



โครงการ การเรียนการสอนเพื่อเพิ่มประสบการณ์

ชื่อโครงการ การเตรียมสีเซรามิกจากกากอุตสาหกรรมจากการชุบผิวเหล็กกล้า
Preparation of Ceramic Pigment from Steel Plating Waste

ชื่อนิสิต	นางสาวเบญจมาศ	ห้วยหงษ์ทอง	เลขประจำตัว	5833237023
	นางสาวปยุตนิษฐ์	องค์อภิบุลย์	เลขประจำตัว	5833244423

ภาควิชา วัสดุศาสตร์

ปีการศึกษา 2561

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของโครงการทางวิชาการที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของโครงการทางวิชาการที่ส่งผ่านทางคณะที่สังกัด

The abstract and full text of senior projects in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)

are the senior project authors' files submitted through the faculty.

โครงการวิจัยระดับปริญญาตรี

เรื่อง


การเตรียมสีเซรามิกจากกากอุตสาหกรรมจากการชุบผิวเหล็กกล้า
Preparation of Ceramic Pigment from Steel Plating Waste

เสนอ

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ตามระเบียบการศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

1. นางสาวเบญจมาศ ห้วยหงษ์ทอง เลขประจำตัว 5833237023
2. นางสาวปยุตนิษฐ์ องค์อภิบุลย์ เลขประจำตัว 5833244423

อนุมัติโดย



.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันทนีย์ พุกกะคุปต์)

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

ปีการศึกษา 2561

หัวข้องานวิจัย	การเตรียมสีเซรามิกจากกากอุตสาหกรรมจากการชุบผิวเหล็กกล้า	
โดย	นางสาวเบญจมาศ	ห้วยหงษ์ทอง
	นางสาวปัญญศนิษฐ์	องค์อภิบุลย์
สาขาวิชา	เซรามิกและวัสดุศาสตร์	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันทนีย์	พุกกะคุปต์
ปีการศึกษา	2561	

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นศึกษาการใช้กากตะกอนโครเมียมจากอุตสาหกรรมการชุบผิวเหล็กกล้า มาเป็นวัตถุดิบทดแทนในผงสีเซรามิก องค์ประกอบหลักทางเคมีของกากตะกอนโครเมียม คือ โครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ซึ่งเป็นออกไซด์ที่สามารถทำให้เกิดสีเขียวในเคลือบ จากองค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนโครเมียม พบว่า น่าจะนำมาทำเป็นผงสีเขียวได้เนื่องจากมีปริมาณโครเมียมออกไซด์สูง งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมผงสีเซรามิกสีเขียวจากกากตะกอนโครเมียมเทียบกับสีเขียวทางการค้าและพิจารณาความแตกต่างของสีและค่าสีมาตรฐาน CIELAB โดยศึกษาผงสีเขียวที่มีส่วนผสมของกากตะกอนโครเมียมต่อซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วน 1:1:1 1:1:0.8 1:1:0.6 และ 1:1:0.4 โดยโมล ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า สัดส่วนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ลดลงทำให้สีเขียวที่ได้เข้มขึ้น โดยอัตราส่วนผสมระหว่างกากตะกอนโครเมียม ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนตที่ให้สีเขียวที่ใกล้เคียงกับสีทางการค้าที่สุด คือ 1:1:0.4 หลังจากนั้นเติมโครเมียมออกไซด์ 0.1 และ 0.2% โดยโมล ลงในส่วนผสมเคลือบที่บิที่มีอัตราส่วนของกากตะกอนโครเมียมต่อ ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต 1:1:0.4 จากการเปรียบเทียบผลของปริมาณโครเมียมออกไซด์ที่มีต่อลักษณะเคลือบที่บิ พบว่า การเติมโครเมียมออกไซด์ 0.1% โดยโมล ทำให้เคลือบที่บิมีสีเขียวมากยิ่งขึ้น แต่ยังไม่ใกล้เคียงกับสีเขียวทางการค้าเท่าที่ควร จึงมีการเติมเหล็กออกไซด์และโคบอลต์ออกไซด์เพิ่มเข้าไป 0.05 0.10 และ 0.15% โดยน้ำหนัก การเติมเหล็กออกไซด์เพิ่มเข้าไป 0.05% โดยน้ำหนัก ให้สีเขียวที่ใกล้เคียงกับสีทางการค้ามากที่สุด ($\Delta E < 5$) จึงสรุปได้ว่าสามารถใช้กากตะกอนโครเมียมจากอุตสาหกรรมการชุบผิวเหล็กกล้ามาเป็นวัตถุดิบทดแทนในการผลิตผงสีเซรามิกสีเขียวได้

Title	Preparation of Ceramic Pigment from Steel Plating Waste	
By	Miss Benjamas	Huayhongthong
	Miss Poosanit	Ongapibool
Major	Ceramic and Materials Science	
Advisor	Assistant Prof. Dr.Wantanee Buggakupta	
Academic year	2018	

Abstract

This study focused on the use of chromium waste from steel surface plating industry as a replacement of raw materials in ceramic pigment. According to chemical composition of chromium waste, it is possible to use it as raw materials in green ceramic pigment which is a chromium-rich pigment. The main chemical composition of chromium waste is chromium oxide (Cr_2O_3) which can create green color in glazes. This study prepared of green ceramic pigment from chromium waste compared with commercial green pigment, considering the difference of the obtained color and the commercial colors by CIELAB standards. Characteristics of green pigment from the mixtures of each chromium waste, silica and calcium carbonate, the mol ratios of which among 1:1:1 1:1:0.8 1:1:0.6 and 1:1:0.4, were observed. The experimental results showed the smaller content of calcium carbonate led to more vivid green. The optimum ratio of chromium waste, silica and calcium carbonate of 1:1:0.4 provided the similar green relative the commercial green. The addition of chromium oxide 0.1 and 0.2 mol% in the opaque glaze, with the 1:1:0.4 pigment was concerned. The experimental results showed the addition of 0.1 mol% chromium oxide gave the closer green opaque glaze but not yet satisfactory. So, the addition of iron oxide and cobalt oxide of 0.05, 0.10 and 0.15 wt% each was subsequently undergone. The results suggested that 0.05 wt% iron oxide gave the best green which was very similar to commercial green pigment ($\Delta E < 5$). This indicated that chromium waste from steel surface plating industry could be potentially used as a raw material in green ceramic pigment production.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจากการสนับสนุนและความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ จากหลายท่าน ดังนี้

ผศ.ดร.วันทนี พุกกะคุปต์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความรู้ ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาในการทำโครงการ และเรื่องต่างๆ ตลอดมา

คุณวิระพงษ์ ครพนม เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเซรามิก ที่คอยช่วยเหลือ และให้คำแนะนำการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบ

บริษัท สยามพริท จำกัด สำหรับกากตะกอนโครเมียมจากอุตสาหกรรมการชุบผิวเหล็กกล้า

บริษัท ไทยอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา จำกัด สำหรับกระเบื้องสำเร็จรูป

บริษัท คอมพาวด์เคลย์ จำกัด สำหรับเคลือบทึบสำเร็จรูป

คณาจารย์และบุคลากรในภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่คอยช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการทำโครงการวิทยาศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนสนับสนุนในการทำโครงการวิทยาศาสตร์

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัว ที่สนับสนุนให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน คอยช่วยเหลือ และให้กำลังใจผู้จัดทำตลอดการเรียน

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 การชุบโลหะ.....	3
2.1.1 กรรมวิธีการชุบทองแดง-นิกเกิล-โครเมียม.....	6
2.2 การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการชุบโลหะ.....	7
2.3 กากตะกอนโครเมียมจากน้ำยาชุบโครเมียม.....	8
2.4 เคลือบ.....	10
2.4.1 โครงสร้างของเคลือบ.....	11
2.5 สีอะครีลิก.....	12
2.5.1 กระบวนการผลิตผงสีอะครีลิก.....	12
2.5.2 สีอะครีลิกสำหรับใช้ในเคลือบ.....	13
2.5.3 สีเขียว.....	16
2.6 เอกสารที่เกี่ยวข้อง.....	18
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	22
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	22

หน้า

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบ.....	22
3.3 วิธีการทดลอง.....	23
3.3.1 การล้างกากตะกอนโครเมียมจากน้ำยาชุบโครเมียม.....	23
3.3.2 การผสมสูตรสีเซรามิก.....	24
3.3.3 การเตรียมเคลือบที่มีส่วนผสมของโครเมียมออกไซด์โดยใช้กากอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบ ทดแทน.....	25
3.3.4 การศึกษาสมบัติของเคลือบ.....	26
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	28
4.1 ผลการศึกษาลักษณะของกากตะกอนโครเมียมจากน้ำยาชุบโครเมียม.....	28
4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี.....	28
4.1.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาเคมีตามอุณหภูมิ.....	31
4.2 ผลการศึกษาลักษณะของผงเซรามิกสีเขียว.....	32
4.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบเฟส.....	32
4.2.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาเคมีตามอุณหภูมิ.....	33
4.2.3 การเปรียบเทียบผงเซรามิกสีเขียว.....	35
4.3 ผลการศึกษาของสีเคลือบจากกากตะกอนโครเมียมกับสีเคลือบทางการค้า.....	35
4.3.1 เปรียบเทียบสีเคลือบของสูตร Prelim กับสีเคลือบทางการค้า 5%.....	35
4.3.2 เปรียบเทียบสีเคลือบของสูตร Prelim, PF1, PF2 และ PF3 กับสีเคลือบทางการค้าสูตร STD2 ST-4000.....	36
4.3.3 เปรียบเทียบสีเคลือบของสูตรสีเคลือบที่เติม Cr_2O_3 0.1-0.2% กับสูตรสีเคลือบทางการค้า สูตร STD2 ST-4000.....	37
4.3.4 เปรียบเทียบสีเคลือบของสูตรสีเคลือบที่เติม Fe_2O_3 0.05-0.15% กับสีเคลือบทางการค้า สูตร STD2 ST-4000.....	38
4.3.5 เปรียบเทียบสีเคลือบของสูตรสีเคลือบที่เติม CoO 0.05-0.15% กับสีเคลือบทางการค้า สูตร STD2 ST-4000.....	39
4.3.6 เปรียบเทียบสีเคลือบของสูตรสีเคลือบทางการค้า STD2 ST-4000 กับสูตรสีเคลือบที่มีค่าสี ใกล้เคียงกับสูตรสีเคลือบทางการค้า STD2 ST-4000 มากที่สุด.....	40

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	41
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	41
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	41
เอกสารอ้างอิง.....	43
ภาคผนวก.....	45
ภาคผนวก ก.....	46
ภาคผนวก ข.....	52
ภาคผนวก ค.....	56

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนโครเมียมจากน้ำยาชุบโครเมียม.....	10
ตารางที่ 2.2 สูตรสีเซรามิกที่มีส่วนประกอบออกไซด์ทางการค้าของสีเขียว.....	17
ตารางที่ 3.1 ตารางส่วนผสมในสีเซรามิกโดยใช้กากอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบทดแทน.....	24
ตารางที่ 3.2 ตารางสูตรเคลือบ.....	25
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของออกไซด์ของกากตะกอนโครเมียมก่อนและหลังผ่านกระบวนการล้าง 1 ครั้ง และ 2 ครั้ง.....	29
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของธาตุ/โลหะของกากตะกอนโครเมียมก่อนและหลังผ่านกระบวนการล้าง 1 ครั้งและ 2 ครั้ง.....	30
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าโทนสีของสูตรสีเคลือบทางการค้าและสีเคลือบสูตร Prelim.....	36
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าโทนสีของสูตรสีเคลือบทางการค้า STD2 ST-4000 และสีเคลือบสูตร Prelim, PF1, PF2 และ PF3.....	37
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าโทนสีของสูตรสีเคลือบทางการค้า STD2 ST-4000 และสีเคลือบสูตร A และ B.....	38
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าโทนสีของสูตรสีเคลือบทางการค้า STD2 ST-4000 และสีเคลือบสูตร A1, A2 และ A3.....	39
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าโทนสีของสูตรสีเคลือบทางการค้า STD2 ST-4000 และสีเคลือบสูตร A4, A5 และ A6.....	39
ตารางที่ 4.8 แสดงค่าโทนสีของสูตรสีเคลือบทางการค้า STD2 ST-4000 และสีเคลือบสูตร A, A1 และ A4.....	40
ตารางที่ ก.1 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนโครเมียม.....	47
ตารางที่ ก.2 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนโครเมียมล้าง 1 ครั้ง.....	49
ตารางที่ ก.3 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนโครเมียมล้าง 2 ครั้ง.....	51

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 ภาพรวมอุตสาหกรรมการชุบโลหะ.....	3
ภาพที่ 2.2 ประเภทของการชุบโลหะ.....	5
ภาพที่ 2.3 ขั้นตอนการชุบโลหะด้วยทองแดง-นิกเกิล-โครเมียม.....	6
ภาพที่ 2.4 การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดง-นิกเกิล-โครเมียม.....	8
ภาพที่ 2.5 ลักษณะของกากตะกอนโครเมียมจากน้ำยาชุบโครเมียม.....	9
ภาพที่ 2.6 XRD pattern ของกากตะกอนโครเมียมจากน้ำยาชุบโครเมียม.....	9
ภาพที่ 2.7 รูปปริมาตรฐานสามเหลี่ยมของซิลิกา 1 หน่วย.....	11
ภาพที่ 2.8 ตัวอย่างผงสีสะเตนที่สังเคราะห์มาทำเคลือบเซรามิก.....	13
ภาพที่ 2.9 ผลึกแร่ยูวาร์ไวต์ (Uvarovite).....	16
ภาพที่ 2.10 โครงสร้างผลึกระบบคิวบิกของแร่ยูวาร์ไวต์ (Uvarovite).....	17
ภาพที่ 3.1 การกรองกากตะกอนโครเมียมจากน้ำยาชุบโครเมียมหลังการล้าง.....	24
ภาพที่ 3.2 แผนผังขั้นตอนการทดลอง.....	27
ภาพที่ 4.1 ผลวิเคราะห์ DTA ของกากตะกอนโครเมียมจากน้ำยาชุบโครเมียม.....	31
ภาพที่ 4.2 กราฟ XRD เปรียบเทียบของค์ประกอบเฟสผงเซรามิกสีเขียวสูตรต่าง ๆ.....	32
ภาพที่ 4.3 ผลวิเคราะห์ DTA ของผงเซรามิกสีเขียวสูตร Prelim.....	33
ภาพที่ 4.4 ผลวิเคราะห์ DTA ของผงเซรามิกสีเขียวสูตร PF3.....	34
ภาพที่ 4.5 ผงเซรามิกสูตร Prelim, PF1, PF2 และ PF3.....	35
ภาพที่ 4.6 สีเคลือบจากกากตะกอนโครเมียมสูตร Prelim เทียบกับสีเคลือบทางการค้า.....	36
ภาพที่ 4.7 สีเคลือบสูตร Prelim, PF1, PF2 และ PF3 เทียบกับสีเคลือบทางการค้าสูตร STD2 ST-4000.....	37
ภาพที่ 4.8 สีเคลือบสูตร A และ B เทียบกับสีเคลือบทางการค้าสูตร STD2 ST-4000.....	38
ภาพที่ 4.9 สีเคลือบสูตร A1, A2 และ A3 เทียบกับสีเคลือบทางการค้าสูตร STD2 ST-4000.....	38
ภาพที่ 4.10 สีเคลือบสูตร A4, A5 และ A6 เทียบกับสีเคลือบทางการค้าสูตร STD2 ST-4000.....	39
ภาพที่ 4.11 สีเคลือบสูตร A, A1 และ A4 เทียบกับสีเคลือบทางการค้าสูตร STD2 ST-4000.....	40
ภาพที่ ก.1 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนโครเมียม.....	46

หน้า

ภาพที่ ก.2 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนโครเมียมล้าง 1 ครั้ง.....	48
ภาพที่ ก.3 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนโครเมียมล้าง 2 ครั้ง.....	50
ภาพที่ ข.1 องค์ประกอบทางเฟสของผงสีเขียวสูตรที่ใช้กากตะกอนโครเมียมต่อซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วน 1:1:1.....	52
ภาพที่ ข.2 องค์ประกอบทางเฟสของผงสีเขียวสูตรที่ใช้กากตะกอนโครเมียมต่อซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วน 1:1:0.8.....	53
ภาพที่ ข.3 องค์ประกอบทางเฟสของผงสีเขียวสูตรที่ใช้กากตะกอนโครเมียมต่อซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วน 1:1:0.6.....	54
ภาพที่ ข.4 องค์ประกอบทางเฟสของผงสีเขียวสูตรที่ใช้กากตะกอนโครเมียมต่อซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วน 1:1:0.4.....	55
ภาพที่ ค.1 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนและน้ำหนักของกากตะกอนโครเมียม.....	56
ภาพที่ ค.2 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนและน้ำหนักของผงสีเขียวสูตรที่ใช้กากตะกอนโครเมียมต่อซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วน 1:1:1.....	57
ภาพที่ ค.3 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนและน้ำหนักของผงสีเขียวสูตรที่ใช้กากตะกอนโครเมียมต่อซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วน 1:1:0.4.....	58

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมมีกากของเสียที่มาจากการทำอุตสาหกรรมที่มีโลหะหนักเจือปน ซึ่งไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์และอาจทำให้เกิดมลพิษในโรงงาน อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและยากต่อการกำจัดทิ้งเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตาม สารประกอบโลหะที่เป็นกลุ่มโลหะออกไซด์ เช่น โครเมียมออกไซด์ เป็นส่วนผสมหลักที่ใช้ในอุตสาหกรรมการทำผงสีเซรามิก ซึ่งถือเป็นของเสียที่ไม่มีประโยชน์ต่อโรงงานและสิ่งแวดล้อม แต่ของเสียเหล่านี้สามารถนำมาผ่านกระบวนการทางเซรามิกเพื่อให้ได้ผงสีเซรามิกที่สามารถนำมาใช้กับอุตสาหกรรมเซรามิกได้อย่างผงสีเซรามิกทั่วไป

อุตสาหกรรมการชุบผิวเหล็กกล้ามีของเสียที่ได้จากกระบวนการชุบโลหะหลายชนิด เช่น กากตะกอนโครเมียม ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการชุบโครเมียม กากตะกอนโครเมียมนี้นำมาผ่านการลดวาเลนซ์จาก +6 เป็น +3 เพื่อลดความเป็นพิษลง กากอุตสาหกรรมเหล่านี้บางส่วนถูกกำจัดทิ้ง ในขณะที่บางส่วนสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเซรามิกและผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ได้

สำหรับกากตะกอนโครเมียมที่ได้จากกระบวนการชุบผิวเหล็กกล้า มีลักษณะเป็นของแข็ง เกาะกันเป็นก้อนใหญ่ และประกอบด้วยโครเมียมไฮดรอกไซด์เป็นหลัก นอกจากนี้อาจมีโลหะออกไซด์อื่น ๆ เจือปนอยู่ด้วย โครเมียมไฮดรอกไซด์นี้จึงจะสามารถนำมาผลิตเป็นสีเซรามิกได้โดยการใช้ในการเตรียมวัตถุดิบโครเมียมออกไซด์ ซึ่งเป็นสารให้สีเขียวในเคลือบเซรามิก

งานวิจัยในครั้งนี้ จึงเกิดแนวคิดที่จะผลิตผงสีเซรามิกจากกากของเสียที่ได้จากอุตสาหกรรม ซึ่งจะนำกากตะกอนโครเมียมมาทำเป็นผงสีเซรามิก เพื่อเป็นการลดขยะและช่วยลดมลพิษที่เกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับกากของเสียให้เกิดประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมผงสีเซรามิก ช่วยลดต้นทุนและค่าใช้จ่ายของผงสีเซรามิกในอุตสาหกรรมเซรามิกอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตผงสีเซรามิกจากกากอุตสาหกรรมที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบหลัก

1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสมบัติของผงสีเซรามิกที่เตรียมได้จากกากอุตสาหกรรมที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบหลัก

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของเจดสีในเคลือบทึบของกากตะกอนโครเมียมและสีทางการค้า

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ใช้กากอุตสาหกรรมจากกระบวนการชุบผิวเหล็กกล้า ได้แก่ กากตะกอนโครเมียม นำมาใช้เป็นส่วนผสมในการเตรียมผงสีเซรามิก

1.3.2 เตรียมสีเป้าหมาย ได้แก่ สีเขียวที่มีโครเมียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลักจากกากตะกอนโครเมียม

1.3.3 ปรับและเปรียบเทียบสีที่เตรียมได้จากกากตะกอนโครเมียมกับสีเซรามิกทางการค้าที่ผสมในน้ำเคลือบสูตรมาตรฐาน ณ ปริมาณการเติมโครเมียมออกไซด์ที่เท่ากัน

1.3.4 ปรับและเปรียบเทียบสีที่เตรียมได้จากกากตะกอนโครเมียมกับสีเซรามิกทางการค้าที่ผสมในน้ำเคลือบสูตรมาตรฐาน ณ ปริมาณการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ต่างกัน

1.3.5 ปรับและเปรียบเทียบสีที่เตรียมได้จากกากตะกอนโครเมียมกับสีเซรามิกทางการค้าที่ผสมในน้ำเคลือบสูตรมาตรฐาน ณ ปริมาณการเติมโลหะออกไซด์ที่ต่างกัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพิ่มมูลค่าของกากตะกอนโครเมียมที่ได้จากอุตสาหกรรมการชุบผิวเหล็กกล้า

1.4.2 ช่วยลดต้นทุนในการผลิตผงสีเซรามิก

1.4.3 ลดต้นทุนในการกำจัดกากอุตสาหกรรมในโรงงานอุตสาหกรรม รวมถึงไปถึงปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น

1.4.4 สามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้เพื่อก่อให้เกิดประโยชน์แก่อุตสาหกรรมเซรามิกในแง่ของการเตรียมผงสีเซรามิกจากกากอุตสาหกรรมตัวอื่น ๆ หรือจากวัตถุดิบอื่น ๆ

1.4.5 พบทางเลือกในการเตรียมผงสีเซรามิกเพิ่มขึ้น

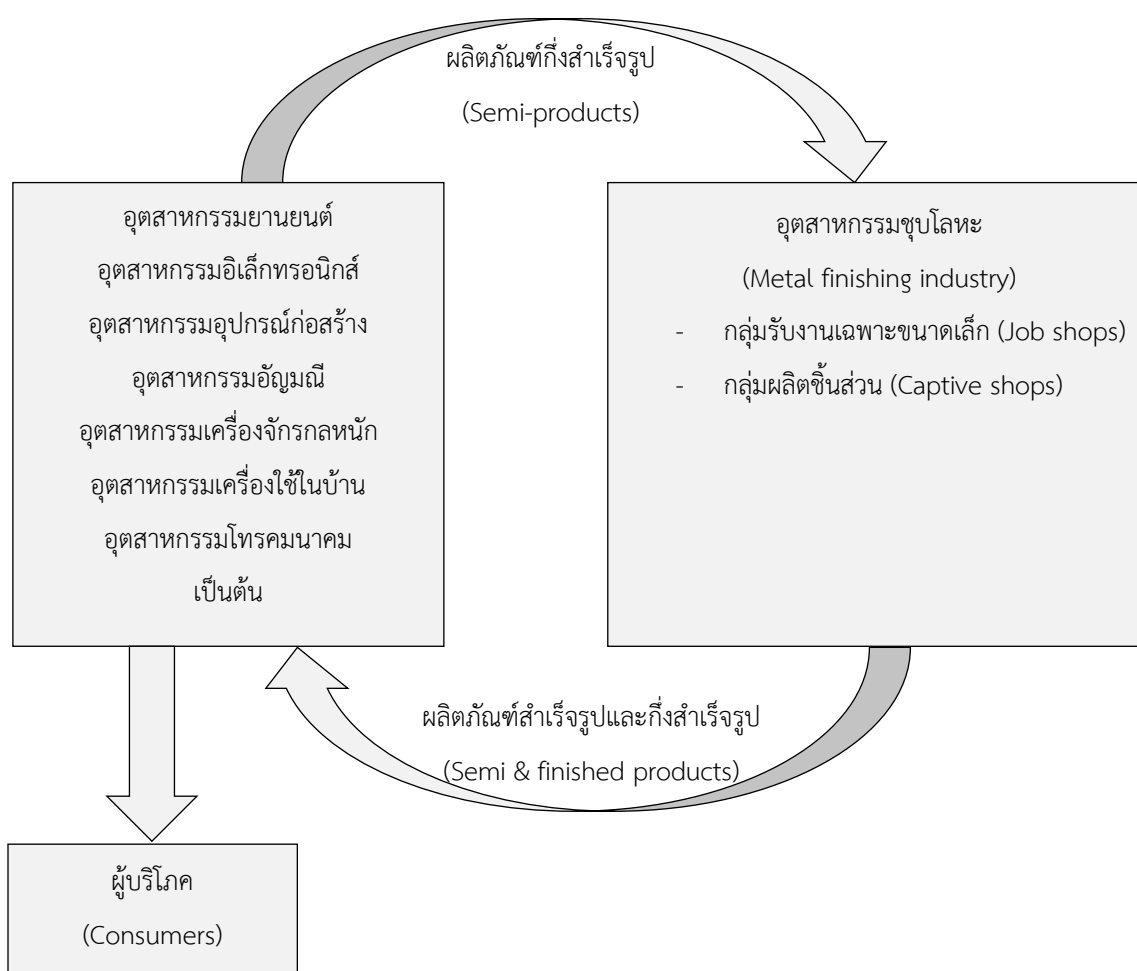
1.4.6 พัฒนาเทคโนโลยีใหม่ ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมผงสีเซรามิก

บทที่ 2

เอกสารและผลงานที่เกี่ยวข้อง

2.1 การชุบโลหะ

อุตสาหกรรมชุบโลหะจัดอยู่ในกลุ่มอุตสาหกรรมตกแต่งผิวโลหะ ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมสนับสนุนของอุตสาหกรรมหลักอื่น ๆ จำนวนมาก เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์ก่อสร้าง อัญมณี เครื่องจักรกลหนัก เครื่องใช้ในบ้าน โทรคมนาคม เป็นต้น^[1] ดังแสดงในรูปที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ภาพรวมอุตสาหกรรมการชุบโลหะ

(ที่มา: http://www2.diw.go.th/I_Standard/Web/pane_files/Industry26.asp)

การชุบเคลือบผิวด้วยโลหะ (Plating) เป็นกระบวนการปรับสภาพผิวโลหะและ/หรือวัสดุประเภทอื่น ๆ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติต่าง ๆ ให้แก่ชิ้นงาน โดยวัตถุประสงค์หลักในการชุบเคลือบผิวด้วยโลหะ มีดังนี้^[2]

1. ตกแต่งผลิตภัณฑ์ให้เกิดความสวยงาม (Decorating)
2. เพื่อป้องกันการผุกร่อน (Anti – corrosion) และยืดอายุการใช้งาน
3. เพื่อเพิ่มสมบัติพิเศษ ได้แก่ การนำไฟฟ้า (Electronic conductivity) การสะท้อนแสง (Reflectivity and appearance) การเป็นประกาย (Brightness) สี (Color) ความแข็ง (Hardness) ความทนทานต่อแรงบิด (Torque tolerance) ความทนทานต่อสารเคมี (Chemical resistance) การเชื่อมประสานโลหะ (Solder ability) และความสามารถในการยึดเกาะกับยางพารา (Ability to bond to rubber) ในอุตสาหกรรมยางรถยนต์ เป็นต้น

การชุบโลหะแบ่งออกเป็น 4 ประเภท^[2] คือ

1. การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating) คือ กระบวนการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายเกลือของโลหะ (Metallic salt) แล้วทำให้อิออนบวกวิ่งมารับประจุไฟฟ้าลบที่ชิ้นงาน ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วลบ (Cathode) จึงทำให้เกิดเป็นชั้นผิวบางของโลหะมาเคลือบอยู่บนผิวด้านนอกของชิ้นงาน ด้วยการใช้กระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟและต่อกระแสไฟให้ครบวงจร อนุภาคเล็ก ๆ ของโลหะที่เป็นสารละลายจะวิ่งไปเคลือบบนผิวชิ้นงานที่นำมาชุบ เช่น การชุบเงิน การชุบทอง การชุบทองแดง การชุบนิกเกิล เป็นต้น
2. การชุบโลหะแบบไม่ใช้ไฟฟ้า (Electroless plating) คือ กระบวนการคงตัวของโลหะที่ผิวหน้าของชิ้นงาน โดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้า แต่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมี เช่น การชุบทองแดง การชุบนิกเกิล การชุบทอง ลงบนแผ่นวงจร (Printed circuit boards, PCB) เป็นต้น
3. การชุบโลหะแบบการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและไฟฟ้าเคมี (Chemical and electrochemical conversion) คือ กระบวนการชุบโลหะที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของชิ้นงาน โดยอาจมีการใช้กระแสไฟฟ้าหรือไม่ก็ได้ เพื่อทำให้เกิดชั้นป้องกันผิว (Protective coating) และ/หรือเกิดชั้นผิวที่สวยงาม (Decorative coating) เช่น
 - Chromating คือ การชุบโลหะด้วยโครเมียม
 - Phosphating คือ การเตรียมผิวหน้า โดยการรองพื้นด้วยฟอสเฟต ซึ่งเป็นกระบวนการก่อนการทาสี หรือพ่นสี
 - Anodizing คือ การจุ่มชิ้นงานลงในสารละลายเกลือโลหะ หรือสารละลายกรด เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกไซด์ของโลหะ (Metal oxide) ซึ่งมีสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อน
 - Passivating คือ กระบวนการจุ่มชิ้นงานลงในสารละลายกรดหรือด่าง ใช้สำหรับการป้องกันการผุกร่อน และช่วยยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์

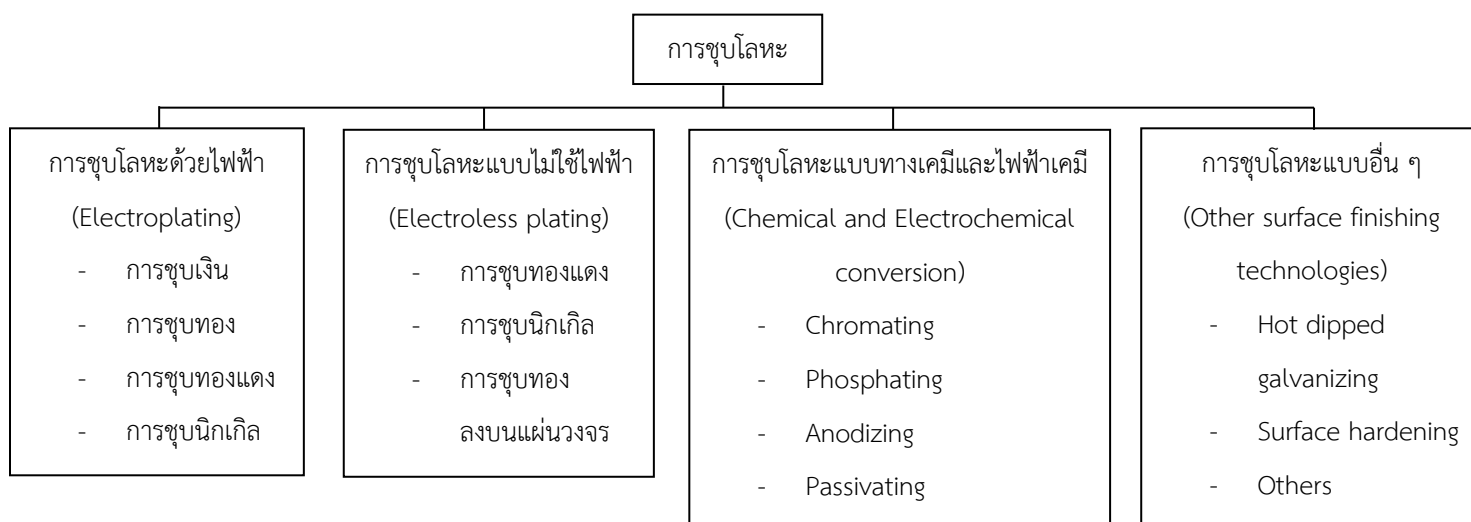
4. การชุบโลหะอื่น ๆ (Other surface finishing technologies) คือ กระบวนการชุบโลหะที่ไม่จัดอยู่ใน 3 กลุ่มข้างต้น ได้แก่

4.1 การชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน (Hot dipped galvanizing) คือ กระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน เพื่อเคลือบผิวเหล็กหรือเหล็กกล้าให้มีความแข็งแรงและทนต่อการผุกร่อน

4.2 Surface hardening คือ กระบวนการทางด้านวัสดุโลหะ เพื่อเพิ่มความแข็ง (Hardness) ความทนทาน (Durability) และความทนทานการสึกกร่อน (Wear resistance)

4.3 การชุบโลหะอื่น ๆ เช่น

- Cladding เป็นการปรับปรุงผิวโลหะเพื่อป้องกันสนิมด้วยการปกคลุมโลหะด้วยโลหะอีกชนิดหนึ่งด้วยแรงกล เช่น การอัดบีบ (Pressing) การรีดดึง (Extruding) ภายใต้ความดันสูง เช่น การผลิตเหรียญกษาปณ์ แผงอะลูมิเนียมประดับอาคาร เป็นต้น
- Vapor deposition คือ การทำให้สารกลายเป็นไอ หรือมีสถานะเป็นก๊าซ แล้วเกิดการกลั่นตัวหรือเกิดปฏิกิริยาบนผิววัตถุ เพื่อปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ให้ดีขึ้น เช่น สมบัติทางกล ไฟฟ้า ความร้อน สะท้อนแสง ป้องกันสนิม และต้านทานการสึกกร่อน
- Vacuum coating คือ การเคลือบผิววัตถุในสภาพสุญญากาศ หรือมีความกดอากาศน้อย ทำให้ผิวเคลือบมีความบริสุทธิ์และไม่มีสารเจือปน ส่วนมากใช้ในอุตสาหกรรมผลิตอัญมณี ฟิล์มโลหะหรือฟิล์มนำไฟฟ้า ฟิล์มนำไฟฟ้าชนิดโปร่งใส แผงป้องกันผ้าที่ระจก และฟิล์มป้องกันไฟฟ้าสถิตย์ที่จอภาพ เป็นต้น

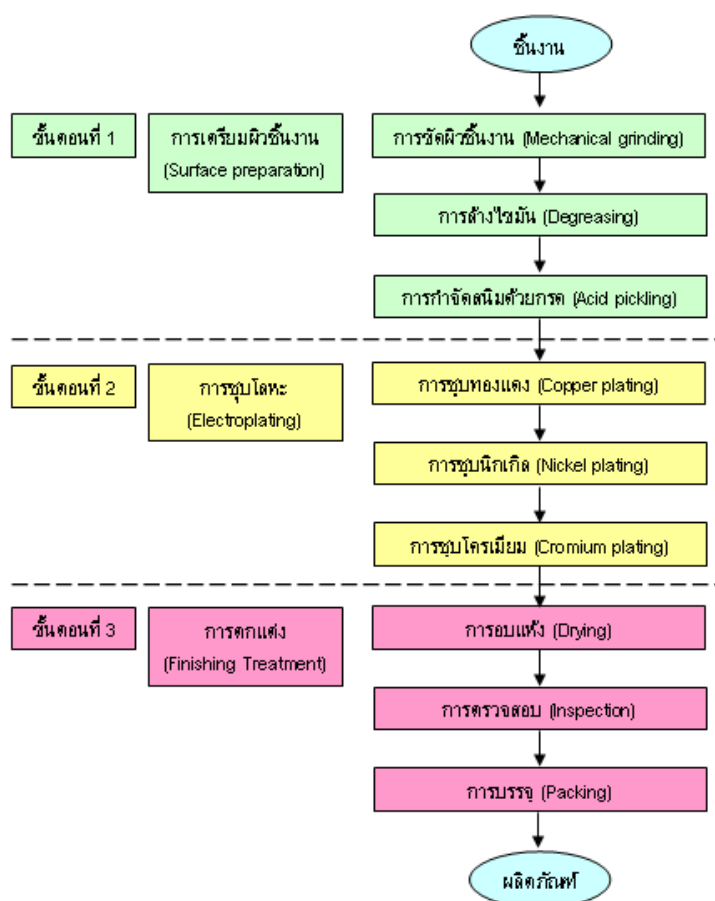


ภาพที่ 2.2 ประเภทของการชุบโลหะ

(ที่มา: <http://www.mrcplating.com/Electroplating-process-with-chemical-change.html>)

2.1.1 กรรมวิธีการชุบทองแดง-นิกเกิล-โครเมียม

การชุบทองแดง นิกเกิล โครเมียม เป็นการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ซึ่งเป็นกระบวนการใช้กระแสไฟฟ้าไปทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีด้วยการลดค่าไอออนโลหะซึ่งมีประจุบวก (Cations) ในน้ำยาชุบ (Electrolytes) แล้วทำให้สารโลหะไปเคลือบหรือยึดเกาะกับชิ้นวัตถุนำไฟฟ้าได้ เกิดแผ่นบางของโลหะหุ้มที่ผิวด้านนอกของวัตถุ ชิ้นงานหรือชิ้นวัตถุจะต่อเข้ากับขั้วลบ (Cathode) ของแบตเตอรี่หรือต่อกับเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าตรง (D.C. Current rectifier) และขั้วบวก (Anode) ที่จุ่มอยู่ในสารละลายของน้ำยาชุบจะทำด้วยโลหะที่ต้องการใช้เป็นโลหะเคลือบผิว เช่น แผ่นทองแดง หรือแผ่นนิกเกิล เมื่อเราผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายของสารอิเล็กโทรไลต์ อนุภาคของสารอิเล็กโทรไลต์จะวิ่งไปยังขั้วบวก (Anode) และอนุภาคอีกพวกหนึ่งของสารอิเล็กโทรไลต์จะวิ่งไปยังขั้วลบ (Cathode) อนุภาคของอิเล็กโทรไลต์ที่วิ่งไปยังขั้วบวก หรือขั้วลบดังกล่าว เรียกว่า ไอออน (Ion) ไอออนแต่ละตัวจะมีประจุไฟฟ้าประจำตัวทุกตัว ไอออนที่วิ่งไปยังขั้วบวกเรียกว่า ไอออนลบ (Anion) จะมีประจุไฟฟ้าลบ (-) ประจำตัว ไอออนที่วิ่งไปยังขั้วลบเรียกว่า ไอออนบวก (Cation) จะมีประจุไฟฟ้าบวก (+) ประจำตัว ซึ่งกระบวนการชุบทองแดง-นิกเกิล-โครเมียม ประกอบด้วยขั้นตอนหลักและขั้นตอนย่อย^[1] ดังรูป



ภาพที่ 2.3 ขั้นตอนการชุบโลหะด้วยทองแดง-นิกเกิล-โครเมียม

(ที่มา: http://www2.diw.go.th/I_Standard/Web/pane_files/Industry26.asp)

2.2 การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการชุบโลหะ

สำหรับการบำบัดน้ำเสีย ระบบการบำบัดที่เหมาะสมที่สุด คือ ระบบบำบัดด้วยวิธีทางเคมี (Chemical treatment) แต่เนื่องจากน้ำเสียจากกระบวนการชุบโลหะมีทั้งปริมาณ และลักษณะสมบัติที่แตกต่างกัน จึงควรแยกสลายน้ำเสียแต่ละประเภทออกจากกันเพื่อแยกกันบำบัดขั้นต้นก่อน เพราะจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงกว่า รวมทั้งจะไม่มีสารเคมีที่ซับซ้อนเกิดขึ้น เช่น นิกเกิลไฮยาไนด์ ซึ่งยากต่อการบำบัด รวมทั้งอาจเกิดก๊าซที่เป็นพิษขึ้นได้ การบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมชุบโลหะ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ทั้งน้ำเสียของโรงงานชุบทองแดง-นิกเกิล-โครเมียม และชุบสังกะสีด้วยวิธีจุ่มร้อน

สำหรับการชุบทองแดง-นิกเกิล-โครเมียม ควรลดวาเลนซ์ของโครเมียมจาก +6 เป็น +3 เนื่องจากโครเมียม +6 จะมีอันตรายมากกว่า โครเมียมวาเลนซ์ +3 มาก จึงควรหาทางลดวาเลนซ์ลง ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น ใช้สารประกอบกำมะถัน ใช้เกลือเหล็กที่มีวาเลนซ์สอง หรือแยกด้วยไฟฟ้า ซึ่งหากใช้เกลือเหล็กจะเกิดตะกอนมากเป็น 4 เท่าทำให้ยากต่อการกำจัดต่อ จึงนิยมใช้สารประกอบกำมะถัน ดังนี้

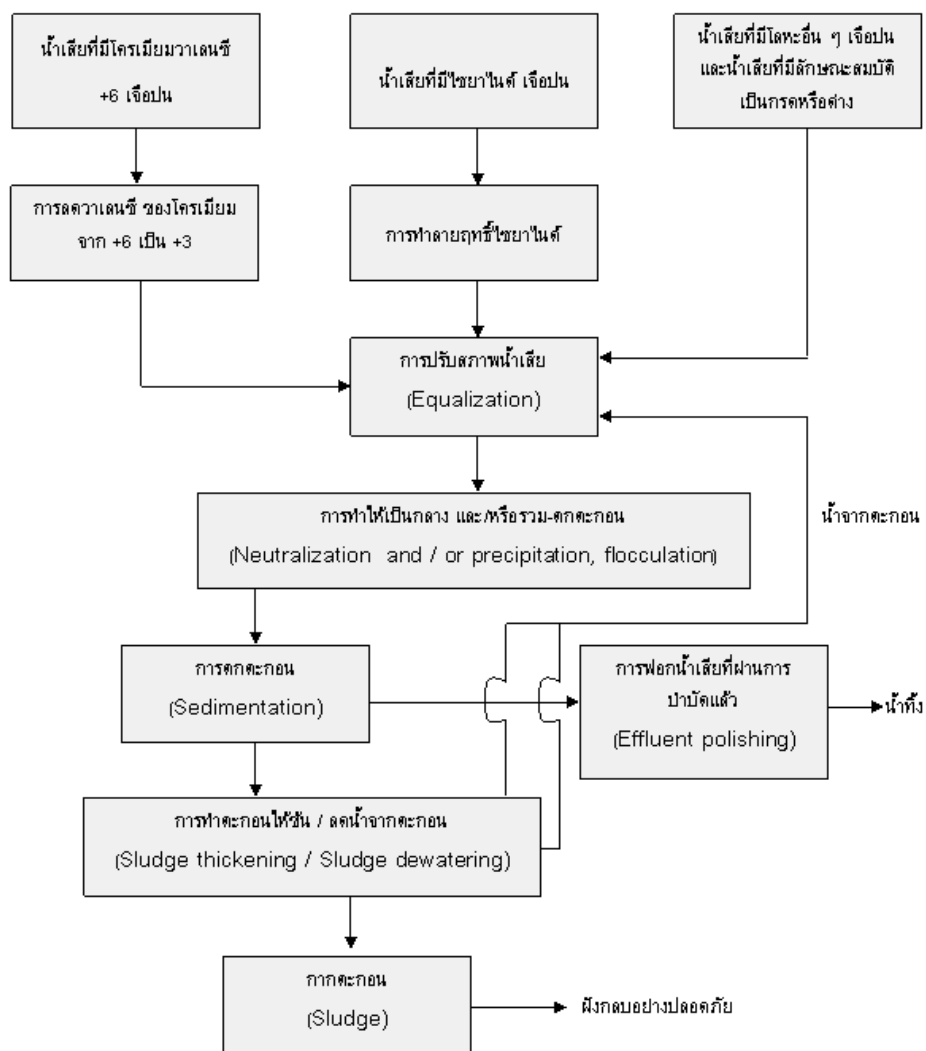
- ในสารละลายกรด (pH 2-2.5) ใช้ NaHSO_3
- ในสารละลายที่เป็นกลางใช้ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$
- ในสารละลายด่าง (pH 8.5-12) ใช้ $\text{Fe}(\text{OH})_2$

สารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาค้ำยันกัน ภายใต้สภาวะที่เป็นกรดที่ช่วงพีเอช (pH) 2-3 ซึ่งสารเหล่านี้จะแตกตัวเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลไฟท์ ซึ่งจะปลดโครเมียม +6 ให้กลายเป็นวาเลนซ์ +3 หลังจากนั้นก็ผ่านน้ำทิ้งที่มีโครเมียมวาเลนซ์ +3 ไปทำให้เกิดตะกอนต่อไป

ส่วนการทำลายฤทธิ์ไฮยาไนด์นั้น เนื่องจากไฮยาไนด์เป็นสารอีกตัวหนึ่งที่มีอันตรายมาก จึงต้องทำลายฤทธิ์ก่อนระบายทิ้ง โดยอาจใช้ก๊าซคลอรีนหรือใช้สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ (NaOCl) 12-15 % ภายใต้สภาวะค่า pH 11.0-11.5 เมื่อเติมคลอรีนหรือเติมสารละลายไฮโปคลอไรท์ จะเกิดคลอรีนไปเปลี่ยนไฮยาไนด์ให้กลายเป็นโซโนเจนคลอไรด์ซึ่งละลายน้ำกลายเป็นไฮยาเนตในเวลา 10-15 นาที หากเราต้องการกำจัดเพียงไฮยาไนด์อย่างเดียว ถึงขั้นนี้ก็สามารถระบายทิ้งได้แล้ว แต่หากจะกำจัดไฮยาเนตต่อก็สามารถทำได้ง่าย ๆ โดยปรับค่า pH คืนไปที่ค่า 7.5-8.0 ด้วยน้ำกรด ไฮยาเนตจะแตกตัวกลายเป็นก๊าซไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากน้ำทิ้ง ในกระบวนการนี้ น้ำด่าง สารละลายสังกะสี หรือแคดเมียมไฮยาไนด์ ก็จะถูกทำลายฤทธิ์ด้วย รวมทั้งทองแดงไฮยาไนด์และนิกเกิลไฮยาไนด์ ที่ต้องใช้เวลาทำปฏิกิริยานานประมาณ 30 นาทีหรือนานกว่านั้น ดังนั้นเพื่อความปลอดภัย ปฏิกิริยาทั้งหมดควรให้เวลานานประมาณ 90 นาที

นอกจากนี้ ยังสามารถทำลายฤทธิ์ไฮยาไนด์ ด้วยออกซิเจน จากสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) หรือใช้โอโซนรวมทั้งใช้การแยกด้วยไฟฟ้าหรือใช้เกลือเหล็ก แต่ตะกอนที่เกิดขึ้นอาจไม่คงรูปจะสามารถละลายออกมาใหม่ได้หากไปฝังบริเวณที่มีสภาพเป็นกรด ส่วนการเผาทำลายไฮยาไนด์ จะได้ก๊าซไนโตรเจนหรือเกลือ

ไนเตรต และสารประกอบคาร์บอน แต่หากเผาที่อุณหภูมิสูงถึง 1200-1400 องศาเซลเซียส จะทำลายไซยาไนด์ได้ทั้งหมด และกลายเป็นก๊าซไนโตรเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์^[1] ดังรูป



ภาพที่ 2.4 การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดง-นิกเกิล-โครเมียม

(ที่มา: http://www2.diw.go.th/l_Standard/Web/pane_files/Industry26.asp)

2.3 กากตะกอนโครเมียมจากน้ำยาชุบโครเมียม

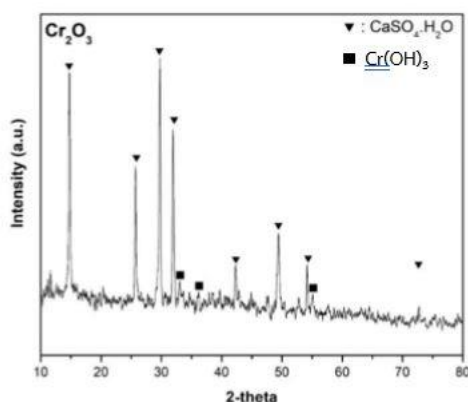
กากตะกอนโครเมียมจากน้ำยาชุบโครเมียมที่ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทสยามฟริท จำกัด มีลักษณะเป็นผงสีเขียว เกะก้านเป็นก้อนใหญ่ ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ลักษณะของกากตะกอนโครเมียมจากน้ำยาชุบโครเมียม

(ที่มา: โครงการส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีรีไซเคิล เพื่อพัฒนาและประยุกต์ใช้วัสดุทดแทนในอุตสาหกรรมเซรามิก)

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของกากตะกอนโครเมียมจากน้ำยาชุบโครเมียมด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) พบว่า กากตะกอนโครเมียมมีเฟสของแคลเซียมซัลเฟต ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) เป็นเฟสหลัก และมีเฟสของโครเมียมไฮดรอกไซด์ $\text{Cr}(\text{OH})_3$ เป็นเฟสรอง ดังรูป



ภาพที่ 2.6 XRD pattern ของกากตะกอนโครเมียมจากน้ำยาชุบโครเมียม

(ที่มา: โครงการส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีรีไซเคิล เพื่อพัฒนาและประยุกต์ใช้วัสดุทดแทนในอุตสาหกรรมเซรามิก
กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2561)

และเมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนโครเมียมจากน้ำยาชุบโครเมียม พบว่า กากตะกอนโครเมียมมีโครเมียมไฮดรอกไซด์ $\text{Cr}(\text{OH})_3$ เป็นองค์ประกอบหลัก และเมื่อคำนวณโดยกำหนดให้โลหะที่เกิดขึ้นในตัวอย่างเป็นออกไซด์ จะได้ว่ามีโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) อยู่ร้อยละ 46.1 รองลงมาเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และซัลเฟต (SO_3) ซึ่งมีอยู่ร้อยละ 23.5 และร้อยละ 22.9 ตามลำดับ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนโครเมียมจากน้ำยาชุบโครเมียม

องค์ประกอบทางเคมีของออกไซด์	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ธาตุ/โลหะ	ปริมาณของแต่ละธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
ZnO	0.038	Zn	0.035
CuO	0.440	Cu	0.405
Cl	0.045	Cl	0.042
Al ₂ O ₃	0.316	Al	0.291
PbO	0.092	Pb	0.084
SO ₃	22.9	S	21.062
SiO ₂	2.35	Si	2.166
CaO	23.5	Ca	21.060
Fe ₂ O ₃	1.80	Fe	1.661
P ₂ O ₅	0.832	P	0.766
Cr ₂ O ₃	46.1	Cr	42.387
MgO	0.827	Mg	0.761
SnO ₂	0.084	Sn	0.077
NiO	0.039	Ni	0.036
Na ₂ O	9.69	Na	8.673

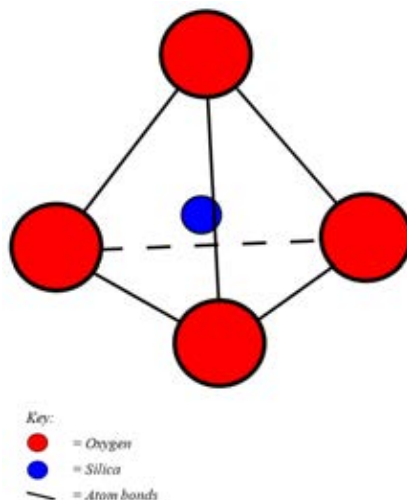
(ที่มา: โครงการส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีรีไซเคิล เพื่อพัฒนาและประยุกต์ใช้วัสดุทดแทนในอุตสาหกรรมเซรามิก)

2.4 เคลือบ

เคลือบ คือ ชั้นบาง ๆ ของแก้วที่ฉาบอยู่บนผิวผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้จากการหลอมสารประกอบซิลิเกต มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน มีความโปร่งใส แข็งแกร่ง ทนต่อกรดและด่างได้เป็นอย่างดี โดยทั่วไปแล้วเคลือบมีสมบัติคล้ายแก้ว คือ มีความแข็ง ไม่ละลายหรือละลายได้น้อยมากในสารละลายเคมี ยกเว้นกรดกัดแก้ว (HF) และด่างแก่ (Strong base) และไม่ยอมให้ของเหลวและก๊าซซึมผ่านได้ แต่เคลือบจะมีส่วนประกอบทางเคมีซับซ้อนกว่าแก้ว เคลือบนี้เกิดจากการหลอมที่อุณหภูมิสูงของวัตถุดิบต่าง ๆ โดยมีซิลิกาหรือซิลิคอนไดออกไซด์เป็นตัวหลักที่ทำให้เกิดเป็นเนื้อแก้ว^[3,4]

2.4.1 โครงสร้างของเคลือบ

โครงสร้างของเคลือบมีลักษณะคล้ายคลึงกับแก้วใส โดยทั่วไปประกอบด้วยหน่วยของซิลิกา ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเคลือบเซรามิก หรือที่เรียกว่า ตัวทำให้เกิดแก้ว (Glass former) โดยหน่วยของซิลิกามีรูปร่างเป็นปิรามิดฐานสามเหลี่ยม (Tetrahedron) ซึ่งมีการจัดเรียงตัวเป็นเครือข่าย (Network) 3 มิติ ที่มามีระเบียบ การเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบของเคลือบเกิดเนื่องจากเคลือบหลอมมีการเย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้หน่วยของซิลิกาไม่มีเวลามากพอในการจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบได้^[4,5]



ภาพที่ 2.7 รูปปิรามิดฐานสามเหลี่ยมของซิลิกา 1 หน่วย

(ที่มา: <https://structuredatabase.wordpress.com/phyllsilicates-in-fault-zones/>)

โดยปกตินั้น ซิลิกาเพียงอย่างเดียวสามารถหลอมกลายเป็นแก้วได้ แต่ต้องหลอมที่อุณหภูมิมากกว่า 1,700 องศาเซลเซียส ซึ่งทำได้ยากในเชิงปฏิบัติ จึงต้องมีการใช้วัตถุดิบอื่น ๆ เพื่อช่วยให้เคลือบสามารถหลอมเป็นแก้วได้ที่อุณหภูมิต่ำลง หรือที่เรียกว่า ตัวช่วยหลอม (Flux) โดยส่วนใหญ่เป็นออกไซด์ของธาตุที่มีอะตอมขนาดใหญ่ ในหมู่แอลคาไลและอัลคาไลเอิร์ท เช่น โซเดียม (Na) ลิเทียม (Li) โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) ซึ่งสามารถแทรกตัวเองในช่องว่างของโครงสร้างของเคลือบได้ ทำให้โครงสร้างของเคลือบโปร่งและอ่อนแอ โครงสร้างที่อ่อนแอจะทำให้จุดหลอมตัวของเคลือบลดลง ความสามารถในการช่วยลดอุณหภูมิหลอมในแก้วของธาตุต่าง ๆ สามารถเรียงลำดับได้ดังนี้

มาก $\text{Li}_2\text{O} > \text{PbO} > \text{Na}_2\text{O} > \text{BaO} > \text{CaO} > \text{SrO} > \text{MgO} > \text{ZnO}$ น้อย

การผสมออกไซด์ของธาตุต่าง ๆ เข้ากันด้วย สามารถทำให้จุดหลอมตัวของเคลือบต่ำลงไปได้อีก เคลือบที่มีโครงสร้างที่อ่อนแอจะมีความทนทานต่อสารเคมีและน้ำ รวมทั้งมีความแข็งแรงเชิงกลต่ำ ดังนั้นเพื่อเพิ่มความทนทานทางกายภาพและทางเคมี จึงจำเป็นต้องเติมออกไซด์ของธาตุอีกประเภทหนึ่งเพื่อปรับสมบัติของเคลือบ นั้น

คือ ตัวช่วยทำให้เกิดแก้ว (Glass co-former) ตัวอย่างคือ อะลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งจะทำหน้าที่ช่วยปิดโครงสร้างในโครงสร้างของเคลือบ และปรับปรุงสมบัติดังกล่าว^[4]

2.5 สีสะท้อน

สีสะท้อนเป็นสีที่ผ่านกระบวนการทำให้อยู่ในรูปของผลึกที่มีโครงสร้างแน่นอน เมื่อนำมาใช้เป็นส่วนผสมในน้ำเคลือบจะให้สีที่ถูกต้องและสม่ำเสมอ ทำให้สะดวกในการใช้งานและควบคุมกระบวนการผลิต^[3]

2.5.1 กระบวนการผลิตผงสีสะท้อน

สีสะท้อนผลิตจากออกไซด์ของธาตุแทรนซิชันต่างๆที่ให้สี เช่น เหล็กออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ โคบอลต์ออกไซด์ และแมงกานีสออกไซด์ นอกจากนั้นยังมีวัตถุดิบอื่นๆที่ใช้ในการผลิตสีสะท้อน เช่น ควอร์ต (SiO_2) ทรายเซอร์คอน (ZrO_2SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) ตะกั่วออกไซด์ (PbO) สังกะสีออกไซด์ (ZnO) หินปูน ($CaCO_3$) และวัตถุดิบอื่น ๆ ^[6]

การผลิตสีสะท้อนเริ่มจากการนำวัตถุดิบที่ใช้ผลิตสีมาซึ่งตามสูตรของที่นักวิจัยหรือผู้ผลิตสีได้ออกแบบสูตรไว้ หลังจากนั้นนำวัตถุดิบต่างๆมาผสมรวมกันมีทั้งแบบผสมแห้งและผสมเปียกโดยใช้ Ball mill หลังจากผสมแล้วก็นำไปใส่ไว้ในจ้อ (Sagger) ในกรณีที่ใช้การผสมแบบเปียกต้องนำออกมาอบให้แห้งก่อนแล้วจึงนำไปใส่ในจ้อ จากนั้นก็นำจ้อไปจัดเรียงบนรถเตา ซึ่งเตาที่ใช้เผามีทั้งการเผาแบบต่อเนื่อง เช่น เตาอุโมงค์ (Tunnel kiln) และเตาที่เผาเป็นครั้งคราว (Shuttle kiln) ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบเริ่มต้นที่นำมาผลิต เนื่องจากมีสีบางประเภทที่ไม่สามารถเผาได้โดยใช้เตาอุโมงค์แต่จำเป็นต้องเผาโดยใช้ Shuttle kiln อย่างเดียว โดยอุณหภูมิในการเผาของการผลิตสีเซรามิกจะอยู่ในช่วง 1150-1300 องศาเซลเซียส นอกจากนั้นการยีนไฟ (Soaking time) ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่จะทำให้สีเหล่านั้นมีสีสันทึ่ถูกต้องไม่ผิดเพี้ยนไปจากสีมาตรฐานเดิม

หลังจากเผาแล้ว สีสะท้อนเหล่านี้จะมีการจับตัวกันเป็นก้อนแข็ง (Agglomeration) จึงต้องนำไปผ่านการบดอีกครั้งด้วย Ball mill เพื่อที่เวลานำไปใช้งานกับสีเคลือบแล้วจะได้ไม่เกิดปัญหาจุดสี หรือเม็ดสีขึ้นในสีเคลือบ และลดเวลาในการบดสีเคลือบลงได้

หลังจากทำการบดแล้วจะทำการถายน้ำสลิสีนี้ลงในถังขนาดใหญ่และเติมสารเคมีที่ช่วยกำจัดเกลือต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างการเผา และเติมน้ำลงไปด้วย จำนวนครั้งในการล้างหรือกำจัดเกลือขึ้นอยู่กับสูตรของสีแต่ละชนิด และเทคนิคของผู้ผลิตสี ซึ่งโดยปกติจะอยู่ที่ 2-5 รอบ เมื่อล้างสีจนมั่นใจว่าได้กำจัดเกลือส่วนเกินที่เป็นสาเหตุทำให้สีเคลือบเกิดรูพรุน หรือการไหลตัวของเคลือบเปลี่ยนไปเรียบร้อยแล้ว ก็นำไปตกตะกอนแยกน้ำออก

และนำสีที่ได้ไปอบแห้งอีกครั้งที่อุณหภูมิไม่สูงมากนักแต่ใช้เวลาในการอบแห้งที่นานขึ้น จากนั้นนำมาบดแห้งและบรรจุถุงเพื่อนำไปจำหน่ายต่อไป^[6]



ภาพที่ 2.8 ตัวอย่างผงสีสะเตนที่สังเคราะห์มาทำเคลือบเซรามิก
(ที่มา: http://www.thaiceramicsociety.com/rm_paint_ceramiccolor.php)

2.5.2 สีสะเตนสำหรับใช้ในเคลือบ

สีสะเตนสำหรับเคลือบนั้นสามารถใช้เป็นสีใต้เคลือบ (Underglaze) สีบนเคลือบสำหรับตกแต่ง (On glaze) และเป็นสีที่ใช้ในเคลือบ (In glaze)

อุณหภูมิและบรรยากาศที่จะใช้งานนั้นขึ้นกับส่วนประกอบของสี รวมทั้งวัตถุดิบที่จะใช้ทำเคลือบจะต้องเหมาะสมกับส่วนประกอบของสีสะเตนที่เราจะเลือกใช้ด้วยเพื่อให้เราสามารถควบคุมคุณภาพของสีเคลือบได้อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งถ้าเราเลือกสีที่ไม่เหมาะสมกับสูตรเคลือบก็จะทำให้สีเพี้ยนไปไม่คงที่หรือจะต้องใช้สีในปริมาณมากขึ้นทำให้ต้นทุนของสีเคลือบสูงขึ้นโดยไม่จำเป็น

สีสะเตนแต่ละสีมีองค์ประกอบของออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบของเคลือบต่างกัน ดังนี้^[6]

2.5.2.1 สีแดง สีเปลือกมังคุด

Sn-Ca-Si-Cr อุณหภูมิที่ใช้งานได้ถึง 1250 องศาเซลเซียส

Sn-Ca-Si-Cr-Pb อุณหภูมิใช้งานได้ถึง 1000 องศาเซลเซียส

สีสะเตนนี้ได้มาจากการนำเอา SnO_2 , CoO และ SiO_2 มาผสมกันโดยเปลี่ยนสัดส่วนของ Cr_2O_3 เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิสูง Cr-ion จะเกิดการแพร่เข้าไปในโครงสร้างของผลึก สามารถนำไปใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง โดยที่ยังคงความเสถียรของสี และควรใช้กับบรรยากาศออกซิเดชัน การใช้สีสะเตนนี้ควรกำจัดจุดเหล็กที่ปนมากับ

วัตถุประสงค์ของเคลือบออกก่อน เพราะจะทำให้เกิดจุดขาวบนผิวเคลือบและเป็นสาเหตุของรูพรุนในเคลือบ สีสะท้อนนี้เหมาะสำหรับใช้กับเคลือบที่มี Pb, Ca และมีปริมาณของ B_2O_3 , MgO, ZnO ต่ำ เพราะออกไซด์ทั้งสามตัวนี้จะทำให้สีสะท้อนมีความเข้มลดลงและไม่เหมาะที่จะใช้เป็นสีของเนื้อดิน

2.5.2.2 สีชมพู

Zr-Si-Fe อุณหภูมิที่ใช้งานได้ถึง 1300 องศาเซลเซียส

วัตถุประสงค์เริ่มต้นคือ เซอร์โคเนียมซิลิเกต ซึ่งจะเป็นตัวให้ ZrO_2 กับ SiO_2 และเติม Fe_2O_3 ลงไปเล็กน้อยเพื่อให้เกิดสีโดยที่ Fe ion จะเข้าไปอยู่ในโครงสร้างผลึกของเซอร์คอน (ZrO_2SiO_2) ควรใช้กับบรรยากาศออกซิเดชัน เป็นสีที่มีความเสถียรดีมาก และใช้ได้กับเคลือบที่ทึบแสงจากเซอร์คอน ถ้าในเคลือบมี ZnO อยู่ในปริมาณสูงก็จะช่วยปรับปรุงสีให้มีความสดขึ้นมีสีออกแดงมากขึ้น แต่ไม่เหมาะกับเคลือบที่มีตะกั่วออกไซด์และพวกอัลคาไลน์ ออกไซด์อยู่ในปริมาณที่สูงและไม่เหมาะจะใช้สำหรับเป็นสีสำหรับเนื้อดิน สีสะท้อนนี้สามารถใช้ผสมกับสีสะท้อนโทนอื่น ๆ ได้ดี โดยเฉพาะตระกูลสีที่เป็นพวกเซอร์โคเนต (Zirconate) เหมือนกัน เช่น สีฟ้า (Turquoise) และสีเหลืองของ Zr-Pr-Si

2.5.2.3 สีส้ม

Ti - Sb - Cr ทนอุณหภูมิได้ถึง 1200 องศาเซลเซียส

สีสะท้อนนี้ได้จากการ calcined TiO_2 , Sb_2O_3 และ Cr_2O_3 ช่วงของเฉดสีมีตั้งแต่สีเหลืองมัสตาดไปจนถึงสีน้ำตาลเข้ม ขึ้นอยู่กับปริมาณของ Cr_2O_3 อุณหภูมิและช่วงเวลาในการ calcined รวมทั้งออกไซด์บางตัวที่เติมเพื่อปรับโทนสี เช่น เติม NiO เข้าไปจะได้สีครีม หรือเติม Fe_2O_3 กับ MnO_2 เข้าไปจะได้สีน้ำตาล สีสะท้อนนี้สามารถใช้ผสมกับสีสะท้อนอื่นๆ เพื่อปรับปรุงเฉดสีโทนใหม่ยกเว้นสีที่มีส่วนผสมของ SnO_2

2.5.2.4 สีส้มและสีเหลือง

Pb - Sb - Fe สีส้มอมน้ำตาล อุณหภูมิที่ใช้งานไม่เกิน 1050 องศาเซลเซียส

Pb - Sb - Sn สีเหลืองสดใส

สีสะท้อนนี้ได้จากการ calcined PbO และ Sb_2O_3 และเติมออกไซด์ตัวอื่น ๆ ลงไปเล็กน้อย เช่น Fe และ Sn เพื่อให้เฉดสีหลากหลายขึ้น สีนี้ต้องใช้กับเคลือบที่มีเปอร์เซ็นต์ PbO และ SnO_2 สูง โดย Sn จะช่วยเป็นตัวทึบแสง (Opacifier) สีสะท้อนนี้เหมาะสำหรับเป็นสีตกแต่งใต้เคลือบและบนเคลือบเท่านั้น ไม่ควรใช้สำหรับเติมในสีเคลือบหรือในเนื้อดิน

2.5.2.5 สีเหลือง

Zr – Si – Pr อุณหภูมิที่ใช้งาน 1300 องศาเซลเซียส

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตสีนี้คือ Zirconium Oxide และ Silica กับ Praseodymium oxide สีสะเตนนี้มี ความเสถียรของสีจนถึงอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้งานเหมาะสำหรับบรรยากาศออกซิเดชัน และใช้ได้กับเคลือบทุกชนิด โดยเฉพาะเคลือบทึบแสงที่มี Zirconium เป็นองค์ประกอบ และสามารถใช้สำหรับเป็น Body stain ได้ด้วย

2.5.2.6 สีเขียว

Cr – Co – Zn – Al อุณหภูมิที่ใช้งานได้ถึง 1280 องศาเซลเซียส

สีสะเตนนี้ได้จากการนำ CoO และ Cr₂O₃ มาเผา (calcine) โดยเติม ZnO และ Al₂O₃ ลงไปเพื่อเป็นตัว ปรับแต่งเฉดสี ซึ่งสีนี้เสถียรได้จนถึงอุณหภูมิสูงสุด และเหมาะสำหรับใช้กับเคลือบที่มีปริมาณของ ZnO และ SnO₂ ต่ำ สามารถใช้เป็น Body stain ได้

2.5.2.7 สีน้ำเงิน

Co – Al

Co - Zn – Al อุณหภูมิที่ใช้งานได้ถึง 1280 องศาเซลเซียส

Co - Al – Si

วัตถุดิบหลักคือ CoO และ Al₂O₃ และมีการเติม ZnO หรือ SiO₂ เพื่อปรับปรุงเฉดสี สีนี้มีความเสถียรดี มาก สามารถใช้ได้กับเคลือบทุกชนิดโดยเฉพาะเคลือบที่มี ZnO และ Al₂O₃ รวมทั้งใช้เป็น Body stain ได้ด้วย สำหรับสีน้ำเงินที่มีส่วนประกอบเป็น Co-Si ใช้ได้ดีกับบรรยากาศแบบรีดักชัน

2.5.2.8 สีฟ้า (Turquoises)

Zr-Si-V อุณหภูมิที่ใช้งานได้ถึง 1300 องศาเซลเซียส

สีสะเตนนี้ได้จากการ calcined ZrO₂ กับ SiO₂ ตามสัดส่วนที่ทำให้เกิด Zircon ผู้ผลิตบางรายจะใช้ Zircon sand มาเผาจนทำให้มีความบริสุทธิ์และละเอียดแล้วจึงเติม V₂O₅ (vanadium pentoxide) ลงไป สีฟ้า ตัวนี้มีความเสถียรของสีดีมากในตลอดทุกอุณหภูมิที่ใช้งานทั้งในบรรยากาศออกซิเดชันและรีดักชัน สามารถใช้ได้ดี กับเคลือบเกือบทุกชนิดโดยเฉพาะเคลือบที่มีปริมาณของตะกั่วต่ำ การเติมเซอร์โคเนียมซิลิเกตลงไปจะช่วยเพิ่ม ความคงตัวของสีฟ้า สีสะเตนนี้สามารถผสมกับสีสะเตนตัวอื่น ๆ ได้โดยเฉพาะสีเหลืองและสีชมพูที่เป็นสีเซอร์โคเนต เหมือนกันซึ่งจะทำให้เกิดโทนสีต่าง ๆ ขึ้นและสามารถใช้เป็นสีสำหรับเนื้อดินได้

2.5.2.9 สีน้ำตาล

Fe-Cr-Si-Zn-Sn

Zr-Fe-Si-Pr อุณหภูมิที่ใช้งานถึง 1250 องศาเซลเซียส

สีน้ำตาลที่มีส่วนประกอบของ Zr-Fe-Si-Pr ได้จากการผสมกันของสีสะเตนสีเหลืองและสีชมพูที่เป็นสีเซอร์โคเนตเหมือนกัน ซึ่งจะให้ความเสถียรของสีได้จนถึงอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้งาน ส่วนสีน้ำตาลที่มีส่วนประกอบของ Fe-Cr-Si-Zn-Sn ได้จากการผสมของ SnO₂, SiO₂ และ ZnO ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง โดยจะมีการเติม Cr₂O₃ และ Fe₂O₃ ลงไปเพื่อปรับแต่งเฉดสี สีชนิดนี้เหมาะสำหรับบรรยากาศออกซิเดชัน

2.5.3 สีเขียว

สะเตนสีเขียวจัดเป็นผงสีเซรามิกประเภท idiochromatic compound หรือสีที่มีองค์ประกอบหลักที่สามารถให้สีเขียวด้วยตัวเอง ไม่จำเป็นต้องเติมธาตุหรือตัวเติมอื่น ๆ เข้าไป โดยองค์ประกอบหลักของสีเขียว คือ แคลเซียมโครเมียมซิลิเกต (Ca₃Cr₂(SiO₄)₃) หรือแร่ยูวาโรไวต์ (Uvarovite) หรือที่รู้จักกันดีว่า โครเมียมการ์เนต (Chromium Garnet) ซึ่งเป็นแร่ที่มีสีเขียว^[7] ดังรูป

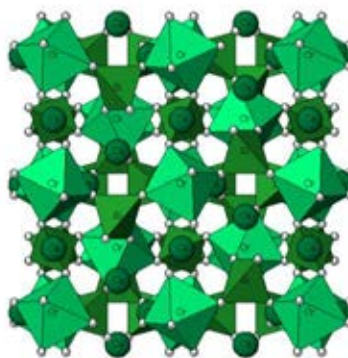


ภาพที่ 2.9 ผลึกแร่ยูวาโรไวต์ (Uvarovite)

(ที่มา: <https://www.gemrockauctions.com/auctions/16260>

-cts-rare-uvarovite-garnet-specimenrussia-mgw3922-397124)

ระบบผลึก (Crystal system) ของแร่ยูวาโรไวต์หรือโครเมียมการ์เนตเป็นแบบคิวบิก (Cubic) ซึ่งมีจุดหลอมเหลวประมาณ 1800 องศาเซลเซียส และเป็นแร่ที่มีโครงสร้างผลึก (Crystal structure) ได้หลายรูปแบบ ยกตัวอย่างเช่น โดเดคาฮีดรอน (Dodecahedron) ทราพีโซฮีดรอน (Trapezohedron) เฮกโซออกทาฮีดรอน (Hexoctahedron) สمانแน่นแบบมวลเม็ดหยาบ และเป็นเกรนฝังในหิน เป็นต้น^[7,8]



ภาพที่ 2.10 โครงสร้างผลึกระบบคิวบิกของแร่ยูวาโรไวต์ (Uvarovite)

(ที่มา: <https://staff.aist.go.jp/nomura-k/common/STRUCIMAGES/Uvarovite.gif>)

สูตรผสมของสีเขียวทางการค้ามีวัตถุดิบหลัก คือ โครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ดังแสดงในตารางที่ 2.2 (ยกเว้น สูตรอ้างอิง no.73) ทั้งนี้ออกไซด์ของโลหะตัวอื่น ๆ ในส่วนผสมสีเซรามิก เช่น อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ เป็นสารที่ทำได้ทั่วไปและสามารถใช้วัตถุดิบเซรามิกปกติอย่างดินทดแทนได้

ตารางที่ 2.2 สูตรสีเซรามิกที่มีส่วนประกอบออกไซด์ทางการค้าของสีเขียว

วัตถุดิบ (%wt.)	สีเขียว No.23	สีเขียว No.48	สีเขียว No.49	สีเขียว No.73
อุณหภูมิเผา	(1257-1271 °C)	(1207-1243 °C)	(1207-1243 °C)	(1271-1280 °C)
Cr_2O_3	30.0	66.7	50.6	5.6
ZnO	10.0	-	13.6	-
$\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	40.0	-	25.9	-
CoCO_2	-	-	9.9	-
CoO	20.0	-	-	27
ดินขาว	-	33.3	-	67.4

(ที่มา: GLAZE AND STAIN (ค.ศ.1959))

2.6 เอกสารที่เกี่ยวข้อง

F. Andreola และคณะ^[9] ได้ศึกษาการเตรียมผงสีเซรามิกสีชมพู $\text{CaCr}_{0.04}\text{Sn}_{0.97}\text{SiO}_5$ และสีเขียว $\text{Ca}_3\text{Cr}_2(\text{SiO}_4)_3$ จากโครเมียมประจุ +3 ที่อยู่ในรูปของกากตะกอนกัลวานิกที่ได้จากกระบวนการชุบโครเมียมในอุตสาหกรรมโลหะหนัก สังเคราะห์โดยใช้ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid-state reactions) และใช้กากตะกอนโครเมียมเป็นสารตั้งต้นของโครเมียมออกไซด์ การแยกกากตะกอนโครเมียมนั้นทำได้ 2 วิธีคือ

- กระบวนการที่หนึ่ง สำหรับโครเมียมประจุ +6 จะถูกทำให้อยู่ในรูปของกลุ่มประจุ +3 คือ โครเมียมซัลเฟต ($\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$) ซึ่งมีความเสถียรมากกว่า โดยใช้สารเคมีจำพวกซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHSO_3) โซเดียมเมแทไบซัลไฟต์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) หรือ แคลเซียมเมแทไบซัลไฟต์ (CaS_2O_5) ที่มีค่า pH 2-3 เช่น



- กระบวนการที่สอง สำหรับโครเมียมประจุ+3 ทำการตกตะกอนเพื่อสลายความเป็นพิษให้อยู่ในรูปของ $\text{Cr}(\text{OH})_3$ โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่มีค่า pH 8 หรือมากกว่า เช่น



ในการทดลองได้นำกากตะกอนกัลวานิก อบแห้งที่ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปผสมกับซิลิคอนไดออกไซด์ แคลเซียมคาร์บอเนต บอแรกซ์ โซเดียมคลอไรด์และโครเมียมออกไซด์ (≥ 98 wt%) สำหรับสีเขียวและสำหรับสีชมพู ได้แก่ ซิลิคอนไดออกไซด์ แคลเซียมคาร์บอเนต ไพโรลูไลต์ ลิเทียมเมแทบอเรต และโครเมียมออกไซด์ (≥ 98 wt%) ลงในถ้วยเผาปิด จากนั้นนำไปเผาแคลไซน์ 3 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส สำหรับสีเขียว และ 1000 องศาเซลเซียส สำหรับสีชมพู แล้วนำไปบดเปียกเป็นเวลา 20 นาที และนำไปอบแห้ง

M.A. Abreu และ S.M. Toffoli^[10] ได้ศึกษาการวิเคราะห์กากของเสียที่มีโครเมียมในปริมาณสูงที่ได้จากอุตสาหกรรมฟอกหนังและการนำมาใช้ในทางเซรามิก โดยเริ่มต้นนำกากตะกอนที่ได้จากอุตสาหกรรมฟอกหนังมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนกว่าจะได้น้ำหนักที่คงที่ หลังจากนั้นนำมาทดสอบด้วย X-ray fluorescence (XRF), Total organic carbon content (TOC), Differential scanning calorimetry (DSC) และ X-ray diffraction (XRD) ผลที่ได้คือ จากการวิเคราะห์ XRF พบว่ามี Cr_2O_3 21.8% ในการวิเคราะห์ทางเคมีแสดงไอออนพวกคลอรีนและซัลเฟอร์ แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการพบโซเดียมคลอไรด์และเกลือโซเดียมหรือแคลเซียมซัลเฟต สำหรับการวิเคราะห์ TOC พบ 6% ของ organic carbon, 3.7% ของซัลเฟอร์และ 1.1% ของไนโตรเจน จากการทดลองนี้จะสรุปได้ว่า ในการทดลองมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องกำจัด organic matter ที่จะทำให้เกิดการก่อตัวของโครเมียมไอออน ฉะนั้นขั้นตอนในการล้างกากตะกอนจึงเป็นสิ่งที่สำคัญมากเพื่อที่จะ

ขจัดเกลือที่ไม่ต้องการออกไปซึ่งจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดตำหนิในเคลือบ หรืออย่างน้อยการเป็นการช่วยลดการเกิดออกซิเดชันของโครเมียมไอออน กากของเสียที่ผ่านล้างและการเผามาแล้วนั้นจะส่งผลดีต่อสูตรเคลือบกระเบื้องเซรามิกและความเสถียรของโครเมียมในน้ำแก้ว

T. Thongkanluang และคณะ^[11] ได้ศึกษาการเตรียมสารให้สีเขียวที่มีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสูง และนำมาใช้ในการเคลือบลงบนวัสดุเพื่อใช้ในการดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ ในการทดลองได้นำผงโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และวานาเดียมออกไซด์ (V_2O_5) ผสมและเผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส อัตราความร้อน 4 องศาเซลเซียสต่อนาที จากนั้นนำมาบด 7 นาที และอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง อย่างไรก็ตาม ผลการวิจัยได้เลือกใช้วัสดุติบออกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์ค่อนข้างสูงเพื่อให้ได้เฉดสีและสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้า ซึ่งมีราคาแพงมากจึงไม่เหมาะสมกับการผลิตในระดับอุตสาหกรรมหรือเชิงพาณิชย์

S. Areepipatkul และ T. Phuengphol^[12] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมสีสะเตนจากกากอุตสาหกรรมการชุบเคลือบผิวด้วยโลหะทางไฟฟ้า โดยนำกากอุตสาหกรรมประเภท Ni-Cr ซึ่งกากประเภทนี้ประกอบด้วยเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) มาเตรียมเป็นสีสะเตนที่มีสีน้ำตาลและสีเขียว โดยทำการผสมกันระหว่างกากอุตสาหกรรม (ที่ซึ่งถูกแทนด้วย N waste ประกอบด้วย Chromium ในปริมาณสูง และ O waste ประกอบด้วย Nickel ปริมาณสูง) กับ Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ในส่วนสัดส่วนต่างๆกันทั้งหมด 4 ชุด ดังนี้ ชุดที่ 1 มี Al_2O_3 : O waste เป็น 20.29 : 100 ชุดที่ 2 มี Fe_2O_3 : N waste เป็น 31.83 : 100 ชุดที่ 3 มี Al_2O_3 : O waste เป็น 15.04 : 100 และชุดที่ 4 มี Fe_2O_3 : N waste เป็น 23.58 : 100 จากนั้นนำแต่ละชุดไปบดด้วย high-speed ball mill แล้วนำไปเข้าเตาอบเพื่อให้ได้ลักษณะที่เป็นผง แล้วนำมา calcined ที่อุณหภูมิ 6 อุณหภูมิ ได้แก่ 1000 1050 1100 1150 1200 และ 1250 องศาเซลเซียส หลังจากเผาแคลไซน์แล้วพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 1000 องศาเซลเซียส นำผงสีที่ได้นั้นมาผสมเข้ากับสูตรเคลือบ โดยผสม 2 สูตรต่อ 1 ชุด (สูตร 1 คือ สีสะเตน 5% สูตรที่ 2 คือ สีสะเตน 10%) บดผสมเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ทุกสูตรแล้วทำการวิเคราะห์สีของเคลือบจากผล XRD พบว่า สีของผลิตภัณฑ์เคลือบดูเหมือนจะคล้ายกับที่คาดการณ์ในตอนเริ่มต้นยกเว้นชุดที่ 1 ที่เป็นสีน้ำตาล ซึ่งอาจเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีของ ZnO และ Cr_2O_3 ในระหว่างการเผา ซึ่งจะทำให้ความเป็นพิษลดลงสู่สถานะที่ไม่เป็นอันตรายหลังจากการเผาเสร็จสิ้น เนื่องจากในระหว่างการเผาจะเกิดปฏิกิริยาระหว่าง Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ซึ่งจะทำให้เกิดโครงสร้างของ spinel ที่เสถียรและไม่เป็นพิษ สรุปได้ว่ากากอุตสาหกรรมจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้ในการทดลองผลิตเคลือบเซรามิกนั้นประสบความสำเร็จซึ่งสามารถนำมาตรวจสอบโดย XRD สีที่ได้อาจไม่เป็นไปตามที่คาดการณ์เล็กน้อยเนื่องจากมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลอ่อนซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาระหว่าง ZnO และ Cr_2O_3 สรุปได้ว่าเคลือบที่ทำจากกากอุตสาหกรรมเหล่านี้มีคุณภาพใกล้เคียงกัน

Mihail Doynov และคณะ^[13] ได้ศึกษาการเตรียมผงสีเซรามิกจากกากอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมันที่มีองค์ประกอบหลัก คือ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) เหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) และโครเมียมออกไซด์ (Cr₂O₃) โดยนำกากไปบดแห้งแล้วบดเปียกให้อนุภาคมีขนาดเล็กละเอียด แล้วนำไปผสมกับกรดไนตริกและกรดซัลฟิวริกในอัตราส่วน 1:1 แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และผ่านกระบวนการ homogenization ให้อนุภาครวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำไปเผา sinter ที่อุณหภูมิ 800 900 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM พบว่า ผงเซรามิกที่เผาที่ต่ำกว่า 900 องศาเซลเซียสมีลักษณะกลมใหญ่ ส่วนผงเซรามิกที่เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส มีลักษณะกลมและมีรอยแตก เนื่องจากมีน้ำระเหยออกมามากและเกิดรูพรุนภายในโครงสร้างของอนุภาค สรุปได้ว่าการเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1000 องศาเซลเซียสได้ผงเซรามิกที่มีลักษณะที่ดีกว่า %porosity น้อยกว่าเผาที่อุณหภูมิสูง งานวิจัยนี้ถือว่าประสบความสำเร็จและสามารถใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกได้

Umran Tezcan Un และคณะ^[14] ได้ศึกษาเรื่องการบำบัดน้ำเสียที่มีโครเมียมโดยใช้ เทคนิค electrocoagulation และการผลิตสีเซรามิกจากกากตะกอนที่เกิดขึ้น ในการผลิตผงสีเริ่มต้นจากกากตะกอนที่มี Cr₂O₃ และ Al(OH)₃ และ ZnO เพื่อผลิตเป็นผงสีสีน้ำตาล และ Co₃O₄ เพื่อผลิตเป็นผงสีสีดำ โดยเตรียมจากการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยนำไปบดด้วย ball mill 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำการกำจัด agglomerate ออกไปแล้วนำไปผสมกับเคลือบโปรงใส 5 wt% เพื่อนำไปใช้กับกระเบื้องเซรามิก ค่า L*a*b ของผงสีน้ำตาลในเคลือบโปรงใสที่เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นสีน้ำตาลเข้มซึ่งดูได้จากบนผิวเคลือบ เกิดจากการเติมกากตะกอนลงไป ทำให้ค่า dE* เปลี่ยนจาก 2.27 เป็น 9.41 ค่า L*a*b ของผงสีสีดำในเคลือบโปรงใสที่เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ได้เป็นสีดำเข้ม มีค่าเท่ากับ 42.64 / -0.20 / 0.03 การเติมกากตะกอนลงไปไม่ทำให้สีเปลี่ยนไปซึ่งทำให้ค่า dE* ของสีดำเท่ากับในองค์ประกอบของกากตะกอน ดังนั้น การใช้กากตะกอนที่มีเหล็กและโครเมียมเป็นองค์ประกอบสามารถผลิตผงสีที่มีศักยภาพต่อการใช้งานได้

Griselda X. Gayo และ A.E. Lavat^[15] ได้ศึกษาการเตรียมผงสีเซรามิกจากกากอุตสาหกรรมการชุบเคลือบผิวด้วยโลหะ โดยนำกากของเสียที่ประกอบด้วยโครเมียมออกไซด์ (Cr₂O₃) มาเตรียมเป็นผงเซรามิกสีเขียว โดยนำกากอุตสาหกรรมไปผ่านกระบวนการชะล้างเพื่อกำจัดเกลือที่ละลายน้ำ เช่น โซเดียมซัลเฟต (Na₂SO₄) แล้วให้ความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดไฮดรอกไซด์และสารอินทรีย์ต่าง ๆ แล้วนำ Cr₂O₃ ที่ได้ไปบดผสมในสูตรเคลือบทั้งหมด 3 สูตร ดังนี้ สูตรที่ 1: Frit A ซึ่ง PbO เป็นองค์ประกอบ 30% สูตรที่ 2:Frit C ซึ่งมี SiO₂ เป็นองค์ประกอบสูงและไม่มี PbO เป็นองค์ประกอบ และสูตรที่ 3: Micronized glaze ซึ่งเป็นสูตรที่มี SiO₂ เป็นองค์ประกอบสูง ไม่มี PbO เป็นองค์ประกอบและผ่านตะแกรงคัดขนาด 325 เมช จากนั้นนำไปบดผสม

แบบเปียก แล้วนำไปเข้าเตาอบให้ได้ลักษณะที่เป็นผง แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ยืนไฟ 15 นาที แล้ววัดค่าสีด้วย colorimeter พบว่า เคลือบสูตรที่ 3 ให้สีที่เขียวมากที่สุด รองลงมาคือ สูตรที่ 2 และสูตรที่ 1 ตามลำดับ และเมื่อเทียบกับสีทางการค้า พบว่า สีที่ได้จากกากอุตสาหกรรมจะเข้มกว่าสีทางการค้า

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 วัตถุดิบและสารเคมี

- 1) ชิ้นงานกระเบื้องสำเร็จรูปเนื้อดิน stoneware (บริษัท ไทยอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา จำกัด)
- 2) กากตะกอนโครเมียมจากน้ำยาชุบโครเมียม (รับมาจากบริษัท สยามพริท จำกัด)
- 3) เคลือบสำเร็จรูป 222 (บริษัท คอมพาวด์เคลย์ จำกัด)
- 4) สีทางการค้า สีเขียวแก่ (AP-016) (บริษัท อัมรินทร์เซรามิกส์คอร์ปอเรชั่น จำกัด)
- 5) สีทางการค้า สีเขียวโครม (ST-4000) (บริษัท อัมรินทร์เซรามิกส์คอร์ปอเรชั่น จำกัด)
- 6) โครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) เกรดอุตสาหกรรม
- 7) โคบอลต์ออกไซด์ (CoO) เกรดอุตสาหกรรม
- 8) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) เกรดอุตสาหกรรม
- 9) โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) เกรดอุตสาหกรรม
- 10) หินปูน (CaCO_3)
- 11) ซิลิกา (SiO_2)
- 12) Pentasodium triphosphate, STPP ($\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$)
- 13) Carboxy Methyl Cellulose, CMC
- 14) น้ำ
- 15) น้ำ Reverse Osmosis, RO

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบ

- 1) ปีกเกอร์ 500 ml.
- 2) เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง
- 3) แท่งแก้วคนสาร
- 4) เครื่องผสมสาร magnetic stirrer
- 5) Magnetic bar

- 6) ชุดกรองสาร vacuum
- 7) กระจกครอบ
- 8) ถาด
- 9) เตาดอบ
- 10) หม้ออบดปอร์ซเลน
- 11) เครื่องวัดความเร็วสูง
- 12) ตะแกรงขนาด 325 เมช
- 13) เตาดเผาไฟฟ้า
- 14) Crucible
- 15) Vibratory Mill
- 16) ตะแกรงขนาด 100 เมช
- 17) เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)
- 18) เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)
- 19) เครื่อง Color Meter Analyzer
- 20) เครื่อง Differential Thermal Analysis (DTA)

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การล้างกากตะกอนโครเมียมจากน้ำยาชุบโครเมียม

3.3.1.1 นำกากตะกอนโครเมียมจากน้ำยาชุบโครเมียมไปทำการอบแห้ง

3.3.1.2 ใช้กากตะกอนโครเมียมหลังอบแห้งปริมาณ 100 กรัม ปั่นละลายในน้ำ RO ปริมาณ 200 มิลลิลิตร และเติมโซเดียมคาร์บอเนตปริมาณร้อยละ 26.5 โดยน้ำหนักของกากตะกอนโครเมียม โดยในการปั่นผสม จะให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (อาจใช้แท่งแก้วคนสารช่วยคนด้วย)

3.3.1.3 กรองกากตะกอนของโครเมียมดังแสดงในภาพที่ 3.1 แล้วนำไปอบแห้ง

3.3.1.4 ทำซ้ำอีก 1-2 รอบ



ภาพที่ 3.1 การกรองกากตะกอนโครเมียมจากน้ำยาชุบโครเมียมหลังการล้าง

3.2.2 การผสมสูตรสีเซรามิก

3.2.2.1 นำตะกอนโครเมียมที่ได้หลังการอบแห้งปริมาณ 100 กรัม มาผสมกับแคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณ 71.95 กรัม และซิลิคอนไดออกไซด์ปริมาณ 65.30 กรัม หรืออัตราส่วนโดยโมล กากตะกอนโครเมียม:SiO₂:CaCO₃ เท่ากับ 1:1:1 ซึ่งในการทดลองจะใช้เป็นสูตร Prelim เพื่อปรับสีในตรงตามต้องการ (ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิคอนไดออกไซด์เปลี่ยนแปลงไปตามสูตรดังแสดงตารางที่ 3.1) นำมาบดแบบแห้งด้วยเครื่องบดความเร็วสูง

3.2.2.2 นำมาร้อนแบบแห้งผ่านตะแกรงเบอร์ 325 เมช เพื่อให้ได้ผงสีที่มีขนาดอนุภาค 44 ไมครอน แล้วนำผงที่ผ่านตะแกรงไปเผา

3.2.2.3 นำไปเผาที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้เป็นผงสีเขียว

3.2.2.4 นำมาบดใน vibratory mill เพื่อให้ได้เป็นผงละเอียดและนำมาร้อนแบบแห้งผ่านตะแกรงเบอร์ 325 เมช

ตารางที่ 3.1 ตารางส่วนผสมในสีเซรามิกโดยใช้กากอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบทดแทน

สูตร	วัตถุดิบ		
	กากตะกอนโครเมียม (กรัม)	CaCO ₃ (กรัม)	SiO ₂ (กรัม)
Prelim	100	71.95	65.30
PF 1	100	57.56 (0.8 โมล)	65.30
PF 2	100	43.17 (0.6 โมล)	65.30
PF 3	100	28.78 (0.4 โมล)	65.30

3.3.3 การเตรียมเคลือบที่มีส่วนผสมของโครเมียมออกไซด์โดยใช้กากอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบทดแทน

3.3.3.1 ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการใช้กากของเสียจากอุตสาหกรรม และคำนวณสูตร Segar จากวัตถุดิบทดแทนที่นำมาใช้

3.3.3.2 เตรียมวัตถุดิบของเคลือบโดยใช้กากอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบทดแทนและอุปกรณ์ จากนั้นผสมสูตรเคลือบดังแสดงตารางที่ 3.2

3.3.3.3 เตรียมน้ำเคลือบโดยนำวัตถุดิบผสมด้วยวิธีบดเปียก โดยใช้หม้ออบดปอร์ซเลน หลังจากนั้นกรองน้ำเคลือบผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช เพื่อกรองวัตถุดิบที่บดไม่ละเอียดออกและปรับความถ่วงจำเพาะ นำกระเบื้องสำเร็จรูปมาทำความสะอาด โดยการนำมาเช็ดด้วยฟองน้ำที่ชุบน้ำหมาด จากนั้นนำมาชุบเคลือบเป็นเวลา 10 วินาที แล้วนำชิ้นงานกระเบื้องสำเร็จรูปที่ชุบเคลือบแล้วไปเผาในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ใช้ Heating Rate 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และเย็นไฟเป็นเวลา 30 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.2 ตารางสูตรเคลือบ

สูตร	เคลือบ 222 (กรัม)	STPP (กรัม)	CMC (กรัม)	น้ำ (กรัม)	ผงสีเซรามิกจากกาก อุตสาหกรรม (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CoO (%)
PF 1	100	0.1	0.2	60	5	-	-	-
PF 2	100	0.1	0.2	60	5	-	-	-
PF 3	100	0.1	0.2	60	5	-	-	-
A	100	0.1	0.2	60	5	0.1	-	-
B	100	0.1	0.2	60	5	0.2	-	-
A 1	100	0.1	0.2	60	5	0.1	0.05	-
A 2	100	0.1	0.2	60	5	0.1	0.10	-
A 3	100	0.1	0.2	60	5	0.1	0.15	-
A 4	100	0.1	0.2	60	5	0.1	-	0.05
A 5	100	0.1	0.2	60	5	0.1	-	0.10
A 6	100	0.1	0.2	60	5	0.1	-	0.15

3.3.4 การศึกษาสมบัติของเคลือบ

3.3.4.1 การศึกษาสมบัติของวัตถุเคลือบ

- ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี โดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)
- ศึกษาองค์ประกอบทางเฟส โดยใช้เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)
- ศึกษาสมบัติทางความร้อน โดยใช้เครื่อง Differential Thermal Analysis (DTA)

3.3.4.2 การศึกษาสมบัติของเนื้อเคลือบ

- ศึกษาสีของเนื้อเคลือบ โดยใช้เครื่อง Color Meter Analyzer และคำนวณหาค่า ΔE

$$\text{จากสูตร } \Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2}$$

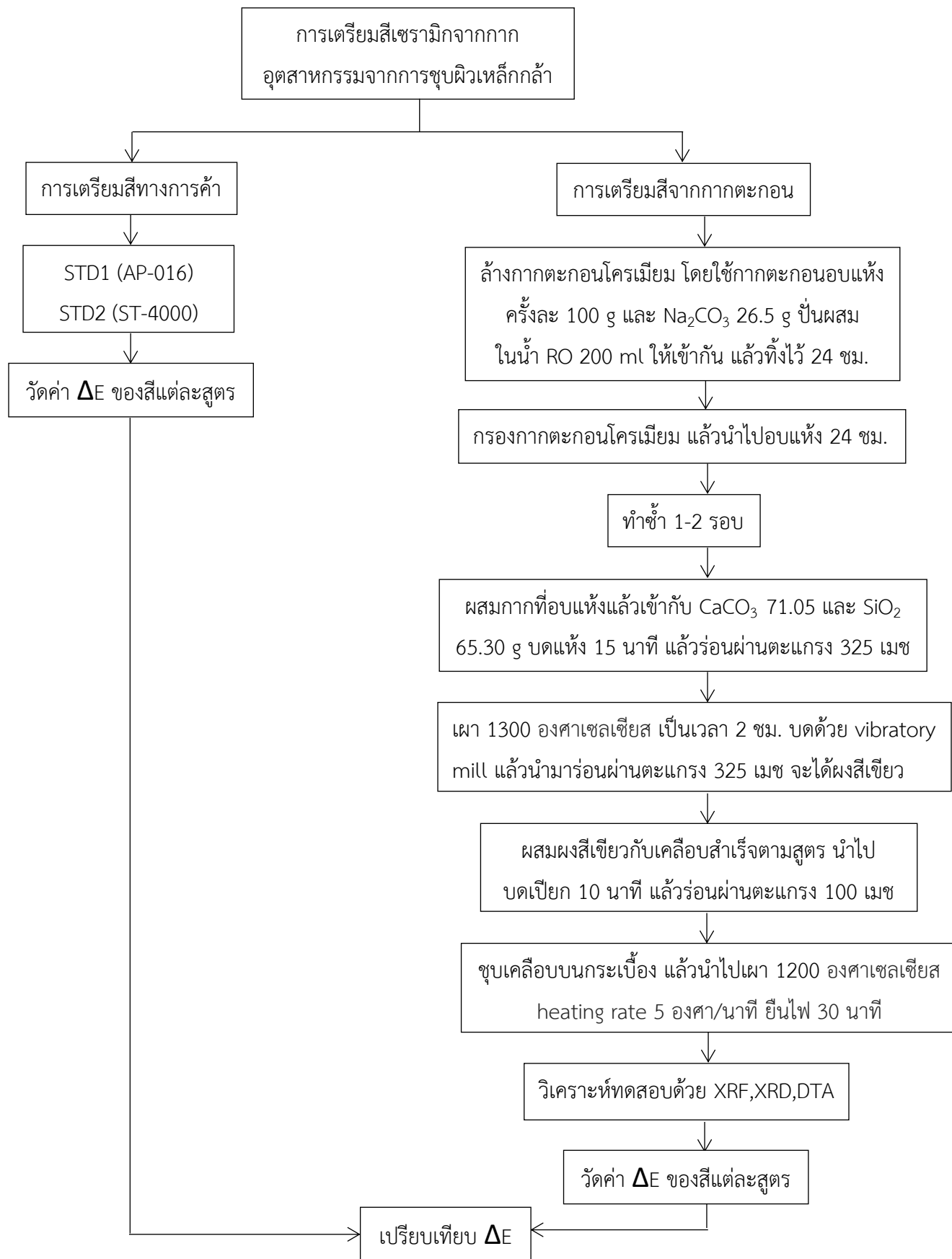
โดยที่ L^* คือ ค่าความสว่าง (Lightness) มีค่าอยู่ระหว่าง 0-100

ค่า a^* ที่เป็นบวก สีจะไปในในทางสีแดง

ค่า a^* ที่เป็นลบ สีจะไปในในทางสีเขียว

ค่า b^* ที่เป็นบวก สีจะไปในในทางสีเหลือง

ค่า b^* ที่เป็นลบ สีจะไปในในทางสีน้ำเงิน



ภาพที่ 3.2 แผนผังขั้นตอนการทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทที่ 4 จะกล่าวถึงผลการทดลองจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนโครเมียมจากน้ำยาชุบโครเมียมด้วยเทคนิค XRF การวิเคราะห์องค์ประกอบของเฟสที่ปรากฏในเคลือบด้วยเทคนิค XRD การทดสอบความถ่วงจำเพาะของเคลือบ การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาเคมีตามอุณหภูมิด้วยเทคนิค DTA และการวัดค่าสีด้วย Color Meter Analyzer

4.1 ผลการศึกษาลักษณะของกากตะกอนโครเมียมจากน้ำยาชุบโครเมียม

4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

กากตะกอนโครเมียมจากน้ำยาชุบโครเมียมที่ได้รับความอนุเคราะห์จากโรงงานสยามพริต มีลักษณะเป็นผงสีเขียว เกาะกันเป็นก้อนใหญ่ ๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.5 เมื่อนำมาผ่านกระบวนการล้างด้วยโซเดียมคาร์บอเนต 1 ครั้งและ 2 ครั้ง แล้วส่งผลให้กากตะกอนโครเมียมจากน้ำยาชุบโครเมียมมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนโครเมียมจากน้ำยาชุบโครเมียมหลังจากผ่านกระบวนการล้าง 1 ครั้ง และ 2 ครั้ง พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของออกไซด์ของกากตะกอนโครเมียมหลังล้าง 1 ครั้ง และ 2 ครั้ง มี Cr_2O_3 เป็นองค์ประกอบหลัก และมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกากตะกอนโครเมียมก่อนล้าง ซึ่งพบว่าหลังล้าง 1 ครั้งมีปริมาณ Cr_2O_3 อยู่ร้อยละ 52.2 โดยน้ำหนักและหลังล้าง 2 ครั้งมีปริมาณ Cr_2O_3 อยู่ร้อยละ 53.3 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังพบว่าสารประกอบจำพวกซัลเฟตมีปริมาณลดลงค่อนข้างมาก โดยเหลืออยู่เพียงร้อยละ 7.02 โดยน้ำหนักหลังจากการล้าง 2 ครั้งดังแสดงในตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของออกไซด์ของกากตะกอนโครเมียมก่อนและหลังผ่านกระบวนการล้าง 1 ครั้ง และ 2 ครั้ง

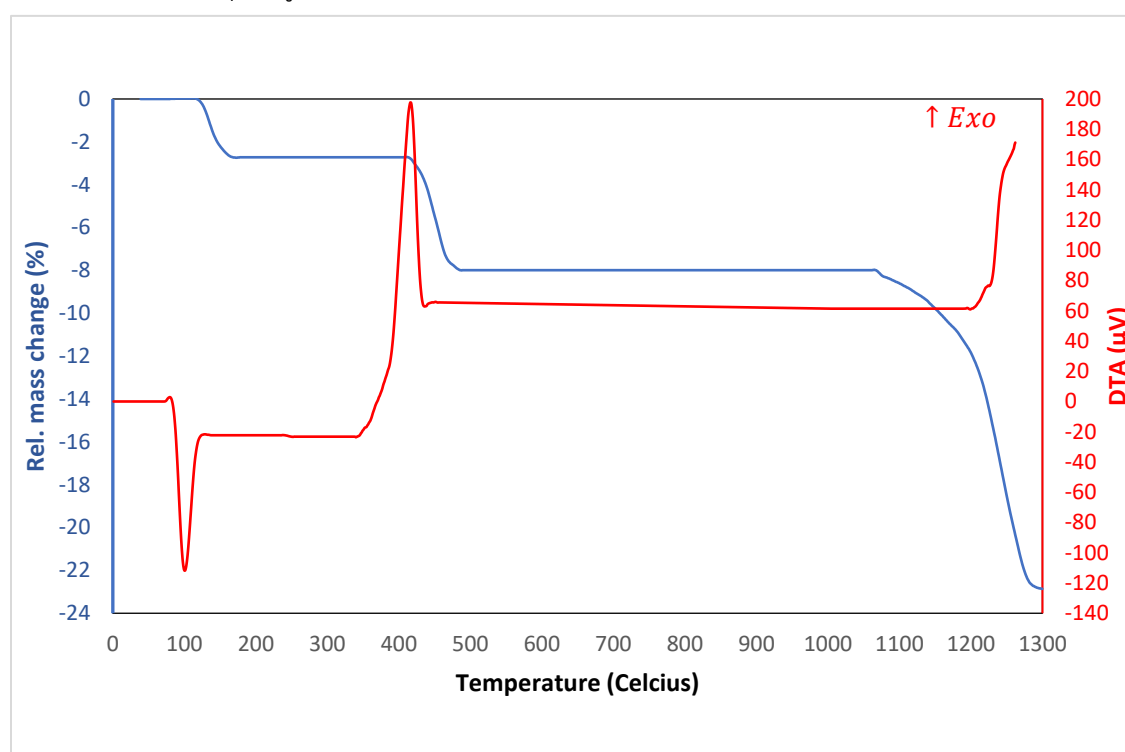
องค์ประกอบทางเคมีของออกไซด์	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	กากตะกอนสด	กากตะกอนหลังล้าง 1 ครั้ง	กากตะกอนหลังล้าง 2 ครั้ง
ZnO	0.038	0.033	0.039
CuO	0.440	0.563	0.549
Cl	0.045	0.030	0.034
Al ₂ O ₃	0.316	0.336	0.560
PbO	0.092	0.106	0.114
SO ₃	22.9	8.86	7.02
SiO ₂	2.35	2.54	2.63
CaO	23.5	25.0	21.3
Fe ₂ O ₃	1.80	2.07	2.16
P ₂ O ₅	0.832	0.860	0.886
Cr ₂ O ₃	46.1	52.2	53.3
MgO	0.827	0.899	0.932
SnO ₂	0.084	0.102	0.122
NiO	0.039	0.042	0.047

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของธาตุ/โลหะของกากตะกอนโครเมียมก่อนและหลังผ่านกระบวนการล้าง 1 ครั้งและ 2 ครั้ง

ธาตุ/โลหะ	ปริมาณของแต่ละธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	กากตะกอนสด	กากตะกอนหลังล้าง 1 ครั้ง	กากตะกอนหลังล้าง 2 ครั้ง
Zn	0.035	0.029	0.035
Cu	0.405	0.499	0.492
Cl	0.042	0.027	0.030
Al	0.291	0.297	0.501
Pb	0.084	0.094	0.102
S	21.062	7.857	6.283
Si	2.166	2.252	2.357
Ca	21.060	22.193	19.082
Fe	1.661	1.832	1.933
P	0.766	0.763	0.793
Cr	42.387	46.260	47.731
Mg	0.761	0.761	0.835
Sn	0.077	0.090	0.109
Ni	0.036	0.037	0.042

4.1.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาเคมีตามอุณหภูมิ

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาตามอุณหภูมิของกากตะกอนโครเมียม พบว่า ตั้งแต่อุณหภูมิ 50-200 องศาเซลเซียส เป็นปฏิกิริยาการดูดความร้อน และมีการสูญเสียน้ำหนัก 2.74% เนื่องจากความชื้นระเหยออกไปและมีการสูญเสียน้ำในโครงสร้างเนื่องจากกระบวนการ dehydration ในกากตะกอน และที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นปฏิกิริยาการคายความร้อน เนื่องจากเกิดการตกผลึกของแคลเซียมซิลเฟตและสูญเสียน้ำหนัก 5.26 % เนื่องจากกระบวนการ dehydroxylation และเกิดการสูญเสียน้ำหนัก 14.78% ที่อุณหภูมิ 1050-1300 องศาเซลเซียส รวมถึงเกิดการตกผลึกของโครเมียมออกไซด์ในรูปของสารประกอบแคลเซียมโครเมียมซิลิเกต ($\text{Ca}_3\text{Cr}_2(\text{SiO}_4)_3$) ที่อุณหภูมิมากกว่า 1200 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 4.1

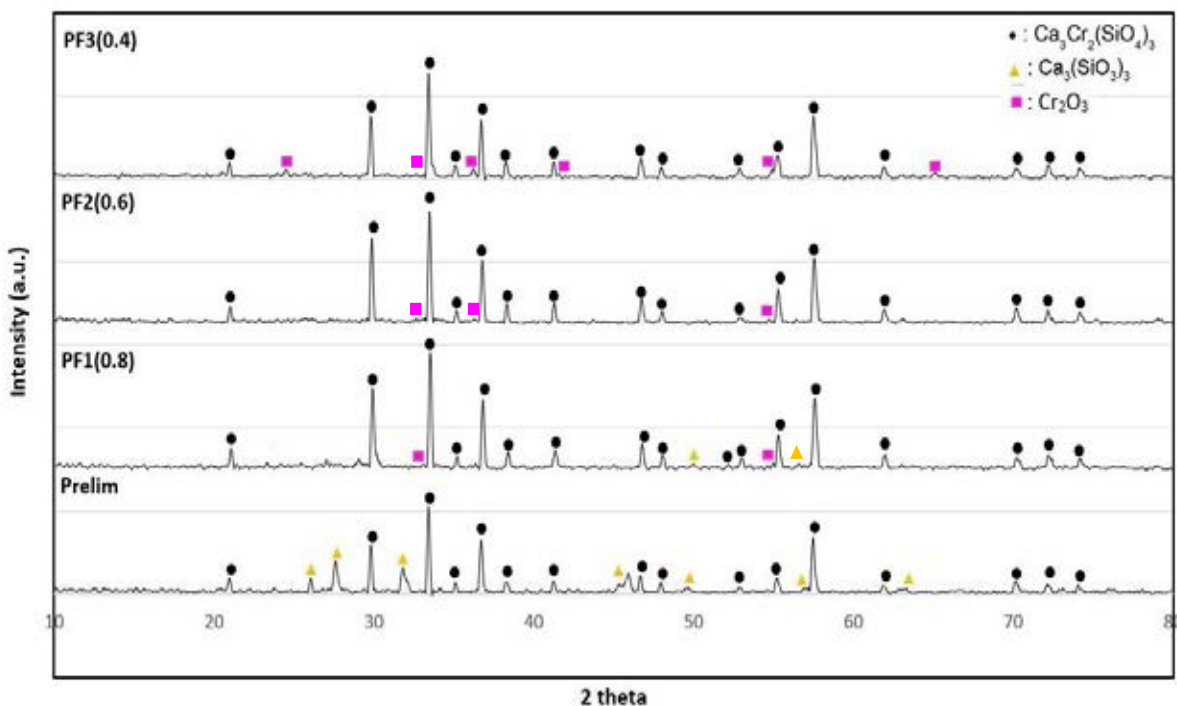


ภาพที่ 4.1 ผลวิเคราะห์ DTA ของกากตะกอนโครเมียมจากน้ำยาชุบโครเมียม

4.2 ผลการศึกษาลักษณะของผงเซรามิกสีเขียว

4.2.1 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบเฟส

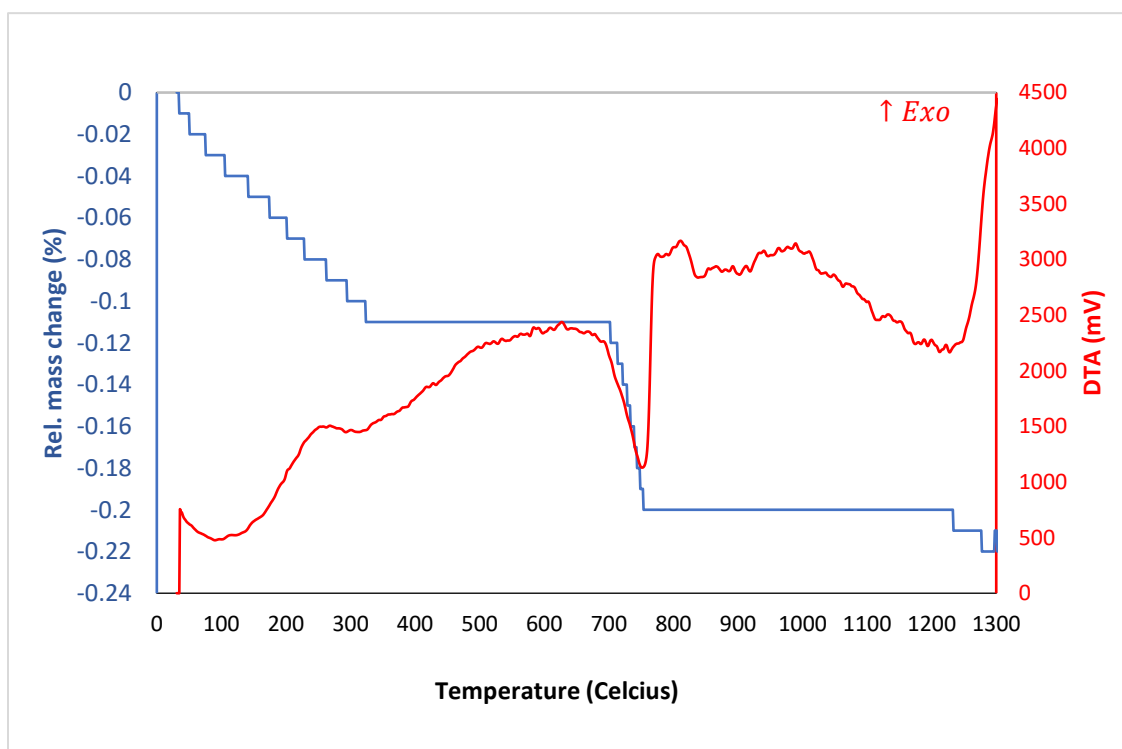
ผงเซรามิกสีเขียวแต่ละสูตรมีองค์ประกอบเฟสที่ต่างกัน จากการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบเฟสของผงเซรามิกสีเขียว พบว่า ผงเซรามิกสีเขียวสูตร Prelim มีเฟส $\text{Ca}_3\text{Cr}_2(\text{SiO}_4)_3$ เป็นเฟสหลัก และมีเฟส $\text{Ca}_3(\text{SiO}_3)_3$ เป็นเฟสรอง เมื่อลดปริมาณ CaCO_3 ลงเหลือ 0.8 โมลเป็นสูตร PF1 พบว่ามีเฟส $\text{Ca}_3\text{Cr}_2(\text{SiO}_4)_3$ เป็นเฟสหลัก $\text{Ca}_3(\text{SiO}_3)_3$ เป็นเฟสรอง และปรากฏเฟส Cr_2O_3 เพิ่มมาเล็กน้อย เมื่อลดปริมาณ CaCO_3 ลงเหลือ 0.6 โมลเป็นสูตร PF2 พบว่ามีเฟส $\text{Ca}_3\text{Cr}_2(\text{SiO}_4)_3$ เป็นเฟสหลักและมีเฟส Cr_2O_3 เป็นเฟสรอง และเมื่อลดปริมาณ CaCO_3 ลงเหลือ 0.4 โมลเป็นสูตร PF3 พบว่ายังคงมีเฟส $\text{Ca}_3\text{Cr}_2(\text{SiO}_4)_3$ เป็นเฟสหลัก และมีเฟส Cr_2O_3 เป็นเฟสรองและยังมีปริมาณมากกว่าในทุก ๆ สูตร ดังแสดงในภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 กราฟ XRD เปรียบเทียบองค์ประกอบเฟสผงเซรามิกสีเขียวสูตรต่าง ๆ

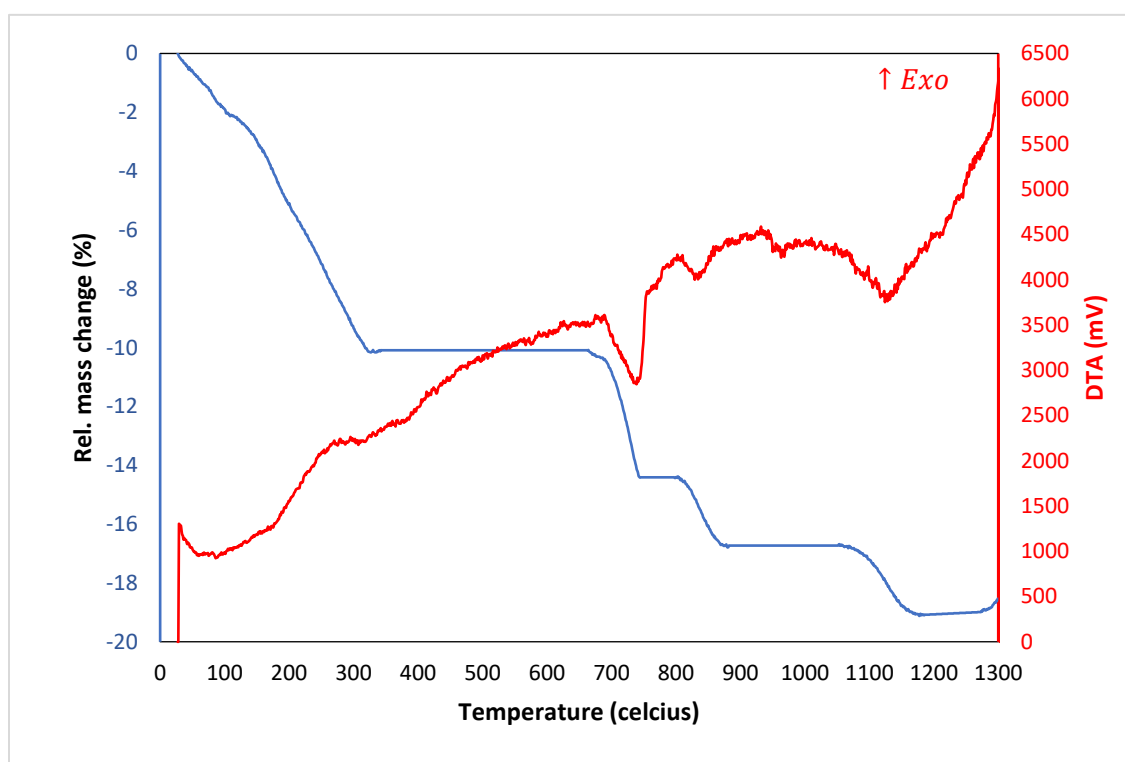
4.2.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาเคมีตามอุณหภูมิ

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาตามอุณหภูมิของส่วนผสมสีเซรามิกในสูตร Prelim พบว่าที่อุณหภูมิ 50-350 องศาเซลเซียส เกิดการสูญเสียน้ำหนัก 0.11% เนื่องจากความชื้นระเหยออกไปและมีการสูญเสียน้ำในโครงสร้างเนื่องจากกระบวนการ dehydration ในส่วนผสมสีเซรามิก และที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นปฏิกิริยาการดูดความร้อน และมีการสูญเสียน้ำหนัก 0.09% เนื่องจากกระบวนการ dehydroxylation และที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส มีการสูญเสียน้ำหนัก 0.01% เนื่องจากการสลายตัวของสารประกอบคาร์บอเนต รวมถึงเกิดการตกผลึกของโครเมียมออกไซด์ในรูปของสารประกอบแคลเซียมโครเมียมซิลิเกต ($\text{Ca}_3\text{Cr}_2\text{SiO}_4$) ที่อุณหภูมิมากกว่า 1200 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 ผลวิเคราะห์ DTA ของผงเซรามิกสีเขียวสูตร Prelim

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาตามอุณหภูมิของส่วนผสมซีรามิกในสูตร PF3 (0.4%mol CaCO_3) พบว่า ตั้งแต่อุณหภูมิ 50-350 องศาเซลเซียส เกิดการสูญเสียน้ำหนัก 10.13% เนื่องจากความชื้นระเหยออกไปและมีการสูญเสียน้ำในโครงสร้างเนื่องจากกระบวนการ dehydration ในส่วนผสมซีรามิก และที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นปฏิกิริยาการดูดความร้อน และมีการสูญเสียน้ำหนัก 4.32% เนื่องจากกระบวนการ dehydroxylation และที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส มีการสูญเสียน้ำหนัก 2.36% เนื่องจากการสลายตัวของสารประกอบคาร์บอเนต รวมถึงเกิดตกผลึกของโครเมียมออกไซด์ในรูปของสารประกอบแคลเซียมโครเมียมซิลิเกต ($\text{Ca}_3\text{Cr}_2\text{SiO}_4$) ที่อุณหภูมิมากกว่า 1200 องศาเซลเซียสเล็กน้อย ดังแสดงในภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 ผลวิเคราะห์ DTA ของผงซีรามิกสีเขียวสูตร PF3

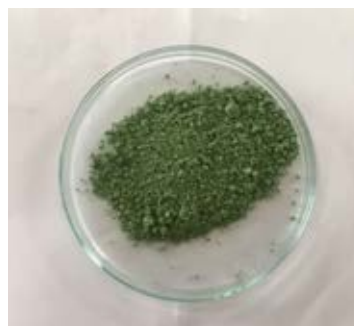
จากผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาตามอุณหภูมิของผงซีรามิกสีเขียวสูตร Prelim (ภาพที่ 4.3) และสูตร PF3 (ภาพที่ 4.4) ที่ลดปริมาณ CaCO_3 ลงเหลือ 0.8 โมล พบว่า สูตร PF3 สูญเสียน้ำหนักโดยรวมมากกว่าสูตร Prelim เนื่องจากน้ำและสารประกอบคาร์บอเนตในโครงสร้างถูกกำจัดออกไปจำนวนมาก การสลายตัวของสารประกอบคาร์บอเนตของผงสีเขียวสูตร PF3 รวมถึงการตกผลึกของโครเมียมออกไซด์ในรูปของสารประกอบแคลเซียมโครเมียมซิลิเกต ($\text{Ca}_3\text{Cr}_2\text{SiO}_4$) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าสูตร Prelim ดังนั้น การเตรียมผงซีรามิกสีเขียวตามสูตร PF3 จึงเหมาะสมและช่วยประหยัดพลังงานมากกว่าสูตร Prelim

4.2.3 การเปรียบเทียบผงเซรามิกสีเขียว

จากการเปรียบเทียบผงเซรามิกสีเขียวที่มีอัตราส่วนผสมของกากตะกอนโครเมียม : ซิลิกา : แคลเซียมคาร์บอเนต เป็น 1:1:0.4 (สูตร PF3), 1:1:0.6 (สูตร PF2), 1:1:0.8 (สูตร PF1) และ 1:1:1 (สูตร Prelim) พบว่าผงเซรามิกสูตร PF3 มีเนื้อละเอียดและให้สีเขียวที่เข้มกว่าผงเซรามิกตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.5



(ก) ผงสีเซรามิกสูตร Prelim



(ข) ผงสีเซรามิกสูตร PF1



(ค) ผงสีเซรามิกสูตร PF2



(ง) ผงสีเซรามิกสูตร PF3

ภาพที่ 4.5 ผงเซรามิกสูตร Prelim, PF1, PF2 และ PF3

4.3 ผลการศึกษาของสีเคลือบจากกากตะกอนโครเมียมกับสีเคลือบทางการค้า

4.3.1 เปรียบเทียบสีเคลือบของสูตร Prelim กับสีเคลือบทางการค้า 5%

จากการวิเคราะห์ค่าโทนสีของสูตรสีเคลือบด้วยเครื่อง Color Meter Analyzer ในระบบ CIE L*a*b และคำนวณค่า ΔE เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของสีเคลือบทั้ง 3 สูตร พบว่า สูตร Prelim ให้สีเขียวที่ใกล้เคียงกับสีเคลือบทางการค้าสูตร STD2 ST-4000 มากกว่าสีเคลือบทางการค้าสูตร STD1 AP-106 ซึ่งมีค่า ΔE เท่ากับ 19.59 ดังนั้น จึงเลือกสีเคลือบทางการค้า STD2 ST-4000 เป็นสูตรมาตรฐานในการเปรียบเทียบสีเคลือบต่อไป ดังแสดงในภาพที่ 4.6 และตารางที่ 4.3



(ก) สีเคลือบสูตร STD1 AP-106



(ข) สีเคลือบสูตร STD2 ST-4000



(ค) สีเคลือบสูตร Prelim

ภาพที่ 4.6 สีเคลือบจากกากตะกอนโครเมียมสูตร Prelim เทียบกับสีเคลือบทางการค้า

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าโทนสีของสูตรสีเคลือบทางการค้าและสีเคลือบสูตร Prelim

สูตรสีเคลือบ	L	a*	b*	ΔE (เมื่อเทียบกับ STD1 AP-016)	ΔE (เมื่อเทียบกับ STD2 ST-4000)
STD1 AP-016	46.79	-11.71	4.14	-	-
STD2 ST-4000	55.92	-2.32	14.56	-	-
Prelim	73.56	-10.78	15.57	29.12	19.59

4.3.2 เปรียบเทียบสีเคลือบของสูตร Prelim, PF1, PF2 และ PF3 กับสีเคลือบทางการค้าสูตร STD2 ST-4000

จากการวิเคราะห์ค่าโทนสีของสูตรสีเคลือบด้วยเครื่อง Color Meter Analyzer ในระบบ CIE L*a*b และคำนวณหาค่า ΔE เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของสีเคลือบสูตร Prelim, PF1, PF2 และ PF3 เทียบกับสูตรทางการค้า STD2 ST-4000 พบว่า สีเคลือบสูตร PF3 ให้สีเขียวที่ใกล้เคียงกับสูตรทางการค้า STD2 ST-4000 มากกว่าสีเคลือบสูตร PF2, PF1 และ Prelim ซึ่งมีค่า ΔE เท่ากับ 8.62, 11.39, 14.05 และ 19.59 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.7 และตารางที่ 4.4



(ก) สีเคลือบสูตร STD2 ST-4000



(ข) สีเคลือบสูตร Prelim



(ค) สีเคลือบสูตร PF1



(ง) สีเคลือบสูตร PF2



(จ) สีเคลือบสูตร PF3

ภาพที่ 4.7 สีเคลือบสูตร Prelim, PF1, PF2 และ PF3 เทียบกับสีเคลือบทางการค้าสูตร STD2 ST-4000

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าโทนสีของสูตรสีเคลือบทางการค้า STD2 ST-4000 และสีเคลือบสูตร Prelim, PF1, PF2 และ PF3

สูตรสีเคลือบ	L	a*	b*	ΔE
STD2 ST-4000	55.92	-2.32	14.56	-
Prelim	73.56	-10.78	15.57	19.59
PF1	68.71	-7.93	16.13	14.05
PF2	66.25	-7.00	15.64	11.39
PF3	63.48	-6.45	14.90	8.62

4.3.3 เปรียบเทียบสีเคลือบของสูตรสีเคลือบที่เติม Cr_2O_3 0.1-0.2% กับสูตรสีเคลือบทางการค้าสูตร STD2 ST-4000

จากการวิเคราะห์ค่าโทนสีของสูตรสีเคลือบด้วยเครื่อง Color Meter Analyzer ในระบบ CIE L^*a^*b และคำนวณค่า ΔE เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของสีเคลือบสูตร A และ B เทียบกับสูตรทางการค้า STD2 ST-4000 พบว่า สีเคลือบสูตร A ให้สีเขียวที่ใกล้เคียงกับสูตรทางการค้า STD2 ST-4000 มากกว่าสีเคลือบสูตร B ซึ่งมีค่า ΔE เท่ากับ 6.42 และ 7.50 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.8 และตารางที่ 4.5



(ก) สีเคลือบสูตร STD2 ST-4000



(ข) สีเคลือบสูตร A



(ค) สีเคลือบสูตร B

ภาพที่ 4.8 สีเคลือบสูตร A และ B เทียบกับสีเคลือบทางการค้าสูตร STD2 ST-4000

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าโทนสีของสูตรสีเคลือบทางการค้า STD2 ST-4000 และสีเคลือบสูตร A และ B

สูตรสีเคลือบ	L	a*	b*	ΔE
STD2 ST-4000	55.92	-2.32	14.56	-
A	61.20	-5.87	15.44	6.42
B	62.55	-5.49	16.07	7.50

4.3.4 เปรียบเทียบสีเคลือบของสูตรสีเคลือบที่เติม Fe_2O_3 0.05-0.15% กับสีเคลือบทางการค้าสูตร STD2 ST-4000

จากการวิเคราะห์ค่าโทนสีของสูตรสีเคลือบด้วยเครื่อง Color Meter Analyzer ในระบบ CIE L^*a^*b และคำนวณหาค่า ΔE เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของสีเคลือบสูตร A1, A2 และ A3 เทียบกับสูตรทางการค้า STD2 ST-4000 พบว่า สีเคลือบสูตร A1 ให้สีเขียวที่ใกล้เคียงกับสูตรทางการค้า STD2 ST-4000 มากกว่าสีเคลือบสูตร A3 และ A2 ซึ่งมีค่า ΔE เท่ากับ 5.97, 7.18 และ 7.27 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.9 และตารางที่ 4.6



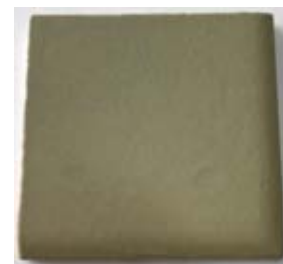
(ก) สีเคลือบสูตร STD2 ST-4000



(ข) สีเคลือบสูตร A1



(ค) สีเคลือบสูตร A2



(ง) สีเคลือบสูตร A3

ภาพที่ 4.9 สีเคลือบสูตร A1, A2 และ A3 เทียบกับสีเคลือบทางการค้าสูตร STD2 ST-4000

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าโทนสีของสูตรสีเคลือบทางการค้า STD2 ST-4000 และสีเคลือบสูตร A1, A2 และ A3

สูตรสีเคลือบ	L	a*	b*	ΔE
STD2 ST-4000	55.92	-2.32	14.56	-
A1	60.96	-4.60	16.81	5.97
A2	61.95	-5.06	17.56	7.27
A3	62.04	-4.23	17.81	7.18

4.3.5 เปรียบเทียบสีเคลือบของสูตรสีเคลือบที่เติม CoO 0.05-0.15% กับสีเคลือบทางการค้าสูตร STD2 ST-4000

จากการวิเคราะห์ค่าโทนสีของสูตรสีเคลือบด้วยเครื่อง Color Meter Analyzer ในระบบ CIE L*a*b และคำนวณค่า ΔE เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของสีเคลือบสูตร A4, A5 และ A6 เทียบกับสูตรทางการค้า STD2 ST-4000 พบว่า สีเคลือบสูตร A4 ให้สีเขียวที่ใกล้เคียงกับสูตรทางการค้า STD2 ST-4000 มากกว่าสีเคลือบสูตร A6 และ A5 ซึ่งมีค่า ΔE เท่ากับ 7.60, 9.37 และ 9.66 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.10 และตารางที่ 4.7



(ก) สีเคลือบสูตร STD2 ST-4000



(ข) สีเคลือบสูตร A4



(ค) สีเคลือบสูตร A5



(ง) สีเคลือบสูตร A6

ภาพที่ 4.10 สีเคลือบสูตร A4, A5 และ A6 เทียบกับสีเคลือบทางการค้าสูตร STD2 ST-4000

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าโทนสีของสูตรสีเคลือบทางการค้า STD2 ST-4000 และสีเคลือบสูตร A4, A5 และ A6

สูตรสีเคลือบ	L	a*	b*	ΔE
STD2 ST-4000	55.92	-2.32	14.56	-
A4	60.37	-8.33	13.19	7.60
A5	61.52	-9.75	11.95	9.66
A6	58.58	-10.35	10.53	9.37

4.3.6 เปรียบเทียบสีเคลือบของสูตรสีเคลือบทางการค้า STD2 ST-4000 กับสูตรสีเคลือบที่มีค่าสีใกล้เคียงกับสูตรสีเคลือบทางการค้า STD2 ST-4000 มากที่สุด

จากการวิเคราะห์ค่าโทนสีของสูตรสีเคลือบด้วยเครื่อง Color Meter Analyzer ในระบบ CIE L*a*b และคำนวณหาค่า ΔE เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของสีเคลือบสูตร A, A1 และ A4 เทียบกับสูตรทางการค้า STD2 ST-4000 พบว่า สีเคลือบสูตร A1 ให้สีเขียวที่ใกล้เคียงกับสูตรทางการค้า STD2 ST-4000 มากกว่าสีเคลือบสูตร A และ A4 ซึ่งมีค่า ΔE เท่ากับ 5.97, 6.42 และ 7.60 ตามลำดับ กล่าวคือ สีเคลือบสูตร A1 ให้สีเขียวที่ใกล้เคียงกับสูตรทางการค้า STD2 ST-4000 มากที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 4.11 และตารางที่ 4.8



(ก) สีเคลือบสูตร STD2 ST-4000



(ข) สีเคลือบสูตร A



(ค) สีเคลือบสูตร A1



(ง) สีเคลือบสูตร A4

ภาพที่ 4.11 สีเคลือบสูตร A, A1 และ A4 เทียบกับสีเคลือบทางการค้าสูตร STD2 ST-4000

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าโทนสีของสูตรสีเคลือบทางการค้า STD2 ST-4000 และสีเคลือบสูตร A, A1 และ A4

สูตรสีเคลือบ	L	a*	b*	ΔE
STD2 ST-4000	55.92	-2.32	14.56	-
A	61.20	-5.87	15.44	6.42
A1	60.96	-4.60	16.81	5.97
A4	60.37	-8.33	13.19	7.60

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาลักษณะผงสีเซรามิกทางการค้าและการเตรียมผงสีเซรามิกจากกากอุตสาหกรรมจากการชุบผิวเหล็กกล้า สามารถสรุปผลการวิจัยได้ ดังนี้

- 5.1 สามารถนำกากตะกอนโครเมียมจากอุตสาหกรรมการชุบผิวเหล็กกล้ามาผลิตผงสีเซรามิกได้
- 5.2 สามารถผลิตผงสีเซรามิกได้ให้มีสีใกล้เคียงกับสีทางการค้าได้
- 5.3 การล้างกากตะกอนโครเมียมส่งผลให้เคลือบมีสีเขียวมากยิ่งขึ้นได้
- 5.4 ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตมีผลต่อเคลือบ โดยเมื่อลดปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตลงส่งผลให้เคลือบมีสีเขียวมากยิ่งขึ้น
- 5.5 การเติมสารประกอบออกไซด์ที่ให้สีส่งผลต่อสีเซรามิกที่ทำจากกากตะกอนโครเมียมและใช้ในเคลือบที่บด ดังนี้
 - การเติมโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) จะช่วยเพิ่มสีเขียวให้กับเคลือบ
 - การเติมเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) จะช่วยเพิ่มความคล้ำให้กับเคลือบ
 - การเติมโคบอลต์ออกไซด์ (CoO) จะช่วยเพิ่มความสดและความเข้ม

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาลักษณะผงสีเซรามิกทางการค้าและการเตรียมผงสีเซรามิกจากกากอุตสาหกรรมจากการชุบผิวเหล็กกล้า มีข้อเสนอแนะในงานวิจัย ดังนี้

- 5.2.1 การเลือกใช้วัตถุดิบเป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตผงสีเซรามิก การเลือกกากอุตสาหกรรมมาเป็นวัตถุดิบทดแทนวัตถุดิบหลักจึงควรต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายด้าน เช่น สมบัติทางความร้อน สมบัติทางเคมี สมบัติทางกล รวมไปถึงที่มาของวัตถุดิบและสารเจือปนที่อาจมีผลต่อการผลิตผงสีเซรามิก
- 5.2.2 การทดสอบองค์ประกอบทางเฟสของผงสีเซรามิก หากตรวจพบความผิดปกติของผลการทดสอบองค์ประกอบทางเฟส ควรทำการทดสอบซ้ำ เนื่องจากมีการกระจายตัวของวัตถุดิบอาจไม่สม่ำเสมอ และการตรวจสอบเป็นการยิงรังสีเอ็กซ์ลงบนพื้นที่ส่วนน้อยและลงไปเพียงชั้นผิวบนของผงสีเซรามิกเท่านั้น

- 5.2.3 การทดสอบพฤติกรรมของวัสดุต่อการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน ควรตรวจสอบค่าการทดสอบ Correction curve ซึ่งกราฟที่ได้ไม่ควรเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ผิดปกติ หากเกิดค่าที่ได้ผิดปกติควรตรวจสอบการทดลองและเครื่องมือก่อนนำไปใช้ในการทำการศึกษาต่อไป

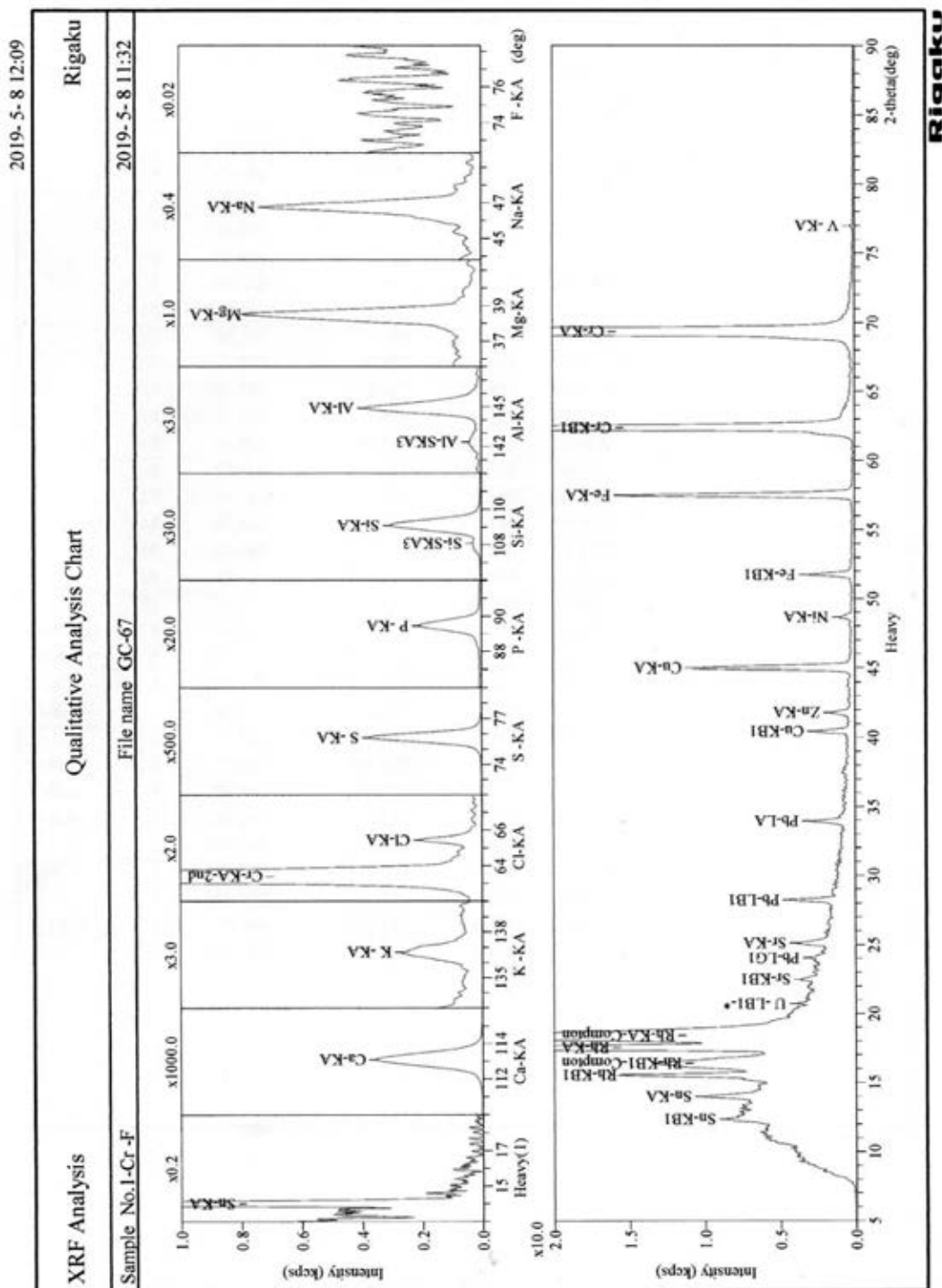
เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (18 พฤษภาคม 2562). การชุบโลหะ. สืบค้นจาก http://www2.diw.go.th/l_Standard/ Web/pane_files/Industry26.asp.
- [2] เอ็มอาร์ซี เจริญเคมีคอล จำกัด. (18 พฤษภาคม 2562). การชุบโลหะ. สืบค้นจาก www.mrcplating.com/Electroplating-process-with-chemical-change.html.
- [3] วรณา ต.แสงจันทร์ และลดา พันธุ์สุขุมธนา. (19 พฤษภาคม 2562). เคลือบเซรามิก. สืบค้นจาก http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss_manual/M008.pdf.
- [4] ภาวิณี เลี้ยวรี. (2547). เอกสารเผยแพร่ทางวิชาการ. ศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องเคลือบดินเผา. ลำปาง: สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมรายสาขา.
- [5] University of Otago, New Zealand. Tetrahedron silica. สืบค้นจาก <http://structuredatabase.wordpress.com/phyllsilicates-in-fault-zones/>.
- [6] คชินท์ สายอินทวงศ์. (19 พฤษภาคม 2562). สีสะเตน. สืบค้นจาก http://www.thaiceramicsociety.com/rm_paint_ceramiccolor.php.
- [7] Michael Dondi, et al. (2003). Innovation in ceramic pigments between new technologies and old chimeras. CNR-ISTEC Faenza, Institute of Science and Technology of Ceramic Materials, Italy.
- [8] Uvarovite. (24 พฤษภาคม 2562). สืบค้นจาก <http://www0.tint.or.th/gems/data/garnet.pdf>.
- [9] F. Andreola and et al. (2007). Synthesis of chromium containing pigments from chromium galvanic sludges. Journal of Hazardous Materials.
- [10] M.A. Abreu and S.M. Toffoli (2009). Characterization of a chromium-rich tannery waste and its potential use in ceramics. Ceramics International. Brazil.
- [11] Thadsanee Thongkanluang, et al. (2010). Preparation and characterization of Cr₂O₃-TiO₂-Al₂O₃-V₂O₅ green pigment. Ceramics International.
- [12] Sawin Areepipatkul and Takdanai Phuengphol. (2013). Preparation of Ceramic Pigment from Ni-Cr Electroplating Industrial Sludge. (Bachelor's thesis). Chulalongkorn University, Bangkok.
- [13] Mihail Doynov and et al. (2016). Alternative technological approach for synthesis of ceramic pigments by waste materials recycling. Ceramica y Vidrio. Bulgaria.

- [14] Umran Tezcan Un and et al. (2017). The treatment of chromium containing wastewater using electrocoagulation and the production of ceramic pigments from the resulting sludge. *Journal of Environmental Management*. Turkey.
- [15] Griselda X. Gayo and Araceli E. Lavat. (2018). Green ceramic pigment based on chromium recovered from a plating waste. *Ceramics International*. Argentina.

ภาคผนวก

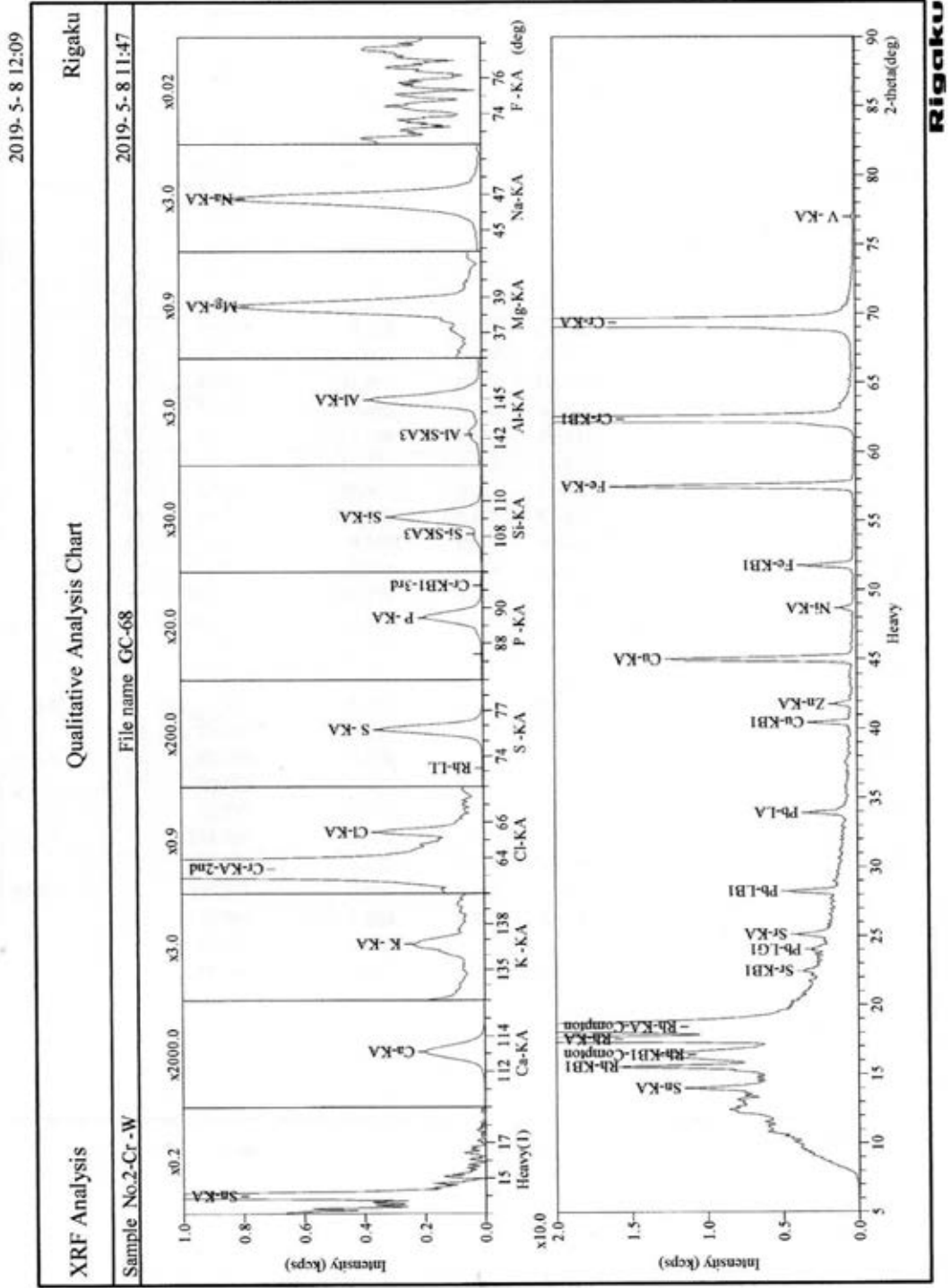
ภาคผนวก ก
องค์ประกอบทางเคมี



ภาพที่ ก.1 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนโครเมียม

ตารางที่ ก.1 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนโครเมียม

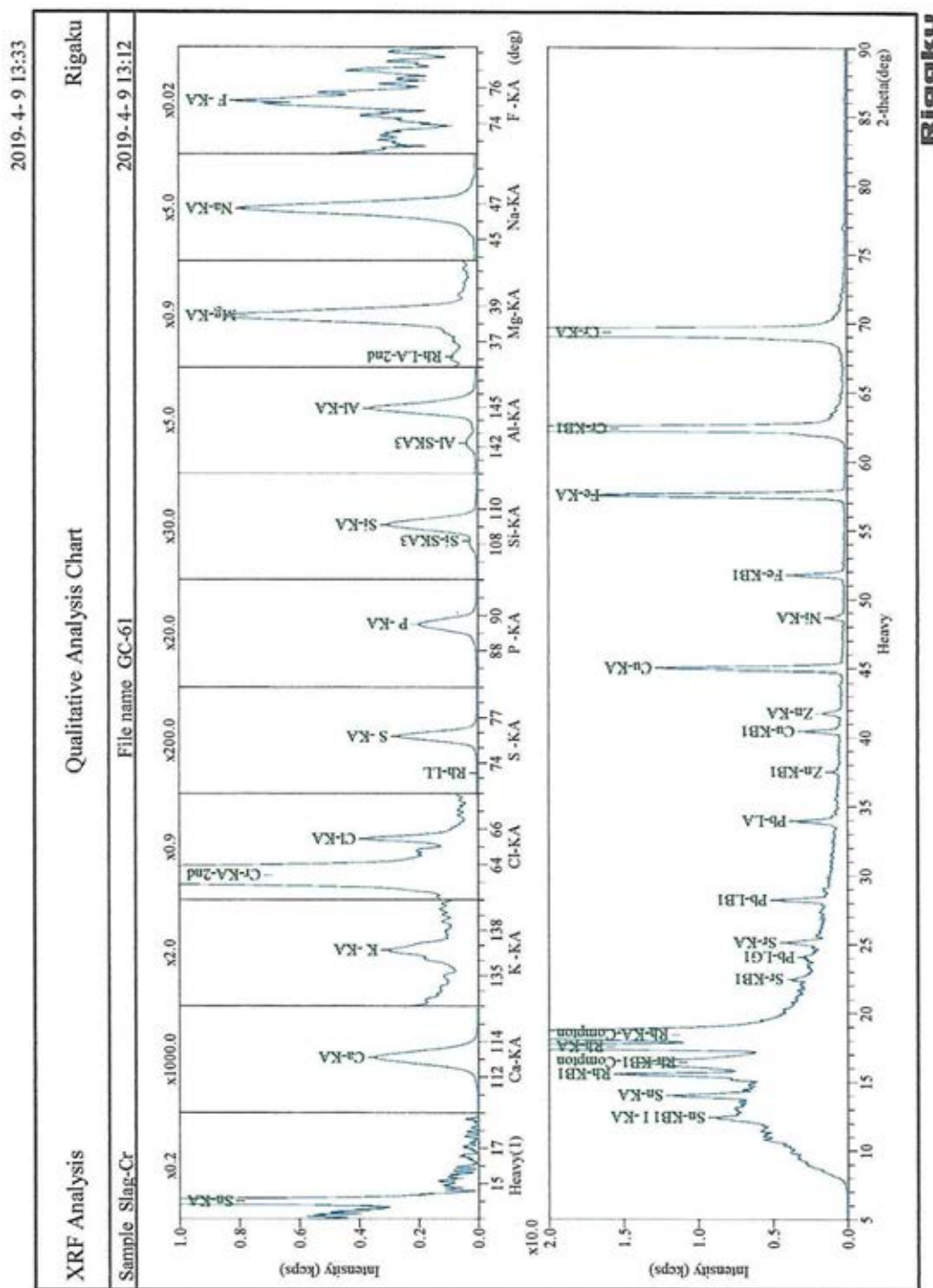
SQX Calculation Result							
Sample : No.1-Cr -F					Date analyzed : 2019- 5- 8 11:32		
Application : F-U_Solid_N_000		Sample type : Oxide Powder			Balance :		
		Sample film corr. :			Matching library :		
		File : GC-67			Impurity corr. :		
No.	Component	Result	Unit	Det. limit	EL line	Intensity	w/o normal
1	Na2O	0.626	mass%	0.03410	Na-KA	0.2653	0.5760
2	MgO	0.827	mass%	0.02741	Mg-KA	0.7184	0.7611
3	Al2O3	0.316	mass%	0.00561	Al-KA	1.1161	0.2908
4	SiO2	2.35	mass%	0.00721	Si-KA	8.9280	2.1659
5	P2O5	0.832	mass%	0.00777	P -KA	3.9827	0.7660
6	SO3	22.9	mass%	0.00999	S -KA	184.8022	21.0615
7	Cl	0.0454	mass%	0.00330	Cl-KA	0.3434	0.0418
8	K2O	0.0320	mass%	0.00320	K -KA	0.6033	0.0295
9	CaO	23.5	mass%	0.01070	Ca-KA	349.0762	21.6069
10	V2O5	0.0479	mass%	0.01880	V -KA	0.1648	0.0441
11	Cr2O3	46.1	mass%	0.02782	Cr-KA	294.3059	42.3872
12	Fe2O3	1.80	mass%	0.01033	Fe-KA	15.2182	1.6610
13	NiO	0.0391	mass%	0.00607	Ni-KA	0.7126	0.0360
14	CuO	0.440	mass%	0.00511	Cu-KA	10.3487	0.4054
15	ZnO	0.0378	mass%	0.00433	Zn-KA	1.2006	0.0348
16	SrO	0.0162	mass%	0.00278	Sr-KA	1.9051	0.0150
17	SnO2	0.0840	mass%	0.00784	Sn-KA	0.3345	0.0773
18	PbO	0.0916	mass%	0.00760	Pb-LA	2.2943	0.0843



ภาพที่ ก.2 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนโครเมียมล้าง 1 ครั้ง

ตารางที่ ก.2 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนโครเมียมล้าง 1 ครั้ง

SQX Calculation Result							
<i>(wash)</i>							
Sample : No.2-Cr -W		Application : F-U_Solid_N_001			Sample type : Oxide Powder		Date analyzed : 2019- 5- 8 11:47
		Sample film corr. :			File : GC-68		Balance :
							Matching library :
							Impurity corr. :
No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	Na2O	6.29	mass%	0.05002	Na-KA	2.5053	5.5803
2	MgO	0.899	mass%	0.02552	Mg-KA	0.6993	0.7971
3	Al2O3	0.336	mass%	0.00562	Al-KA	1.0681	0.2979
4	SiO2	2.54	mass%	0.00699	Si-KA	8.7353	2.2515
5	P2O5	0.860	mass%	0.00557	P -KA	3.7702	0.7625
6	SO3	8.86	mass%	0.00627	S -KA	67.1999	7.8571
7	Cl	0.0301	mass%	0.00325	Cl-KA	0.2415	0.0267
8	K2O	0.0254	mass%	0.00315	K -KA	0.5104	0.0226
9	CaO	25.0	mass%	0.01027	Ca-KA	388.3201	22.1932
10	V2O5	0.0435	mass%	0.01841	V -KA	0.1451	0.0386
11	Cr2O3	52.2	mass%	0.03041	Cr-KA	319.1732	46.2602
12	Fe2O3	2.07	mass%	0.00947	Fe-KA	15.7387	1.8316
13	NiO	0.0417	mass%	0.00638	Ni-KA	0.6856	0.0370
14	CuO	0.563	mass%	0.00558	Cu-KA	11.9191	0.4996
15	ZnO	0.0334	mass%	0.00504	Zn-KA	0.9458	0.0296
16	SrO	0.0189	mass%	0.00298	Sr-KA	1.9887	0.0168
17	SnO2	0.102	mass%	0.00828	Sn-KA	0.3629	0.0901
18	PbO	0.106	mass%	0.00839	Pb-LA	2.3836	0.0940

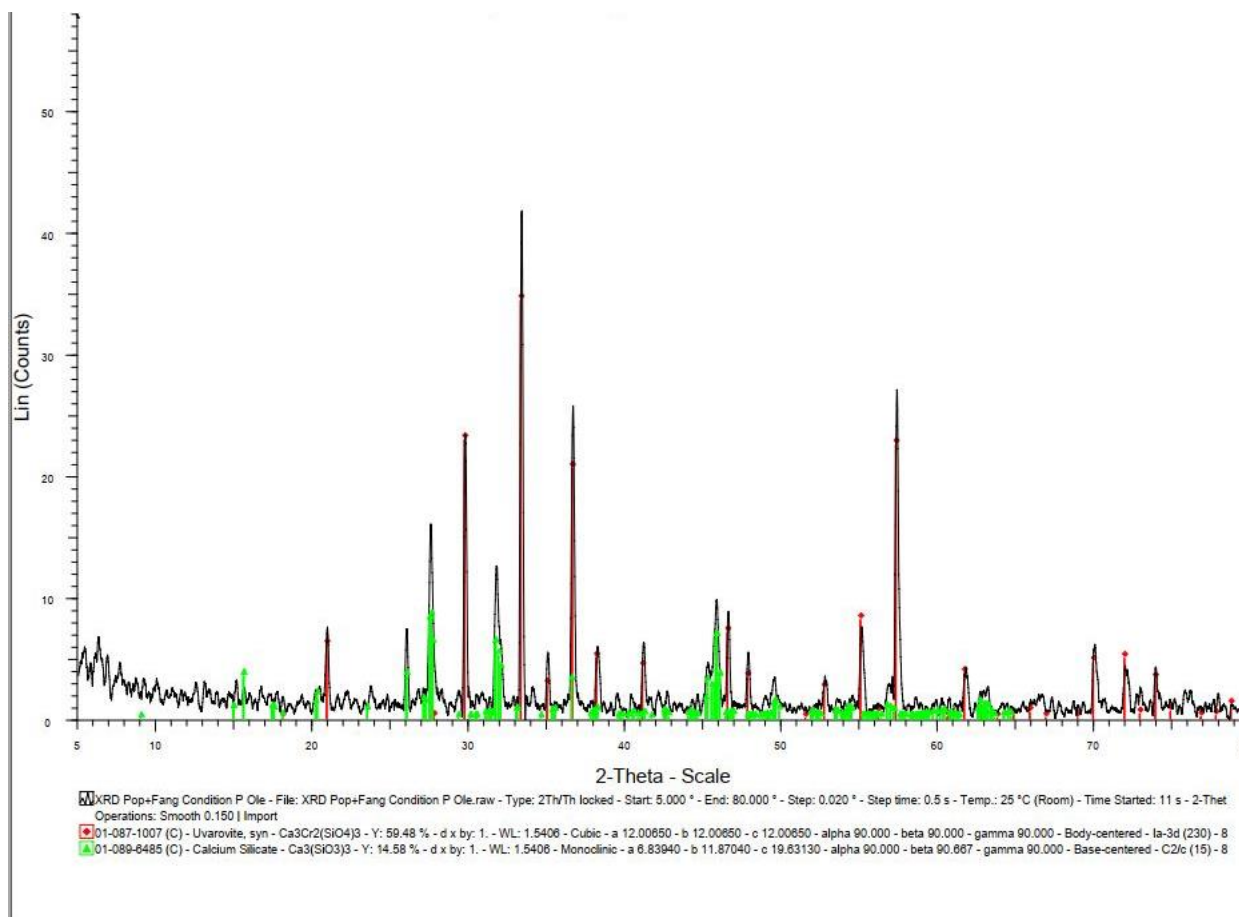


ภาพที่ ก.3 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนโครเมียมล้าง 2 ครั้ง

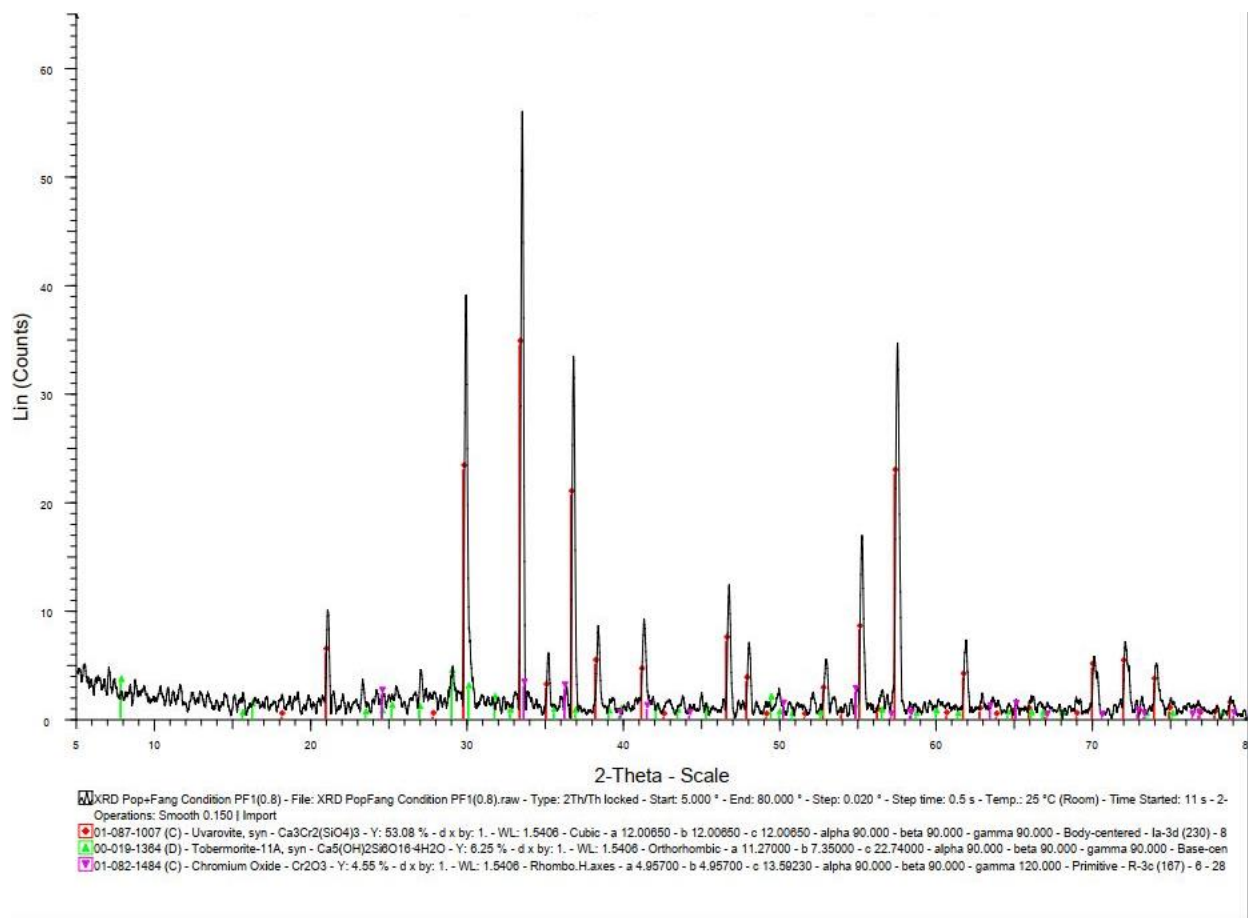
ตารางที่ ก.3 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนโครเมียมล้าง 2 ครั้ง

SQX Calculation Result							
Sample : Slag-Cr		Date analyzed : 2019- 4- 9 13:12					
Application : F-U_Solid_N_000		Sample type : Oxide Powder		Balance :			
		Sample film corr. :		Matching library :			
		File : GC-61		Impurity corr. :			
No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	F	0.564	mass%	0.41347	F-KA	0.0088	0.5050
2	Na2O	9.69	mass%	0.05281	Na-KA	3.9302	8.6728
3	MgO	0.932	mass%	0.02754	Mg-KA	0.7139	0.8348
4	Al2O3	0.560	mass%	0.00671	Al-KA	1.7524	0.5011
5	SiO2	2.63	mass%	0.00661	Si-KA	8.9096	2.3574
6	P2O5	0.886	mass%	0.00691	P-KA	3.8241	0.7930
7	SO3	7.02	mass%	0.00624	S-KA	52.6044	6.2835
8	Cl	0.0336	mass%	0.00313	Cl-KA	0.2720	0.0301
9	K2O	0.0207	mass%	0.00295	K-KA	0.4214	0.0185
10	CaO	21.3	mass%	0.00947	Ca-KA	342.4736	19.0823
11	Cr2O3	53.3	mass%	0.03522	Cr-KA	348.8508	47.7308
12	Fe2O3	2.16	mass%	0.01182	Fe-KA	16.9070	1.9331
13	NiO	0.0467	mass%	0.00581	Ni-KA	0.7871	0.0418
14	CuO	0.549	mass%	0.00604	Cu-KA	11.9270	0.4920
15	ZnO	0.0393	mass%	0.00499	Zn-KA	1.1532	0.0352
16	SrO	0.0184	mass%	0.00299	Sr-KA	1.9814	0.0165
17	SnO2	0.122	mass%	0.00854	Sn-KA	0.4463	0.1094
18	PbO	0.114	mass%	0.00854	Pb-LA	2.6245	0.1019

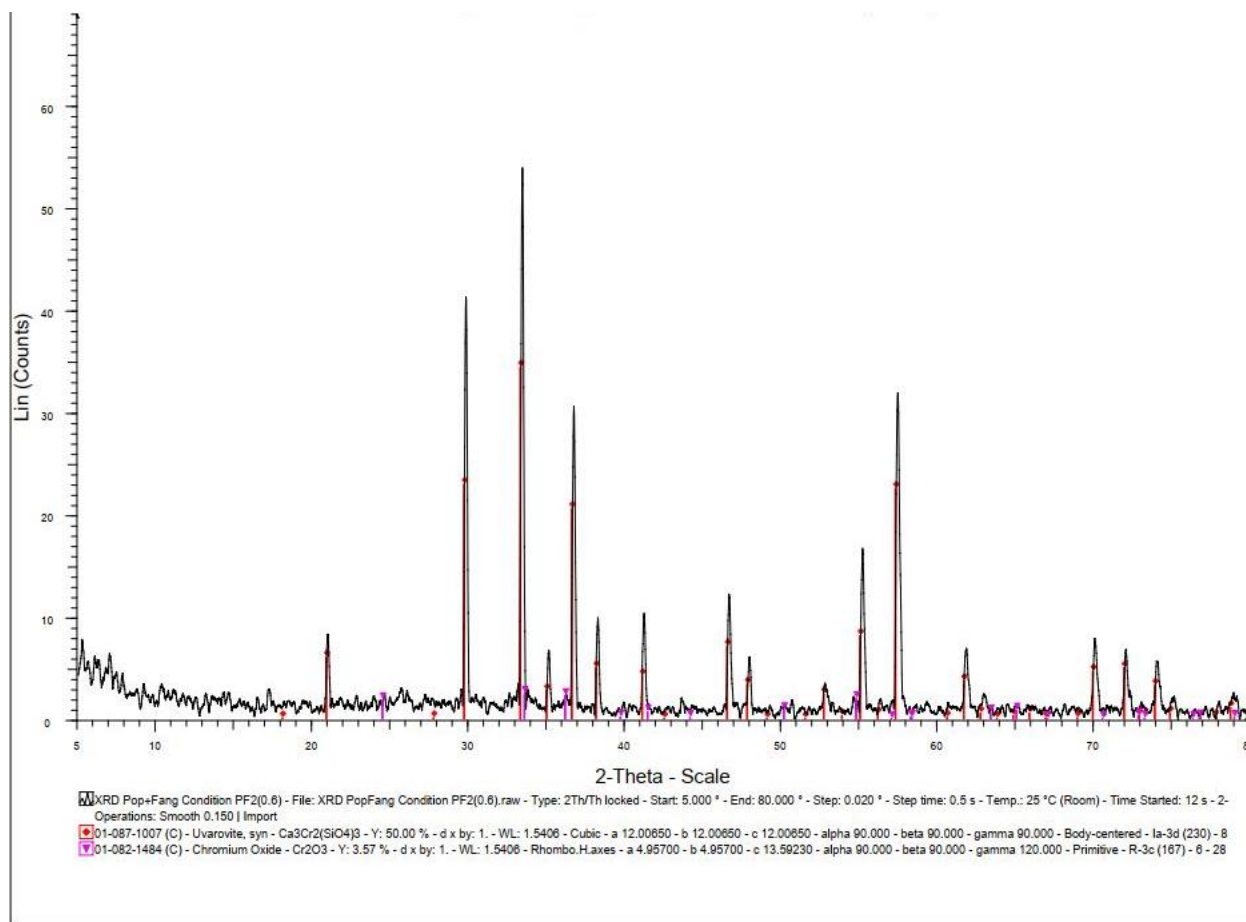
ภาคผนวก ข
องค์ประกอบทางเฟส



ภาพที่ ข.1 องค์ประกอบทางเฟสของผงสีเขียวสูตรที่ใช้
กากตะกอน โครเมียมต่อซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วน 1:1:1

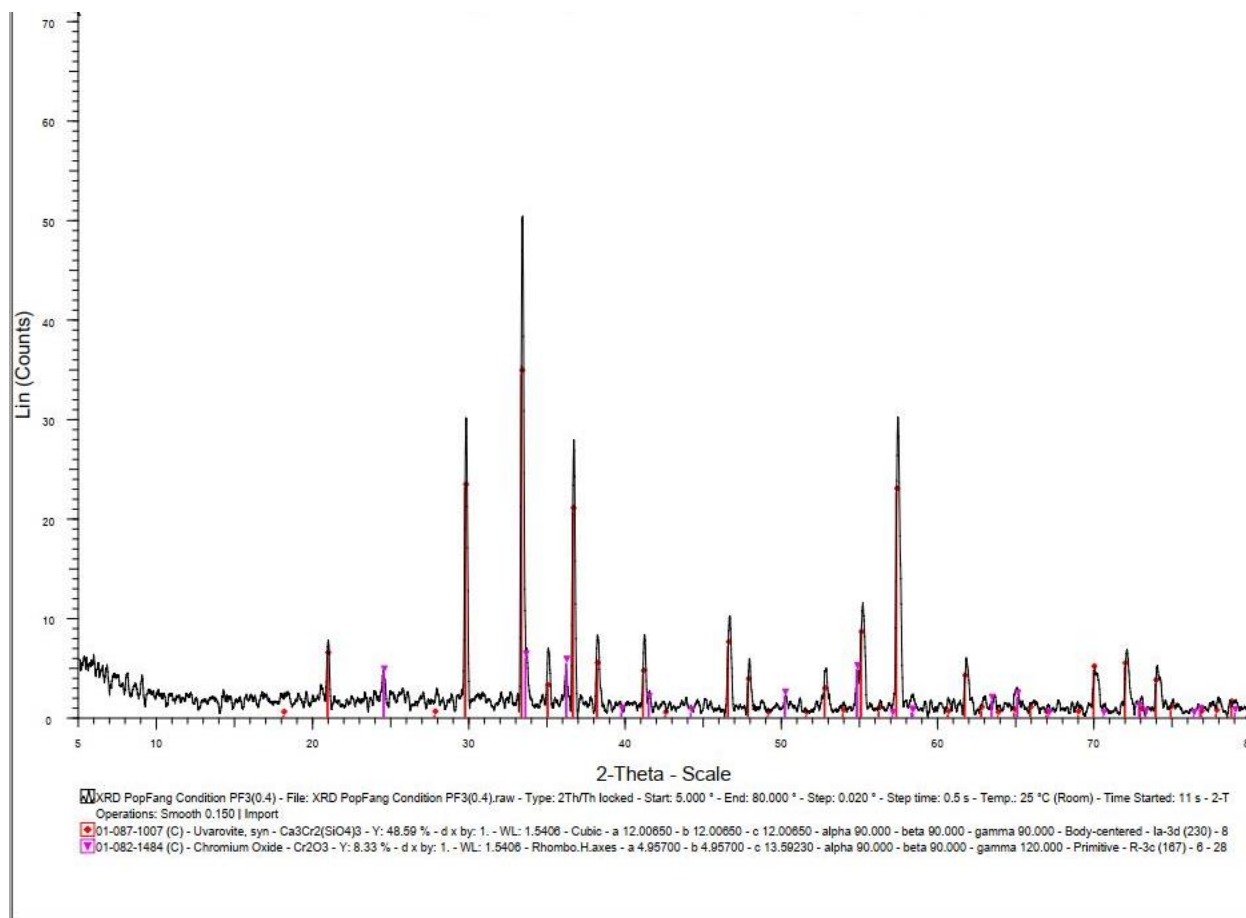


ภาพที่ ข.2 องค์ประกอบทางเฟสของผงสีเขียวสูตรที่ใช้
กากตะกอน โครเมียมต่อซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วน 1:1:0.8



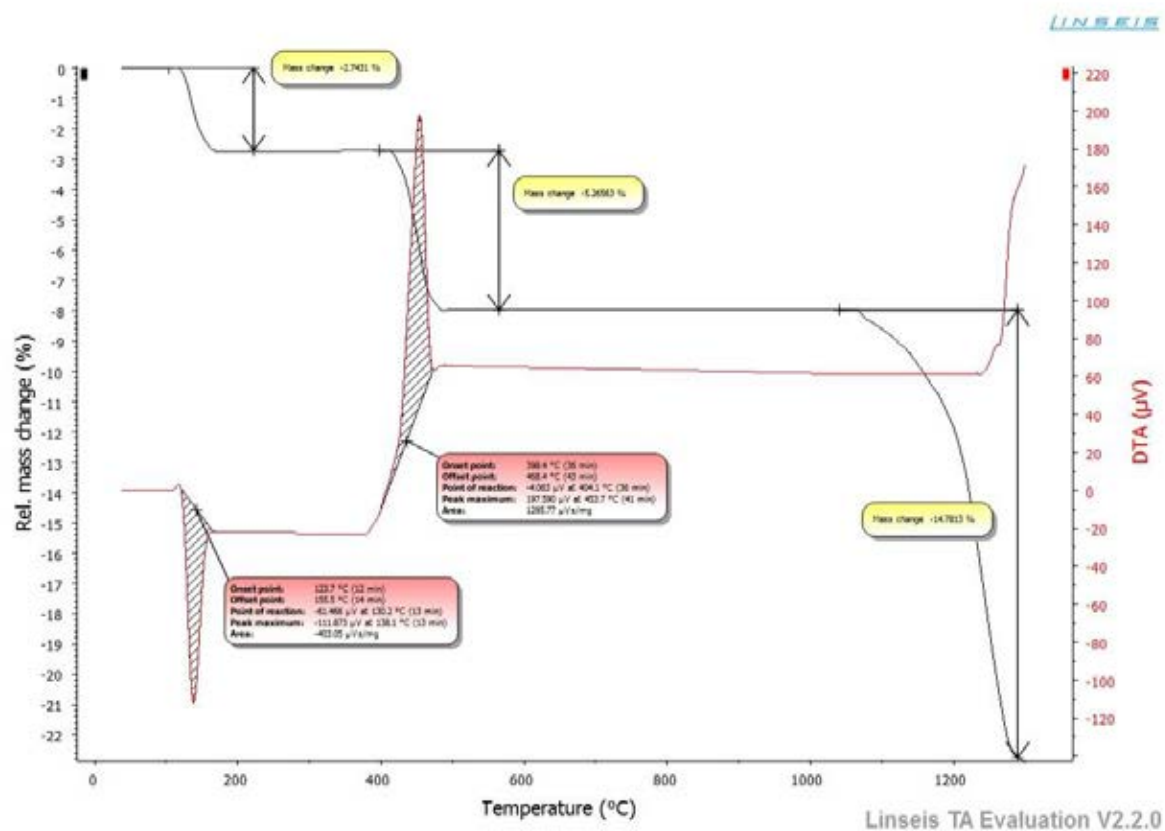
ภาพที่ ข.3 องค์ประกอบทางเฟสของผงสีเขียวสูตรที่ใช้

กากตะกอนโครเมียมต่อซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วน 1:1:0.6

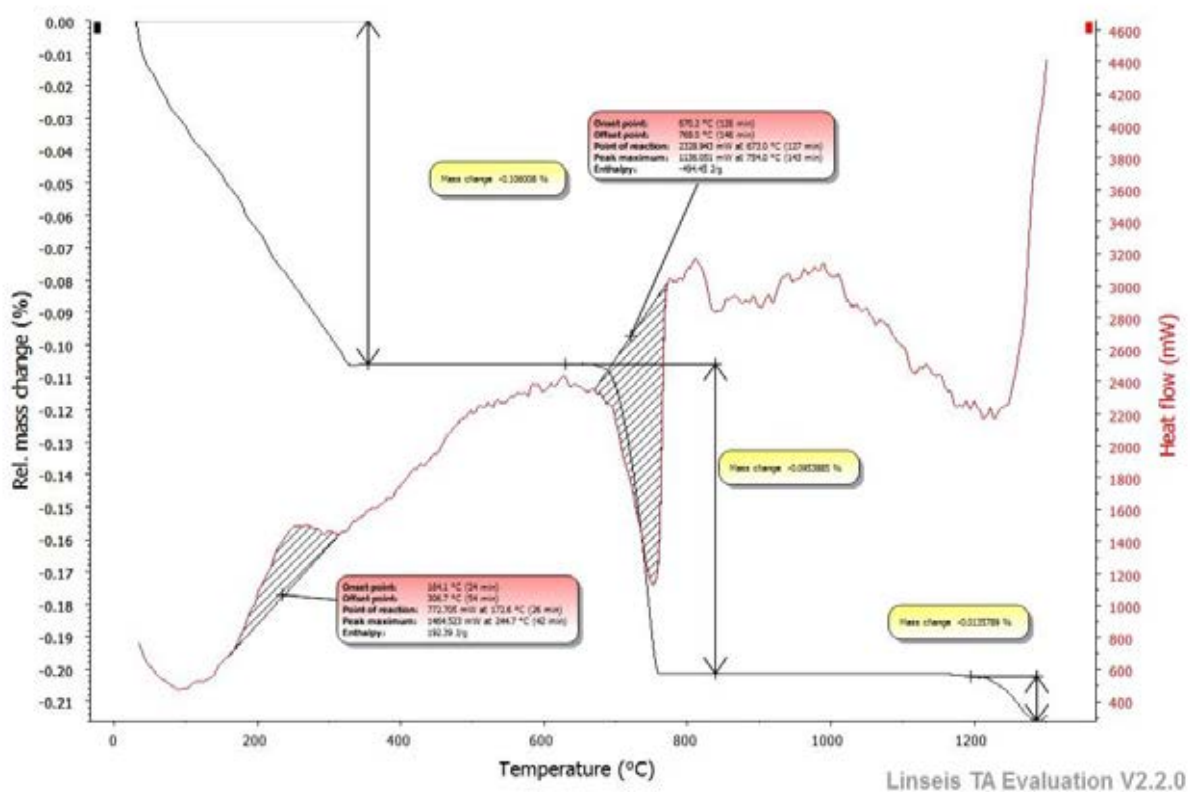


ภาพที่ ข.4 องค์ประกอบทางเฟสของผงสีเขียวสูตรที่ใช้
กาทะกอนโครเมียมต่อซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วน 1:1:0.4

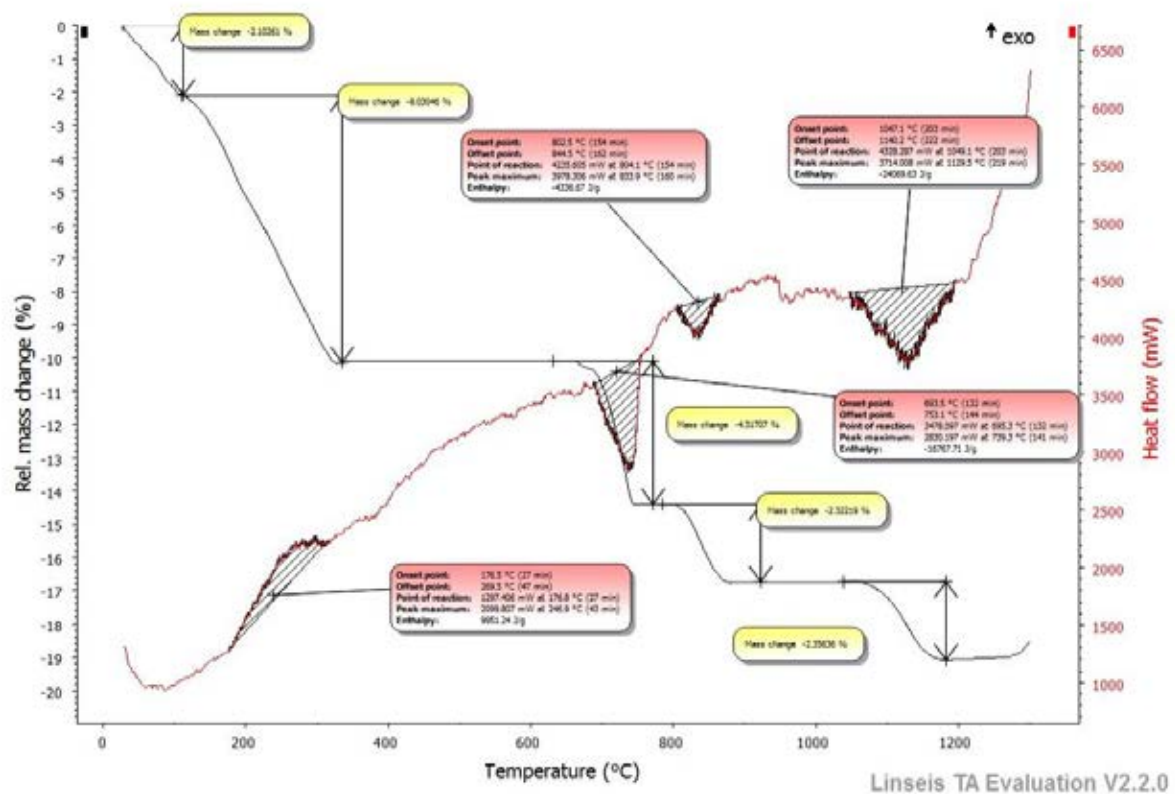
ภาคผนวก ค
การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนและน้ำหนัก



ภาพที่ ค.1 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนและน้ำหนักของกากตะกอนโครเมียม



ภาพที่ ค.2 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนและน้ำหนักของของผงสีเขียวสูตรที่ใช้
กากตะกอนโครเมียมต่อซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วน 1:1:1



ภาพที่ ค.3 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนและน้ำหนักของของผงสีเซียวสูตรที่ใช้
กากตะกอนโครเมียมต่อซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วน 1:1:0.4