



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์
การพัฒนาวิธีวิเคราะห์อะพาไทต์สีฟ้าอมเขียวจากมาดากัสการ์ที่ผ่านการเผา
โดยใช้เทคนิคทางสเปกโตรเมทรี
Developing of bluish green apatite from Madagascar identification
method using spectrometry technique

ปริญญา ชินดุขฎิกุล
เมธินี จามกระโทก

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้
(เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 256108A1080054

สัญญาเลขที่ 178/2561

การพัฒนาวิธีวิเคราะห์อะพาไทต์สีฟ้าอมเขียวจากมาดากัสการ์ที่ผ่านการเผา
โดยใช้เทคนิคทางสเปกโตรเมทรี

Developing of bluish green apatite from Madagascar identification
method using spectrometry technique

ปริญญา ชินดุขฎิกุล คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา
เมธินี จามกระโทก คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ เลขที่ สัญญา 178/2561 ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการอัญมณี คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา สำหรับความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง EDXRF และเครื่องมือทดสอบอัญมณีขั้นพื้นฐาน ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ และศิลปศาสตร์ สำหรับความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer และเครื่อง Fluorescence Spectrophotometer ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำหรับความอนุเคราะห์ในการวิเคราะห์ XRD และ DTA และขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับการวิเคราะห์ EPMA

Acknowledgment

This work was financially supported by the Research Grant of Burapha University through National Research Council of Thailand (Grant no. 178/2561). Thanks are also given to Burapha Gemological Laboratory, Faculty of Gems, Burapha University for EDXRF analysis and basic gemological instruments testing, Faculty of Science and Arts, Burapha University for UV-Visible Spectrophotometer and Fluorescence Spectrophotometer analysis, National Metal and Materials Technology Center for XRD and DTA analysis and Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University for EPMA analysis.

บทคัดย่อ

อะพาไทต์เป็นแร่ที่มีองค์ประกอบของฟอสฟอรัสมีสูตรเคมี $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})$ อะพาไทต์จัดเป็นแร่อัญมณีชนิดหนึ่งเนื่องจากมีสีสรรที่หลากหลายเช่น สีน้ำเงิน สีเขียว และสีเหลือง ฯลฯ ในงานวิจัยนี้ได้นำอะพาไทต์สีเขียวจากแหล่งมาตากัสการ์มาทำการสำรวจผลกระทบจากกระบวนการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนต่อการคายพลังงานและสเปกตรากการดูดกลืนแสงเพื่อทำความเข้าใจความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงสีกับคุณสมบัติการเรืองแสง จากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าความร้อนไม่ได้มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงสีเพียงอย่างเดียว แต่ความร้อนยังส่งผลถึงการเรืองแสงของอะพาไทต์สีเขียวด้วย ผลการศึกษาคุณสมบัติการเรืองแสงของอะพาไทต์สีเขียวที่ยังไม่ผ่านการเผาจะไม่เกิดขึ้นเนื่องจากการมีการถ่ายเทประจุของ $\text{Ce}^{3+} / \text{Ce}^{4+}$ ทำให้ไม่เกิดการเรืองแสง เมื่อตัวอย่างอะพาไทต์ถูกเผาจะทำให้การถ่ายเทประจุของ $\text{Ce}^{3+} / \text{Ce}^{4+}$ ลดลง ทำให้อะพาไทต์เกิดการเรืองแสง พบพีคการคายพลังงานของ Ce^{3+} ที่ตำแหน่ง 365 nm เมื่ออะพาไทต์เปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีฟ้าอมเขียว และใสไม่มีสี และการลดลงของแถบการดูดกลืนแสงเนื่องจากการถ่ายเทประจุ $\text{Ce}^{3+} / \text{Ce}^{4+}$ ที่ตำแหน่ง 400 nm

ABSTRACT

Apatite is a phosphorus mineral with general formula, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})$. Natural apatite is known as gemstone due to a variety color such as blue, green, and yellow, etc. In this study, green natural apatites from Madagascar were explored the effect of heating enhancement process on emission and absorption spectra to understand the correlation of color alternation and luminescence properties. It is demonstrated that heating process not only effect on the alternation of color but it is also effect on luminescence properties of natural green apatite. The result indicated that luminescence properties of non-heated green apatite was switched-off by charge transfer Ce^{3+} to Ce^{4+} . Due to CT decreasing upon heating process, their luminescence properties were enhanced as the enhancement of emission peak at 365 nm of Ce^{3+} accompanies with the color alternations from green to greenish blue and colorless. Charge transfer of Ce^{3+} to Ce^{4+} process was confirmed by the decreasing of absorption band at 400 nm.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 การทบทวนวรรณกรรม	1
1.2 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	4
1.3 วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย	5
1.4 สมมติฐานของโครงการวิจัย	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย และผลการทดลอง	6
2.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	6
2.2 วิธีดำเนินการวิจัย	8
2.3 ผลการวิจัย	9
บทที่ 3 อภิปรายผลการทดลอง	22
3.1 การเปลี่ยนแปลงสีของอะพาไทต์สีเขียวจากแหล่งมาดากัสการ์เมื่อได้รับความร้อน	22
3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางผลึก และการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่างอะพาไทต์	23
3.3 การวิเคราะห์เชิงความร้อน (Differential thermal analysis; DTA)	23
3.4 การเปลี่ยนแปลงการเรืองแสงของอะพาไทต์สีเขียวจากแหล่งมาดากัสการ์เมื่อได้รับความร้อน	24
บทที่ 4 สรุปผลการทดลอง	27
บทที่ 5 ผลผลิต	28
รายงานการเงิน	29
เอกสารอ้างอิง	30
ภาคผนวก ก ผลการวัดการดูดกลืนแสงของตัวอย่างอะพาไทต์	31
ภาคผนวก ข ผลการวัดการเรืองแสงของตัวอย่างอะพาไทต์	42
ประวัตินักวิจัยและคณะ	53

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 แสดงปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (%wt) ของมลทินธาตุที่ตรวจพบในตัวอย่างอะพาไทต์	2
2.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างอะพาไทต์สีเขียวจากมาดากัสการ์	9
2.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่างด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์แบบกระจายพลังงาน	10
2.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่างด้วยเทคนิคเครื่องอิเล็กตรอนโพรบไมโครแอนาไลซิส	11
2.4 สีของอะพาไทต์ก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C – 800°C ระยะเวลา ยืนอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศ	13
2.5 สีของอะพาไทต์ก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C – 800°C ระยะเวลา ยืนอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศแบบรีดักชัน	15
2.6 CIE L*a*b* ของตัวอย่างตัวอย่างอะพาไทต์ก่อนเผาและตัวอย่างที่เผาที่อุณหภูมิ 400°C – 800°C ในบรรยากาศ และตัวอย่างที่เผาในบรรยากาศแบบรีดักชัน	18

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
1.1	โครงสร้างของแร่อะพาไทต์	1
1.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสัญญาณ SO_3^- center และ SiO_3^- center	3
1.3	สเปกตรากการดูดกลืนแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ ตัวอย่างที่ 15, 2, 12, 18 และ 20	3
2.1	ตัวอย่างอะพาไทต์จากแหล่งมาดากัสการ์ (ก) พลอยอะพาไทต์ดิบ (ข) รูปตัวอย่างพลอยอะพาไทต์ที่นำไปขัดให้มีด้านขนานกัน 1 คู่	6
2.2	เครื่องเอกซเรย์ ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence) ยี่ห้อ EDAX Ametek รุ่น Orbis	6
2.3	เครื่องอิเล็กตรอนโพรบไมโครแอนาไลซิส (Electron Probe Microanalysis: EPMA)	7
2.4	เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer)	7
2.5	เครื่องฟลูออเรสเซนส์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fluorescence Spectrophotometer)	8
2.6	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวอย่างอะพาไทต์สีเขียวก่อนเผาด้วย เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์	12
2.7	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วง 200 – 800 nm ของตัวอย่างอะพาไทต์ AP01 ก่อนเผาและหลังเผาในบรรยากาศที่อุณหภูมิ 300–800°C	17
2.8	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วง 200 – 800 nm ของตัวอย่างอะพาไทต์ AP11 ก่อนเผาและหลังเผาในบรรยากาศแบบรีดักชันที่อุณหภูมิ 300–800°C	17
2.9	สเปกตรัมการเรืองแสงในช่วง 300 – 700 nm ของตัวอย่าง AP01 ก่อน เผาและหลังเผาในบรรยากาศที่อุณหภูมิ 300 – 800°C	20
2.10	สเปกตรัมการเรืองแสงในช่วง 300 – 700 nm ของตัวอย่าง AP011 ก่อน เผาและหลังเผาในบรรยากาศรีดักชันที่อุณหภูมิ 300 – 800°C	20
2.11	กราฟ DTA ของตัวอย่างอะพาไทต์สีเขียวจากมาดากัสการ์ภายใต้บรรยากาศ แบบออกซิเจน และภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน	21
3.1	(ก) รูปตัวอย่างแสดงสีของอะพาไทต์ก่อนเผา และหลังจากเผาที่อุณหภูมิ 300 - 800 °C (ข) ตัวอย่างการพลอตกราฟค่า a^* - b^* ของตัวอย่างอะพาไทต์ ก่อนเผา และหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 300 - 800 °C	22
3.2	(ก) สีของตัวอย่างอะพาไทต์ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300 – 800°C ภายใต้แสง Daylight (ข) การเรืองแสงตัวอย่างอะพาไทต์ก่อนเผา และหลังเผา ที่อุณหภูมิ 300 – 800°C ภายใต้แสง UV ความยาวคลื่น 254 nm	24

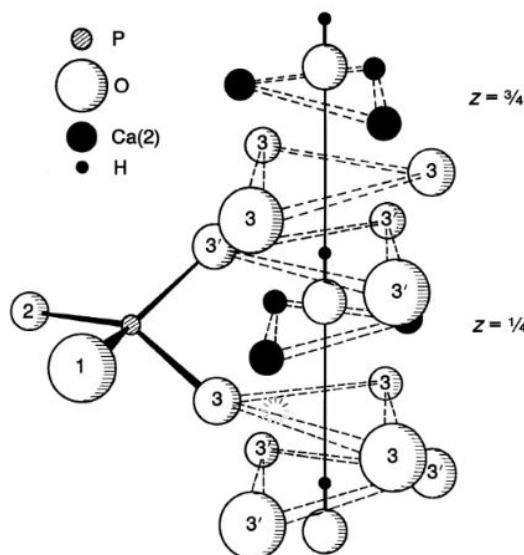
รูปที่	หน้า
3.3 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP11 ก่อนเผา และหลังเผา ภายใต้บรรยากาศรีดักชันที่อุณหภูมิ 300 -800°C	25
3.4 สเปกตรากการเรืองแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP11 ก่อนเผา และหลังเผา ภายใต้บรรยากาศรีดักชันที่อุณหภูมิ 300 -800°C	25

บทที่ 1

บทนำ

1.1 การทบทวนวรรณกรรม

อะพาไทต์เป็นแร่ชนิดหนึ่งในกลุ่มแร่ฟอสเฟต โดยทั่วไปพบสีเขียว อาจพบสีเหลือง สีน้ำเงิน อมม่วง สีชมพู และสีน้ำตาล อะพาไทต์มีสูตรเคมีคือ $X_{10}(YO_4)_6(Z)_2$ โดยปกติ $X = Ca$, $Y = P$ และ $Z = F, Cl, OH$ ทำให้สามารถแบ่งอะพาไทต์ออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ ไฮดรอกซิลอะพาไทต์ (Hydroxylapatite; $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) ฟลูออโรอะพาไทต์ (Fluoro-apatite; $Ca_{10}(PO_4)_6(F)_2$) และ คลอโรอะพาไทต์ (Chlor-apatite; $Ca_{10}(PO_4)_6(Cl)_2$) นอกจากนี้ในตำแหน่งของ Z อาจถูกแทนที่ได้ด้วย $\frac{1}{2}CO_3$ หรือ $\frac{1}{2}O_2$ ตำแหน่งของ PO_4 สามารถถูกแทนที่ด้วย $HPO_4, AsO_4, VO_4, SiO_4$ หรือ CO_3 (Jc Elliott, 2002) ตำแหน่งของ X สามารถถูกแทนที่ด้วย $Fe^{2+}, Mn^{2+}, Ba^{2+}, Cd^{2+}, Pb^{2+}, Sr^{2+}, Na^+, K^+, REE^{3+}$ และ U^{4+} และตำแหน่งของ Y สามารถแทนที่ได้ด้วย As^{5+}, Cr^{5+} และ V^{5+} โครงสร้างของอะพาไทต์แสดงในรูปที่ 1.1



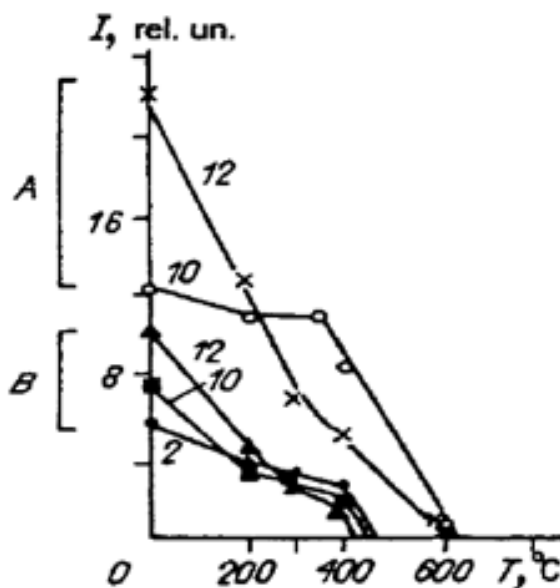
รูปที่ 1.1 โครงสร้างของแร่อะพาไทต์ (J.C. Elliott, R.M. Wilson & S.E.P. Dowker, 2002)

L. G. Gilinskaya และ R. I. Mashkovtsev, 1995 ได้ทำการศึกษาการเกิดอะพาไทต์สีเขียวและสีฟ้าโดยใช้เทคนิคอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ (Electron Spin Resonance; ESR) ประกอบกับข้อมูลทางสเปกโตรสโคปี ในตารางที่ 1.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างอะพาไทต์ที่ใช้ในการทดลองและสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ที่มีความสัมพันธ์กับ S (SO_3^- center) และ Si (SiO_3^- center) พบว่าอะพาไทต์ที่มีสีเขียวจนถึงฟ้าจะตรวจพบ SiO_2 , SO_3 และมี MnO ในบางตัวอย่าง (ตัวอย่างที่ 1-14) ตัวอย่างเหล่านี้ตรวจพบสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ของ S และ Si แต่ในตัวอย่างที่มีสีฟ้าเข้ม (ตัวอย่างที่ 15) ตรวจพบ MnO ในปริมาณสูงคือ 0.187%wt กลับตรวจไม่พบสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ของ S และ Si

ตารางที่ 1.1 แสดงปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (%wt) ของมลทินธาตุที่ตรวจพบในตัวอย่างอะพาไทต์ (L. G. Gilinskaya and R. I. Mashkovtsev, 1995)

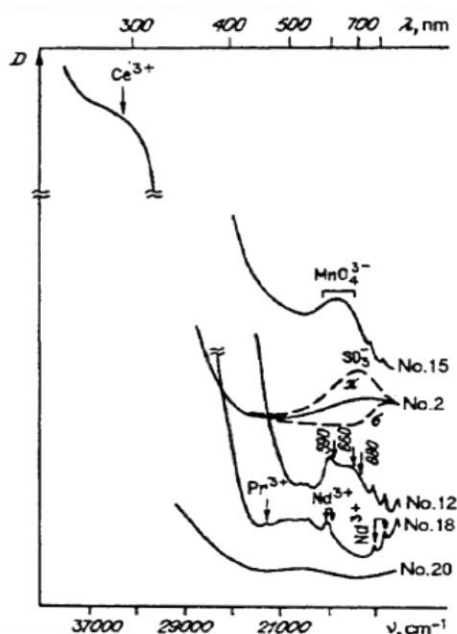
No	SiO ₂	SO ₃	Si:S Atomic ratio	Ce ₂ O ₃	La ₂ O ₃	U	Th	MnO	FeO	Color of sample	Presence of ESR centers connected with S, Si
1	0.153	0.336	0.071:0.136	0.025	0.009	7.1x10 ⁻³	Not det	0.0007	-	Blue	+ +
2	0.348	1.038	0.161:0.420	0.023	-	79.85x10 ⁻³	1.4x10 ⁻²	-	-	Blue	+ +
3	0.090	0.217	0.042:0.089	0.03	-	8.9x10 ⁻³	1.75x10 ⁻²	0.082	-	Blue+Pale green	+ +
4	0.241	0.814	0.113- 0.329	0.014	-	5.7x10 ⁻³	1.5x10 ⁻²	0.0181	0.016	Blue+Green	+ +
5	0.179	0.337	0.083:0.136	0.031	-	5.7x10 ⁻³	1.4x10 ⁻²	0.0009	-	Pale green	+ +
6	-	0.102	0:0.041	0.183	0.1	9.0x10 ⁻³	4.51 x10 ⁻²	-	-	Blue	+ +
7	0.51	0.27	0.236:0.109	0.31	0.21	6.8x10 ⁻³	2.6 x10 ⁻²	Not det	Not det	Green	+ +
8	0.71	0.33	0.329:0.133	0.610	0.394	8.0x10 ⁻³	3.5 x10 ⁻²	Not det	Not det	Green	+ +
9	0.71	0.259	0.329:0.104	0.71	0.394	6.4x10 ⁻³	3.62 x10 ⁻²	-	0.003	Green	+ +
10	0.998	0.525	0.463:0.212	0.480	0.280	7.5x10 ⁻³	4.25x10 ⁻²	-	-	Emerald green	+ +
11	0.616	0.605	0.285:0.244	0.502	0.151	1.1x10 ⁻³	5.4x10 ⁻²	-	0.024	Blue	+ +
12	1.78	1.47	0.826:0.595	0.84	0.41	2.0x10 ⁻²	11.2x10 ⁻²	Not det	-	Bottle green	+ +
13	0.709	0.398	0.328:0.161	0.742	0.280	2.6x10 ⁻³	3.4x10 ⁻²	-	0.030	Green	+ +
14	0.447	0.238	0.207:0.096	0.605	0.201	2.13x10 ⁻³	2.75x10 ⁻²	-	-	Emerald blue	+ +
15	0.039	0.051	0.018:0.020	0.015	0.01	3.3x10 ⁻³	2.75x10 ⁻²	0.187	Not det	Dark blue	- -
16	0.326	0.030	0.168:0.012	0.388	0.268	4.05x10 ⁻⁴	2.0x10 ⁻³	0.187	Not det	Colorless	- -
17	1.135	0.108	0.520:0.043	0.52	0.27	7.12x10 ⁻⁴	8.0x10 ⁻³	0.043	0.048	Colorless	- -
18	0.240	-	0.111:0	2.456	1.109	1.2x10 ⁻⁴	3.0x10 ⁻³	-	0.040	Yellowish	- -
19	-	-	- : -	0.43	0.20	1.36x10 ⁻⁴	1.28x10 ⁻³	0.123	0.002	Colorless	- -
20	0.098	0.61	0.045:0.024	-	0.005	Not det	Not det	0.050	Not det	Colorless	- -

ตัวอย่างที่ตรวจพบสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ของ S และ Si (ตัวอย่างที่ 2, 10 และ 12) ถูกนำมาเผาด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 200 – 800 องศาเซลเซียส ในสภาวะบรรยากาศเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อนำมาตรวจสอบสัญญาณ SO₃⁻ center และ SiO₃⁻ center พบว่าเมื่อเผาตัวอย่างถึงอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส สัญญาณของ SO₃⁻ หายไป และสัญญาณของ SiO₃⁻ หายไปเมื่ออุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสัญญาณ SO₃⁻ center และ SiO₃⁻ center แสดงในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสัญญาณ SO_3^- center และ SiO_3^- center (ตัวอย่างที่ 2, 10 และ 12) (L. G. Gilinskaya & R. I. Mashkovtsev, 1995)

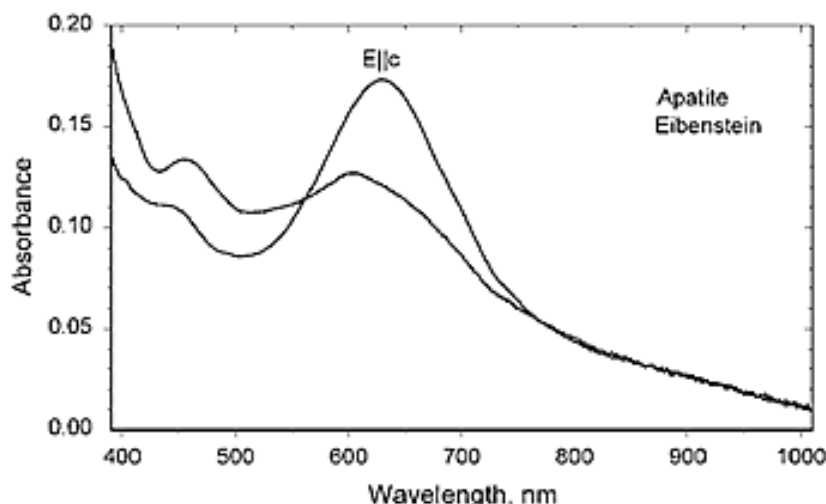
สเปกตรากการดูดกลืนแสงของอะพาไทต์ในช่วงวิสิเบิล 400 – 700 nm แสดงในรูปที่ 1.3 ตัวอย่างที่ 15 เป็นตัวอย่างที่มี MnO ในปริมาณสูง มีสีฟ้าเข้ม แสดงการดูดกลืนแสงเนื่องจาก MnO_4^{3-} ตัวอย่างที่ 2 มีสีฟ้าแสดงการดูดกลืนแสงเนื่องจาก SO_3^- center ตัวอย่างที่ 12 มีสีเขียวเข้ม (Bottle green) มีมลทินธาตุ SiO_2 1.78%, SO_3 1.47%, Ce_2O_3 0.84% ที่ตำแหน่ง 590, 660 และ 680 นาโนเมตร ถูกอธิบายว่าอาจจะเป็นการทรานสิชันระดับพลังงานระหว่าง $\text{SiO}_3^- - (\text{Ce}^{3+} + \text{K})$ defect ตัวอย่างที่ 18 มีสีออกเหลือง เป็นตัวอย่างที่มีปริมาณธาตุ Rare earth สูง และตัวอย่างที่ 20 เป็นตัวอย่างที่ไม่มีสี



รูปที่ 1.3 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ ตัวอย่างที่ 15, 2, 12, 18 และ 20 (L. G. Gilinskaya & R. I. Mashkovtsev, 1995)

John M. Hughes และคณะ, 2004 ทำการศึกษาฟลูอออะพาไทต์จาก Eibenstein an der Thaya ประเทศออสเตรเลีย ที่มีปริมาณ Mn สูงซึ่งมีสีฟ้า (MnO 9.79%) มีสูตรเคมี $(\text{Ca}_{8.56}\text{Mn}_{1.41}\text{Fe}_{0.01})\text{P}_6\text{O}_{24}\text{F}_{2.00}$ ซึ่ง Mn สามารถเข้าไปแทนที่ได้ทั้งในตำแหน่งของ Ca1: $\text{Ca}_{0.72(1)}\text{Mn}_{0.28}$ และตำแหน่งของ Ca2: $\text{Ca}_{0.96(1)}\text{Mn}_{0.04}$ จากการวิเคราะห์ด้วย EPMA พบว่ามีปริมาณ P_2O_5 40.05-40.96 wt% FeO 0.02-0.10 wt% MnO 9.71- 9.88 wt% CaO 46.40-46.93 wt% และ F 3.92-4.05 wt%

การวัด Absorption spectrum ในช่วง 400 – 1000 nm ในรูปที่ 1.4 แสดงให้เห็นการดูดกลืนของ Mn^{5+} ซึ่งเป็นการแทนที่ของ Mn ในตำแหน่งของ P ที่ตำแหน่งประมาณ 640 nm พบว่าการดูดกลืนแสงในแนวขนานกับแกน C มีค่าสูงกว่าการดูดกลืนแสงในแนวตั้งฉากกับแกน C การดูดกลืนแสงอ่อนที่ตำแหน่ง 404 nm ในสเปกตรัมที่วัดในแนวขนานกับแกน C แสดงถึง Mn^{2+} ใน Octahedral นอกจากนี้ยังมีการทดสอบว่าสีฟ้าที่เกิดขึ้นในฟลูอออะพาไทต์จากแหล่งนี้ไม่ได้เกิดจากผลข้างเคียงของการแผ่รังสีโดยการนำอะพาไทต์ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงสีเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 1.4 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของอะพาไทต์ที่มีปริมาณ Mn สูง จาก Eibenstein an der Thaya ประเทศออสเตรเลีย (John M. Hughes et al., 2004)

1.2 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

จากการวิเคราะห์อัญมณีในห้องปฏิบัติการวิเคราะห์อัญมณี คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา ในหลายปีที่ผ่านมาพบว่าผู้ใช้บริการนำแร่อะพาไทต์ (Apatite) ที่มีสีฟ้าอมเขียวมาทำการตรวจวิเคราะห์อยู่บ่อยครั้ง เนื่องจากอะพาไทต์สีนี้มีความคล้ายคลึงกันกับแร่ทัวมาลีน (Tourmaline) สีฟ้าอมเขียวที่มีชื่อว่า “พาไรอึบา (Paraiba)” ทัวมาลีนสีนี้เป็นที่ต้องการของตลาดมากและเป็นสีที่หายาก ทำให้ราคาของทัวมาลีนสีนี้สูงมาก แม้ว่าคุณสมบัติทางกายภาพของอัญมณีทั้งสองชนิดนี้จะแตกต่างกันอย่างมากในเรื่องของความแข็ง อะพาไทต์มีความแข็งเท่ากับ 5 โมห์สเกล ทัวมาลีนมีความแข็งประมาณ 7-7.5 โมห์สเกล แต่การวิเคราะห์ความแข็งของอัญมณีจะทำให้ตัวอย่างเกิดรอยบนผิว ทำให้ไม่สามารถใช้การวิเคราะห์ความแข็งเพื่อแยกความแตกต่างได้ การตรวจสอบคุณสมบัติอื่น ได้แก่ ลักษณะทางแสงไม่สามารถแยกความแตกต่างได้เนื่องจากอัญมณีทั้ง 2 ชนิด จัดอยู่ในระบบผลึกเฮก

อะโกลนอลเหมือนกันจึงแสดงลักษณะทางแสงแบบเดียวกัน ค่าดัชนีหักเหและความถ่วงจำเพาะมีความใกล้เคียงกันมาก มีเพียงค่าไบเรฟริงค์เจนส์ (ความแตกต่างของค่าดัชนีหักเหสูงสุดกับค่าดัชนีหักเหต่ำสุด) ที่แตกต่างกัน ซึ่งทำให้ผู้วิเคราะห์สามารถแยกความแตกต่างของอัญมณีทั้ง 2 ออกจากกันได้ แต่บางครั้งผลการวิเคราะห์ในบางตัวอย่างอาจมีค่าใกล้เคียงกันมากทำให้ผลการวิเคราะห์เกิดความผิดพลาดได้ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าอะพาไทต์สีฟ้าอมเขียว เป็นอัญมณีเลียนแบบทิวมาลีนพาไรอิตาที่ใกล้เคียงที่สุด

การสอบถามผู้ใช้บริการและผู้ขายหลายคน ทำให้ทราบข้อมูลว่าอะพาไทต์สีฟ้าอมเขียวที่มีสีใกล้เคียงกับทิวมาลีนพาไรอิตา แท้จริงแล้วได้จากการนำอะพาไทต์สีเขียวมาเผาทำให้สีของอะพาไทต์เปลี่ยนไปเป็นสีฟ้าอมเขียว งานวิจัยนี้มีเป้าหมายในการที่จะศึกษาคุณสมบัติการดูดกลืนแสง ข้อมูลจากองค์ประกอบทางเคมี และการเรืองแสงที่เปลี่ยนแปลงไปของอะพาไทต์สีเขียวเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง

1.3 วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอะพาไทต์สีเขียวเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ
2. สามารถนำข้อมูลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางสเปกโตรเมทรีในการระบุว่าเป็นอะพาไทต์สีฟ้าอมเขียวผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน

1.4 สมมติฐานของโครงการวิจัย

อะพาไทต์มักจะมีการเรืองแสงเมื่อได้รับรังสีในช่วงคลื่นอัลตราไวโอเล็ต เนื่องจากการปนเปื้อนของธาตุ เช่น แมงกานีส (Mn) ซีเรียม (Ce) และธาตุหายากอื่นๆ (Rare earth elements) ดิสโพรเซียม (Dy) เทอร์เบียม (Tb) ซาแมเรียม (Sm) นีโอติเมียม (Nd) อิตเทอร์เบียม (Yb) และยูโรเพียม (Eu) เป็นต้น หลังการทดลองเผาอะพาไทต์สีเขียวที่อุณหภูมิประมาณ 500 – 800°C พบว่าสีของอะพาไทต์เกิดการเปลี่ยนแปลงไป และเกิดการเรืองแสงเมื่อทดสอบด้วยคลื่นแสงเรืองแสงอัลตราไวโอเล็ต ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของสีที่เกิดขึ้นน่าจะมีความสัมพันธ์กับการเรืองแสงที่พบหลังจากการเผาตัวอย่าง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงสีของอะพาไทต์สีเขียวเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ
2. ได้ข้อมูลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางสเปกโตรเมทรีในการระบุว่าเป็นอะพาไทต์สีฟ้าอมเขียวผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน

บทที่ 2

วิธีดำเนินการวิจัย และผลการทดลอง

2.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. อะพาไทต์สีเขียวจากแหล่งมาดากัสการ์จำนวน 20 ตัวอย่าง รูปที่ 2.1(ก) พลอยดิบอะพาไทต์จากมาดากัสการ์ นำไปขัดเป็นแผ่น มีด้านขนานกัน 1 คู่ และขัดผิวทั้งสองด้านให้เงาแสดงในรูปที่ 2.1(ข) จำนวนตัวอย่างอะพาไทต์ที่ใช้ในการทดลอง 20 ตัวอย่าง แบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม
 - กลุ่มที่ 1 ตัวอย่าง AP01-AP10 สำหรับการทดลองเผาในบรรยากาศ
 - กลุ่มที่ 2 ตัวอย่าง AP11-AP20 สำหรับการทดลองเผาในบรรยากาศแบบปิดกั้น



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างอะพาไทต์จากแหล่งมาดากัสการ์(ก) พลอยอะพาไทต์ดิบ (ข) รูปตัวอย่างพลอยอะพาไทต์ที่นำไปขัดให้มีด้านขนานกัน 1 คู่

2. เอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Fluorescence; EDXRF) ยี่ห้อ EDAX Ametek รุ่น Orbis ใช้สำหรับวัดองค์ประกอบในตัวอย่างอะพาไทต์แสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 เครื่องเอกซเรย์ ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence) ยี่ห้อ EDAX Ametek รุ่น Orbis

3. เครื่องอิเล็กตรอนโพรบไมโครแอนาไลซิส (Electron Probe Microanalysis: EPMA) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JXA 8100 แสดงในรูปที่ 2.3 Acceleration voltage 15.0 kV Probe current 2.184×10^{-8} A Beam diameter 1–5 μm และคำนวณผลด้วยซอฟต์แวร์ JEOL



รูปที่ 2.3 เครื่องอิเล็กตรอนโพรบไมโครแอนาไลซิส (Electron Probe Microanalysis: EPMA) (ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2562)

4. เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) ยี่ห้อ Agilent รุ่น Cary 60 แสดงในรูปที่ 2.4 มีแหล่งกำเนิดแสงแบบ Xenon pulse lamp และดีเทคเตอร์แบบ PMT วัด Absorption spectra ในช่วง 200 – 800 nm และคำนวณค่าสีด้วยโปรแกรม Color ตั้งค่าระบบสีในระบบ CIE $L^*a^*b^*$ แสงขาว D65 และเลือกมุมในการวัดแบบ 2° ก่อนและหลังการเผาตัวอย่าง



รูปที่ 2.4 เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer)

4. เครื่องฟลูออเรสเซนส์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fluorescence Spectrophotometer) ยี่ห้อ Agilent รุ่น Cary Eclipse แสดงในรูปที่ 2.5 มี Excitation source เป็น Xenon flash lamp และ ดีเทคเตอร์แบบ PMT ใช้สำหรับบันทึกการเรืองแสงของตัวอย่าง โดยกำหนดค่าพลังงานกระตุ้นที่ ความยาวคลื่น 275 nm และบันทึกสเปกตรัมการคายพลังงาน ในช่วง 300 – 800 nm



รูปที่ 2.5 เครื่องฟลูออเรสเซนส์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fluorescence Spectrophotometer)

5. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer: XRD) ยี่ห้อ Phillips รุ่น Rigaku TTRAX III ใช้สำหรับวิเคราะห์โครงสร้างทางผลึกของตัวอย่างอะพาไทต์ที่ใช้ในการทดลอง

6. เครื่องมือวิเคราะห์เชิงความร้อน (Differential thermal analysis; DTA) รุ่น NETZSCH STA499C ใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงในลักษณะการดูดความร้อน (Endothermic) หรือการคายความร้อน(Exothermic) ของตัวอย่าง ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ $30^{\circ}\text{C} - 1,000^{\circ}\text{C}$ อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ $10^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$ ภายใต้บรรยากาศและบรรยากาศไนโตรเจน

2.2 วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาผลกระทบของการปรับปรุงคุณภาพพลอยอะพาไทต์จากแหล่งมาดากัสการ์ด้วยความร้อนมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

1. การเตรียมตัวอย่างพลอยอะพาไทต์

- นำอะพาไทต์สีเขียวจากมาดากัสการ์จำนวน 20 ตัวอย่าง นำมาตัดเป็นแผ่นให้มีด้านขนานกัน 1 คู่ และขัดเงา ตัวอย่างมีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร
- บันทึกภาพและตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างได้แก่ น้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะ ค่าดัชนีหักเห และการเรืองแสงภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตคลื่นยาว (356nm) และคลื่นสั้น (254nm)

2. การวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่าง
 - วิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่างทั้งหมดด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์แบบกระจายพลังงาน
 - วิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่องอิเล็กตรอนโพรบไมโครแอนาไลซิส จำนวน 3 ตัวอย่าง
3. วิเคราะห์โครงสร้างของตัวอย่างด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์
4. วัดการดูดกลืนแสงและวัดสีของตัวอย่างทั้งหมดก่อนเผาด้วยเครื่องเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโต-มิเตอร์
5. วัดการเรืองแสงของตัวอย่างทั้งหมดก่อนเผาด้วยเครื่องฟลูออเรสเซนส์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์
6. ขั้นตอนระหว่างการผลิตคุณภาพพอลิเออะพาไทต์ด้วยความร้อน

ในการทดลองนี้ทำการแบ่งตัวอย่างอะพาไทต์เป็น 2 กลุ่ม สำหรับการทดลองเผา

 - กลุ่มที่ 1 (AP01-AP10) นำไปเผาที่อุณหภูมิ 300°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ ปล่อยให้ตัวอย่างลดอุณหภูมิในเตาเผา และเผาซ้ำที่อุณหภูมิ 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C โดยในแต่ละอุณหภูมิทำการวัดการดูดกลืนแสง วัดสี และการเรืองแสงของทุกตัวอย่าง
 - กลุ่มที่ 2 (AP11-AP20) นำไปเผาที่อุณหภูมิ 300°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศแบบบริดจ์ขึ้น (ใส่ผงแกรไฟต์ลงในครุชีเปิล) ปล่อยให้ตัวอย่างลดอุณหภูมิในเตาเผา และเผาซ้ำที่อุณหภูมิ 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C โดยในแต่ละอุณหภูมิทำการวัดการดูดกลืนแสง วัดสี และการเรืองแสงของทุกตัวอย่าง
7. การวิเคราะห์เชิงความร้อนด้วยเทคนิค DTA ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน และบรรยากาศไนโตรเจน

2.3 ผลการวิจัย

1. คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างอะพาไทต์สีเขียวที่ใช้ในการทดลอง แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างอะพาไทต์สีเขียวจากมาดากัสการ์

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม)	ความถ่วงจำเพาะ	ค่าดัชนีหักเห		การเรืองแสงอัลตราไวโอเล็ต	
			ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	คลื่นยาว (365 nm)	คลื่นสั้น (254 nm)
AP01	0.81	3.24	1.635	1.629	ไม่เรืองแสง	ไม่เรืองแสง
AP02	0.68	3.16	1.632	1.629	ไม่เรืองแสง	ไม่เรืองแสง
AP03	0.84	3.23	1.635	1.629	ไม่เรืองแสง	ไม่เรืองแสง
AP04	0.80	3.20	1.637	1.629	ไม่เรืองแสง	ไม่เรืองแสง
AP05	0.98	3.20	1.632	1.629	ไม่เรืองแสง	ไม่เรืองแสง
AP06	0.59	3.19	1.632	1.629	ไม่เรืองแสง	ไม่เรืองแสง
AP07	0.79	3.22	1.635	1.629	ไม่เรืองแสง	ไม่เรืองแสง
AP08	0.73	3.22	1.635	1.629	ไม่เรืองแสง	ไม่เรืองแสง
AP09	0.73	3.20	1.640	1.629	ไม่เรืองแสง	ไม่เรืองแสง
AP10	0.83	3.19	1.635	1.629	ไม่เรืองแสง	ไม่เรืองแสง

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม)	ความถ่วงจำเพาะ	ค่าดัชนีหักเห		การเรืองแสงอัลตราไวโอเล็ต	
			ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	คลื่นยาว (365 nm)	คลื่นสั้น (254 nm)
AP11	0.77	3.21	1.635	1.629	ไม่เรืองแสง	ไม่เรืองแสง
AP12	0.96	3.18	1.632	1.629	ไม่เรืองแสง	ไม่เรืองแสง
AP13	1.28	3.11	1.635	1.629	ไม่เรืองแสง	ไม่เรืองแสง
AP14	0.94	3.19	1.635	1.629	ไม่เรืองแสง	ไม่เรืองแสง
AP15	0.78	3.18	1.635	1.629	ไม่เรืองแสง	ไม่เรืองแสง
AP16	0.93	3.12	1.635	1.629	ไม่เรืองแสง	ไม่เรืองแสง
AP17	0.945	3.15	1.635	1.629	ไม่เรืองแสง	ไม่เรืองแสง
AP18	1.20	3.20	1.635	1.629	ไม่เรืองแสง	ไม่เรืองแสง
AP19	0.94	3.22	1.634	1.629	ไม่เรืองแสง	ไม่เรืองแสง
AP20	1.06	3.16	1.632	1.629	ไม่เรืองแสง	ไม่เรืองแสง

2. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่างด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์แบบกระจายพลังงาน แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่างด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์แบบกระจายพลังงาน

ตัวอย่าง	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	CaO	Ce ₂ O ₃	MnO	SrO	ผลรวม
AP01	1.07	54.05	1.52	42.80	0.28	0.06	0.22	100.00
AP02	0.94	52.28	4.21	42.06	0.28	0.04	0.19	100.00
AP03	0.98	53.84	1.48	43.20	0.29	0.03	0.19	100.01
AP04	0.89	53.52	1.54	43.48	0.26	0.06	0.25	100.00
AP05	1.01	53.46	1.85	43.19	0.32	0.01	0.16	100.00
AP06	1.05	54.03	1.58	42.81	0.32	0.03	0.19	100.01
AP07	0.81	54.04	2.91	41.88	0.23	0.02	0.12	100.01
AP08	1.01	54.12	1.44	42.93	0.26	0.02	0.22	100.00
AP09	1.05	53.69	1.47	43.27	0.34	0.02	0.17	100.01
AP10	1.02	54.18	1.50	42.70	0.36	0.03	0.21	100.00
AP11	1.03	54.40	1.56	42.45	0.30	0.03	0.23	100.00
AP12	0.91	54.25	1.87	42.54	0.28	0.01	0.15	100.01
AP13	1.05	53.77	1.62	43.06	0.31	0.02	0.18	100.01
AP14	1.07	53.67	1.68	43.10	0.27	0.02	0.21	100.02
AP15	1.05	53.85	1.64	43.03	0.26	0.01	0.16	100.00

ตัวอย่าง	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	CaO	Ce ₂ O ₃	MnO	SrO	ผลรวม
AP16	1.01	53.80	1.48	43.21	0.30	0.03	0.19	100.02
AP17	1.01	53.46	1.85	43.21	0.30	0.01	0.16	100.00
AP18	0.98	54.40	1.61	42.45	0.30	0.03	0.23	100.00
AP19	1.05	53.69	1.64	43.14	0.27	0.02	0.21	100.02
AP20	1.04	54.20	1.50	42.70	0.34	0.03	0.23	100.04

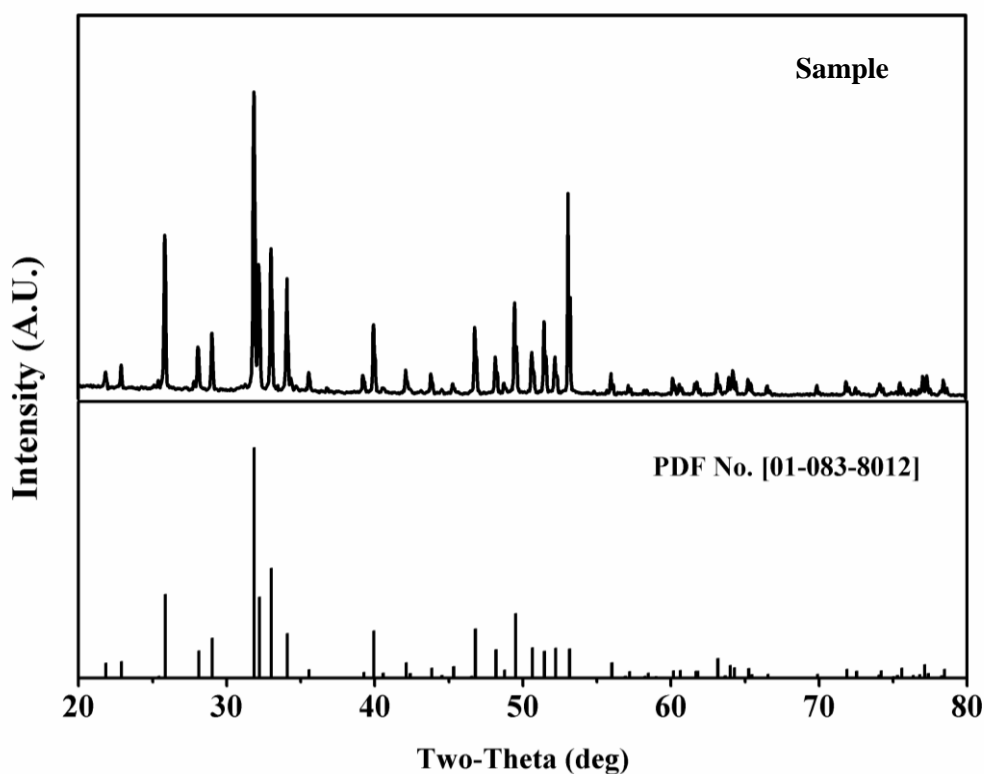
3. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่างด้วยเทคนิคเครื่องอิเล็กตรอนโพรบไมโครแอนาไลซิส แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่างด้วยเทคนิคเครื่องอิเล็กตรอนโพรบไมโครแอนาไลซิส

%wt	AP01			ค่าเฉลี่ย	AP02			ค่าเฉลี่ย	AP03			ค่าเฉลี่ย
Al ₂ O ₃	0.00	0.02	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	2.71	0.91
SiO ₂	0.85	0.88	0.88	0.87	0.85	0.80	0.87	0.84	0.93	0.90	0.91	0.92
SO ₃	0.87	0.88	0.91	0.89	0.85	0.88	0.83	0.85	0.87	0.91	0.88	0.88
Cl	0.14	0.15	0.17	0.15	0.16	0.20	0.19	0.18	0.14	0.16	0.14	0.14
FeO	0.02	0.03	0.04	0.03	0.02	0.07	0.00	0.03	0.00	0.04	0.00	0.01
As ₂ O ₅	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MgO	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.00	0.02
CaO	55.10	55.41	55.36	55.29	55.35	55.39	55.93	55.55	55.25	55.53	55.58	55.45
K ₂ O	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
MnO	0.02	0.02	0.06	0.03	0.03	0.05	0.00	0.03	0.00	0.03	0.02	0.02
F	0.27	0.24	0.17	0.22	0.09	0.15	0.10	0.11	0.18	0.12	0.13	0.14
Na ₂ O	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04
P ₂ O ₅	40.11	40.18	40.70	40.33	40.77	40.78	40.78	40.78	40.37	40.62	40.31	40.43
Tb ₂ O ₃	0.04	0.00	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
ZnO	0.03	0.03	0.02	0.03	0.01	0.07	0.00	0.02	0.05	0.02	0.00	0.02
SrO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr ₂ O ₃	0.01	0.03	0.01	0.02	0.00	0.00	0.03	0.01	0.03	0.03	0.05	0.04
Tm ₂ O ₃₀	0.00	0.00	0.03	0.01	0.02	0.07	0.03	0.04	0.07	0.00	0.00	0.02
CuO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.00	0.01	0.01
La ₂ O ₃	0.00	0.00	0.05	0.02	0.00	0.00	0.04	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01
Y ₂ O ₃	0.06	0.03	0.03	0.04	0.04	0.00	0.03	0.02	0.06	0.00	0.01	0.02
Lu ₂ O ₃	0.00	0.08	0.01	0.03	0.01	0.12	0.10	0.08	0.00	0.11	0.03	0.05

%wt	AP01			ค่าเฉลี่ย	AP02			ค่าเฉลี่ย	AP03			ค่าเฉลี่ย
Ce ₂ O ₃	0.56	0.58	0.52	0.56	0.47	0.57	0.55	0.53	0.49	0.49	0.44	0.47
ThO ₂	0.00	0.00	0.07	0.02	0.17	0.01	0.00	0.06	0.02	0.00	0.03	0.02
Pr ₂ O ₃	0.22	0.18	0.15	0.18	0.09	0.16	0.16	0.13	0.18	0.27	0.21	0.22
UO ₂	0.01	0.02	0.01	0.01	0.05	0.01	0.00	0.02	0.00	0.02	0.01	0.01
Nd ₂ O ₃	0.17	0.13	0.12	0.14	0.11	0.13	0.14	0.13	0.16	0.17	0.14	0.15
PbO	0.04	0.14	0.08	0.08	0.13	0.13	0.19	0.15	0.05	0.04	0.23	0.11
Dy ₂ O ₃	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.05	0.00	0.02	0.04	0.00	0.03	0.02
Gd ₂ O ₃	0.00	0.02	0.00	0.01	0.02	0.09	0.02	0.04	0.00	0.03	0.04	0.02
Sm ₂ O ₃	0.01	0.05	0.02	0.03	0.02	0.03	0.04	0.03	0.00	0.03	0.00	0.01
Ho ₂ O ₃	0.06	0.00	0.00	0.02	0.03	0.00	0.03	0.02	0.03	0.00	0.01	0.02
Yb ₂ O ₃	0.06	0.02	0.00	0.03	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
Er ₂ O ₃	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ผลรวม				99.11				99.80				100.20

4. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวอย่างอะพาไทต์สีเขียวก่อนเผาด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ เปรียบเทียบตำแหน่งกับฐานข้อมูลอะพาไทต์ PDF No.[01-083-8012] แสดงในรูปที่ 2.6






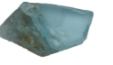




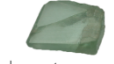


























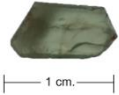
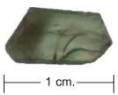
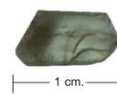
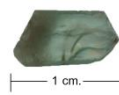
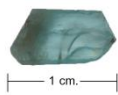
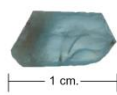
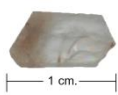
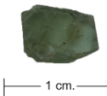
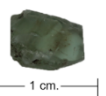
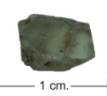
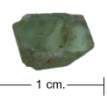
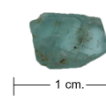
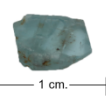



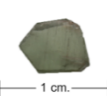
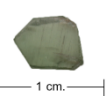
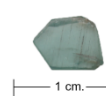
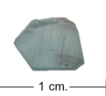

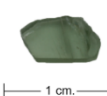
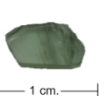


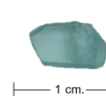



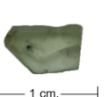
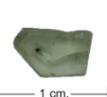

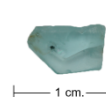
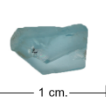

รูปที่ 2.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวอย่างอะพาไทต์สีเขียวก่อนเผาด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์

5. ผลการปรับปรุงคุณภาพพลอยอะพาไทต์ด้วยความร้อน











































5.1 ภาพถ่ายของตัวอย่างอะพาไทต์ก่อนและหลังเผาอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 300°C – 800°C ระยะเวลาเย็นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศ และในบรรยากาศแบบรีดักชัน แสดงในตารางที่ 2.4 และ 2.5




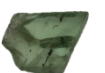

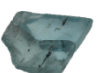


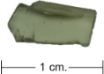
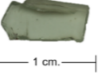
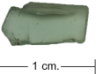
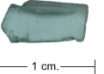
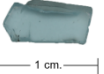






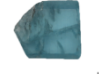

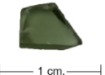



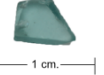
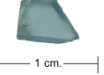
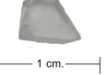
ตารางที่ 2.4 สีของอะพาไทต์ก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C – 800°C ระยะเวลาเย็นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ						
	ก่อนเผา	300°C	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C
AP01	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.
AP02	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.
AP03	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.
AP04	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.
AP05	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.

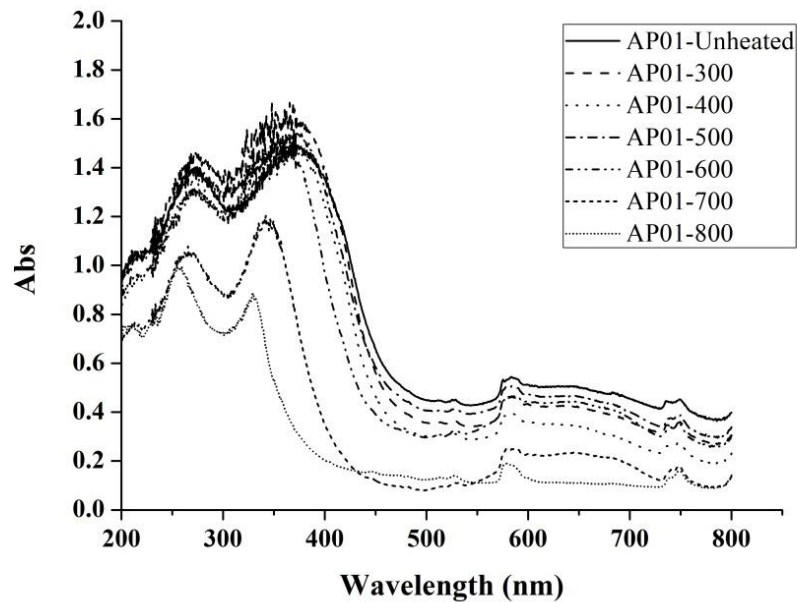
ตัวอย่าง	อุณหภูมิ						
	ก่อนเผา	300°C	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C
AP06	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.
AP07	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.
AP08	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.
AP09	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.
AP10	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.

ตารางที่ 2.5 สีของอะพาไทต์ก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C – 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศแบบรีดักชัน

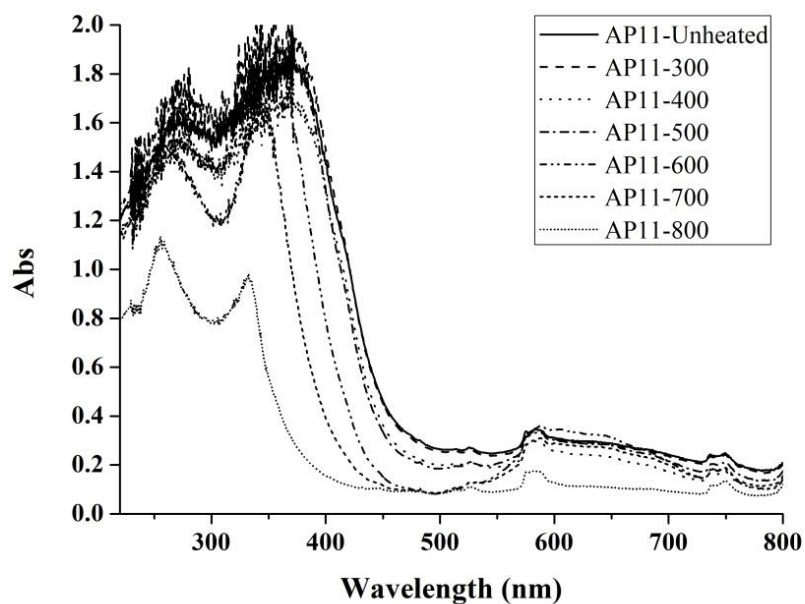
ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)						
	ก่อนเผา	300°C	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C
AP11	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.
AP12	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.
AP13	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.
AP14	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.
AP15	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.
AP16	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)						
	ก่อนเผา	300°C	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C
AP17	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.
AP18	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.
AP19	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.
AP20	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.	 1 cm.

5.2 ผลการวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ในช่วงความยาวคลื่น 300 – 800 nm ของตัวอย่างอะพาไทต์ก่อนเผาและตัวอย่างที่เผาที่อุณหภูมิ 300°C - 800°C ในบรรยากาศ และตัวอย่างที่เผาในบรรยากาศแบบรีดักชันมีลักษณะเหมือนกัน ตัวอย่าง AP01 เผาในบรรยากาศ แสดงในรูปที่ 2.7 และตัวอย่าง AP11 แสดงในรูปที่ 2.8 เผาในบรรยากาศแบบรีดักชัน ผลการวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ แสดงในภาคผนวก ก



รูปที่ 2.7 สเปกตรากการดูดกลืนแสงในช่วง 200 – 800 nm ของตัวอย่างอะพาไทต์ AP01 ก่อนเผาและหลังเผาในบรรยากาศที่อุณหภูมิ 300 – 800°C



รูปที่ 2.8 สเปกตรากการดูดกลืนแสงในช่วง 200 – 800 nm ของตัวอย่างอะพาไทต์ AP11 ก่อนเผาและหลังเผาในบรรยากาศแบบรีดักชันที่อุณหภูมิ 300 – 800°C

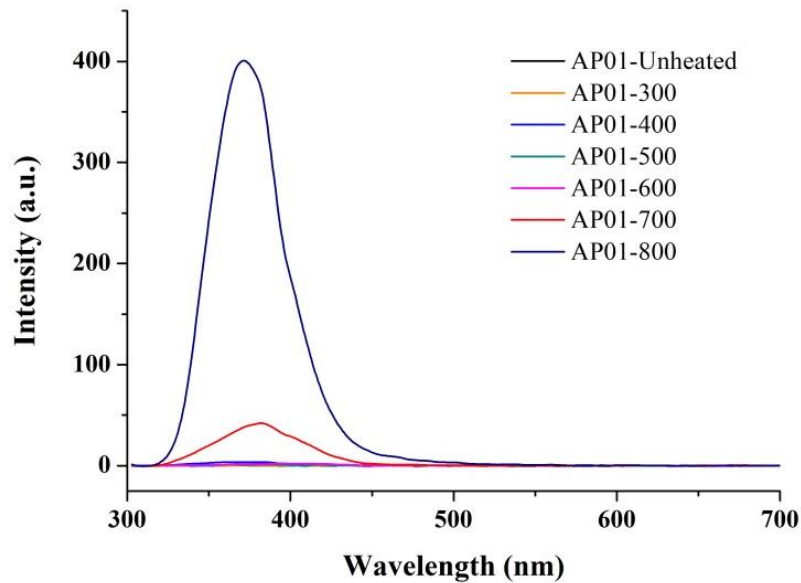
5.3 ผลการวัดสี CIE L*a*b* ของตัวอย่างตัวอย่างอะพาไทต์ก่อนเผาและตัวอย่างที่เผาที่อุณหภูมิ 400°C – 800°C ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ในบรรยากาศ (AP01-AP10) และตัวอย่างที่เผาในบรรยากาศแบบรีดักชัน (AP11-AP20) แสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 CIE L*a*b* ของตัวอย่างตัวอย่างอะพาไทต์ก่อนเผาและตัวอย่างที่เผาที่อุณหภูมิ 400°C – 800°C ในบรรยากาศ และตัวอย่างที่เผาในบรรยากาศแบบรีดักชัน

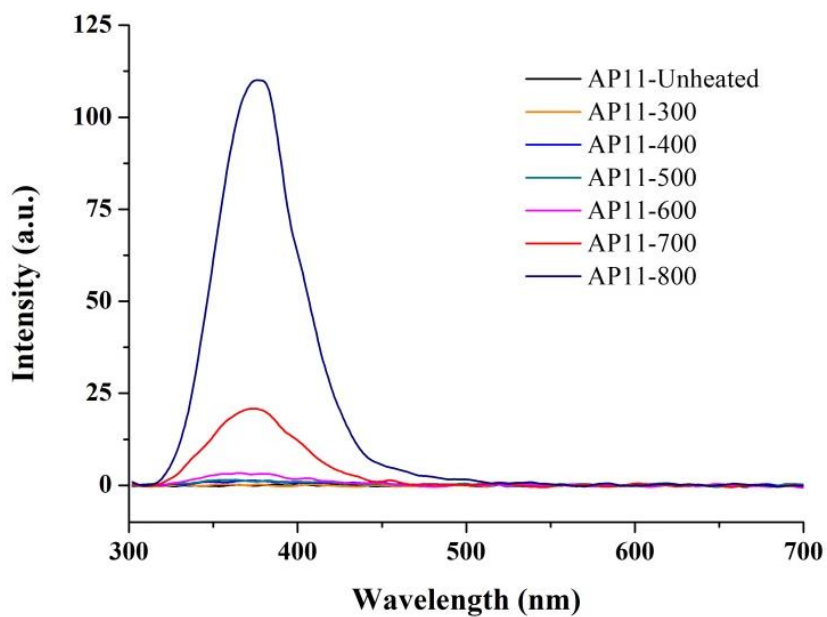
ตัวอย่าง	Unheated			300.00			400.00			500.00			600.00			700.00			800.00		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
AP01	70.25	-15.63	18.73	70.34	-15.28	17.42	74.36	-12.95	15.50	67.20	13.03	14.83	71.74	-14.44	3.79	87.43	-12.41	-3.70	89.08	-1.43	2.72
AP02	77.23	-15.28	22.84	74.50	-14.04	20.46	79.20	-15.65	15.17	74.48	-20.99	11.99	79.33	-22.62	-4.46	85.01	-18.25	-10.75	88.85	-2.70	1.20
AP03	67.27	-6.86	16.31	71.04	-13.45	25.45	79.20	-15.65	15.17	79.53	-18.74	12.50	82.46	-19.05	-1.33	91.41	-17.11	-6.72	94.09	-2.09	1.37
AP04	64.50	-14.77	17.10	63.98	-9.42	25.12	73.36	-12.09	18.96	71.02	-15.58	22.10	78.74	-16.25	3.79	77.53	-9.71	-0.53	84.55	-0.80	2.63
AP05	65.92	-17.57	18.67	66.06	-17.63	17.76	71.45	-16.97	14.97	70.80	-22.29	11.92	74.85	-24.51	-4.60	76.14	-18.29	-11.53	76.65	-2.87	1.68
AP06	71.21	-7.66	26.93	63.49	-7.24	31.55	66.89	-8.48	31.89	65.12	-12.18	29.24	75.27	-12.77	6.99	78.00	-7.98	1.10	80.77	-0.01	4.44
AP07	78.63	-14.32	26.69	73.14	-9.61	25.71	77.97	-9.53	22.57	85.63	-15.74	21.81	78.32	-18.64	3.27	84.23	-10.35	-2.76	84.23	-10.35	-2.76
AP08	72.47	-12.85	25.55	72.97	-12.83	26.03	75.97	-13.96	21.77	72.20	-19.94	19.67	79.30	-21.23	-2.70	75.45	-14.07	-7.95	75.45	-14.07	-7.95
AP09	68.68	-7.94	14.68	64.60	-12.66	19.01	77.54	-12.29	18.63	73.39	-9.71	12.13	71.31	-11.82	5.30	81.35	-9.78	-0.28	81.35	-9.78	-0.28
AP10	68.73	-15.03	27.00	68.54	-15.26	25.91	70.54	-14.99	21.79	70.70	-20.61	14.40	74.84	-26.85	-3.31	84.56	-21.53	-13.24	84.56	-21.53	-13.24
AP11	65.10	-16.39	18.24	67.07	-16.83	18.73	72.79	-14.04	18.49	75.09	-17.42	10.26	80.40	-21.57	-1.16	85.60	-16.92	-8.42	85.60	-16.92	-8.42
AP12	77.73	-14.60	21.48	78.01	-14.30	19.88	81.62	-13.64	17.11	80.45	-16.54	12.10	83.46	-20.88	-4.52	84.92	-13.56	-7.91	84.92	-13.56	-7.91
AP13	74.33	-13.06	25.99	69.55	-12.79	27.58	67.63	-12.72	23.27	70.50	-16.48	23.74	75.69	-19.76	1.76	61.92	-4.74	7.33	61.92	-4.74	7.33
AP14	78.47	-12.53	24.67	75.05	-11.91	22.22	77.64	-13.56	22.14	73.86	-17.36	15.43	77.49	-21.22	0.17	91.11	-16.11	-5.84	91.11	-16.11	-5.84
AP15	69.35	-13.65	20.56	68.12	-13.09	18.78	80.34	-14.34	18.13	73.86	-17.36	15.43	77.40	-18.35	1.67	85.53	-13.14	-5.52	85.53	-13.14	-5.52
AP16	57.22	-14.03	20.26	52.80	-12.56	18.93	62.20	-12.23	18.02	61.47	-12.30	16.24	70.19	-18.66	4.53	61.65	-7.90	1.55	61.65	-7.90	1.55

ตัวอย่าง	Unheated			300.00			400.00			500.00			600.00			700.00			800.00		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
AP17	60.35	-19.11	23.97	58.27	-18.95	22.46	61.29	-17.70	19.39	67.37	-23.04	16.90	72.08	-28.29	-2.19	80.93	-21.83	-10.78	80.93	-21.83	-10.78
AP18	81.31	-13.01	20.61	78.30	-14.73	20.51	81.26	-15.30	16.94	75.82	-17.65	11.55	83.62	-17.72	-2.16	74.43	-12.86	-6.54	74.43	-12.86	-6.54
AP19	81.02	-13.55	21.85	76.21	-11.42	21.21	85.38	-13.66	16.81	82.95	-18.07	11.77	74.48	-17.98	-0.80	87.96	-14.80	-7.68	87.96	-14.80	-7.68
AP20	77.68	-15.12	21.25	80.34	-15.93	22.81	85.63	-13.85	20.42	83.65	-13.46	15.43	86.23	-13.52	4.59	89.99	-9.06	-2.30	89.99	-9.06	-2.30

5.4 ผลการวัดการเรืองแสงด้วยเครื่องฟลูออเรสเซนส์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ กำหนดค่าความยาวคลื่นของพลังงานกระตุ้น 275 nm และบันทึกสเปกตรัมการเรืองแสงในช่วง 300 – 800 nm ของตัวอย่างอะพาไทต์ก่อนเผาและตัวอย่างที่เผาที่อุณหภูมิ 300 °C - 800 °C ในบรรยากาศ ผลการทดลองของตัวอย่างที่เผาในบรรยากาศและในบรรยากาศแบบรีดักชันมีลักษณะเหมือนกัน ผลการบันทึกสเปกตรัมการเรืองแสงในช่วง 300 – 800 nm ตัวอย่าง AP01 เผาในบรรยากาศ แสดงในรูปที่ 2.9 และตัวอย่าง AP11 เผาในบรรยากาศแบบรีดักชัน แสดงในรูปที่ 2.10 ผลการวัดการเรืองแสงด้วยเครื่องฟลูออเรสเซนส์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ของตัวอย่างทั้งหมด แสดงในภาคผนวก ข

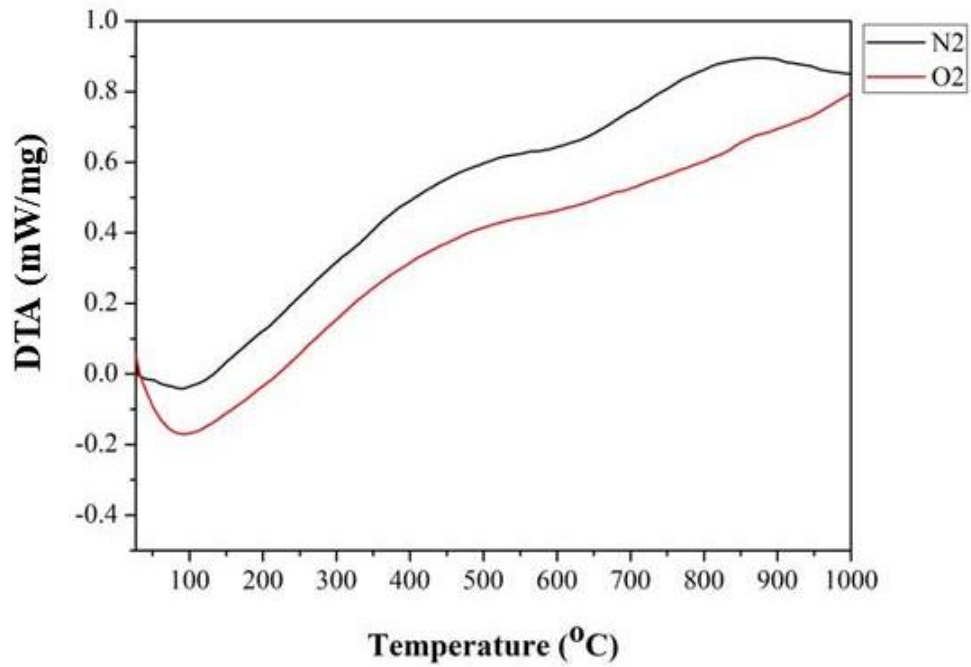


รูปที่ 2.9 สเปกตรากการเรืองแสงในช่วง 300 – 700 nm ของตัวอย่าง AP01 ก่อนเผาและหลังเผาในบรรยากาศที่อุณหภูมิ 300 – 800 °C



รูปที่ 2.10 สเปกตรัมการเรืองแสงในช่วง 300 – 700 nm ของตัวอย่าง AP011 ก่อนเผาและหลังเผาในบรรยากาศรีดักชันที่อุณหภูมิ 300 – 800 °C

6. ผลการทดสอบด้วยเครื่องมือวิเคราะห์เชิงความร้อน (Differential thermal analysis; DTA) ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ $30^{\circ}\text{C} - 1,000^{\circ}\text{C}$ อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ $10^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$ ภายใต้บรรยากาศออกซิเจนและบรรยากาศไนโตรเจน แสดงในรูปที่ 2.11



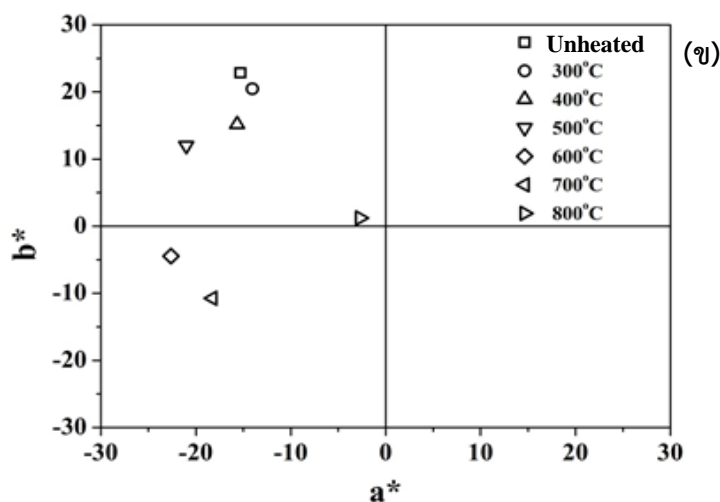
รูปที่ 2.11 กราฟ DTA ของตัวอย่างอะพาไทต์สี่เหลี่ยมจากมาดากัสการ์ภายใต้บรรยากาศแบบออกซิเจน และภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

บทที่ 3

อภิปรายผลการทดลอง

3.1 การเปลี่ยนแปลงสีของอะพาไทต์สีเขียวจากแหล่งมาดากัสการ์เมื่อได้รับความร้อน

การทดลองเผาอะพาไทต์สีเขียวจากแหล่งมาดากัสการ์ที่อุณหภูมิ 300 – 800 °C โดยแบ่งกลุ่มการทดลองออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 เผาในบรรยากาศ และกลุ่มที่ 2 เผาในบรรยากาศแบบรีดักชัน ระยะเวลาในการยึนอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง และปล่อยให้ตัวอย่างเย็นในเตาเผา พบว่าสีของตัวอย่างทั้ง 2 กลุ่มมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกัน จากการวัดสีด้วยเครื่องยูวี วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยใช้ระบบการวัดสี CIE L*a*b* color index ค่า L* ใช้กำหนดค่าความสว่าง (Lightness) L = 0 สีที่ได้จะมีดำเป็นสีดำ L = 100 สีที่ได้จะสว่างเป็นสีขาวค่า a* ใช้กำหนดสีแดงหรือสีเขียว a* เป็น + แสดงว่าวัตถุมีสีออกแดง a* เป็น - แสดงว่าวัตถุมีสีออกเขียว b* ใช้กำหนดสีเหลืองหรือน้ำเงิน b* เป็น + วัตถุมีสีออกเหลือง b* เป็น - วัตถุมีสีออกน้ำเงิน ตัวอย่างอะพาไทต์ที่ใช้ในการทดลองก่อนการเผาทุกตัวมีค่า a* เป็นค่าลบ แสดงถึงสีเขียว และมีค่า b* เป็นค่าบวก แสดงถึงสีเหลือง จากการสังเกตด้วยตาพบว่าตัวอย่างมีสีเขียวอมเหลือง หลังจากการเผาตัวอย่างอะพาไทต์ที่อุณหภูมิ 300 - 800 °C พบว่าสีของตัวอย่างเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเมื่อเผาถึงอุณหภูมิในช่วง 600 - 700 °C ค่า a* มีค่าเป็นลบมากขึ้น และค่า b* ของตัวอย่างเปลี่ยนจากค่าบวกเป็นลบ แสดงถึงสีน้ำเงินในตัวอย่างมากขึ้น จากสังเกตตัวอย่างด้วยตาพบว่า การเผาที่อุณหภูมิในช่วง 600 - 700 °C ตัวอย่างจะมีสีฟ้าอมเขียว



รูปที่ 3.1 (ก) รูปตัวอย่างแสดงสีของอะพาไทต์ก่อนเผา และหลังจากเผาที่อุณหภูมิ 300 - 800 °C
(ข) ตัวอย่างการพลอตกราฟค่า a*- b* ของตัวอย่างอะพาไทต์ก่อนเผา และหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 300 - 800 °C

การเปลี่ยนแปลงสีของอะพาไทต์ที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงในรูปที่ 3.1(ก) สอดคล้องกับการวัดสีด้วยเครื่องยูวี วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เมื่อเผาตัวอย่างซ้ำอีกครั้งที่อุณหภูมิ 800 °C ตัวอย่างเปลี่ยนสีจากฟ้าอมเขียวเป็นใสไม่มีสี รูปที่ 3.1(ข) แสดงกราฟตัวอย่างการพลอตค่า a^* - b^* ของตัวอย่างอะพาไทต์ก่อนเผา และหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 300 - 800 °C

3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางผลึก และการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่างอะพาไทต์

จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางผลึกของตัวอย่างเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลแร่อะพาไทต์ (PDF No. 01-083-8012) แสดงในรูปที่ 2.5 พบว่าผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ของ อะพาไทต์ที่ใช้ในการทดลองตรงกับตำแหน่งของข้อมูลอ้างอิง ข้อมูลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีจากเครื่องเอ็กซ์เรย์ ฟลูออเรสเซนซ์แบบกระจายพลังงาน และเครื่องอิเล็กตรอนโพรบไมโครแอนาไลซิส พบว่าตัวอย่างมีแคลเซียม (Ca) และฟอสฟอรัส (P) เป็นองค์ประกอบหลัก และเนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ ฟลูออเรสเซนซ์แบบกระจายพลังงานมีข้อจำกัด ไม่สามารถวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบได้ทั้งหมด การวิเคราะห์ด้วยเครื่องอิเล็กตรอนโพรบไมโครแอนาไลซิสจากตัวอย่าง พบว่าในตัวอย่างมีองค์ประกอบของธาตุอื่นๆ ที่ไม่ใช่โลหะ และองค์ประกอบของธาตุที่เป็นโลหะ องค์ประกอบของกลุ่มที่ไม่ใช่โลหะที่สำคัญ ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) และซัลเฟอร์ ไตรออกไซด์ (SO₃) มีปริมาณ 0.84 - 0.92% และ 0.85 - 0.89% ทั้ง 2 องค์ประกอบนี้มีรายงานว่ามีความสัมพันธ์กับการเกิดความผิดปกติทางผลึก (Point defect) ของอะพาไทต์ธรรมชาติสีเขียว และสีน้ำเงิน (L.G. Gilinskaya, R.I. Mashkovtsev, 1995) นอกจากนี้ยังตรวจพบองค์ประกอบของธาตุหายาก (Rare earth element) ได้แก่ ซีเรียมออกไซด์ (Ce₂O₃) 0.47 - 0.56% เพอร์ซีโอดีเมียมออกไซด์ (Pr₂O₃) 0.13 - 0.22% และนีโอดีเมียมออกไซด์ (Nd₂O₃) 0.13 - 0.15% ซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุของการเรืองแสงของอะพาไทต์ อย่างไรก็ตามในตัวอย่างอะพาไทต์สีเขียวธรรมชาติจากมาดากัสการ์ที่ไม่ได้ผ่านการเผาทั้งหมดตรวจไม่พบการเรืองแสง แสดงให้เห็นว่าเมื่อเผาตัวอย่างอะพาไทต์ด้วยความร้อนแล้วจึงทำให้เกิดการเรืองแสงของตัวอย่างเพิ่มขึ้น

3.3 การวิเคราะห์เชิงความร้อน (Differential thermal analysis; DTA)

การวิเคราะห์เชิงความร้อนทำการทดสอบในช่วงอุณหภูมิที่ 30°C - 1,000 °C อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 10 °C/นาที ภายใต้บรรยากาศออกซิเจนและบรรยากาศไนโตรเจน ผลการทดสอบมีลักษณะคล้ายกันแสดงในรูปที่ 2.13 กราฟ DTA แสดงตำแหน่ง Endothermic Peak ที่อุณหภูมิ 100°C เนื่องจากกระบวนการ Dehydration แต่ในการทดสอบในบรรยากาศไนโตรเจนให้ข้อมูลที่ชัดเจนกว่าการทดสอบในบรรยากาศออกซิเจน กราฟ DTA แสดงตำแหน่ง Exothermic Peak ที่อุณหภูมิ 640°C ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีเขียวของอะพาไทต์เป็นสีฟ้าอมเขียว และตำแหน่ง Exothermic Peak ที่อุณหภูมิ 878.4°C ซึ่งเป็นผลจากจุดหลอมเหลวของ CaCO₃

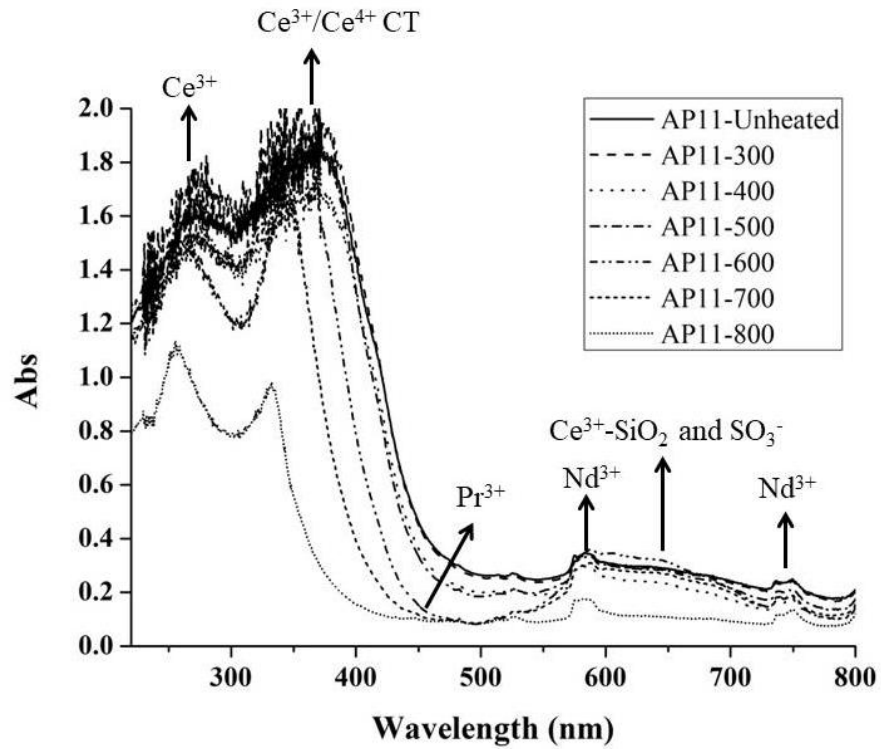
3.4 การเปลี่ยนแปลงการเรืองแสงของอะพาไทต์สีเขียวจากแหล่งมาดากัสการ์เมื่อได้รับความร้อน

การเผาอะพาไทต์สีเขียวจากมาดากัสการ์ในบรรยากาศ และในบรรยากาศแบบรีดักชันพบว่า ภายใต้แสง Daylight สีของตัวอย่างเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดจากสีเขียวเป็นสีฟ้าอมเขียว เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600°C รูปที่ 3.1(ก) และจากการตรวจสอบเบื้องต้นด้วยเครื่อง UV-lamp (254 nm) พบว่าตัวอย่างเริ่มมีการเรืองแสงสีม่วงเกิดขึ้นในตัวอย่างที่เผาที่อุณหภูมิ 600°C เช่นเดียวกัน และเรืองแสงมากที่สุดเมื่อเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิ 800°C เมื่อตัวอย่างเปลี่ยนเป็นไม่มีสี แสดงในรูปที่ 3.2(ข) กราฟ a* - b* ในรูปที่ 3.1(ข) พบว่ามีการเปลี่ยนตำแหน่งสีของตัวอย่างจากบริเวณสีเขียว-เหลือง เป็นบริเวณสีเขียวน้ำเงิน เมื่อเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิ 600°C และ 700°C และตำแหน่งของสีเข้าใกล้จุดศูนย์กลางเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 800°C ตัวอย่างเปลี่ยนเป็นไม่มีสี

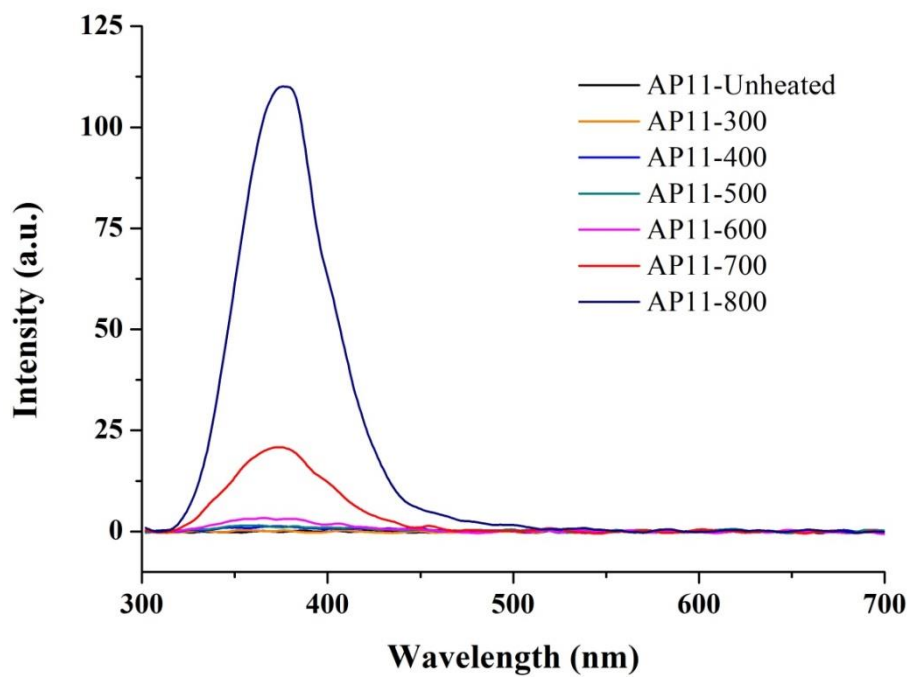


รูปที่ 3.2 (ก) สีของตัวอย่างอะพาไทต์ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300 – 800°C ภายใต้แสง Daylight (ข) การเรืองแสงตัวอย่างอะพาไทต์ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300 – 800°C ภายใต้แสง UV ความยาวคลื่น 254 nm

สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างอะพาไทต์สีเขียวจากแหล่งมาดากัสการ์ที่อุณหภูมิ 300 – 800°C ของตัวอย่างทั้ง 2 กลุ่ม มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกัน รูปที่ 3.3 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง AP11 ก่อนเผา และหลังเผาในบรรยากาศรีดักชัน พบการดูดกลืนแสงของธาตุหายาก Ce^{3+} , Pr^{3+} และ Nd^{3+} เนื่องจากตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองตรวจพบธาตุเหล่านี้เป็นองค์ประกอบ แถบการดูดกลืนบริเวณ 373 nm ของ Ce^{3+}/Ce^{4+} และการดูดกลืนที่ตำแหน่งประมาณ 300 nm ของ Ce^{3+} (4f-5d) การดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 450 nm ของ Pr^{3+} (4f-5d) และการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 580 และ 750 nm ของ Nd^{3+} และตำแหน่งแถบการดูดกลืนแสงที่สำคัญบริเวณ 600 nm ที่อ้างว่าเป็นการดูดกลืนแสงเนื่องจากศูนย์กลางสีของ $Ce^{3+} - SiO_3^-$ และ SO_3^{3-} (L.G. Gilinskaya, R.I. Mashkovtsev, 1995)



รูปที่ 3.3 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP11 ก่อนเผา และหลังเผาภายใต้บรรยากาศรีดักชันที่อุณหภูมิ 300 -800°C



รูปที่ 3.4 สเปกตรากการเรืองแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP11 ก่อนเผา และหลังเผาภายใต้บรรยากาศรีดักชันที่อุณหภูมิ 300 -800°C

เมื่อเผาตัวอย่างอะพาไทต์ที่อุณหภูมิสูงขึ้นไปจนถึง 700°C พบว่าอะพาไทต์สีเขียวเปลี่ยนเป็นสีฟ้าอมเขียว สเปกตรากการดูดกลืนแสงในรูปที่ 3.3 ของตัวอย่างก่อนเผาจนกระทั่งถึงตัวอย่างหลังเผาที่อุณหภูมิ 700°C พบการดูดกลืนแสงที่บริเวณ 600 nm แสดงถึงศูนย์กลางสีของ $\text{Ce}^{3+} - \text{SiO}_3^-$ และ SO^{3-} แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 800°C สีของตัวอย่างอะพาไทต์เปลี่ยนเป็นไม่มีสี แถบการดูดกลืนแสงของ $\text{Ce}^{3+} - \text{SiO}_3^-$ และ SO^{3-} หายไปเช่นเดียวกัน แต่ยังคงพบตำแหน่งการดูดกลืนแสงของธาตุหายาก ได้แก่ Ce^{3+} ที่ตำแหน่ง 275 nm Pr^{3+} ที่ตำแหน่ง 450 nm และตำแหน่งการดูดกลืนแสงของ Nd^{3+} ที่ตำแหน่ง 590 nm และ 750 nm หลังการเผาตัวอย่างอะพาไทต์ทำให้ Ce^{4+} เปลี่ยนเป็น Ce^{3+} มากขึ้น สเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ ตำแหน่ง 373 nm ที่แสดงถึง $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$ Charge transfer ลดลงเมื่อเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงขึ้นไป และการดูดกลืนแสงของ Ce^{3+} ($4f-5d$) ที่ตำแหน่ง 273 nm มีการดูดกลืนแสงที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับตำแหน่งของ $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$ Charge transfer

การตรวจสอบการเรืองแสงเบื้องต้นด้วย UV-lamp ความยาวคลื่น 254 nm แสดงในรูปที่ 3.2 พบว่าตัวอย่างเริ่มมีการเรืองแสงสีม่วงหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 600°C และเรืองแสงมากที่สุดหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 800°C ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องอิเล็กตรอนไมโครแอนาไลซิสพบธาตุหายาก Ce, Pr และ Nd ซึ่งธาตุหายากเหล่านี้มักจะเป็นสาเหตุของการเรืองแสงในอัญมณี การวิเคราะห์การเรืองแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ก่อนเผาและอะพาไทต์ที่เผาที่อุณหภูมิ $300 - 800^{\circ}\text{C}$ ด้วยเครื่องฟลูออเรสเซนส์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยให้พลังงานกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 275 nm และวัดการปล่อยพลังงานในช่วงความยาวคลื่น $300 - 700\text{ nm}$ พบว่าตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600°C , 700°C และ 800°C เกิดการคายพลังงานที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 365 nm ตรงกับตำแหน่งการคายพลังงานของ Ce^{3+} จากระดับพลังงาน $5d \rightarrow 4f$ (${}^5D_{3/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$ และ ${}^5D_{3/2} \rightarrow {}^2F_{5/2}$) (A.D. Sontakke, J. Ueda & S. Tanabe, 2016 และ A. Barrera-Villatoro, 2017) การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง $270 - 380\text{ nm}$ แสดงให้เห็นว่าในตัวอย่างมีทั้ง Ce^{3+} และ Ce^{4+} การเกิด Quenching ของ Ce^{4+} ทำให้คุณสมบัติในการเรืองแสงซึ่งเกิดจาก Ce^{3+} ลดลง เนื่องจากการเกิด $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$ charge transfer ที่ตำแหน่งความยาวคลื่นสูงกว่า (A.D. Sontakke et al., 2015, W.Chewpraditkul et al., 2011 และ E. Van Der kolk et al., 2007) เมื่อเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิมากกว่า 600°C พบว่าการเกิด $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$ charge transfer ลดลง ทำให้พบการคายพลังงานของ Ce^{3+} ของตัวอย่างที่ตำแหน่ง 365 nm เพิ่มขึ้น การคายพลังงานของ Pr และ Nd หลังจากได้รับพลังงานกระตุ้นไม่สามารถตรวจสอบได้ อาจเกิดจากปริมาณของธาตุที่ตรวจพบมีปริมาณต่ำกว่า Ce มาก

บทที่ 4

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอะพาไทต์สีเขียวจากมาดากัสการ์เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 300 – 800 °C พบว่าการเปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่างอะพาไทต์มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติในการเรืองแสงของอะพาไทต์ สเปกตรากการดูดกลืนแสงของอะพาไทต์ก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 300 – 800 °C แสดงให้เห็นถึงการลดลงของ Ce^{4+} เนื่องจากการลดลงของ Ce^{3+} / Ce^{4+} Charge transfer ที่ตำแหน่ง 373 nm สีเหลือง (b^*) ของตัวอย่างมีค่าติดลบมากขึ้นแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่างว่ามีสีน้ำเงิน ($-b^*$) เพิ่มมากขึ้น ในช่วงการเผาที่อุณหภูมิ 300 – 700 °C ก่อนที่สีของตัวอย่างจะหายไปเมื่อเผาถึงอุณหภูมิ 800 °C ในส่วนของคุณสมบัติการเรืองแสงของตัวอย่างที่มีความสัมพันธ์กับสีของอะพาไทต์ที่เปลี่ยนไป การติดตามคุณสมบัติการเรืองแสงของตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 300 – 800 °C พบว่าตัวอย่างเริ่มมีการเรืองแสงเกิดขึ้นเมื่อเผาตัวอย่างถึงอุณหภูมิ 600 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ทำให้ตัวอย่างเปลี่ยนเป็นสีฟ้าอมเขียว และเห็นการเปลี่ยนแปลงเป็นสีฟ้าอมเขียวชัดเจนหลังการเผาที่อุณหภูมิ 700 °C จากสเปกตรากการเรืองแสงของตัวอย่างอะพาไทต์แสดงให้เห็นถึงการคายพลังงานของ Ce^{3+} ที่ตำแหน่ง 365 nm เริ่มเกิดขึ้นเมื่อเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิ 600 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ตัวอย่างเปลี่ยนเป็นสีฟ้าอมเขียว และมีการคายพลังงานสูงที่สุดหลังจากเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิ 800 °C จากผลการทดลองทำให้สามารถสรุปได้ว่าคุณสมบัติการเรืองแสงสามารถใช้ในการวิเคราะห์อะพาไทต์สีฟ้าอมเขียวที่ผ่านการเผามาแล้วได้

บทที่ 5 ผลผลิต

ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

P. Chindudsadeegul, M. Jamkratoke. (2018). *Effect of heat treatment on the luminescence properties of natural apatite*. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 204 276–280.

รายงานการเงิน

สัญญาเลขที่ 178/2561

โครงการวิจัยประเภท งบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) มหาวิทยาลัยบูรพา
ประจำปีงบประมาณ 2561

ชื่อโครงการ การพัฒนาวิธีวิเคราะห์ห่อพาไทด์สีฟ้าอมเขียวจากมาตากลักส์การ์ที่ผ่านการเผา
โดยใช้เทคนิคทางสเปกโตรเมทรี

ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน อาจารย์ปริญญา ชินดุชฎีกุล

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2560 ถึงวันที่ 21 มิถุนายน พ.ศ. 2562

ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี 8 เดือน นับตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2560

รายรับ

จำนวนเงินที่ได้รับ (เป็นยอดเงินที่ถูกหักค่าสาธารณูปโภคออกแล้ว งดละ 10%)

งวดที่ 1 (50%) 124,200 บาท เมื่อวันที่ 21 กันยายน พ.ศ. 2560

งวดที่ 1 (40%) 99,360 บาท เมื่อวันที่ 22 มกราคม พ.ศ. 2562

งวดที่ 1 (10%) 24,840 บาท รอทำเรื่องเบิกเมื่อส่งรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์เสร็จสิ้นแล้ว

รวม⁽¹⁾ 248,400 บาท ((1) + ค่าสาธารณูปโภค 10% = 276,000 บาท)

รายจ่าย

รายการ	งบประมาณที่ตั้งไว้	งบประมาณที่ใช้จริง	จำนวนเงินคงเหลือ/ เกิน
1. ค่าตอบแทน	33,600	33,600	33,600
2. ค่าวัสดุ	100,000	100,000	100,000
3. ค่าใช้สอย	114,800	114,800	114,800
4. ค่าครุภัณฑ์	-	-	-
5. ค่าใช้จ่ายอื่นๆ - ค่าสาธารณูปโภค	27,600	27,600	27,600
รวม	276,000	276,000	276,000



(นางสาวปริญญา ชินดุชฎีกุล)
หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

เอกสารอ้างอิง

ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2562). ห้องปฏิบัติการ (Laboratory) และเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง (Advanced Analytical Tools). สืบค้น 12 ธันวาคม 2561, จาก <http://www.geo.sc.chula.ac.th/labs>

A.D. Sontakke, J. Ueda, S. Tanabe. (2016). *Effect of synthesis conditions on Ce³⁺ luminescence in borate glasses*, Journal of Non-Crystalline Solids. 431. 150–153.

E. Van Der Kolk, J.T.M. De Haas, A.J.J. Bos, C.W.E. Van Eijk, P. Dorenbos. (2007). *Luminescence quenching by photoionization and electron transport in a LaAlO₃:Ce³⁺ crystal*. Journal of applied physic. 101. 4–7.

J.C. Elliott, R.M. Wilson and S.E.P. Dowker. (2002). *Apatite Structure*. Advances in X-ray Analysis. 45. 172-181.

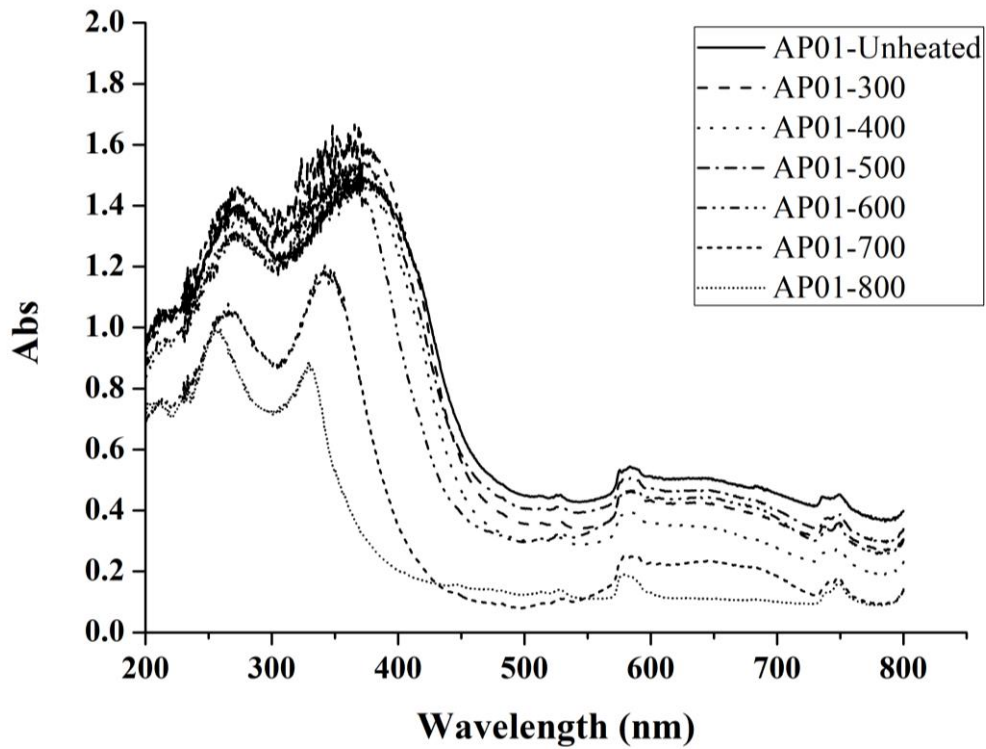
J. M. Hughes, A. Ertl, H. J. Bernhardt, G.R. Rossman and J. Rakovan. (2004). *Mn-Rich Apatite from Austria: Crystal Structure, Chemical Analysis, and spectroscopic investigations*. American Mineralogist. 89. 629-632.

L.G. Gilinskaya and R. I. Mashkovtsev. (1995). *Blue and green centers in natural apatites by ERS and optical spectroscopy data*. Journal of Structural Chemistry. 36(1). 76-86.

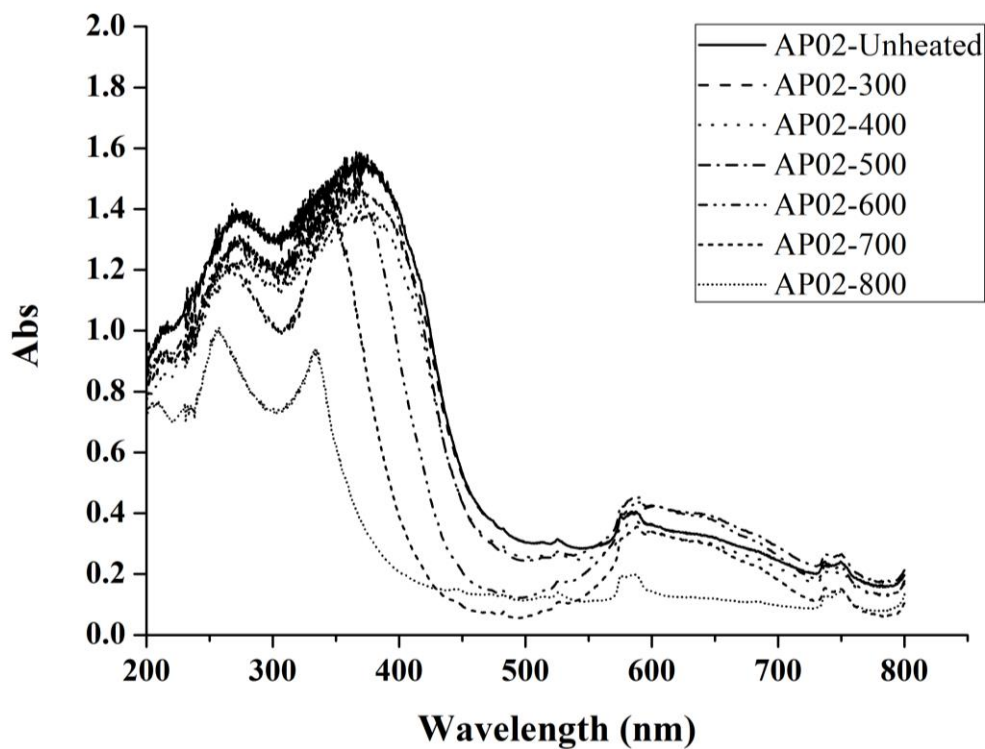
W. Chewpraditkul, X. He, D. Chen, Y. Shen, Q. Sheng, B. Yu, M. Nikl, R. Kucerkova, A. Beitlerova, C. Wanarak, A. Phunpueok. (2011). *Luminescence and scintillation of Ce³⁺-doped oxide glass with high Gd₂O₃ concentration*. Physica status solidi (a) (Phys Status Solidi). 208(12). 2830-2832.

ภาคผนวก ก

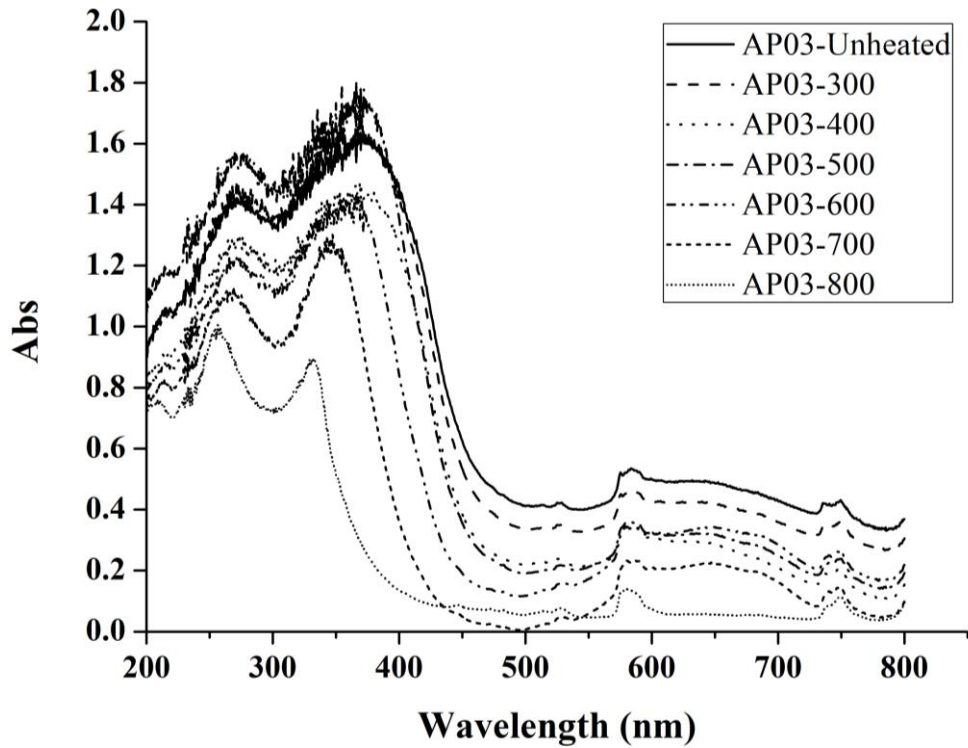
ผลการวัดการดูดกลืนแสงของตัวอย่างอะพาไทต์



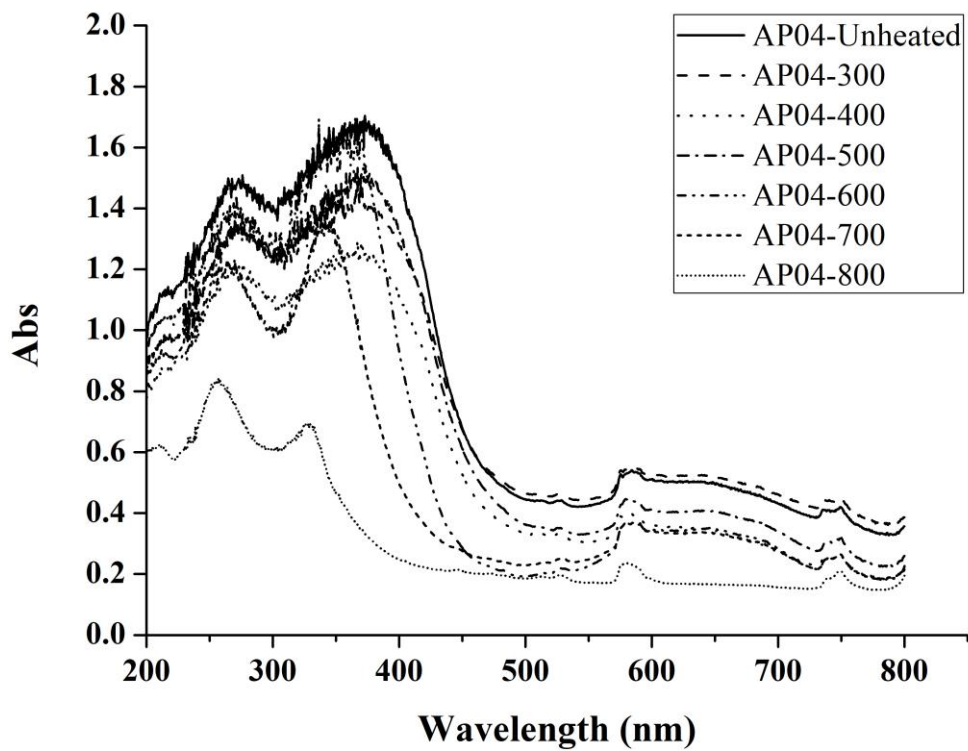
รูปที่ ก-1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP01 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศ



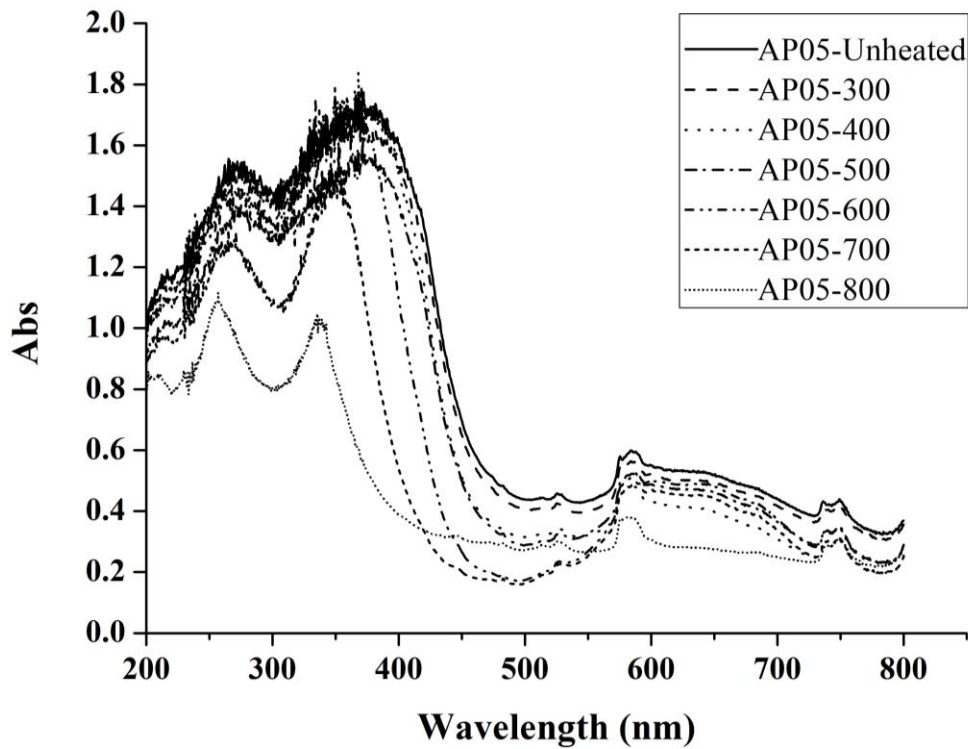
รูปที่ ก-2 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP02 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศ



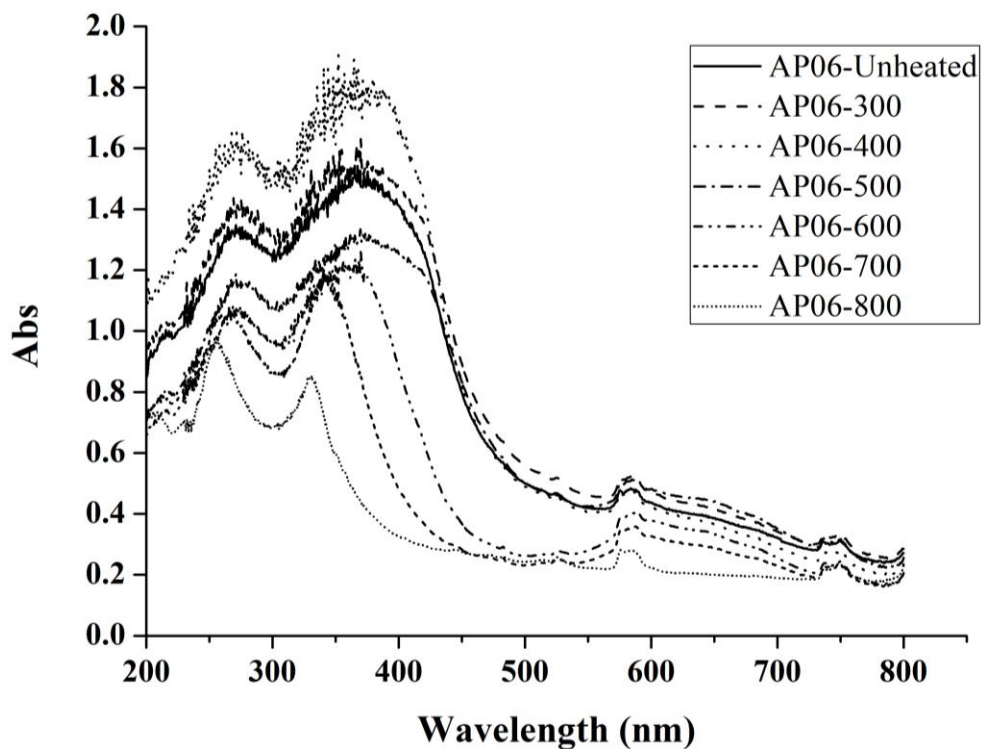
รูปที่ ก-3 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP03 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศ



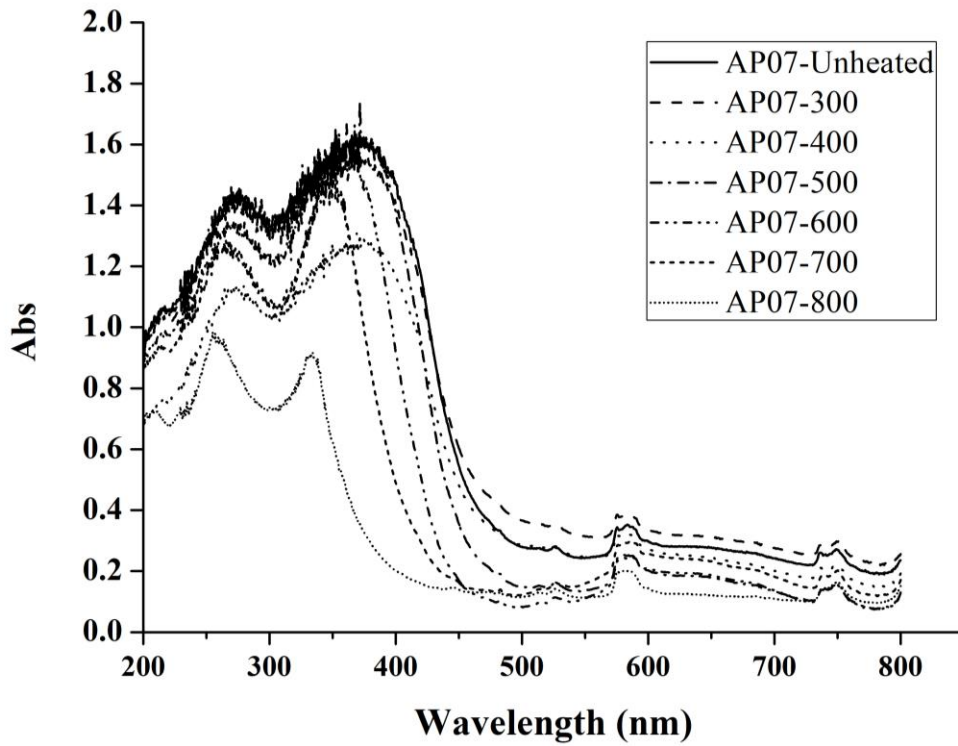
รูปที่ ก-4 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP04 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศ



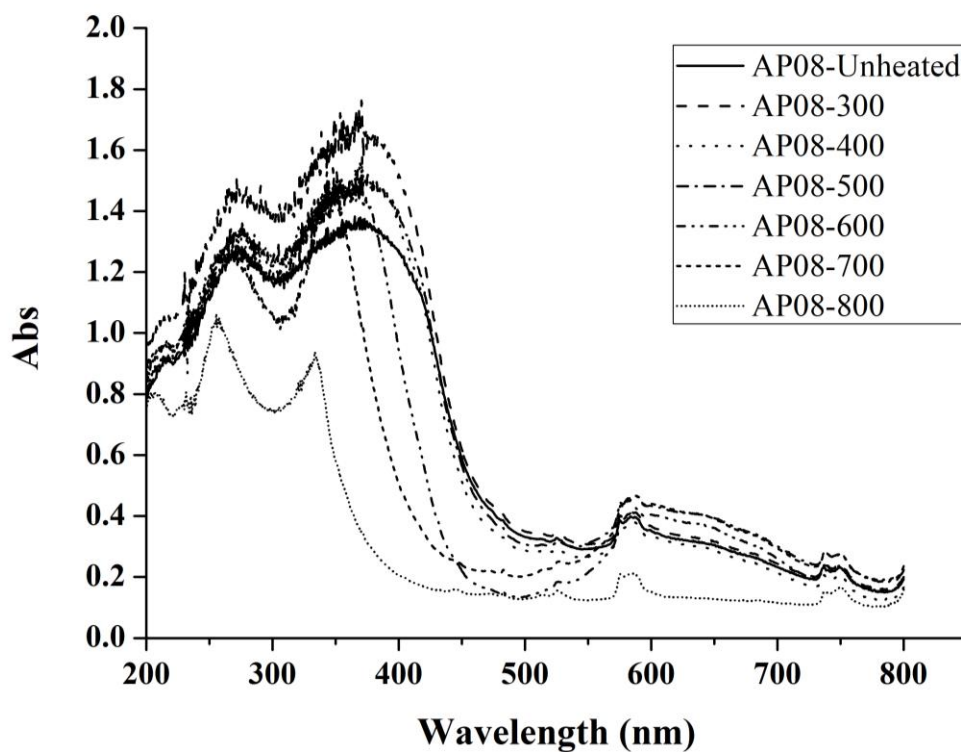
รูปที่ ก-5 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP05 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศ



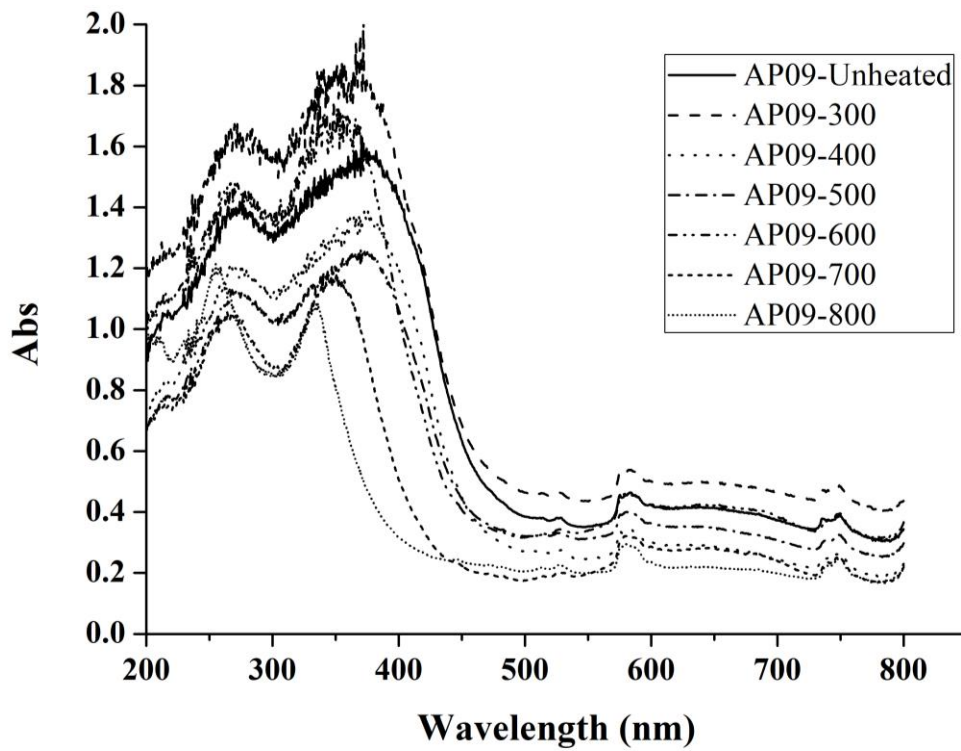
รูปที่ ก-6 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP06 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศ



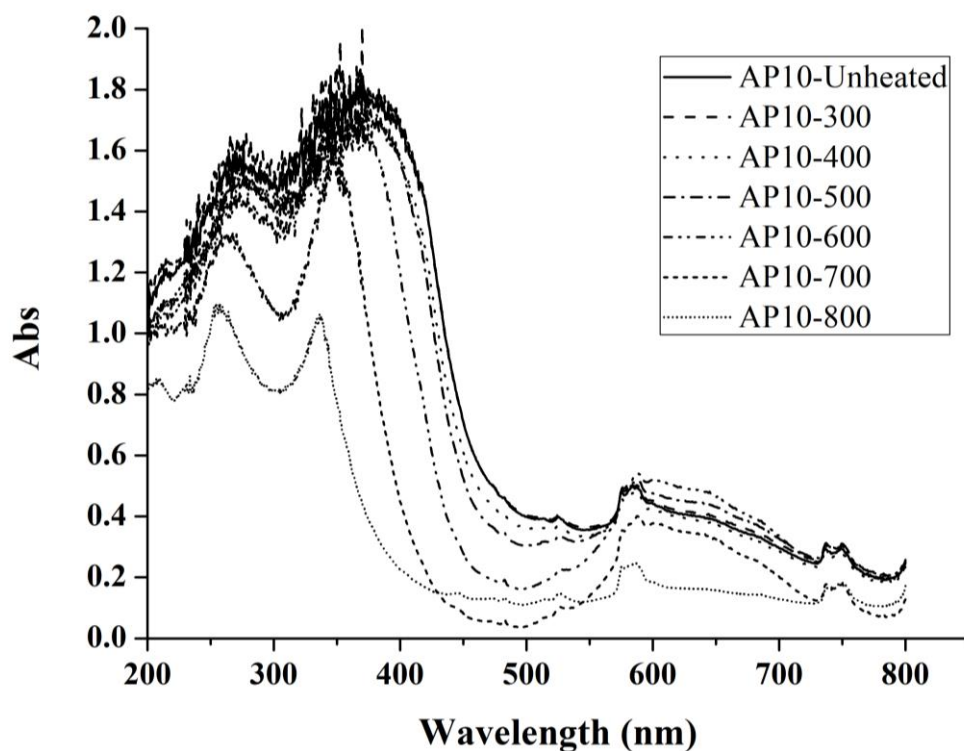
รูปที่ ก-7 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP07 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศ



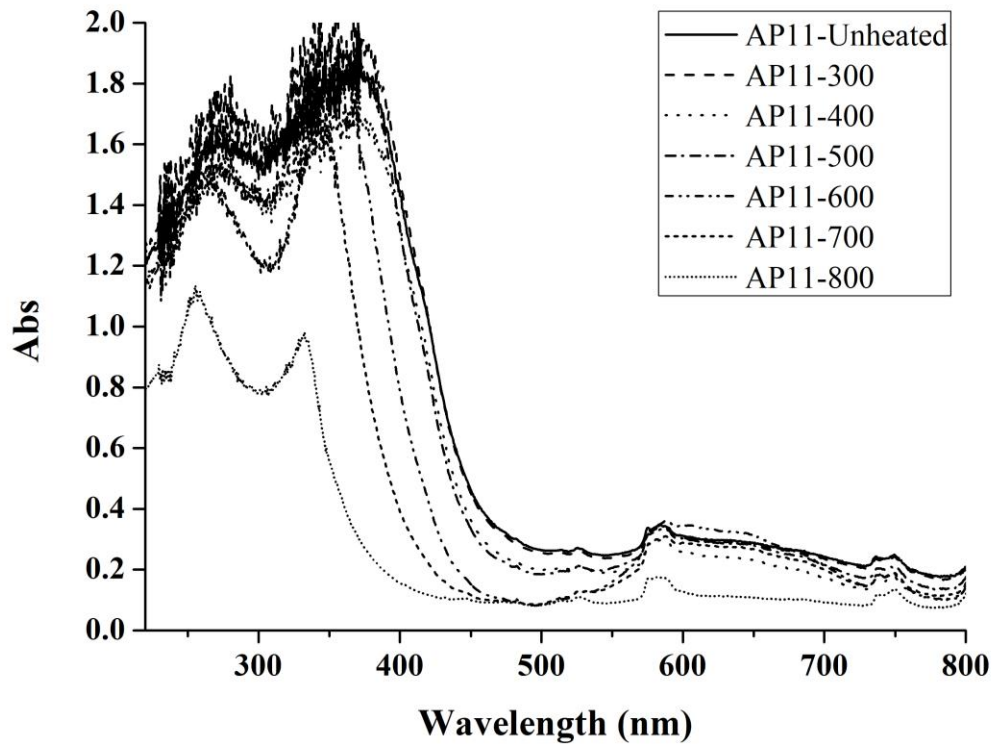
รูปที่ ก-8 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP08 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศ



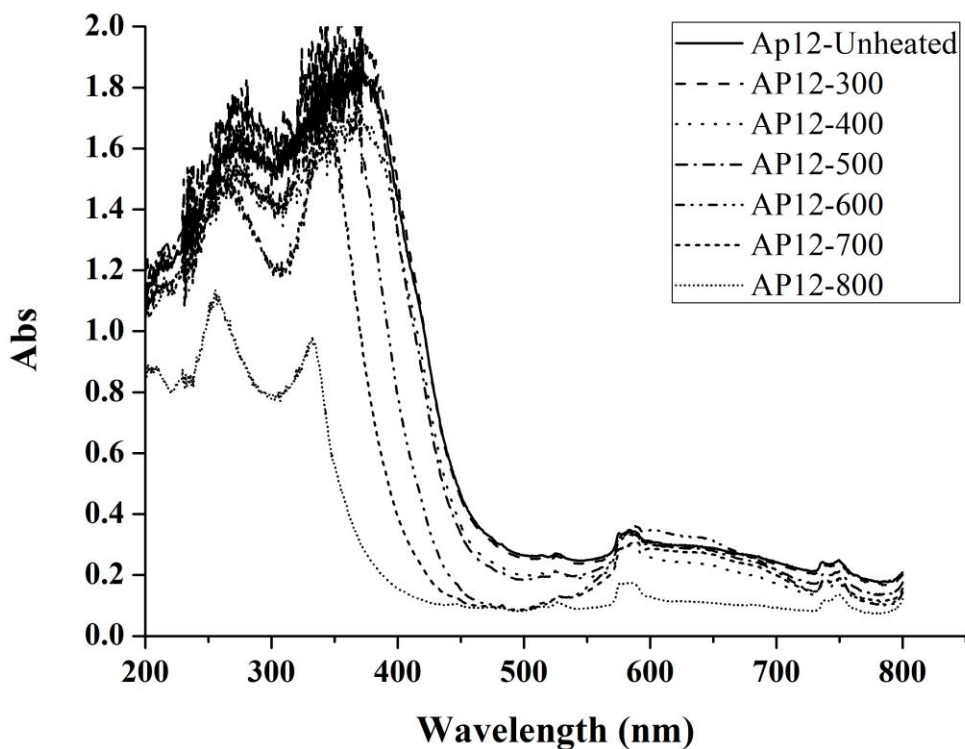
รูปที่ ก-9 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP09 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศ



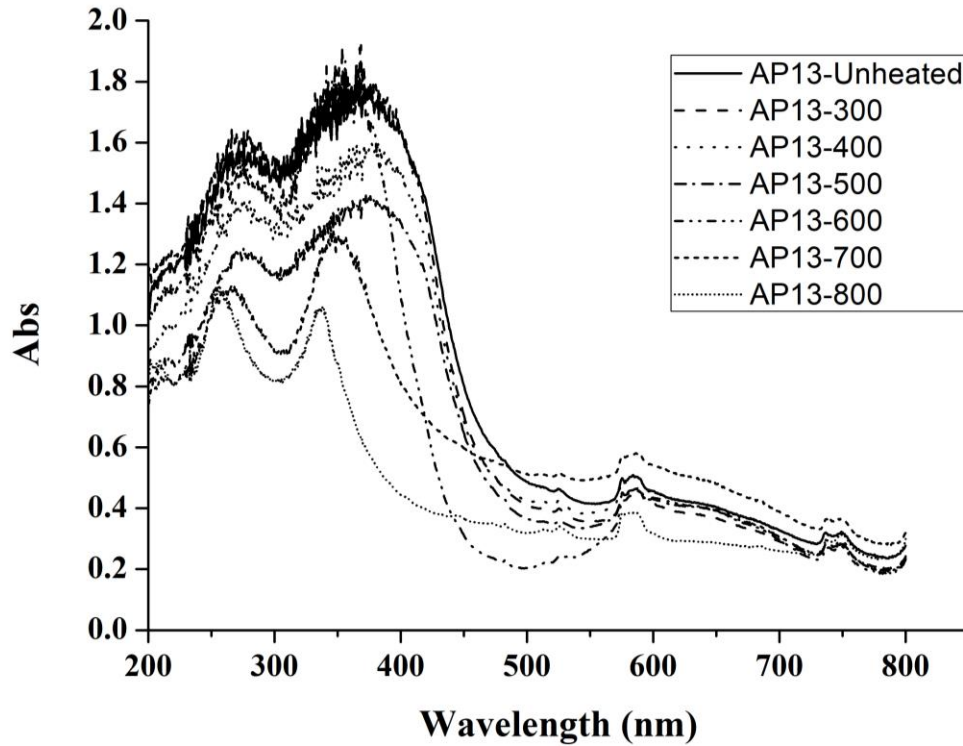
รูปที่ ก-10 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP10 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศ



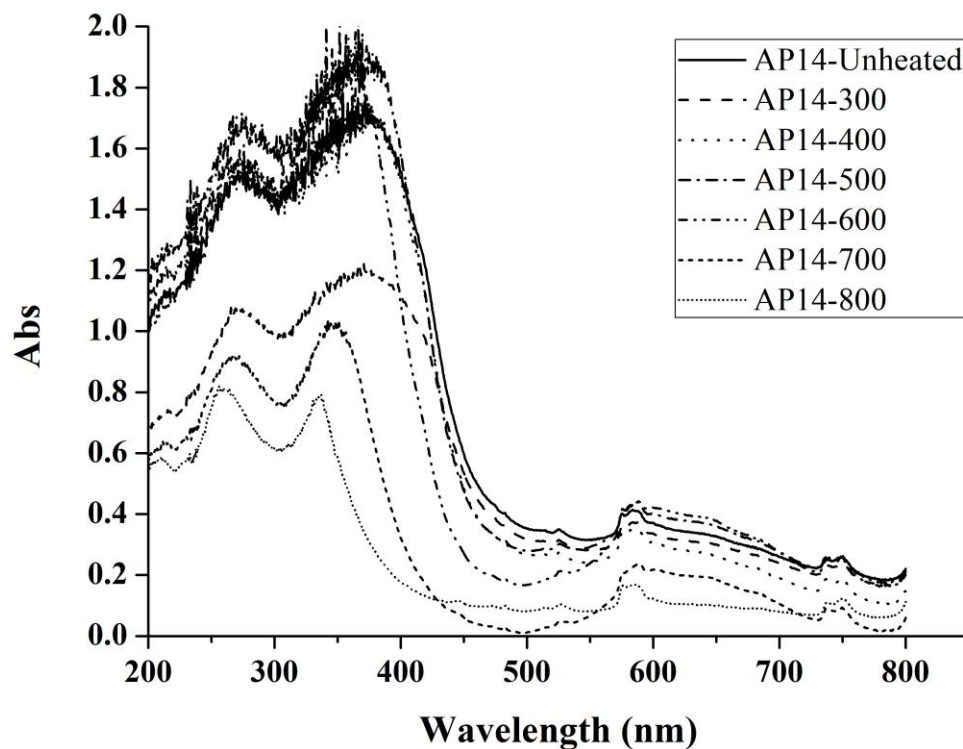
รูปที่ ก-11 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP11 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศรีดักชัน



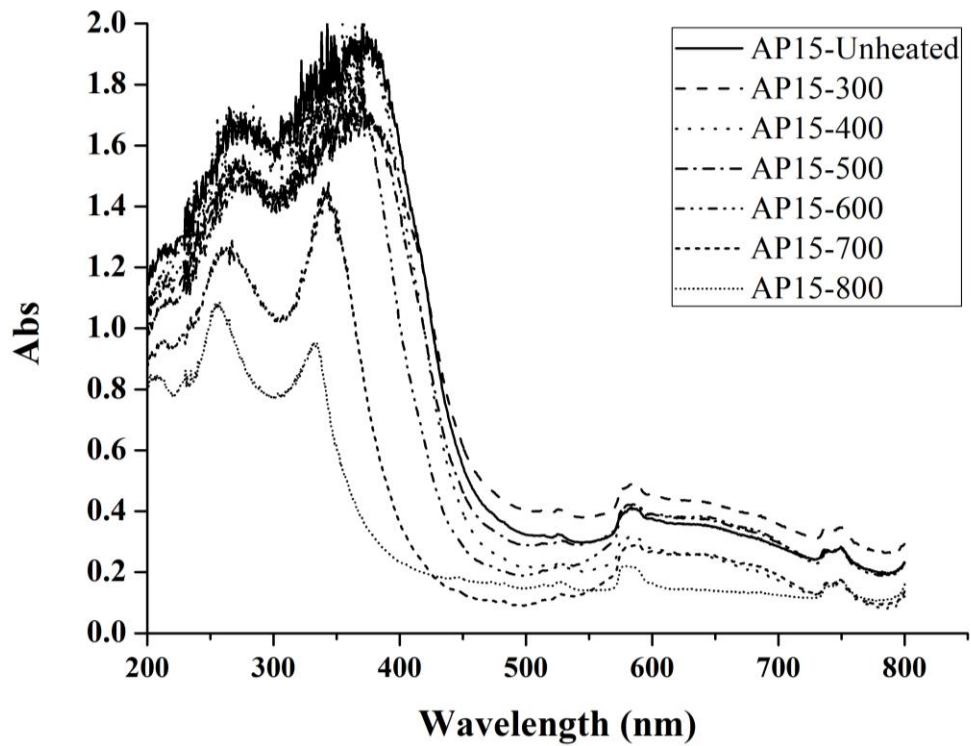
รูปที่ ก-12 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP12 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศรีดักชัน



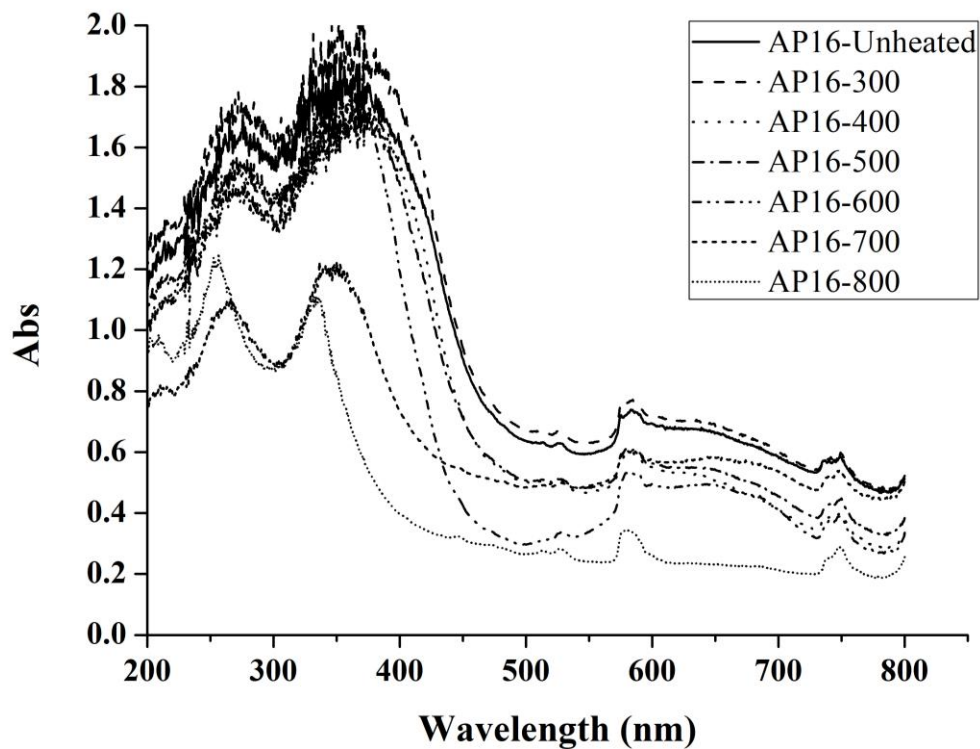
รูปที่ ก-13 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP13 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศรีดักชัน



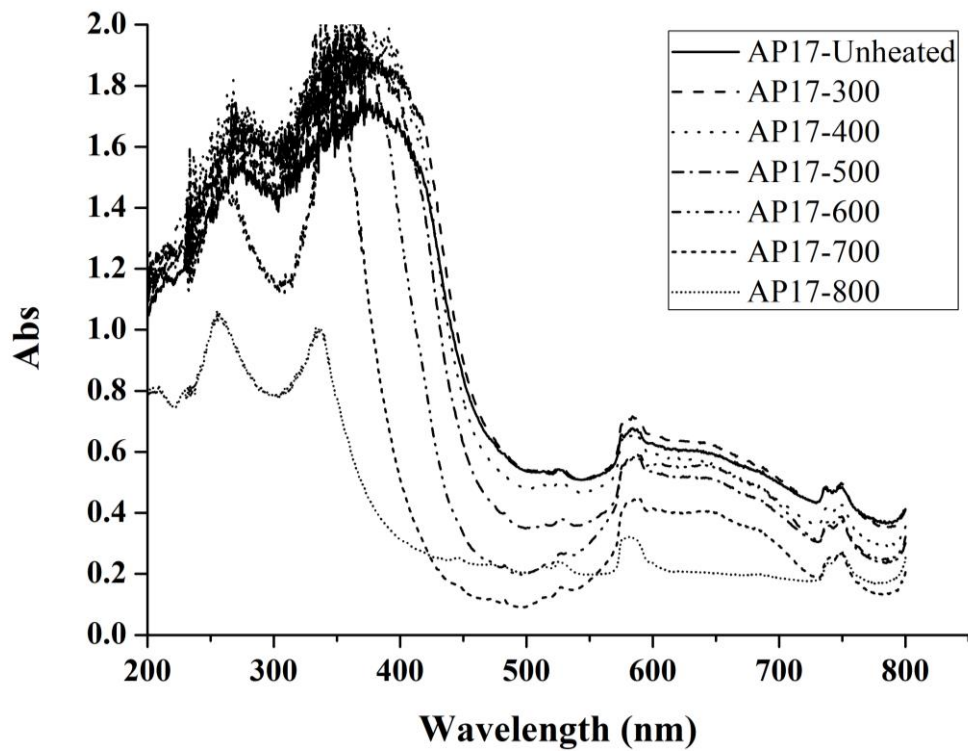
รูปที่ ก-14 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP14 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศรีดักชัน



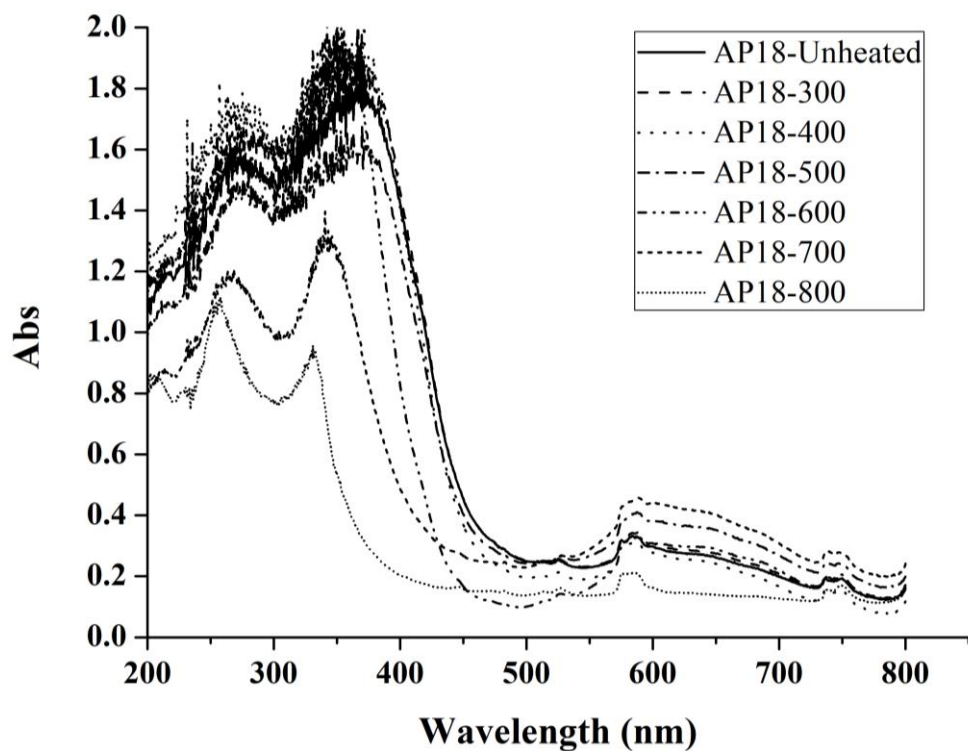
รูปที่ ก-15 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP15 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศรีดักชัน



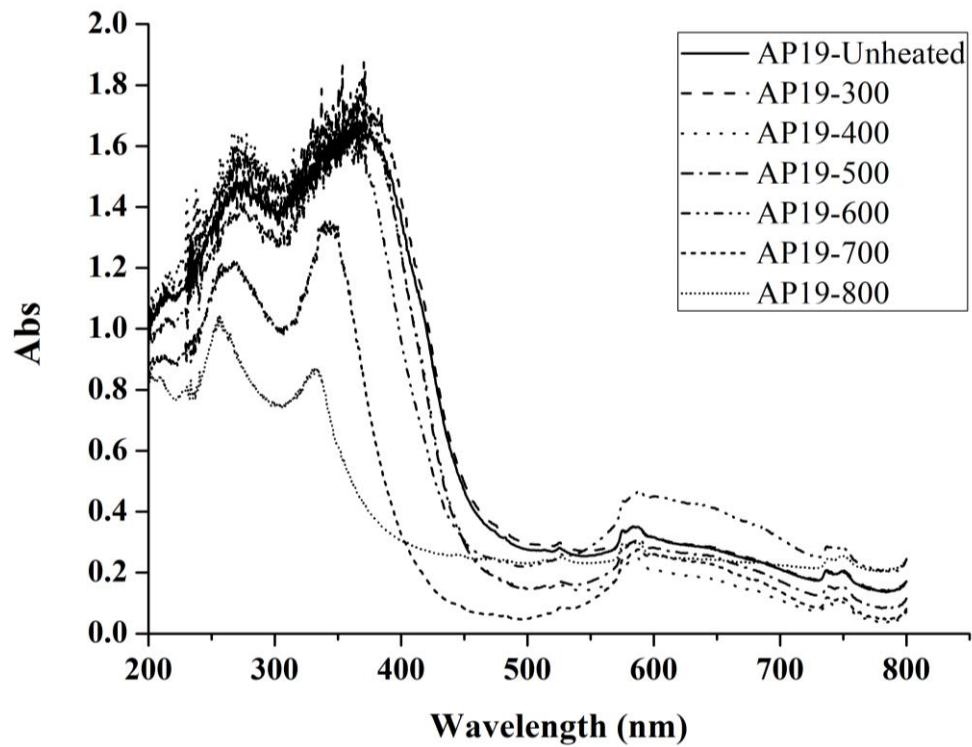
รูปที่ ก-16 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP16 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศรีดักชัน



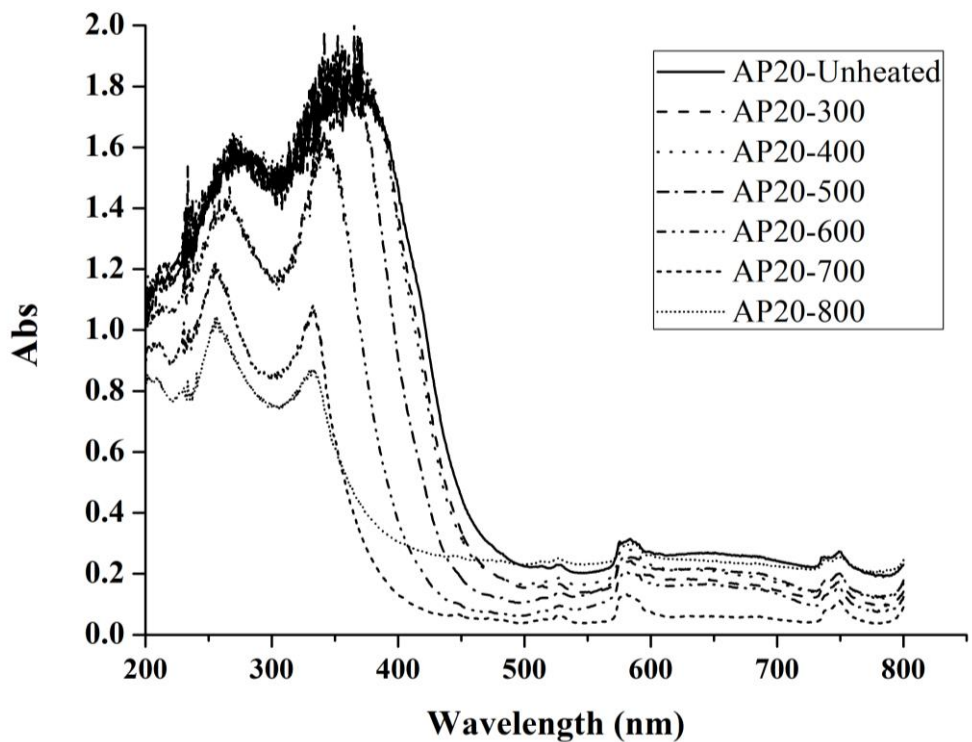
รูปที่ ก-17 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP17 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศรีดักชัน



รูปที่ ก-18 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP18 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศรีดักชัน



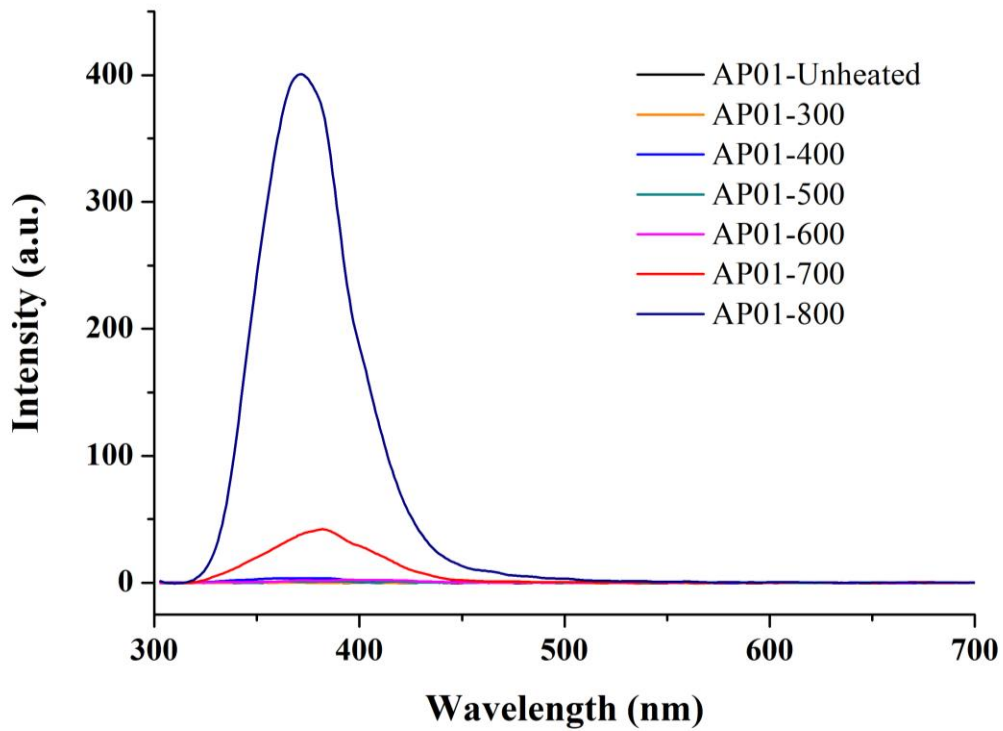
รูปที่ ก-19 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP19 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศรีดักชัน



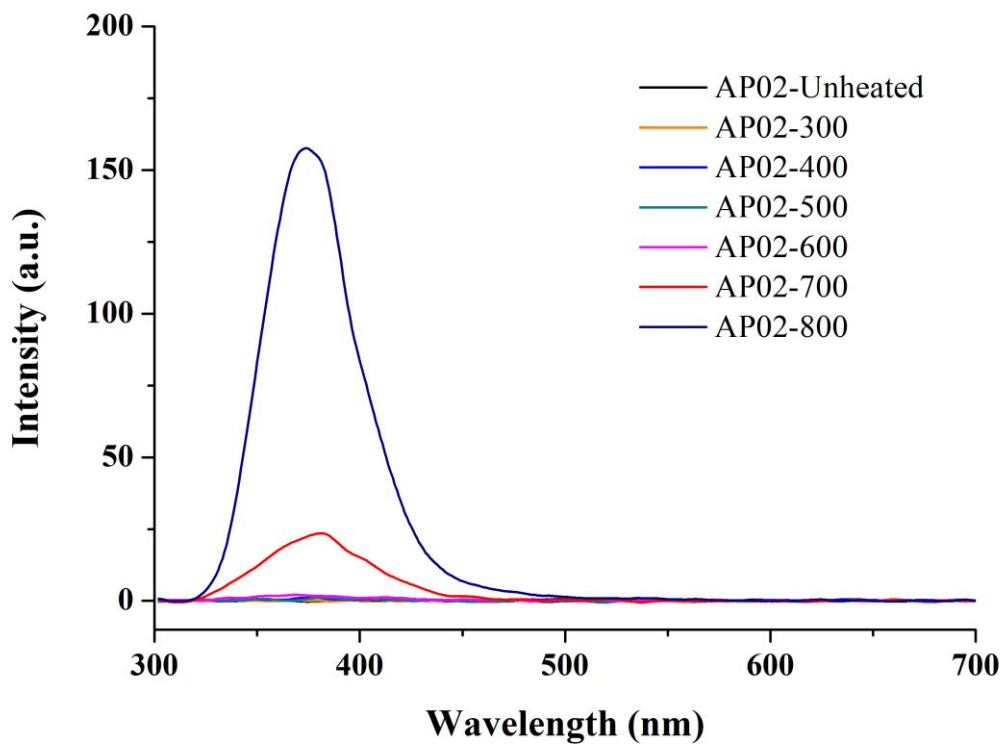
รูปที่ ก-20 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP20 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศรีดักชัน

ภาคผนวก ข

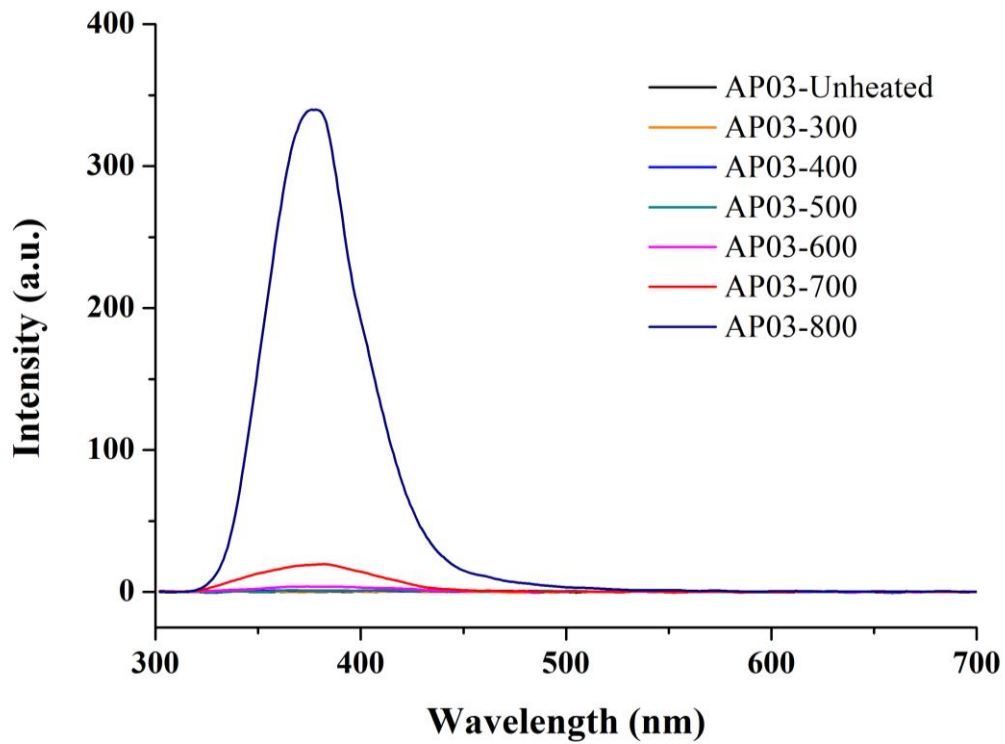
ผลการวัดการการเรืองแสงของตัวอย่างอะพาไทต์



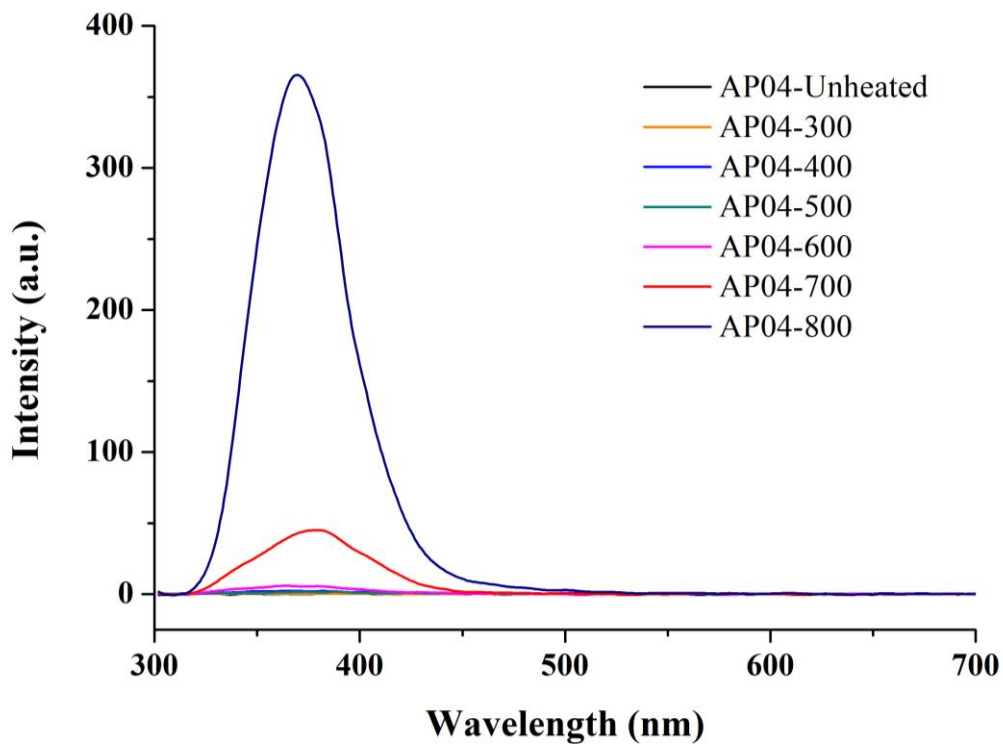
รูปที่ ข-1 สเปกตรัมการเรืองแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP01 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศ



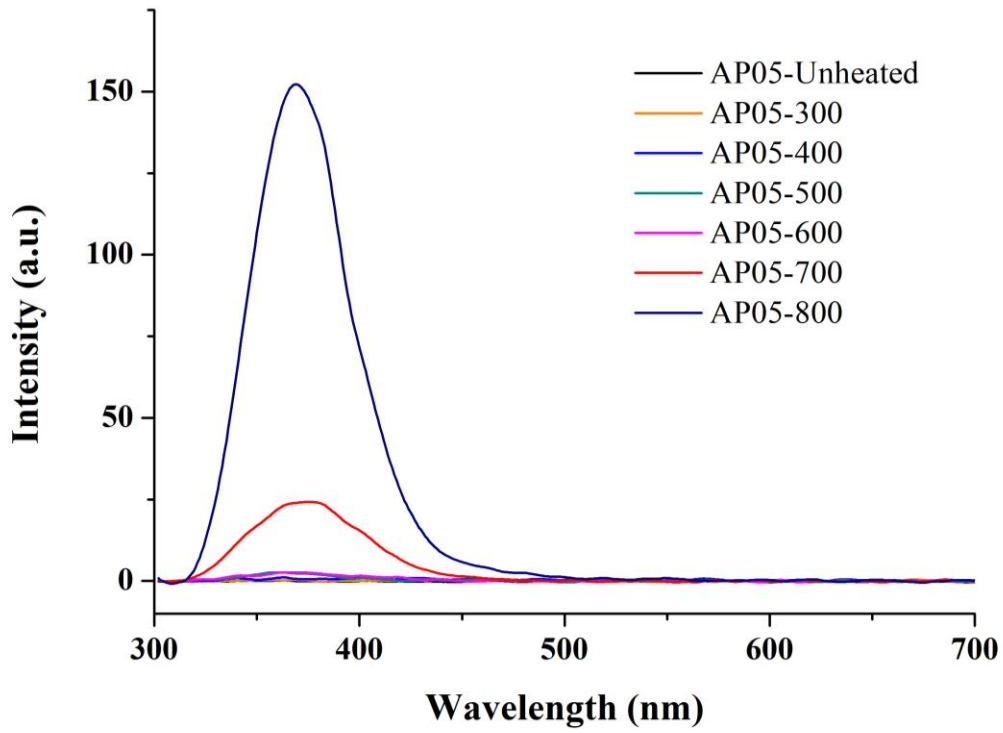
รูปที่ ข-2 สเปกตรัมการเรืองแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP02 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศ



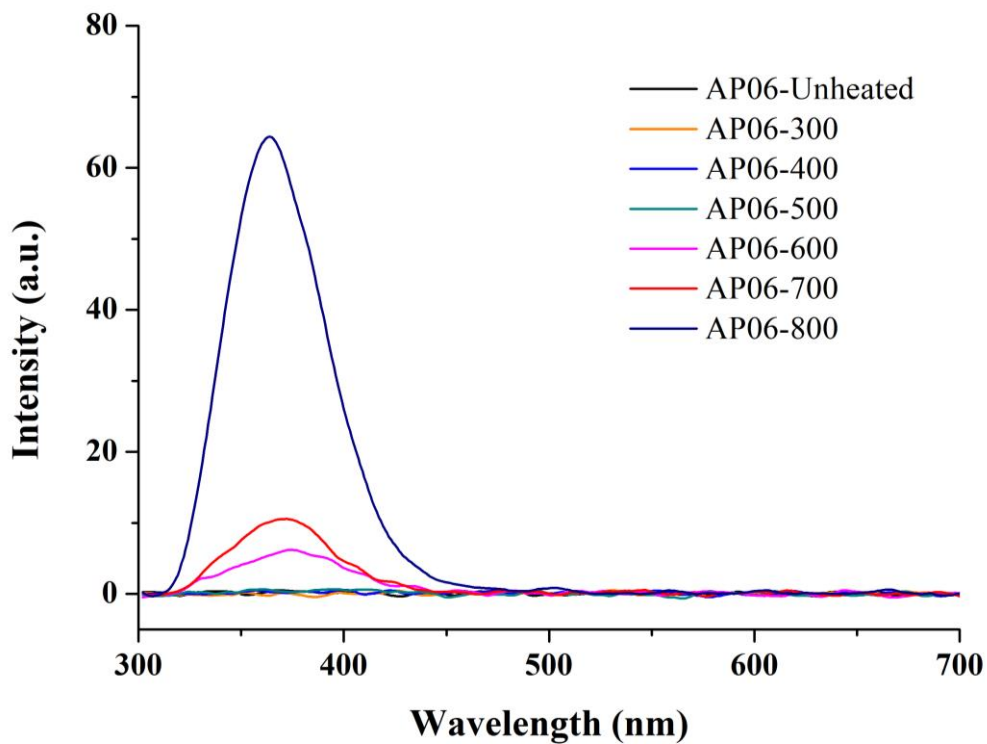
รูปที่ ข-3 สเปกตรัมการเรืองแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP03 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศ



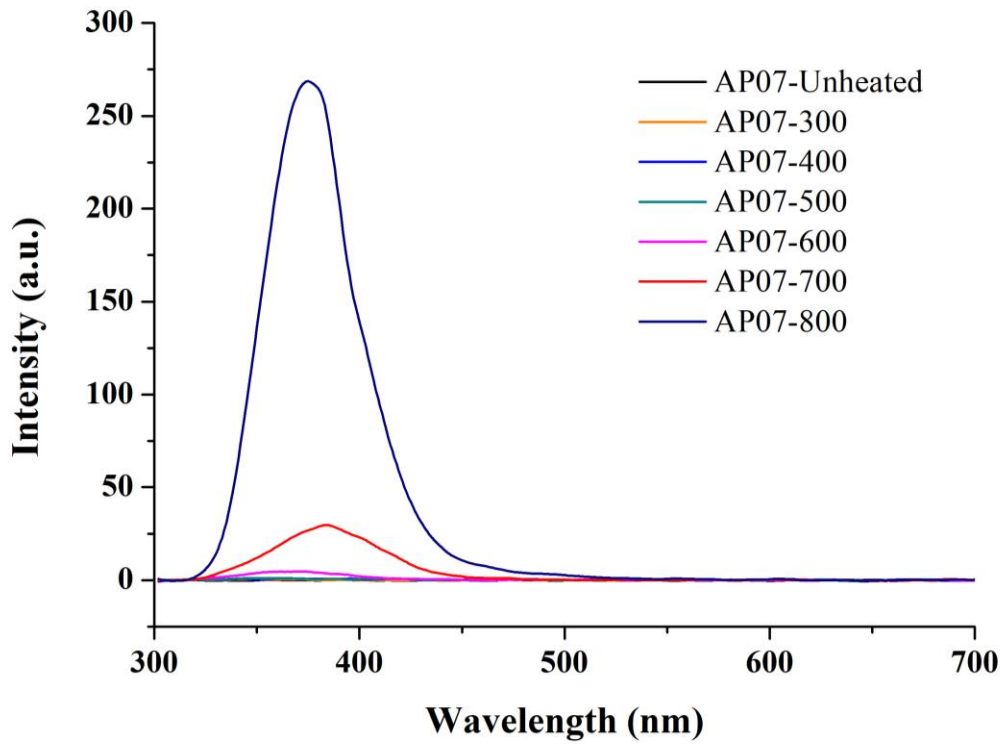
รูปที่ ข-4 สเปกตรัมการเรืองแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP04 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศ



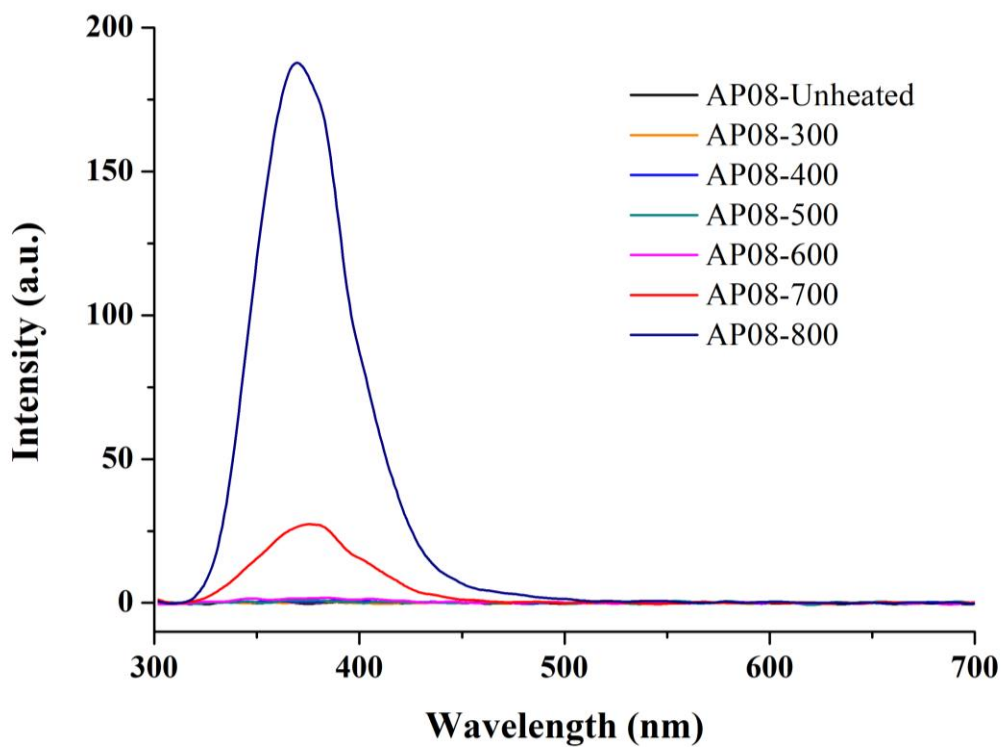
รูปที่ ข-5 สเปกตรัมการเรืองแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP05 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศ



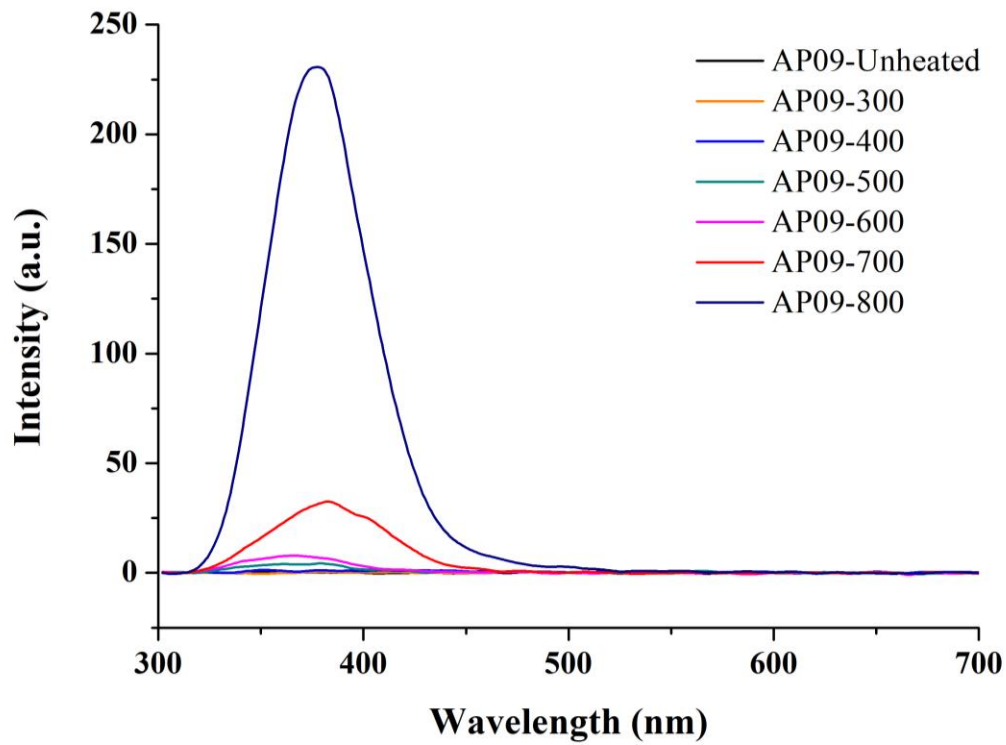
รูปที่ ข-6 สเปกตรัมการเรืองแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP06 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศ



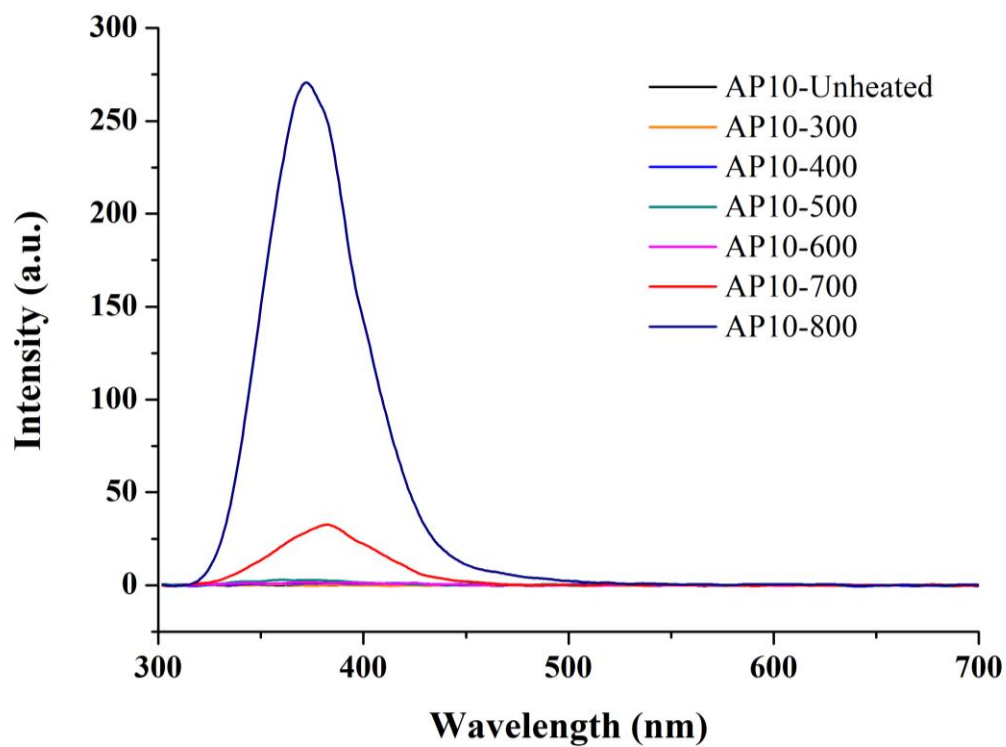
รูปที่ ข-7 สเปกตรัมการเรืองแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP07 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศ



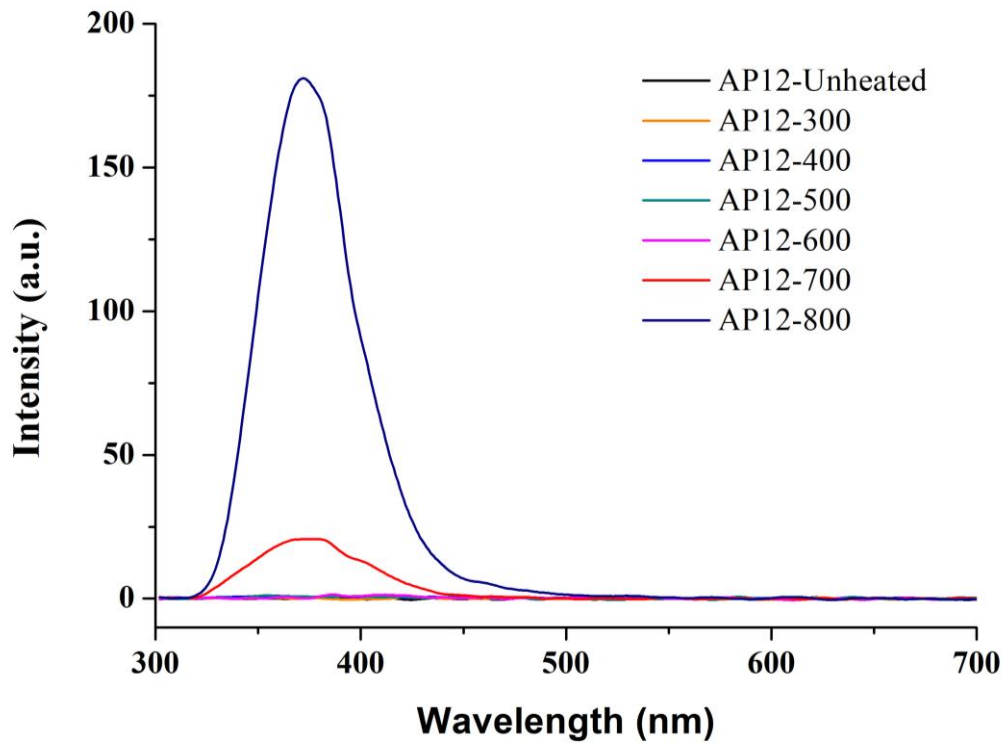
รูปที่ ข-8 สเปกตรัมการเรืองแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP08 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศ



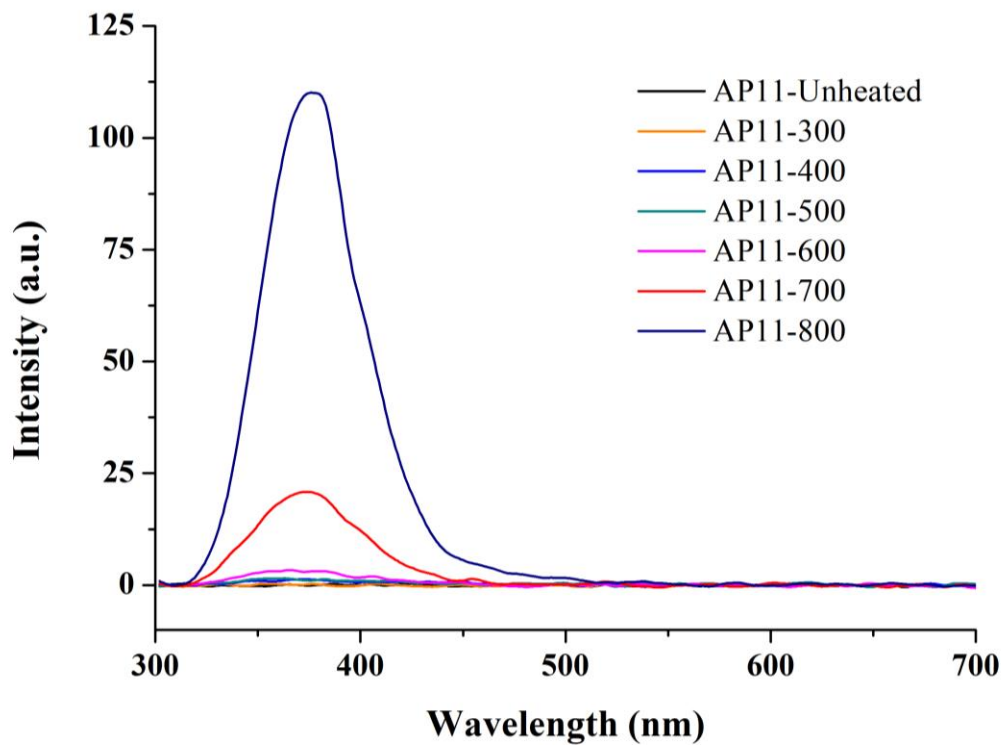
รูปที่ ข-9 สเปกตรัมการเรืองแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP09 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศ



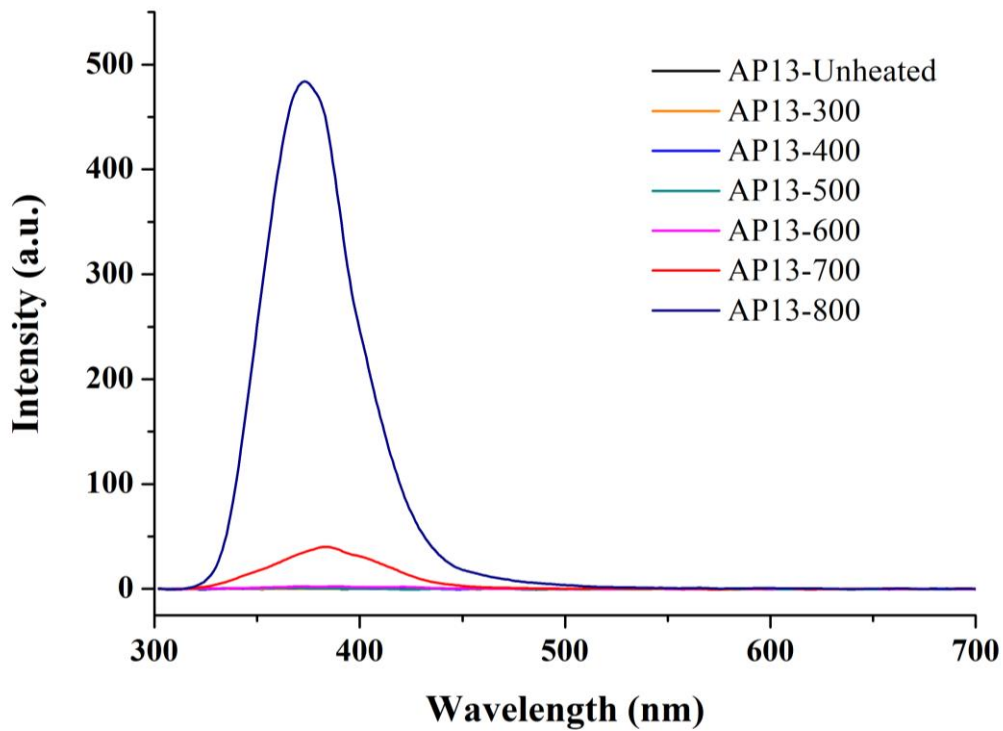
รูปที่ ข-10 สเปกตรัมการเรืองแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP10 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศ



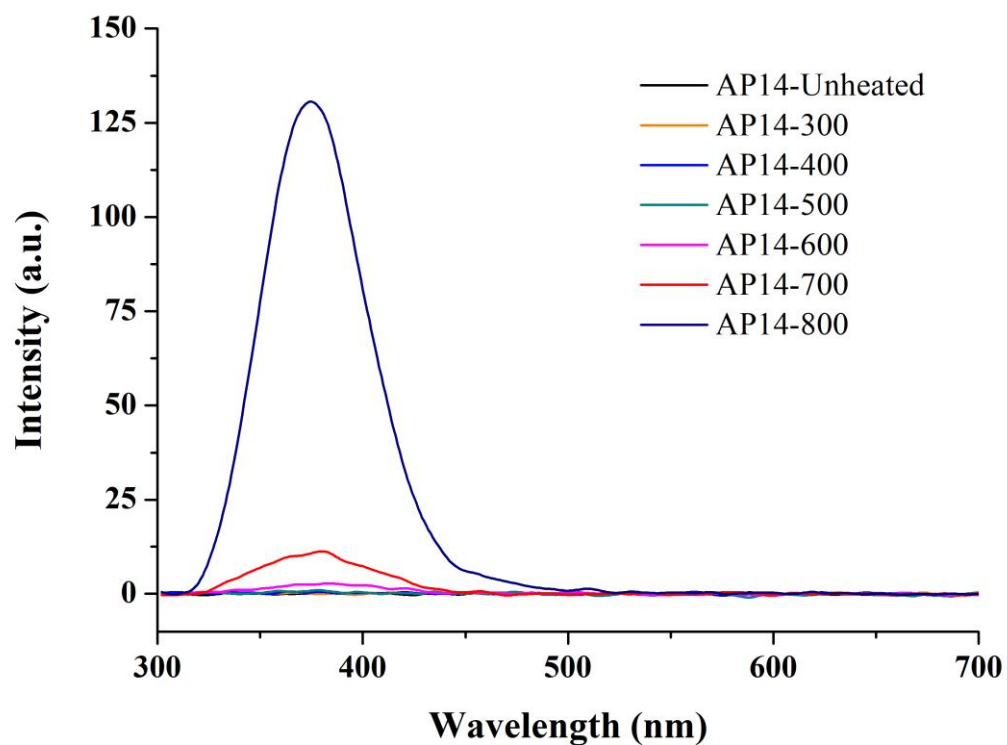
รูปที่ ข-11 สเปกตรัมการเรืองแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP11 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศรีดักชัน



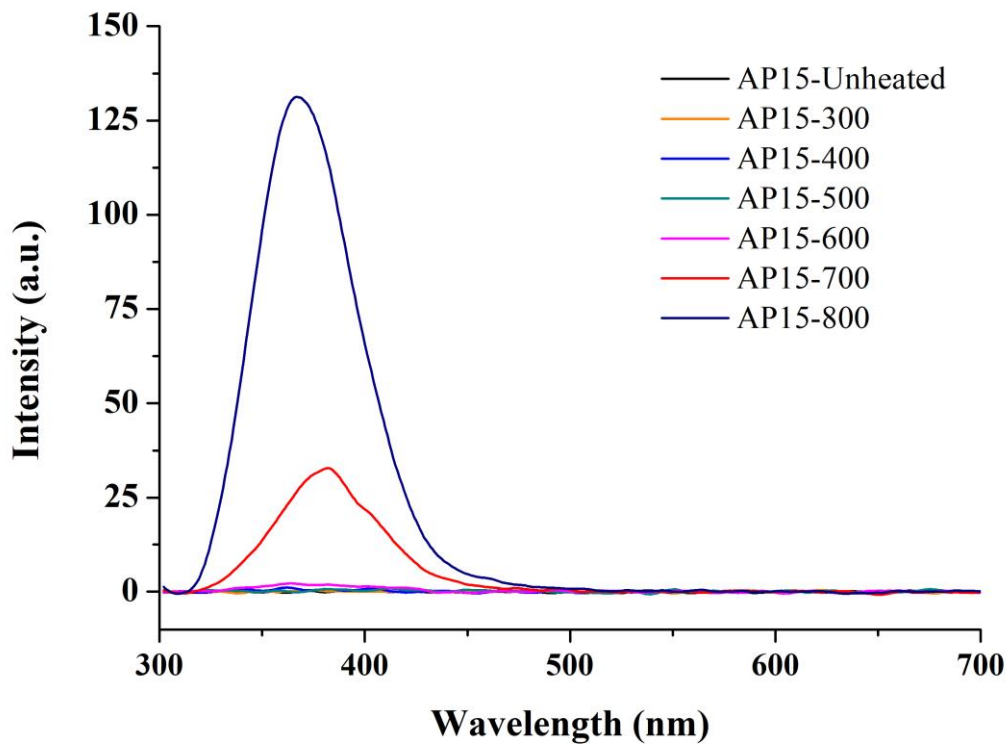
รูปที่ ข-12 สเปกตรัมการเรืองแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP12 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศรีดักชัน



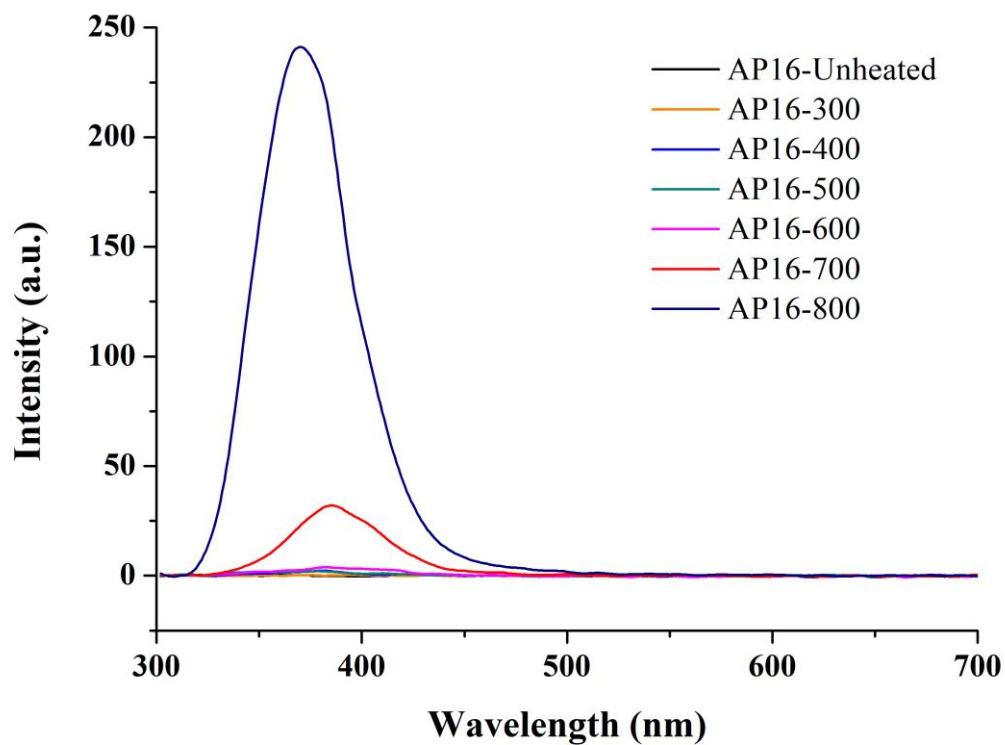
รูปที่ ข-13 สเปกตรัมการเรืองแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP13 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศรีดักชัน



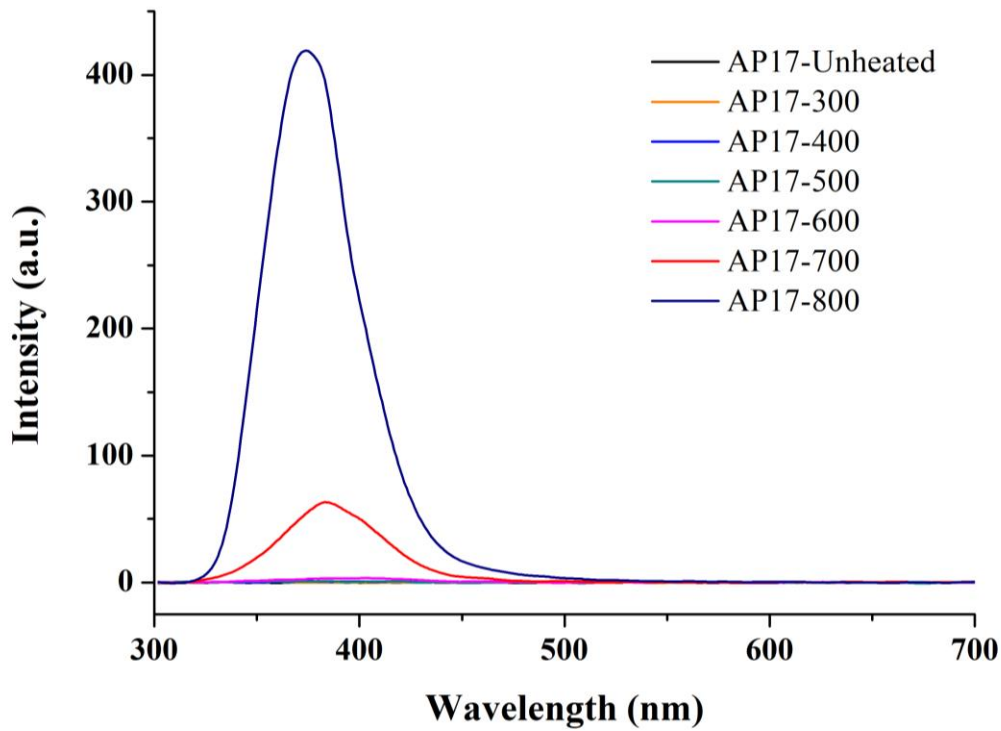
รูปที่ ข-14 สเปกตรัมการเรืองแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP14 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศรีดักชัน



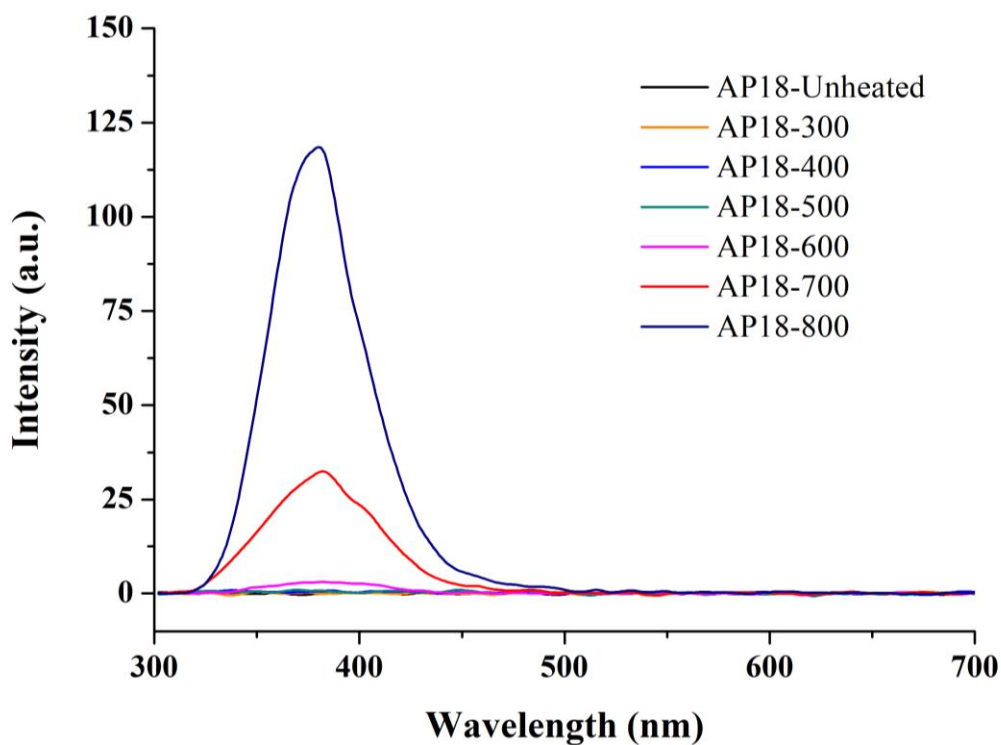
รูปที่ ข-15 สเปกตรัมการเรืองแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP15 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศรีดักชัน



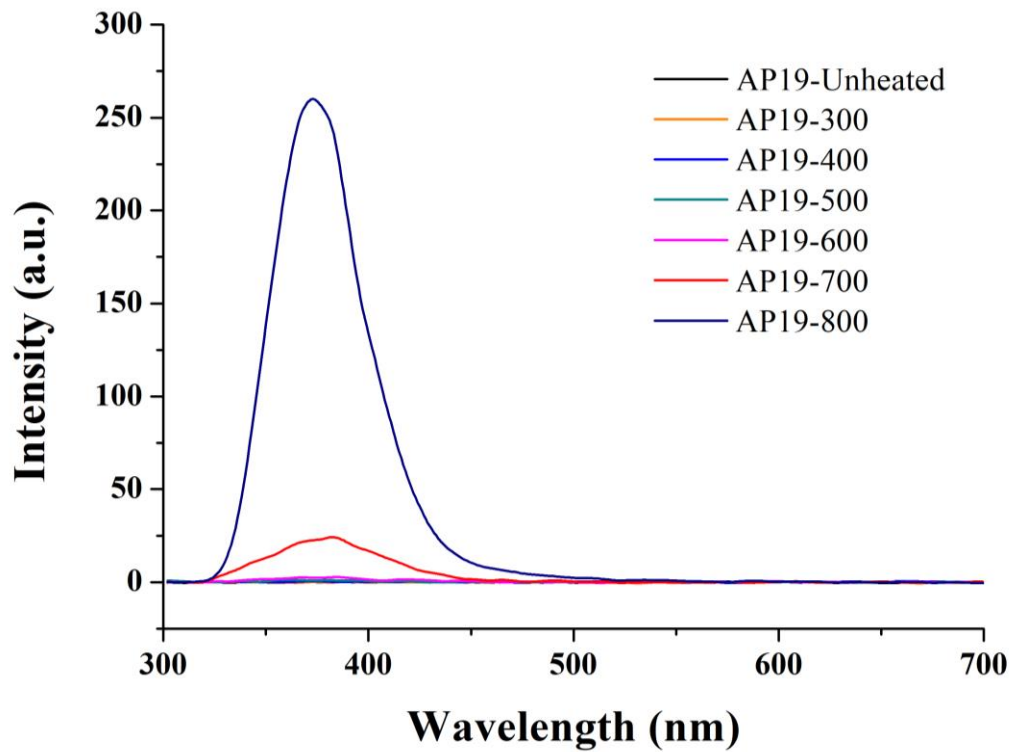
รูปที่ ข-16 สเปกตรัมการเรืองแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP16 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศรีดักชัน



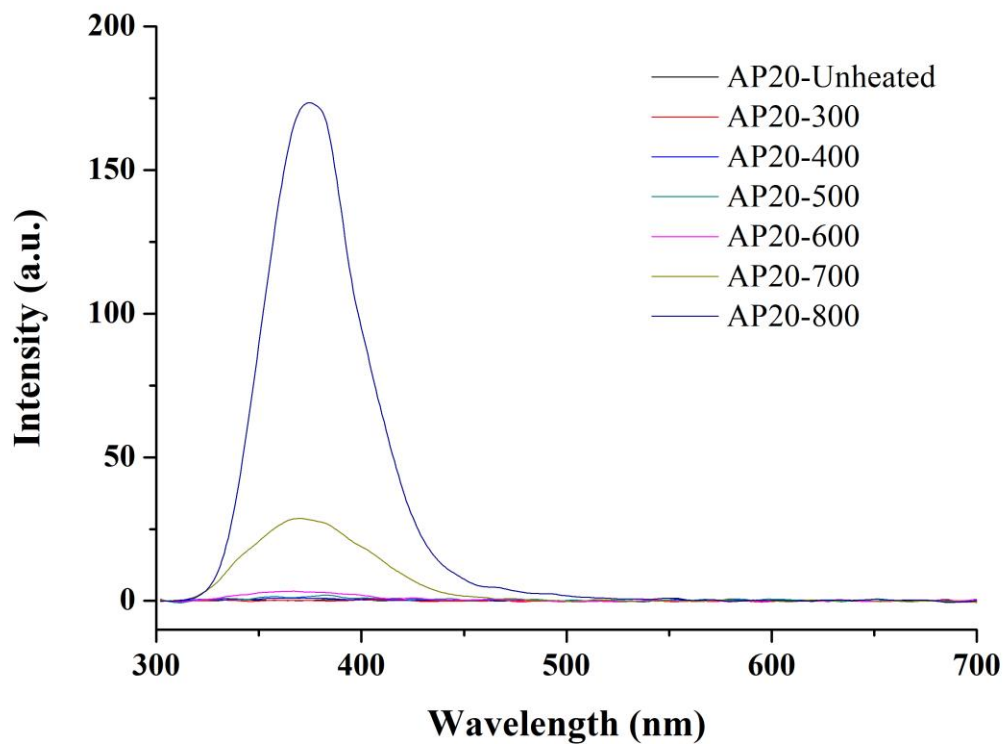
รูปที่ ข-17 สเปกตรัมการเรืองแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP17 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศรีดักชัน



รูปที่ ข-18 สเปกตรัมการเรืองแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP18 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศรีดักชัน



รูปที่ ข-19 สเปกตรัมการเรืองแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP19 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศรีดักชัน



รูปที่ ข-20 สเปกตรัมการเรืองแสงของตัวอย่างอะพาไทต์ AP20 ก่อนเผา และหลังเผาที่อุณหภูมิ 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C และ 800°C ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ 1 ชั่วโมง ในสภาวะบรรยากาศรีดักชัน