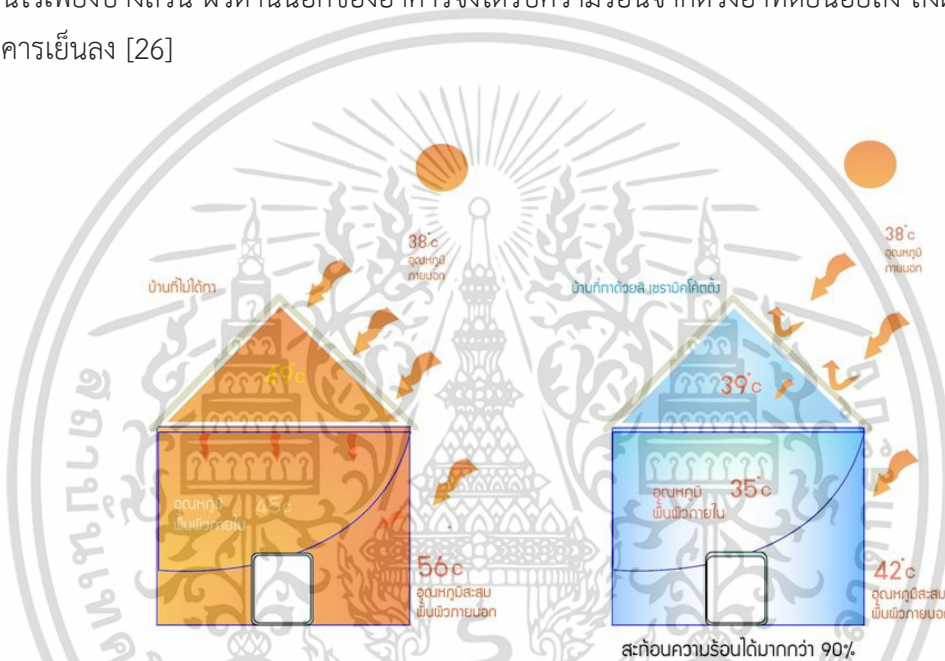


รูปที่ 2.5 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายในอาคารที่ไม่ผ่านการทาสีสะท้อนความร้อนและอาคารที่ทาสีสะท้อนความร้อน [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 สีสะท้อนความร้อน

สีสะท้อนความร้อน หรือสีกันความร้อน เป็นหนึ่งในนวัตกรรมสำหรับที่อยู่อาศัยและอาคารที่ช่วยให้อากาศภายในเย็นสบายและประหยัดพลังงานมากยิ่งขึ้น เนื่องจากสีสะท้อนความร้อนเป็นสีที่มีส่วนผสมของเม็ดสีเซรามิกโคทติ้ง (ceramic coating) ที่ประกอบไปด้วยอนุภาคเซรามิก ซึ่งมีสมบัติและประสิทธิภาพในการช่วยสะท้อนความร้อนได้ดี (สามารถสะท้อนแสงออกไปได้มากกว่าร้อยละ 90) ดูดซับความร้อนต่ำ กระจายความร้อนได้รวดเร็ว มีความยืดหยุ่นสูง และยึดเกาะพื้นผิวได้ดี [24, 25] ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เมื่อพื้นผิวอาคารที่ทาสีสะท้อนความร้อนได้รับรังสีความร้อนจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ สีสะท้อนความร้อนจะทำหน้าที่ในการสะท้อนรังสีดังกล่าวออกไป คงเหลือความร้อนไว้เพียงบางส่วน ผิวด้านนอกของอาคารจึงได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์น้อยลง ส่งผลให้ภายในอาคารเย็นลง [26]



รูปที่ 2.6 อุณหภูมิภายในอาคารที่ไม่ทาสีสะท้อนความร้อนและอาคารที่ทาสีสะท้อนความร้อน [27]

ในปัจจุบันได้มีการผลิตสีทาอาคารสะท้อนความร้อนในเชิงพาณิชย์มากยิ่งขึ้น ยกตัวอย่างเช่น สีทาภายนอกจากบริษัท TOA เกรดสี Ultra premium ซึ่งสะท้อนความร้อนได้มากกว่าร้อยละ 95 หรือ สีทาภายนอกจากบริษัท Beger เกรดสี Ultra premium ที่สะท้อนความร้อนได้ร้อยละ 94.2 ซึ่งโดยทั่วไปแล้วในเชิงพาณิชย์สีสะท้อนความร้อนจะสามารถสะท้อนความร้อนได้มากกว่าร้อยละ 80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 องค์ประกอบของผงสีที่สังเคราะห์

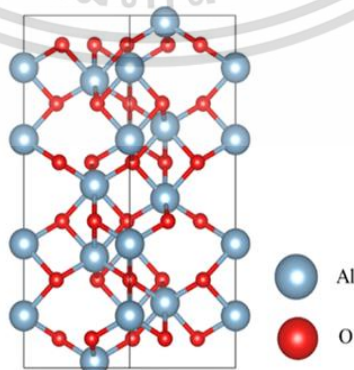
2.5.1 เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3)

เหล็ก(III) ออกไซด์ (iron(III) oxide) หรือเฟอร์ริกออกไซด์ (ferric oxide) เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และเป็นหนึ่งในสามออกไซด์หลักของเหล็ก มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 159.69 กรัมต่อโมล ความหนาแน่น 5.242 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 1475 ถึง 1565 องศาเซลเซียส มีสีน้ำตาลแดง ไม่มีกลิ่น เสถียรภาพทางความร้อนสูงและไม่ละลายน้ำเหมาะสำหรับการใช้งานแก้ว ออปติก และเซรามิก [28, 29, 30] โดยรูปที่ 2.7 แสดงถึงโครงสร้างของแอลฟา-เหล็กออกไซด์ ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)



2.5.2 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)

อะลูมิเนียมออกไซด์ (aluminum oxide) หรือเรียกอีกชื่อว่าอลูมินา (alumina) มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาวหรือใสไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีมวลโมเลกุล 101.96 กรัมต่อโมล จุดหลอมเหลว 2072 องศาเซลเซียส และจุดเดือด 2977 องศาเซลเซียส ไม่ละลายในน้ำและตัวทำละลาย เป็นสารประกอบที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ โดยรูปแบบผลึกที่พบมากที่สุดคือ คอรันดัม (corundum) โครงสร้างผลึกของอะลูมิเนียมออกไซด์แสดงดังรูปที่ 2.8



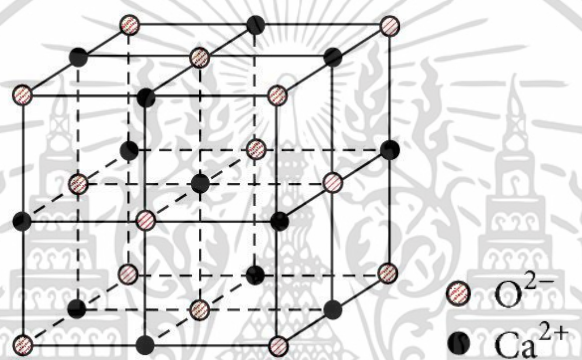
รูปที่ 2.8 โครงสร้างผลึกของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) [34]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะลูมิเนียมออกไซด์ มีความแข็งแรงสูง ทนต่อการขีดข่วนและสารเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้า แต่มีค่าการนำความร้อนค่อนข้างสูง และเนื่องจากอะลูมิเนียมออกไซด์มีจุดหลอมเหลวที่สูงทำให้มีความทนไฟที่ดี จากสมบัติต่าง ๆ จึงทำให้อะลูมิเนียมออกไซด์สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้หลากหลาย เช่น สารต้านการเป็นรอยขีดข่วน ฉนวนไฟฟ้า ตัวเร่งปฏิกิริยา อุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมเครื่องขัดถู อุตสาหกรรมเซรามิก เป็นต้น [32, 33]

2.5.3 แคลเซียมออกไซด์ (CaO)

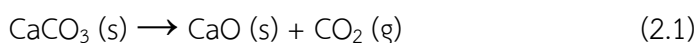
แคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide) เป็นที่รู้จักโดยทั่วไปว่า ปูนขาว หรือ ปูนเผา มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาวหรือเทาขาว มีฤทธิ์เป็นด่าง กัดกร่อนได้ มวลโมเลกุล 56.08 กรัมต่อโมล จุดหลอมเหลว 2572 องศาเซลเซียส และจุดเดือด 2850 องศาเซลเซียส [35] แสดงโครงสร้างผลึกของแคลเซียมออกไซด์ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โครงสร้างผลึกของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) [36]

2.5.3.1 เปลือกไข่

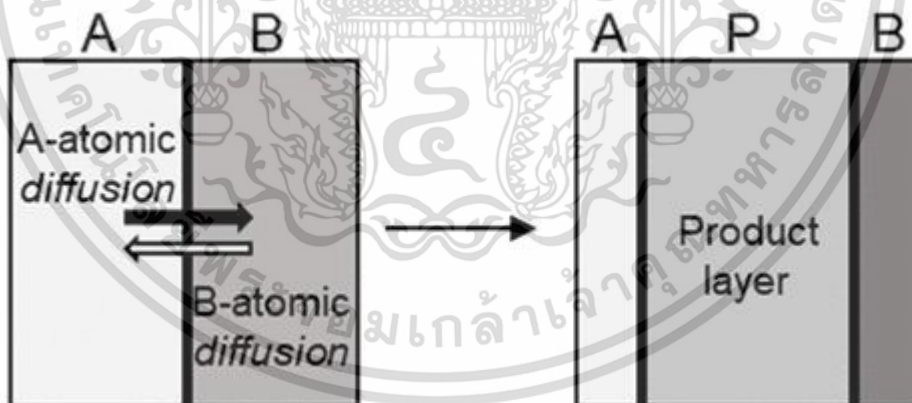
เปลือกไข่ประกอบด้วยเยื่อพื้นหรือแมทริกซ์ (matrix) ซึ่งเป็นเส้นใยโปรตีนสานกันเป็นตาข่ายและผลึกหินปูน (calcite) หรือแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ในอัตราส่วน 1 : 50 โดยธาตุที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของเปลือกไข่ คือ แคลเซียมร้อยละ 98.2 แมกนีเซียมร้อยละ 0.9 และฟอสฟอรัสร้อยละ 0.8 โดยน้ำหนัก [37] เนื่องจากเปลือกไข่มีแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นองค์ประกอบในอัตราส่วนที่มาก เมื่อนำเปลือกไข่มาผ่านกระบวนการเผาแคลไซน์ (calcination) ที่อุณหภูมิมากกว่า 825 องศาเซลเซียส จะสามารถผลิตแคลเซียมออกไซด์ ออกมาได้ ดังแสดงในสมการที่ 2.1 ที่แสดงปฏิกิริยาการเกิดแคลเซียมออกไซด์ จากกระบวนการเผาแคลไซน์ของแคลเซียมคาร์บอเนต โดยแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการเผาเปลือกไข่มีคุณสมบัติเหมือนกับแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการเผาหินปูนทั่วไป [38]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction)

วิธีสังเคราะห์แบบปฏิกิริยาของแข็ง ทำโดยนำสารตั้งต้นที่เป็นของแข็ง มาชั่งน้ำหนักให้ได้สัดส่วนตามที่กำหนดไว้ จากนั้นนำมาบดผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วจึงนำมาเผาในอุณหภูมิที่กำหนด การสังเคราะห์ผงละเอียดในทางอุตสาหกรรมนั้น ส่วนใหญ่ใช้วิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย ประหยัดค่าใช้จ่าย แต่การสังเคราะห์สารด้วยวิธีนี้จะมีกระบวนการในการบดผสม (intermediate milling) เพื่อใช้ในการผสมสารตั้งต้นจำพวกสารประกอบออกไซด์หรือคาร์บอเนตเข้าด้วยกัน และทำการเผาแคลไซน์ (calcination) โดยการเผาแบบแคลไซน์เป็นกระบวนการที่อนุภาคหรือสารถูกเผาภายใต้อุณหภูมิสูงแต่ยังไม่ถึงอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของอนุภาคหรือสารนั้น กระบวนการนี้ถูกใช้เพื่อวัตถุประสงค์ในหลายด้าน ทั้งกำจัดความชื้นหรือสารอินทรีย์ ใช้เพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีของสาร ซึ่งในการเผาจะต้องทำการเผาที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ทำให้เกิดผลเสียต่าง ๆ ได้ เช่น มีการจับตัวกันของอนุภาค (agglomerate) ทำให้ขนาดของอนุภาคมีขนาดใหญ่และขนาดของอนุภาคไม่เท่ากันหรือมีการกระจายตัวของขนาดของอนุภาคที่กว้าง สารตั้งต้นอาจทำปฏิกิริยากันได้ไม่สมบูรณ์ ความสามารถในการเผาซินเตอร์ต่ำ (sinterability) และอาจพบปัญหาการปนเปื้อนจากกระบวนการบดผสมส่งผลต่อความบริสุทธิ์ของผงที่สังเคราะห์และส่งผลต่อความเป็นเนื้อเดียวกันของสัดส่วนองค์ประกอบ เป็นต้น [39, 40, 41] โดยรูปที่ 2.10 แสดงการเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็งที่ผลิตภัณฑ์ (product; P) จะเกิดขึ้นบนรอยต่อหรือบริเวณของสารตั้งต้น A และ B ที่เป็นของแข็งมาสัมผัสกันซึ่งปฏิกิริยาสถานะของแข็งซึ่งจะอาศัยหลักการเกี่ยวข้องกับการแพร่ (diffusion) ในการเกิดปฏิกิริยา



รูปที่ 2.10 ภาพการเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็ง [42]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

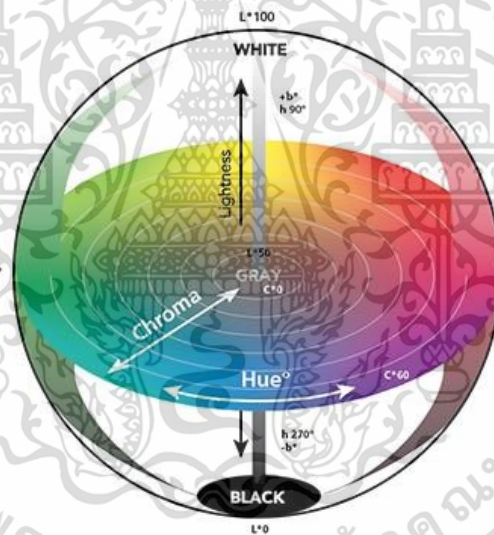
2.7 การวัดสี (Color measurement)

การมองเห็นสีของมนุษย์ เกิดจากแสงจากแหล่งกำเนิดแสงส่องมาตกกระทบวัตถุมีสี สะท้อนเข้าสู่ตาเราและส่งไปที่สมอง เพื่อประมวลออกมาเป็นสีที่เห็น ในการมองเห็นจึงมีปัจจัยอยู่ 3 อย่าง คือ แหล่งกำเนิดแสง วัตถุมีสี และสายตของมนุษย์ (ผู้สังเกตการณ์) โดยตาของมนุษย์จะไวต่อแม่สีแสง 3 สี คือ สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน

การมองเห็นด้วยตาจะบ่งบอกลักษณะของวัตถุได้ 3 ลักษณะคือ

1. สีที่ปรากฏในการมองเห็น (hue) เช่น สีแดง สีเขียว หรือสีน้ำเงิน
2. ความสว่างของสี (lightness) ซึ่งเป็นการสะท้อนของแสงที่มีค่าต่างกัน
3. ความสดใส ความเข้มและความบริสุทธิ์ของสี (chroma)

การมองเห็นของมนุษย์ต่อวัตถุที่มีสีจะเป็นการมองเห็นที่แตกต่างกัน จึงได้มีการพัฒนาอุปกรณ์เพื่อใช้วัดสีที่มีมาตรฐานและลดความไม่เป็นกลางเนื่องจากปัจจัยของแหล่งกำเนิดแสงและผู้สังเกตการณ์ ซึ่งระบบการวัดสีที่นิยมใช้คือ ระบบสี CIE $L^*a^*b^*$ หรือ CIELAB เป็นวิธีการวัดสีที่ใช้ลักษณะของ color space [43] โดยรูปที่ 2.11 แสดงลักษณะของ color space



รูปที่ 2.11 ลักษณะของ color space [44]

โดยกำหนดให้ L^* ใช้กำหนดค่าความสว่าง (Lightness)

$L = 0$ สีที่ได้จะมีมืดเป็นสีดำ

$L = 100$ สีที่ได้จะสว่างเป็นสีขาว

a^* ใช้กำหนดสีแดงหรือสีเขียว

a เป็น + จะมีสีเป็นไปในทิศทางสีแดง

a เป็น - จะมีสีเป็นไปในทิศทางสีเขียว

b^* ใช้กำหนดสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน

b เป็น + จะมีสีเป็นไปในทิศทางสีเหลือง

b เป็น - จะมีสีเป็นไปในทิศทางสีน้ำเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงหรือเผยแพร่เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังได้มีการปรับปรุงระบบโดยการเชื่อมค่า a^* และ b^* เข้ากับเฉดสี (hue; h^*) ซึ่งมีค่าเป็นตัวเลขหน่วยองศา โดยกำหนดให้ $h^* = 0^\circ$ แสดงสีแดง, 90° แสดงสีเหลือง, 180° แสดงสีเขียว และ 270° แสดงสีน้ำเงิน และความอิ่มตัวของสี (chroma; C^*) ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0 ที่จุดศูนย์กลาง และสีจะมีความอิ่มตัวมากขึ้นเมื่อออกห่างจากจุดศูนย์กลาง

หลักการวัดความแตกต่างของสีตัวอย่างและสีตัวอย่างมาตรฐาน ทำได้โดยการคำนวณจากระยะห่างของแต่ละแกนของตัวอย่างแต่ละสี ดังสมการที่ 2.2

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (2.2)$$

โดย ΔE^* คือ ค่าความแตกต่างของสี

ΔL^* คือ L^* (ของตัวอย่าง) - L^* (ของตัวอย่างมาตรฐาน)

Δa^* คือ a^* (ของตัวอย่าง) - a^* (ของตัวอย่างมาตรฐาน)

Δb^* คือ b^* (ของตัวอย่าง) - b^* (ของตัวอย่างมาตรฐาน)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

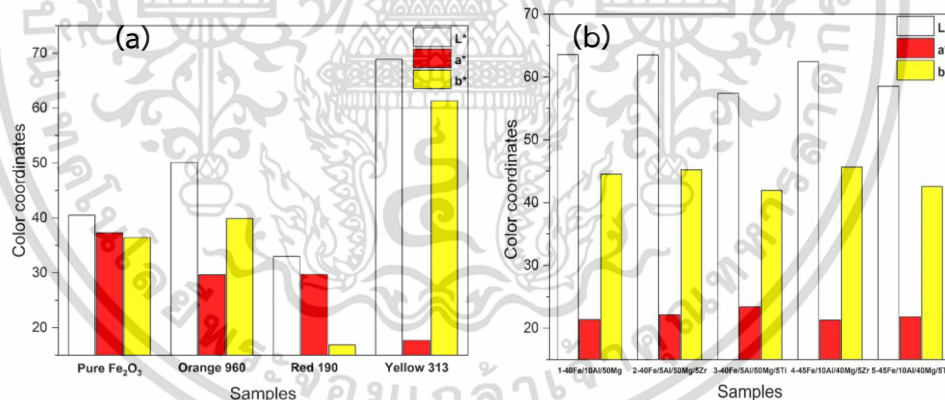
ในงานวิจัยของ ทอฝัน ดำจร และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาและการพัฒนาผงสีส้มสะท้อนรังสีอินฟราเรดจากเหล็กออกไซด์ที่เติมเซอร์โคเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งได้ศึกษาปัจจัยของชนิดและอัตราส่วนสารตั้งต้นที่มีผลต่อค่าพิกัดสีและสมบัติการสะท้อนรังสีอินฟราเรดของผงสีที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้ปฏิกิริยาสถานะของของแข็งในการสังเคราะห์ผงสีและทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ใช้อัตราในการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 5 องศาเซลเซียส ต่อนาที สังเคราะห์ผงสีทั้งหมด 5 สูตร จากนั้นทำการศึกษาปริมาณของธาตุองค์ประกอบพบว่า น้ำหนักขององค์ประกอบของสารที่ใช้ในการสังเคราะห์มีร้อยละโดยน้ำหนักใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี ซึ่งการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบที่แตกต่างทางค่าทฤษฎีเล็กน้อยอาจเป็นผลมาจากการที่องค์ประกอบของสารเจือปนในสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ การศึกษาผลของอัตราส่วนของสารตั้งต้นที่มีผลต่อค่าพิกัดสีของผงสีส้ม พบว่าผงสีที่สังเคราะห์ได้มีค่า CIE L^* a^* b^* ใกล้เคียงกับผงสีส้มทางการค้ามากที่สุด คือ ผงสีสูตรที่ 3 (40Fe/5Al/50Mg/5Ti) ซึ่งอัตราส่วนที่แสดงเป็นอัตราส่วนของร้อยละโดยน้ำหนัก และจากตารางที่ 2.2 เมื่อเปรียบเทียบผลของการเติมเซอร์โคเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ จะเห็นได้ว่าการเติมเซอร์โคเนียมไดออกไซด์มีผลเล็กน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงเฉดสี ส่วนการเติมไทเทเนียมไดออกไซด์จะให้ผงสีที่มีค่าความสว่าง L^* และค่าสีเหลือง b^* ที่ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ค่าพิกัดสี ค่าเฉดสี (hue angle) และค่าความอิ่มตัวของสี (chroma) ของผงสีสูตรต่างๆ [7]

สูตร	องค์ประกอบ	ค่าพิกัดสี			Hue angle	Chroma
		L*	a*	b*		
-	Pure Fe ₂ O ₃	40.49	37.27	36.41	44.42	52.08
-	Orange 960	50.08	29.65	39.86	53.27	49.68
-	Red 190	33.00	29.69	16.88	29.68	34.15
-	Yellow 313	68.91	17.69	61.31	73.88	63.64
1	40Fe/10Al/50Mg	63.58	21.36	44.53	64.28	49.23
2	40Fe/5Al/50Mg/5Zr	63.48	22.11	45.23	63.99	50.34
3	40Fe/5Al/50Mg/5Ti	57.39	23.39	41.92	63.09	48.00
4	45Fe/10Al/40Mg/5Zr	62.42	21.28	45.65	65.06	50.37
5	40Fe/5Al/50Mg/5Ti	58.53	21.81	42.54	62.85	47.81

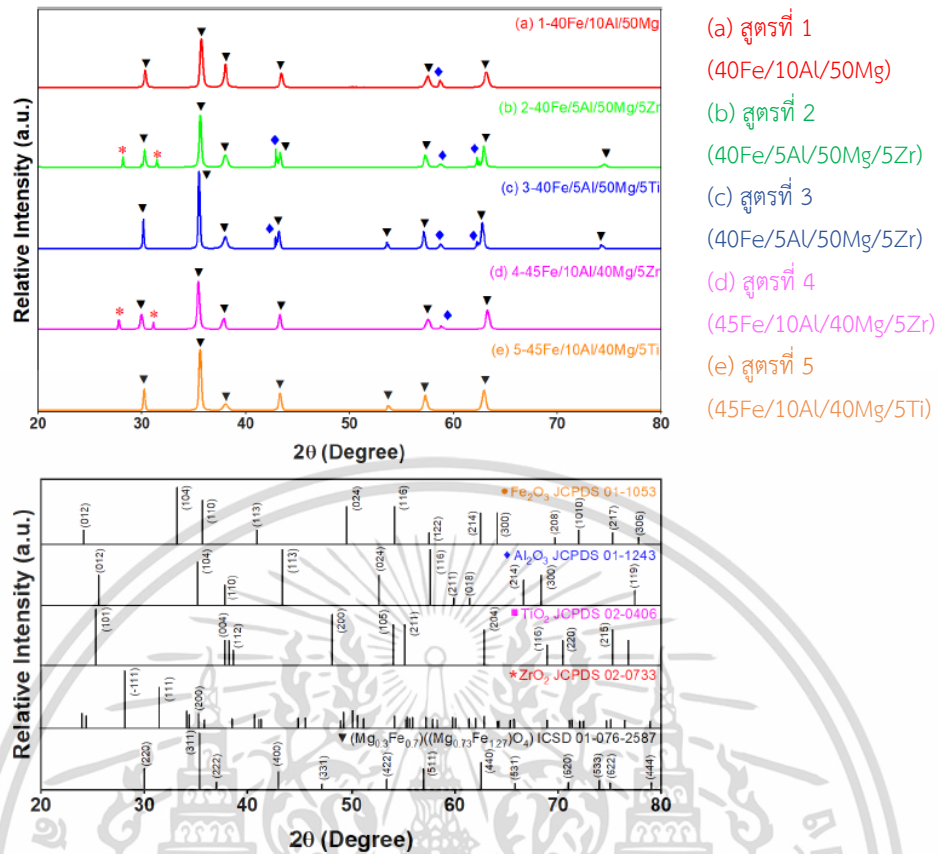
การศึกษาผงสีทั้งหมดพบว่าค่าเฉดสี (hue angle) ที่แสดงค่าสีส้มมีค่าอยู่ในช่วง 30 ถึง 70 องศา โดยผงสีสูตรที่ 3 ที่มีการเติมไทเทเนียมไดออกไซด์เข้าไปจะมีค่าจะลดลงเล็กน้อย ผลจากการศึกษาค่าพิกัดสีพบว่าผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น มีค่าความสว่าง (L*) ค่าสีเหลือง (b*) ที่มากกว่าและค่าสีแดง (a*) ที่น้อยกว่าสีส้มทางการค้า และมีค่าเฉดสีที่มากกว่าสีส้มทางการค้าจึงส่งผลให้ผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นมีสีส้มเหลืองที่สว่างกว่าสีส้มทางการค้าดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 (a) ค่า CIE L* a* b* ของผงสีทางการค้า (b) ค่า CIE L* a* b* ของผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น [7]

ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกโดยใช้เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer; XRD) แสดงให้เห็นว่าผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นทุกสูตรมีวัฏภาคหลักเป็นเหล็กออกไซด์แมกนีไทต์ซึ่งเป็นเหล็กออกไซด์ที่มีสูตรทั่วไป คือ Fe₃O₄ และมีการแทนที่ของ Mg²⁺ และ Al³⁺ ในตำแหน่งของ Fe³⁺ และ Fe²⁺ แสดงดังรูปที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผงสีส้มที่สังเคราะห์ขึ้นทั้ง 5 สูตร และรูปแบบการเลี้ยวเบนของฟิล์มมาตรฐาน Fe₂O₃, Al₂O₃, Mg(OH)₂, TiO₂, ZrO₂ และ (Mg_{0.3}Fe_{0.7}(Mg_{0.73}Fe_{1.27})O₄) [7]

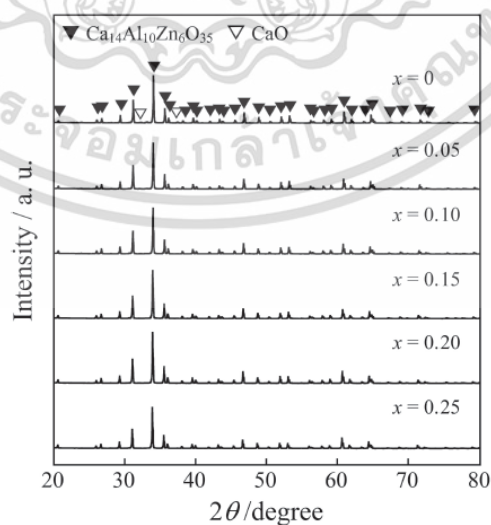
จากการศึกษาด้วยเทคนิค UV-VIS NIR สเปกโทรสโกปี ได้ผลวิเคราะห์ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ของผงสีทางการค้าและผงสีที่สังเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 2.3 พบว่าผงสีที่มีการเพิ่มอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) จะทำให้มีการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ที่มากขึ้นและผงสีที่มีการเติมเซอร์โคเนียมไดออกไซด์จะทำให้มีการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ที่สูงกว่าการเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ และผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นทั้งหมดพบว่ามีค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ที่สูงกว่าผงสีส้มทางการค้าโดยผงสีส้มที่มีค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ที่สูงที่สุดคือผงสีส้มสูตรที่ 4 (45Fe/10Al/40Mg/5Zr) อยู่ที่ร้อยละ 85.2 และงานวิจัยนี้ได้ทดลองการประยุกต์ใช้งานโดยการทาชั้นสีที่ได้จากการผสมสีน้ำทาอาคารสีขาว น้ำ และผงสีที่สังเคราะห์ได้ลงบนแผ่นผ้า จากผลการทดสอบความแตกต่างของอุณหภูมิภายในและภายนอกของกล่องทดสอบพบว่าแผ่นผ้าที่ทาสีจากผงสีส้มที่สังเคราะห์ขึ้นมีความแตกต่างของอุณหภูมิอยู่ในช่วง 10.42 องศาเซลเซียส - 10.87 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าสูงกว่าผงสีส้มทางการค้าที่ 9.63 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ค่าร้อยละการสะท้อนรังสีอาทิตย์ (%R solar) และรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ (%R NIR) ของผงสีส้มทางการค้าและผงสีส้มที่สังเคราะห์ขึ้น

สูตร	องค์ประกอบ	%R Solar	%R NIR
-	Pure Fe ₂ O ₃	43.0	62.6
-	Orange 960	39.5	52.9
-	Red 190	33.7	65.4
-	Yellow 313	51.7	47.9
1	40Fe/10Al/50Mg	64.6	84.9
2	40Fe/5Al/50Mg/5Zr	63.2	82.8
3	40Fe/5Al/50Mg/5Ti	61.6	82.7
4	45Fe/10Al/40Mg/5Zr	65.1	85.2
5	45Fe/10Al/40Mg/5Ti	62.3	83.1

ในงานวิจัยของ Ryohei Oka และคณะ [45] ได้ทำการศึกษาและสังเคราะห์ผงสีส้มที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจากสารประกอบแคลเซียมอะลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์ (Ca₁₄Al₁₀Zn₆O₃₅) เนื่องจากสารประกอบนี้ประกอบด้วยองค์ประกอบที่ไม่เป็นพิษ มีความเสถียรทางเคมีและความร้อน โดยทำการเติมเฟอร์ริก (Fe³⁺) ลงไปแทนที่ในตำแหน่งของอะลูมิเนียม (Al³⁺) และมีการปรับอัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์ริก (Fe³⁺) ในช่วง 0-0.25 ซึ่งมีสูตรเอมพิริคัล คือ Ca₁₄(Al_{1-x}Fe_x)₁₀Zn₆O₃₅ (0 ≤ x ≤ 0.25) โดยใช้ปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง ในการสังเคราะห์ผงสี และทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบดด้วยโกร่งบดสารเพื่อให้อนุภาคขนาดลดลง จากการศึกษาผลจากเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าเมื่อทำการเติมเฟอร์ริกในวงอัตราส่วนโดยโมล 0.05 จนถึง 0.25 ผงสีที่ได้จะมีโครงสร้างเป็นวัฏภาคเดียวของแคลเซียมอะลูมิเนียมซิงค์ออกไซด์ แต่ในกรณีที่ไม่มีการเติมเฟอร์ริก Ca₁₄Al₁₀Zn₆O₃₅ (x = 0) จะพบปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ซึ่งเป็นสิ่งเจือปน แสดงดังรูปที่ 2.14

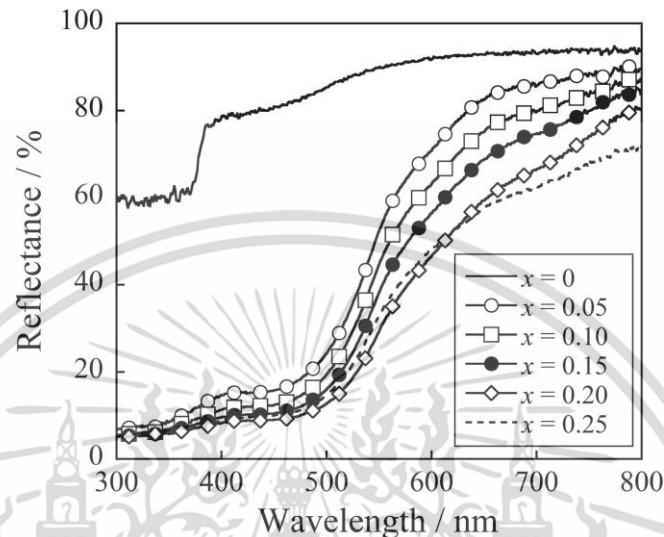


รูปที่ 2.14 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ Ca₁₄(Al_{1-x}Fe_x)₁₀Zn₆O₃₅ (0 ≤ x ≤ 0.25) [45]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาปริมาตรหน่วยเซลล์ของตัวอย่างทั้งหมด พบว่าเมื่อความเข้มข้นของเฟอร์ริก (Fe^{3+}) เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งชี้ว่าไอออนของอะลูมิเนียม (Al^{3+}) บางตัวถูกแทนที่ด้วยเฟอร์ริก (Fe^{3+}) เนื่องจากรัศมีไอออนของเฟอร์ริกมีขนาดเท่ากับ 0.063 นาโนเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าไอออนของอะลูมิเนียม (Al^{3+}) ที่มีขนาด 0.053 นาโนเมตร



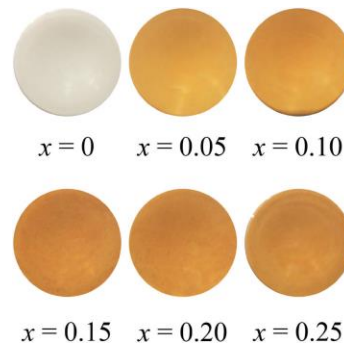
รูปที่ 2.15 UV-Vis สเปกตร้าของ $\text{Ca}_{14}(\text{Al}_{1-x}\text{Fe}_x)_{10}\text{Zn}_6\text{O}_{35}$ ($0 \leq x \leq 0.25$) [45]

จากภาพที่ 2.15 แสดง UV-Vis สเปกตร้าของผงสี ทำให้ทราบว่าผงสีตัวอย่าง $\text{Ca}_{14}\text{Al}_{10}\text{Zn}_6\text{O}_{35}$ ที่ยังไม่มีการเติมเฟอร์ริกจะพบการดูดกลืนแสงที่บริเวณความยาวคลื่น 380 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงของสีม่วง และเมื่อมีการเติมเฟอร์ริกที่มากขึ้นจะพบการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ที่มากขึ้นด้วย

ตารางที่ 2.4 ข้อมูลพิกัดสี $L^*a^*b^* C h^\circ$ color coordinate ของ $\text{Ca}_{14}(\text{Al}_{1-x}\text{Fe}_x)_{10}\text{Zn}_6\text{O}_{35}$ ($0 \leq x \leq 0.25$)

x	L^*	a^*	b^*	C	h°
0	94.4	-1.03	+6.07	6.16	99.6
0.05	79.1	+8.46	+58.4	59.0	81.8
0.10	74.8	+11.7	+59.0	60.1	78.8
0.15	67.9	+14.6	+57.0	58.8	75.6
0.20	67.0	+13.6	+52.0	53.7	75.3
0.25	65.5	+12.2	+52.0	53.4	76.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ภาพถ่ายผนังสีของ $\text{Ca}_{14}(\text{Al}_{1-x}\text{Fe}_x)_{10}\text{Zn}_6\text{O}_{35}$ ($0 \leq x \leq 0.25$) [45]

ข้อมูลพิกัดสี $L^*a^*b^* C h^\circ$ จากตารางที่ 2.4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเติมเฟอร์ริกที่มากขึ้น จะมีค่า a^* ไปในทางบวกมากขึ้นซึ่งเป็นค่าที่แสดงความเป็นสีแดง มีค่า h ที่ลดลง ซึ่งค่า h เป็นค่าที่ใช้บอกช่วงสีโดยบริเวณสีส้มจะมีค่า h อยู่ที่ 35° - 70° บริเวณสีเหลืองมีค่า h อยู่ที่ 70° ถึง 105° ดังนั้นการเติมเฟอร์ริกที่มากขึ้นจะทำให้ผนังสีส้มที่มากขึ้นตามไปด้วย โดยเมื่อพิจารณาพร้อมกับค่า C ที่แสดงความเข้มของสี ทำให้ทราบว่าที่มีการเติมเฟอร์ริกที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 0.15 ผนังสีสูตรเอมพิริคัลคือ $\text{Ca}_{14}(\text{Al}_{0.85}\text{Fe}_{0.15})_{10}\text{Zn}_6\text{O}_{35}$ จะแสดงสีส้มที่เข้มที่สุดจากผนังที่สังเคราะห์ทั้งหมดและจากภาพถ่ายผนังสีในรูปที่ 2.16 แสดงทิศทางเดียวกันกับข้อมูลที่ได้จากพิกัดสี

ในงานวิจัยของ Thadsanee Thongkanluang และคณะ [46] ได้ทำการเตรียมผนังสีอินทรีย์สีน้ำตาลที่สามารถสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ (NIR) จากเหล็ก(III) ออกไซด์ (Fe_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลักและทำการเติมแอนติโมนีไตรออกไซด์ (Sb_2O_3) ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซึ่งจะมีการปรับอัตราส่วนแบบร้อยละโดยน้ำหนักของแต่ละสาร งานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์ทั้งหมด 40 สูตร โดยให้ร้อยละโดยน้ำหนักของเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) เท่ากับ 70 และร้อยละโดยน้ำหนักของแอนติโมนีไตรออกไซด์ (Sb_2O_3) เท่ากับ 10 ส่วนสารอื่น ๆ จะถูกปรับอัตราส่วนต่าง ๆ ให้รวมกันได้เท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ใช้ปฏิกิริยาสถานะของแข็งในการสังเคราะห์ผนังสี ทำการเผาแคล์ซันที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที ใช้ความร้อนในอัตรา 4 องศาเซลเซียสต่อนาที และทำให้เย็นลงตามธรรมชาติจนถึงอุณหภูมิแวดล้อม จากนั้นบดตัวอย่างเป็นเวลา 7 นาที ด้วยความเร็ว 250 รอบต่อนาที จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาทีเพื่อไล่ไอน้ำออก และขั้นตอนสุดท้ายนำผนังสีผ่านที่กรองให้ได้ขนาดอนุภาค 0.5 ถึง 2.0 ไมโครเมตร จากการศึกษาผลค่าการสะท้อนแสงของแสงอาทิตย์ในช่วงรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ จะอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 780 ถึง 2100 นาโนเมตร ผลดังแสดงในตารางที่ 2.5 พบว่าตัวอย่างที่มีค่าการสะท้อนแสงสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 46.7 คือตัวอย่าง S31 และที่ตัวอย่าง S9 มีค่าการสะท้อนแสงต่ำสุดอยู่ที่ร้อยละ 19.6 ซึ่งตัวอย่าง S31 ที่มีค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ที่สูงที่สุด มีส่วนประกอบของ Fe_2O_3 , Sb_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , และ TiO_2 อยู่ที่ร้อยละโดยน้ำหนัก 70, 10, 12, 2 และ 6 ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์เพิ่มเติมพบว่าค่าการสะท้อนเอกสารนี้รังสีอินฟราเรดย่านใกล้สำหรับสาร Sb_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 และ TiO_2 จะมีค่าที่สูง แต่สาร Fe_2O_3 จะมีไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ที่ต่ำ และจากตารางที่ 2.6 พบว่าผงสีสีน้ำตาลที่สังเคราะห์ได้มีสีใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 2.5 ค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 780-2100 นาโนเมตรของผงสี S1-S40 เมื่อเปรียบเทียบกับ Fe_2O_3 , Sb_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , และ TiO_2 บริสุทธิ์

Sample	Composition (wt%)					Solar Reflectance (%)
	Fe_2O_3	Sb_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	
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

ตารางที่ 2.5 (ต่อ) ค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 780-2100 นาโนเมตรของผงสี S1-S40 เมื่อเปรียบเทียบกับ Fe_2O_3 , Sb_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , และ TiO_2 บริสุทธิ์

Sample	Composition (wt%)					Solar Reflectance (%)
	Fe_2O_3	Sb_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	
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_2O_3	100	-	-	-	-	26.3
Sb_2O_3	100	-	-	-	-	84.8
SiO_2	100	-	-	-	-	89.4
Al_2O_3	100	-	-	-	-	98.1
TiO_2	100	-	-	-	-	96.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 ข้อมูลสี CIE L*a*b* ของผงสี และ Fe₂O₃

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	Fe ₂ O ₃	35.75	9.85	3.30
S19	35.46	9.81	6.93				

ตารางที่ 2.7 การสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ของพื้นผิวกระเบื้องดินเผาเคลือบผงสี S31

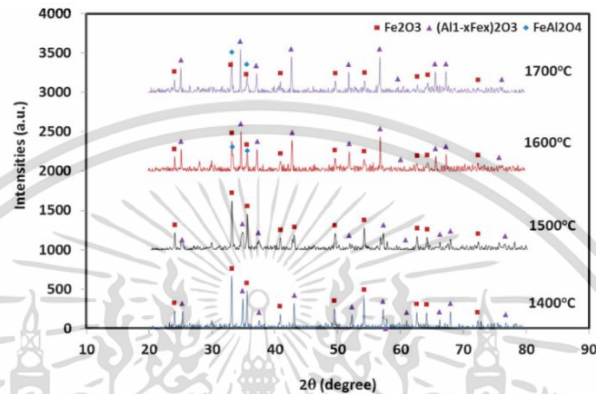
Pigment Amount (g)	Solar Reflectance (%)		
	Sample1	Sample2	Average
4	37.4	37.0	37.2
5	41.0	41.6	41.3
6	41.0	40.8	40.9
7	40.8	40.3	40.6
8	39.6	39.2	39.4

จากการวัดการสะท้อนแสงสเปกตรัมของผงสี พบว่าตัวอย่าง S31 ให้การสะท้อนแสงสูงสุดร้อยละ 46.7 ดังนั้นตัวอย่าง S31 จะถูกมาการศึกษาเกี่ยวกับการเคลือบสะท้อนแสงต่อไป ในการเตรียมการเคลือบสะท้อนแสง ผงสี S31 ถูกแบ่งออกเป็น 5 กลุ่ม โดยแต่ละกลุ่มมีปริมาณผงสี 4, 5, 6, 7 และ 8 กรัมตามลำดับ จากนั้นนำแต่ละกลุ่มผสมกับสารเคลือบเซรามิก (ceramic glaze) 100 กรัม และเตรียมตัวอย่างสองตัวอย่างสำหรับแต่ละกลุ่ม ของผสมถูกบดในน้ำโดยเครื่องบดลูกบอลเป็นเวลา 10 นาทีที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เพื่อให้ได้สารละลายผสมที่เป็นเนื้อเดียวกันและมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.40 จากนั้นนำตัวอย่างที่เตรียมไว้ทั้งหมดพ่นลงบนพื้นผิวกระเบื้องดินเผาที่มีขนาด 4 เซนติเมตร x 5 เซนติเมตร แล้วนำกระเบื้องดินเผาที่ถูกเคลือบไปให้ความร้อนในอัตรา 4 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิสูงสุด 1100 องศาเซลเซียสแล้วค้างไว้ 30 นาที เมื่อนำไปทดสอบการสะท้อนรังสีของกระเบื้องดินเผาเคลือบผงสี S31 ทำให้ทราบว่าสัดส่วนที่ดีที่สุดคือการใช้ผงสี S31 จำนวน 5 กรัม ซึ่งให้ค่าการสะท้อนรังสีใกล้อินฟราเรดสูงสุดที่ร้อยละ 41.3 แสดงดังตารางที่ 2.7

ในงานวิจัยของ ชุมพล บุชบก และคณะ [47] ได้ทำการศึกษาการเตรียมผงสีน้ำตาลสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ โดยใช้ปฏิกิริยาสถานะของของแข็ง ระหว่างเหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) โดยได้ศึกษาถึงผลของอัตราส่วนของสารตั้งต้น อุณหภูมิและระยะเวลาในการเผาแคลไซน์ จากการนำตัวอย่างผงสีที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเหล็กออกไซด์

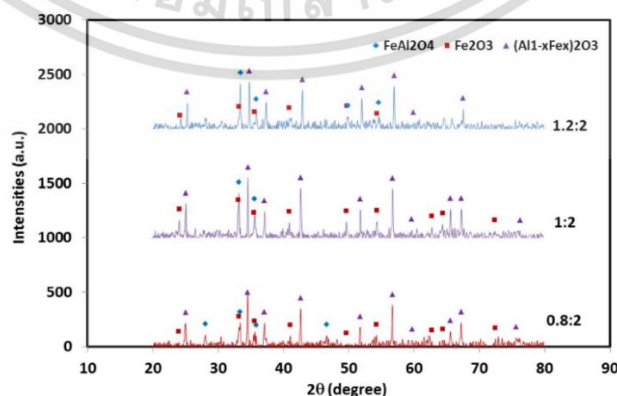
ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ (Fe₂O₃ : Al₂O₃) เท่ากับ 1 : 2 โดยใช้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ที่แตกต่างกันเป็นเวลา 2 ชั่วโมง มาวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จากรูปแบบของ XRD

ดังรูปที่ 2.17 เห็นได้ว่าผงสีตัวอย่างทั้ง 4 ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิระหว่าง 1400 ถึง 1700 องศาเซลเซียส แสดงสารประกอบหลัก 2 ชนิดคือเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ซึ่งเป็นสารตั้งต้น และ $(\text{Al}_{1-x}\text{Fe}_x)_2\text{O}_3$ โดยเมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้น Al^{3+} ในโครงสร้างแบบรอมโบฮีรัล (rhombohedral) ของอะลูมิเนียม-ออกไซด์ จะถูกแทนที่ด้วย Fe^{3+} ทำให้ความเข้มของพีค $(\text{Al}_{1-x}\text{Fe}_x)_2\text{O}_3$ เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเข้มของพีคเหล็ก-ออกไซด์จะค่อย ๆ ลดลง นอกจากนี้ก็ยังพบวัฏภาคสปินเนล (FeAl_2O_4) ที่อุณหภูมิ 1600 และ 1700 องศาเซลเซียสอีกด้วย

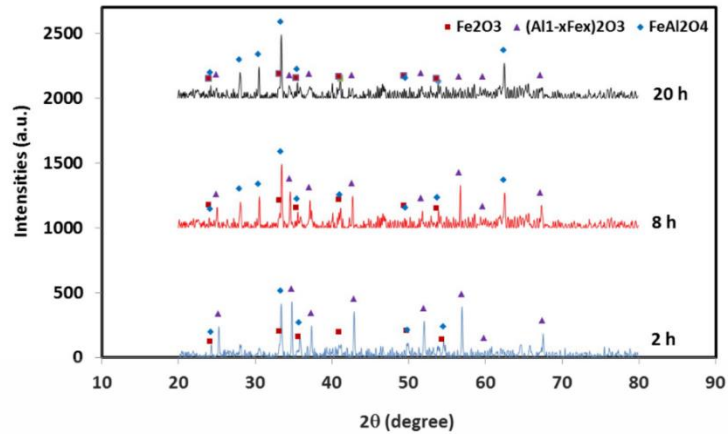


รูปที่ 2.17 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงสีตัวอย่างที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน [47]

เมื่อนำผงสีตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของสารตั้งต้นที่แตกต่างกันมาเปรียบเทียบกัน จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในรูปที่ 2.18 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของเหล็กออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ที่มากขึ้นจาก 0.8:2 1:2 และ 1.2:2 ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาสถานะของของแข็งที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้นที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเหล็กออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ เท่ากับ 1.2:2 ความเข้มของพีค FeAl_2O_4 และ $(\text{Al}_{1-x}\text{Fe}_x)_2\text{O}_3$ สูงขึ้น และรูปที่ 2.20 แสดงการเปรียบเทียบเมื่อใช้ระยะเวลาในการเผาแคลไซน์ที่ต่างกัน จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเข้มของพีคสปินเนล FeAl_2O_4 และ $(\text{Al}_{1-x}\text{Fe}_x)_2\text{O}_3$ เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

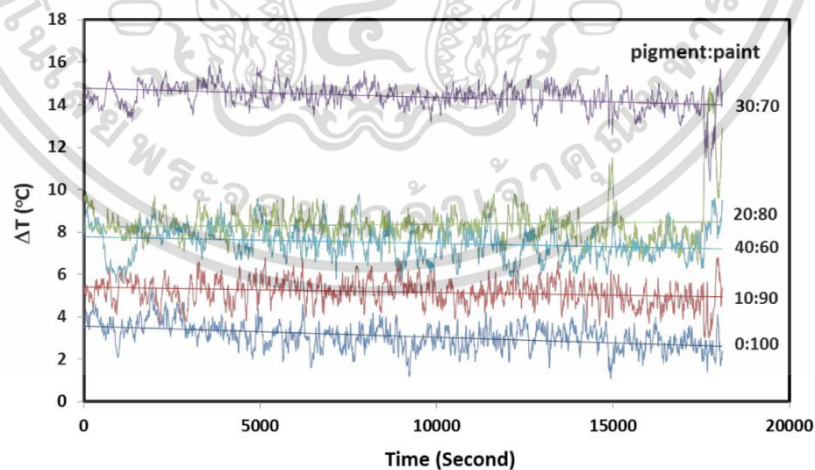


เอกสารนี้รูปที่ 2.18 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงสีตัวอย่างที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีอัตราส่วน เหล็กออกไซด์ : อะลูมิเนียมออกไซด์ที่ต่างกัน [47]



รูปที่ 2.19 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงสีตัวอย่างที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1700 องศาเซลเซียส โดยใช้ระยะเวลาในการเผาที่แตกต่างกัน [47]

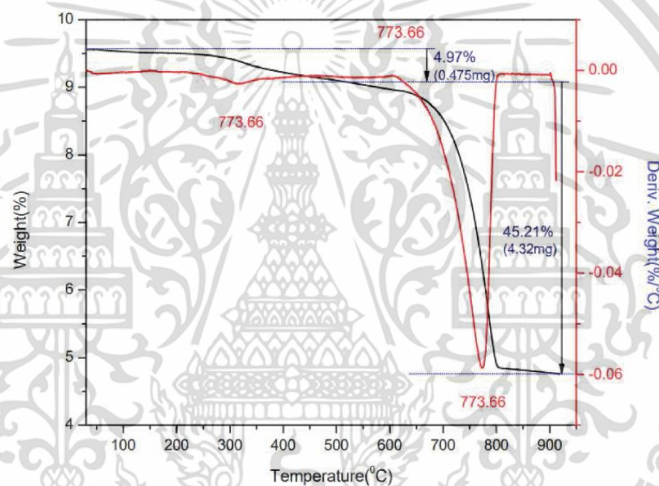
นอกจากนั้นได้มีการนำผงสีที่สังเคราะห์ได้โดยใช้อัตราส่วนเหล็กออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ 1.2:2 และเผาที่อุณหภูมิ 1,700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง ไปผสมกับสีทาภายนอกในอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่าง ๆ แล้วนำไปเคลือบบนแผ่นโลหะ เพื่อตรวจสอบสมบัติการสะท้อนความร้อนโดยอาศัยหลักการสะท้อนความร้อนด้วยหลอดไฟขนาด 200 วัตต์ จากรูปที่ 2.20 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเติมผงสีในอัตราส่วนที่สูงขึ้น การสะท้อนความร้อนก็จะเพิ่มขึ้น โดยความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านที่เคลือบซึ่งถูกส่องด้วยหลอดไฟและด้านตรงข้ามที่สูงที่สุดคือประมาณ 14 องศาเซลเซียสได้จากอัตราส่วนระหว่างผงสีที่สังเคราะห์ได้ต่อสีทาภายนอก เท่ากับ 30 : 70 หลังจากนั้นความแตกต่างของอุณหภูมิจะลดลงเหลือ 8 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วน 40 : 60



รูปที่ 2.20 ความแตกต่างของอุณหภูมิของตัวอย่างแผ่นโลหะที่เคลือบด้วยผงสีและสีทาภายนอกโดยมีอัตราส่วนที่แตกต่างกัน [47]

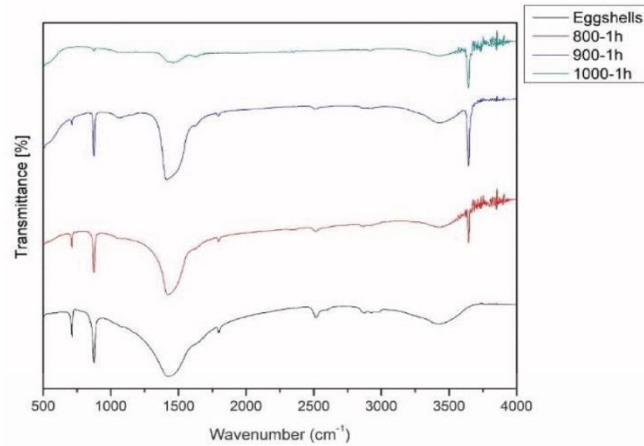
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยของ Udakshi Nipunika และคณะ [48] ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่เหลือที่ผ่านกระบวนการบดแบบบอลมิลล์ (ball mill) และการเผาแคลไซน์ โดยได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา และปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการเผาเปลือกไข่ จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (thermogravimetric analysis; TGA) ของเปลือกไข่ แสดงผลในรูปที่ 2.21 พบการสูญเสียมวลที่สำคัญสองครั้งในช่วง 300 และ 800 องศาเซลเซียส โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 4.97 และ 45.21 ซึ่งเกิดจากการสูญเสียสารระเหย เช่น น้ำและสารอินทรีย์ และการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เนื่องจากการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) ตามลำดับ และในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (differential thermal analysis; DTA) ผงเปลือกไข่ แสดงค่าพีคของการดูดความร้อนที่ประมาณ 773.66 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงถึงการสลายตัวของวัฏภาคอะราโกไนต์ (aragonite) ไปเป็นวัฏภาคคิวบิก (cubic) ที่มีความบริสุทธิ์สูงของแคลเซียมออกไซด์



รูปที่ 2.21 การวิเคราะห์ TGA-DTA ของผงเปลือกไข่ [48]

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy; FT-IR) ดังแสดงในรูปที่ 2.22 พบว่าผงเปลือกไข่มีช่วงการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งเลขคลื่น 710.89 cm⁻¹ และ 875.29 cm⁻¹ ซึ่งตรงกับรูปแบบการสั่นของคาร์บอเนตไอออน (CO₃²⁻) ที่บ่งบอกถึงการมีอยู่ของแคลเซียมคาร์บอเนต และพบช่วงการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1421.72 cm⁻¹ ซึ่งตรงกับรูปแบบการสั่นแบบยืดหด (stretching) ของกลุ่มคาร์บอเนต เมื่อทำการเปรียบเทียบช่วงการดูดกลืนแสงของผงเปลือกไข่ที่ผ่านการเผาแคลไซน์แล้วที่อุณหภูมิ 800 900 และ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่ามีช่วงการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ 560 cm⁻¹ ซึ่งตรงกับพีคการสั่นของพันธะ Ca-O บ่งชี้ถึงการเกิดขึ้นของแคลเซียมออกไซด์ และค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ 710 cm⁻¹ และ 1420 cm⁻¹ ของผงเปลือกไข่ที่เผาแล้วนั้นมีความเข้มของพีคที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเผามากขึ้น แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของแคลเซียมคาร์บอเนต เอกสารนี้ไปเป็นแคลเซียมออกไซด์ รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 FTIR สเปกตรัมของผงเปลือกไข่ที่ไม่ผ่านการเผาและผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง [48]

จากการศึกษาปริมาณขององค์ประกอบของเปลือกไข่ที่เปลี่ยนไปเมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิ 800 – 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตจะลดลงตามอุณหภูมิการเผาที่เพิ่มขึ้น โดยผงเปลือกไข่ที่เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส จึงถูกเปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์มากที่สุด

ในงานวิจัยของ พัฒนะ รักความสุข และคณะ [49] ได้ศึกษาการสังเคราะห์ผงสีเซรามิกสีแดง ส้มท่อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ ด้วยปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง จากเซอร์คอน (zircon) ที่เจือด้วยเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ทำการสังเคราะห์ผงสีโดยการบดผสมสารทั้งหมดที่อัตราส่วนต่าง ๆ ตามตารางที่ 2.8 เพื่อเกิดปฏิกิริยาเป็นสารประกอบอินทรีย์ โดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ $\text{ZrSiO}_4 : \text{Fe}_2\text{O}_3 : \text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ 45 : 25 : 30 เป็นพื้นฐาน แล้วแทนที่อะลูมิเนียมออกไซด์ ด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1100 1200 และ 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ใช้อัตราเพิ่มอุณหภูมิเผาที่ 5 องศาเซลเซียส ต่อนาที

ตารางที่ 2.8 ชื่อสารประกอบตัวอย่างที่เตรียมขึ้นจากการใช้อัตราส่วนและอุณหภูมิในการเผาต่าง ๆ

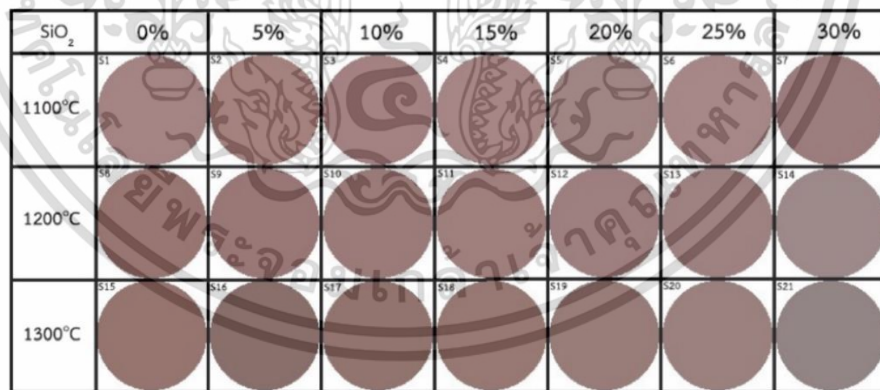
อัตราส่วน (%)				อุณหภูมิเผา (°C)		
ZrSiO ₄	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	1,100	1,200	1,300
ชื่อตัวอย่าง						
45	25	30	0	S1	S8	S15
45	25	25	5	S2	S9	S16
45	25	20	10	S3	S10	S17
45	25	15	15	S4	S11	S18
45	25	10	20	S5	S12	S19
45	25	5	25	S6	S13	S20
45	25	0	30	S7	S14	S21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์ที่วัดได้จากเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) เมื่อนำมาคำนวณค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ ตามมาตรฐาน ASTM E903 และค่าวิเคราะห์สี ตามหลัก CIE L* a* b* จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 2.9 พบว่าผงสีที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิการเผา 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส มีค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ที่ใกล้เคียงกันในแต่ละอัตราส่วน แต่ที่อุณหภูมิการเผา 1300 องศาเซลเซียส ค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยหากเปรียบเทียบจากผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงสีได้โครงสร้างหลักคือ เหล็กเซอร์โคเนียมออกไซด์ซิลิเกต ($ZnFe_{0.05}(SiO_4)_{0.95}O_{0.175}$) และเมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้น อะลูมิเนียมออกไซด์จะไม่ทำปฏิกิริยาเกิดเป็นโครงสร้างใหม่ ทำให้ซิลิกอนไดออกไซด์ไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้ จึงเป็นผลให้ค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดลดลง

ตารางที่ 2.9 ค่าพิกัดสีที่คำนวณได้ตามระบบ CIE L* a* b* และค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ (NIR) ของผงสีสีแดงที่สังเคราะห์ได้

อัตราส่วน (%)				1,100°C				1,200°C				1,300°C			
ZrSiO ₄	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	L*	a*	b*	R _{NIR} (%)	L*	a*	b*	R _{NIR} (%)	L*	a*	b*	R _{NIR} (%)
45	25	30	0	51.10	15.04	6.84	64.6	45.25	16.24	8.62	60.5	44.33	14.49	9.91	52.9
45	25	25	5	50.13	16.31	7.83	64.8	45.35	15.77	7.85	61.0	40.73	12.72	7.84	43.6
45	25	20	10	50.15	15.16	6.15	65.9	47.00	15.34	7.41	61.9	42.69	13.56	8.40	44.3
45	25	15	15	51.90	15.04	6.22	65.1	48.36	15.00	6.73	62.8	45.25	14.01	8.35	51.5
45	25	10	20	50.88	13.98	5.46	65.4	50.77	13.45	5.53	61.9	46.81	13.06	7.21	53.6
45	25	5	25	53.38	13.60	5.19	65.3	50.53	12.49	5.39	61.7	48.96	11.84	6.22	53.9
45	25	0	30	49.13	14.09	4.94	65.2	52.15	9.44	2.53	59.4	49.18	6.66	1.64	51.0



รูปที่ 2.23 ลักษณะสีของตัวอย่าง S1 – S21 [49]

จากรูปที่ 2.23 และตารางที่ 2.9 ที่แสดงค่าพิกัดสีจากการคำนวณได้ตามระบบ CIE L* a* b* และค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ เมื่อเปรียบเทียบจากค่า L* ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิเผา 1,200 และ 1,300 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อลดปริมาณอะลูมิเนียมออกไซด์ลง แล้วแทนที่ด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ จะทำให้สีของผงสีมีความสว่างเพิ่มขึ้นตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของซิลิกอนไดออกไซด์ เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนวิชาสำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูยาดเหนาไปไซประโยชน์ดานการคาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการสังเคราะห์ผงสีเซรามิกสีแดงสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ ด้วยปฏิกิริยาในสถานะของของแข็งใช้อัตราส่วนพื้นฐานโดยน้ำหนักของ $ZrSiO_4 : Fe_2O_3 : Al_2O_3$ เป็น 45 : 25 : 30 แล้วแทนที่อะลูมิเนียมออกไซด์ ด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ พบว่าผงสีเซรามิกสีแดงที่มีอัตราส่วน $ZrSiO_4 : Fe_2O_3 : Al_2O_3 : SiO_2$ เท่ากับ 45 : 25 : 20 : 10 ที่อุณหภูมิการเผา 1100 องศาเซลเซียส จะได้ผงสีแดงที่มีค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ สูงที่สุด เท่ากับร้อยละ 65.9 และจากผล XRD พบว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้นอะลูมิเนียมออกไซด์จะไม่ทำปฏิกิริยาเกิดเป็นโครงสร้างใหม่ ซิลิกอนไดออกไซด์จึงไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้ เป็นผลให้ค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดลดต่ำลง

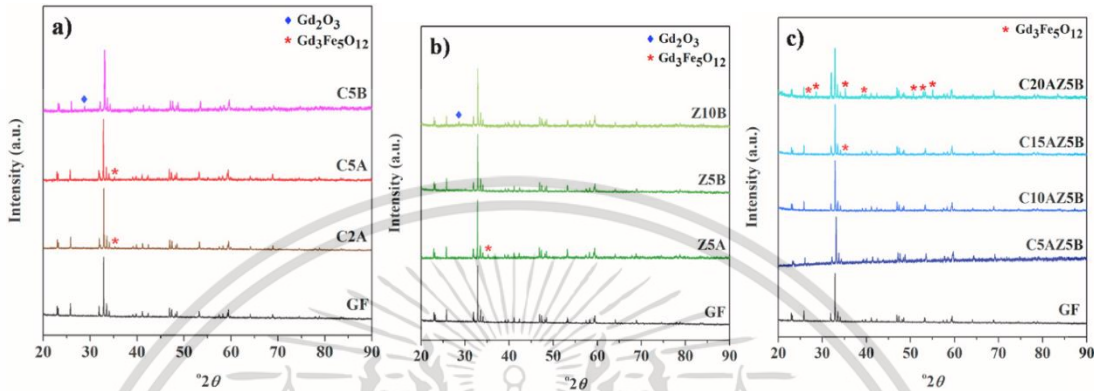
ในงานวิจัยของ Maria Fortuño-Morte และคณะ [50] ได้ศึกษาพัฒนาผงสีแดงถึงดำจากแกโดลิเนียม-ออร์โทเฟอร์ไรต์ ($GdFeO_3$) ที่มีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ (perovskite; ABO_3) ที่ยั่งยืนจากสีแดงไปสู่สีดำบริสุทธิ์ โดยการเติมแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และซิงค์ไอออน (Zn^{2+}) เนื่องจากเป็นไอออนที่ไม่เป็นพิษ (non-toxic) และไม่โครโมฟอร์ (non-chromophore) ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม (coprecipitation) ที่อุณหภูมิการเผา 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ใช้อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยมีอัตราส่วนของผงสีตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 2.10 กำหนดให้ C คือ แคลเซียมไอออน Z คือ ซิงค์ไอออน และให้ A คือตำแหน่งของไอออนบวกที่มีเลขโคออร์ดิเนชัน (coordination number) เท่ากับ 12 และ B คือตำแหน่งของไอออนบวกที่มีเลขโคออร์ดิเนชันเท่ากับ 6 ในโครงสร้างเพอโรฟสไกต์

ตารางที่ 2.10 องค์ประกอบที่เตรียมขึ้นจาก Ca และ/หรือ Zn ซึ่งเติมลงใน $GdFeO_3$ และตัวบ่งชี้ความเสถียรของโครงสร้างผลึก (t)

Samples	General formula	x	y	Nominal Composition	Reference	t
Undoped $GdFeO_3$	$GdFeO_3$	0	0	$GdFeO_3$	GF	0.923
Ca-doped $GdFeO_3$	$(Gd_{1-x}Ca_x)FeO_{3-x/2}$	0.02	0	$(Gd_{0.98}Ca_{0.02})FeO_{2.99}$	C2A	0.924
		0.05		$(Gd_{0.95}Ca_{0.05})FeO_{2.975}$	C5A	0.924
		0	0.05	Gd $(Fe_{0.95}Ca_{0.05})O_{2.975}$	C5B	0.915
Zn-doped $GdFeO_3$	$(Gd_{1-x}Zn_x)FeO_{3-x/2}$	0.05	0	$(Gd_{0.95}Zn_{0.05})FeO_{2.975}$	Z5A	0.920
		0	0.05	Gd $(Fe_{0.95}Zn_{0.05})O_{2.975}$	Z5B	0.921
			0.10	Gd $(Fe_{0.90}Zn_{0.10})O_{2.95}$	Z10B	0.918
Ca,Zn-co-doped $GdFeO_3$	$(Gd_{1-x}Ca_x)(Fe_{1-y}Zn_y)O_{3-x/2-y/2}$	0.05	0.05	$(Gd_{0.95}Ca_{0.05})(Fe_{0.95}Zn_{0.05})O_{2.95}$	C5AZ5B	0.922
		0.10		$(Gd_{0.90}Ca_{0.10})(Fe_{0.95}Zn_{0.05})O_{2.95}$	C10AZ5B	0.923
			0.15	$(Gd_{0.85}Ca_{0.15})(Fe_{0.95}Zn_{0.05})O_{2.925}$	C15AZ5B	0.925
			0.20	$(Gd_{0.80}Ca_{0.20})(Fe_{0.95}Zn_{0.05})O_{2.90}$	C20AZ5B	0.926
				$(Fe_{0.95}Zn_{0.05})O_{2.875}$		

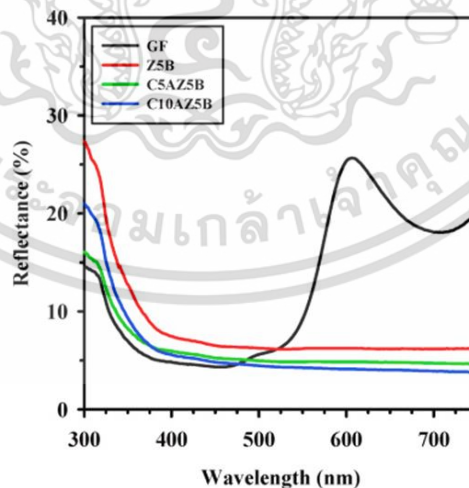
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 2.24 พบว่าผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นทั้งหมดแสดงลักษณะพีคั้วภาคหลักของโครงสร้างผลึกเพอโรฟสไกต์แบบออร์โธโรมบิก (orthorhombic) ของแกโดลิเนียมออร์โทเฟอร์ไรต์ แต่ในตัวอย่างบางส่วนที่มีการเติมแคลเซียม ไอออนและซิงค์ไอออนได้มีการแสดงลักษณะพีคของวัฏภาคทุติยภูมิอื่น ๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปยังตัวอย่างผงสีที่แสดงวัฏภาคเดียว คือ $GdFeO_3$ ซึ่งได้แก่ GF, Z5B, C5AZ5B และ C10AZ5B



รูปที่ 2.24 ผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงสีตัวอย่างที่อุณหภูมิการเผา 1200 องศาเซลเซียส (a) มีการเติมแคลเซียมลงใน $GdFeO_3$ (b) มีการเติมซิงค์ลงใน $GdFeO_3$ (c) มีการเติมแคลเซียมและซิงค์ลงใน $GdFeO_3$ [50]

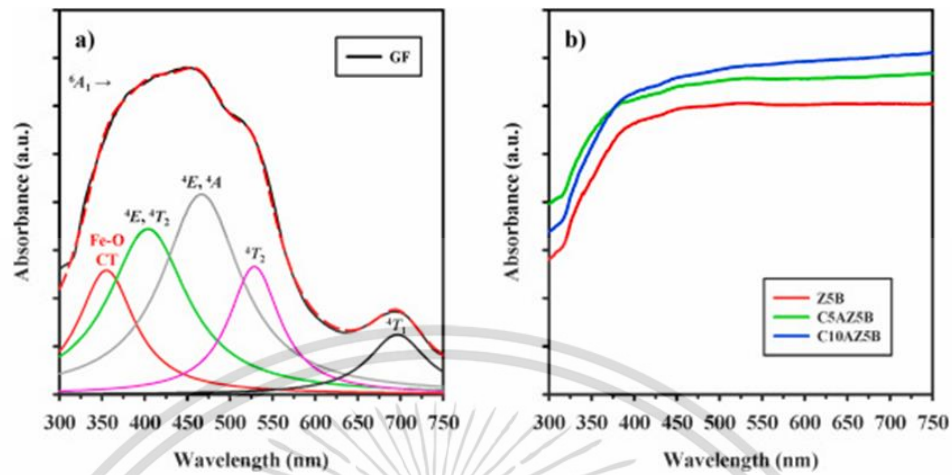
จากการศึกษา UV-Vis สเปกตรัมของผงสี ที่แสดงในรูปที่ 2.25 ทำให้ทราบว่าผงสี GF ที่ยังไม่มีการเจือสารอื่นจะมีการสะท้อนสเปกตรัมอยู่ที่ประมาณ 600 นาโนเมตร ซึ่งเป็นในช่วงของแสงสีแดง และในผงสี Z5B, C5AZ5B และ C10AZ5B ที่มีการเจือซิงค์หรือแคลเซียมแล้วนั้นจะมีการสะท้อนแสง UV-Vis ที่ต่ำกว่า 300 นาโนเมตร แสดงให้เห็นว่าผงสีทั้ง 3 สูตรเป็นสีดำ



รูปที่ 2.25 UV-Vis สเปกตรัมของ GF, Z5B, C5AZ5B และ C10AZ5B [50]

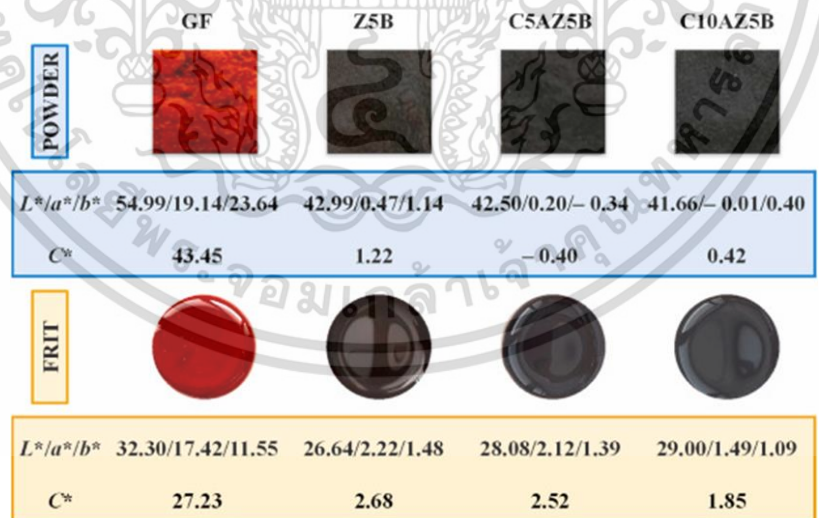
จากการศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของผงสี GF แสดงในรูปที่ 2.26 จะพบการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 350 ถึง 550 นาโนเมตร เป็นผลมาจากการถ่ายเทประจุ (charge transfer transitions) ของ $O_{2p} \rightarrow Fe_{3d}$ และจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนใน d-ออร์บิทัล (d-d

transitions) ของ Fe^{3+} ดังแสดงในรูป 2.26(a) และในผงสี Z5B, C5AZ5B และ C10AZ5B แสดงค่าการดูดกลืนแสงสูงในทุกช่วงของ UV-Vis



รูปที่ 2.26 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของผงสีเผาที่อุณหภูมิ 1200 °C: (a) GF, (b) Z5B, C5AZ5B และ C10AZ5B [50]

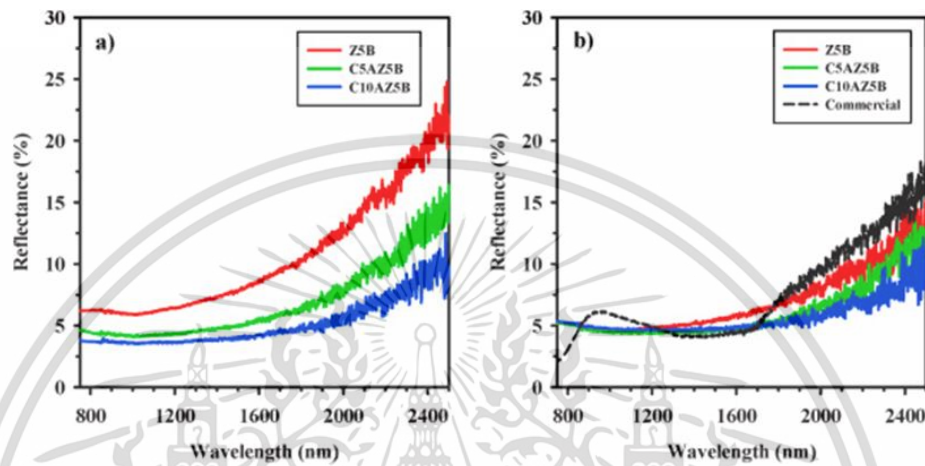
จากการศึกษาค่าพิกัดสีดังแสดงในรูปที่ 2.27 ของสีในสูตร GF, Z5B, C5AZ5B และ C10AZ5B พบว่าสูตรที่มีการเจือ Zn^{2+} หรือ Ca^{2+} มีค่า L^* ลดลง โดยทั้ง 4 สูตรมีค่า L^* อยู่ที่ประมาณ 42 ค่า a^* อยู่ระหว่าง -0.01 ถึง 0.47 ค่า b^* คือ ระหว่าง -0.34 ถึง 1.14 และความอิ่มตัว (C^*) มีค่าตั้งแต่ -0.40 ถึง 1.22 ซึ่งผงสีที่ให้สีดำที่ดีที่สุด มีค่าความอิ่มตัวของสีดำที่ดีที่สุดคือสูตร C5AZ5B และสูตร C10AZ5B เป็นสูตรที่ดีที่สุดสำหรับที่จะทำที่เคลือบ (glazes)



รูปที่ 2.27 ภาพถ่ายและค่าพิกัดสีของผงสีและสีเคลือบ [50]

จากการศึกษาค่าการสะท้อนรังสี NIR ของผงสีดำแสดงในรูปที่ 2.27(a) พบว่ามีค่าการสะท้อนอยู่ที่ร้อยละ 8, 5 และ 4 สำหรับผงสี Z5B, C5AZ5B และ C10AZ5B ตามลำดับ โดยผงสีทั้ง 3 สูตรเอกสารนี้ยังให้ค่าการสะท้อนกลับของแสงอาทิตย์ทั้งหมด (total solar reflectance; RT) อยู่ที่ร้อยละ 71 ไม่ว่าจะเป็นสำหรับ Z5B ร้อยละ 5 สำหรับ C5AZ5B และร้อยละ 5 สำหรับ C10AZ5B ซึ่งมีค่าการสะท้อนกลับ

ของแสงอาทิตย์ทั้งหมด ใกล้เคียงกับผงสีดำทั่วไป เช่น คาร์บอนแบล็ค ซึ่งมีค่าการสะท้อนแสงของแสงอาทิตย์เท่ากับร้อยละ 6 นอกจากนี้ยังศึกษาค่าการสะท้อนรังสี NIR ของผงสีที่ผสมกับฟritเพื่อใช้ในการเตรียมเคลือบเซรามิก โดยค่าการสะท้อนแสงของแสงอาทิตย์ NIR ดังแสดงในรูปที่ 2.28(b) พบว่าค่าการสะท้อนมีค่าอยู่ที่ร้อยละ 5 ซึ่งมีค่าที่เท่ากับสารเคลือบที่เตรียมด้วยผงสีดำเชิงพาณิชย์ ดังนั้นผงสีดำที่งานวิจัยนี้สังเคราะห์เป็นผงสีที่มีองค์ประกอบที่ไม่เป็นพิษและสามารถนำมาใช้งานในด้านของเซรามิกได้



รูปที่ 2.28 สเปกตรากการสะท้อนรังสี NIR ของ (a) ผงสี Z5B, C5AZ5B และ C10AZ5B และ (b) สารผสมระหว่างผงสีดำ-ฟrit [50]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 3.1.1 เครื่องบดด้วยลูกบอลแบบหมุนกลิ้ง (ball milling)
- 3.1.2 ขวดพลาสติกโพลีโพรพิลีน (PP) พร้อมฝาปิดขนาด 240 มิลลิลิตร
- 3.1.3 ลูกบดเซอร์โคเนีย (ZrO_2) ขนาด 3, 5, 8 และ 10 มิลลิเมตร
- 3.1.4 ครกหินพร้อมสากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว
- 3.1.5 กระชอนพลาสติกขนาด 8 เซนติเมตร
- 3.1.6 ซ้อนตักสาร
- 3.1.7 ปีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร
- 3.1.8 ตะแกรงลวดขนาด 400 เมช (mesh)
- 3.1.9 กระจบอกล้างน้ำ
- 3.1.10 กระจบอกล้าง
- 3.1.11 ตู้อบ รุ่น UF 110 บริษัท memmert
- 3.1.12 แท่งแก้วคนสาร
- 3.1.13 เตาให้ความร้อนและเครื่องปั่นกวน
- 3.1.14 แท่งแม่เหล็กกวนสาร (magnetic bar)
- 3.1.15 ครุชีเบิลอะลูมินา
- 3.1.16 เตาเผา รุ่น L9/12P บริษัท ซวโชติ จำกัด
- 3.1.17 โถรงบดสาร
- 3.1.18 เครื่องชั่งทศนิยมสี่ตำแหน่ง
- 3.1.19 แปรงทาสี ขนาด 2 นิ้ว
- 3.1.20 กระจดาชกรองเบอร์ 5
- 3.1.21 เครื่องตรวจวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer; XRD) รุ่น SmartLab บริษัท Rigaku
- 3.1.22 เครื่องตรวจวัดค่าการสะท้อนรังสี (UV-Vis DRS spectrophotometer) รุ่น UV-2600 บริษัท Shimadzu
- 3.1.23 เครื่องตรวจวัดค่าการสะท้อนรังสี (UV-Vis-NIR spectrophotometer) รุ่น Solid spec-3700 บริษัท Shimadzu
- 3.1.24 เครื่องตรวจวัดสี (spectrophotometer) รุ่น CM 2600d บริษัท Konica minota
- 3.1.25 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; FE-SEM) รุ่น Quanta FEG-250 บริษัท FEI
- 3.1.26 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (X-ray fluorescence spectrometer; XRF) รุ่น ZSX Primus IV บริษัท Rigaku

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่...
ไม่ว่าการ...
ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.27 เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer; FT-IR) รุ่น IR tracer-100 บริษัท Shimadzu

3.1.28 เครื่องรามานสเปกโทรมิเตอร์ (Raman spectrometer) รุ่น DXR smart Raman บริษัท Thermo fisher scientific

3.1.29 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการประยุกต์ใช้ผงสีเป็นสีทาอาคารเพื่อการสะท้อนความร้อน

3.1.30 หลอดไฟอินฟราเรดขนาด 250 วัตต์ รุ่น BR125 บริษัท ฟิลิปส์ อิเล็กทรอนิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด

3.1.31 เครื่องวัดอุณหภูมิ รุ่น RC-4HC บริษัท Elitech

3.2 สารเคมี

3.2.1 เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) บริสุทธิ์ 99% บริษัท Himedia

3.2.2 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) บริสุทธิ์ 99% บริษัท Carlo Erba

3.2.3 โซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) บริสุทธิ์ 99% บริษัท Carlo Erba

3.2.4 แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่ได้จากโรงอาหารคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3.2.5 สีรองพื้นสีขาว บริษัท ทีโอเอ เพ้นต์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)

3.2.6 สีน้ำทากายนอกสีขาว บริษัท นิปปอน เพ้นต์ เดคโคเรทีฟ โคทติ้ง (ประเทศไทย) จำกัด

3.2.7 แผ่นฝ้ายปั๊มสีขาว บริษัท Gyproc

3.3 วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์ผงสีผ่านปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid state reaction) โดยนำสารตั้งต้นได้แก่ เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3 ; Fe) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3 ; Al) แคลเซียมออกไซด์ (CaO ; Ca) ที่เตรียมขึ้นจากการใช้แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) จากเปลือกไข่เป็นสารตั้งต้น มาซึ่งน้ำหนักให้ได้สัดส่วนตามที่กำหนดไว้ดังตารางที่ 3.1 โดยมีโซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) เป็นตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยา (mineralizer) เพื่อช่วยลดอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาของสารให้ต่ำลง จากนั้นทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

3.3.1. การเตรียมผงอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) จากเปลือกไข่

3.3.1.1 การเตรียมเปลือกไข่สด

1) นำเปลือกไข่มาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปาและล้างด้วยน้ำยาล้างจาน โดยขัดเยื่อไข่บริเวณเปลือกออกจนหมด

2) ต้มเปลือกไข่ที่ทำความสะอาดแล้วในน้ำประปาจนเดือด

3) นำเปลือกไข่ที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

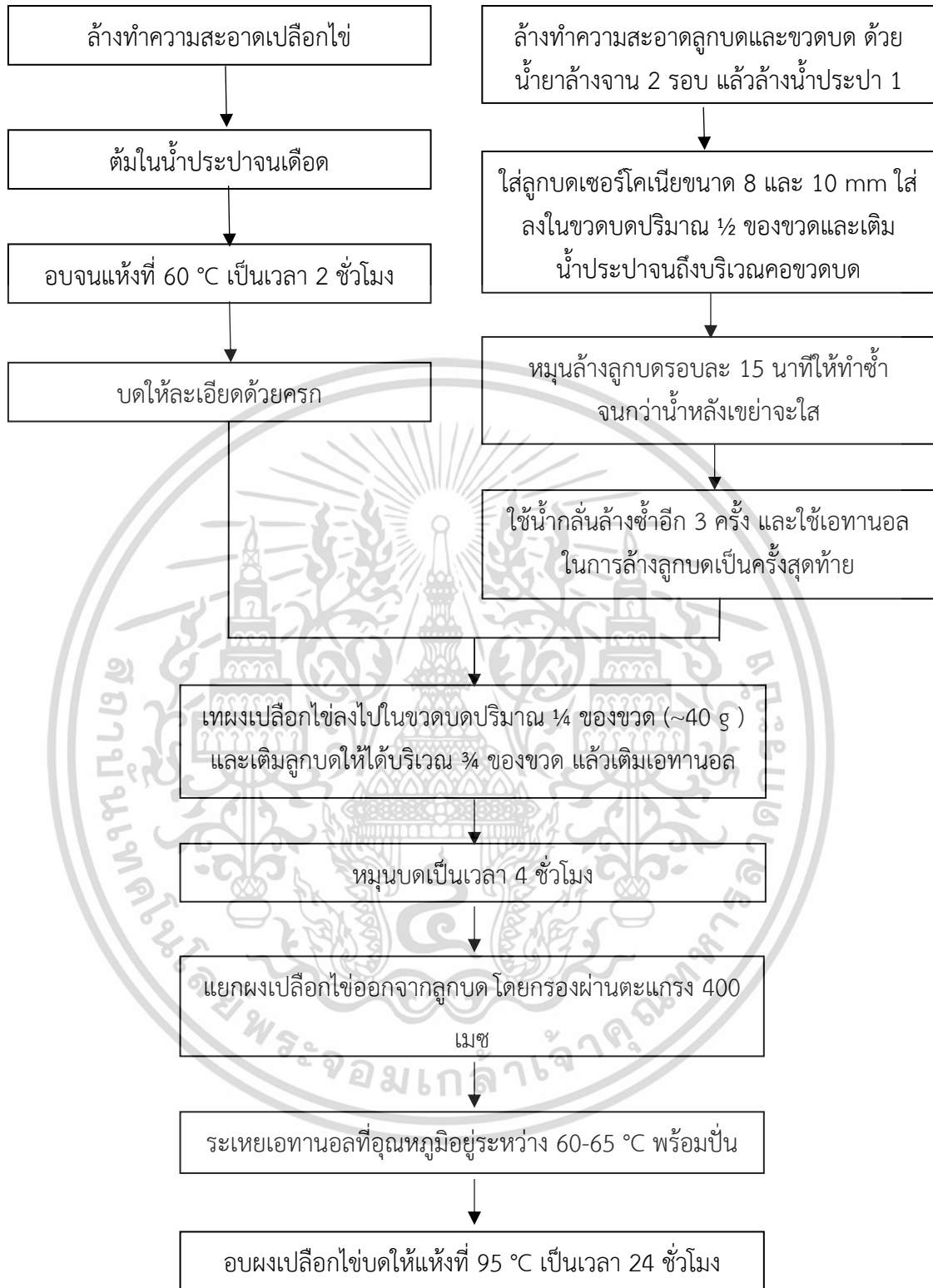
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นให้ มีมติเห็นชอบโดย คณะกรรมการบริหารของสถาบันฯ

4) นำเปลือกไข่ที่อบแล้วมาบดด้วยครกจนละเอียด

3.3.1.2 การบดผงอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่

- 1) ล้างทำความสะอาดลูกบดเซอร์โคเนียและขวดบดด้วยน้ำประปา และล้างด้วยน้ำยาล้างจาน 2 รอบ แล้วนำไปล้างน้ำประปาอีก 1 รอบ
 - 2) ใช้ลูกบดเซอร์โคเนียขนาด 8 และ 10 มิลลิเมตร ใส่ลงในขวดพลาสติกโพลีโพรพิลีนขนาด 240 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำประปาจนถึงบริเวณคอขวดบด
 - 3) ทำการล้างลูกบดด้วยน้ำประปาดบนเครื่องหมุนบดรอบละ 15 นาที จนลูกบดสะอาด โดยสังเกตจากน้ำหลังจากการเขย่าล้างจะใสขึ้น
 - 4) ทำซ้ำขั้นตอนการล้างลูกบดบนเครื่องหมุนบดอีก 3 ครั้ง โดยใช้น้ำกลั่น และใช้เอทานอลเป็นครั้งสุดท้าย
 - 5) เมื่อล้างลูกบดจนสะอาดดีแล้ว เทผงเปลือกไข่ที่ได้จากตอนที่ 1.1 ลงไปในขวดบดให้อยู่ที่ $\frac{1}{4}$ ของขวดหรือประมาณ 40 กรัม และใส่ลูกบดเซอร์โคเนียขนาด 8 และ 10 มิลลิเมตร ให้ได้ปริมาณ $\frac{3}{4}$ ของขวดหรือประมาณ 540 กรัม
 - 6) เติมน้ำเอทานอลจนถึงบริเวณคอขวดบดแล้วนำไปหมุนบดเป็นเวลา 4 ชั่วโมง
 - 7) แยกผงเปลือกไข่ออกจากลูกบดโดยการกรองผ่านตะแกรงลวดขนาด 400 เมช แล้วล้างลูกบดที่มีผงเปลือกไข่ติดอยู่ด้วยเอทานอลผ่านตะแกรงลวดเช่นกัน
 - 8) ทำการระเหยเอทานอลโดยใส่แท่งแม่เหล็กปั่นกวนลงไปในปีกเกอร์ และใช้ฟอยล์ที่เจาะรูคลุมปากปีกเกอร์ จากนั้นให้ความร้อนพร้อมปั่นกวนที่อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 60 – 65 องศาเซลเซียส
 - 9) นำผงอนุภาคเปลือกไข่ที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- แผนภาพขั้นตอนการเตรียมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่แสดงในรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แผนภาพกระบวนการเตรียมผงอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2. การสังเคราะห์ผงสี

- 1) ชั่งเหล็กออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ แคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้เป็นสารตั้งต้นของแคลเซียมออกไซด์และโซเดียมฟลูออไรด์ ตามปริมาณที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3.2 และ 3.3 แล้วนำมาบดผสมกันด้วยโกร่งเป็นเวลา 15 นาที
 - 2) นำสารผสมที่ได้ใส่ครุชีเบิลอะลูมินาปิดฝาแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มและลดเท่ากันที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที
 - 3) ล้างผงสีที่ได้หลังจากการเผาเพื่อกำจัดโซเดียมฟลูออไรด์ โดยนำผงสีไปกระจายตัวในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร แล้วทำการต้มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาทีโดยมีการปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กตลอดเวลา จากนั้นทำการกรองแยกผงสีแบบลดความดัน ทำซ้ำขั้นตอนการล้างผงสี 2 รอบ
 - 4) นำผงสีที่ผ่านการล้างแล้วบรรจุลงในขวดพลาสติกโพลีโพรพิลีนปริมาณ $\frac{1}{4}$ ของขวดหรือประมาณ 40 กรัม และบรรจุลูกบดเซอร์โคเนียที่ล้างสะอาดแล้วขนาด 3, 5 และ 10 มิลลิเมตร ในอัตราส่วนที่เท่า ๆ กันให้ได้ปริมาณ $\frac{3}{4}$ ของขวดบดหรือประมาณ 460 กรัม และเติมน้ำกลั่น 160 มิลลิลิตร แล้วนำไปหมუნบดเป็นเวลา 4 ชั่วโมง
 - 5) แยกลูกบดออกแล้วทำการกรองผ่านตะแกรงขนาด 400 เมช และล้างลูกบดที่มีผงสีติดอยู่ด้วยน้ำกลั่น นำสารที่ผ่านการกรองแล้วไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
 - 6) นำผงสีที่สังเคราะห์ได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติด้วยเทคนิคต่าง ๆ
- แผนภาพขั้นตอนการเตรียมการสังเคราะห์ผงสีแสดงในรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แผนภาพกระบวนการสังเคราะห์ผงสีด้วยปฏิกิริยาของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ผงสี

Formular	Component	Weight (%wt)				
		Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	Total	NaF
1	50Fe/50Ca	50	-	50	100	8
2	50Fe/10Al/40Ca	50	10	40	100	8
3	50Fe/20Al/30Ca	50	20	30	100	8
4	50Fe/30Al/20Ca	50	30	20	100	8
5	50Fe/40Al/10Ca	50	40	10	100	8
6	50Fe/50Al	50	50	-	100	8

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ให้แคลเซียมออกไซด์ตามที่กำหนด

Formular	Component	Weight (%wt)	
		CaO	CaCO ₃
1	50Fe/50Ca	50	89.17
2	50Fe/10Al/40Ca	40	71.34
3	50Fe/20Al/30Ca	30	53.50
4	50Fe/30Al/20Ca	20	35.67
5	50Fe/40Al/10Ca	10	17.83
6	50Fe/50Al	-	-

หมายเหตุ : แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 °C ขึ้นไปจะเปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 56.07 อ้างอิงจากวิทยานิพนธ์ของกัญญาภักดิ์ ศรีปะโค และ พงศกร พรหมทา [51]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ปริมาณของสารที่ใช้ในการสังเคราะห์ผงสีปริมาณ 20 กรัม

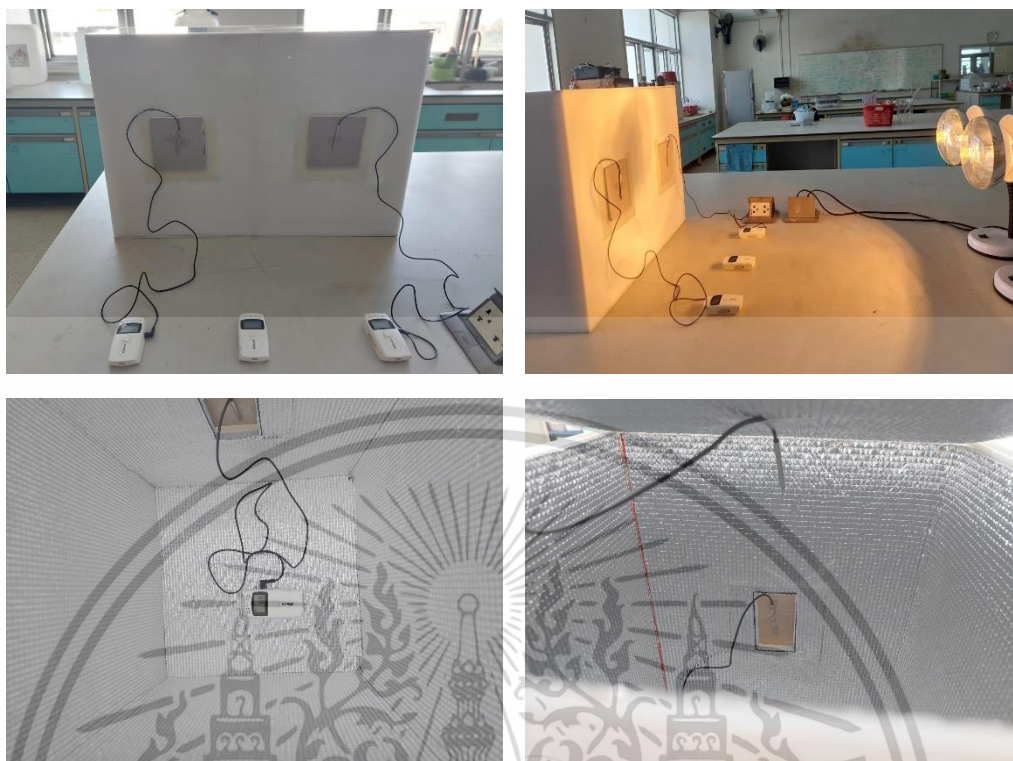
Formular	Component	Weight (g)					
		Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	CaCO ₃	Total	NaF
1	50Fe/50Ca	10	-	10	17.83	20	1.6
2	50Fe/10Al/40Ca	10	2	8	14.26	20	1.6
3	50Fe/20Al/30Ca	10	4	6	10.70	20	1.6
4	50Fe/30Al/20Ca	10	6	4	7.13	20	1.6
5	50Fe/40Al/10Ca	10	8	2	3.57	20	1.6
6	50Fe/50Al	10	10	-	-	20	1.6

3.4 การทดสอบความสามารถในการสะท้อนความร้อนเมื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นสีทาอาคาร

เตรียมสีทาอาคารโดยการผสมผงสีตัวอย่างจากการสังเคราะห์ : สีทาอาคารสีขาว : น้ำ ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 1 : 4 : 1 คนส่วนผสมทั้งหมดให้เข้ากัน จากนั้นตัดแผ่นผ้าใยขัดสีขาวขนาด 10 เซนติเมตร x 10 เซนติเมตร และทาสีรองพื้นสีขาวจำนวน 1 รอบ ทิ้งให้แห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทาสีที่ผสมไว้โดยควบคุมให้มีความหนา 0.5 เซนติเมตร โดยทาประมาณ 1 รอบ

จัดชุดอุปกรณ์กล่องทดสอบตามรูปที่ 3.3 ซึ่งประกอบขึ้นจากแผ่นอะคริลิกที่มีขนาดกว้าง 30 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร และยาว 30 เซนติเมตร จำนวน 2 กล่องติดกัน ภายในกล่องทดสอบบุด้วยแผ่นฉนวนป้องกันความร้อน ทำการทดสอบโดยการนำแผ่นทดสอบที่ผ่านการทาดำด้วยชั้นเคลือบของผงสีสะท้อนความร้อนวางไว้ที่ผนังด้านหน้าของกล่อง และปิดกล่องให้สนิทเพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อน จากนั้นให้ความร้อนโดยใช้แหล่งกำเนิดความร้อนคือหลอดไฟอินฟราเรดขนาด 250 วัตต์ ฉายไปยังแผ่นทดสอบที่ติดอยู่ด้านหน้าของกล่องให้มีระยะห่างระหว่างกล่องทดสอบและหลอดไฟเท่ากับ 60 เซนติเมตร ทำการวัดอุณหภูมิ 4 ตำแหน่ง ประกอบด้วย อุณหภูมิภายในและภายนอกกล่องทดสอบ และอุณหภูมิที่ผิวด้านนอกและด้านในแผ่นทดสอบเปรียบเทียบกับ โดยบันทึกอุณหภูมิบนพื้นผิวทุก ๆ 30 วินาที ต่อเนื่องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำการทดสอบซ้ำ 2 ครั้งต่อตัวอย่าง และนำมาหาค่าเฉลี่ยอุณหภูมิในช่วงที่อุณหภูมิคงที่เพื่อรวบรวมข้อมูล [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ชุดอุปกรณ์การทดสอบความสามารถในการสะท้อนความร้อน

3.5 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์และสมบัติของผงสี

3.5.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer; XRD)

เป็นเครื่องมือที่อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบบนผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่าง ๆ กัน ใช้ในการวิเคราะห์เชิงโครงสร้างของวัสดุที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (non-destructive analysis) สามารถวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (crystalline structure) ของสารประกอบที่อยู่ในสารตัวอย่าง ได้ทั้งในรูปแบบผง (powder) และแบบฟิล์มบาง (thin film) ผลการวิเคราะห์จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างผลึก และระนาบผลึกของสารตัวอย่าง โดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่าง ๆ ไปเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) ซึ่งสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบโครงสร้างผลึก และระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมที่ต่างกัน ทำให้สามารถแยกประเภทและชนิดของสารได้ [52] โดยรูปที่ 3.4 แสดงเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ Bruker รุ่น D8 Advance [52]

3.5.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer; FT-IR)

เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์สามารถวิเคราะห์โครงสร้างประกอบทางโครงสร้างเคมี พันธะเคมี และหมู่ฟังก์ชัน ใช้วิเคราะห์หาได้ทั้งกับสารอนินทรีย์ (inorganic) และสารอินทรีย์ (organic) โดยใช้การวัดปริมาณของแสงที่ถูกดูดกลืนจากการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่นของอินฟราเรดช่วงกลาง (middle infrared region) ที่มีความยาวคลื่นในช่วง 2.5 ถึง 50 มิลลิเมตรเมตร หรือช่วงเลขคลื่นที่ 4000 ถึง 400 cm^{-1} เนื่องจากเมื่อโมเลกุลดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่มีพลังงานพอเหมาะตรงกับค่าเฉพาะของโมเลกุล ทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่น (vibration) และการหมุน (rotation) มีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) ซึ่งพลังงานกระตุ้นที่ทำให้ดูดกลืนรังสีอินฟราเรดจะเป็นค่าเฉพาะของแต่ละพันธะ ทำให้สามารถตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารหรือโครงสร้างทางเคมีได้ โดยข้อมูลที่ได้จะเป็นอินฟราเรดสเปกตรัม (infrared spectrum) ซึ่งเทคนิคนี้สามารถทำการตรวจวิเคราะห์ได้ทั้งในรูปของเหลวและของแข็ง เป็นเทคนิคที่ไม่ยุ่งยาก ใช้เวลาในการประมวลน้อย [53] แสดงเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ดังรูปที่ 3.5

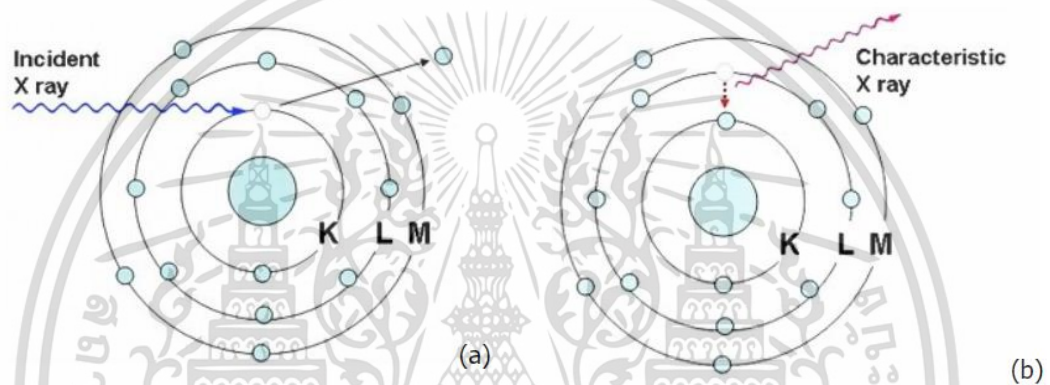


รูปที่ 3.5 เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ [54]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3 การวิเคราะห์ธาตุและปริมาณของธาตุด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence; XRF)

เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์เป็นเครื่องมือที่ใช้หาชนิดและปริมาณของธาตุ โดยใช้รังสีเอ็กซ์ในการยิงเข้าไปสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ เมื่อรังสีเอ็กซ์ไปตกกระทบกับอิเล็กตรอนในวงโคจร เกิดการถ่ายโอนพลังงานให้อิเล็กตรอนจนเป็นผลให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจร เกิดช่องว่าง อิเล็กตรอนวงนอกจึงมาแทนที่ตำแหน่งที่อิเล็กตรอนหลุดไป โดยการอิเล็กตรอนวงนอกมาแทนที่ทำให้เกิดมีการคายพลังงานในรูปแบบรังสีเอ็กซ์ออกมา ซึ่งในแต่ละธาตุจะคายรังสีเอ็กซ์ส่วนเกินที่มีพลังงานจำเพาะ (characteristic X-ray) เฉพาะของแต่ละธาตุออกมา ทำให้ทราบได้ว่าเป็นธาตุชนิดใด อธิบายดังรูปที่ 3.6 [55] และรูปที่ 3.7 แสดงเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์



รูปที่ 3.6 (a) รังสีเอ็กซ์พลังงานสูงทำให้อิเล็กตรอนในชั้น K หลุดออกไปจากวงโคจร (b) อิเล็กตรอนในชั้น M หรือ L ที่มีพลังงานสูงกว่าลงมาแทนที่ โดยคายรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานจำเพาะออกมา [55]



รูปที่ 3.7 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ [56]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างโมเลกุลด้วยเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ (Raman spectrometer)

เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของโมเลกุล โดยการวัดการกระเจิงของแสง ซึ่งในเทคนิคนี้จะมีการให้ลำแสงเลเซอร์ยิงไปที่โมเลกุลของสารตัวอย่าง เมื่อโมเลกุลถูกกระตุ้นจากแสงเลเซอร์ที่มีความเข้มข้นสูงจะทำให้เกิดการกระเจิงแสงออกมา โดยหากแสงที่กระเจิงออกมามีค่าความยาวเท่ากับแสงเลเซอร์จะเรียกว่า แสงเลย์โร (Rayleigh scatter) ส่วนรามาน (Raman scatter) คือแสงที่กระเจิงออกมามีค่าไม่เท่าความยาวคลื่นไม่กับแสงเลเซอร์ที่ยิงไปในตอนแรก โดยแสงรามานที่ออกมาจะสามารถนำมาคำนวณเพื่อหาพลังงานที่ใช้ในการสั่นของภายในโมเลกุลได้ ทำให้สามารถนำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของโมเลกุลได้ [57] โดยรูปที่ 3.8 แสดงการเกิดลำแสงรามาน และรูปที่ 3.9 แสดงเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์



รูปที่ 3.8 การเกิดรามาน โดยการกระเจิงในลูกศรสีเขียว คือ แสงเลย์โร และสีส้ม คือ ลำแสงรามาน [57]



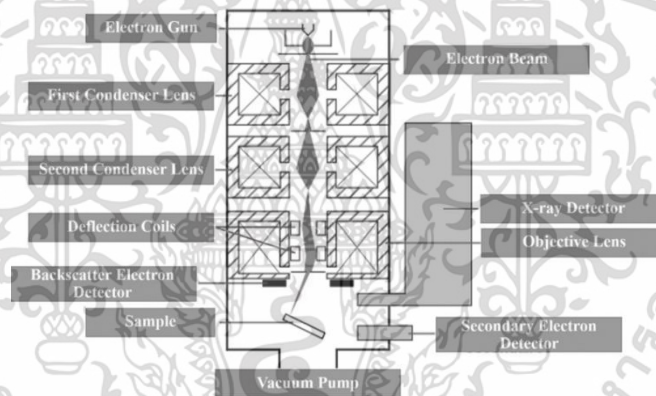
รูปที่ 3.9 เครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ [58]

3.5.5 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)

เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ศึกษาสารตัวอย่างได้โดยใช้การกราดลำอิเล็กตรอนบนพื้นผิว เอกสารนี้เป็นเอกสารทูลงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับถวายเป็นประโยชน์ด้านการค้าของสารตัวอย่าง แล้วนำสัญญาณที่ได้จากการที่อิเล็กตรอนกระเจิงกลับไปสร้างเป็นภาพ โดยภาพที่ได้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเครื่อง SEM จะมีลักษณะเป็นภาพเสมือน 3 มิติที่มีระยะชัดลึกสูง เนื่องจากการใช้อิเล็กตรอนที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่าคลื่นแสง และใช้เลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าแทนเลนส์กระจก ใช้ในการศึกษา สัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของสารตัวอย่าง

หลักการทำงานเริ่มจากปืนอิเล็กตรอน (electron gun) หรือ แคโทด (cathode) ปล่อยอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) ออกมา อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นถูกดูดลงด้านล่างด้วยแผ่นแอโนด (anode plate) ผ่านชุดเลนส์คอนเดนเซอร์ (condenser lens) ที่ทำหน้าที่ในการควบคุมกระแสของลำอิเล็กตรอน และช่วยปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็กลงเพื่อเพิ่มความเข้มของลำอิเล็กตรอน จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะวิ่งลงมาผ่านเลนส์วัตถุ (objective lens) ที่ทำหน้าที่ปรับจุดโฟกัสของลำอิเล็กตรอนให้ตรงกับผิวสารตัวอย่าง โดยมีชุดขดลวดควบคุมการกวาด (scan coil) ช่วยควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนพื้นผิวตัวอย่าง หลังจากการกวาดลำอิเล็กตรอนลงบนสารตัวอย่างทำให้เกิดการปลดปล่อยสัญญาณอิเล็กตรอนออกมา สามารถนำไปประมวลผลใช้ในการศึกษาลักษณะผิวและวิเคราะห์ธาตุที่มีในสารตัวอย่างได้ [59] โดยรูปที่ 3.10 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และรูปที่ 3.11 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 3.10 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [59]



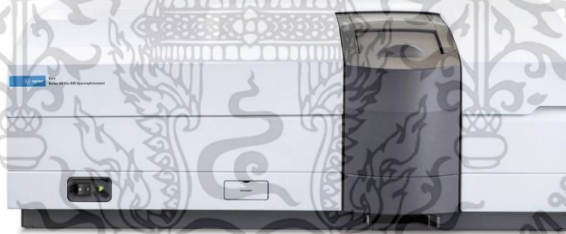
รูปที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [60]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.6 การตรวจสอบวัดค่าการสะท้อนด้วยเครื่องยูวี วิซิเบิล เอ็นไออาร์ สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS-NIR spectrophotometer)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดคุณสมบัติทางแสงทั้งการสะท้อนแสง (reflectance) การส่องผ่านของแสง (transmittance) และการดูดกลืนแสง (absorbance) ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet) ถึงอินฟราเรดย่านใกล้ (near infrared) โดยมีช่วงความยาวคลื่นที่สามารถทดสอบได้ตั้งแต่ 175 ถึง 3300 นาโนเมตร มีระบบการวัดการดูดกลืนแสงเป็นแบบลำแสงคู่ (double beam spectrophotometer) เป็นเทคนิคที่วิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ [61] ส่วนประกอบหลัก ๆ คือ

1. แหล่งกำเนิดแสง ใช้หลอดดิวเทอเรียม (deuterium lamp) เป็นแหล่งกำเนิดแสงช่วงอัลตราไวโอเล็ต และใช้หลอดทังสเตนฮาโลเจน (tungsten halogen lamp) เป็นแหล่งกำเนิดแสงในช่วงตามองเห็นและอินฟราเรดย่านใกล้
2. โมโนโครมาเตอร์ (monochromator) 2 ชุด ชุดแรกเป็นปริซึมรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าทำจากผลึกซิลิกา (anhydrous fused quartz) ทำหน้าที่เป็นตัวรับและกระจายแสง ชุดที่สองทำหน้าที่แยกคลื่นแสงออกเป็นคลื่นเดี่ยว 2 ช่วงคลื่นที่ต่อเนื่องกัน คือ ช่วงอัลตราไวโอเล็ต และช่วงอินฟราเรดย่านใกล้
3. หัววัด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร โดยใช้เป็นหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (photomultiplier tube) ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและช่วงที่ตามองเห็น และ คูสโทป์โพสิทีฟคริสตัลไลน์ เลด(II) ซัลเฟต (cooled type PbS) ในช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ [62] แสดงเครื่องยูวี วิซิเบิล เอ็นไออาร์ สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เครื่องยูวี วิซิเบิล เอ็นไออาร์ สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ [63]

3.5.7 การวิเคราะห์ค่าแถบพลังงาน (Band gap energy; E_g) ด้วยเครื่องยูวี วิซิเบิล ดิฟฟิวซ์ รีเฟลคแทนซ์ สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Diffuse Reflectance Spectrophotometer)

เป็นเครื่องตรวจวัดค่าการสะท้อนรังสี โดยเทคนิคการวัดค่าการสะท้อนแสงแบบกระจาย ใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติทางแสงเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างของแข็งในลักษณะผง พื้นผิวมีลักษณะขรุขระ โดยข้อมูลที่ได้จะเป็นสเปกตรากการดูดกลืนแสงสามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์หาค่าแถบพลังงาน (Band gap energy; E_g) ได้ [64] แสดงเครื่องยูวี วิซิเบิล ดิฟฟิวซ์ รีเฟลคแทนซ์ สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ดังรูปที่ 3.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 เครื่องยู่วี วิชิเบล ดิฟฟิวซ์ รีเฟลคแทนซ์ สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ [65]

3.5.8 การตรวจสอบค่าสีด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าสีที่ใช้แทนสายตามนุษย์ สามารถวัดสีของสารตัวอย่างออกมาเป็นตัวเลขได้ จากการวัดปริมาณการสะท้อนแสงของสารเทียบกับมาตรฐานอ้างอิงที่เป็นกราฟการสะท้อนแสง (reflectance curve) โดยสารที่มีสีต่างกันจะมีกราฟการสะท้อนแสงที่ต่างกัน และเมื่อสะท้อนแสงนั้นสีที่ออกมาจะมีความยาวคลื่นที่ต่างกัน โดยสีน้ำเงิน มีความยาวคลื่น 430 – 460 นาโนเมตร สีเขียว มีความยาวคลื่น 500 – 580 นาโนเมตร และสีแดง มีความยาวคลื่น 620 – 780 นาโนเมตร โดยระบบการวัดสีในเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์มีอยู่หลายระบบ คือ ระบบ Munsell, ระบบ Tristimulus Value, ระบบ Chromaticity coordinate และระบบ CIE L*a*b* โดยในระบบนี้ได้มีการกำหนดให้แกน L* เป็นค่าบอกความสว่าง จาก 0 คือสีดำ ถึง 100 คือสีขาว แกน a* แสดงค่าสีเขียว (-a*) ถึงสีแดง (+a*) แกน b* แสดงค่าสีน้ำเงิน (-b*) ถึงสีเหลือง (+b*) มีค่าแสดงเฉดสีหรือมุมของสี (hue angle; h*) ซึ่งมีหน่วยเป็นองศา ส่วนค่าโครมา (chroma; C*) บอกถึงความอิ่มตัวของสี และสามารถบอกความแตกต่างของสีโดยรวมระหว่างสีตัวอย่างและสีตัวอย่างมาตรฐานได้จากการคำนวณ " ΔE^* " [43] โดยแสดงเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ [66]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาการพัฒนาผงสีสะท้อนรังสีอินฟราเรดจากเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่ได้จากสารตั้งต้นเปลือกไข่โดยสังเคราะห์ด้วยกระบวนการปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง (solid state reaction) ซึ่งประกอบไปด้วยผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ สันฐานวิทยา การวัดค่าพิกัดสี การทดสอบสมบัติเชิงแสง การทดสอบการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ และการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นสีทาอาคาร

4.1 การศึกษาปริมาณของธาตุองค์ประกอบ

จากการที่ได้นำผงสีทางการค้าและผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นไปวิเคราะห์ปริมาณของธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทสโกปี (X-ray Fluorescence; XRF) แสดงดังตารางที่ 4.1-4.4 พบว่าเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ผงสีประกอบด้วยเหล็กออกไซด์ร้อยละ 96.3 โดยน้ำหนักและมีออกไซด์อื่นเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P_2O_5) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) โครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) แมงกานีสออกไซด์ (MnO) โคบอลต์ออกไซด์ (Co_2O_3) และในส่วนของสารตั้งต้นอื่น ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่พบว่ามีแคลเซียมออกไซด์อยู่ร้อยละ 98.0 โดยน้ำหนักและมีออกไซด์อื่นเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) โซเดียมออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ ซิลิกอนไดออกไซด์ ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ สตรอนเชียมออกไซด์ (SrO) เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO_2) และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นมีอะลูมิเนียมออกไซด์อยู่ที่ร้อยละ 99.6 โดยน้ำหนักและมีโซเดียมออกไซด์ ซิลิกอนไดออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ เจอร์เมเนียมออกไซด์ (Ge_2O_3) นอกจากนี้ผงสีน้ำตาลทางการค้า (Brown 6819) มีอัตราส่วนของเหล็กออกไซด์ร้อยละ 93.7 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลัก อัตราส่วนของอะลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 0.608 แคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 0.0895 นอกจากนี้ยังมีธาตุอื่น ๆ เป็นองค์ประกอบ คือ ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ ซิลิกอนไดออกไซด์ ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ โคบอลต์ออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) นิกเกิลออกไซด์ (NiO) นอกจากนี้ในผงสีน้ำตาลทางการค้ายังมีโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) เลททอนออกไซด์ (PbO) คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) โครเมียมออกไซด์ แมงกานีสออกไซด์ และอาเซนิกไดออกไซด์ (As_2O_3) เป็นธาตุองค์ประกอบที่เป็นอันตรายและมีพิษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของสารตั้งต้น

องค์ประกอบ	องค์ประกอบออกไซด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)																	
	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SO ₃	CaO	ZnO	Na ₂ O	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	K ₂ O	ZrO ₂	Co ₂ O ₃	Ge ₂ O ₃	MgO	SrO	SUM
Pure Fe ₂ O ₃	96.300	0.571	0.155	0.019	2.210	0.039	0.176	0.314	0.023	0.023	0.121	-	-	0.036	-	-	-	100
Pure Al ₂ O ₃	0.032	0.0372	99.600	-	-	0.0582	-	0.258	-	-	-	-	-	-	0.0113	-	-	100
CaO	0.055	0.114	0.050	0.400	0.211	98.000	-	0.104	-	-	-	0.027	0.023	-	-	0.947	0.059	100

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของผงสีน้ำตาลทางการค้า (Brown 6819)

องค์ประกอบ	องค์ประกอบออกไซด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)																		
	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SO ₃	CaO	ZnO	Na ₂ O	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	K ₂ O	CuO	Co ₂ O ₃	As ₂ O ₃	MgO	NiO	PbO	SUM
Brown 6819	93.7	1.92	0.608	0.036	0.675	0.895	0.210	0.176	0.772	0.025	0.409	0.090	0.042	0.025	0.067	0.028	0.020	0.075	100

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบหลักของผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น

สูตร	องค์ประกอบ	องค์ประกอบออกไซด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)					
		Fe ₂ O ₃		Al ₂ O ₃		CaO	
		ทฤษฎี	ทดลอง	ทฤษฎี	ทดลอง	ทฤษฎี	ทดลอง
1	50Fe/50Ca	50.00	50.90	-	-	50.00	47.13
2	50Fe/10Al/40Ca	50.00	52.20	10.00	7.50	40.00	38.60
3	50Fe/20Al/30Ca	50.00	50.10	20.00	18.00	30.00	28.80
4	50Fe/30Al/20Ca	50.00	50.18	30.00	28.20	20.00	18.10
5	50Fe/40Al/10Ca	50.00	46.80	40.00	41.10	10.00	9.07
6	50Fe/50Al	50.00	46.01	50.00	50.50	-	-

หมายเหตุ : การคำนวณร้อยละโดยน้ำหนักทางทฤษฎีของผงสีไม่รวมปริมาณของโซเดียม-ฟลูออไรด์ (NaF) ที่ใช้เป็นสารช่วยหลอมเนื่องจากการกำจัดออกในขั้นตอนการสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบของสารเจือปนในผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น

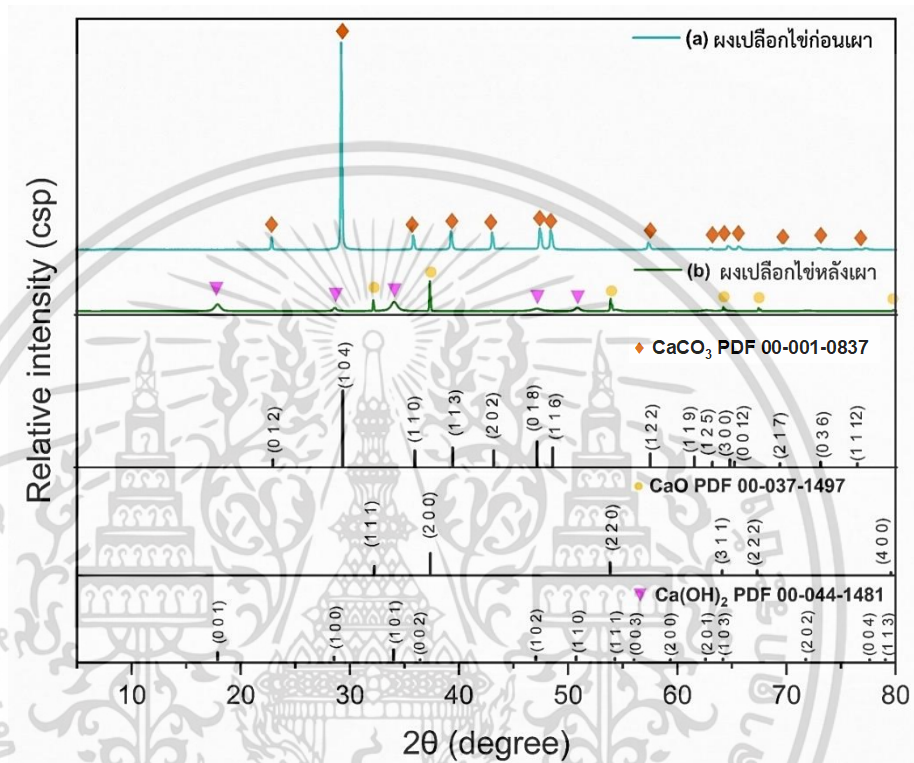
สูตร	องค์ประกอบ	องค์ประกอบออกไซด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)										
		SiO ₂	Na ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃	MnO	ZnO	SrO	ZrO ₂	K ₂ O	Cr ₂ O ₃
1	50Fe/50Ca	0.515	0.177	0.530	0.267	0.061	0.061	0.093	0.023	0.122	-	-
2	50Fe/10Al/40Ca	0.594	0.154	0.276	0.236	0.192	0.082	0.085	0.019	0.092	-	-
3	50Fe/20Al/30Ca	0.566	0.984	0.248	0.175	1.370	0.065	0.092	0.012	0.080	0.015	-
4	50Fe/30Al/20Ca	0.469	2.030	0.182	0.129	0.293	0.076	0.088	0.009	0.138	0.039	-
5	50Fe/40Al/10Ca	0.449	4.660	0.112	0.064	0.023	0.056	0.074	0.007	0.151	0.061	0.021
6	50Fe/50Al	0.580	1.70	-	0.011	0.043	0.056	0.085	-	0.232	0.175	0.023

จากการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุองค์ประกอบของผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น โดยมีเหล็กออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ เป็นองค์ประกอบที่ร้อยละโดยน้ำหนักต่าง ๆ โดยได้ทำการสังเคราะห์ผงสีทั้งหมด 6 สูตร ได้แก่ สูตรที่ 1 (50Fe/50Ca) สูตรที่ 2 (50Fe/10Al/40Ca) สูตรที่ 3 (50Fe/20Al/30Ca) สูตรที่ 4 (50Fe/30Al/20Ca) สูตรที่ 5 (50Fe/40Al/10Ca) และสูตรที่ 6 (50Fe/50Al) และใช้โซเดียมฟลูออไรด์เป็นสารช่วยหลอม โดยทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่ามีร้อยละโดยน้ำหนักขององค์ประกอบของสารที่ใช้ในการสังเคราะห์มีใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี ซึ่งการมีสารเจือปนในสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์มีผลให้ค่าร้อยละขององค์ประกอบแตกต่างจากค่าทฤษฎีเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.4 โดยในผงสีที่ทำการสังเคราะห์มีสารเจือปน คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ร้อยละ 0.449 - 0.594 โซเดียมออกไซด์ร้อยละ 0.117 - 4.660 แมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 0.112 - 0.530 ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ร้อยละ 0.0175 - 0.0301 ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ร้อยละ 0.023 - 1.370 แมงกานีสออกไซด์ ร้อยละ 0.056 - 0.082 ซิงค์ออกไซด์ ร้อยละ 0.074 - 0.093 สตรอนเชียมออกไซด์ร้อยละ 0.007 - 0.023 เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 0.080 - 0.232 และในสูตรที่ 3 สูตรที่ 4 สูตรที่ 5 และสูตรที่ 6 พบสารประกอบโปแตสเซียมออกไซด์ ร้อยละ 0.015, 0.039, 0.061 และ 0.212 ตามลำดับ โดยในสูตรที่ 5 และสูตรที่ 6 จะพบโครเมียมออกไซด์ร้อยละ 0.021 และ 0.023 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาโครงสร้างผลึก

ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกโดยใช้เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer; XRD) ของสารตั้งต้นแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ ผงสีทางการค้า และผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นจากการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 4.1 – 4.3

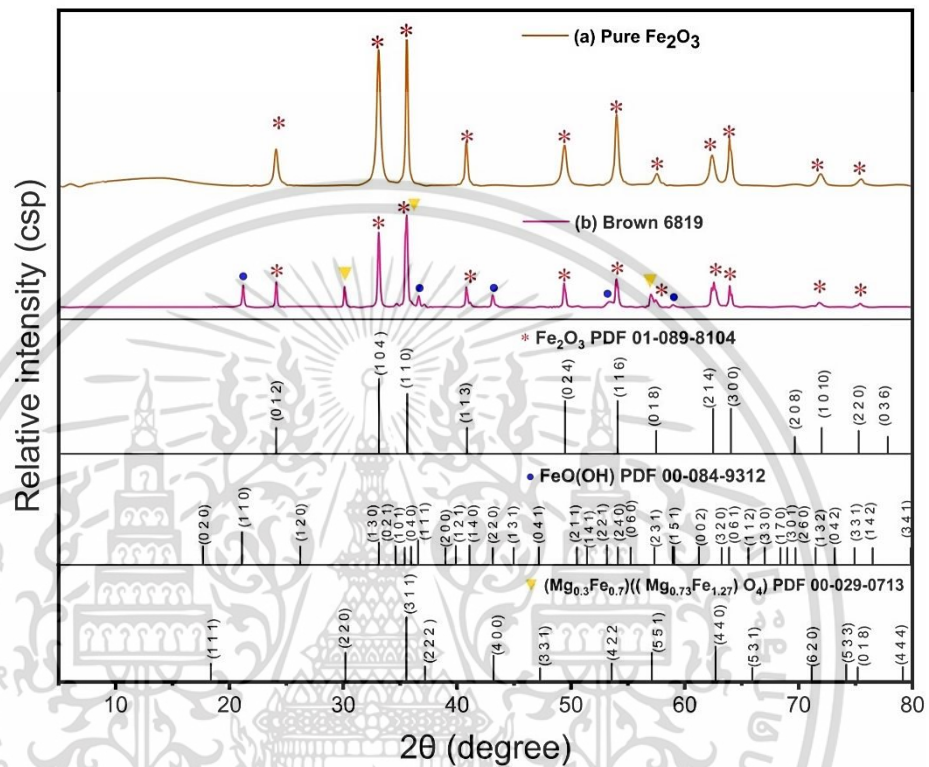


รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (a) ผงเปลือกไข่ก่อนเผา และ (b) ผงเปลือกไข่หลังเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

รูปที่ 4.1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงเปลือกไข่ก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยผงเปลือกไข่ก่อนเผาพบว่าการเลี้ยวเบนขึ้นตำแหน่ง 2θ ที่ 8.84, 29.26, 35.84, 39.28, 43.04, 46.99, 47.39, 48.41, 57.31, 61.29, 62.95, 64.59, 69.10, 72.81 และ 76.23 ตรงกับระนาบการเลี้ยวเบน (012), (104), (110), (113), (202), (024), (116), (122), (119), (125), (300), (217), (128) และ (220) ตามลำดับซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนตามไฟล์มาตรฐานของแคลเซียมคาร์บอเนต (calcite; CaCO₃; PDF หมายเลข 00-001-0837) อยู่ในกลุ่มผลึก 167 : *R-3c* ส่วนผงเปลือกไข่หลังเผามีรูปแบบการเลี้ยวเบนขึ้นตำแหน่ง 2θ ที่ 32.20, 37.36, 53.87, 64.15, 67.38 และ 79.67 ตรงกับระนาบการเลี้ยวเบน (111), (200), (220), (311), (222) และ (400) ตามลำดับซึ่งตรงกับไฟล์มาตรฐานของแคลเซียมออกไซด์ (Lime; CaO; PDF หมายเลข 00-037-1497) อยู่ในกลุ่มผลึก 225 : *Fm-3m* และยังพบรูปแบบการเลี้ยวเบนขึ้นตำแหน่ง 2θ ที่ 32.20, 37.36, 53.87, 64.15, 67.38 และ 79.67 ตรงกับระนาบการเลี้ยวเบน (111), (200),

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(220), (311), (222) และ (400) ตามลำดับซึ่งตรงกับไฟล์มาตรฐานของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide; $\text{Ca}(\text{OH})_2$; PDF หมายเลข 00-044-1481) มีระบบผลึกแบบเฮกซะโกนอล อยู่ในกลุ่มผลึก 164 : $P-3m1$ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการดูดความชื้นของแคลเซียมออกไซด์ ทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ขึ้น



รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงสีทางการค้า (a) Fe_2O_3 และ (b) ผงสีน้ำตาล (Brown 6819)

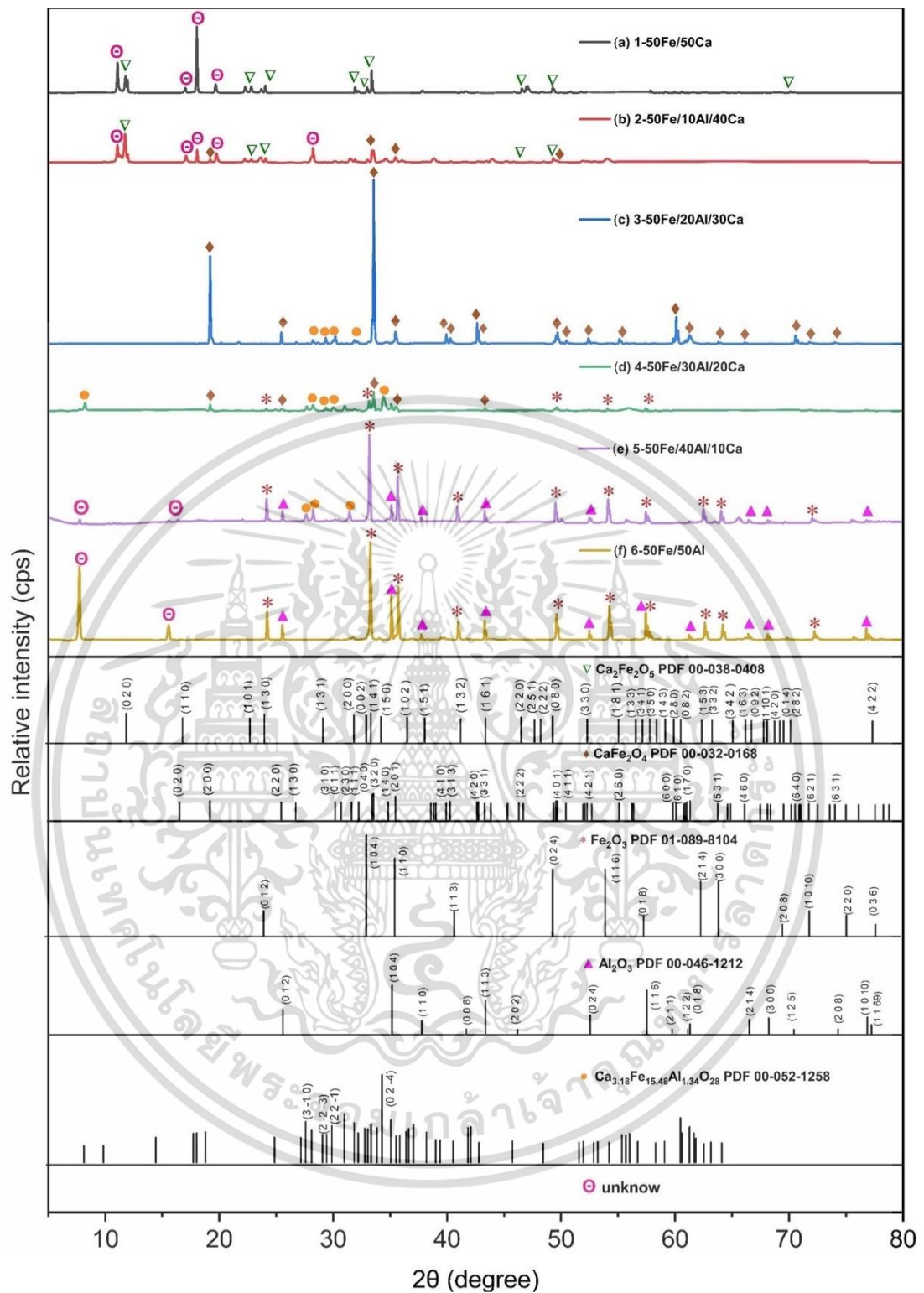
รูปที่ 4.2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ทางการค้า ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ผงสี พบว่ามีรูปแบบการเลี้ยวเบนขึ้นตำแหน่ง 2θ ที่ 24.10, 33.32, 35.60, 40.90, 49.52, 54.14, 62.46, 63.96, 71.79 และ 77.65 ตรงกับระนาบการเลี้ยวเบน (012), (104), (110), (113), (024), (116), (018), (214), (300), (1010) และ (220) ตามลำดับ ซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนตามไฟล์มาตรฐานของเหล็กออกไซด์ฮีมาไทต์ (hematite; Fe_2O_3 ; PDF หมายเลข 01-089-8104) ที่มีระบบผลึกแบบเฮกซะโกนอลและอยู่ในกลุ่มผลึก 167 : $R-3c$ และผงสีน้ำตาลทางการค้า (Brown 6819) มีรูปแบบการเลี้ยวเบนขึ้นตำแหน่ง 2θ ที่ 24.10, 33.32, 35.60, 40.90, 49.52, 54.14, 62.46, 63.96, 71.79 และ 77.65 ตรงกับระนาบการเลี้ยวเบน (012), (104), (110), (113), (024), (116), (018), (214), (300), (1010) และ (220) ตามลำดับ ซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของไฟล์มาตรฐานของเหล็กออกไซด์ฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) แสดงให้เห็นว่าผงเหล็กออกไซด์

ทางการค้าและผงสีน้ำตาลทางการค้า (Brown 6819) มีวัฏภาคหลักเป็นเหล็กออกไซด์ฮีมาไทต์ เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออ่านต่อหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากนำไปใช้

43.19, 54.01, 58.68 ตรงกับระนาบการเลี้ยวเบน (110), (111), (220), (240) และ (151) ตรงตามกับไฟล์มาตรฐานเหล็กออกซิไฮดรอกไซด์โกอิไทต์ (goethite; $\text{FeO}(\text{OH})$); PDF หมายเลข 00-084-9312) มีระบบผลึกเป็นแบบออร์ทอโรมบิกและอยู่ในกลุ่มผลึก 62 : *Pbnm* และยังพบรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง 30.12 และ 57.03 ตรงกับระนาบ (220) และ (511) ตามลำดับ ซึ่งตรงกับไฟล์มาตรฐานเหล็กแมกนีไทต์ที่มีการแทนที่ของไอออนแมกนีเซียมในโครงสร้าง (magnetite; $\text{Mg}_{0.3}\text{Fe}_{0.7}(\text{Mg}_{0.73}\text{Fe}_{1.27})\text{O}_4$; PDF หมายเลข 00-029-0713) ซึ่งอาจมีการแทนที่ของไอออนบวกอื่น ๆ เช่น ไทเทเนียม, แคลเซียมและอะลูมิเนียม เป็นต้น โดยมีระบบผลึกแบบสปินเนล (spinel) อยู่ในกลุ่มผลึก 227 : *Fd-3m* จากผลการศึกษาโครงสร้างผลึกแสดงให้เห็นว่าผงสีน้ำตาลทางการค้า (Brown 6819) มีวัฏภาคหลักคือเหล็กออกไซด์ฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) และมีเหล็กออกซิไฮดรอกไซด์ ($\text{FeO}(\text{OH})$) เป็นวัฏภาครอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงสี่ที่สังเคราะห์ขึ้น (a) สูตรที่ 1 (50Fe/50Ca) (b) สูตรที่ 2 (50Fe/10Al/40Ca) (c) สูตรที่ 3 (50Fe/20Al/30Ca) (d) สูตรที่ 4 (50Fe/30Al/20Ca) (e) สูตรที่ 5 (50Fe/40Al/10Ca) และ (f) สูตรที่ 6 (50Fe/50Al) เทียบกับไฟล์มาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

33.64, 35.53 และ 42.81 ตรงกับระนาบการเลี้ยวเบน (200), (320), (201) และ (331) ตามลำดับซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนตามไฟล์มาตรฐานของฮาร์มันน์ และพบรูปแบบการเลี้ยวเบนตำแหน่ง 2θ ที่ 27.72, 29.56 และ 30.02 ตรงกับระนาบการเลี้ยวเบน (3-10) (2-2-3) และ (22-1) ตามลำดับซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนตามไฟล์มาตรฐานของ SFCA-I เหมือนกับสูตร 3 (50Fe/20Al/30Ca) นอกจากนี้ยังพบรูปแบบการเลี้ยวเบนตำแหน่ง 2θ ที่ 24.24, 33.30, 49.66, 54.30 และ 57.87 ตรงกับระนาบการเลี้ยวเบน (012), (104), (024), (118), และ (018) ซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนตามไฟล์มาตรฐานของเหล็กออกไซด์ฮีมาไทต์ที่เป็นสารตั้งต้นแสดงให้เห็นว่ามีเหล็กออกไซด์ที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาหลงเหลืออยู่ โดยใน (e) สูตรที่ 5 (50Fe/40Al/10Ca) และ (f) สูตรที่ 6 (50Fe/50Al) รูปแบบการเลี้ยวเบนขึ้นตำแหน่ง 2θ ที่ 24.10, 33.32, 35.60, 40.90, 49.52, 54.14, 62.46, 63.96 และ 71.79 ตรงกับระนาบการเลี้ยวเบน (012), (104), (110), (113), (024), (116), (018), (214), (300) และ (1010) ตามลำดับ ซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนตามไฟล์มาตรฐานของเหล็กออกไซด์ฮีมาไทต์และพบรูปแบบการเลี้ยวเบนขึ้นตำแหน่ง 2θ ที่ 25.27, 35.15, 37.77, 43.35, 52.54, 56.12, 61.30, 66.51, 68.19 และ 78.87 ตรงกับระนาบการเลี้ยวเบน (012), (104), (110), (113), (024), (116), (018), (214), (300) และ (1010) ตามลำดับซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนตามไฟล์มาตรฐานของอะลูมิเนียมออกไซด์ (corundum; Al_2O_3 ; PDF หมายเลข 00-046-1212) โดยวิทยุภาคที่พบสอดคล้องกับแผนผังวิทยุภาค ซึ่งเหล็กออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่พบนั้นเป็นสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ผงสี และในสูตรที่ 5 และ 6 ยังพบรูปแบบการเลี้ยวเบนในตำแหน่ง 2θ ที่ 7.74 และ 15.56 ซึ่งไม่สามารถระบุวิทยุภาคได้ นอกจากนี้ในสูตรที่ 5 ยังพบรูปแบบการเลี้ยวเบนขึ้นตำแหน่ง 2θ ที่ 27.72, 28.25 และ 30.02 ตรงกับระนาบการเลี้ยวเบนที่ (3-10), (121) และ (22-1) ซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนตามไฟล์มาตรฐานของ SFCA-I โดยในสูตรที่ 5 และ 6 ที่พบวิทยุภาคหลักคือเหล็กออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ไม่เกิดการทำปฏิกิริยา อาจเป็นผลมาจากอัตราส่วนของอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น การเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็งเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากอะลูมิเนียมออกไซด์มีความเสถียรตัวสูง มีค่าพลังงานอิสระกิบส์ (Gibbs free energy; ΔG) ของปฏิกิริยาระหว่างเหล็กออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์อยู่ที่ -18331.90 J/mol ซึ่งมีค่าติดลบน้อยกว่าเหล็กออกไซด์กับแคลเซียมออกไซด์ที่มีค่าพลังงานอิสระของกิบส์อยู่ที่ -33311.86 J/mol เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเหล็กออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์นั้นเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า [69] โดยตารางที่ 4.5 แสดงวิทยุภาคที่พบในผงสีแต่ละสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

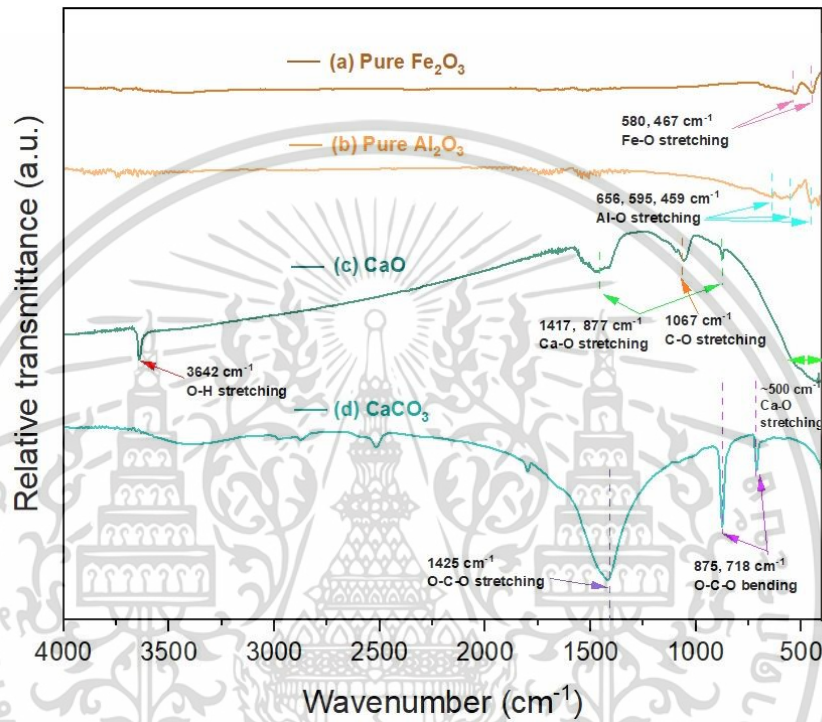
ตารางที่ 4.5 ภูมิภาคที่พบในผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น

สูตร	องค์ประกอบ	ภูมิภาคที่พบ
1	50Fe/50Ca	1. $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ 2. unknown
2	50Fe/10Al/40Ca	1. $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ 2. unknown 3. CaFe_2O_4
3	50Fe/20Al/30Ca	1. CaFe_2O_4 2. $\text{Ca}_{3.18}\text{Fe}_{15.48}\text{Al}_{1.34}\text{O}_{28}$
4	50Fe/30Al/20Ca	1. CaFe_2O_4 2. $\text{Ca}_{3.18}\text{Fe}_{15.48}\text{Al}_{1.34}\text{O}_{28}$ 3. Fe_2O_3
5	50Fe/40Al/10Ca	1. $\text{Ca}_{3.18}\text{Fe}_{15.48}\text{Al}_{1.34}\text{O}_{28}$ 2. Fe_2O_3 3. Al_2O_3 4. unknown
6	50Fe/50Al	1. Fe_2O_3 2. Al_2O_3 3. unknown

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างโมเลกุล

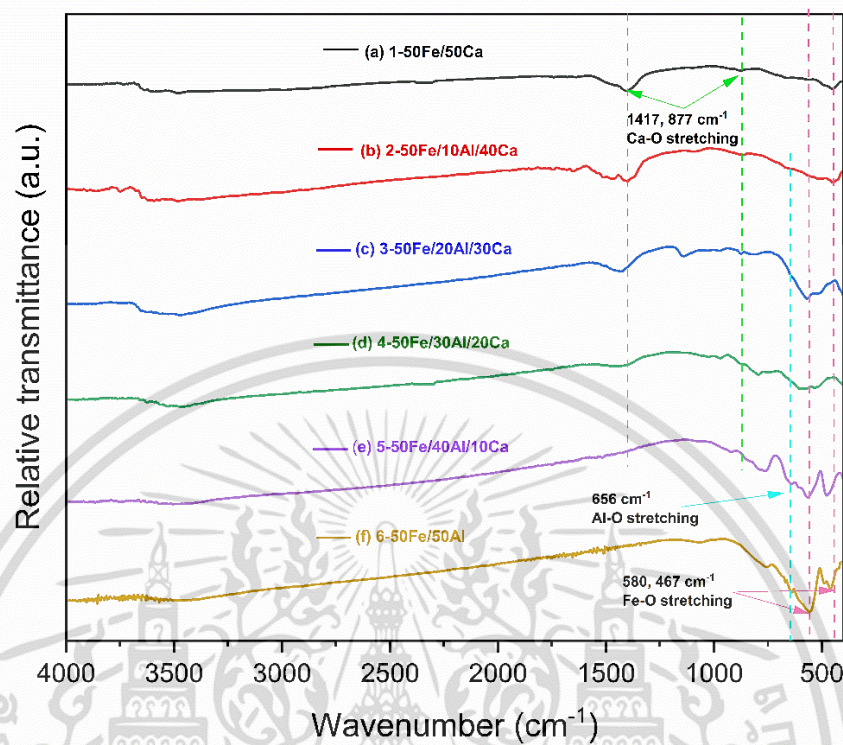
จากผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างโมเลกุลด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer) ในช่วงความยาวคลื่น 400 – 4000 cm^{-1} ของสารตั้งต้นและผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.4 และ 4.5



รูปที่ 4.4 FT-IR สเปกตรัมของผงสีทางการค้า (a) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) (b) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) (c) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และ (d) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3)

ผลการตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างโมเลกุลของสารตั้งต้นซึ่งได้แก่ เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) แสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าเหล็กออกไซด์มีช่วงการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 580 และ 467 cm^{-1} ซึ่งตรงกับรูปแบบการสั่นแบบยืดหด (stretching) ของพันธะ Fe-O [7] ส่วนอะลูมิเนียมออกไซด์พบช่วงการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 656, 595 และ 459 cm^{-1} ซึ่งตรงกับรูปแบบการสั่นแบบยืดหดของพันธะ Al-O [70] และแคลเซียมคาร์บอเนตมีช่วงการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 875 และ 718 cm^{-1} ซึ่งตรงกับรูปแบบการสั่นแบบบิดงอ (bending) ของพันธะ O-C-O และช่วงการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 1425 cm^{-1} ซึ่งตรงกับรูปแบบการสั่นแบบยืดหดของพันธะ O-C-O ของกลุ่มคาร์บอเนต [71] เมื่อแคลเซียมคาร์บอเนตผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส พบว่ามีช่วงการดูดกลืนแสงเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 1417, 877 และ 500 cm^{-1} ซึ่งตรงกับรูปแบบการสั่นแบบยืดหดของพันธะ Ca-O [72, 73] และพบช่วงการดูดกลืนแสงที่ 1067 cm^{-1} ซึ่งตรงกับรูปแบบการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-O [74] ที่เกิดจากการหลงเหลืออยู่ของกลุ่มคาร์บอเนต นอกจากนี้ยังพบช่วงการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 3642 cm^{-1} ซึ่ง

ตรงกับรูปแบบการสั่นแบบยืดหดของพันธะ O-H [75] ที่เกิดจากการดูดซับความชื้น แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงจากแคลเซียมคาร์บอเนตไปเป็นแคลเซียมออกไซด์



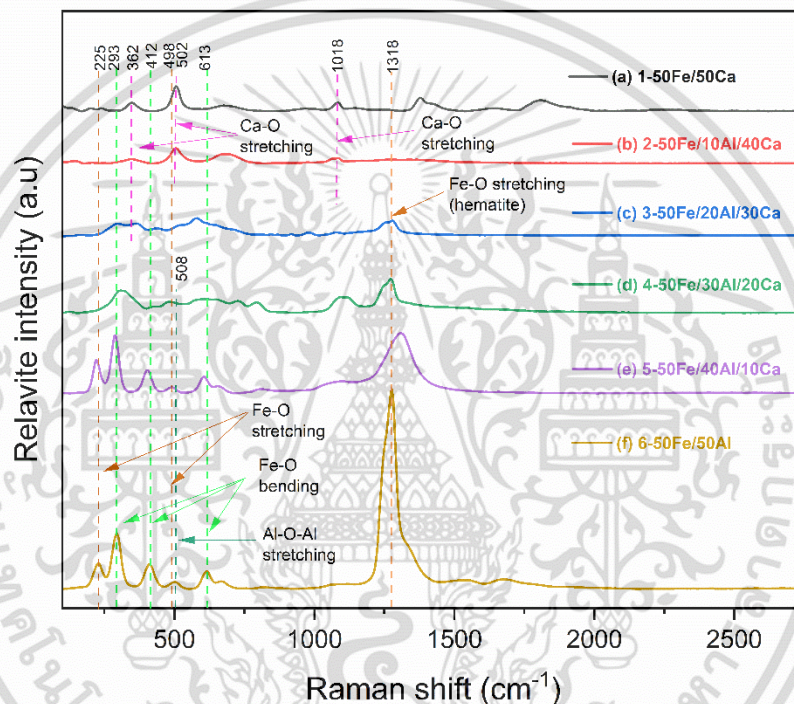
รูปที่ 4.5 FT-IR สเปกตรัมของผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น (a) สูตรที่ 1 (50Fe/50Ca) (b) สูตรที่ 2 (50Fe/10Al/40Ca) (c) สูตรที่ 3 (50Fe/20Al/30Ca) (d) สูตรที่ 4 (50Fe/30Al/20Ca) (e) สูตรที่ 5 (50Fe/40Al/10Ca) และ (f) สูตรที่ 6 (50Fe/50Al)

ผลการตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างโมเลกุลของผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นทั้ง 6 สูตร แสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่าผงสีในสูตรที่ 1 (50Fe/50Ca) สูตรที่ 2 (50Fe/10Al/40Ca) สูตรที่ 3 (50Fe/20Al/30Ca) และสูตรที่ 4 (50Fe/30Al/20Ca) พบช่วงการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 1417 และ 877 cm^{-1} ซึ่งตรงกับรูปแบบการสั่นแบบยืดหดของพันธะ Ca-O ส่วนผงสีในสูตรที่ 5 (50Fe/40Al/10Ca) และสูตรที่ 6 (50Fe/50Al) ซึ่งมีองค์ประกอบร้อยละโดยน้ำหนักของแคลเซียมที่ต่ำไม่พบช่วงการดูดกลืนแสงในช่วงนี้ และมีการพบช่วงการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 656 cm^{-1} ซึ่งตรงกับรูปแบบการสั่นแบบยืดหดของพันธะ Al-O ในผงสีสูตรที่ 5 และ 6 นอกจากนั้นทั้ง 6 สูตรยังพบช่วงการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 580 และ 467 cm^{-1} ซึ่งตรงกับรูปแบบการสั่นแบบยืดหดของพันธะ Fe-O

จากการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ (Raman spectrometer) ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.6 โดยผงสีทุกสูตรพบพีคซึ่งตรงกับช่วงการสั่นของพันธะ Fe-O ของเหล็กออกไซด์ฮีมาไทต์ (hematite Fe_2O_3) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 225 และ 498 cm^{-1} มีรูปแบบการสั่นแบบยืดหด และพีคการสั่นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 293, 412 และ 613 cm^{-1} มีรูปแบบการสั่นแบบบิดงอ [76] และพบพีคการสั่นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 362, 502 และ 1018 cm^{-1} ซึ่งตรงกับช่วงการสั่นแบบยืดหดของพันธะ Ca-O [77, 78] ได้ในผงสีสูตรที่ 1, 2 และ 3 นอกจากนั้น

ในวงสปีตริก 4, 5 และ 6 พบพีคการสั่นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 508 cm^{-1} ซึ่งตรงกับช่วงการสั่นแบบยืดหดของพันธะ Al-O-Al ของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) [79]

โดยจากผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่ออัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของแคลเซียมออกไซด์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ผงสีกลดลงส่งผลให้ความเข้มพีกของพันธะ Ca-O ลดลงด้วยเช่นเดียวกัน และจะเห็นได้ว่าความเข้มพีกของพันธะ Fe-O จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของอะลูมิเนียมออกไซด์ในผงสีเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาโครงสร้างผลึกในหัวข้อ 4.2 ที่แสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนของอะลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้น จะพบวัฏภาคของเหล็กออกไซด์ที่ไม่ทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความเข้มของพีกเหล็กออกไซด์ที่ปรากฏเพิ่มขึ้น



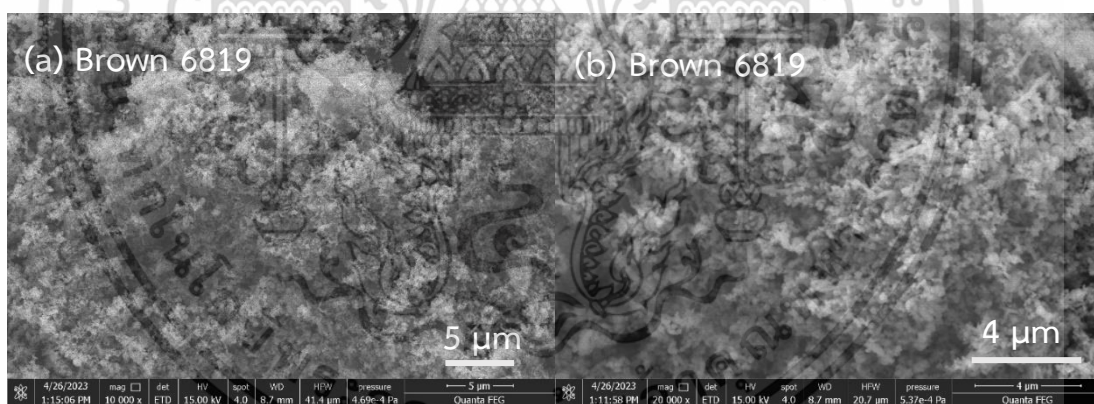
รูปที่ 4.6 รามานสเปกตรัมของผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น (a) สูตรที่ 1 (50Fe/50Ca) (b) สูตรที่ 2 (50Fe/10Al/40Ca) (c) สูตรที่ 3 (50Fe/20Al/30Ca) (d) สูตรที่ 4 (50Fe/30Al/20Ca) (e) สูตรที่ 5 (50Fe/40Al/10Ca) และ (f) สูตรที่ 6 (50Fe/50Al)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การศึกษาสัณฐานวิทยา

ได้ทำการศึกษาสัณฐานวิทยาของผงสีทางการค้าและผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูงชนิดฟิลด์อีมิชัน (field emission scanning electron microscope; FE-SEM) และทำการหาขนาดอนุภาคเฉลี่ยด้วยการใช้โปรแกรม Image J โดยวัดขนาดของอนุภาคแต่ละรูปร่างจาก 100 อนุภาค ซึ่งภาพถ่าย FE-SEM แสดงดังรูปที่ 4.7 – 4.10 และขนาดอนุภาคแสดงในตารางที่ 4.6

จากภาพถ่าย FE-SEM ของผงสีน้ำตาลทางการค้า พบว่ามีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลมขนาดเล็กปะปนกับอนุภาคลักษณะแท่ง มีการกระจายตัวของอนุภาคอย่างสม่ำเสมอ โดยมีขนาดอนุภาคทรงกลมเฉลี่ยเท่ากับ 0.22 ± 0.11 ไมโครเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคที่มีลักษณะแท่งเท่ากับ 0.23 ± 0.10 ไมโครเมตร จากงานวิจัยของกัญญาวีร์ สีนมมงคล และคณะ [80] พบว่าสารตั้งต้นเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) มีลักษณะอนุภาคเป็นแท่งขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 0.7 ± 1.50 ไมโครเมตร อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) มีลักษณะอนุภาคแบบเหลี่ยม ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 3.50 ± 0.69 ไมโครเมตร และจากการวิจัยของกัญญาภัค ศรีปะโค และคณะ [81] พบว่าผงแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) จากเปลือกไข่มีลักษณะอนุภาคเป็นก้อนทรงเหลี่ยมหลากหลายขนาด โดยขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 28.30 ± 5.58 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย FE-SEM ของผงสีน้ำตาลทางการค้า Brown 6819 (a) กำลังขยาย 10,000x และ (b) กำลังขยาย 20,000x

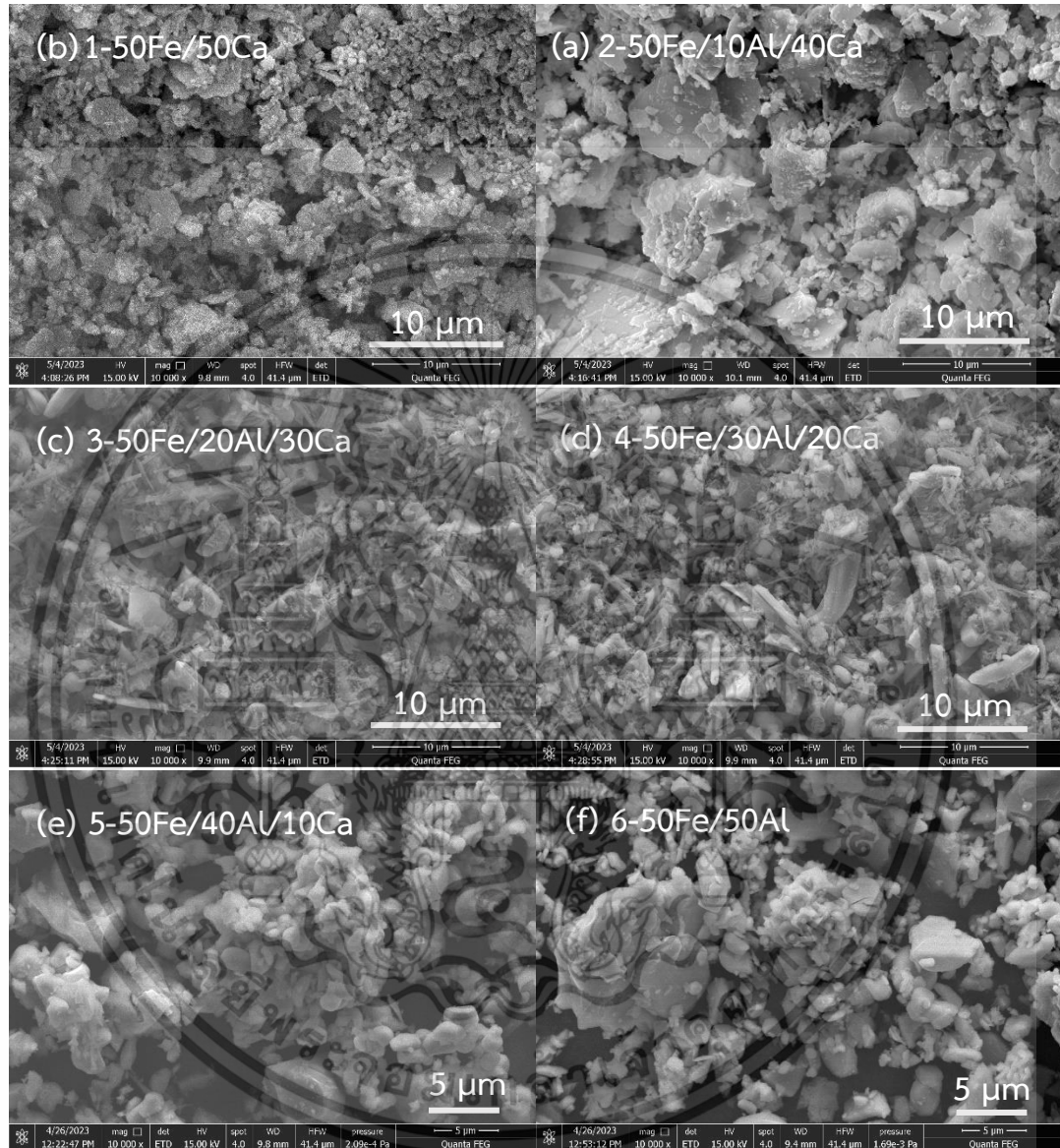
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยและรูปร่างของผงสีทางการค้าและผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น

สูตร	ตัวอย่าง	รูปร่าง	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมโครเมตร) ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
-	Brown 6819	ทรงกลม	0.22 ± 0.11
		แท่ง	0.23 ± 0.10
1	50Fe/50Ca	แผ่น	2.85 ± 0.88
		ทรงกลม	0.94 ± 0.27
2	50Fe/10Al/40Ca	แผ่น	3.44 ± 0.80
		ทรงกลม	0.75 ± 0.12
3	50Fe/20Al/30Ca	รูปร่างไม่แน่นอน	3.01 ± 0.83
		ทรงกลม	0.68 ± 0.21
		แท่ง	0.25 ± 0.08
4	50Fe/30Al/20Ca	รูปร่างไม่แน่นอน	2.99 ± 0.93
		ทรงกลม	0.43 ± 0.15
		แท่ง	0.28 ± 0.13
5	50Fe/40Al/10Ca	รูปร่างไม่แน่นอน	2.49 ± 0.82
		ทรงกลม	0.26 ± 0.11
6	50Fe/50Al	รูปร่างไม่แน่นอน	2.21 ± 0.84
		ทรงกลม	0.31 ± 0.10

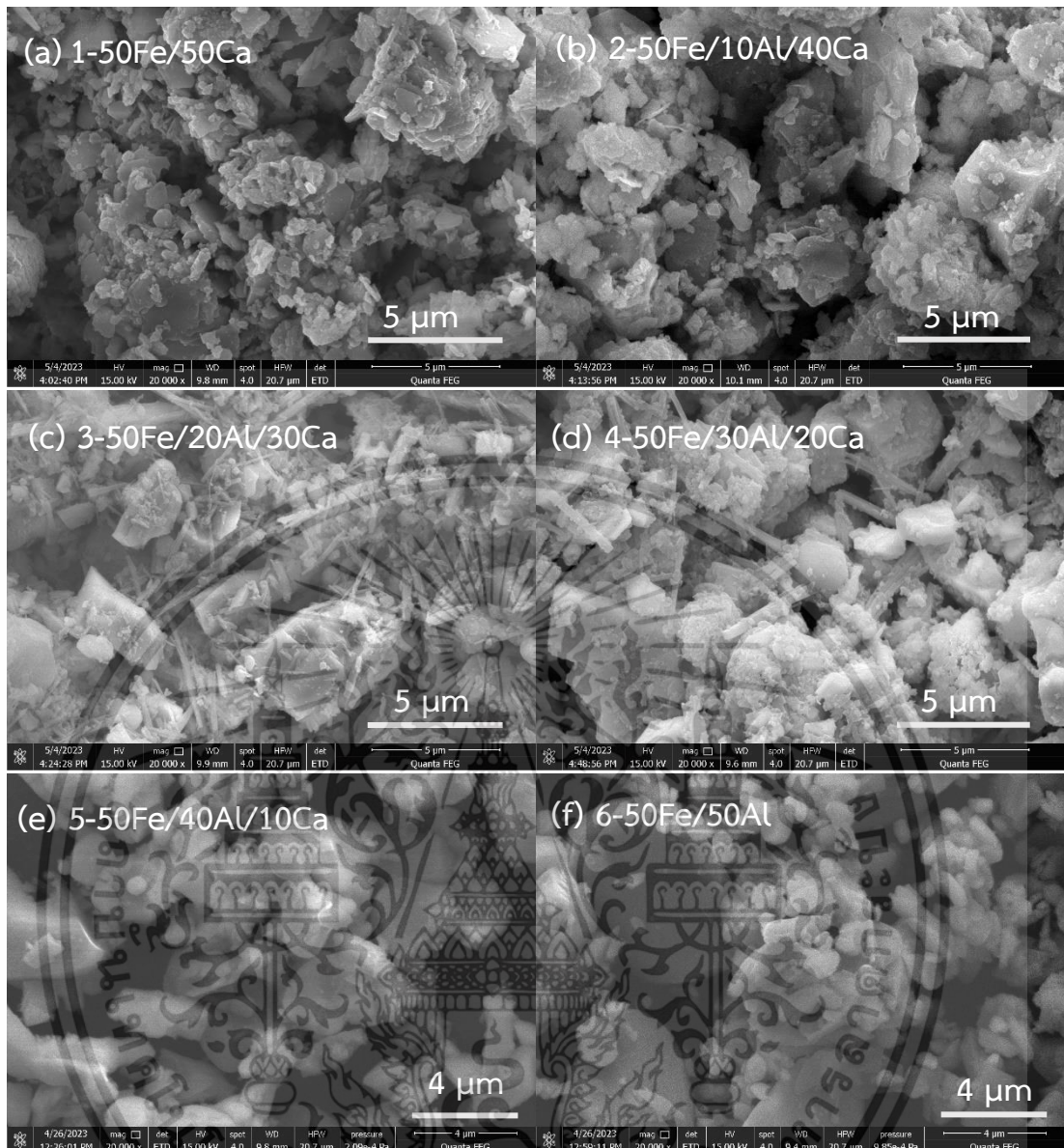
จากการศึกษาสัณฐานวิทยาและขนาดอนุภาคของผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าลักษณะอนุภาคของผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น จะมีลักษณะโดยประกอบด้วยอนุภาคที่เป็นทรงกลมขนาดเล็ก แผ่นที่ซ้อนกันเป็นชั้นขนาดใหญ่หรือมีรูปร่างไม่แน่นอน และบางสูตรจะพบอนุภาคที่เป็นแท่ง โดยผงสีสูตรที่ 1 (50Fe/50Ca) และสูตรที่ 2 (50Fe/10Al/40Ca) จะพบลักษณะอนุภาคที่เป็นแผ่นและทรงกลมขนาดเล็กซึ่งขนาดอนุภาคของทรงกลมของผงสีสูตรที่ 1 จะมีขนาดใหญ่ที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับผงสีสูตรอื่น ส่วนผงสีสูตรที่ 3 (50Fe/20Al/30Ca) และสูตรที่ 4 (50Fe/20Al/30Ca) เป็นสูตรที่มีอัตราส่วนของแคลเซียมออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ใกล้เคียงกัน จะพบอนุภาคทรงกลม มีการเกาะตัวของอนุภาคเป็นรูปร่างไม่แน่นอน และพบอนุภาคเป็นแท่ง ซึ่งจากการพิจารณาร่วมกับวัฏภาคที่พบจากเทคนิค XRD (หัวข้อ 4.2) อนุภาคที่เป็นแท่งอาจเป็นฮาร์มูไนท์ (harmunite; CaFe_2O_4) และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของสารประกอบจาก SEM-EDS ในสูตรที่ 3 และสูตรที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าอนุภาคลักษณะเป็นแผ่นและแท่งขนาดใหญ่มีองค์ประกอบหลักคือเหล็กออกไซด์ ส่วนอนุภาคแท่งขนาดเล็กมีองค์ประกอบหลักคือแคลเซียมออกไซด์ โดยอนุภาคที่มีไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะลูมิเนียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลักมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอและมีการเกาะตัวของอนุภาค ส่วนในสูตรที่ 5 (50Fe/20Al/30Ca) และสูตรที่ 6 (50Fe/50Al) จะพบว่า มีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลมและลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน



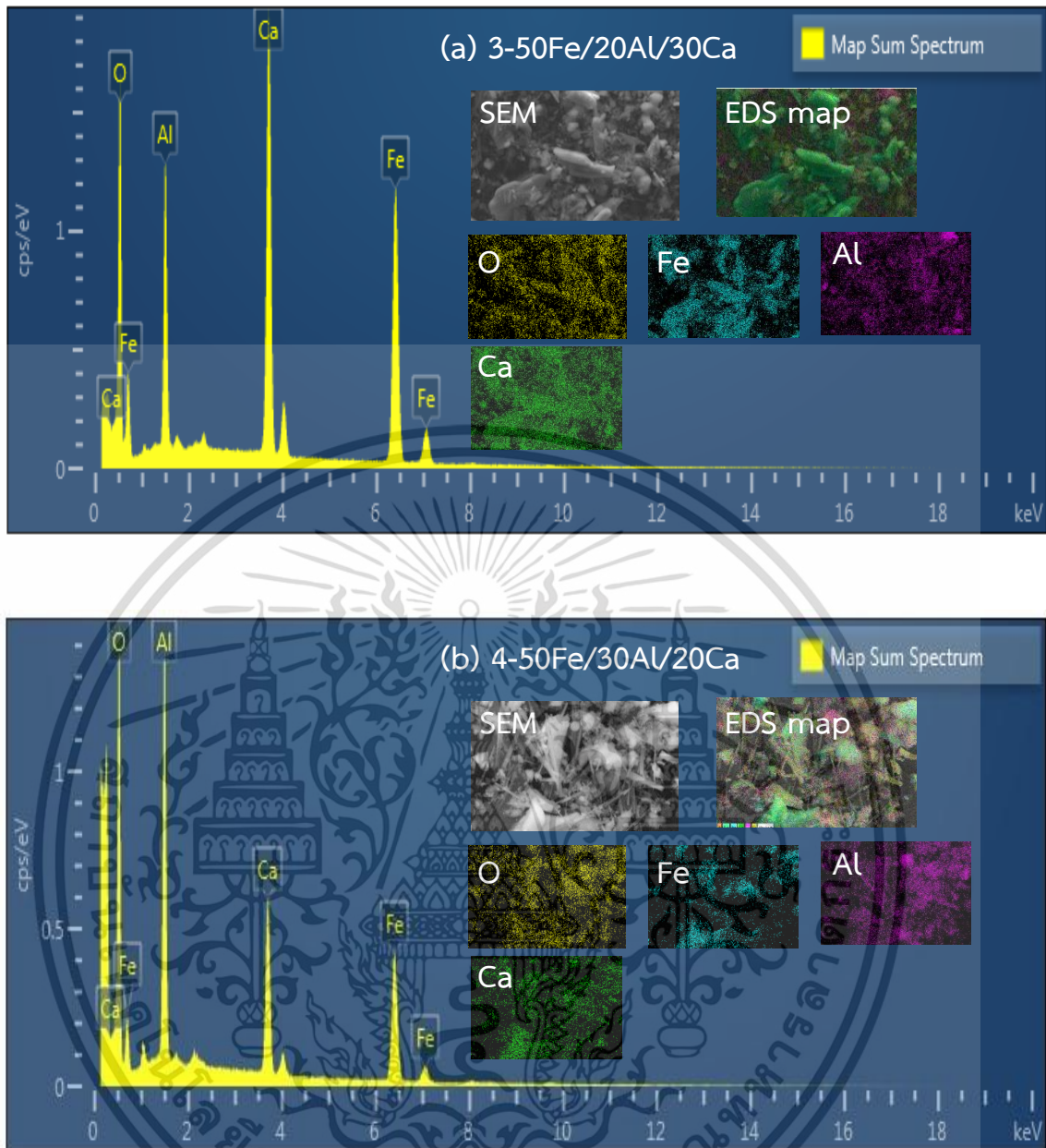
รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย FE-SEM ของผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น (a) สูตรที่ 1 (50Fe/50Ca) (b) สูตรที่ 2 (50Fe/10Al/40Ca) (c) สูตรที่ 3 (50Fe/20Al/30Ca) (d) สูตรที่ 4 (50Fe/30Al/20Ca) (e) สูตรที่ 5 (50Fe/40Al/10Ca) และ (f) สูตรที่ 6 (50Fe/50Al) กำลังขยาย 10,000x

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ภาพถ่าย FE-SEM ของผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น (a) สูตรที่ 1 (50Fe/50Ca) (b) สูตรที่ 2 (50Fe/10Al/40Ca) (c) สูตรที่ 3 (50Fe/20Al/30Ca) (d) สูตรที่ 4 (50Fe/30Al/20Ca) (e) สูตรที่ 5 (50Fe/40Al/10Ca) และ (f) สูตรที่ 6 (50Fe/50Al) กำลังขยาย 20,000x

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้











รูปที่ 4.10 EDS สเปกตรัมและแผนภาพการกระจายตัวของผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น (a) สูตรที่ 3 (50Fe/20Al/30Ca) และ (b) สูตรที่ 4 (50Fe/30Al/20Ca)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การศึกษาค่าพิกัดสี

จากผลการวิเคราะห์ค่าพิกัดสีของผงสีทางการค้าและผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น ด้วยเครื่องวัดค่าพิกัดสี (spectrophotometer) ดังแสดงในตารางที่ 4.7 พบว่าค่าพิกัดสีของผงเหล็กทางการค้า (Fe_2O_3) มีค่าความสว่าง (L^*) เท่ากับ 41.61 มีค่า a^* และ b^* เป็นบวกซึ่งแสดงถึงความเป็นสีแดงและสีเหลืองตามลำดับ โดยค่าความเป็นสีแดง ($+a^*$) เท่ากับ 34.46 และค่าความเป็นสีเหลือง ($+b^*$) เท่ากับ 32.83 และค่าพิกัดสีของผงสีน้ำตาลทางการค้า (Brown 6819) มีค่าความสว่างเท่ากับ 36.61 a^* เท่ากับ 15.22 และ b^* เท่ากับ 16.60 จะเห็นได้ว่าค่าพิกัดสี L^* a^* และ b^* ของผงสีน้ำตาลทางการค้าจะมีค่าน้อยกว่าค่าพิกัดสีของผงเหล็กทางการค้า ผงสีน้ำตาลทางการค้าจึงมีความทึบมากกว่า และแสดงถึงความเป็นสีแดงและสีเหลืองที่น้อยกว่า

ตารางที่ 4.7 ค่าพิกัดสีของผงสีทางการค้าและผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น

สูตร	องค์ประกอบ	ค่าพิกัดสี			รูปภาพ	สีที่ตามองเห็น
		L^*	a^*	b^*		
-	Pure Fe_2O_3	41.61	34.46	32.83		แดงส้ม
-	Brown 6819	36.61	15.22	16.60		น้ำตาล
1	50Fe/50Ca	45.06	11.25	23.84		น้ำตาลเหลือง
2	50Fe/10Al/40Ca	41.07	12.99	22.11		น้ำตาล
3	50Fe/20Al/30Ca	47.53	6.42	6.13		เทา
4	50Fe/30Al/20Ca	42.84	11.48	10.02		ม่วงน้ำตาล
5	50Fe/40Al/10Ca	46.76	8.24	6.46		เทาม่วง
6	50Fe/50Al	44.77	14.56	8.00		ม่วง

เมื่อเปรียบเทียบค่าพิกัดสีของผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นทั้ง 6 สูตรที่มีองค์ประกอบเหล็กออกไซด์เท่ากันที่ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก พบว่าทั้งหมดมีค่า a^* และ b^* เป็นบวก และมีสีโทนเข้มในกลุ่มของสีน้ำตาล โดยผงสีสูตรที่ 1 (50Fe/50Ca) ที่มีการเติมแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ให้ค่าความสว่าง (L^*) เท่ากับ 45.06 a^* เท่ากับ 11.25 และ b^* เท่ากับ 23.84 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผงสีสูตรที่ 2 (50Fe/10Al/40Ca) ที่มีการเติมอะลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 10 และแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ที่มีค่าความสว่าง (L^*) เท่ากับ 41.07 a^* เท่ากับ 12.99 และ b^* เท่ากับ 22.11 ทำให้ทั้ง 2 สูตรได้สีน้ำตาลที่ใกล้เคียงกัน และผงสีสูตรที่ 1 ให้ค่าความเป็นสีเหลืองมากที่สุด และมีค่าลดลงในสูตรที่ 2 และ 3 (50Fe/20Al/30Ca) ที่มีการเติมอะลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 20 และแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก นอกจากนั้นในสูตรที่ 3 มีค่าความสว่าง (L^*) มากที่สุดเท่ากับ 47.53 แต่ค่าความเป็นสีแดงและสีเหลืองต่ำที่สุด คือ a^* เท่ากับ 6.42 และ b^* เท่ากับ 6.13 และมีสีที่ตามองเห็นเป็นสีเทาซึ่งน่าจะเป็นผลจากการมีวิภาคหลักเป็นฮาร์โมนไนท์ (CaFe_2O_4) และหากเปรียบเทียบระหว่างสูตรที่ 4 (50Fe/30Al/20Ca) ที่มีการเติมอะลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 30 และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และสูตรที่ 5 (50Fe/40Al/10Ca) ซึ่งมีการเติมอะลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 40 และแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อปริมาณอะลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้น และปริมาณแคลเซียมออกไซด์ลดลง ค่าความสว่างมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่า a^* และ b^* มีค่าลดลง และสูตรที่ 6 (50Fe/50Al) ที่มีการเติมอะลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ให้ค่าความเป็นสีแดงที่มากที่สุดเท่ากับ 14.56 ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการมีวัฏภาค Fe_2O_3 ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาอยู่มาก เมื่อนำผลสีทางการค้ามาพิจารณาเปรียบเทียบกับผลสีที่สังเคราะห์ขึ้นโดยการเติมอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แสดงให้เห็นว่าค่าความสว่างของผลสีที่สังเคราะห์ขึ้นทั้ง 6 สูตรมีแนวโน้มมากกว่าค่าความสว่างของผลสีทางการค้า และผลสีที่สังเคราะห์ขึ้นที่มีค่าพิกัดสีใกล้เคียงกับผลสีน้ำตาลทางการค้ามากที่สุดคือ ผลสีสูตรที่ 2

ตารางที่ 4.8 ค่าพิกัดสี ค่าเฉดสี (hue angle) และค่าความอิ่มตัวของสี (chroma) ของผลสีสูตรต่าง ๆ

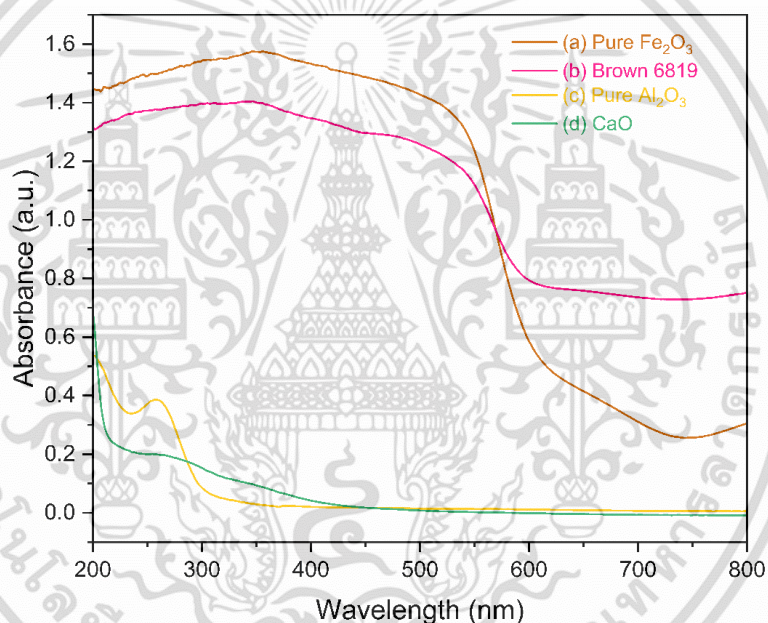
สูตร	องค์ประกอบ	ค่าพิกัดสี			Hue angle	Chroma
		L^*	a^*	b^*		
-	Pure Fe_2O_3	41.61	34.46	32.83	43.61	47.60
-	Brown 6819	36.61	15.22	16.60	47.48	22.52
1	50Fe/50Ca	45.06	11.25	23.84	64.73	26.36
2	50Fe/10Al/40Ca	41.07	12.99	22.11	59.57	25.64
3	50Fe/20Al/30Ca	47.53	6.42	6.13	43.66	8.87
4	50Fe/30Al/20Ca	42.84	11.48	10.02	41.10	15.24
5	50Fe/40Al/10Ca	46.76	8.24	6.46	38.10	10.47
6	50Fe/50Al	44.77	14.56	8.00	28.79	16.61

จากตารางที่ 4.8 แสดงค่าเฉดสี (Hue angle) และค่าความอิ่มตัวของสี (Chroma) พบว่าผลสีทางการค้าให้ค่าความอิ่มตัวของสีเท่ากับ 47.60 ซึ่งมีค่ามากกว่าผลสีน้ำตาลทางการค้าและผลสีที่สังเคราะห์ขึ้นที่มีค่าอยู่ในช่วง 8.87 – 26.36 และเมื่อเปรียบเทียบผลสีที่สังเคราะห์ขึ้นทั้ง 6 สูตร พบว่ามีค่าเฉดสีอยู่ในช่วง 28.79 – 64.73 องศา ซึ่งอยู่ในช่วงของเฉดสีแดงถึงเหลือง จะเห็นได้ว่าผลสีสูตรที่ 1 ให้ค่าเฉดสีที่มากที่สุดเท่ากับ 64.73 องศา และค่าเฉดสีนั้นจะลดลง เมื่ออัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของอะลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้น และแคลเซียมออกไซด์ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

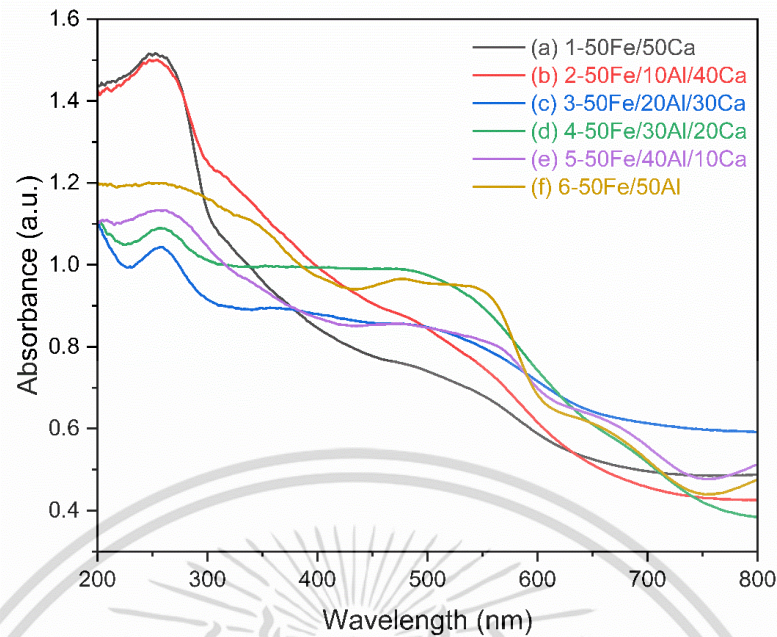
4.6 การวิเคราะห์สมบัติทางแสง

จากผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของสารตั้งต้น ผงสีทางการค้าและผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยเครื่องยูวี วิซิเบิล ดิฟฟิวซ์ รีเฟลคแทนซ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible diffuse reflectance spectrophotometer) ในช่วงความยาวคลื่น 200 – 800 นาโนเมตร ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 พบว่าเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และผงสีน้ำตาลทางการค้า (Brown 6819) สามารถดูดกลืนแสงได้ทั้งในช่วงยูวี (UV; 200 – 400 นาโนเมตร) และวิซิเบิล (visible; 400 – 800 นาโนเมตร) ส่วนอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ดูดกลืนแสงในช่วงยูวีได้เล็กน้อย และเมื่อเปรียบเทียบผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นพบว่าผงสีสามารถดูดกลืนแสงในช่วงวิซิเบิลได้มากที่สุดคือผงสีสูตรที่ 4 (50Fe/30Al/20Ca) รองลงมาคือสูตรที่ 6 (50Fe/50Al) สูตรที่ 5 (50Fe/40Al/10Ca) สูตรที่ 3 (50Fe/20Al/30Ca) สูตรที่ 2 (50Fe/10Al/40Ca) และสูตรที่ 1 (50Fe/50Ca) ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 UV-Vis สเปกตรัมของผงสีทางการค้าและสารตั้งต้น (a) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) (b) ผงสีน้ำตาลทางการค้า (Brown 6819) (c) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และ (d) แคลเซียมออกไซด์ (CaO)

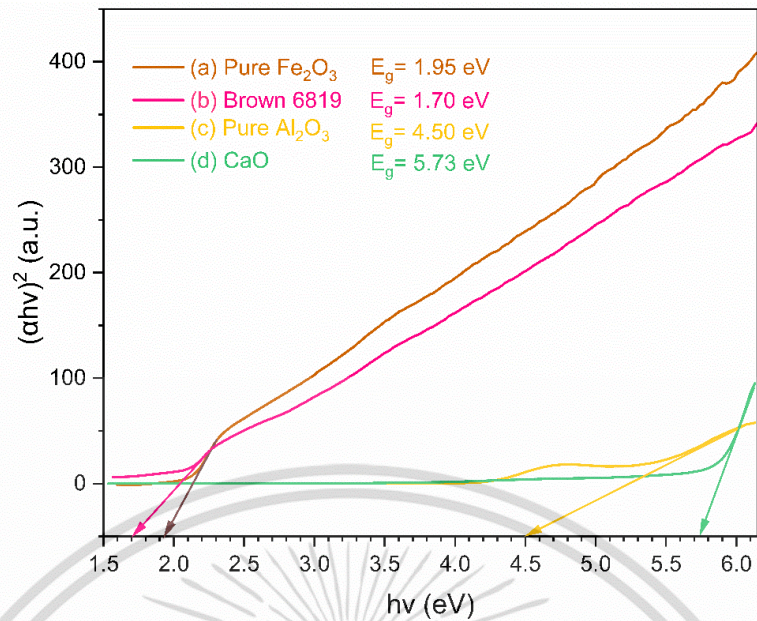
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



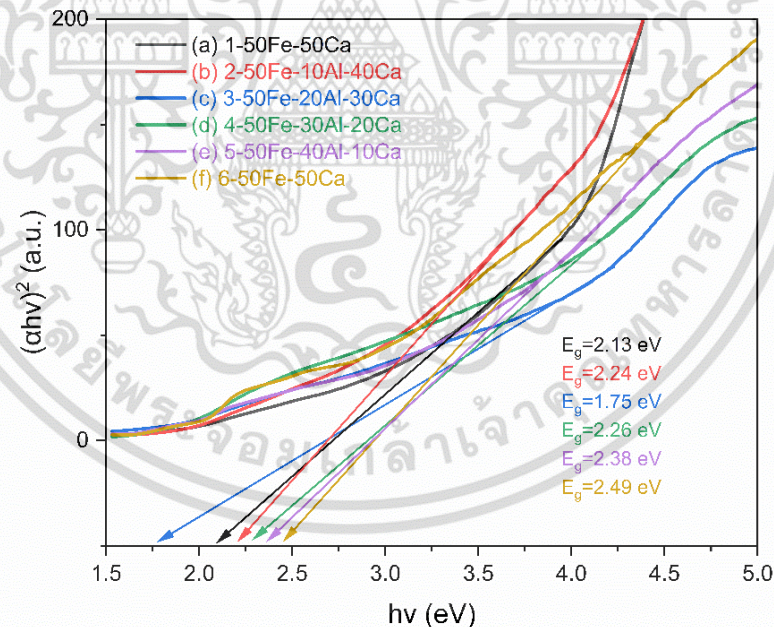
รูปที่ 4.12 UV-Vis สเปกตรัมของผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น (a) สูตรที่ 1 (50Fe/50Ca) (b) สูตรที่ 2 (50Fe/10Al/40Ca) (c) สูตรที่ 3 (50Fe/20Al/30Ca) (d) สูตรที่ 4 (50Fe/30Al/20Ca) (e) สูตรที่ 5 (50Fe/40Al/10Ca) และ (f) สูตรที่ 6 (50Fe/50Al)

เมื่อนำค่าการดูดกลืนแสงไปคำนวณหาค่าแถบช่องว่างพลังงาน (band gap energy; E_g) ด้วยวิธีการของ Tuac แล้วทำการพล็อตค่า $(\alpha h\nu)^2$ กับค่า $h\nu$ แล้วลากเส้นตัดแกน x จะได้ค่าแถบช่องว่างพลังงาน ดังแสดงผลในรูปที่ 4.13 – 4.16 และตารางที่ 4.9 พบว่าผงเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และ ผงสีน้ำตาล (Brown 6819) มีค่าแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 1.95 และ 1.70 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ ในขณะที่ผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นในสูตรที่ 1 (50Fe/50Ca) สูตรที่ 2 (50Fe/10Al/40Ca) สูตรที่ 3 (50Fe/20Al/30Ca) สูตรที่ 4 (50Fe/30Al/20Ca) สูตรที่ 5 (50Fe/40Al/10Ca) และสูตรที่ 6 (50Fe/50Al) มีค่าแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 2.13, 2.24, 1.75, 2.26, 2.38 และ 2.49 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าแถบช่องว่างพลังงานระหว่างผงสีน้ำตาลทางการค้าและผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น จะเห็นได้ว่าผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นนั้นให้ค่าแถบช่องว่างพลังงานที่สูงกว่าผงสีน้ำตาลทางการค้า โดยพบว่าเมื่ออัตราส่วนของอะลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าแถบช่องว่างพลังงานเพิ่มขึ้น ยกเว้นผงสีสูตรที่ 3 ที่มีค่าแถบช่องว่างพลังงานต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับผงสีสูตรอื่น ๆ ซึ่งจากงานวิจัยของ Yong Shi และคณะ [82] ได้รายงานไว้ว่าหากค่าแถบช่องว่างพลังงานลดลง ส่งผลให้การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ (NIR) มากขึ้น เป็นสาเหตุให้ค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของผงสีทางการค้าและสารตั้งต้น (a) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) (b) ผงสีน้ำตาลทางการค้า (Brown 6819) (c) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และ (d) แคลเซียมออกไซด์ (CaO)

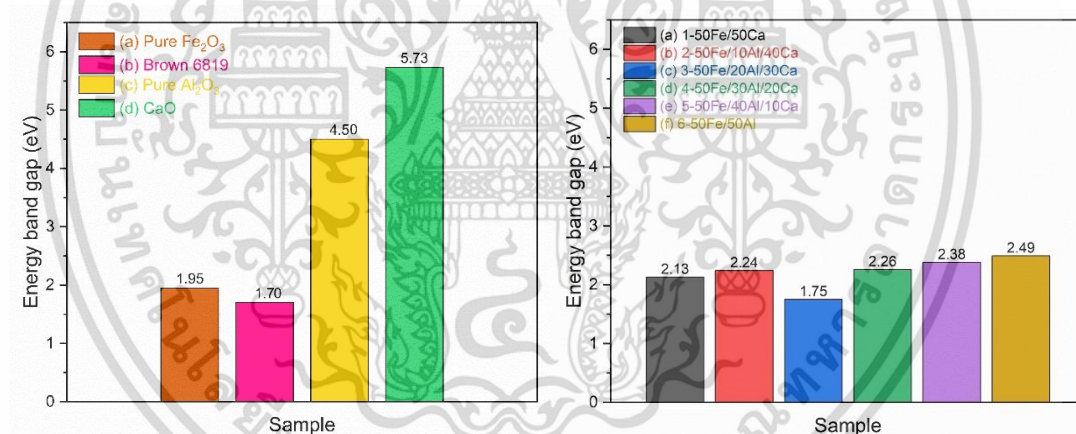


รูปที่ 4.14 ค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น (a) สูตรที่ 1 (50Fe/50Ca) (b) สูตรที่ 2 (50Fe/10Al/40Ca) (c) สูตรที่ 3 (50Fe/20Al/30Ca) (d) สูตรที่ 4 (50Fe/30Al/20Ca) (e) สูตรที่ 5 (50Fe/40Al/10Ca) และ (f) สูตรที่ 6 (50Fe/50Al)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของสารตั้งต้น ผงสีทางการค้าและผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น

สูตร	องค์ประกอบ	Band gap energy (eV)
-	Pure Fe ₂ O ₃	1.95
-	Brown 6819	1.70
-	Pure Al ₂ O ₃	4.50
-	Pure CaO	5.73
1	50Fe/50Ca	2.13
2	50Fe/10Al/40Ca	2.24
3	50Fe/20Al/30Ca	1.75
4	50Fe/30Al/20Ca	2.26
5	50Fe/40Al/10Ca	2.38
6	50Fe/50Al	2.49

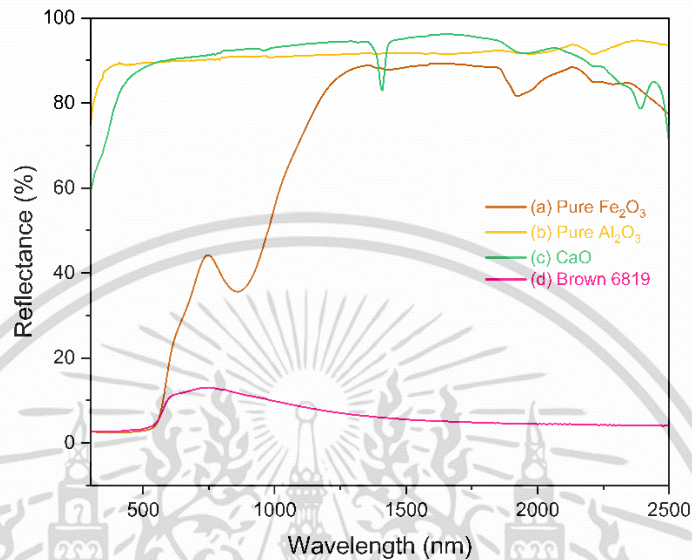


รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของสารตั้งต้น ผงสีทางการค้าและผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น

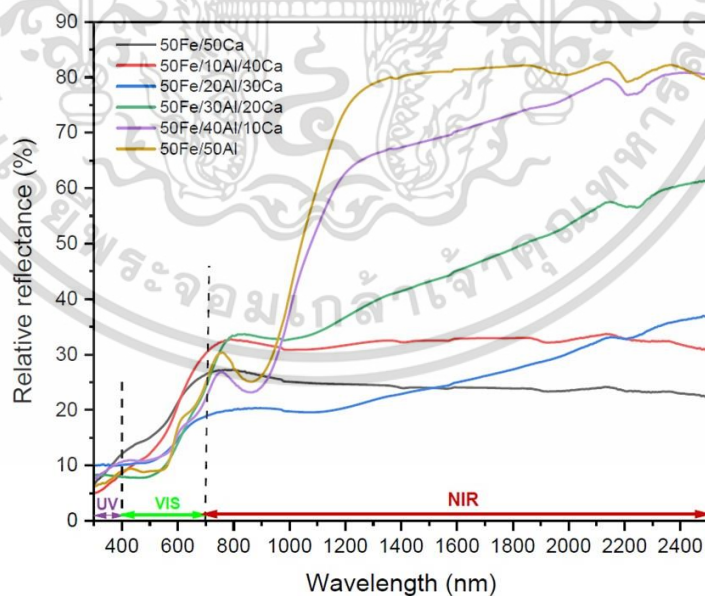
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 การทดสอบการสะท้อนรังสี

จากผลการวิเคราะห์ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ของ ผงสีทางการค้าและผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น ด้วยเครื่องยูวี วิซิเบิล เอ็นไออาร์ สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS-NIR spectrophotometer) แสดงผลดังรูปที่ 4.16 และ 4.17 และตารางที่ 4.10



รูปที่ 4.16 สเปกตรัมการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผงสีทางการค้าและสารตั้งต้น (a) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) (b) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) (c) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และ (d) ผงสีน้ำตาล (Brown 6819)



รูปที่ 4.17 สเปกตรัมการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น (a) สูตรที่ 1 (50Fe/50Ca) (b) สูตรที่ 2 (50Fe/10Al/40Ca) (c) สูตรที่ 3 (50Fe/20Al/30Ca) (d) สูตรที่ 4 (50Fe/30Al/20Ca) (e) สูตรที่ 5 (50Fe/10Al/10Ca) และ (f) สูตรที่ 6 (50Fe/50Al)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ในการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ค่าร้อยละการสะท้อนรังสีอาทิตย์ (%R solar) และรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ (%R NIR) ของผงสีทางการค้าและผงสีผสมที่สังเคราะห์ขึ้น

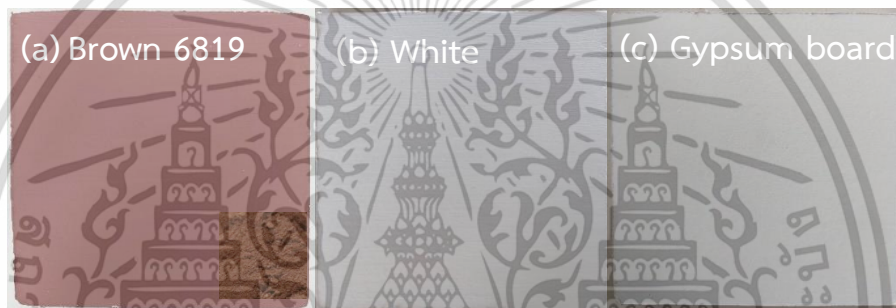
สูตร	องค์ประกอบ	%R Solar	%R NIR
-	Pure Fe ₂ O ₃	40.93	61.36
-	Brown 6819	8.23	9.30
1	50Fe/50Ca	22.44	25.45
2	50Fe/10Al/40Ca	25.73	31.96
3	50Fe/20Al/30Ca	18.17	21.75
4	50Fe/30Al/20Ca	26.47	36.73
5	50Fe/40Al/10Ca	31.88	44.96
6	50Fe/50Al	34.95	50.64

จากการศึกษาพบว่าผงเหล็กทางการค้า (Fe₂O₃) มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ร้อยละ 40.93 และค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ร้อยละ 61.36 และผงสีน้ำตาลทางการค้า (Brown 6819) มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ร้อยละ 8.23 และค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ร้อยละ 9.30 ส่วนผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นในสูตรที่ 1 (50Fe/50Ca) สูตรที่ 2 (50Fe/10Al/40Ca) สูตรที่ 3 (50Fe/20Al/30Ca) สูตรที่ 4 (50Fe/30Al/20Ca) สูตรที่ 5 (50Fe/40Al/10Ca) และสูตรที่ 6 (50Fe/50Al) มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ร้อยละ 22.44, 25.73, 18.17, 26.47, 31.88 และ 34.95 ตามลำดับ และมีค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ร้อยละ 25.96, 31.96, 21.75, 36.73, 44.96 และ 50.64 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าการสะท้อนรังสีของผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นกับผงสีทางการค้า พบว่าผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นมีค่าการสะท้อนรังสีที่ต่ำกว่าผงเหล็กทางการค้า แต่มีค่าการสะท้อนรังสีที่สูงกว่าผงสีน้ำตาลทางการค้า และค่าการสะท้อนรังสีของผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นนั้นมีค่าที่สอดคล้องกันกับค่าแถบช่องว่างพลังงานดังที่ได้รายงานไว้ในหัวข้อ 4.5 หากเปรียบเทียบผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นพบว่าผงสีที่มีอัตราส่วนของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) เพิ่มขึ้น จะมีแนวโน้มให้ค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นสูตรที่ 3 ที่ให้ค่าการสะท้อนรังสีที่น้อยที่สุดซึ่งเป็นผลมาจากการที่ผงสีสูตรที่ 3 ประกอบด้วยวัฏภาคฮาร์มูไนท์ (harmunite; CaFe₂O₄) ซึ่งมีโครงสร้างแบบสปิเนลเป็นหลัก ซึ่งอาจเป็นผลที่ทำให้สูตรที่ 3 มีโหนดที่เข้มกว่าสูตรอื่น ๆ ส่งผลทำให้ได้ค่าแถบช่องว่างพลังงานและค่าการสะท้อนรังสีที่ต่ำ

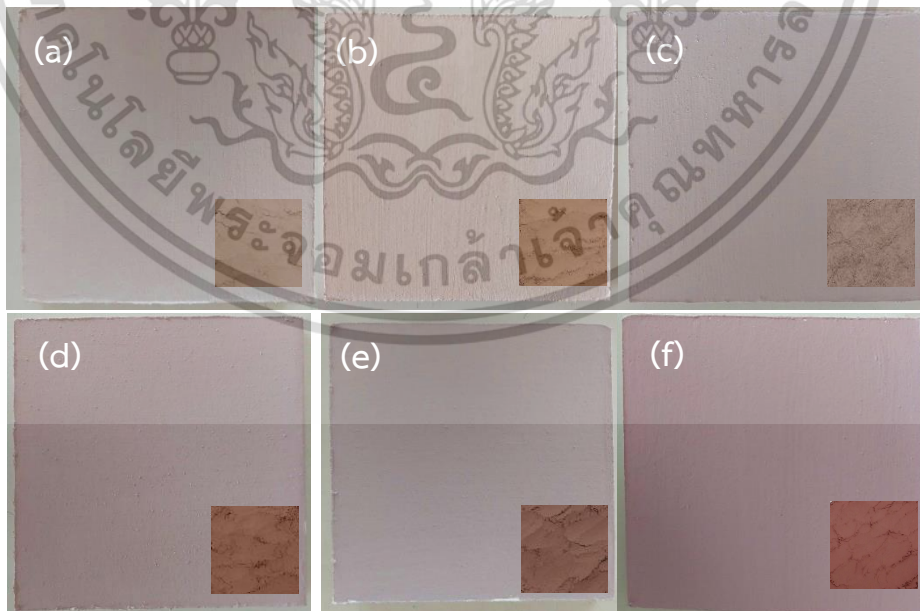
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 การนำไปประยุกต์ใช้งาน

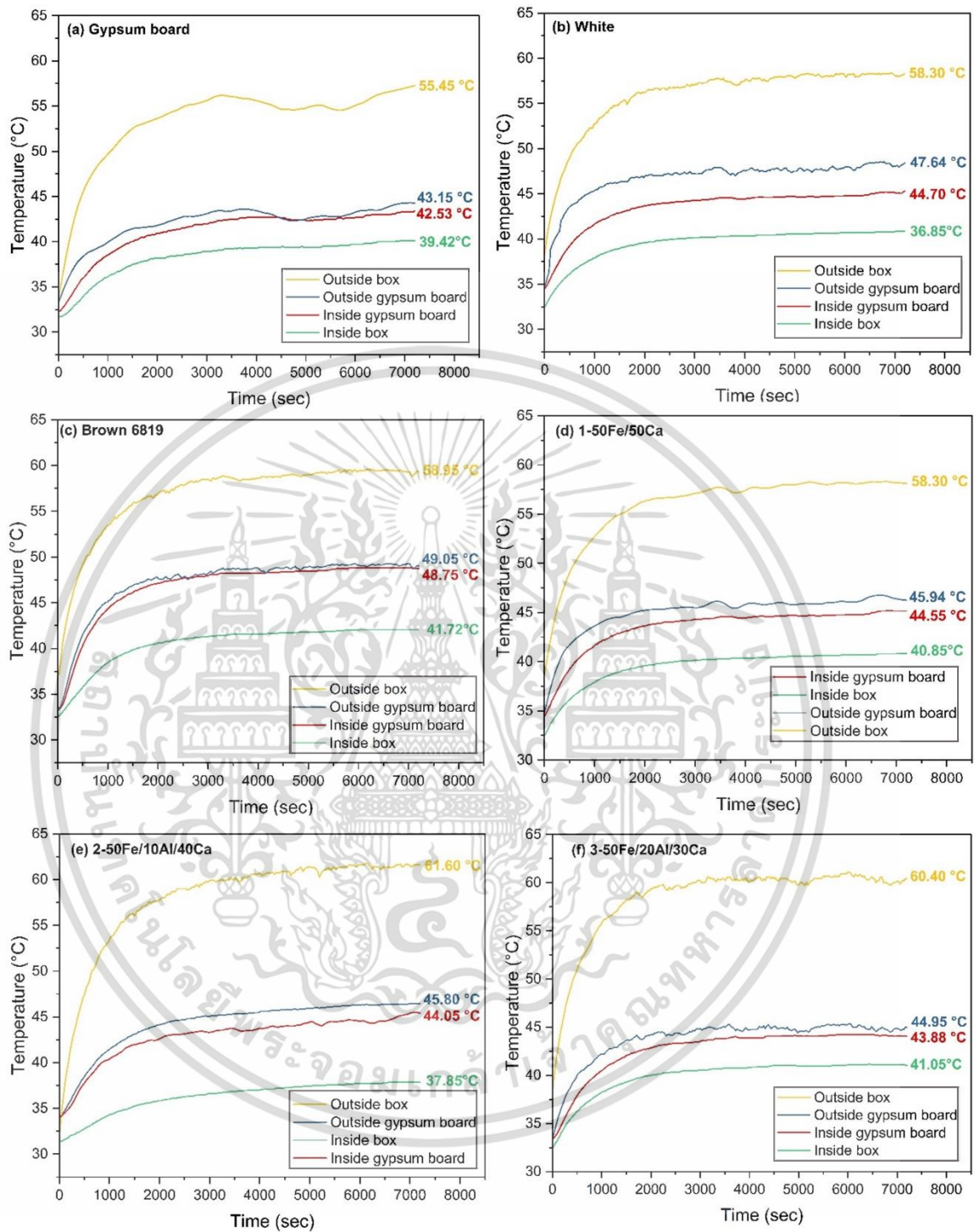
การทดสอบความสามารถในการสะท้อนความร้อนของผงสีเมื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นสีทาอาคาร โดยการทาสีลงบนแผ่นผ้ายิปซัมตามอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ ผงสี : สีน้ำทาอาคารสีขาว : น้ำ เท่ากับ 1 : 4 : 1 ซึ่งชั้นสีที่ทาลงบนแผ่นผ้ายิปซัมที่แสดงดังรูปที่ 4.18 และ 4.19 เห็นได้ว่าสีน้ำตาลทางการค้า (Brown 6819) เมื่อทาลงบนแผ่นผ้ายิปซัมให้สีที่ใกล้เคียงกับสีของผงสี แตกต่างจากชั้นสีที่เตรียมจากผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น เมื่อทาลงบนแผ่นผ้ายิปซัมแล้วนั้นสีที่ได้มีความอ่อนลงจากสีของผงสี ซึ่งเป็นผลมาจากรูปร่างและขนาดอนุภาคของผงสีดังที่รายงานไว้ในหัวข้อ 4.4 การศึกษาสัณฐานวิทยาที่พบว่าผงสีน้ำตาลทางการค้ามีรูปร่างที่สมำเสมอและขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นที่มีรูปร่างที่หลากหลายประกอบด้วยรูปทรงกลม แผ่น แท่ง และรูปร่างไม่แน่นอน มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าและมีการเกาะกลุ่มกันของอนุภาค ทำให้ผงสีทางการค้าสามารถกระจายตัวในตัวกลางสีน้ำได้ดีกว่าจึงทำให้ชั้นสีที่ได้มีเฉดสีใกล้เคียงกับผงสี



รูปที่ 4.18 ชั้นสีทาบนแผ่นผ้า (a) สีน้ำตาลทางการค้า (Brown 6819) (b) สีน้ำสำหรับทาอาคาร (สีขาว) และ (c) แผ่นผ้า

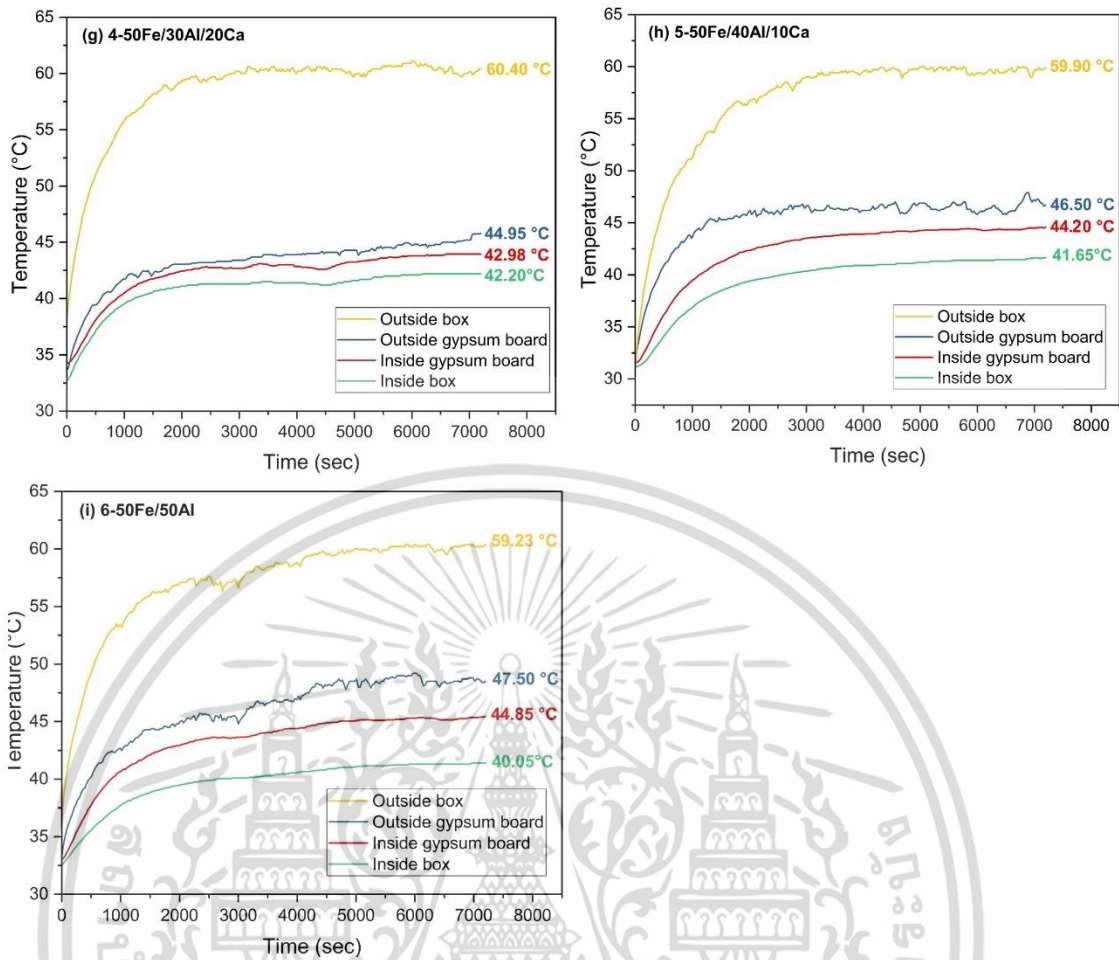


รูปที่ 4.19 ชั้นสีทาบนแผ่นผ้าด้วยผงสีสังเคราะห์ขึ้นสูตรต่าง ๆ ผสมกับสีน้ำทาอาคารสีขาว (a) สูตรที่ 1 (50Fe/50Ca) (b) สูตรที่ 2 (50Fe/10Al/40Ca) (c) สูตรที่ 3 (50Fe/20Al/30Ca) (d) สูตรที่ 4 (50Fe/30Al/20Ca) (e) สูตรที่ 5 (50Fe/40Al/10Ca) และ (f) สูตรที่ 6 (50Fe/50Al) ไม่ว่าการนำสีเหล่านี้ไปใช้



รูปที่ 4.20 ผลการวัดอุณหภูมิของแผ่นทดสอบที่ทำด้วยชั้นสีของสีสูตรต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 ผลการวัดอุณหภูมิของแผ่นทดสอบที่ทำด้วยชั้นสีของสีสูตรต่าง ๆ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

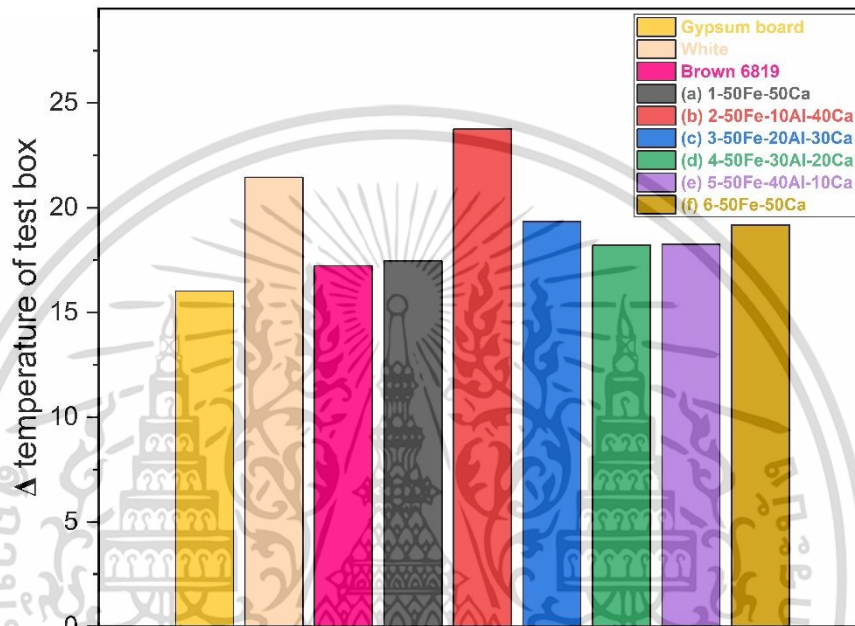
ตารางที่ 4.11 ผลการวัดอุณหภูมิของแผ่นทดสอบที่ทำด้วยชั้นสีสูตรต่าง ๆ

สูตร	ตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ (°C)					
		แผ่นทดสอบ (Gypsum board)			กล่องทดสอบ (Test box)		
		ผิวนอก (°C)	ผิวใน (°C)	Δ (°C)	ภายนอก (°C)	ภายใน (°C)	Δ (°C)
-	Gypsum board	43.15	42.53	0.62	55.45	39.42	16.03
-	White	47.64	44.70	2.94	58.30	36.85	21.45
-	Brown 6819	49.05	48.75	0.3	58.95	41.72	17.23
1	50Fe/50Ca	45.94	44.55	1.39	58.30	40.85	17.45
2	50Fe/10Al/40Ca	45.80	44.05	1.75	61.60	37.85	23.75
3	50Fe/20Al/30Ca	44.95	43.88	1.07	60.40	41.05	19.35
4	50Fe/30Al/20Ca	44.95	42.98	1.97	60.40	42.20	18.20
5	50Fe/40Al/10Ca	46.50	44.20	2.30	59.90	41.65	18.25
6	50Fe/50Al	47.50	44.85	2.65	59.23	40.05	19.18

เมื่อนำแผ่นฝ้ายิปซัมที่ผ่านการทาสีแล้วไปทดสอบด้วยกล่องทดสอบความร้อนซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์ในการทาสีภายนอกตัวอาคารเพื่อดูประสิทธิภาพในการสะท้อนความร้อน และใช้หลอดอินฟราเรดเป็นแหล่งให้ความร้อน โดยทำการวัดอุณหภูมิทั้งหมด 4 จุด คือ อุณหภูมิภายนอกกล่องทดสอบ อุณหภูมิภายในกล่องทดสอบ อุณหภูมิบนพื้นผิวภายนอกแผ่นทดสอบ และอุณหภูมิมบนพื้นผิวภายในแผ่นทดสอบ โดยวัดอุณหภูมิทุก ๆ 30 วินาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำซ้ำ 2 ครั้ง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ โดยการหาค่าเฉลี่ยในช่วงเวลาที่อุณหภูมิคงที่ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.21 และตารางที่ 4.11 พบว่าแผ่นฝ้ายิปซัมที่ไม่ผ่านการทาสีมีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิภายในและภายนอกกล่องทดสอบ 16.03 องศาเซลเซียส แผ่นฝ้ายิปซัมที่มีการทาสีขาวมีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิภายในและภายนอกกล่องทดสอบ 21.45 องศาเซลเซียส แผ่นฝ้ายิปซัมที่ผ่านการทาสีน้ำตาลทางการค้า มีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิภายในและภายนอกกล่องทดสอบ 17.23 องศาเซลเซียส และแผ่นฝ้ายิปซัมที่มีการทาสีด้วยผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นทั้ง 6 สูตรมีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิภายในและภายนอกกล่องทดสอบอยู่ในช่วง 17.45 – 23.75 องศาเซลเซียส และสูตรที่ให้ค่าความแตกต่างสูงที่สุดคือสูตรที่ 2 (50Fe/10Al/40Ca) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผงสีน้ำตาลทางการค้าและผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นจะเห็นได้ว่า ผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นนั้นให้ค่าความแตกต่างที่มากกว่าผงสีน้ำตาลทางการค้า แสดงให้เห็นถึงสมบัติในการสะท้อนความร้อนได้ของผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น แต่ผลที่ได้จากกล่องทดสอบไม่สอดคล้องกับค่าความแตกต่างของอุณหภูมิผิวนอกและผิวในของแผ่นทดสอบ โดยเมื่อนำผลที่ได้จากแผ่นทดสอบไปเปรียบเทียบกับค่าแถบช่องว่างพลังงานและค่าการสะท้อนรังสีแล้วนั้นจะเห็นได้ว่าผลที่ได้มีแนวโน้มไปทางเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ หรือการขงนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยู่ได้เห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งนี้ผลการทดสอบที่ได้ยังไม่ชัดเจนนัก เนื่องจากข้อจำกัดในการทดสอบทั้งด้านของสภาพอากาศและอุณหภูมิในแต่ละช่วงเวลาของการทดสอบ จึงอาจเป็นผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่วัดได้ นอกจากนี้ความคลาดเคลื่อนอาจเป็นผลมาจากการที่ชั้นสีที่เตรียมได้จากผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นมีการกระจายตัวของผงสีที่ไม่ดี ทำให้ได้ชั้นสีที่มีเฉดสีที่สว่างกว่าชั้นสีที่เตรียมขึ้นจากผงสีน้ำตาลทางการค้า



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความแตกต่างของอุณหภูมิภายในและภายนอกของกล่องทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาพัฒนาผงสีสะท้อนรังสีอินฟราเรดจากเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ที่มีการเติม อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นเปลือกไข่ โดยใช้ ปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง (solid state reaction) เพื่อพัฒนาผงสีที่มีคุณสมบัติในการสะท้อนความร้อนย่านรังสีอินฟราเรด และสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นสีทาอาคารสะท้อนความร้อนได้ สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

จากการศึกษาถึงผลของอัตราส่วนของสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ผงสีทั้งหมด 6 สูตร คือ สูตรที่ 1 (50Fe/50Ca) สูตรที่ 2 (50Fe/10Al/40Ca) สูตรที่ 3 (50Fe/20Al/30Ca) สูตรที่ 4 (50Fe/30Al/20Ca) สูตรที่ 5 (50Fe/40Al/10Ca) และสูตรที่ 6 (50Fe/50Al) โดยใช้โซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) เป็นตัวช่วยหลอมในการเกิดปฏิกิริยา และเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าปริมาณของธาตุองค์ประกอบของผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นมีร้อยละโดยน้ำหนักใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีทั้งหมด โดยผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นมีสีโทนเข้มในกลุ่มของสีน้ำตาลมีความสว่าง (L^*) อยู่ในช่วงระหว่าง 41.07 – 47.53 มีค่า a^* และ b^* เป็นค่าบวกซึ่งแสดงถึงความเป็นสีแดงและสีเหลืองตามลำดับ โดยมีค่าความเป็นสีแดง ($+a^*$) อยู่ในช่วงระหว่าง 6.42 – 14.56 และค่าความเป็นสีเหลือง ($+b^*$) อยู่ในช่วงระหว่าง 6.13 – 23.84 เมื่อนำค่า a^* และ b^* มาคำนวณหาค่าเฉดสี (hue angle) และค่าความอิ่มตัวของสี (chroma) จะมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 28.79 – 64.73 และ 8.87 – 26.36 ตามลำดับ ซึ่งมีเฉดสีในกลุ่มสีแดงถึงเหลือง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นทั้ง 6 สูตรพบว่า เมื่ออัตราส่วนร้อยละของอะลูมิเนียมออกไซด์โดยน้ำหนักเพิ่มขึ้นทำให้ค่าเฉดสีมีค่าลดลง

จากการศึกษาศึกษาโครงสร้างของผลึกพบว่าในสูตรที่ 1 และ 2 จะมีวัฏภาคที่เหมือนกันคือ สเรโบรโดลสไกต์ (srebrodolskite; $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$) และวัฏภาคที่ไม่สามารถระบุได้ ในสูตรที่ 3 พบวัฏภาคหลักคือแคลเซียมเหล็กออกไซด์ (harmunite; CaFe_2O_4) ซึ่งมีโครงสร้างแบบสปินเนล (spinel) เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของแคลเซียมออกไซด์ลดลงในสูตรที่ 4 จึงทำให้วัฏภาคของแคลเซียมเหล็กออกไซด์ลดลง แต่พบวัฏภาคของเหล็กออกไซด์ฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) ที่ไม่ทำปฏิกิริยาเกิดขึ้น และสูตรที่ 5 และ 6 ที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของอะลูมิเนียมออกไซด์มาก จะพบวัฏภาคที่ไม่ทำปฏิกิริยาเป็นหลักคือเหล็กออกไซด์ฮีมาไทต์และอะลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งเป็นผลมาจากอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีความเสถียรตัวสูงทำให้ปฏิกิริยาสถานะของแข็งได้ไม่สมบูรณ์

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างโมเลกุลด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น พบช่วงการดูดกลืนแสงที่แสดงถึงองค์ประกอบของสารตั้งต้นคือช่วงการดูดกลืนแสงของพันธะ Fe-O รูปแบบการสั่นแบบยืดหด (stretching) นอกจากนั้นยังพบช่วงการดูดกลืนแสงไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของพันธะ Ca-O รูปแบบการสั่นแบบยืดหดในสูตรที่ 1, 2, 3 และ 4 และพบช่วงการดูดกลืนแสงของพันธะ Al-O รูปแบบการสั่นแบบยืดหดในผงสีสูตรที่ 4, 5 และ 6 ส่วนการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี พบสเปกตรัมการสั่นแบบยืดหดและบิดงอ (bending) ของพันธะ Fe-O ของเหล็กออกไซด์ฮีมาไทต์ (hematite Fe_2O_3) โดยความเข้มของพีคการสั่นของพันธะ Fe-O จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของอะลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้น และช่วงการสั่นแบบยืดหดของพันธะ Al-O-Al ของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) นอกจากนั้นพบช่วงการสั่นแบบยืดหดของพันธะ Ca-O ในผงสีสูตรที่ 1, 2 และ 3

การศึกษาสัณฐานวิทยาของผงสีที่สังเคราะห์ขึ้น พบว่ามีรูปร่างสัณฐานที่แตกต่างกันประกอบไปด้วยรูปร่างทรงกลม ทรงแท่ง แผ่น และรูปร่างไม่แน่นอน มีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ และมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าผงสีน้ำตาลทางการค้า (Brown 6819) ในสูตรที่ 3 และ 4 ที่มีการเติมทั้งแคลเซียมออกไซด์และอะลูมิเนียมในอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกันจะพบรูปร่างลักษณะแท่ง โดยขนาดของอนุภาคมีความแตกต่างกันโดยอนุภาคทรงกลมจะมีขนาดอนุภาคอยู่ที่ 0.26 ± 0.11 ถึง 0.94 ± 0.27 μm ลักษณะแผ่นจะมีขนาดอนุภาคอยู่ที่ 2.85 ± 0.88 ถึง 3.44 ± 0.80 μm ในอนุภาคลักษณะแท่งจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคอยู่ที่ 0.16 ± 0.04 ถึง 0.31 ± 0.10 μm และในอนุภาคที่มีรูปร่างไม่แน่นอนจะมีขนาดอนุภาคอยู่ที่ 2.21 ± 0.84 ถึง 3.01 ± 0.83 μm

ในส่วนการศึกษาสมบัติทางแสงพบว่าผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นสามารถดูดกลืนแสงในช่วงวิชิเบิลได้มากที่สุดคือผงสีสูตรที่ 4 รองลงมาคือสูตรที่ 6, 5, 3, 2 และ 1 ตามลำดับ และเมื่อนำไปคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (band gap energy; E_g) พบว่าผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นมีค่าแถบช่องว่างพลังงานอยู่ในช่วงระหว่าง 1.75 – 2.49 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมีค่ามากกว่าผงสีทางการค้า จากการวิเคราะห์ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ พบว่าค่าร้อยละของการสะท้อนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ (%R NIR) มีค่าอยู่ในช่วง 21.75 – 50.64 และค่าร้อยละการสะท้อนรังสีอาทิตย์ (%R Solar) อยู่ในช่วง 18.17 – 34.95 โดยส่วนใหญ่ค่าร้อยละการสะท้อนรังสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนของอะลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้น ยกเว้นสูตรที่ 3 ซึ่งเป็นสูตรที่ให้ค่าการสะท้อนรังสีน้อยที่สุด เนื่องจากการมีวิญญูภาคหลักเป็นฮาร์มูไนท์ (harmunite; CaFe_2O_4) ซึ่งมีโครงสร้างแบบสปิเนลเป็นหลัก ซึ่งอาจเป็นผลที่ทำให้สูตรที่ 3 มีโตนสีที่เข้มกว่าสูตรอื่น ๆ ส่งผลทำให้ได้ค่าแถบช่องว่างพลังงานและค่าการสะท้อนรังสีที่ต่ำ

จากการทดสอบการสะท้อนความร้อนของผงสีในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นสีทาอาคาร พบว่าผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นมีค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายในและภายนอกกล่องทดสอบอยู่ในช่วง 18.20 – 23.75 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าความแตกต่างของอุณหภูมิของผงสีน้ำตาลทางการค้าซึ่งมีค่าเท่ากับ 17.45 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นสามารถสะท้อนความร้อนได้ และจากผลการตรวจวิเคราะห์ทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าผงสีที่สังเคราะห์ขึ้นจากเหล็กออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์จากสารตั้งต้นเปลือกไข่ นั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นสีทาอาคารเพื่อสะท้อนย่านรังสีอินฟราเรดได้ อีกทั้งยังแสดงให้เห็นว่าสามารถนำเปลือกไข่ที่เป็นของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ได้ เพื่อลดปริมาณขยะและต้นทุนในการผลิต

ไม่ว่าการันเตฯ พงสีน อีกทั้งห มิมีเหตตแบสงเนยห และตองอฯองตงเจฯของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากการสังเคราะห์ผงสีโดยใช้ปฏิกิริยาในสถานะของแข็งอาจทำให้ได้ขนาดของอนุภาคที่ใหญ่และไม่สามารถควบคุมขนาดของอนุภาคได้ จึงควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการใช้เทคนิคอื่นในการสังเคราะห์ผงสี เช่น วิธีการโซล-เจล (sol-gel) เป็นต้น
2. เนื่องจากพบการแยกตัวของเหล็กออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เป็นสารตั้งต้นในอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักตั้งแต่ร้อยละ 40 ขึ้นไป จึงควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการเพิ่มอุณหภูมิการเผาที่สูงกว่า 1000 จนถึง 1100 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็งอย่างสมบูรณ์
3. ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการวัดมุมสัมผัส (contact angle measurement) เพื่อวิเคราะห์ถึงสมบัติในการทำความสะอาดตัวเอง (self-cleaning) ได้ของผงสีเมื่อใช้เป็นสีทาอาคาร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สราวุธ ไพฑูรย์พงษ์. 2021. ภาวะโลกร้อน กับ แรงงาน. [Online]. Available : <https://tdri.or.th/2021/11/climate-change-affect-labor/>.
- [2] วิชิตา คະแนนสิน. 2019. ‘เปิดแอร์’ ดับร้อน แต่โลกยิ่งร้อนเพราะ ‘เปิดแอร์’. [Online]. Available : <https://becommon.co/world/airconditioner-climatechange/>.
- [3] Gyproc Saint-Gobain. 2021. **ทำไมบ้านถึงได้ร้อน และวิธีการแก้ปัญหาบ้านร้อนทำให้บ้านเย็นขึ้น**. [Online]. Available : <https://www.gyproc.co.th/ทำไมบ้านถึงได้ร้อนและวิธีการแก้ปัญหาบ้านร้อนทำให้บ้านเย็นขึ้น>.
- [4] iEnergyGuru. 2015. **การถ่ายเทความร้อนผ่านกรอบอาคาร (HEAT TRANSFER THROUGH THE BUILDING ENVELOPE)**. [Online] . Available : <https://ienergyguru.com/2015/09/heat-transfer-through-the-building-envelope/>
- [5] deltapaint. 2020. **จริงหรือไม่ ? สีทาบ้านภายนอก สะท้อนความร้อน แฉกช่วยประหยัดพลังงานได้**. [Online]. Available : <https://www.deltapaint.co.th/สีทาบ้านภายนอก/>
- [6] งานพัฒนาคุณภาพการเผยแพร่เทคโนโลยีวัสดุ. 2018. **ผงสีและผิวเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์เพื่อการอนุรักษ์พลังงาน**. [Online]. Available : <https://www.mtec.or.th/post-knowledges/65171/>.
- [7] ทอฝัน ดำจร, ภัสสรุ จันทรดาขำ และมลธิชา วงศ์มุสิก. 2021. “การพัฒนาผงสีสัมผัสสะท้อนรังสีอินฟราเรดจากเหล็กออกไซด์ที่เติมเซอร์โคเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [8] Seil, J.T. and Webster, T.J. 2012. “Antimicrobial applications of nanotechnology: methods and literature.” *Nanomedicine*. (7) : 2767–2781.
- [9] Sharaf, E.M. Hassan, A. Al-Salmi, F.A. Albalwe, F.M. Albalawi, H.M.R. Darwish, D.B. and Fayad, E. 2022. “Synergistic antibacterial activity of compact silver/magnetite core-shell nanoparticles core shell against Gram-negative foodborne pathogens.” *Microbiology*. (13) : 3239.
- [10] เสริม จันทรฉาย. 2017. **รังสีอาทิตย์ ครั้งที่พิมพ์.2 นครปฐม : เกษมพรินติ้ง**.
- [11] วุฒิ พงษ์ แสงมณี. 2013. **พลังงานจากดวงอาทิตย์**. [Online]. Available : <http://www.geog.pn.psu.ac.th/CAIClimate/3Sun49.pdf>.
- [12] สุธาทิพย์ หวังอำนวยพร. 2021. **อันตรายจากแสงแดดต่อผิวหนัง**. [Online]. Available : <https://www.scimath.org/article-chemistry/item/12349-2021-07-01-05-38-39>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] สรายุทธ สรวชิษฐ์ธนากุล. 2013. “การใช้แอลอีดีสำหรับการตรวจหาหลักฐานทางชีววิทยาในการตรวจสถานที่เกิดเหตุ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [14] ชลลดา ศรีทวีภาศ, นัสตยา โยเหลา และภาวดี พันนาม. 2012. “การศึกษาความเป็นไปได้ของการวัดความเข้มรังสีอินฟราเรดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม.
- [15] The CutMethaneEU team. 2021. **The Basics of Optical Gas Imaging**. [Online]. Available : <https://cutmethane.eu/learn/the-basics-of-optical-gas-imaging/>.
- [16] siamchemi. 2022. **รังสีอินฟราเรด (Infrared Radiation : IR) ประโยชน์ และอันตรายจากรังสีอินฟราเรด**. [Online]. Available : <https://www.siamchemi.com/รังสีอินฟราเรด/>.
- [17] เสริม จันทร์ฉาย. 2014. **รังสีอาทิตย์**. ครั้งที่พิมพ์.1 นครปฐม : เพชรเกษมการพิมพ์.
- [18] CoolCalifornia.org. 2011. **Science of Cool Roofs**. [Online]. Available : <https://coolcalifornia.arb.ca.gov/science-of-cool-roofs>.
- [19] Decor Report. 2017 **สี กัน ความ ร ้อ น**. [Online]. Available : <http://www.decorreport.com/a5186-ส-ก-นความร-อน>.
- [20] วัดพล. 2022. **การถ่ายโอนความร้อน หรือ การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)**. [Online]. Available https://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?bookID=6073&pageid=15&read=true&count=true.
- [21] SCG Building Materials. 2022. **แก้ปัญหาบ้านร้อนให้อยู่สบาย ด้วย active airflowtm system**. [Online]. Available : <https://www.Scgbuildingmaterials.com/th/ideas/tips-and-tricks/แก้ปัญหาบ้านร้อนอบอ้าว-ให้เป็นบ้านอยู่สบาย-ภายใน-1-วัน-ด้วย-active-airflow-system#>.
- [22] กระทรวงพลังงาน. 2003. **การให้ความเย็นแก่อาคาร**. ครั้งที่พิมพ์.5 กรุงเทพฯ : สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน.
- [23] Fastseal solutions. n.d. **Heat Reflective coating for Roof**. [Online]. Available : <https://salefastseal.wixsite.com/fastseal/roof-cool-coat>.
- [24] Baania. 2020. **สีกันความร้อน ผู้ช่วยลดอุณหภูมิให้บ้านคุณ**. [Online]. Available : <https://www.baania.com/article/สีกันความร้อน-5efca2a3159c3b0914ffdd61>.
- [25] PP CERAMIC COATING. 2022. **CERAMIC COATING คืออะไร ?**. [Online]. Available : <https://ppeceramiccoating.com/ceramic-coating-คืออะไร/>.
- [26] CM-Coatingteam. 2022. **สีสะท้อนความร้อนเซรามิคโค้ตติ้ง**. [Online]. Available : <https://www.cm-coatingteam.com/content/2624/insulationceramiccoating-coolhouse>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [27] มุมมองและความคิด (นามแฝง). 2012. **ฉนวนกันความร้อน เซรามิกโค้ดตั้ง**. [Online]. Available : <http://marmb1040.blogspot.com/2012/06/blog-post.html>.
- [28] National Library of Medicine. 2005. **Iron(III) oxide**. [Online]. Available : https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Iron_III_oxide.
- [29] BYJU'S. n.d. **Fe₂O₃ Iron(III) oxide**. [Online]. Available : <https://byjus.com/chemistry/fe2o3/>.
- [30] American elements. n.d. **Iron(III) Oxide**. [Online]. Available : <https://www.americanelements.com/iron-iii-oxide-1309-37-1>.
- [31] Machala, L. Tucek, J. and Zboril, R. 2011. "Polymorphous Transformations of Nanometric Iron(III) Oxide: A Review." *Chemistry of materials*. : 3255-3272.
- [32] Aluminum Manufacturers. n.d. **Aluminum Oxide**. [Online]. Available : <https://www.aluminummanufacturers.org/aluminum-sulfate/aluminum-oxide/>.
- [33] สุจินต์ พรราวพันธุ์. 2011. **อะลูมินากับการนำไปใช้งานทางเซรามิก**. [Online]. Available : <https://soclaimon.wordpress.com/2011/07/23/อะลูมินากับการนำไปใช้/>.
- [34] Ramogayana, B. Santos-Carballeda, D. Maenetja, K.P. de Leeuw, N.H. and Ngoepe, P.E. 2021. "Density Functional Theory Study of Ethylene Carbonate Adsorption on the (0001) Surface of Aluminum Oxide α -Al₂O₃." *ACS Omega*. : 29577-29587.
- [35] BYJU'S. n.d. **Calcium Oxide - CaO**. [Online]. Available : <https://byjus.com/chemistry/calcium-oxide/>.
- [36] Zhang, H. Zhao, H. Chen, J. Li, J. Yu, J. and Nie, J. 2013. "Defect Study of MgO-CaO Material Doped with CeO₂." *Advances in Materials Science and Engineering*.
- [37] รัชณี ตัณฑะพานิชกุล. 2004. **เคมีอาหาร Food Chemistry**. ครั้งที่พิมพ์.2 กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- [38] ภัทรนันท์ ทวดอาจ, เสกสิทธิ์ ดวงคำ, และศุภชัย สมเพ็ชร. 2019. **การเตรียมแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่เหลือทิ้ง**. บุรีรัมย์ : คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์.
- [39] สุทธาสินี กัตถัญญ. 2007. "การเตรียมและการหาลักษณะเฉพาะของวัสดุทั้งสแตนเลสและซิลไฟต์หมู่ II ปีที่ใช้สำหรับการเรืองแสง." *วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*.
- [40] นพศิริ ไชโย และนราธิป วิทยากร. 2011. "วิธีการสังเคราะห์แบบเผาไหม้ Combustion Synthesis." *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*. 20(1) : 46-57.

[41] จิตรกร กรพรม. 2021. **การเตรียมผลึกเฟอร์โรแมกเนทริกที่มีขนาดเล็กของเอกสารนี้** เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นความการใดๆ **Y_{2.7}Bi_{0.3}Fe_{4.7}Mn_{0.3}O₁₂ ที่มีประสิทธิภาพสูง ด้วยวิธีการเผาไหม้ของแข็ง**. เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่.

- [42] Kumar, A Dutta, S Kim, S Kwon, T Patil, S.S. Kumari, N. Jeevanandham, S. Lee, I.S. 2022. “Solid-State Reaction Synthesis of Nanoscale Materials: Strategies and Applications.” *Chemical Reviews*. 122(15) : 12748-12863.
- [43] ภัคณัย ทองทีอัมพร. 2007. การมองเห็นและการวัดสี. โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม.
- [44] Tim Mouw. 2018. **Tolerancing Part 3 : Color Space vs. Color Tolerance.** [Online]. Available : <https://www.xrite.com/blog/tolerancing-part-3>.
- [45] Oka, R. Kosaya, T. and Masui, T. 2018. “Novel Environmentally Friendly Inorganic Orange Pigments Based on $\text{Ca}_{14}\text{Al}_{10}\text{Zn}_6\text{O}_{35}$.” *Chemistry Letters*. 47(12) : 1522-1525.
- [46] Thongkanluang, T. Chirakanphaisarnb, N. and Limsuwanc, P. 2012. “Preparation of NIR Reflective Brown Pigment.” *Procedia Engineering*. 32 : 895-901.
- [47] Busabok, C. Khongwong, W. Somwongsa, P. Ngerchuklin, P. Saensing, A. and Kanchanasutha, S. 2018. “Preparation of Near-Infrared (NIR) Reflective Pigment by Solid State Reaction between Fe_2O_3 and Al_2O_3 .” *KeyEngineering Materials*. 766 : 127-132.
- [48] Nipunika, U. Jayaneththi, Y. and Sewwandi, G.A. 2022. “Synthesis of Calcium Oxide Nanoparticles from Waste Eggshells.” *2022 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCOn)*. : 1-5.
- [49] พัฒนะ รักความสุข, สิทธิสุนทร สุโพธิณะ, ลดา พันธุ์สุขุมธนา และธีรศักดิ์ ตั้งกิตติมงคล. 2019. “การสังเคราะห์สีผงเซรามิกสีแดงสะท้อนรังสีอินฟราเรดใกล้.” *Bulletin of Applied Sciences*. : 34-39.
- [50] Fortuño-Morte, M. Serna-Gallén, P. Beltrán-Mir, H. and Cordoncillo, E. 2022. “The influence of Ca^{2+} and Zn^{2+} doping on the development of sustainable pigments based on GdFeO_3 perovskite: From a reddish colour towards a pure black.” *Ceramics International*. 48(15) : 21428-21437.
- [51] กัญญาภัค ศรีปะโค และพงศกร พรหมทา. 2016. “การเตรียมชั้นเคลือบที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดจากเปลือกไข่ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริก.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [52] รินา ภัทรมานนท์. 2015. **จดหมายข่าวศูนย์เครื่องมือวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.** ขอนแก่น : ศิริภรณ์ (2497).
- [53] ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. 2021. **เครื่องวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีของสารโดยใช้ความยาวคลื่นช่วงอินฟราเรด**
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR).** [Online]. Available : [https://www.ubu.ac.th/web/sec/content/Fourier%20Transform%20Infrared%20Spectrometer%20\(FT-IR\)/](https://www.ubu.ac.th/web/sec/content/Fourier%20Transform%20Infrared%20Spectrometer%20(FT-IR)/).
- [54] shimadzu. 2022. **IRTracer-100.** [Online]. Available : <https://www.shi-madzu.com/an/products/molecular-spectroscopy/ftir/ftir-spectroscopy/irtracer-100/index.html>.
- [55] สมาคมนิวเคลียสแห่งประเทศไทย. 2015. **การวิเคราะห์โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์.** [Online]. Available : <https://www.nst.or.th/article/article494/article49418.htm>.
- [56] DKSH. 2018. **Malvern Panalytical - Benchtop X-Ray Fluorescence (XRF) Spectrometer - Epsilon 1 .** [Online]. Available : <https://www.dksh.com/th-en/products/ins/malvernpanalytical-epsilon1>.
- [57] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2001. “เทคนิคทางรามาน.” *Materials Characterization.* : 60-63.
- [58] CMIT วิทยาลัยเทคโนโลยีและนวัตกรรม. 2021. **Raman Spectrometer (เครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์).** [Online]. Available : <http://www.cmit.kmitl.ac.th/raman-spectrometer/#>.
- [59] อัจฉรพร ศรีอ่อน. 2016. “หลักการทํางานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง.” *เทคโนโลยีวัสดุ.* : 77-80.
- [60] KU LEUVEN. 2022. **In-house research infrastructure of BIOMAT.** [Online]. Available : <https://gbiomed.kuleuven.be/english/research/50000644/research/biomat/in-house-research-infrastructure-of-biomat>.
- [61] สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2017. **UV-Vis spectrophotometer เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง.** [Online]. Available : <https://www.slri.or.th/bdd/th/22-บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์/68-uv-vis-spectrophotometer.html>.
- [62] ชุติมันต์ จันทร์เมือง. 2003. “ผลเชิงแสงจากการฝังไอออนของอาร์กอนและออกซิเจนในทับทิมและไพโรซีนสังเคราะห์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [63] CHASE solar hub. 2022. **Spectroscopy Laboratory.** [Online]. Available : <https://solarhub.unc.edu/spectroscopy-laboratory/>.
- [64] Torrent, J. O. S. E., and Vidal Barrón. 2008. “Diffuse reflectance spectroscopy.” *Methods of Soil Analysis Part 5—Mineralogical Methods.* 5 : 367-385.
- [65] shimadzu. 2020. **UV-2600i, UV-2700i.** [Online]. Available : <https://www.shimadzu.com/an/products/molecular-spectroscopy/uv-vis/uv-vis-nir-spectroscopy/uv-2600i-uv-2700i/features.html>.
- [66] KONICA MINOLTA. 2017. **CM-5 Spectrophotometer.** [Online]. Available : <https://sensing.konicaminolta.us/us/products/cm-5-spectrophotometer/>.

- [67] Kashiwaya, Y. 2017. "Crystal Phases Formed in a CaO-Fe₂O₃ System Under a High Cooling Rate in Air." *Metallurgical and Materials Transactions B.* 48 : 3228-3238.
- [68] Kawasaki, T. Adachi, T. Ohfuji, H. and Osanai, Y. 2019. "FeAlO₃ under ultrahigh-temperature metamorphic conditions : Experimental evidence from the sillimanite-Fe₂O₃ and sillimanite-Fe₃O₄ systems." *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences.* 114(5) : 238-251.
- [69] Zhu, Z. Jiang, T. Li, G. Guo, Y. and Yang, Y. 2011. "Thermodynamics of Reactions Among Al₂O₃, CaO, SiO₂ and Fe₂O₃ During Roasting Processes." *Thermodynamics - Interaction Studies - Solids, Liquids and Gases.*
- [70] Djebaili, K. Mekhalif, Z. Boumaza, A. and Djelloul, A. 2015. "XPS, FTIR, EDX, and XRD Analysis of Al₂O₃ Scales Grown on PM2000 Alloy." *Journal of Spectroscopy.*
- [71] Hajji, S. Turki, T. Boubakri, A. Amor, M.B. and Mzoughi, N. 2017. "Study of cadmium adsorption onto calcite using full factorial experiment design." *Desalination and Water Treatment.* 83 : 222-233.
- [72] Tangboriboon, N. Phudkrachang, P. Mulsow, L. Kunchornsup, W. and Sirivat, A. 2013. "Removal of water extractable proteins from concentrated natural rubber latex by eggshells." *Journal of Elastomers and Plastics.* 45(3) : 253-269.
- [73] Abubakar, A. and Usman, B. 2021. "Optimization and Evaluation of Biodiesel Quality Produced from Cattle Fat using CaO/Al₂O₃ as Catalyst." *Moroccan Journal of Chemistry.* 9 : 132-142.
- [74] Laohavisuti, N. Boonchom, B. Boonmee, W. Chaiseeda, K. and Seesanong, S. 2021. "Simple recycling of biowaste eggshells to various calcium phosphates for specific industries." *Scientific Reports.* 11.
- [75] Berzina-Cimdina, L. and Borodajenko, N. 2012. "Research of Calcium Phosphates Using Fourier Transform Infrared Spectroscopy." *Infrared Spectroscopy - Materials Science, Engineering and Technology.* : 123-148.
- [76] Legodi, M.A. 2008. "Raman Spectroscopy Applied to Iron Oxide Pigments from Waste Materials and Earthenware Archaeological Objects." Ph.D. in Chemistry in the faculty of Natural and Agricultural Sciences of the University of Pretoria.
- [77] Mcmillan, P. and Piriou, B. 1983. "Raman Spectroscopy of Calcium Aluminate Glasses and Crystal." *Journal of Non-Crystalline Solids* 55. : 221-242.
- [78] Rincon-Joya, M. Raba, A. Barba-Ortega, J.J. 2016. "Synthesis of calcium oxide by means of two different chemical processes." *Universidad, Ciencia Y Tecnologia.* 20(81) : 188-192.

- [79] Yue, Y. Wang, J.J. Basheer, P.A.M. and Bai, Y. 2018. "Raman spectroscopic investigation of Friedel's salt." *Cement and Concrete Composites*. 86 : 306-314.
- [80] กัญญาวิวีร์ สีนมมงคลกุล, กัลยา กาลัญญู และอนุพงษ์ มาลาแก้ว. 2017. "การพัฒนาผงสีแดงสะท้อนรังสีอินฟราเรดจากเหล็กออกไซด์." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [81] กัญญาภัค ศรีปะโค และพงศกร พรหมทา. 2016. "การเตรียมชั้นเคลือบที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืนจากเปลือกไข่ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริก." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [82] Shi, Y. Zhong, M. Zhang, Z. and Wang, D. 2017. "Crystal structure and near-infrared reflective properties of Fe^{3+} doped $AlPO_4$ pigments." *Ceramics International*. 43(8) : 5979-5983.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การคำนวณสารที่ใช้ในการสังเคราะห์

1. การสังเคราะห์ผงสี

1.1 สารเคมีที่เกี่ยวข้อง

3.2.1 เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) บริสุทธิ์ 99% บริษัท Himedia3.2.2 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) บริสุทธิ์ 99% บริษัท Carlo Erba3.2.3 โซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) บริสุทธิ์ 99% บริษัท Carlo Erba3.2.4 แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่ได้จากโรงอาหารคณะ
วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1.2 สูตรที่ใช้ในการคำนวณปริมาณสารตั้งต้น

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

โดยที่ g_1 คือ น้ำหนักรวมสารที่ต้องการเตรียม (กรัม) g_2 คือ น้ำหนักสารตั้งต้นที่ต้องการเตรียม (กรัม) x คือ ร้อยละโดยน้ำหนักของสารตั้งต้นการสังเคราะห์ผงสีสูตรที่ 2 ($50\text{Fe}/10\text{Al}/40\text{Ca}$) จากสมการ (ก-1)การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นของผงสีสูตร $50\text{Fe}/40\text{Al}/10\text{Ca}$ จำนวน 20 กรัมสารตั้งต้น Fe_2O_3

$$\text{แทนค่า } g_2 = \frac{50}{100} \times 20$$

$$g_2 = 10.00 \text{ กรัม}$$

ดังนั้น ต้องเตรียม Fe_2O_3 จำนวน 10.00 กรัมสารตั้งต้น Al_2O_3

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

$$g_2 = 2.00 \text{ กรัม}$$

ดังนั้น ต้องเตรียม Al_2O_3 จำนวน 2.00 กรัมสารตั้งต้น CaO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$g_2 = 8.00$ กรัม
 ดังนั้น ต้องเตรียม CaO จำนวน 8.00 กรัม

1.3 สูตรที่ใช้ในการคำนวณปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเพื่อให้แคลเซียมออกไซด์ตามที่กำหนด

$$c_2 = \frac{c_1 \times 100}{56.04} \quad (\text{ก-2})$$

โดยที่ c_1 คือ น้ำหนักแคลเซียมออกไซด์ที่ต้องการเตรียม (กรัม)

c_2 คือ น้ำหนักแคลเซียมคาร์บอเนตที่ต้องการเตรียม (กรัม)

หมายเหตุ การเผาแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่จะได้แคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 56.4 อ้างอิงจาก วิทยานิพนธ์ของกัญญภาภัค ศรีปะโค และพงศกร พรหมทา [48]

การคำนวณปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ของผงสีสูตรที่ 2 (50Fe/10Al/40Ca) จำนวน 20 กรัม

จากสมการ (ก-1)

สารตั้งต้น CaO

$$\text{แทนค่า } g_2 = \frac{40}{100} \times 20$$

$$g_2 = 8.00 \text{ กรัม}$$

ดังนั้น น้ำหนักแคลเซียมออกไซด์ที่ต้องเตรียมคือจำนวน 8.00 กรัม

ดังนั้น c_1 คือ 8.00 กรัม

จากสมการ (ก-2)

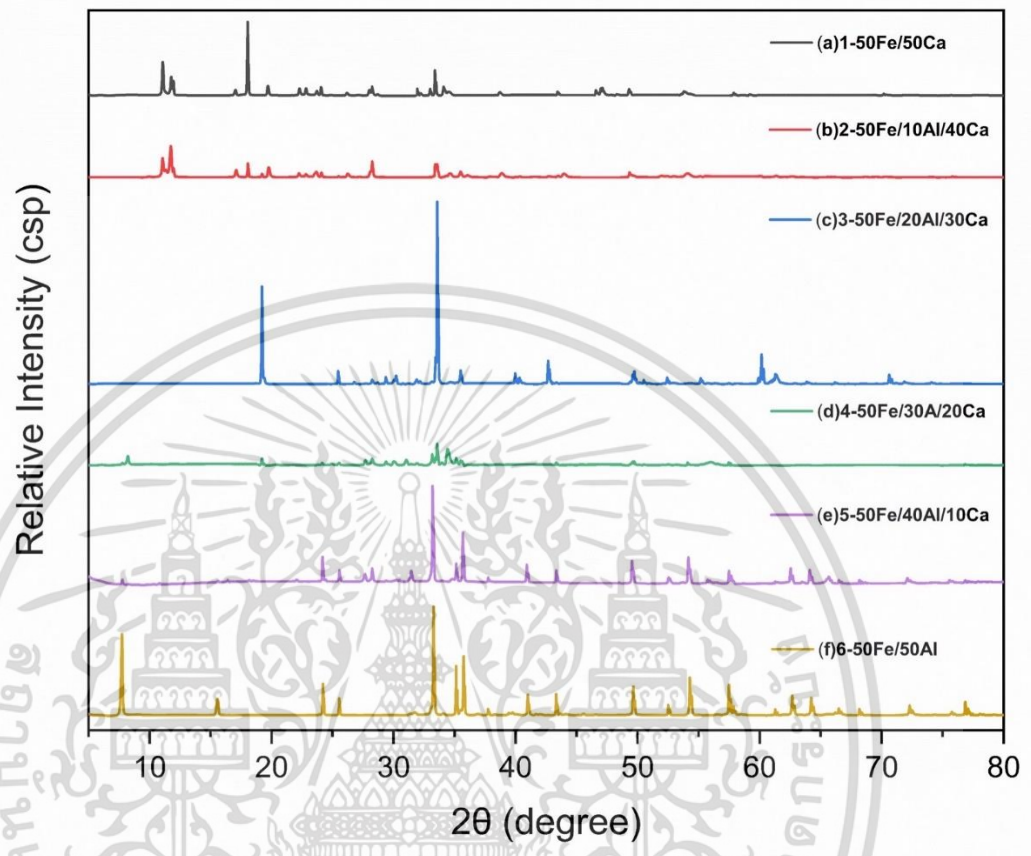
$$\text{แทนค่า } c_2 = \frac{8.00 \times 100}{56.04}$$

$$c_2 = 14.18 \text{ กรัม}$$

ดังนั้น ต้องเตรียม Ca_2O_3 จากเปลือกไข่จำนวน 14.18 กรัม

ภาคผนวก ข

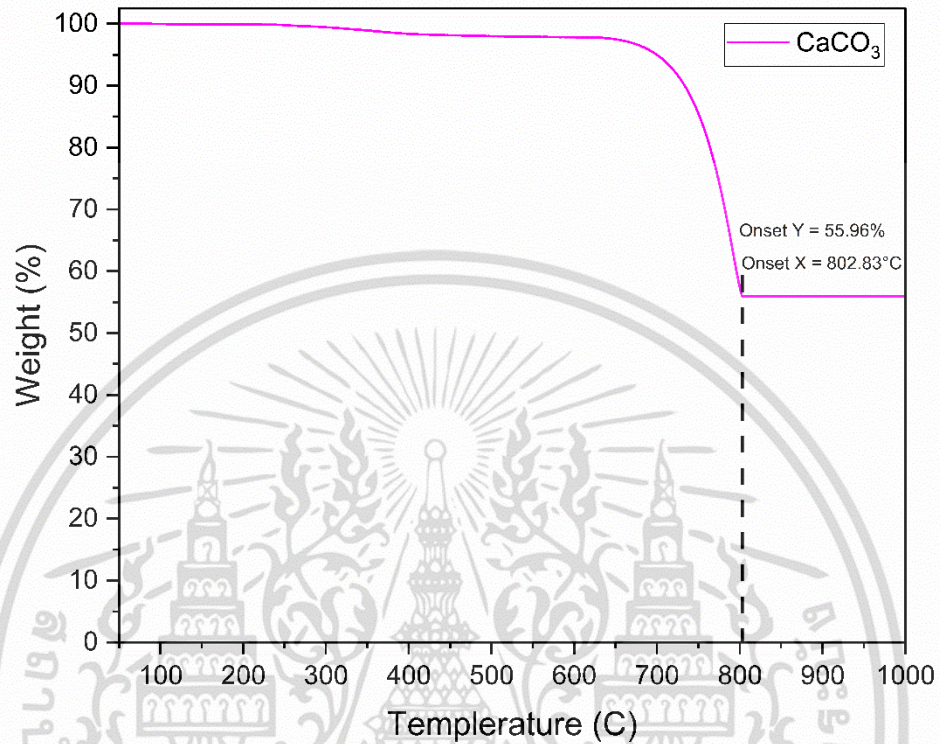
รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงที่สังเคราะห์ขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

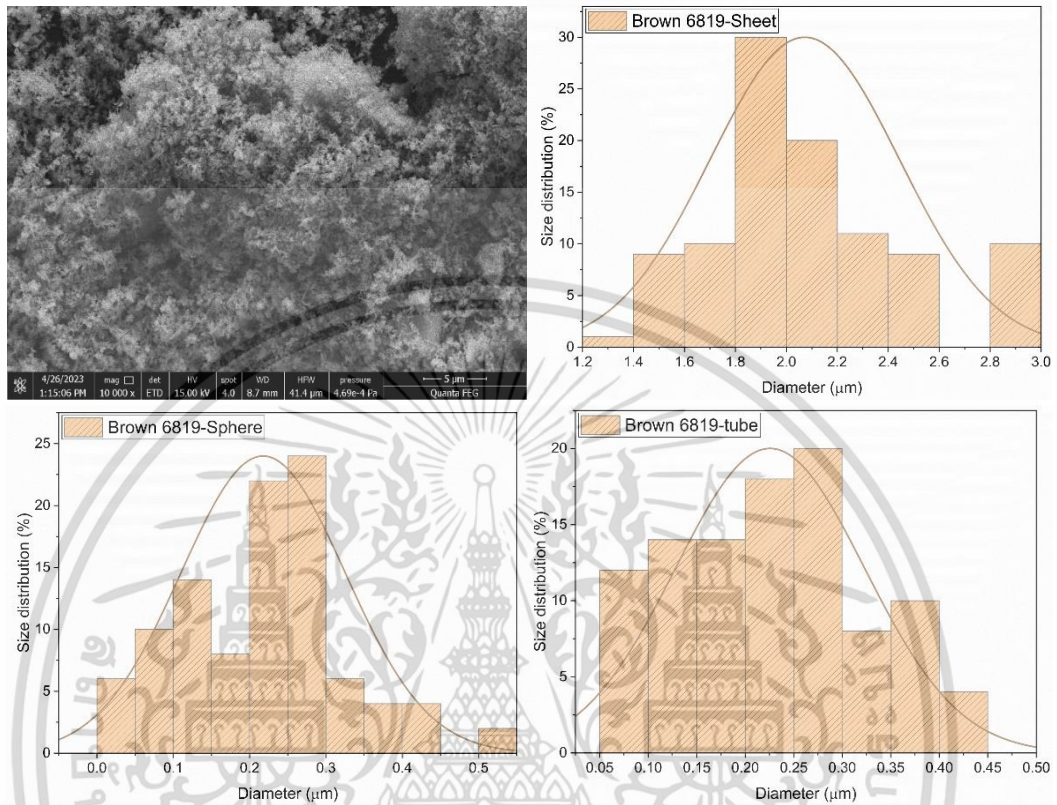
ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA ของเปลือกไข่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

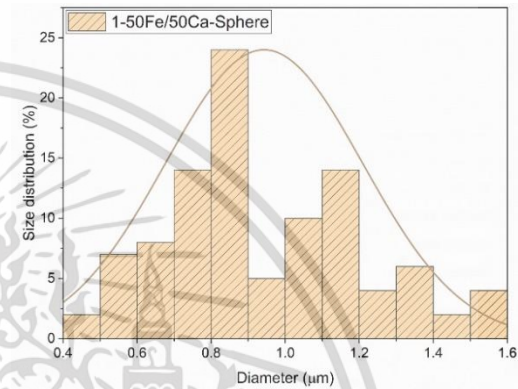
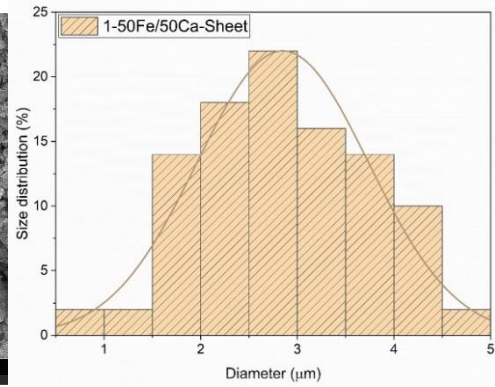
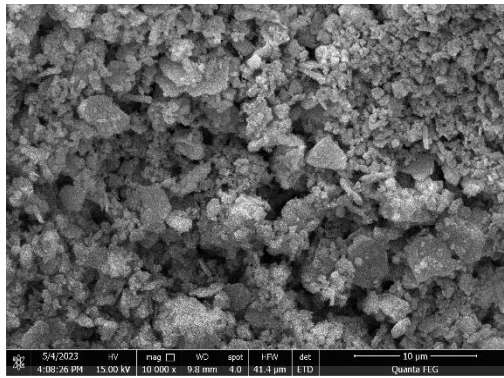
ภาคผนวก ง

ลักษณะสัณฐานวิทยาของผงสี

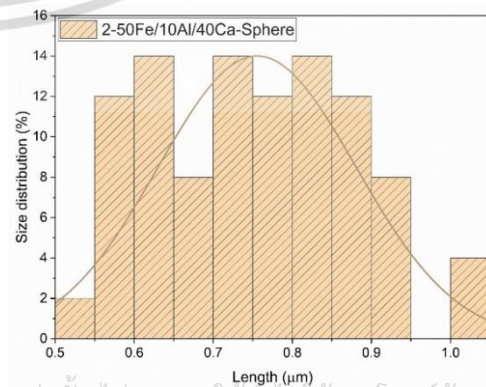
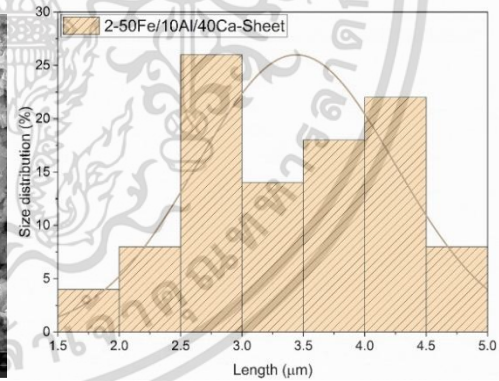
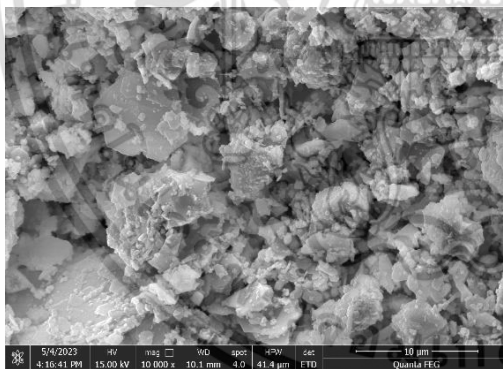


ภาพ SEM และกราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงสีน้ำตาลทางการค้า (Brown 6819)

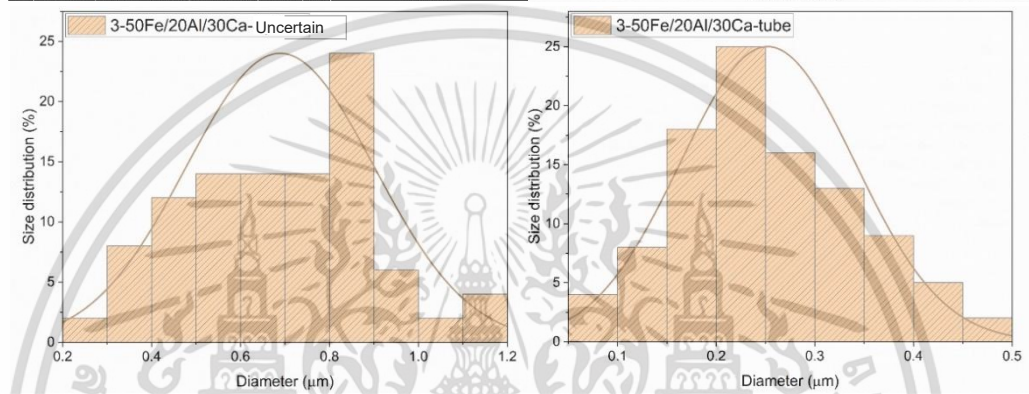
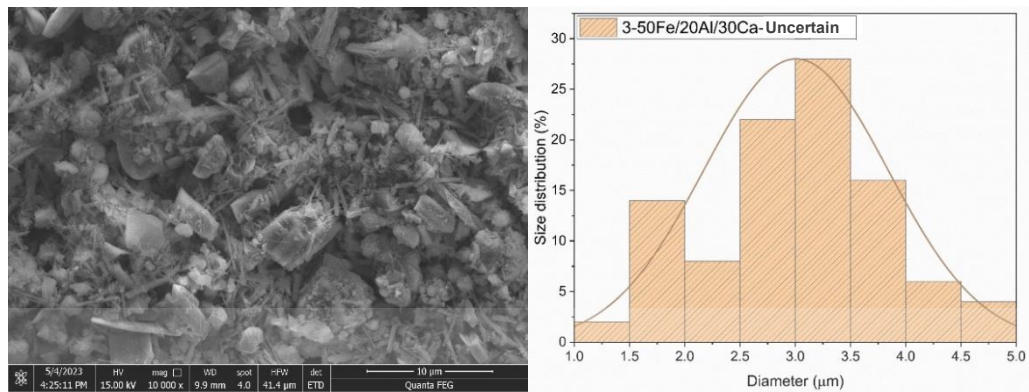
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



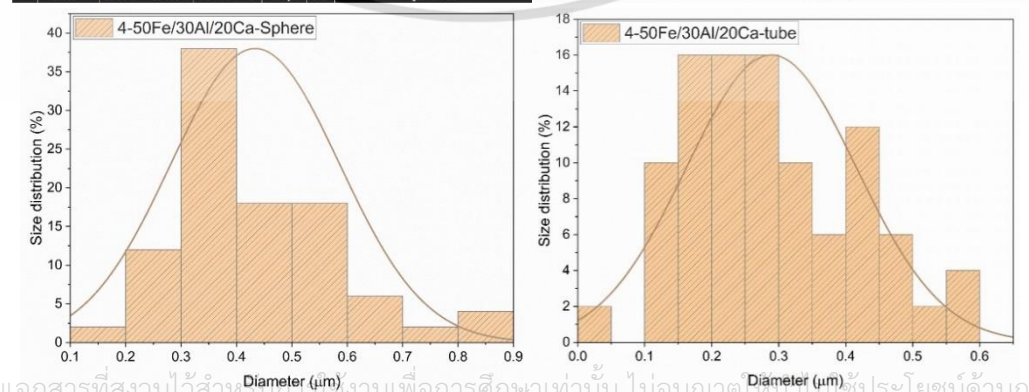
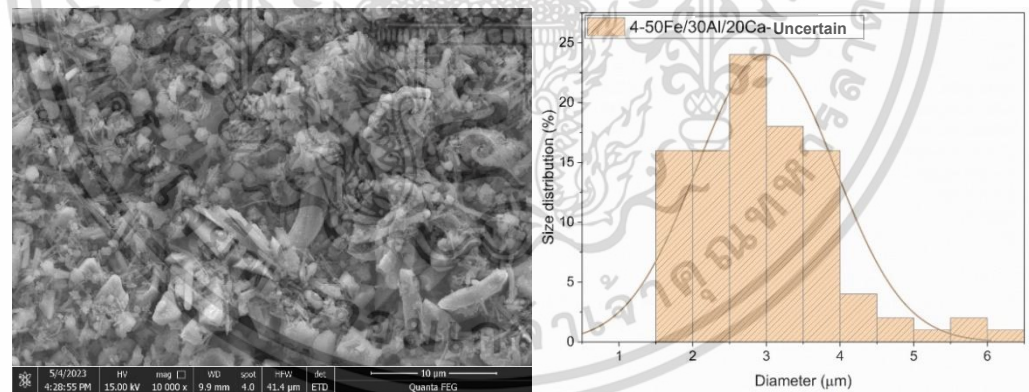
ภาพ SEM และกราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงสีสูตรที่ 1 (50Fe/50Ca)



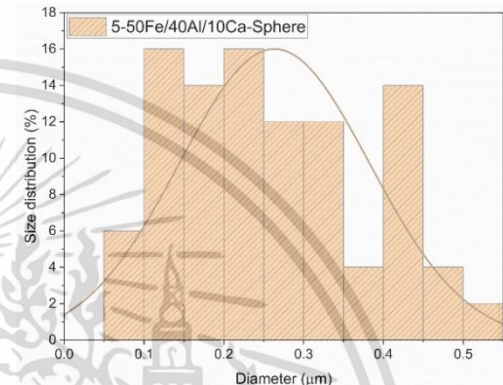
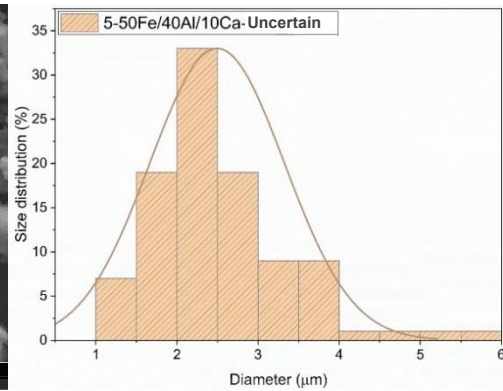
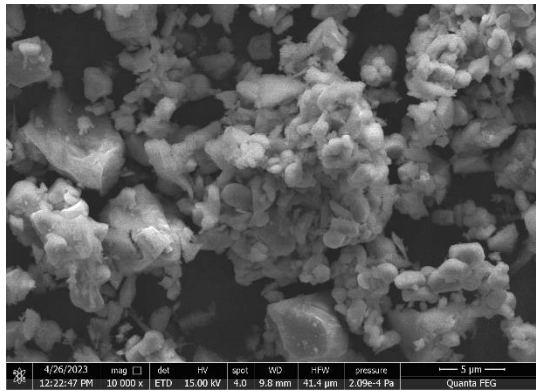
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ภาพ SEM และกราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงสีสูตรที่ 2 (50Fe/10Al/40Ca)



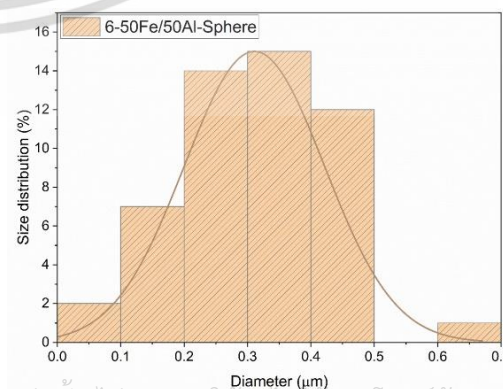
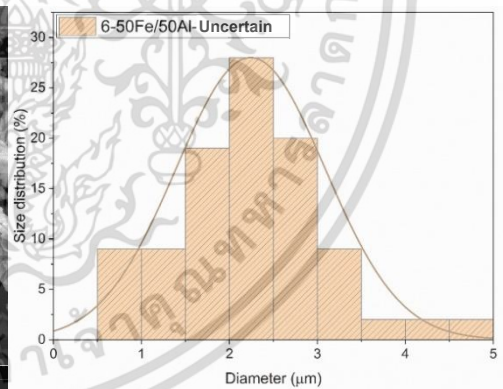
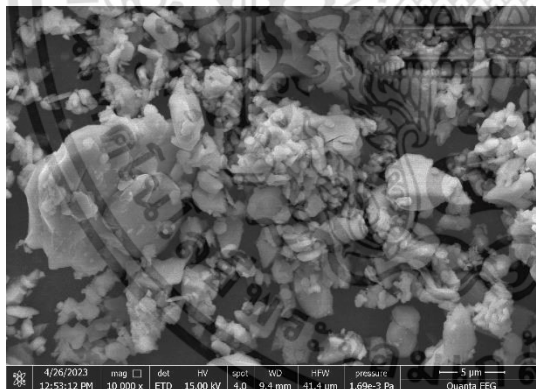
ภาพ SEM และกราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงสัสูตรที่ 3 (50Fe/20Al/30Ca)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ภาพ SEM และกราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงสัสูตรที่ 4 (50Fe/30Al/20Ca) ไปใช้



ภาพ SEM และกราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงสีสูตรที่ 5 (50Fe/40Al/10Ca)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเนื้อหาที่เป็นลิขสิทธิ์และต้องขออนุญาตเผยแพร่สู่สาธารณะหากนำไปใช้

ภาคผนวก จ

การคำนวณหาค่าพลังงานช่องว่างระหว่างชั้นพลังงานของผงลี

จากสูตร $\alpha h\nu = B(h\nu - E_g)^n$ (จ-1)

$$\alpha = \frac{(2.003)A}{L} \quad (จ-2)$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (จ-3)$$

โดยที่ α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ หรือเท่ากับ 6.626×10^{-34} J.s

ν คือ ความถี่ของโฟตอนที่ตกกระทบ (s^{-1})

B คือ ค่าคงที่

E_g คือ ค่าพลังงานช่องว่างระหว่างชั้นพลังงาน (eV)

n คือ ค่าคงที่ โดย $n = 1/2$ แสงผ่านได้โดยตรง

$n = 2$ แสงผ่านได้โดยอ้อม

$n = 3/2$ ไม่สามารถดูดกลืนแสงได้

A คือ ค่าดูดกลืนแสง

L คือ ความกว้างของเซลล์ (cm) ซึ่งโดยทั่วไปมีค่า 1 cm

c คือ ความเร็วแสง (2.98×10^8 m/s)

λ คือ ความยาวคลื่น (nm)

ค่าพลังงานช่องว่างระหว่างชั้นพลังงาน (E_g) หาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $h\nu$ (แกน x) และ $(\alpha h\nu)^2$ (แกน y) โดยลากเส้นในช่วงที่มีความชันสูงสุดตัดลงที่แกน x

การคำนวณเพื่อใช้ในการหาค่าพลังงานช่องว่างระหว่างชั้นพลังงานของผงลีสูตรที่ 1 (50Fe/50Ca) ที่ความยาวคลื่น 200 นาโนเมตร มีค่าการดูดกลืนแสง (A) 1.438

หาค่า α โดยแทนค่าในสมการ (จ-2)

$$\alpha = \frac{(2.003) \times 1.438}{1 \text{ cm}}$$

$$\alpha = 3.3117 \text{ cm}^{-1}$$

หาค่า ν โดยแทนค่าในสมการ (จ-3)

$$\nu = \frac{2.98 \times 10^8 \text{ m/s}}{200 \times 10^{-9} \text{ m}}$$

$$\nu = 1.49 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่า $h\nu$ โดยแทนค่าในสมการ

$$h\nu = (6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(1.49 \times 10^{15} \text{ s}^{-1})$$

$$h\nu = 9.8727 \times 10^{-19} \text{ J}$$

เปลี่ยนหน่วยเป็น eV

$$h\nu = \frac{9.8727 \times 10^{-19}}{1.61 \times 10^{-19}}$$

$$h\nu = 6.1321 \text{ eV}$$

หาค่า $(\alpha h\nu)^2$ โดยการแทนค่า

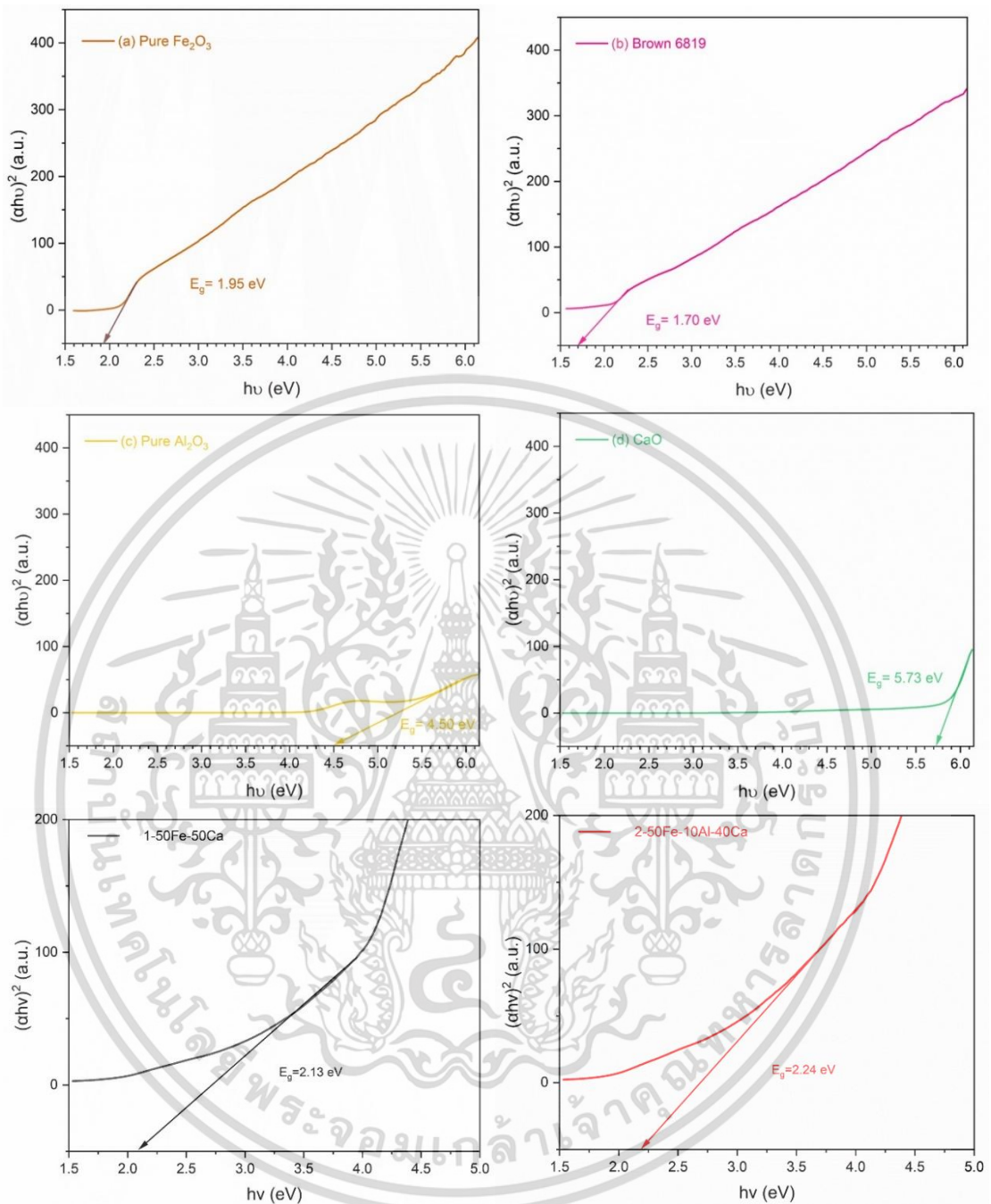
$$\alpha h\nu = 3.3117 \text{ cm}^{-1} \times 6.1321 \text{ eV}$$

$$\alpha h\nu = 20.3077 \text{ eV/cm}$$

หาค่า $(\alpha h\nu)^2$ จะได้

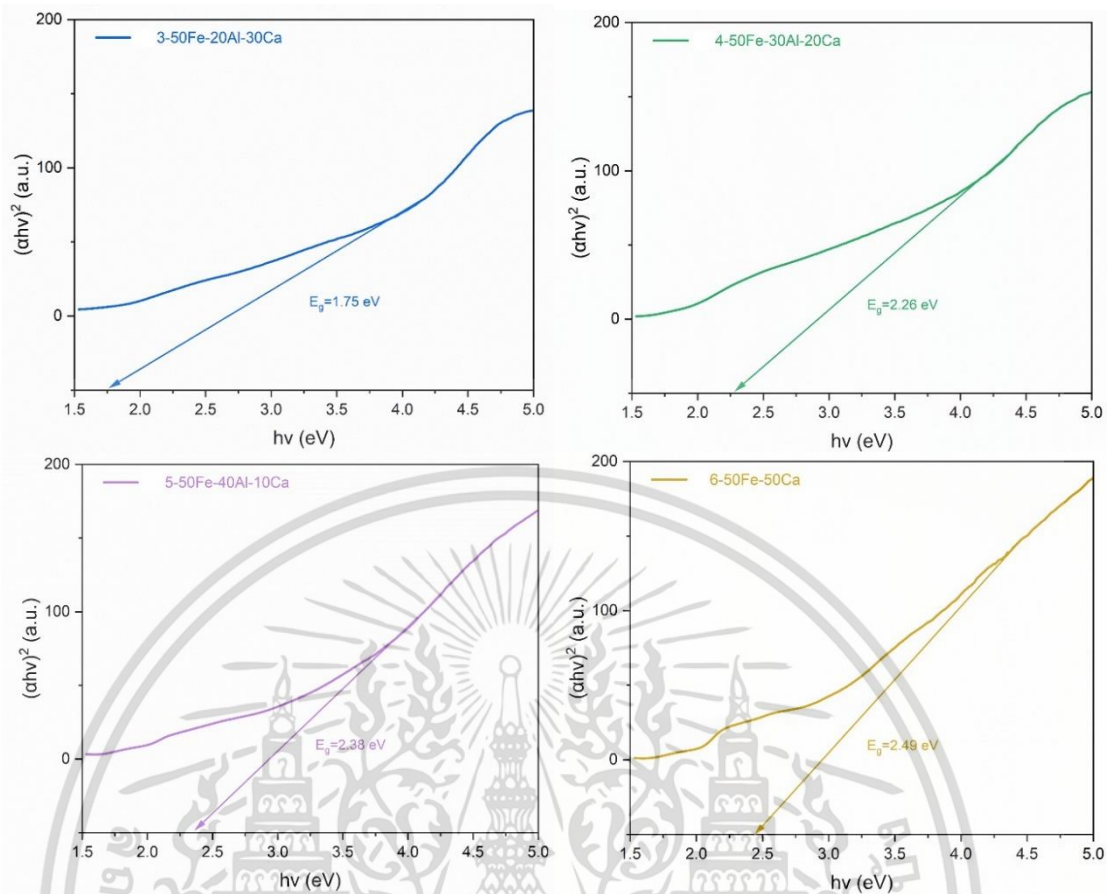
$$(\alpha h\nu)^2 = 412.4101 \text{ (eV/cm)}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ-1 ค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของผงสีทางการค้าและผงสีผสมที่สังเคราะห์ขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ-1 (ต่อ) ค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของผงสีทางการค้าและผงสีสัมที่สังเคราะห์ขึ้น

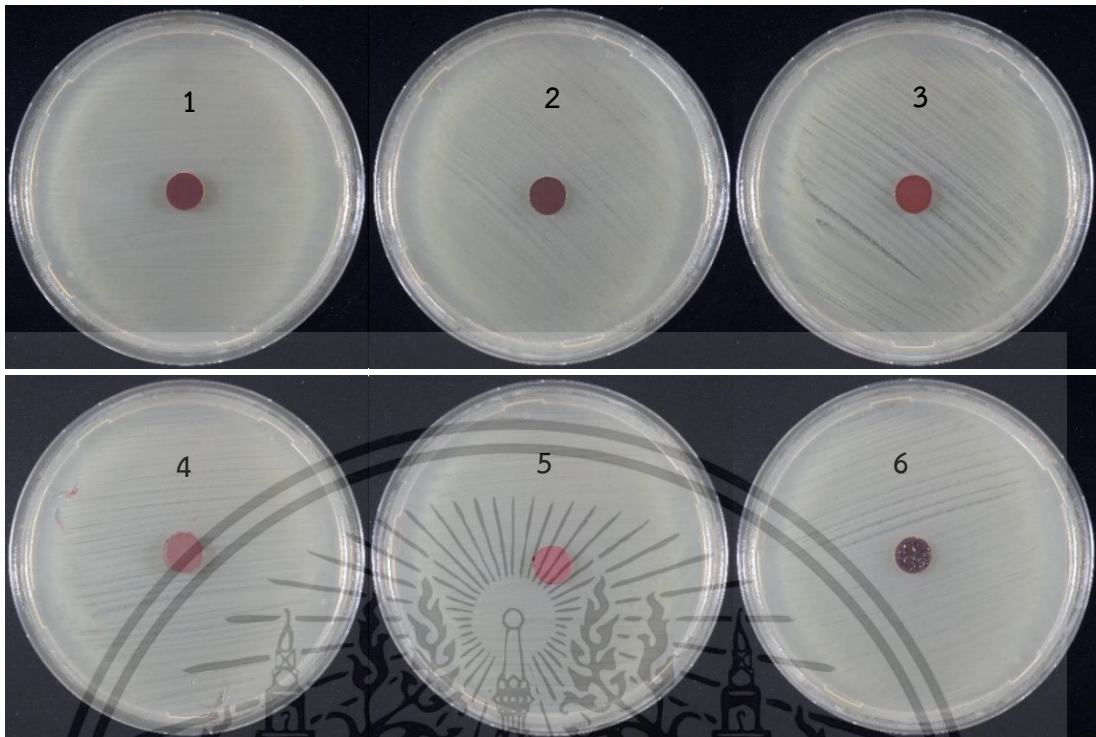
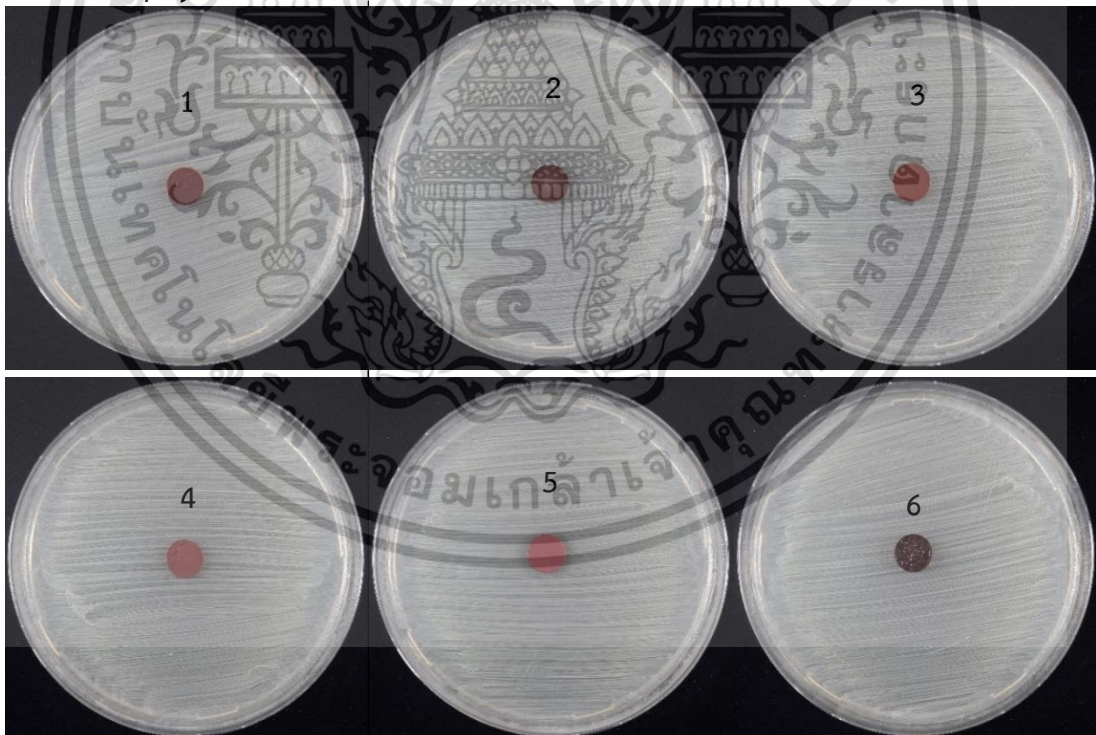
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

ผลการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรีย

Item	Sample code	Replication	Activity	Zone diameter (millimeter)	
				<i>E. coli</i>	<i>S. aureus</i>
1	50Fe/50Ca	1	Inactive	-	-
2	50Fe/10Al/40Ca	1	Inactive	-	-
3	50Fe/20Al/30Ca	1	Inactive	-	-
4	50Fe/30Al/20Ca	1	Inactive	-	-
5	50Fe/40Al/10Ca	1	Inactive	-	-
6	50Fe/50Al	1	Inactive	-	-

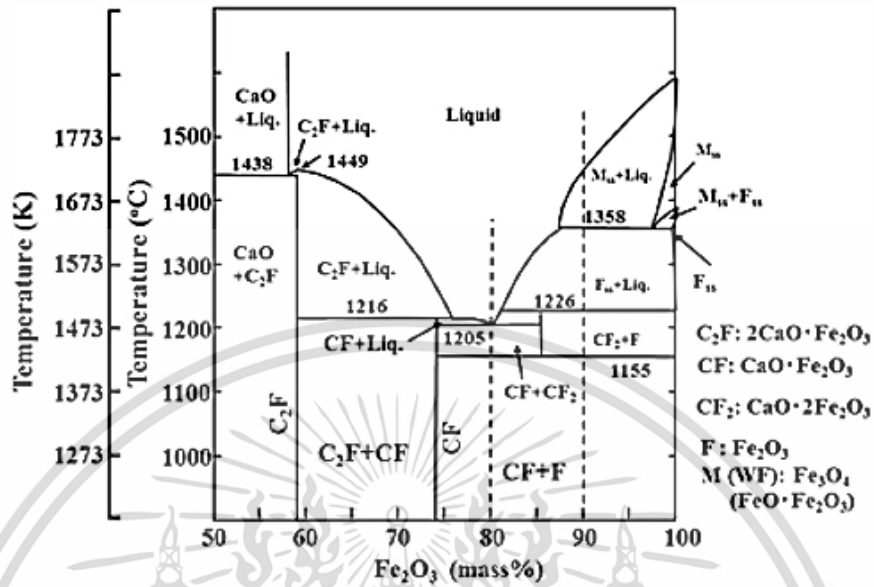
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Escherichia coli ATCC 25922*Staphylococcus aureus* ATCC 25923

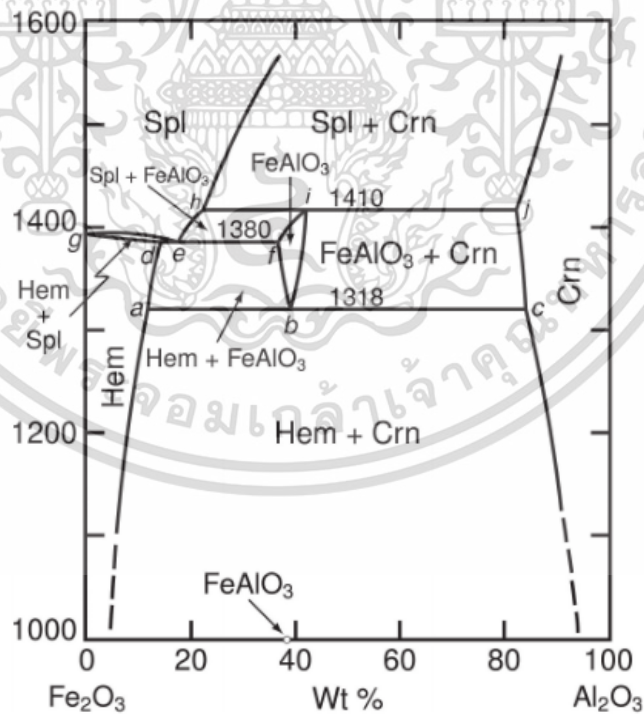
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

แผนผังวัฏภาค Fe_2O_3 -CaO [67]



แผนผังวัฏภาค Fe_2O_3 - Al_2O_3 [68]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา

วันที่ 22 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2566

ข้าพเจ้า นางสาว กนิษฐา เกลี้ยงเกล้า รหัสประจำตัว 62050254

นางสาว นัฐกานต์ กุลวงศ์ รหัสประจำตัว 62050296

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม ภาควิชา เคมี ขอรับรองว่าโครงการพิเศษเรื่อง
ชื่อภาษาไทย การพัฒนาผงสีสะท้อนรังสีอินฟราเรดจากเหล็กออกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์และเปลือกไข่
ชื่อภาษาอังกฤษ Development of NIR-reflective pigments from Fe₂O₃, Al₂O₃ and eggshell waste
ปีการศึกษา 2565

เป็นผลงานวิจัยที่มีได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว และได้
แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่มโครงการพิเศษฉบับสมบูรณ์แล้ว
โปรแกรมอักขราวิสุทธิ์ 0.60 %

ลงชื่อ กนิษฐา เกลี้ยงเกล้า

(นางสาวกนิษฐา เกลี้ยงเกล้า)

นักศึกษา

ลงชื่อ นัฐกานต์ กุลวงศ์

(นางสาวนัฐกานต์ กุลวงศ์)

นักศึกษา

ข้าพเจ้า รศ.ดร. ปานไพลิน สีหาราช อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ได้ตรวจสอบโครงการพิเศษของนักศึกษาข้างต้น
แล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ ปานไพลิน สีหาราช

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้