



การสังเคราะห์สีผงเซรามิกสีน้ำเงิน สะท้อนรังสีอินฟราเรดใกล้ $\text{Co}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Al}_2\text{O}_4$

The synthesis of near-infrared reflective blue ceramic pigment of $\text{Co}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Al}_2\text{O}_4$

พัฒนารักความสุข¹, สิทธิสุนทร สุโพธิณะ², ลดา พันธุ์สุขุมธนา³, ธีรศักดิ์ ตั้งกิตติศักดิ์¹

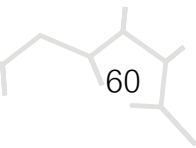
Pattana Rakkwamsuk¹, Sittisunton Supothina², Lada Pansukhumthana³, Teerasak Tangkittimasak¹

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการสังเคราะห์สีผงเซรามิกสีน้ำเงินด้วยปฏิกิริยาของเซรามิกจากความร้อน (solid state reaction) จากโคบอลต์ออลูมิเนต (Cobalt aluminate) ที่เจือด้วยแมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide) เพื่อเกิดเป็นสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน (Complex inorganic compound pigment, CICP) $\text{Co}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Al}_2\text{O}_4$ ที่ให้สีน้ำเงินและมีความสามารถในการสะท้อนรังสีอาทิตย์ช่วงอินฟราเรดใกล้ (Near infrared) ผงสีที่สังเคราะห์ได้สามารถนำไปประกอบเป็นผลิตภัณฑ์สีทาอาคารเพื่อสะท้อนรังสีอาทิตย์ และลดปริมาณความร้อนที่สะสมบนแผ่นหลังคา ส่งผลต่อการประหยัดพลังงานของระบบปรับอากาศ และช่วยเพิ่มสภาพสบายเชิงอุณหภูมิ (Thermal comfort) ภายในอาคาร การสังเคราะห์สีทำโดยการบดผสม CoO MgO และ Al_2O_3 ที่สัดส่วนต่าง ๆ เพื่อเกิดปฏิกิริยาเป็นสารประกอบอินทรีย์ $\text{Co}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Al}_2\text{O}_4$ โดยมีการแปรค่า x ระหว่าง 0 ถึง 1 และถูกเผาที่อุณหภูมิ 1,200 1,300 และ 1,400 องศาเซลเซียส แล้วนำมาล้าง อบ และบดจนได้เป็นผงสีเซรามิกสีน้ำเงิน สีของผงสี ซึ่งคำนวณจากระบบ $\text{CIE } L^* a^* b^*$ ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่ออุณหภูมิเผาเปลี่ยนแปลง แต่แปรเปลี่ยนมากตามค่า x หรือ ตามปริมาณ MgO ที่เจือ และพบว่า สีจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเข้มเป็นสีฟ้า เมื่อ x มีค่าเพิ่มขึ้น และจะเป็นสีขาวเมื่อ x มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ พบว่าผงสีเซรามิกสีน้ำเงินที่มีสูตรสารประกอบ $\text{Co}_{0.2}\text{Mg}_{0.8}\text{Al}_2\text{O}_4$ มีความสามารถในการสะท้อนรังสีอาทิตย์ช่วงอินฟราเรดใกล้ได้ดี โดยค่าการสะท้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ x มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจากชุดตัวอย่างทั้งหมดพบว่า $\text{Co}_{0.2}\text{Mg}_{0.8}\text{Al}_2\text{O}_4$ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1,300 °C จะได้ผงสีน้ำเงินที่มีค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดใกล้สูงสุด เท่ากับ 66.8%

คำสำคัญ: ผงสีสีน้ำเงิน ผงสีสะท้อนรังสีอาทิตย์ ผงสีสะท้อนรังสีอินฟราเรดใกล้ สารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน

¹คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
²ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
³กรมวิทยาศาสตร์บริการ
E-mail address: pattana.rak@kmutt.ac.th
Corresponding author. E-mail address: pattana.rak@kmutt.ac.th



Abstract

This paper presents the research and development of blue ceramic pigment synthesized by solid-state reaction of cobalt aluminate doped with magnesium oxide that formed complex inorganic compound pigment (CICP) of $\text{Co}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Al}_2\text{O}_4$. The pigment offered shades of blue and high reflectivity in the near-infrared (NIR) region. The pigment can be used as a vehicle for a high solar reflective coating that reduces heat stored in building structures, promotes energy conservation in an air-conditioning system, and enhance human thermal comfort in the building. The synthesis was performed by ball-milling raw materials composed of CoO , MgO and Al_2O_3 at various compositions to reactively form $\text{Co}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Al}_2\text{O}_4$ in the calcination process at 1,200, 1,300 and 1,400 °C, where x was varied between 0 and 1. The calcined compound was then washed, oven-dried and ground, that yielded powdered pigment with the shade of blue. The color of pigment, measured and computed in compliance with CIE $L^* a^* b^*$, did not alter as the calcining temperature changed but varied significantly with x. As x increased, the color changed from deep blue to light blue and became white as x was equal to 1.0. The blue pigment possessed high solar reflectance in the NIR region. Its reflectance increased with x. It was found that the pigment synthesized with $x = 0.8$, $\text{Co}_{0.2}\text{Mg}_{0.8}\text{Al}_2\text{O}_4$, and calcined at 1,300 °C offered the highest NIR reflectance at 66.8%

Keywords: Blue pigment, Solar reflective pigment, Near-infrared reflective pigment, Complex inorganic compound pigment (CICP)

1. บทนำ (Introduction)

ในภูมิภาคที่มีความเข้มรังสีอาทิตย์สูง เช่นประเทศที่อยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร อาคารและที่พักอาศัยต่าง ๆ จะสิ้นเปลืองพลังงานไปกับการปรับอากาศซึ่งอาจมีสัดส่วนสูงถึงร้อยละ 50-60 ของพลังงานที่เข้าทั้งหมดในอาคาร [1] แนวทางการลดการใช้พลังงานอาจทำได้หลายวิธี แต่การใช้วัสดุเปลือกอาคารที่มีความสามารถในการสะท้อนรังสีอาทิตย์ ได้รับการพิสูจน์ว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง เพราะลดการสะสมความร้อนภายในโครงสร้างอาคาร ส่งผลโดยตรงต่อการลดการใช้พลังงานกับการปรับอากาศ [2-4] เป็นประโยชน์โดยตรงต่อการอนุรักษ์พลังงาน และลดปัญหาการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เป็นสาเหตุสำคัญของปัญหาภูมิอากาศของโลกเปลี่ยนแปลง

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า เปลือกอาคารที่เคลือบด้วยสีที่มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ (Solar reflectance) ได้ถึง 94% สามารถลดการใช้พลังงานลงได้ไม่น้อยกว่า 20% [5] สีดังกล่าวส่วนใหญ่เป็นสีในกลุ่มโทนสีอ่อน ซึ่งอาจจะไม่ตอบสนองความพึงพอใจของเจ้าของอาคาร อย่างไรก็ตาม การใช้สีโทนเข้มทั่วไป จะมีการสะท้อนรังสีอาทิตย์น้อยกว่าหรือมีการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในปริมาณมากกว่า [6] ดังนั้นโจทย์สำคัญของสีสะท้อนรังสีอาทิตย์จึงได้แก่ การที่สียังคงให้สีในโทนสีต่าง ๆ ได้ แต่ยังคงมีความสามารถในการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในย่านรังสีอินฟราเรดใกล้ (Near infrared) ได้ดี

บทความนี้นำเสนอผลงานวิจัยและพัฒนาผงสีสีน้ำเงินที่สามารถสะท้อนรังสีอาทิตย์ช่วงอินฟราเรดใกล้ (NIR) ได้ดี ในอดีตผงสีเซรามิกสีน้ำเงินมีการผลิตและใช้กันมาตั้งแต่สมัยยุคโบราณ โดยทั่วไปคือ Egyptian blue โดยมี ซิลิกา แคลเซียมออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์ เป็นองค์ประกอบหลัก ต่อมาได้มีการคิดค้นผลิตผงสีเซรามิกสีน้ำเงินจากออกไซด์ต่าง ๆ เพิ่มมากขึ้น โดยใช้สูตรสารประกอบต่าง ๆ [7-11] นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาจนถึงสามารถผลิตเชิงพาณิชย์ได้เช่น บริษัท Ferro Corporation ได้มีการพัฒนาและผลิตผงสีสีน้ำเงิน Pigment Blue 28 และ Pigment Blue 29 ที่ใช้โคบอลออกไซด์ และอลูมิเนียมออกไซด์ นอกจากนี้ ยังมีการใช้โคบอลออกไซด์ และโครเมียมออกไซด์ สำหรับ Pigment Blue 36 [12] ซึ่งผงสีเซรามิกสีน้ำเงินแต่ละชนิดที่ผลิตได้ก็มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่แตกต่างกันออกไป

สำหรับงานวิจัยนี้จะเป็นการสังเคราะห์สีผงเซรามิกสีน้ำเงินด้วยปฏิกิริยาของเซรามิกจากความร้อน (Solid state reaction) ที่อาศัยสารประกอบหลักตาม Pigment Blue 28 และ Pigment Blue 29 แต่จะมีการเจือด้วยแมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide) เพื่อเกิดเป็นสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน (Complex inorganic compound pigment, CICP) $\text{Co}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Al}_2\text{O}_4$ ที่ให้สีน้ำเงิน และมีความสามารถในการสะท้อนรังสีอาทิตย์ช่วงอินฟราเรดใกล้

2. วิธีการวิจัย (Experimental)

2.1 ขั้นตอนการเตรียมผงสีสีน้ำเงิน

การสังเคราะห์ผงสีสีน้ำเงินในงานวิจัยนี้ ทำโดยการบดผสม cobalt(II,III) oxide (100%, Sigma-Aldrich) และ aluminum oxide (99.5%, Sigma-Aldrich) เพื่อเป็นวัตถุดิบฐาน (Based raw material) และมีการลดปริมาณ cobalt(II,III) oxide ด้วยการแทนที่ด้วย magnesium oxide (98%, Fluka) ในปริมาณต่าง ๆ กัน เพื่อทำให้เกิดสารประกอบ $\text{Co}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Al}_2\text{O}_4$ ตามแผนการเตรียมตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 1 แล้วจึงนำสารประกอบแต่ละสูตรผสมทำการเผาที่อุณหภูมิ 1200 1300 และ 1400 องศาเซลเซียส ด้วยเตาเผา (Modu Temp รุ่น SC96BV-N) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ใช้อัตราเพิ่มอุณหภูมิเตาเผาที่ 4 °C/นาที จากนั้นนำไปบดละเอียด ด้วยเครื่อง Planetary Ball Mill (Retsch รุ่น PM200) ด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำผงสีไปล้างด้วยน้ำ และอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการ จะได้ตัวอย่าง 24 ตัวอย่าง แบ่งเป็น กลุ่มที่ 1 ตัวอย่าง M1-M8 เผาที่ 1200 °C กลุ่มที่ 2 ตัวอย่าง M9-M16 เผาที่ 1300 °C และกลุ่มที่ 3 ตัวอย่าง M17-M24 เผาที่ 1400 °C ซึ่งจะถูกนำไปวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ต่อไป

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมส่วนผสมสูตรสารประกอบ $\text{Co}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Al}_2\text{O}_4$

x	สูตรสารประกอบ	ชื่อตัวอย่าง		
		อุณหภูมิเผา(°C)		
		1200	1300	1400
0	CoAl_2O_4	M1	M9	M17
0.2	$\text{Co}_{0.8}\text{Mg}_{0.2}\text{Al}_2\text{O}_4$	M2	M10	M18
0.4	$\text{Co}_{0.6}\text{Mg}_{0.4}\text{Al}_2\text{O}_4$	M3	M11	M19
0.6	$\text{Co}_{0.4}\text{Mg}_{0.6}\text{Al}_2\text{O}_4$	M4	M12	M20
0.8	$\text{Co}_{0.2}\text{Mg}_{0.8}\text{Al}_2\text{O}_4$	M5	M13	M21
0.9	$\text{Co}_{0.1}\text{Mg}_{0.9}\text{Al}_2\text{O}_4$	M6	M14	M22
0.95	$\text{Co}_{0.05}\text{Mg}_{0.95}\text{Al}_2\text{O}_4$	M7	M15	M23
1.0	MgAl_2O_4	M8	M16	M24

2.2 การวัดและคำนวณค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผงสีสีน้ำเงินและค่าพิกัดสี

การวิเคราะห์การสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผงสีที่สังเคราะห์ได้ ทำด้วยการวัดค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ ด้วยเครื่อง UV-VIS-NIR spectrophotometer (Shimadzu, 3100) และนำค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่น 780 ถึง 2500 นาโนเมตร มาคำนวณค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ช่วงอินฟราเรดใกล้ ตามมาตรฐาน ASTM E903 และทำการวิเคราะห์ค่าพิกัดสี ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์สีที่อ้างอิงระบบพิกัด CIE L* a* b*

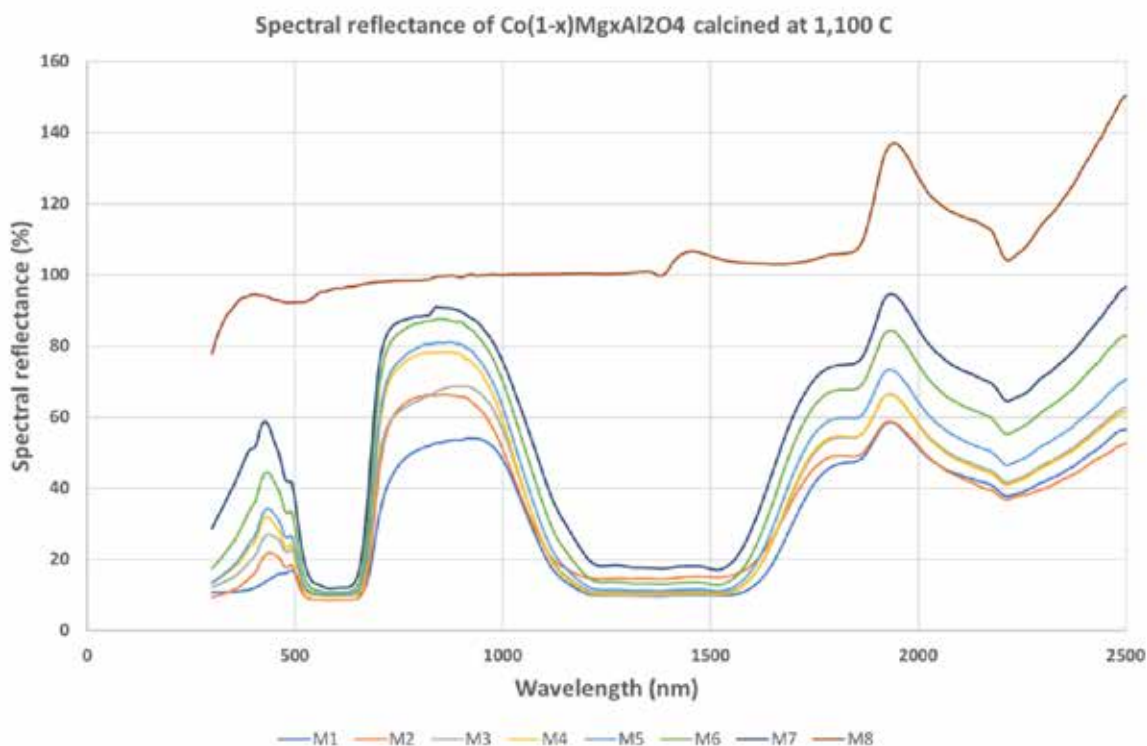
2.3 การศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึก

วิเคราะห์โครงสร้างผลึกทำด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ด้วยรังสี Cu K α , 40 kV, 20 mA ในช่วงมุม 2θ ระหว่าง 20–80 องศา จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ชนิดโครงสร้างผลึก โดยเปรียบเทียบสัญญาณ (Peak matching) มุมที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างมาตรฐานในฐานะข้อมูล

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

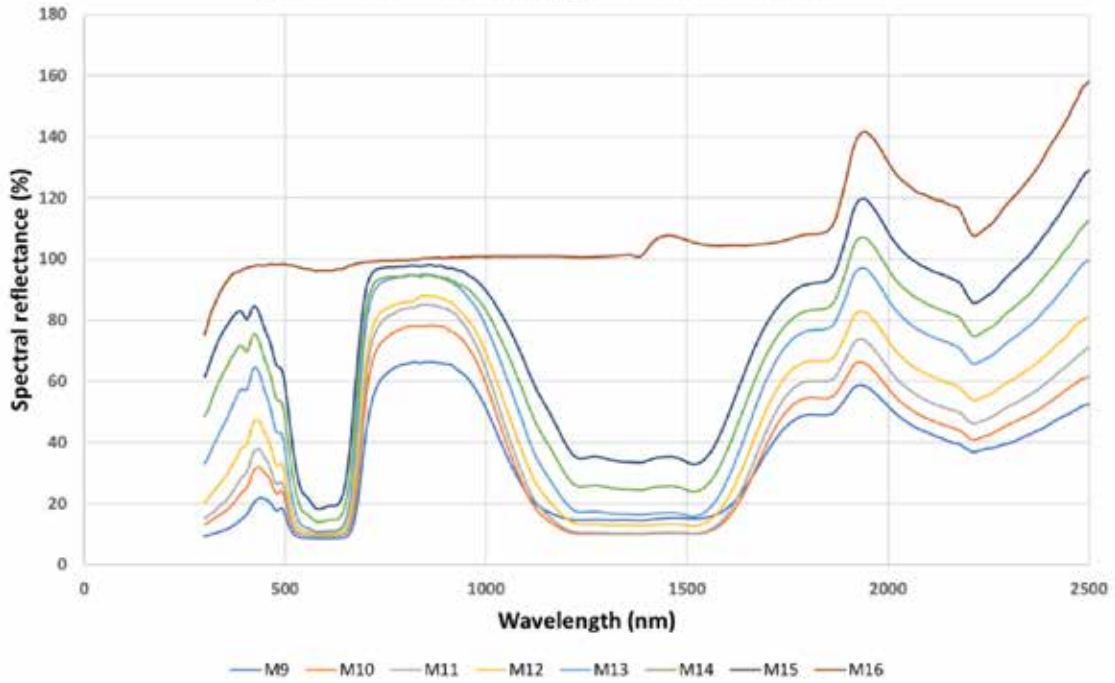
3.1 ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผงสีสีน้ำเงินและค่าพิกัดสี

ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่น 300 ถึง 2500 นาโนเมตรของตัวอย่างผงสีสีน้ำเงิน M1-M24 ที่วัดได้จากเครื่อง spectrophotometer แสดงในรูปที่ 1-3 และเมื่อนำมาคำนวณค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ช่วงอินฟราเรดใกล้ ตามมาตรฐาน ASTM E903 และค่าวิเคราะห์สี ตามหลัก CIE L* a* b* จะได้ผล ดังแสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 4



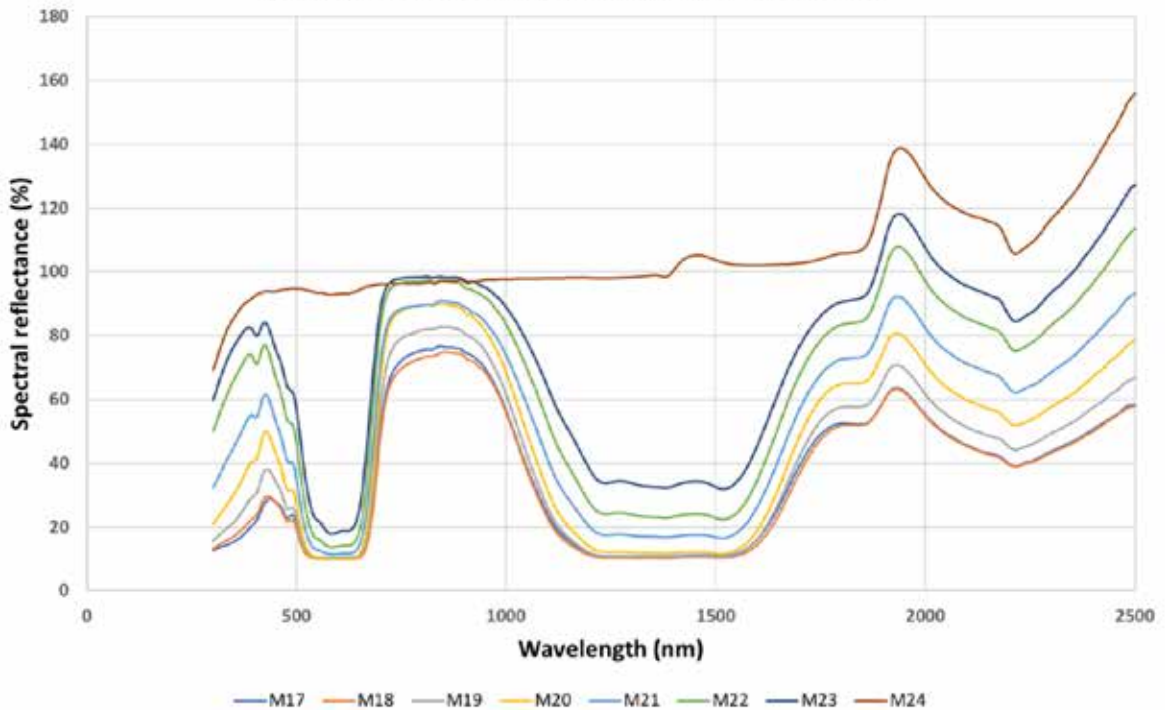
รูปที่ 1 การสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่น 300 ถึง 2500 นาโนเมตรของตัวอย่าง M1–M8 (อุณหภูมิเผา 1200 °C)

Spectral reflectance of $\text{Co}_{(1-x)}\text{Mg}_x\text{Al}_2\text{O}_4$ calcined at 1,300 C



รูปที่ 2 การสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่น 300 ถึง 2500 นาโนเมตร
ของตัวอย่าง M9–M16 (อุณหภูมิเผา 1300 °C)

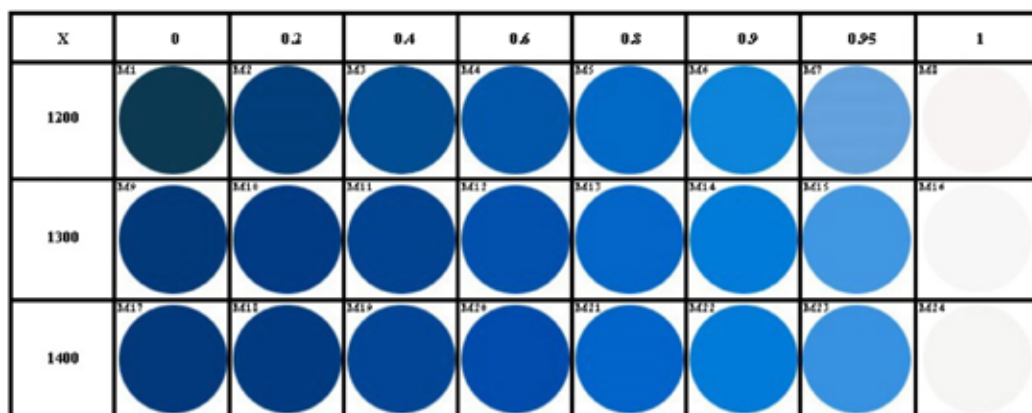
Spectral reflectance of $\text{Co}_{(1-x)}\text{Mg}_x\text{Al}_2\text{O}_4$ calcined at 1,400 C



รูปที่ 3 การสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่น 300 ถึง 2500 นาโนเมตร
ของตัวอย่าง M17–M24 (อุณหภูมิเผา 1400 °C)

ตารางที่ 2 ค่าพิกัดสีที่คำนวณได้ตามระบบ CIE L* a* b* และ ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในช่วงอินฟราเรดใกล้ (R_{NIR}) ของผงสีสีน้ำเงินที่สังเคราะห์ได้

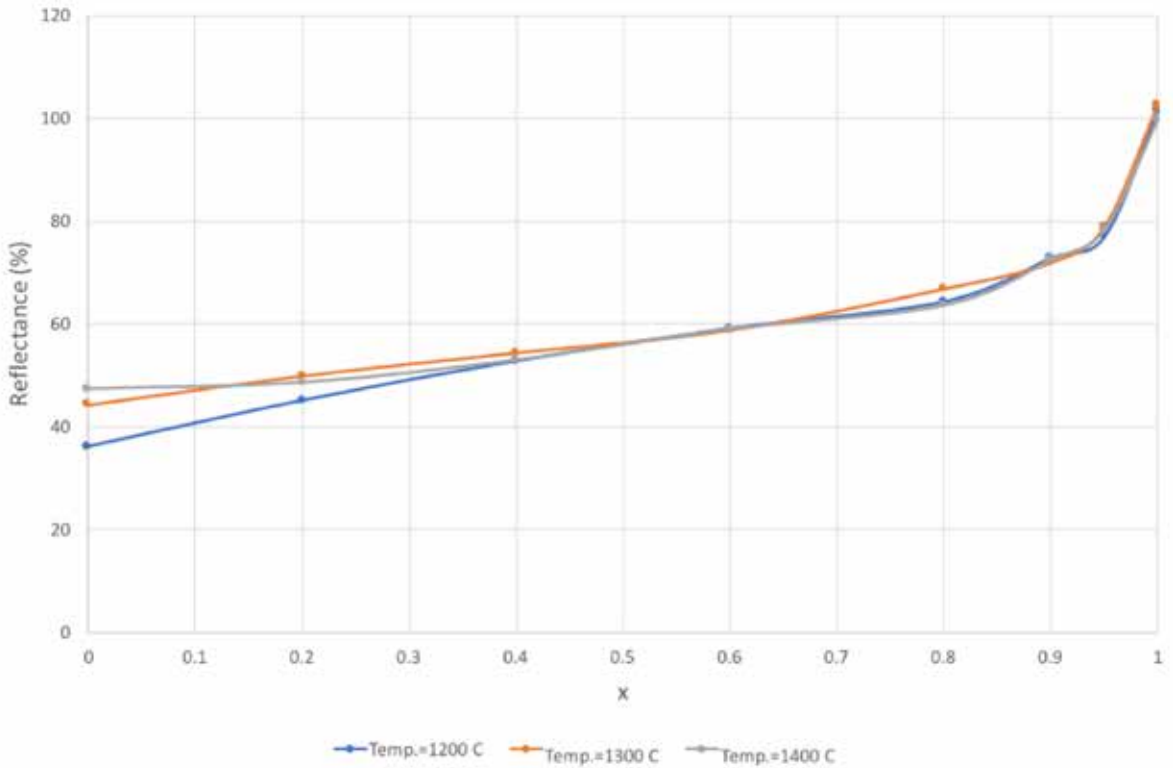
ตัวอย่างผงสี สีน้ำเงินที่สูตร โครงสร้างต่าง ๆ	1200 °C				1300 °C				1400 °C			
	L*	a*	b*	R_{NIR}	L*	a*	b*	R_{NIR}	L*	a*	b*	R_{NIR}
$CoAl_2O_4$	22.72	-4.84	-19.63	36.21	24.86	9.97	-41.99	44.35	25.37	11.32	-43.30	48.61
$Co_{0.8}Mg_{0.2}Al_2O_4$	26.45	8.07	-39.98	45.16	26.30	13.00	-46.30	49.94	25.64	12.86	-44.90	47.38
$Co_{0.6}Mg_{0.4}Al_2O_4$	33.03	8.64	-45.62	52.85	29.46	12.10	-48.98	54.43	30.81	14.03	-51.16	52.97
$Co_{0.4}Mg_{0.6}Al_2O_4$	37.28	9.59	-52.07	59.18	35.09	13.99	-57.01	58.81	34.01	17.66	-59.29	58.97
$Co_{0.2}Mg_{0.8}Al_2O_4$	44.28	8.45	-56.54	64.36	43.68	10.90	-59.61	66.81	42.98	11.93	-60.10	63.59
$Co_{0.1}Mg_{0.9}Al_2O_4$	54.18	1.89	-52.34	72.81	50.80	5.23	-56.45	71.89	51.19	6.51	-57.24	72.40
$Co_{0.05}Mg_{0.95}Al_2O_4$	64.04	-1.72	-38.46	77.08	61.19	-1.18	-46.57	78.95	59.36	0.41	-49.00	78.31
$MgAl_2O_4$	96.84	1.32	0.39	101.53	97.48	-0.26	-0.48	102.58	96.76	-0.28	0.34	99.76



รูปที่ 4 ลักษณะสีของตัวอย่าง M1-M24

จากรูปที่ 4 ที่อุณหภูมิเผา 1200 °C ตัวอย่างที่ M1 ที่ $x=0$ มีสูตรโครงสร้าง $CoAl_2O_4$ ซึ่งผงสีมีสีน้ำเงินเข้ม และเมื่อลดปริมาณ cobalt oxide ลง ด้วยการแทนที่ด้วย magnesium oxide ซึ่งเป็นการเพิ่มค่า x จะเห็นได้ว่าสีของผงสีเริ่มเปลี่ยนจากน้ำเงินเข้ม เป็นสีฟ้า และเป็นสีขาว ในตัวอย่างที่ M8 ที่ $x=1$ และมีสูตรโครงสร้าง $MgAl_2O_4$ ซึ่งไม่มี cobalt oxide เป็นองค์ประกอบ สำหรับตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิเผา 1300 °C และ 1400 °C ก็ให้ผลการวิเคราะห์เป็นไปในแนวทางเดียวกัน

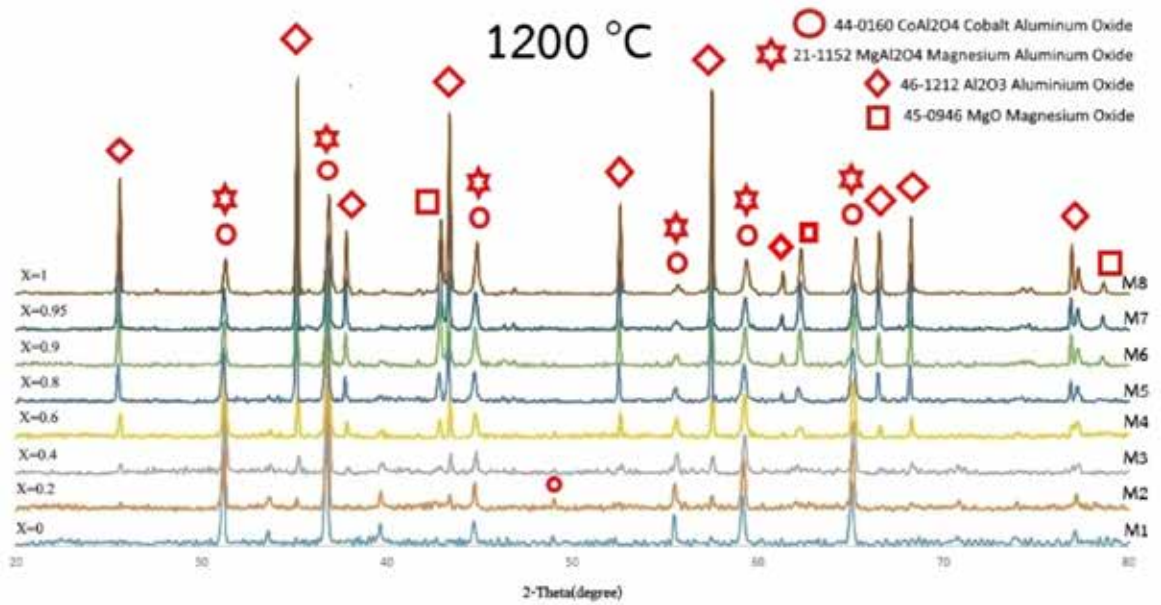
สำหรับค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในช่วงอินฟราเรดใกล้ ที่แสดงในตารางที่ 2 เมื่อนำผลมาแสดงเป็นกราฟ จะได้ผลดังแสดงได้ในรูปที่ 5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดใกล้ของผงสีที่สังเคราะห์ได้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ x มีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามหากเป้าหมายคือการสังเคราะห์ให้ได้ผงสีน้ำเงินและมีค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดใกล้สูง ๆ ค่า x ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.4–0.8



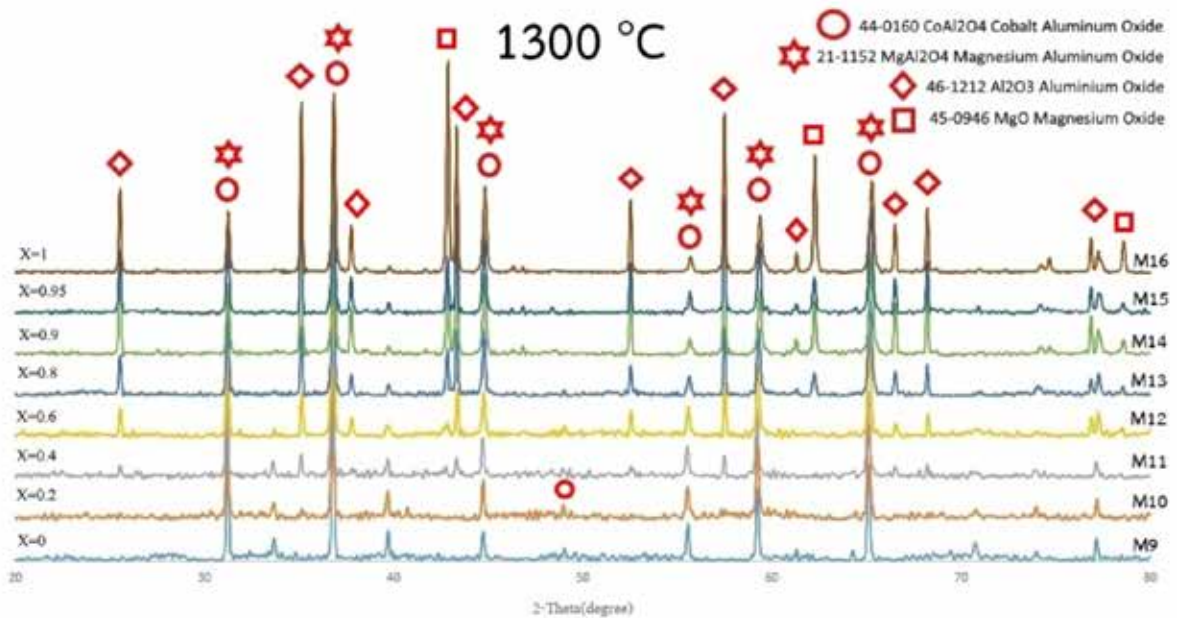
รูปที่ 5 ค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดใกล้ที่มีสัดส่วน (x) ของ MgO ระหว่าง 0 ถึง 1 ที่อุณหภูมิเผา 1,200 1,300 และ 1,400 °C

3.2 ลักษณะโครงสร้างผลึก

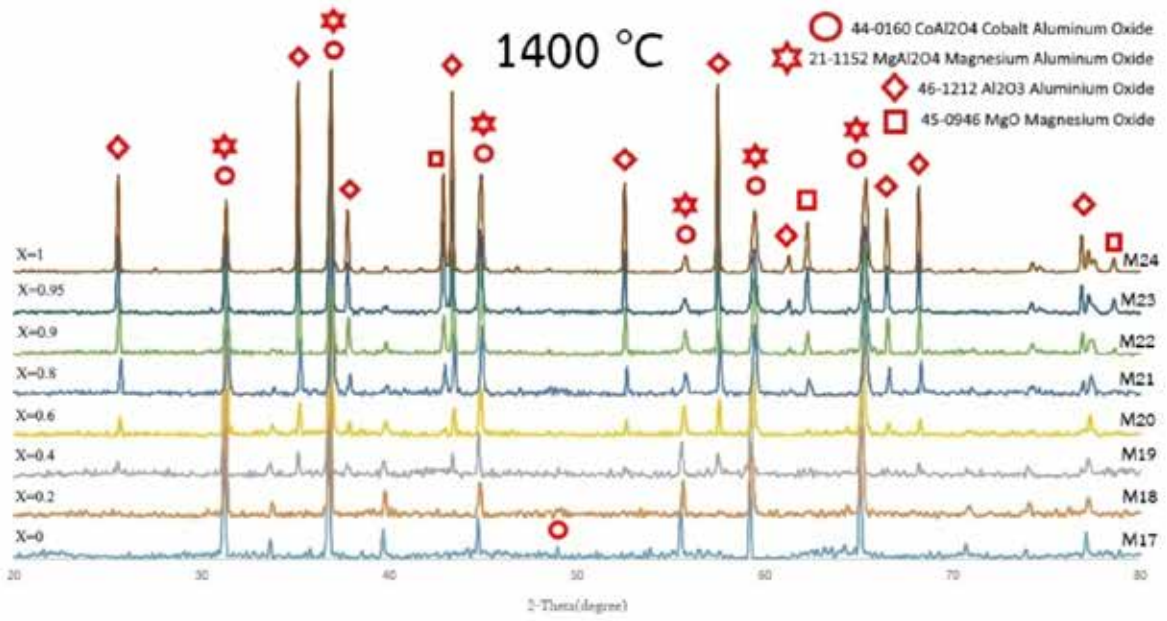
กราฟเปรียบเทียบผล XRD ของผงสีน้ำเงินที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิเผา 1,200 1,300 และ 1,400 °C แสดงดังรูปที่ 6–8 ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่า ที่ $x = 0$ จะพบโครงสร้างของ cobalt aluminum oxide (44-0160) เมื่อทำการเพิ่ม x โครงสร้างจะเปลี่ยนเป็น magnesium aluminum oxide (21-1152) แต่ทั้ง 2 โครงสร้างมีตำแหน่งที่เกิดพีค (peak) ใกล้เคียงกัน การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างดังกล่าว สามารถพิจารณาได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มีมุม 2θ ระหว่าง 44.5–45.0 องศา โดยใช้กรณีศึกษาของตัวอย่างที่เผาที่อุณหภูมิ 1,300 °C ดังรูปที่ 9 ประกอบการพิจารณา จะเห็นได้ว่า ตัวอย่าง M9 ที่ $x = 0$ จะพบโครงสร้างของ cobalt aluminum oxide (44-0160) เมื่อ x มีค่าเพิ่มขึ้น ตัวอย่าง M13 ที่ $x = 0.8$ พีคจะเคลื่อนมาทางโครงสร้าง magnesium aluminum oxide (21-1152) ซึ่งพีคที่เกิดขึ้นนั้นเป็นผลรวมของสัญญาณการเลี้ยวเบนที่มี cobalt aluminum oxide และ magnesium aluminum oxide เกิดขึ้นร่วมกัน และกรณีของตัวอย่าง M16 ที่มีค่า $x = 1$ ที่มีพีคตรงกับโครงสร้างของ magnesium aluminum oxide เมื่อนำการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างดังที่อธิบายข้างต้น มาประกอบกับการวิเคราะห์ค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดใกล้ อาจกล่าวได้ว่าการลดลงของ cobalt aluminum oxide มีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเพิ่มขึ้นของค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดใกล้ ซึ่งจะเห็นได้ชัดในกรณีที่กราฟค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์รูปที่ 1-3 ช่วง 1200-1600 nm มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงขึ้น เมื่อ x มีค่าเพิ่มขึ้น



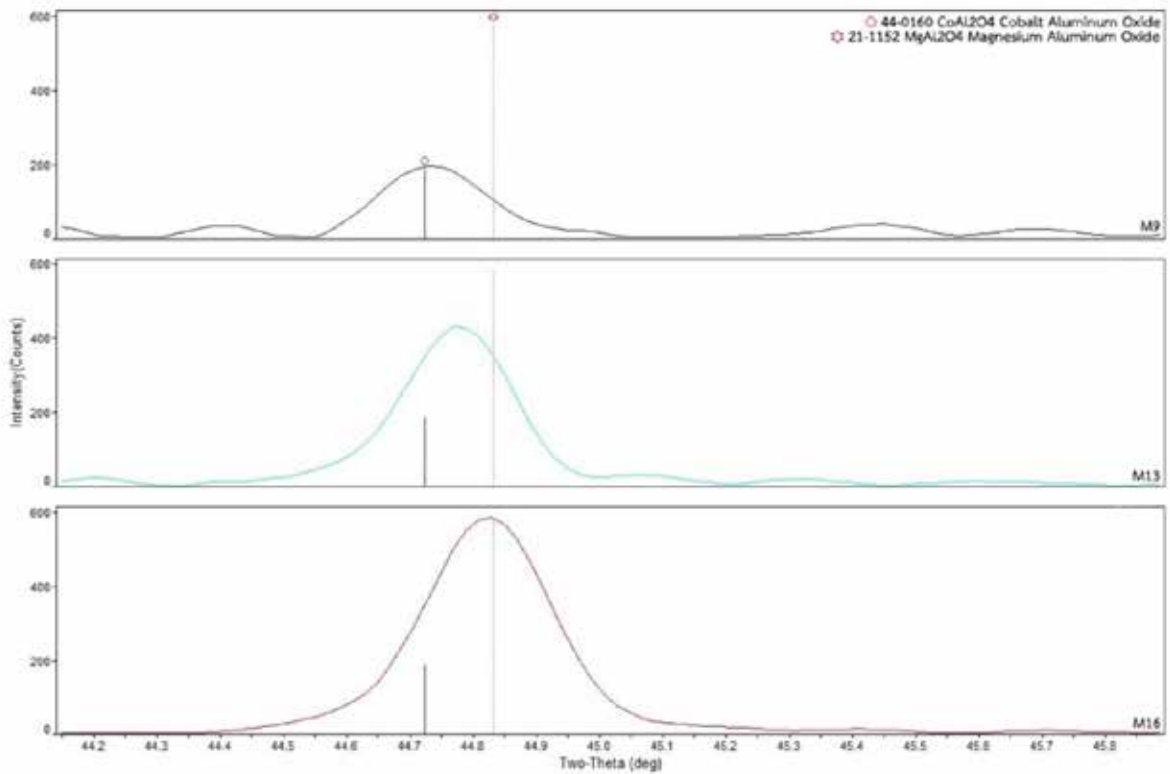
รูปที่ 6 เปรียบเทียบผล XRD ของตัวอย่าง M1-M8



รูปที่ 7 เปรียบเทียบผล XRD ของตัวอย่าง M9-M16



รูปที่ 8 เปรียบเทียบผล XRD ของตัวอย่าง M17-M24



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบ XRD ที่อุณหภูมิเผา 1300 °C ของตัวอย่าง M9 M13 และ M16

4. สรุป (Conclusion)

ผงสีเซรามิกของสารประกอบอนินทรีย์ $\text{Co}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Al}_2\text{O}_4$ สามารถสังเคราะห์ได้ด้วยปฏิกิริยาของเซรามิก จากความร้อน (Solid state reaction) ของโคบอลต์อัลูมินาต์ (Cobalt aluminate) ที่เจือด้วยแมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide) เกิดปฏิกิริยาเป็นผงสีเซรามิกสีน้ำเงินที่สามารถสะท้อนรังสีอินฟราเรดใกล้ สีของผงสีซึ่งคำนวณจากระบบ CIE $L^* a^* b^*$ ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่ออุณหภูมิเผาเปลี่ยนแปลง แต่แปรเปลี่ยนมากตามค่า x หรือ ตามปริมาณ MgO ที่เจือ และพบว่า สีจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเข้มเป็นสีฟ้า เมื่อ x มีค่าเพิ่มขึ้น และจะเป็นสีขาว เมื่อ x มีค่าเท่ากับ 1 และผงสีเซรามิกสีน้ำเงินที่สังเคราะห์ได้ มีความสามารถในการสะท้อนรังสีอาทิตย์ช่วงอินฟราเรดใกล้ โดยค่าการสะท้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ x มีค่าเพิ่มขึ้น ผงสีสีน้ำเงินที่ $X = 0.8$ ($\text{Co}_{0.2}\text{Mg}_{0.8}\text{Al}_2\text{O}_4$) และเผาที่อุณหภูมิ 1300°C จะให้โทนสีน้ำเงินสวยงาม และมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ช่วงอินฟราเรดใกล้สูงที่สุดเท่ากับ 66.81% นอกจากนี้ จากการศึกษาคြွေสร้างผลึกของผงสี พบว่าการเกิดเฟสของ Magnesium aluminum oxide มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ช่วงอินฟราเรดใกล้

5. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] LOMBARD, LUIS PEREZ. JOSE ORTIZ and ISMAEL R. MAESTRE. The map of energy flow in HVAC system. *Applied Energy*. 2011, 88, 5020–5031.
- [2] SYNNEFA, A., M. SANTAMOURIS and K. APOSTOLAKIS. On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment. *Solar Energy*. 2007, 81, 488-497,
- [3] TAKEBAYASHI, H. and M. MORIYAMA. Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. *Build Environ*. 2007, 42, 2971-2979.
- [4] LEVINSON, R., H. AKBARI and JC. Reilly. Cooler tile-roofed buildings with near-infrared-reflective non-white coatings. *Build Environ*. 2007, 42, 2591-2605.
- [5] GANGULY, ARNA, DEBASHISH CHOWDHURY and SUBHASIS NEOGI. Performance of building roofs on energy efficiency-a review. *Energy Procedia*. 2016, 90, 200–208.
- [6] LEVINSON, RONNEN, PAUL BERDAHL and HASHEM AKBARI. Solar spectral optical properties of pigments—part II: survey of common colorants. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2005, 89, 351–389.

[7] BENDIGANAVALA, ASHWINI K. and VINOD C. MALSHE. Infrared reflective inorganic pigments, *Recent Patents on Chemical Engineering*. 2008, 1, 67-79.

[8] MILLER, WILLIAM A., KENNETH T. LOYE, ANDRÉ O. DESJARLAIS and ROBERT P. BLONSKI. Color roofs with complex inorganic color pigments. *Residential Buildings: Technologies, Design, Performance Analysis, and Building Industry Trends*. pp.1.195-1.206.

[9] YONEDA, M., I. GOTOH, M. NAKANISHI, T. FUJII and T. NOMURA. Influence of aluminum source on the color tone of cobalt blue pigment. *Powder Technology*. 2018, 323, 574-580.

[10] GILBERT, J. Characteristics reproducibility of $(\text{Fe,Co})(\text{Cr,Al})_2\text{O}_4$ pigments obtained by solution combustion synthesis. *Ceramics International*. 2016, 42, 12880-12887.

[11] ARANZABE, E. Preparation and characterization of high NIR reflective pigments based in ultramarine blue. *Energy and Buildings*. 2016, 126, 170-176.

[12] FERRO CORPORATION. *Ferro pigments for coating ; Product information* [online]. [viewed 25 June 2018]. Available from: <https://www.ferro.com/-/media/files/resources/pigments-and-dispersions/technical/ferro-pigments-for-coatings-2018-asia.pdf>