

บทนำ (Introduction)

การเคลือบเซรามิกส์เป็นขั้นตอนที่สำคัญในการผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาทั้งสำหรับการผลิตเชิงอุตสาหกรรมและการสร้างสรรค์ผลงานของศิลปิน ลักษณะที่โดดเด่นของเคลือบจะเป็นสิ่งที่เหนี่ยวนำให้เกิดสุนทรียภาพในการชมผลงานชิ้นนั้นๆ หนึ่งในองค์ประกอบที่สำคัญของเคลือบ คือ สีของเคลือบ ซึ่งในปัจจุบันมีความหลากหลายทั้งในด้านชนิดและโทนสี ผงสีสำเร็จรูป (Color pigment หรือ stain) โดยเฉพาะสารประกอบประเภทสปิเนล (Spinel) ได้รับความนิยมเนื่องจากมีความเสถียรเชิงความร้อนสูง และความสามารถในการปรับโทนสีจากการเจือธาตุสี (Chromophore ion) ที่หลากหลาย

อย่างไรก็ตาม ผงสีสำเร็จรูปที่ขายตามท้องตลาดนั้นมักมีราคาสูง กอปรกับยังมีความไม่แน่นอนของโทนสีที่จะปรากฏออกมาเมื่อถูกนำมาผสมกับเคลือบ เนื่องจากเคลือบมีหลายประเภท มีส่วนผสมที่หลากหลาย อันอาจเกิดปฏิกิริยาเชิงเคมีที่ไม่พึงประสงค์ในระหว่างกระบวนการหลอมเคลือบทำให้ลักษณะเชิงเคมีของสารประกอบผงสีเปลี่ยนไป อาจส่งผลให้สีของเคลือบมีความผิดเพี้ยน

ดังนั้น จึงเป็นที่มาของแรงบันดาลใจของโครงการวิจัยนี้ ที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการสังเคราะห์ผงสีประเภทสปิเนลเองภายในสตูดิโอของศิลปิน โดยใช้วัตถุดิบทั่วไปจากอุตสาหกรรมเคลือบและวิธีการผสมออกไซด์อย่างง่าย นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังมุ่งเน้นศึกษาความเสถียรเชิงเคมีของผงสีที่สังเคราะห์ได้โดยจะวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของโทนสี (CIElab) หลังจากนำมาผสมในเคลือบ โดยเลือกเคลือบสองระบบ คือ KNaO (ใช้สูตรของเคลือบสีลาดล) และ ZnO-CaO (ใช้สูตรของเคลือบด้าน ซึ่งเป็นสองระบบต่าง (base หรือ flux) ที่ใช้กันทั่วไปในงานเคลือบเซรามิกส์ ผ่านระบบ Zn-Al-Cr-O ในการศึกษา โดยผู้วิจัยหวังว่า โครงการวิจัยนี้จะเป็นตัวอย่างของการบูรณาการระหว่างศิลป์และศาสตร์ผ่านการศึกษาอย่างเป็นระบบ (Systematic study) สามารถประยุกต์ใช้ได้กับระบบผงสีอื่นๆ เพื่อเป็นแนวทางสำหรับศิลปินในการวางแผนสร้างสรรค์งาน รวมถึงอาจเป็นการลดต้นทุนในการนำเข้าผงสีสำเร็จรูปอีกด้วย

คำสำคัญ (Keyword)

ผงสี, สปิเนล, ปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง, ความเสถียรเชิงสี

Color pigment, Spinel, Solid-state reaction, Color Stability

วิธีดำเนินการวิจัย (Material & Method)

การเตรียมผงสี

สังเคราะห์ระบบ $Zn(Al_{2-x}Cr_x)O_4$ โดยการผสมสารออกไซด์ (Oxide) คือ ZnO , Al_2O_3 และ Cr_2O_3 ที่ผ่านการเผาไล่น้ำที่ $300^\circ C$ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่ $5^\circ C/min$ ตามสูตรเคมีในสัดส่วน $x = 0, 0.2, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0$ mol และใส่ฟลักซ์ (Flux) คือ NaF ในสัดส่วน 5 wt% (เทียบกับปริมาณผงสี) หลังจากนั้นจึงทำการบดผสมสารกับอะซิโตน (Acetone) ด้วยโกร่งบดเป็นเวลา 15 นาที จนเกิดความเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเทใส่ถ้วยอลูมินาและเผาที่ $800^\circ C$, $1000^\circ C$ และ $1200^\circ C$ ด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่ $5^\circ C/min$ เป็นเวลา 12, 24 และ 48 ชั่วโมง นำผงสารที่ผ่านการให้ความร้อนมาบดด้วยโกร่งบดสาร

การเตรียมผงเคลือบ

สำหรับเคลือบด้าน (Matt glaze) ทำการสังเคราะห์ Potassium feldspar, Lime, ZnO , Talc และ Bentonite สัดส่วนเชิงมวล 40 : 15 : 5 : 35 : 5 ตามลำดับ หลังจากนั้นผสมเคลือบด้วยวิธีการใช้ลูกบด (Ball mill) ด้วยน้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำการอบแห้ง (Drying) ที่ $120^\circ C$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และสำหรับเคลือบสีลาด (เคลือบสีที่ใช้กับเคลือบสีลาดแต่ไม่มีการเติมไอออน Fe) ทำการสังเคราะห์ Sodium feldspar, Lime, ZnO , Barium carbonate และ Silica สัดส่วนเชิงมวล 75 : 10 : 3 : 3 : 9 ตามลำดับ หลังจากนั้นผสมเคลือบด้วยวิธีการใช้ลูกบด (Ball mill) ด้วยน้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง อบแห้งที่ $120^\circ C$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

การเตรียมบิสกิตพอสเซเลน (Porcelain Biscuit)

เตรียมน้ำดินสำหรับการหล่อบิสกิตโดยใช้ดินพอสเซเลนสำเร็จรูปปั้นเป็นชิ้นเล็กๆ ผสมกับน้ำด้วยเครื่องปั่นน้ำดิน ให้มีความถ่วงจำเพาะ 1.75 หล่อลงโมลแม่พิมพ์ทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 cm ให้มีความสูง 1.5 cm ปล่อยบิสกิตพอสเซเลนทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำไปเผาที่ $700^\circ C$ ด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่ $5^\circ C/min$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

การเตรียมเคลือบ (Glazing)

นำผงสี 10 wt% (เทียบกับปริมาณผงเคลือบ) ผสมกับผงเคลือบในปริมาณ 10 g โดยใช้ปริมาณ 10 cm^3 เป็นสื่อกลาง หลังจากนั้นจึงทำการบดผสมให้เข้ากันจนกว่าผงสีจะเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำเคลือบให้มากที่สุด (เป็นเวลาประมาณ 15 นาที) นำบิสกิตพอสเซเลนที่ผ่านการเซ็ดทำความสะอาดด้วยฟองน้ำที่แห้งหมาดๆ มาทำการจุ่มเคลือบโดยนำบิสกิตพอสเซเลนจุ่มเอียง 45° กับน้ำเคลือบจุ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 3 นาที แล้วค่อยๆ ดึงบิสกิตพอสเซเลนขึ้นจากน้ำเคลือบ รอจนกว่าเคลือบจะแห้ง จึงทำการชุบเคลือบบริเวณขอบข้างบิสกิตพอสเซเลนออกด้วยคัตเตอร์ หลังจากนั้นจึงนำบิสกิตที่ผ่านการเคลือบไปเผาที่ $1000^\circ C$, $1100^\circ C$, $1200^\circ C$ และ $1250^\circ C$ ด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่ $5^\circ C/min$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง X-ray Diffraction (XRD)

เพื่อศึกษาวิวัฒนาการของการเฟสของผงสีที่อุณหภูมิต่างๆ โดยทำการการศึกษาเฟสและข้อมูลโครงสร้างที่เกิดขึ้นในผงสีด้วยเครื่อง X-ray Diffraction (XRD) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น 6100 เตรียมชิ้นงานทดสอบโดยการบดผงสีให้ละเอียดและทำการปาดลงบนแผ่นกระจกด้านขรุขระ (frosted) ซึ่งใช้อะซิโตนเป็น

สีกกลางและนำไปทดสอบในช่วง 2theta ระหว่าง 10-70° ความต่างศักย์ 30 kV กระแส 15 mA ด้วย อัตราเร็วการสแกน 5°C/min

การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่องX-ray photoelectron Spectroscopy (XPS)

วิเคราะห์ชนิดจำนวนธาตุองค์ประกอบโครงสร้างทางเคมีและสถานะออกซิเดชันของอะตอม โดยใช้ เครื่อง X-ray photoelectron Spectroscopy (XPS) รุ่น AXIS Ultra DLD บริษัท Shimadzu เตรียม ชิ้นงานทดสอบโดยการบดผงสีเป็นเวลา 15 นาที ทำการอัดเม็ดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm สูง 2 mm ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก 1.5 ตัน เป็นเวลา 30 นาที ทำการเผาที่ 1200°C ด้วยอัตราเปลี่ยนแปลงความร้อนที่ 5°C/min เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นปรับพื้นผิวของเม็ดผงสี โดยการขัดด้วยกระดาษทราย 600 1000 2000 2500 และ 3000 ตามลำดับ หลังจากนั้นทำการห่อชิ้นงานด้วยกระดาษฟอยล์สำหรับการส่งทดสอบต่อไป

การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่องFourier Transform Infrared Spectroscopy

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ของผงสี โดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) รุ่น Vertex 70 ของบริษัท Bruker ซึ่งอาศัยการสั่นของพันธะเมื่อถูกคลื่นคลื่น อินฟราเรด เตรียมชิ้นงานทดสอบโดยการนำสารตัวอย่างบดผสม KBr ที่ผ่านการอบที่ 100°C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อกำจัดความชื้นในอัตราส่วนเชิงมวล ผงสาร : KBr ที่ 1:9 อัดเป็นแผ่นบางโดยใช้ความดันประมาณ 10,000 psi เป็นเวลา 1 นาที และนำไปทดสอบที่ช่วงความยาวคลื่น 400– 4000 cm^{-1}

การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่องRaman Spectroscopy

วิเคราะห์เพื่อศึกษาเชิงโมเลกุลและหมู่ฟังก์ชันเพื่อหาธาตุและสารประกอบโดยใช้เครื่อง Raman Spectroscopy รุ่น T64000 Jobinyvonhoriba ซึ่งอาศัยหลักการกระเจิงแสงของปรากฏการณ์รามานเตรียม ชิ้นงานทดสอบโดยการบดผงสีให้ละเอียด โดยใช้อะซิโตนเป็นสีกกลาง เป็นเวลา 15 นาที และนำไปทดสอบ ในช่วง 100°- 2000° ความต่างศักย์ 30 kV กระแส 15 mA ด้วยอัตราเร็วการสแกน 5°C/min

การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่องUV-vis spectrophotometer

วิเคราะห์องค์ประกอบของสารตัวอย่างเพื่อศึกษาการดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วง Ultra violet (UV) และ Visible (VIS) ของอนุภาคผงสีโดยสารแต่ละชนิดจะดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน และปริมาณการดูดกลืนรังสีจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสาร ซึ่งสามารถวัดได้โดยผสมผงสีลงในน้ำกลั่น จากนั้น จึงนำไปทำให้กระจายตัวด้วยเครื่อง Ultrasonicator ยี่ห้อ ACE 300 W, 40 KHz เพื่อแยกเอาสารละลายใส่ Cuvette ทดสอบด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer Carry 5000 Agilent Technologies ในช่วง ความยาวคลื่น 200-800 nm

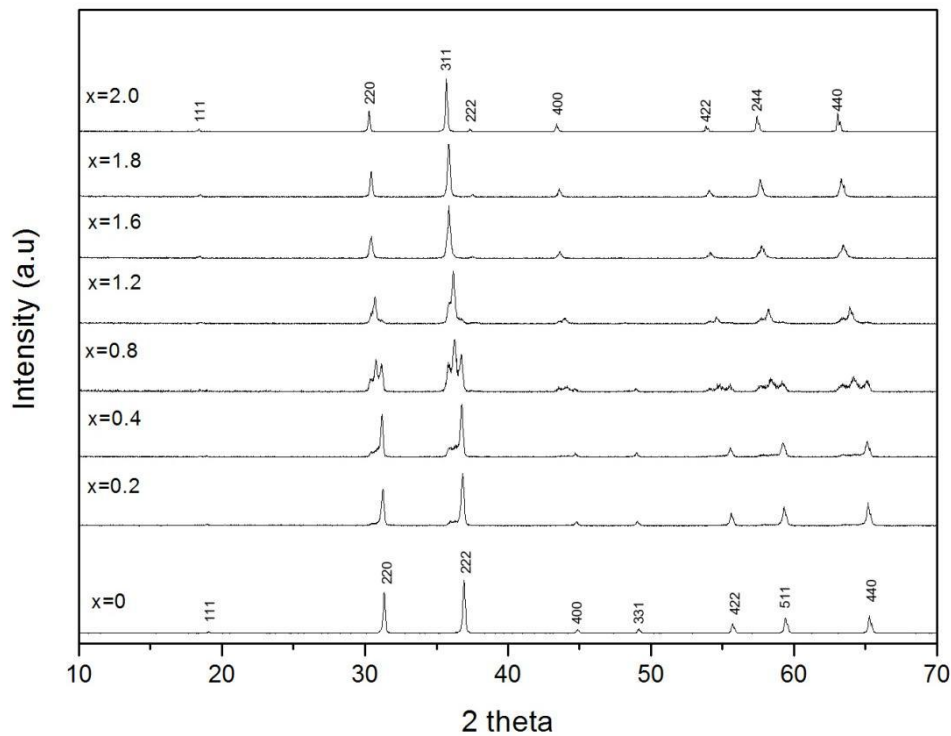
การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่องColor Reader

เพื่อศึกษาค่าสีของผงสีโดยใช้เครื่อง Color Reader รุ่น CR-10 ยี่ห้อ Minolta อ่านค่าได้ 3 ค่าดังนี้ L* แสดงค่าความสว่าง (0 (ดำ) จนถึง 100 (ขาว)), a* แสดงค่าความเป็นสีแดงและสีเขียว (ค่าบวกแสดงค่าสีแดง, ค่าลบแสดงค่าสีเขียว) และ b* แสดงค่าความเป็นสีเหลืองและสีน้ำเงิน (ค่าบวกแสดงค่าสีเหลือง, ค่าลบแสดงค่าสีน้ำเงิน) เตรียมชิ้นงานทดสอบโดยการบดผงสีให้ละเอียด โดยใช้อะซิโตนเป็นสีกกลาง เป็นเวลา 15 นาที และนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Color Reader สองที่ผงสี

ผลการวิจัยและวิจารณ์ (Result and Comment)

การเกิดเฟสของผงสรีระบบ $\text{Zn}(\text{Al}_{2-x}\text{Cr}_x)\text{O}_4$

การเปลี่ยนแปลงเฟสของผงสรีระบบ $\text{Zn}(\text{Al}_{2-x}\text{Cr}_x)\text{O}_4$ เมื่อทำการเจือ Cr_2O_3 ในปริมาณสัดส่วนต่างกัน ระบบที่ไม่เจือ Cr_2O_3 พบเฟสสปีเนล ZnAl_2O_4 (JCPDS 05-0669) ที่การเจือค่ามากที่สุดพบเฟส ZnCr_2O_4 (JCPDS 73-1962) โดยไม่มีเฟสทุติยภูมิเกิดขึ้น จึงสามารถบอกได้ว่า เฟส ZnAl_2O_4 และ ZnCr_2O_4 สามารถเกิดได้โดยการเผาสังเคราะห์ที่ 1200°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ซึ่งจากการทดลองเผาแบบครั้งละ 12 ชั่วโมง โดยมีการนำออกมาบดผสมในโถร่อนอะเกต เพื่อให้เกิดการกระจายตัว และการเผารั้งเดียวเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เฟสที่เกิดขึ้นไม่แตกต่างกัน แต่ที่ระบบ $\text{Zn}(\text{Al}_{2-x}\text{Cr}_x)\text{O}_4$ เมื่อทำการเจือ Cr_2O_3 ในค่า $x = 0.4 - 1.2$ พบว่าเกิดการแยกออกจากกัน (split) เป็นสามพิกัดแสดงในรูปที่ 1 คาดว่าเป็นพิกัดร่วมกันของสารประกอบที่เกิดจากการแทนที่ของ Cr_2O_3 ในโครงสร้างของ ZnAl_2O_4 ในอัตราส่วนที่ต่างกัน ร่วมกับเฟสเฟส ZnCr_2O_4 สำหรับเปอร์เซ็นต์ของสารประกอบที่เกิดขึ้นได้ถูกคำนวณจากสัดส่วนพื้นที่ใต้พิกัด (integrated intensity) ระบุหลักถูกแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 XRD patterns ของผงสรีระบบ $\text{Zn}(\text{Al}_{2-x}\text{Cr}_x)\text{O}_4$ ที่มีการเจือ Cr ถูกเผาที่ 1200°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

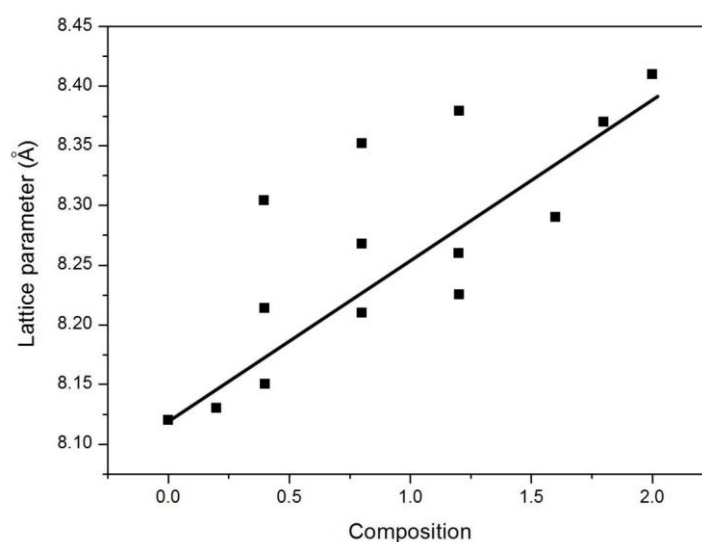
ตารางที่ 1 เปอร์เซ็นต์ของเฟสที่เกิดขึ้นผสมกันในระบบ $\text{Zn}(\text{Al}_{2-x}\text{Cr}_x)\text{O}_4$ โดยแยกเป็นสองแบบ คือ จากพิกัดที่ตำแหน่ง 31.19° และจากพิกัดที่ตำแหน่ง 31.38°

องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์ของเฟส		
	$\text{Zn}(\text{Al}_{2-x}\text{Cr}_x)\text{O}_4$ แบบที่ 1	$\text{Zn}(\text{Al}_{2-x}\text{Cr}_x)\text{O}_4$ แบบที่ 2	ZnCr_2O_4
$x = 0.4$	62.0	25.1	13.0
$x = 0.8$	33.2	43.5	23.3
$x = 1.2$	6.6	67.7	25.7

ความสามารถในการละลายของ Cr^{3+} ในโครงสร้างสปิเนลได้ถูกตรวจสอบโดยการทำ lattice refinement ใช้ tungsten (W) เป็นสารมาตรฐานเพื่อตรวจกับการเลื่อนของพีค XRD ที่เกิดจากการแทนที่ไอออนอย่างเดียวนำให้เกิดจากเครื่องมือหรือความหนาของผงตัวอย่างตอนวิเคราะห์ค่า Lattice parameter ของผงสัระบบ $\text{Zn}(\text{Al}_{2-x}\text{Cr}_x)\text{O}_4$ ได้ถูกสรุปในตารางที่ 2 และในรูปที่ 2 เมื่อเพิ่มปริมาณการเจือ Cr ค่า Lattice parameter เพิ่มขึ้น เนื่องจากขนาดของ Cr^{3+} มีขนาดใหญ่กว่า Al^{3+} แต่ไม่ต่างกันมากนัก จึงสามารถเข้าแทนที่ในช่องว่าง Octahedral ของ Cr^{3+} ในโครงสร้าง spinel ได้ จึงสามารถเกิดเป็นสารละลายของแข็ง (solid solution) ได้ตามกฎของ Vegard อีกทั้งค่า Lattice parameter ยังสอดคล้องกับการเลื่อนของพีคในองศาที่ต่ำลงเมื่อเจือ Cr มากขึ้น ซึ่งเกิดจากค่า d-spacing ที่เปลี่ยนแปลงไปจากการเข้าไปแทนที่ในโครงสร้างของ Cr

ตารางที่ 2 ค่า lattice parameter ของผงสัระบบ $\text{Zn}(\text{Al}_{2-x}\text{Cr}_x)\text{O}_4$ ที่มีการเจือ Cr ในสัดส่วนต่างๆ ถูกเผาที่ 1200°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และที่การเจือ $x=0.4, 0.8, 1.2$ เกิดการแยกออกเป็นสามพีค (ในตำแหน่ง $31 - 32^\circ\text{C}$) จึงหาค่าออกมาสามค่าเรียงตามพีคในรูปที่ 1 จากซ้ายไปขวาตามลำดับ

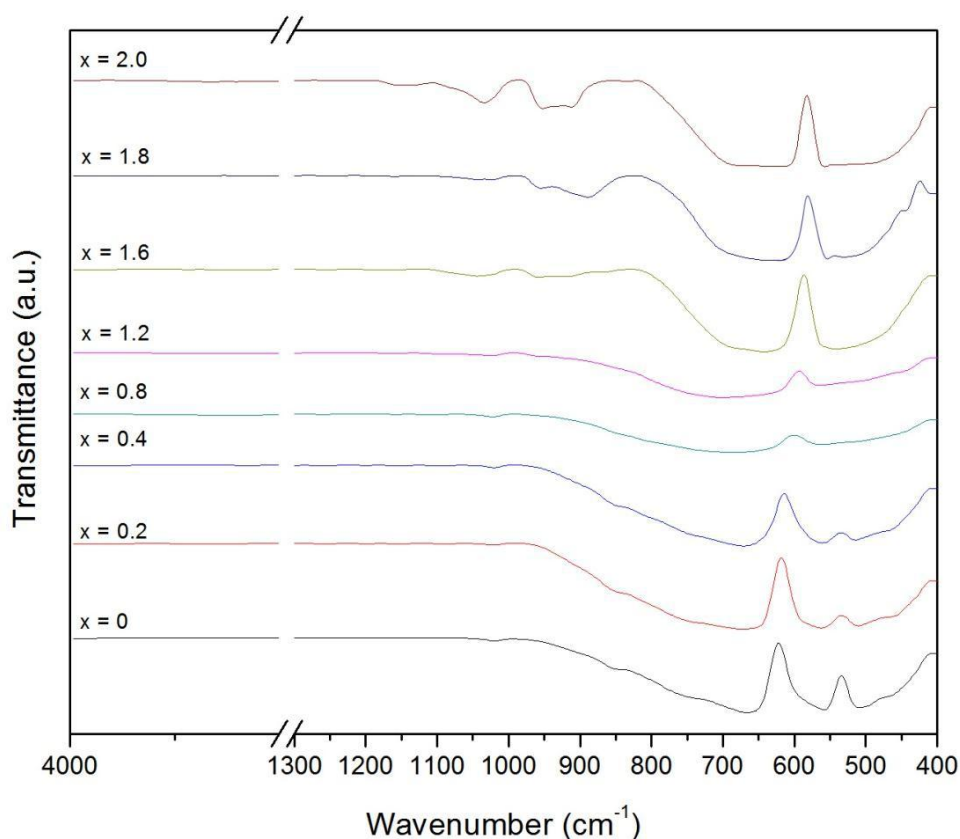
องค์ประกอบ	ค่าคงที่แลตติซ		
	พีคที่ 1	พีคที่ 2	พีคที่ 3
$x = 0$	8.1269 ± 0.0003		
$x = 0.2$	8.1360 ± 0.0002		
$x = 0.4$	8.1570 ± 0.0003	8.2140 ± 0.0002	8.3030 ± 0.0002
$x = 0.8$	8.1750 ± 0.0002	8.2690 ± 0.0002	8.3640 ± 0.0002
$x = 1.2$	8.2180 ± 0.0003	8.2980 ± 0.0002	8.3660 ± 0.0002
$x = 1.6$	8.3500 ± 0.0002		
$x = 1.8$	8.3700 ± 0.0003		
$x = 2.0$	8.4109 ± 0.0003		



รูปที่ 2 ค่า Lattice parameter ที่เปลี่ยนไปเมื่อเจือ Cr ในผงสัระบบ $\text{Zn}(\text{Al}_{2-x}\text{Cr}_x)\text{O}_4$ และที่ composition $x=0.4, 0.8$ และ 1.2 เกิดการแยกเป็นสามพีค ค่าในรูปจึงแบ่งออกเป็นสามค่า

การศึกษาลักษณะพันธะด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

เทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะของพันธะที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของผงสีเพื่อประกอบการวิเคราะห์กับเทคนิค X-ray Diffactometer (XRD) ผลการศึกษาผงสีระบบ $\text{Zn}(\text{Al}_{2-x}\text{Cr}_x)\text{O}_4$ ที่ถูกเผาที่ 1200°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ถูกแสดงในรูปที่ 3 จาก spectrum ของตัวอย่าง $x = 0$ พบช่วงเลขคลื่นที่มีพีคหลัก 3 ช่วง คือ $410 - 535\text{ cm}^{-1}$ Octahedral (Al-O-Al Bending), $534 - 621\text{ cm}^{-1}$ Octahedral (Al-O Stretching) และ $621 - 982\text{ cm}^{-1}$ Tetrahedral (Zn-O Stretching) เมื่อเพิ่มปริมาณการเติม Cr พบว่าพีคยังคงเกิดในช่วงตำแหน่งเดิมหรือใกล้เคียงกันมาก จนกระทั่งเจือ Cr เท่ากับ 1.6 – 2.0 พบช่วงพีคที่เกิดขึ้นใหม่คือ $839 - 982\text{ cm}^{-1}$ และ $986 - 1174\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งแสดงถึงการสั่นของ Cr-O ใน CrO_3 และ Cr-O in CrO_2 ตามลำดับ คาดว่าพีคดังกล่าวเกิดจากการหลงเหลือของ Cr_2O_3 รายละเอียดของพันธะต่างๆได้ถูกสรุปในตารางที่ 3

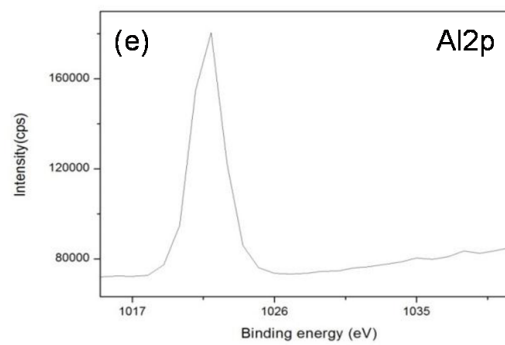
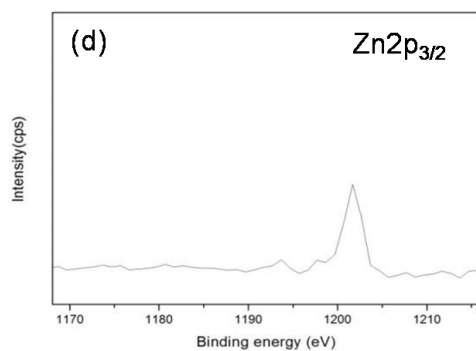
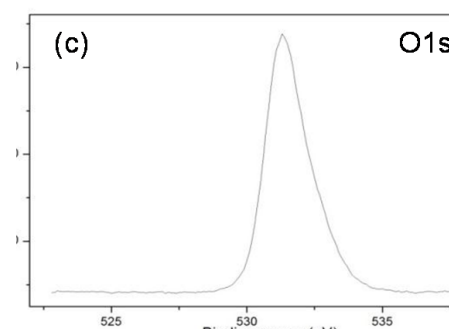
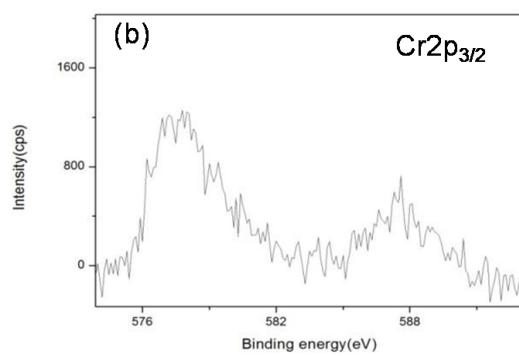
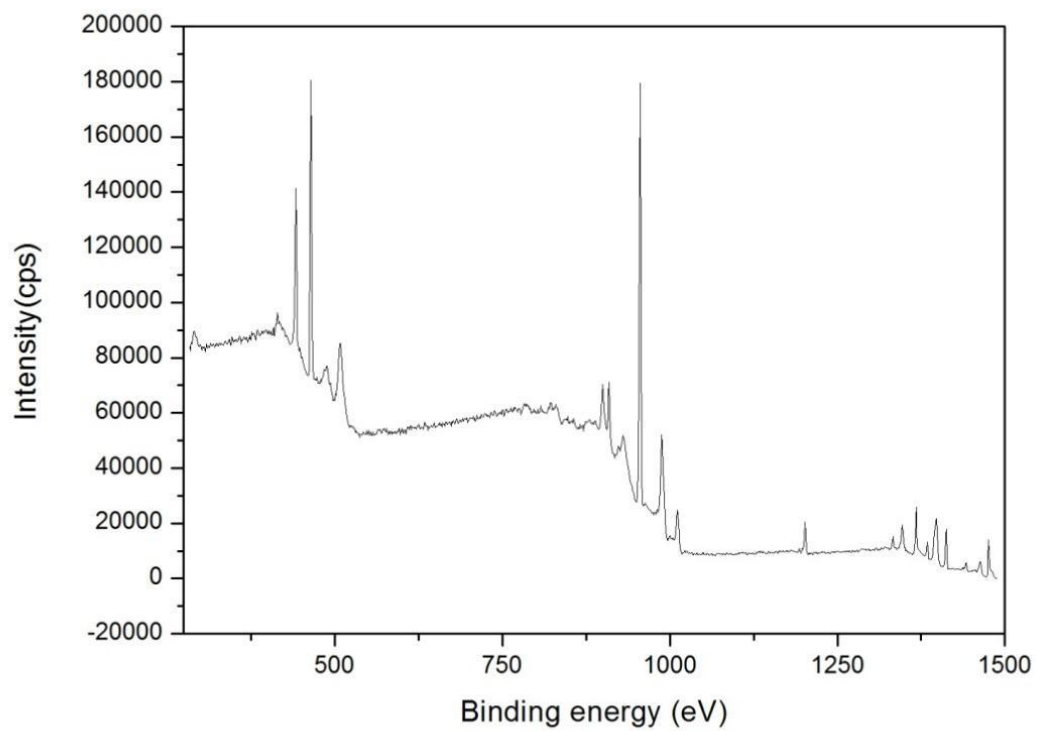


รูปที่ 3 FTIR spectra ของผงสีในระบบ $\text{Zn}(\text{Al}_{2-x}\text{Cr}_x)\text{O}_4$ ที่ถูกเผาที่ 1200°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

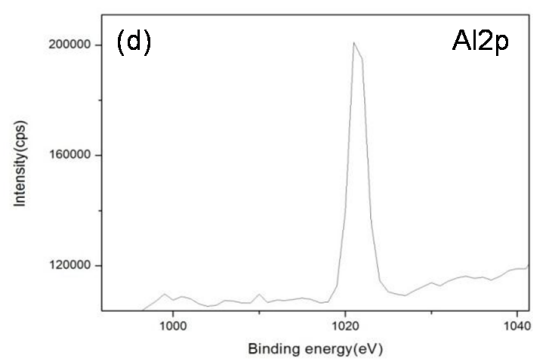
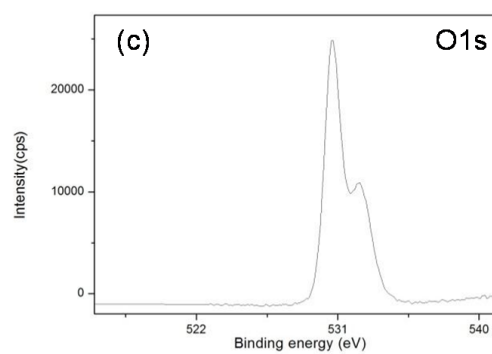
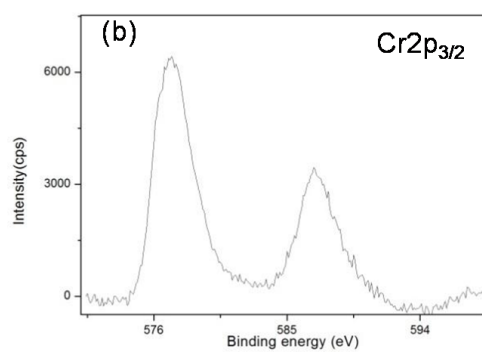
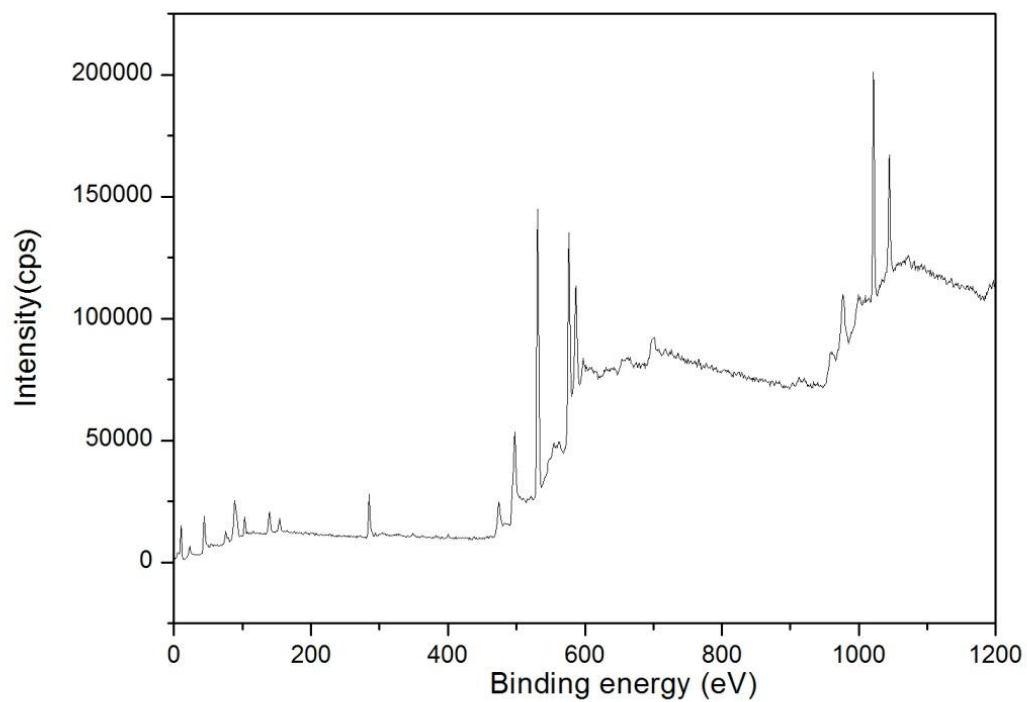
ตารางที่ 3 ชนิดของพันธะ และ Wavenumber (cm^{-1}) ของผงสีในระบบ $\text{Zn}(\text{Al}_{2-x}\text{Cr}_x)\text{O}_4$ ที่ถูกเผาที่ 1200°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

พันธะ	Wavenumber (cm^{-1})
Cr-O in CrO_2	986 – 1174
Cr-O in CrO_3	839 – 982
Tetrahedral Zn-O stretching	630 – 910
Octahedral Al-O or Cr-O stretching	500 – 615
Octahedral Al-O-Al bending	415 – 500
Cr-O in Cr_2O_3	410 – 456

เกิดการคงรูป ข้อมูลที่ได้จึงเป็นเพียงบริเวณผิวหน้าของชิ้นงาน ทั้งนี้อาจมีการเจือปนที่ผิวหน้า ซึ่งทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน



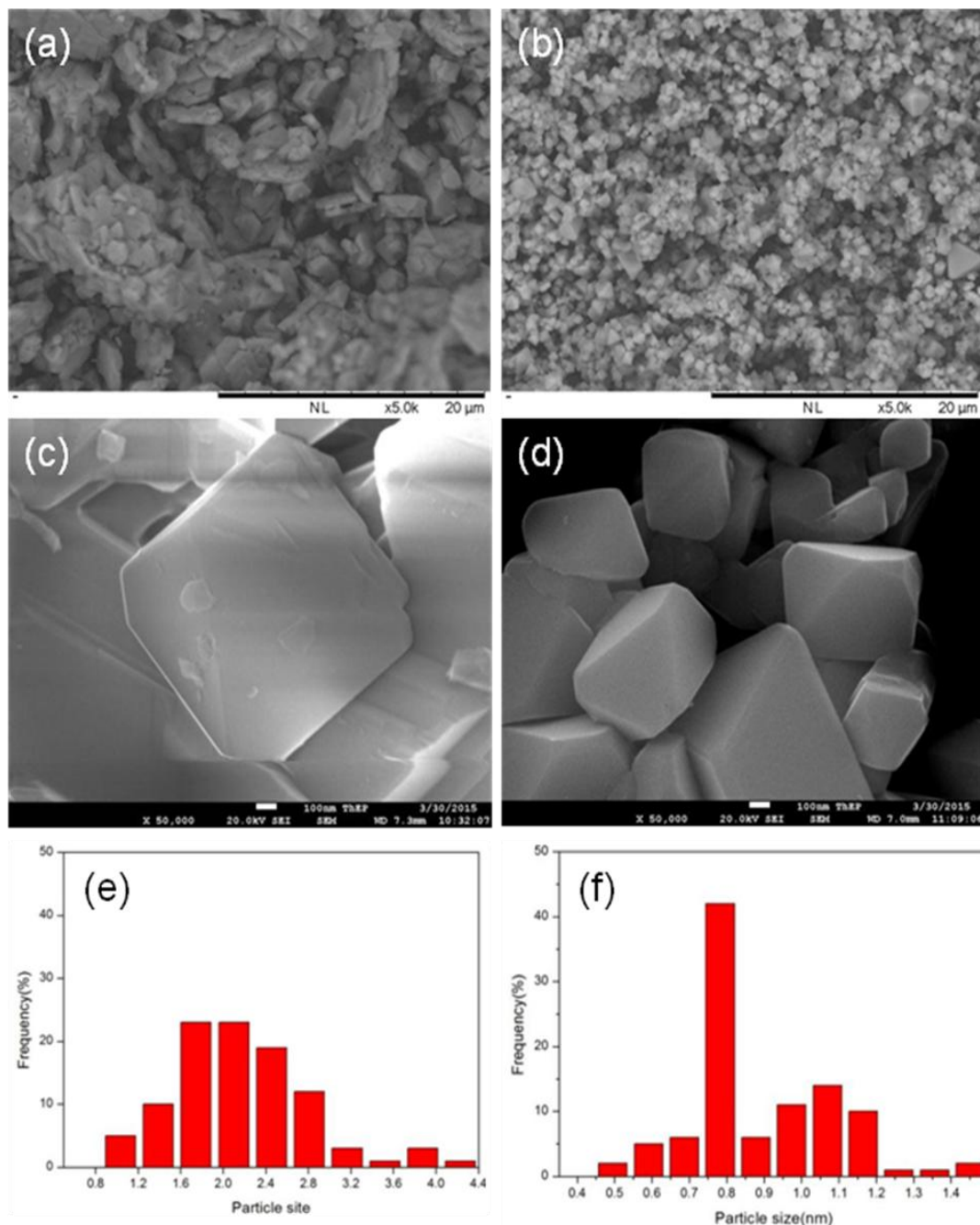
รูปที่ 5 XPS spectra ของผงสัระบบ $\text{Zn}(\text{Al}_{1.6}\text{Cr}_{0.4})\text{O}_4$ (a) survey, (b) Cr2p, (c) O1s, (d) Zn2p_{3/2} และ (e) Al2p



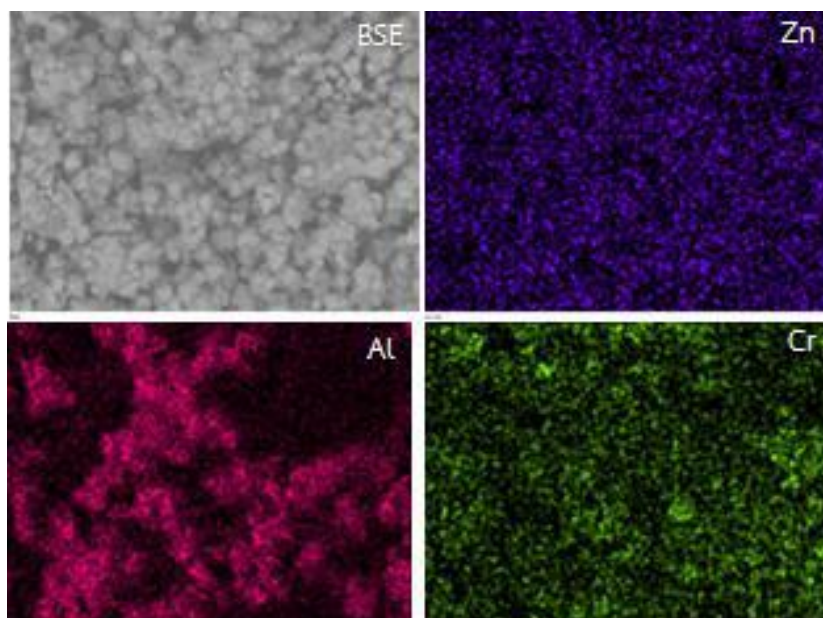
รูปที่ 6 XPS spectra ของผงสีระบบ ZnCr_2O_4 (a) survey, (b) $\text{Cr}2p$, (c) $\text{O}1s$ และ (d) $\text{Al}2p$

สัณฐานวิทยาของผงสี

สัณฐานวิทยาของอนุภาคผงสีระบบ $\text{ZnAl}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$ ที่ $x=0.4$ และ $x=2.0$ ถูกแสดงในรูปที่ 7 ขนาดอนุภาคทั้ง 2 ระบบที่กำลังขยายสูงมีรูปร่างแปดหน้า (octahedron) จากการโตในทิศทาง (111) ซึ่งมีพลังงานพื้นผิวต่ำที่สุด โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 2.17 และ $0.89 \mu\text{m}$ ตามลำดับ อนุภาคเกิดการเกาะกลุ่มรวมตัวกัน (agglomeration) เนื่องจากเผาที่อุณหภูมิสูง เกิด partial sintering ค่อนข้างมากในผงสีที่ไม่มีการเจือ Cr เนื่องจากประกอบด้วย Al ที่มีอุณหภูมิหลอมต่ำ

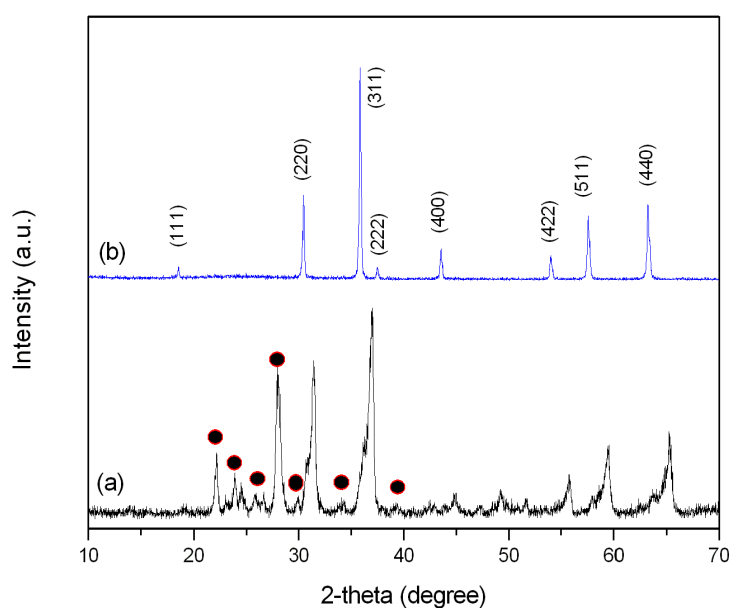


รูปที่ 7 ภาพ SEM ของอนุภาคผงสีในระบบ $\text{Zn}(\text{Al}_{2-x}\text{Cr}_x)\text{O}_4$ ที่ถูกเผาที่ 1200°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง (a) $x = 0.4$, 5,000x, (b) $x = 2.0$, 5,000x, (c) $x = 0.4$, 50,000x, (d) $x = 2.0$, 50,000x และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคจากการวัดด้วยมือ (วิธี characteristic length) สำหรับระบบ (e) $x = 0.4$ และ (f) $x = 2.0$



รูปที่ 8 การวิเคราะห์ธาตุของผงสัระบบ $\text{Zn}(\text{Al}_{1.6}\text{Cr}_{0.4})\text{O}_4$ ด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS)

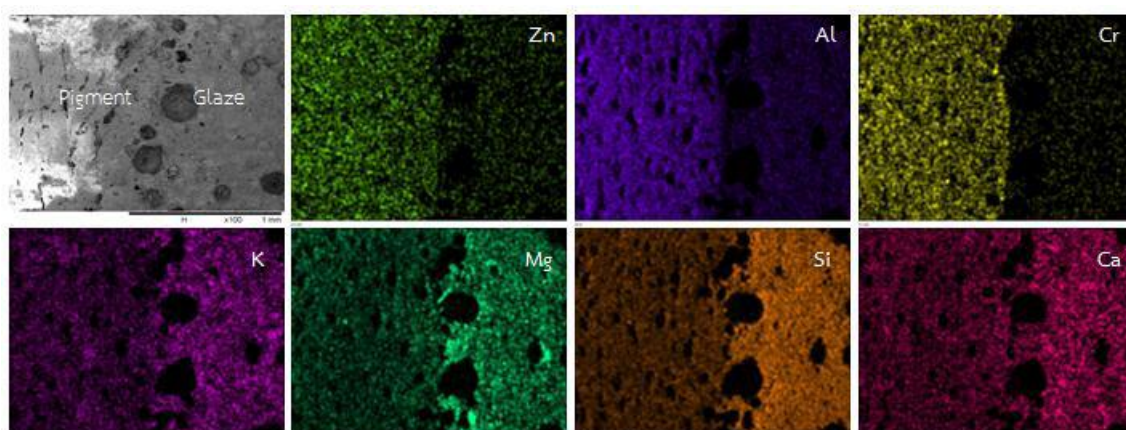
การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของผงสัระบบ $\text{Zn}(\text{Al}_{1.6}\text{Cr}_{0.4})\text{O}_4$ ได้ถูกแสดงในรูปที่ 8 โดยผู้วิจัยเลือกองค์ประกอบ $x = 0.4$ เพื่อศึกษาการกระจายตัวของธาตุ Cr ในกลุ่มอนุภาค ซึ่งจาก EDS spectrum ไม่ปรากฏธาตุเจือปนในผงสั อัตราส่วนเชิงโมระหว่าง Zn, Al และ Cr มีค่าใกล้เคียงกับ Stoichiometry ที่ตรงกับการสังเคราะห์ สามารถแสดงถึงการมีอยู่และการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ของ Cr ในโครงสร้างของอนุภาค อันอาจใช้เป็นตัวบ่งชี้ทางอ้อมถึงการเกิดเฟสสปีเนลจากผล XRD ได้



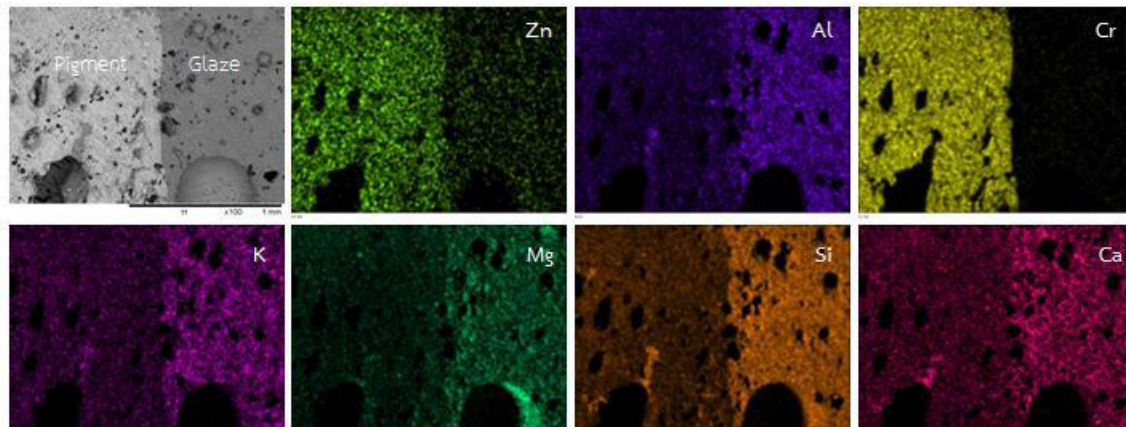
รูปที่ 8 XRD patterns ของเคลือบซิลาลดที่ผสมผงสัในปริมาณสัดส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก (ผงสั : เคลือบ) โดยแบ่งเป็นระบบ (a) $\text{Zn}(\text{Al}_{1.6}\text{Cr}_{0.4})\text{O}_4$ และ (b) ZnCr_2O_4 เฟสหลักที่เกิด คือ สปีเนล โดยมีเฟสทุติยภูมิ คือ Anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) ที่ถูกระบุโดยสัญลักษณ์ ●

การทดสอบความเสถียรของผงสีในเคลือบ

จากกราฟ XRD patterns (รูปที่ 8) ของเคลือบสีลาตที่ผสมผงสีระบบ $\text{Zn}(\text{Al}_{1.6}\text{Cr}_{0.4})\text{O}_4$ และ ZnCr_2O_4 ในปริมาณสัดส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก (ผงสี : เคลือบ) พบการเปลี่ยนแปลงของพีคของผงสีในระบบ $\text{Zn}(\text{Al}_{1.6}\text{Cr}_{0.4})\text{O}_4$ เท่านั้น ซึ่งมีพีคที่เกิดขึ้นใหม่ที่สามารถถูกระบุได้เป็นพีคของเฟส Anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, JCPDS 70-0287) ซึ่งอาจเกิดจากความไม่เสถียรของผงสีในเคลือบสีลาต ทำให้เกิดจากการทำปฏิกิริยาของผงสีกับส่วนประกอบของเคลือบที่เป็นหมู่ต่าง ซึ่งมีหน้าที่ช่วยหลอมสารตั้งต้นในเคลือบ ซึ่งในเคลือบสีลาตคือ NaO โดยจะทำหน้าที่เป็น flux ช่วยให้เคลือบหลอมตัวได้ดีขึ้น และอาจไปทำลายโครงสร้างของผงสีตั้งต้น ($\text{Zn}(\text{Al}_{1.6}\text{Cr}_{0.4})\text{O}_4$) โดยการละลายบางองค์ประกอบของสารประกอบออกไซด์ของผงสี



รูปที่ 9 EDS mapping ของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผงสีสูตร $\text{ZnAl}_{1.6}\text{Cr}_{0.4}\text{O}_4$ ในเคลือบ Matt



รูปที่ 10 EDS mapping ของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผงสีสูตร ZnCr_2O_4 ในเคลือบ Matt

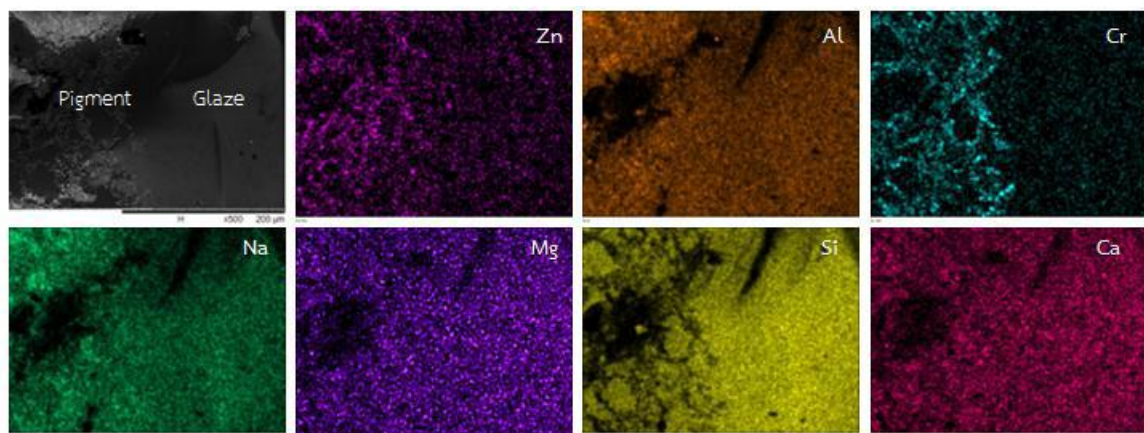
การแพร่ขององค์ประกอบระหว่างผงสีและเคลือบล้าง (Matt)

การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุในบริเวณชั้นแบ่งระหว่างเคลือบและผงสี (interface) เพื่อศึกษาความเสถียรทางเคมีของผงสีสูตร $\text{Zn}(\text{Al}_{1.6}\text{Cr}_{0.4})\text{O}_4$ และ ZnCr_2O_4 ในเคลือบ Matt ดังแสดงในรูปที่ 9 และ 10 ตามลำดับ ตามหลักการของ BEI ธาตุที่มีเลขอะตอมน้อยจะให้ contrast ที่เข้มกว่าธาตุที่มีเลขอะตอมหนัก ในบริเวณใกล้ชั้นแบ่ง (interface) พบรูพรุนขนาดใหญ่ที่อาจเกิดจากแก๊สต่างๆที่คงค้างระหว่างเผาเคลือบ EDS mapping ของ Zn และ Cr แสดงการแพร่จากผงสีเข้าไปในเคลือบเล็กน้อยในขณะที่ธาตุที่มีเฉพาะในเคลือบ (Ca, Si และ Mg) เกิดการแพร่เข้าไปในผงสีค่อนข้างมาก ทำให้อาจเกิดปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกหรือการเกิดเฟสใหม่ (ผล XRD มีการเลื่อนตำแหน่งของพีค (shift) เป็นผล

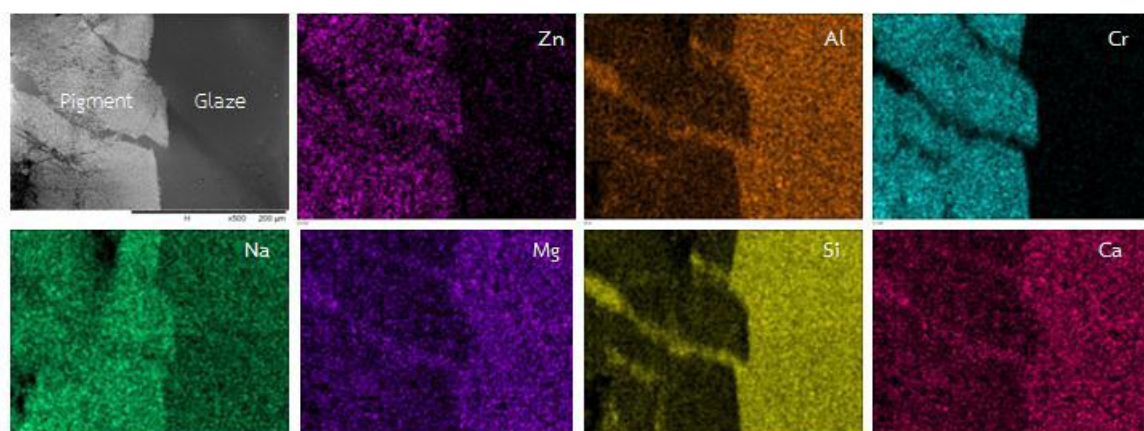
ให้ไททสีในเคลือบเปลี่ยนแปลง) สำหรับผงสีระบบ ZnCr_2O_4 ในเคลือบ Matt มีแนวโน้มที่จะเกิดอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างผงสีกับเคลือบเช่นเดียวกับ $\text{Zn}(\text{Al}_{1.6}\text{Cr}_{0.4})\text{O}_4$

การแพร่ขององค์ประกอบระหว่างผงสีและเคลือบที่สภาวะที่เคลือบแต่ไม่มีการเติมไอออน Fe (Celadon)

การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุในบริเวณชั้นแบ่งเคลือบและผงสี (interface) เพื่อศึกษาความเสถียรทางเคมีของผงสีสูตร $\text{Zn}(\text{Al}_{1.6}\text{Cr}_{0.4})\text{O}_4$ และ ZnCr_2O_4 ในเคลือบ Celadon ดังแสดงในรูปที่ 11 และ 12 ตามลำดับ จากหลักการของ BEI ธาตุที่มีเลขอะตอมน้อยจะให้ contrast ที่เข้มกว่าธาตุที่มีเลขอะตอมหนัก EDS mapping ของ Zn และ Cr แสดงการแพร่จากผงสีเข้าไปในเคลือบเล็กน้อย ในขณะที่ธาตุที่มีเฉพาะในเคลือบและองค์ประกอบหลักในเคลือบ (Ca, Si และ Al) เกิดการแพร่เข้าไปในผงสีค่อนข้างมาก ทำให้อาจเกิดปฏิกิริยาเคมี เปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกหรือการเกิดเฟสใหม่ (ผล XRD มีการเลื่อนตำแหน่งพีค (shift) และ ปรากฏพีคของเฟส Anorthite ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) และ Wollastonite (CaSiO_3) เป็นผลให้ไททสีในเคลือบเปลี่ยนแปลง) สำหรับผงสีระบบ ZnCr_2O_4 ในเคลือบ Celadon มีแนวโน้มที่จะเกิดอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างผงสีกับเคลือบเช่นเดียวกับ $\text{Zn}(\text{Al}_{1.6}\text{Cr}_{0.4})\text{O}_4$ ในเคลือบ

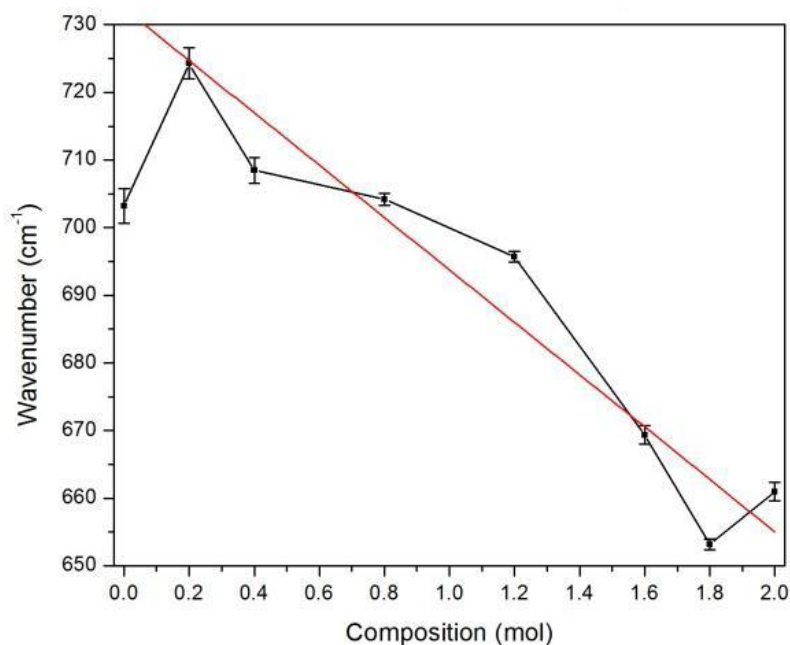


รูปที่ 11 EDS mapping ของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผงสีสูตร $\text{Zn}(\text{Al}_{1.6}\text{Cr}_{0.4})\text{O}_4$ ในเคลือบใส



รูปที่ 12 EDS mapping ของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผงสีสูตร ZnCr_2O_4 ในเคลือบใส

เมื่อพิจารณาการเจือ Cr ในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น พบว่าส่งผลให้เกิดการเลื่อน (Shifting) ของกราฟไปที่เลขคลื่น (Wavenumber) ที่ลดลง ถูกแสดงในรูปที่ 4 แสดงถึงลักษณะพันธะในโครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยอาจมีความเกี่ยวเนื่องกับความสามารถในการละลายในสถานะของแข็ง (Solid solubility) ระหว่าง ZnAl_2O_4 และ ZnCr_2O_4 และยังส่งผลให้พีกมีความกว้าง (Broadening) มากขึ้น เนื่องจากเกิดการ Overlapped ของสองแถบ Electron ทำให้ Crystal field เกิดการเปลี่ยนแปลง



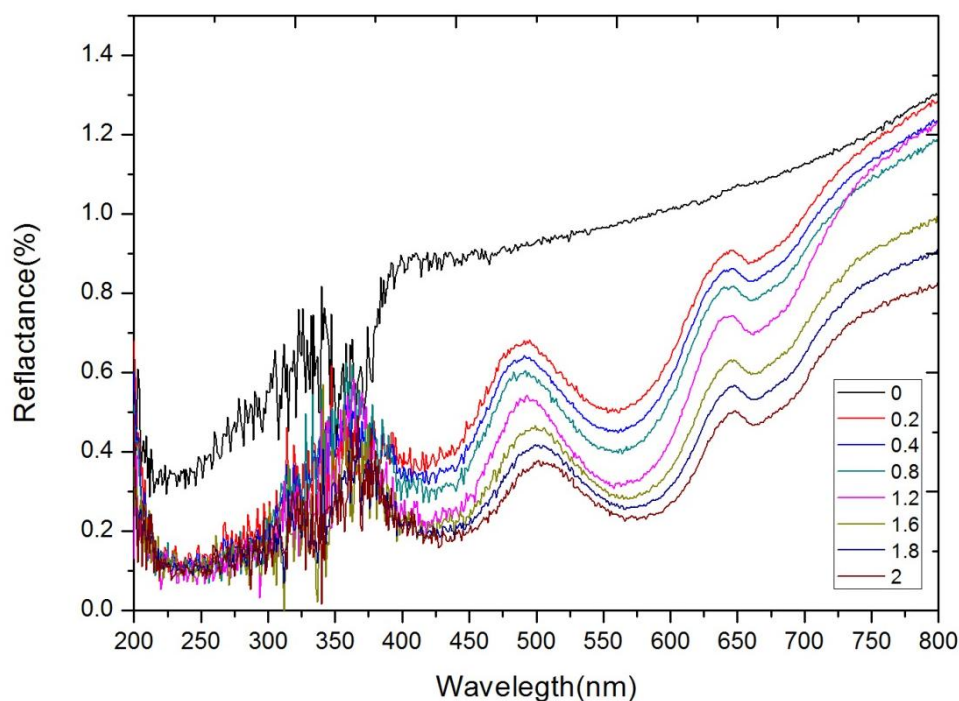
รูปที่ 4 ตำแหน่งพีกที่เปลี่ยนแปลงในช่วง $630\text{ cm}^{-1} - 910\text{ cm}^{-1}$ เมื่อเจือ Cr ที่สัดส่วนโดยโมลเท่ากับ 0 – 2.0 ของระบบ $\text{Zn}(\text{Al}_{2-x}\text{Cr}_x)\text{O}_4$

การตรวจสอบเลขออกซิเดชันและตำแหน่งในโครงสร้างผลึก

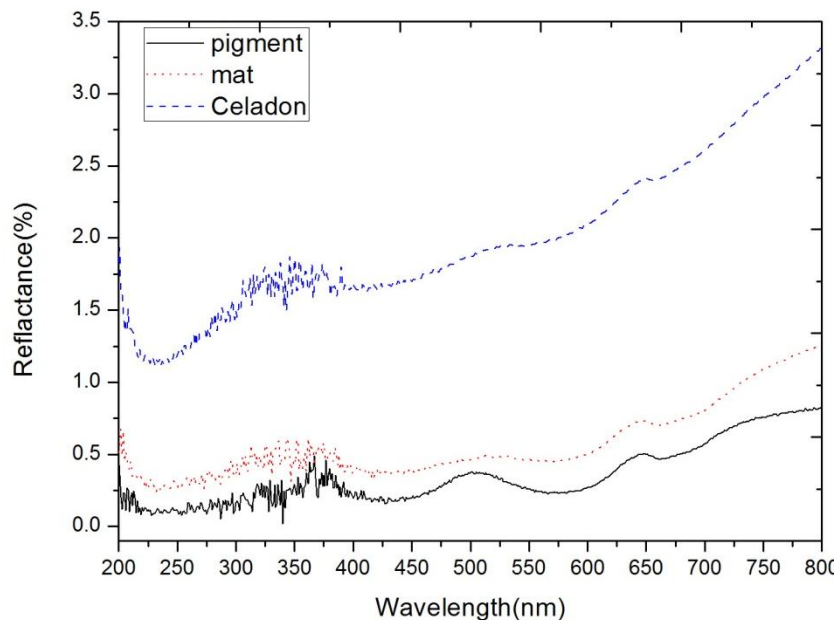
XPS spectra ของผงสัรระบบ $\text{Zn}(\text{Al}_{1.6}\text{Cr}_{0.4})\text{O}_4$ และ ZnCr_2O_4 ได้ถูกแสดงในรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ โดยทั้งสองระบบปรากฏพีกตำแหน่ง Cr2p ของ Cr^{3+} ซึ่งการที่พบเพียงพีกของ Cr^{3+} นั้นอาจบอกได้ว่า ผงสีทั้งสองระบบสามารถเกิดเป็นเฟสของ Solid solution ได้ และจากผลของ XRD ก็พบว่าที่ระบบ ZnCr_2O_4 ก็เกิดเป็น Single-phase เช่นกัน แต่สำหรับระบบ $\text{Zn}(\text{Al}_{1.6}\text{Cr}_{0.4})\text{O}_4$ นั้นจากผล XRD พบการแยกออกเป็นสามเฟส ซึ่งคาดว่าเกิดจากการเกิดสารละลายของแข็งที่สัดส่วนเชิงเคมีต่างกันของ $\text{Zn}(\text{Al,Cr})_2\text{O}_4$ ที่มีสัดส่วนของ Cr เข้าไปในโครงสร้างต่างกัน spectra ของ Cr2p จึงเกิดการแยกออกเป็นหลายๆพีกดังแสดงในรูปที่ 5 เมื่อพิจารณาในส่วน spectra ของ Zn พบการ broadening กับ การเลื่อนของพีก Zn ในระบบ $\text{Zn}(\text{Al}_{1.6}\text{Cr}_{0.4})\text{O}_4$ ซึ่งอาจเกิดจากการที่เกิดช่องว่างของออกซิเจนเมื่อมีการเจือ Cr หรืออาจเกิดจากการที่มี Cr บางส่วนเข้าไปเจือในส่วนช่องว่าง tetrahedral จึงทำให้สัดส่วนของ Zn ในระบบ $\text{Zn}(\text{Al,Cr})_2\text{O}_4$ และ $\text{Zn}(\text{Al}_{1.6}\text{Cr}_{0.4})\text{O}_4$ ต่างกันจึงทำให้เกิดการเลื่อนของพีก และเมื่อพิจารณาในส่วนของ O1s spectra ผงสัรระบบ $\text{Zn}(\text{Al}_{1.6}\text{Cr}_{0.4})\text{O}_4$ และ ZnCr_2O_4 พบพีกของ OH ซึ่งเกิดจากการดูดซับความชื้นบริเวณผิวหน้า และพบการเลื่อนของพีกไปในทางต่ำกว่าของระบบ $\text{Zn}(\text{Al}_{1.6}\text{Cr}_{0.4})\text{O}_4$ แสดงถึงความแตกต่างของลักษณะการเกิดพันธะออกซิเจน ในระบบที่มีปริมาณ Cr และ Al ในระบบต่างกัน อยู่ในโครงสร้างจึงเกิดความแตกต่างของพีกซึ่งเกิดจากความแตกต่างของ Polarizability ทั้งนี้ การวิเคราะห์ในส่วน XPS ทำโดยการนำผงสีไปอัดเม็ดในโมลโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 80mm และมีความสูงประมาณ 1.50 mm และนำไปเผาเพื่อให้เม็ด

สมบัติเชิงแสง

เทคนิค UV-Vis Visible ถูกนำมาใช้ศึกษาสมบัติเชิงแสงของผงสัระบบ $\text{Zn}(\text{Al}_{2-x}\text{Cr}_x)\text{O}_4$ ที่ถูกเผาที่ 1200°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากรูปที่ 13 ผงสีที่ไม่เจือ Cr สะท้อนแสงในช่วง Visible ทั้งหมดทำให้เกิดสีขาว ในส่วนของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของผงสีสามารถอธิบายได้โดย Tanabe-Sugano level diagram ซึ่งสเปกตรัมดังกล่าว เกิดจาก Cr^{3+} ซึ่งมีการจัดเรียง configuration d^3 แทนที่ในตำแหน่ง octahedral site ของผลึกสปิเนล ที่ความยาวคลื่น 420 570 และ 660 เกิดจากอิเล็กตรอนในชั้น d-orbital ถูกกระตุ้นจาก $4A_2(F) \rightarrow 4T_1(F)$, $4A_2(F) \rightarrow 4T_2(F)$ และ $4A_2(F) \rightarrow 4T_1(G)$ ตามลำดับ เมื่อเพิ่มปริมาณ Cr สเปกตรัมการดูดกลืนแสง broad และเกิด “Red shift” เนื่องจาก Cr^{3+} บางตัวแทนที่ในตำแหน่ง weak crystal field site ซึ่งสามารถยืนยันได้จากพีคของเทคนิค FT-IR ที่ broad และการ Shift ไปทางเลขคลื่นต่ำ ซึ่งการเกิด “Red shift” สามารถอธิบายได้จากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของ Octahedral site เนื่องจาก Atomic mass ของ Cr มากกว่า Al ส่งผลให้ Oxygen ligand เกิดการ charge transfer มากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการเจือ ทำให้เกิดการแยกชั้นของระดับพลังงานน้อยลง (split) ทำให้ที่ปริมาณการเจือน้อยๆ ได้ผงสีโทนชมพูและเปลี่ยนเป็นโทนเขียวเมื่อปริมาณการเจือ Cr มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่า CIE lab ที่ตั้งแต่ $x = 0-0.4$ ค่า a^* มีค่ามากขึ้น และ ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการเจือ



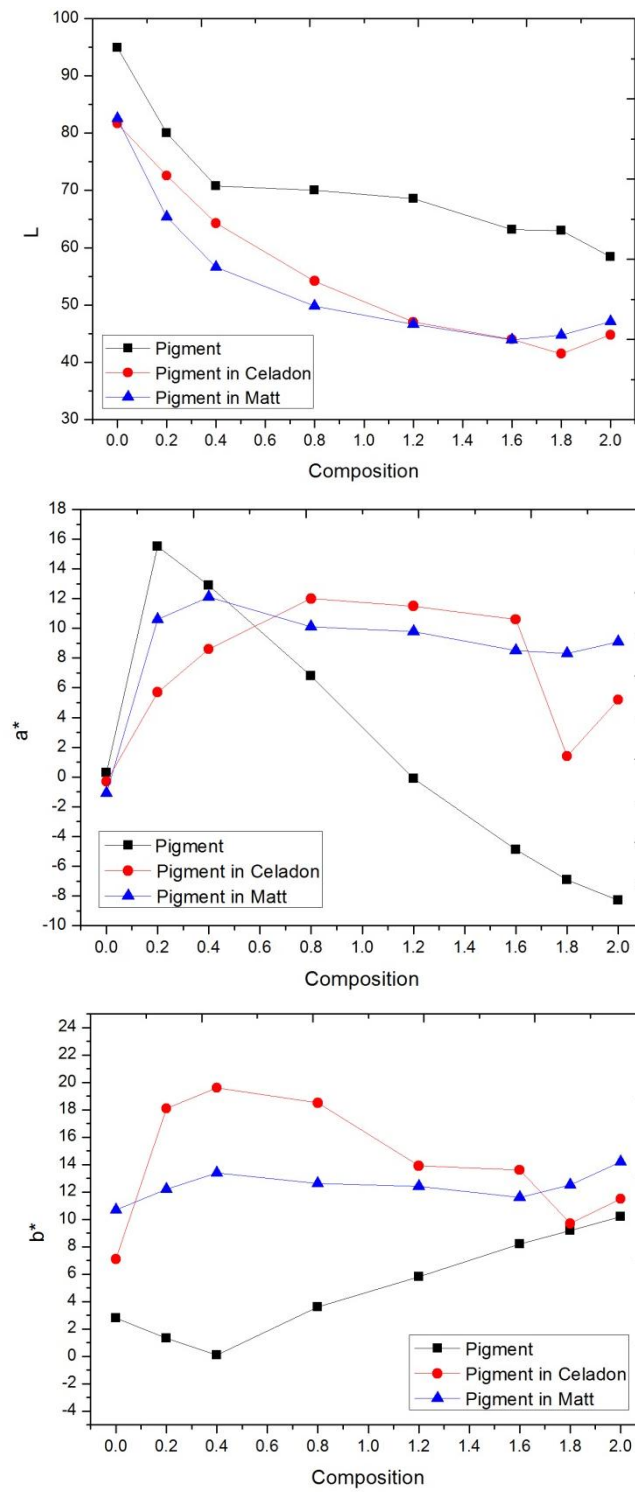
รูปที่ 13 UV Vis spectra ของผงสัระบบ $\text{Zn}(\text{Al}_{2-x}\text{Cr}_x)\text{O}_4$ ที่ถูกเผาที่ 1200°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง



รูปที่ 14 UV-vis spectra ของผงสีและผงสี 10 Wt% ผสมเคลือบ Matt และ Celadon จาก ZnCr_2O_4

เทคนิค UV Visible ถูกนำมาใช้ศึกษาเพื่อทดสอบความเสถียรของผงสีในเคลือบ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 14 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของผงสีที่ประมาณ 420 570 และ 660 nm จากการแทนที่ของ Cr^{3+} เมื่อเปรียบเทียบผงสีและผงสีผสมเคลือบทั้งสองชนิดมีความเข้มน้อยลง ซึ่งน่าจะเกิดจากผงสีละลายในเคลือบแล้ว ผงสีเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง หรือ สร้างเฟสใหม่ระหว่างผงสีกับเคลือบ มีความเป็นไปได้ที่อาจจะมีการแทนที่ของธาตุชนิดอื่น ซึ่งส่งผลต่อ local crystal field ทำให้พันธะระหว่าง O-Cr-O ในตำแหน่ง Octahedral site เปลี่ยนแปลง ทำให้โทนสีในเคลือบเปลี่ยน นอกจากนี้สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของผงสีในเคลือบ Celadon มีการสะท้อนสูงกว่าเคลือบ Matt เนื่องจากเป็นเคลือบใส และผลจากเทคนิค UV-Vis สอดคล้องกับผลจากเทคนิค CIE ค่าพารามิเตอร์ a^* ของผงสี ซึ่งมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณ Cr กลับเปลี่ยนเป็นเพิ่มขึ้นในผงสีที่ผสมเคลือบ

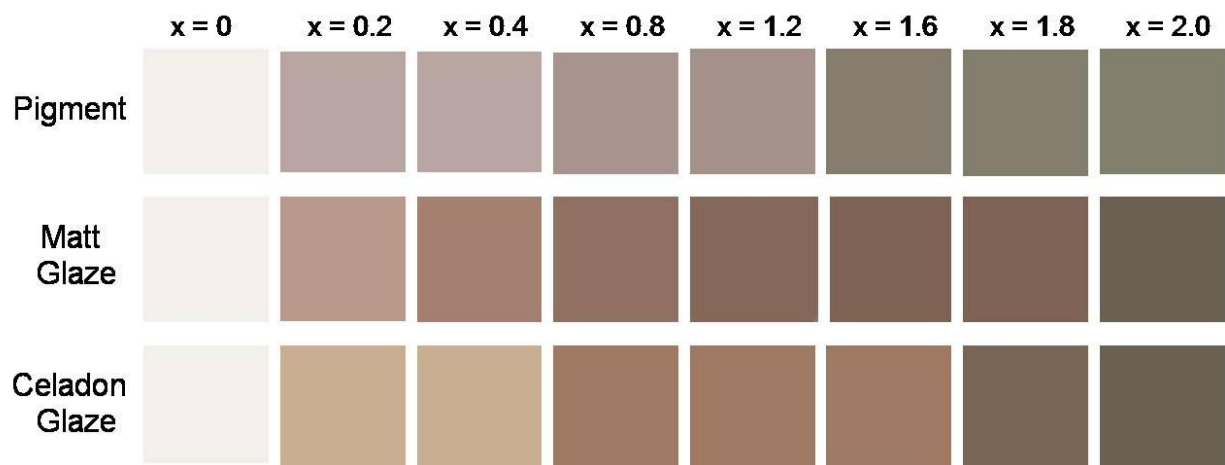
การวัดค่าสีด้วยระบบ CIE Lab เป็นการบรรยายสีแบบสามมิติค่า L^* คือค่าความสว่าง (100 = ขาว, 0 = ดำ) ส่วน a^* และ b^* เป็นค่าของโทนสี ($+a^*$ = แดง, $-a^*$ = เขียว, $+b^*$ = เหลือง และ $-b^*$ = ฟ้า) สำหรับแนวโน้มของค่าพารามิเตอร์ L^* a^* และ b^* ของผงสีระบบ $\text{Zn}(\text{Al}_{2-x}\text{Cr}_x)\text{O}_4$ ที่ถูกเผาที่ 1200°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และผงสี 10 Wt% ผสมเคลือบ Celadon และ Matt ที่เผาที่ 1250°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 15 การวัดค่าสีของผงสีระบบ $\text{Zn}(\text{Al}_{2-x}\text{Cr}_x)\text{O}_4$ ด้วยเทคนิค CIE Lab พิจารณาจากค่า L^* a^* และ b^* กับผลของการเพิ่มปริมาณโครเมียมผงสีที่ไม่เจือโครเมียม ($x=0$) ได้สีขาว ($L^*/a^*/b^* = 94.9/0.3/2.8$) เมื่อเพิ่มปริมาณโครเมียม ($x=0.2-2$) โทนสีเปลี่ยนจากสีชมพู ($70.8/12.9/0.1$) เป็นสีเขียว ($58.4/-8.3/10.2$) ยืนยันได้จากความเป็นบวกที่ลดลงของค่า a^*



รูปที่ 15 ค่าพารามิเตอร์ L a* b* ของผงสีระบบ $Zn(Al_{2-x}Cr_x)O_4$ ที่ถูกเผาที่ $1200^\circ C$ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และผงสี 10wt% ในเคลือบ Celadon และ Matt เผาที่ $1250^\circ C$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ตารางที่ 4 ลักษณะสีของผงสีระบบ $\text{Zn}(\text{Al}_{2-x}\text{Cr}_x)\text{O}_4$ ที่ถูกเผาที่ 1200°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และ สีของผงสี 10wt% ในเคลือบ Matt และ Celadon เผาเคลือบที่ 1250°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

Sample	Color Parameter	Composition							
		x = 0	x = 0.2	x = 0.4	x = 0.8	x = 1.2	x = 1.6	x = 1.8	x = 2
Pigment	L	94.9	71.9	70.8	70	68.6	63.2	63	58.4
	a	0.3	15.5	12.9	6.8	-0.1	-4.9	-6.9	-8.3
	b	2.8	1.3	0.1	3.6	5.8	8.2	9.2	10.2
Matt Glaze	L	82.6	65.4	56.6	49.8	46.6	43.9	44.7	47.1
	a	-1.1	10.6	12.1	10.1	9.8	8.5	8.3	9.1
	b	10.7	12.2	13.4	12.6	12.4	11.6	12.5	14.2
Celadon Glaze	L	81.7	72.6	64.3	54.2	47	44	41.5	44.8
	a	-0.3	5.7	8.6	12	11.5	10.6	7.4	5.2
	b	7.1	18.1	19.6	18.5	13.9	13.6	12.7	11.5



สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ (Conclusions and Recommendation)

ผงสีเซรามิกสีในระบบสปีเนล $\text{Zn}(\text{Al}_{2-x}\text{Cr}_x)\text{O}_4$ ผ่านการตรวจสอบอย่างเป็นระบบ ชัดจำกัดความสามารถในการละลายในสถานะของแข็งอยู่ในช่วง 0-0.2 และ 1.6-2.0 การเข้าแทนที่ของไอออนให้สี (โครเมียม) สามารถยืนยันได้ทางอ้อมโดยเทคนิค FTIR และ Raman spectroscopy ผ่านการเลื่อนและการกว้างขึ้นของพีค เลขออกซิเดชันของโครเมียมที่ตรวจสอบโดยเทคนิค XPS เป็น +3 ซึ่งบ่งบอกถึงความน่าจะเป็นในการแทนที่ตำแหน่ง Al^{3+} ผงสีที่ถูกสังเคราะห์มีขนาดอนุภาคในช่วง 1-2 ไมครอน ผงสีปรากฏสีโทนชมพูที่ปริมาณการเจือโครเมียมต่ำและเปลี่ยนเป็นโทนสีเขียวเมื่อเพิ่มปริมาณการเจือ เทคนิค XRD และการทำ lattice refinement ยืนยันการเข้าแทนที่ของ Cr ด้วยผลของการเปลี่ยนแปลง lattice constant ที่ตรงตาม Vegard's law สมรรถนะเชิงเทคโนโลยีของผงสีได้ถูกทดสอบกับเคลือบจริง (เคลือบสีที่ใช้กับเคลือบสีลาด แต่ไม่มีการเติมไอออน Fe และเคลือบด้าน) โดยทำการเผาที่จุดสุกตัวของเคลือบ การเปลี่ยนแปลงโทนสีหลังการเผาเคลือบอาจเกิดจากการแพร่เข้าและออกของบางธาตุ ซึ่งถูกตรวจพบอย่างคร่าวๆ โดยใช้เทคนิคEDS ที่บริเวณรอยต่อ (interface) ระหว่างเม็ดผงสีและเนื้อแก้วเคลือบ

ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาไอออนให้สีชนิดอื่นด้วยเพื่อให้เกิดข้อมูลของสีที่หลากหลายเพิ่มขึ้น รวมถึงการใช้ระบบ MgAl_2O_4 เป็น host ซึ่งอาจได้ผลที่แตกต่างออกไป