

บทที่ 5

ข้อคิดเห็นและวิจารณ์

5.1 ทัวร์มาลีน

5.1.1 ผลที่ได้จากการใช้ความร้อน

ทัวร์มาลีนประเภทคราไวต์สีเขียวแกมเหลือง มีสีเขียวใสขึ้นเล็กน้อย

ทัวร์มาลีนประเภทคราไวต์ สีเขียว ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงสีที่ชัดเจน

ทัวร์มาลีนประเภทเอลบาไอต์สีเขียวแกมฟ้า มีสีอ่อนลงเล็กน้อย

ทัวร์มาลีนประเภทเอลบาไอต์ สีเขียวแกมดำ มีสีเขียวใสขึ้นเล็กน้อย

ทัวร์มาลีนประเภทเอลบาไอต์ สีม่วง เปลี่ยนเป็นสีฟ้าที่ 550 องศาเซลเซียส

ทัวร์มาลีนประเภทเอลบาไอต์ สีชมพู เปลี่ยนเป็นสีชมพูอ่อนถึงไร้สีที่ 550 องศาเซลเซียส

ผลการตรวจสอบด้วยเครื่องมือพื้นฐานพบว่า ก่อนและหลังการใช้ความร้อน สมบัติทางกายภาพและทางแสงของทัวร์มาลีนในแต่ละกลุ่มสีไม่เปลี่ยนแปลง มีเพียงทัวร์มาลีนสีเขียวแกมฟ้าและสีม่วงหลังการใช้ความร้อนที่แสดงเรื่องแสงเล็กน้อยสีเขียวในแสงอัลตราไวโอเลตคลื่นสั้น โดยที่ทัวร์มาลีนสีเขียวแกมฟ้าและสีม่วงก่อนใช้ความร้อนไม่แสดงการเรืองแสงทั้งในแสงอัลตราไวโอเลตคลื่นสั้นและคลื่นยาว สำหรับลักษณะมลทินภายในของทัวร์มาลีนแต่ละกลุ่มสี มีการเปลี่ยนแปลงหลังการใช้ความร้อนค่อนข้างชัดเจน โดยที่ 450 องศาเซลเซียส หลายตัวอย่างเริ่มแสดงการเปลี่ยนแปลงให้เห็นเล็กน้อย ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของมลทินชนิดต่างๆ เช่น รอยแตกรูปจานจากมลทินผลึกแร่ รอยแตกวาวจากมลทินของไหล การเหือดของมลทินลายนิ้วมือ และการเพิ่มขึ้นของคราบเหล็กออกไซด์ เป็นสีแดงปนน้ำตาลเข้ม เป็นต้น จะสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ขึ้นไป และแสดงการเปลี่ยนแปลงชัดเจนมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นไปจนถึง 650 องศาเซลเซียส

ข้อมูล EDXRF พบว่า ผลการวิเคราะห์ทัวร์มาลีนทั้งก่อนและหลังการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ นั้นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ข้อมูล UV-Vis-NIR พบว่า

ทัวร์มาลีนประเภทคราไวต์สีเขียวแกมเหลือง แสดงการเปลี่ยนแปลงไม่เด่นชัด

ทัวร์มาลีนประเภทคราไวต์สีเขียว แสดงการเปลี่ยนแปลงไม่เด่นชัด

ทัวร์มาลีนประเภทเอลบาไอต์สีเขียวแกมฟ้า แสดงการเปลี่ยนแปลงไม่เด่นชัด

ทัวร์มาลีนประเภทเอลบาไอต์สีเขียวแกมดำ แสดงการเปลี่ยนแปลงไม่เด่นชัด

ทัวร์มาลีนประเภทเอลบาไอต์สีม่วง ที่ 450 องศาเซลเซียส การดูดกลืนที่ 392 519 689 nm ลดลงที่ 550 องศาเซลเซียส บางตัวอย่างการดูดกลืนที่ 392 519 nm หายไป



ทัวร์มาลีนประเภทเอลบาไอต์สีชมพู ที่ 450 องศาเซลเซียส การดูดกลืนที่ 519 nm ลดลงและหายไปที่ 550 องศาเซลเซียส

การใช้ความร้อนส่งผลกระทบต่อทัวร์มาลีนสีเขียวแกมเหลืองและสีเขียวชนิดราไวต์เล็กน้อย โดยที่การดูดกลืนที่ประมาณ 975 nm จากกลุ่ม OH (Rossman and Mattson, 1986) ลดลงหรือหายไป ส่วนสีซึ่งเกิดจากธาตุโครเมียม (Cr) และวานาเดียม (V^{3+}) ที่ความยาวคลื่น 608 และ 414/437 nm (Wentzell *et al.*, 2005) ยังคงแสดงการดูดกลืนเช่นเดิม ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพคือ สีแทบไม่เปลี่ยนแปลง หลังจากการให้ความร้อน เช่นเดียวกันกับทัวร์มาลีนเอลบาไอต์กลุ่มที่ 1 กลุ่มสีเขียวแกมฟ้าและสีเขียวแกมดำ ก็ไม่แสดงความแตกต่างมากนักทั้งก่อนและหลังให้ความร้อน ซึ่งผลการวิเคราะห์ก็แสดงความสัมพันธ์เช่นเดียวกันคือ แถบการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นประมาณ 720 nm ที่เกิดจากธาตุเหล็ก (Fe^{2+}) (Rossman and Mattson; 1987; Burzo, 2005; Castaneda *et al.*, 2006;) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก แต่ผลกระทบจากความร้อนเห็นได้ชัดเจนในทัวร์มาลีนเอลบาไอต์กลุ่มที่ 2 กลุ่มสีม่วงและสีชมพู คือ กลุ่มสีม่วงเปลี่ยนเป็นสีฟ้า และกลุ่มสีชมพูมีสีอ่อนลง เมื่อได้รับความร้อน ทัวร์มาลีน กลุ่มสีม่วงมีทองแดง (Cu) และแมงกานีส (Mn) เป็นธาตุร่องรอย โดยแสดงการดูดกลืนที่ประมาณ 900 nm (Cu^{2+}) (Wentzell *et al.*, 2005; Abduriyim *et al.*, 2006; Mashkovtsev *et al.*, 2006) และ 520 nm (Mn^{3+}) (Rossman and Mattson; 1987; Burzo, 2005; Wentzell *et al.*, 2005; Abduriyim *et al.*, 2006; Camargo *et al.*, 2006; Mashkovtsev *et al.*, 2006;) ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลจากการลดลงอย่างชัดเจนของแถบการดูดกลืนที่สัมพันธ์กับธาตุแมงกานีส ($Mn^{3+} - Mn^{2+}$) (Rossman and Reinitz, 1988; Toit and Befi, 2005; Abduriyim *et al.*, 2006; Camargo *et al.*, 2006; Reddy *et al.*, 2007) ที่ตำแหน่งประมาณ 392 และ 520 nm นั้นเอง

ข้อมูล FTIR พบว่า

ทัวร์มาลีนประเภทราไวต์สีเขียวแกมเหลือง แสดงการเปลี่ยนแปลงไม่เด่นชัด

ทัวร์มาลีนประเภทราไวต์สีเขียว แสดงการเปลี่ยนแปลงไม่เด่นชัด

ทัวร์มาลีนประเภทเอลบาไอต์สีเขียวแกมฟ้า แสดงการเปลี่ยนแปลงไม่เด่นชัด

ทัวร์มาลีนประเภทเอลบาไอต์สีเขียวแกมดำ แสดงการเปลี่ยนแปลงไม่เด่นชัด

ทัวร์มาลีนประเภทเอลบาไอต์สีม่วง แสดงการเปลี่ยนแปลงไม่เด่นชัด

ทัวร์มาลีนประเภทเอลบาไอต์สีชมพู แสดงการเปลี่ยนแปลงไม่เด่นชัด

การใช้ความร้อนนั้นไม่ส่งผลกระทบต่ออย่างชัดเจนต่อการดูดกลืนแสงในย่าน Mid-IR ของทัวร์มาลีนที่ทำการทดลองทุกกลุ่มสี แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าในการเผาที่ 450 ถึง 650 องศาเซลเซียสนั้นพบว่าการดูดกลืนในย่าน $6000-7000\text{ cm}^{-1}$ จากกลุ่ม OH (Reddy *et al.*, 2007) ของทุกตัวอย่างแสดงความเข้มลดลงเป็นลำดับ



ข้อมูล Raman พบว่า

ทัวร์มาลีนประเภทควาไรต์สีเขียวแกมเหลือง แสดงการเปลี่ยนแปลงไม่เด่นชัด

ทัวร์มาลีนประเภทควาไรต์สีเขียว แสดงการเปลี่ยนแปลงไม่เด่นชัด

ทัวร์มาลีนประเภทเอลบาไอต์สีเขียวแกมฟ้า แสดงการเปลี่ยนแปลงไม่เด่นชัด

ทัวร์มาลีนประเภทเอลบาไอต์สีเขียวแกมดำ แสดงการเปลี่ยนแปลงไม่เด่นชัด

ทัวร์มาลีนประเภทเอลบาไอต์สีม่วง แสดงการเปลี่ยนแปลงไม่เด่นชัด

ทัวร์มาลีนประเภทเอลบาไอต์สีชมพู แสดงการเปลี่ยนแปลงไม่เด่นชัด

การใช้ความร้อนนั้นไม่ส่งผลกระทบต่ออย่างชัดเจนต่อรามานสเปกตรัมของทัวร์มาลีนที่ทำการทดลองทุกกลุ่มสี

ข้อมูล Photoluminescence พบว่า

ทัวร์มาลีนประเภทควาไรต์สีเขียวแกมเหลือง บางตัวอย่าง พิกโค้งที่ 720 nm เปลี่ยนแปลงลดลง ที่ 450 องศาเซลเซียส พิก 630 632 688 nm หายไปที่ 550 องศาเซลเซียส

ทัวร์มาลีนประเภทควาไรต์สีเขียว พิกโค้งที่ 720 nm เปลี่ยนแปลงลดลง ที่ 450 และ 550 องศาเซลเซียส ในบางตัวอย่าง พิก 630 632 688 nm หายไป

ทัวร์มาลีนประเภทเอลบาไอต์สีเขียวแกมฟ้า พิก 627 631 633 nm ลดลง ที่ 450 องศาเซลเซียส และหายไปที่ 550 องศาเซลเซียส

ทัวร์มาลีนประเภทเอลบาไอต์สีเขียวแกมดำ พิก 627 631 633 nm ลดลง ที่ 450 องศาเซลเซียส และหายไปที่ 550 องศาเซลเซียส

ทัวร์มาลีนประเภทเอลบาไอต์สีม่วง ที่ 450 องศาเซลเซียส พิก 626 631 633 ลดลงและหายไปที่ 550 องศาเซลเซียส

ทัวร์มาลีนประเภทเอลบาไอต์สีชมพู พิก 628 631 nm ลดลง ที่ 450 องศาเซลเซียส และหายไปที่ 550 องศาเซลเซียส

การวิเคราะห์โฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกตรัม พบว่า โฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกตรัมของทัวร์มาลีนชนิดควาไรต์และชนิดเอลบาไอต์แตกต่างกัน โดยทัวร์มาลีนชนิดควาไรต์มีพิกเด่นที่ 680-690 nm ส่วนทัวร์มาลีนเอลบาไอต์มีพิกเด่นที่ 627-633 nm นอกจากนี้อิทธิพลจากการใช้ความร้อนส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกตรัมของทัวร์มาลีนทุกกลุ่มที่ทำการทดลอง โดยในทัวร์มาลีนสีเขียวแกมเหลืองและสีเขียวชนิดควาไรต์ พิกที่ 630 632 688 nm ลดลงหรือหายไป และพิกที่ 682 nm เเด่นชัดขึ้นที่อุณหภูมิ 550-650 องศาเซลเซียส ส่วนทัวร์มาลีนประเภทเอลบาไอต์ทุกกลุ่มสี กลุ่มสเปกตรัมแสดงการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอน โดยที่สเปกตรัมตำแหน่งประมาณ 625-635 nm ซึ่งแสดงอย่างชัดเจนในทัวร์มาลีนทุกกลุ่มก่อนการใช้ความร้อน แสดงแนวโน้มของการลดลงของพิกตั้งแต่ 450



องศาเซลเซียสถึง 650 องศาเซลเซียส แต่ที่ 550 องศาเซลเซียส กลุ่มสเปกตรัมดังกล่าวของทัวร์มาลีนสีเขียวแกมดำและสีม่วงลดลงมากที่สุดและกลับเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนอีกครั้งหนึ่งที่ 650 องศาเซลเซียส

5.1.2 ผลที่ได้จากการฉายรังสีแกมมา

ทัวร์มาลีนสีเขียวแกมเหลือง ประเภทราไวต์ ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงสีที่ชัดเจน บางตัวอย่างมีสีเขียวอ่อนลงเล็กน้อย ค่าดัชนีหักเห ค่าความถ่วงจำเพาะ และการเรืองแสงในแสงอัลตราไวโอเล็ต ไม่มีความแตกต่างจากก่อนการฉายรังสี

ทัวร์มาลีนสีเขียว ประเภทราไวต์ ที่ความเข้มรังสี 200 Mrad แสดงการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยมีสีเขียวสดมากขึ้น แต่ค่าดัชนีหักเห ค่าความถ่วงจำเพาะ และการเรืองแสงในแสงอัลตราไวโอเล็ต ไม่มีความแตกต่างจากก่อนการฉายรังสี

ทัวร์มาลีนสีเขียวแกมฟ้า ประเภทเอลบาไอต์ เปลี่ยนเป็นสีม่วงแกมน้ำตาลถึงม่วงแกมเขียว แต่ค่าดัชนีหักเห ค่าความถ่วงจำเพาะ และการเรืองแสงในแสงอัลตราไวโอเล็ต ไม่มีความแตกต่างจากก่อนการฉายรังสี

ทัวร์มาลีนสีเขียวแกมดำประเภทเอลบาไอต์ แสดงการเปลี่ยนแปลงสีที่ไม่แน่นอนชัดเจน บางตัวอย่างมีสีแดงม่วงปนเล็กน้อย บางตัวอย่างมีสีเขียวเข้มดำมากขึ้นค่าดัชนีหักเห ค่าความถ่วงจำเพาะ และการเรืองแสงในแสงอัลตราไวโอเล็ต ไม่มีความแตกต่างจากก่อนการฉายรังสี

ทัวร์มาลีนสีม่วง ประเภทเอลบาไอต์ มีสีม่วงเข้มขึ้น ค่าดัชนีหักเห ค่าความถ่วงจำเพาะ และการเรืองแสงในแสงอัลตราไวโอเล็ต ไม่มีความแตกต่างจากก่อนการฉายรังสี

ทัวร์มาลีนสีชมพูประเภทเอลบาไอต์ มีสีชมพูเข้มขึ้นตามความเข้มรังสีที่เพิ่มขึ้น แต่ค่าดัชนีหักเห ค่าความถ่วงจำเพาะ และการเรืองแสงในแสงอัลตราไวโอเล็ต ไม่มีความแตกต่างจากก่อนการฉายรังสี

สำหรับมลทินภายในของทัวร์มาลีนแต่ละกลุ่มสี ก่อนและหลังฉายรังสีแกมมา ไม่แสดงลักษณะของการเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัด อาจกล่าวได้ว่ารังสีแกมมาที่ใช้ไม่มีผลกระทบต่อลักษณะภายในของทัวร์มาลีน

ข้อมูล EDXRF พบว่า ผลการวิเคราะห์ทัวร์มาลีนทั้งก่อนและหลังการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ นั้นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ข้อมูล UV-Vis-NIR พบว่า

อิทธิพลจากการฉายรังสีแกมมานั้นทำให้ทัวร์มาลีนสีเขียวแกมดำบางตัวอย่างและทัวร์มาลีนสีเขียวแกมฟ้าบางตัวอย่าง ที่มีสีแดงม่วงเกิดร่วมเมื่อใช้ความเข้มรังสีที่ 100 Mrad โดยแสดงพีคที่ประมาณ 497 nm (Fe^{2+}) (Rossman and Mattson, 1987) ชัดเจนขึ้น ส่วนทัวร์มาลีนสีม่วงและ สีชมพู ที่มีสีแดงปนมากขึ้น แสดงพีคที่ 392 520 (519) nm (Mn^{3+}) เด่นชัดมากขึ้นเมื่อใช้ความเข้มรังสีเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจาก



การเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนของแถบการดูดกลืนที่สัมพันธ์กับธาตุแมงกานีส (Mn^{3+}) (Rossman and Reinitz, 1988; Burzo, 2005; Camargo *et al.*, 2006)

ข้อมูล FTIR พบว่า

ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนในช่วงใกล้อินฟราเรด (Mid-IR) พบว่า การฉายรังสีแกมมานั้นไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการเปลี่ยนแปลงในย่านรังสีอินฟราเรดของทัวร์มาลีนทุกกลุ่มสี

ข้อมูล Raman พบว่า

การฉายรังสีแกมมานั้นไม่ส่งผลกระทบต่อรามานสเปกตรัมของทัวร์มาลีนที่ทำการทดลองทุกกลุ่มสี

ข้อมูล Photoluminescence พบว่า

การฉายรังสีแกมมานั้นไม่ส่งผลกระทบต่อความเข้มของการเปลี่ยนแปลงของ PL สเปกตรัมของทัวร์มาลีนทุกกลุ่มที่ทำการศึกษาในครั้งนี้

5.1.3 การเปรียบเทียบผลการศึกษา

การเปรียบเทียบลักษณะการดูดกลืนแสงที่สำคัญในช่วง UV-Vis-NIR, IR และรามานสเปกตรัมของทัวร์มาลีนชนิดคราไวต์และเอลบาไอต์จากการศึกษาในครั้งนี้กับงานวิจัยที่มีผู้เคยศึกษามาแล้ว แสดงดังตารางที่ 5.1.1 ถึง 5.1.6 และดูรายละเอียดเพิ่มเติมของทัวร์มาลีนและข้อมูลทาง สเปกโทรสโกปีที่มีผู้เคยศึกษามาแล้วได้ในบทที่ 2



ตารางที่ 5.1.1 ข้อมูลเปรียบเทียบลักษณะการดูดกลืนแสงที่สำคัญในช่วง UV-Vis-NIR ของทัวร์มาลีน

สาเหตุ	ตำแหน่งการดูดกลืน (nm)										
	Faye <i>et al.</i> (1947)	Rossman and Mattson (1984)	Rossman and Mattson (1986)*	Rossman and Mattson (1987)*	Burzo (2005)	Wentzell <i>et al.</i> (2005)	Carmargo <i>et al.</i> (2006)	Abduriyim <i>et al.</i> (2006)	Maskovtsev <i>et al.</i> (2006)*	บุญทวี ศรีประเสริฐ และคณะ (2551)	
										ทัวร์มาลีนสีแดง ม่วง	ทัวร์มาลีนสีเขียวถึง น้ำเงิน
Mn ³⁺				520	515-513 392	515	512 392.1	515	515	518-521 387-393	518-522
Mn ²⁺			633 413		414		434.7				433-439 412-413
Mn ²⁺ --> Ti ⁴⁺			325								
Cu ²⁺						900-910 690-720		690	920 695		700
Fe ²⁺	1111 833 714	1100** 700**	1100 700	1250 1100 765 670 550 497	1250 1176 1000 720 675		1176 724.6			670-715	722 700

*ทัวร์มาลีนชนิดเอลบาไอต์ ** ทัวร์มาลีนชนิดตราไวต์



ตารางที่ 5.1.1 ข้อมูลเปรียบเทียบลักษณะการดูดกลืนแสงที่สำคัญในช่วง UV-Vis-NIR ของทัวร์มาลีน (ต่อ)

สาเหตุ	ตำแหน่งการดูดกลืน (nm)										
	Faye <i>et al.</i> (1947)	Rossmann and Mattson (1984)	Rossmann and Mattson (1986)*	Rossmann and Mattson (1987)*	Burzo (2005)	Wentzell <i>et al.</i> (2005)	Carmargo <i>et al.</i> (2006)	Abduriyim <i>et al.</i> (2006)	Maskovtsev <i>et al.</i> (2006)*	บุญทวี ศรีประเสริฐ และคณะ (2551)	
										ทัวร์มาลีนสีแดง ม่วง	ทัวร์มาลีนสีเขียวถึง น้ำเงิน
Fe ³⁺	454			485 420						478-489	
Fe ³⁺ - Fe ³⁺		540 485		535-545							
Fe ²⁺ - Fe ³⁺				550							
Fe ²⁺ --> Fe ³⁺	571 540										
Fe ²⁺ --> Ti ⁴⁺		400-460	415								
Ti ³⁺ --> Ti ⁴⁺	450									450-453	
V ³⁺						599-610 418-440					606-609
OH		1300-1500	975	975	1428	1400-1500	1428			1426-1484	1320-1475

*ทัวร์มาลีนชนิดเอลบาไอต์ ** ทัวร์มาลีนชนิดคราไวต์



ตารางที่ 5.1.2 ข้อมูลเปรียบเทียบลักษณะการดูดกลืนแสงในช่วง UV-Vis-NIR ของพั้วร์มาลีนที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้ ทั้งก่อนเผา หลังเผา และหลังการอบรังสี

สาเหตุ	ตำแหน่งการดูดกลืน (nm)																	
	สีเขียวแกมเหลือง			สีเขียว			สีเขียวแกมฟ้า			สีเขียวแกมดำ			สีม่วง			สีชมพู		
	ก่อน	หลัง	หลัง	ก่อน	หลัง	หลัง	ก่อน	หลัง	หลัง	ก่อน	หลัง	หลัง	ก่อน	หลัง	หลัง	ก่อน	หลัง	หลัง
		เผา	อบ		เผา	อบ		เผา	อบ		เผา	อบ		เผา	อบ		เผา	อบ
Mn ³⁺																392	392	392
																519	519	519
Mn ²⁺	437	437	437	414	414	414	414	414	414	414	414	414						
							437	437	437									
Cu ²⁺													900	900	900			
Fe ²⁺							497	497	497				689	689	689			
							718	718	718							718	718	718
										724	724	724						
Fe ³⁺													392	392	392			
													519	519	519			
V ³⁺	608	608	608	437	437	437	608	608	608									
				608	608	608												
OH	975	975	975	975	975	975										975	975	975
	1307	1307	1307															
				1318	1318	1318	1318	1318	1318	1318	1318	1318	1318	1318	1318	1318	1318	1318
	1429	1429	1429	1429	1429	1429	1429	1429	1429	1431	1431	1431	1429	1429	1429	1429	1429	1429
				1436	1436	1436	1436	1436	1436									
	1475	1475	1475	1475	1475	1475	1475	1475	1475	1475	1475	1475	1475	1475	1475	1465	1465	1465



ตารางที่ 5.1.3 ข้อมูลเปรียบเทียบลักษณะการดูดกลืนรังสีที่สำคัญในช่วง IR ของทัวร์มาลีน

สาเหตุ	ตำแหน่งการดูดกลืน (cm ⁻¹)				
	Robert (1996)	Burzo (2005)	Reddy <i>et al.</i> (2007)	บุญทวี ศรีประเสริฐ และคณะ (2551)	
				ทัวร์มาลีนสีแดงม่วง	ทัวร์มาลีนสีเขียวถึงน้ำเงิน
Fe ²⁺			7900-10400 3555		
O-H		3692 3680 3670 3650 3604 3594 3586 3583 3568 3558 3507 3492 3473 3464	7600 7000 6500 3655 3600 3500-3560** 3460	3330	3740
H กับ O ของ SiO ₄		3493			
O-H ที่สัมพันธ์กับธาตุอื่นๆ (Al, Fe, Mn, Mg)			3555 4000-4800		
MgOH			1100 4500	4533-4535	4500-4536
AlOH			4600	4597-4602	4596-4597
FeOH			4300		
NaOH	3738**				
OH-[]	3677**				
BO ₃	1300-1400 600-800	600-800	1300		
2Mg ²⁺ + O ₂ และ B ³⁺	1380	1380			
Mg ²⁺ และ Al ³⁺	1340	1340			
O ₂ กับ B ³⁺ และ 2Al ³⁺	1290	1290			
Si ₆ O ₁₈			1000		
Si-O	800-1200	1100			
Si-O-Si	700	700			

*ทัวร์มาลีนชนิดเอลบาอิต์ ** ทัวร์มาลีนชนิดคราไวต์



ตารางที่ 5.1.4 ข้อมูลเปรียบเทียบลักษณะการดูดกลืนรังสีในช่วง IR ของทัวร์มาลีนที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้ ทั้งก่อนเผา หลังเผา และหลังการอบรังสี

สาเหตุ	ตำแหน่งรามานสเปกตรา (cm ⁻¹)																	
	สีเขียวแกมเหลือง			สีเขียว			สีเขียวแกมฟ้า			สีเขียว-ดำ			สีม่วง			สีชมพู		
	ก่อน	หลัง	หลัง	ก่อน	หลัง	หลัง	ก่อน	หลัง	หลัง	ก่อน	หลัง	หลัง	ก่อน	หลัง	หลัง	ก่อน	หลัง	หลัง
	เผา	อบ		เผา	อบ		เผา	อบ		เผา	อบ		เผา	อบ		เผา	อบ	
O-H	6996	6996	6996	6996	6996	6996	6996	6996	6996	6996	6996	6996	6996	6996	6996	6996	6996	6996
	3903	3903	3903	3903	3903	3903	3903	3903	3903	3903	3903	3903	3903	3903	3903	3903	3903	3903
	3328	3328	3328	3328	3328	3328	3328	3328	3328	3328	3328	3328	3328	3328	3328	3328	3328	3328
MgOH	4533	4533	4533	4533	4533	4533	4533	4533	4533	4533	4533	4533	4533	4533	4533	4533	4533	4533
Al-OH	4595	4595	4595	4595	4595	4595	4595	4595	4595	4595	4595	4595	4595	4595	4595	4595	4595	4595
FeOH	4339	4339	4339	4339	4339	4339	4339	4339	4339	4339	4339	4339	4339	4339	4339	4339	4339	4339
O-H ที่สัมพันธ์กับธาตุอื่นๆ (Al, Fe, Mn, Mg)	4867	4867	4867	4867	4867	4867	4867	4867	4867	4867	4867	4867	4867	4867	4867	4867	4867	4867
	4440	4440	4440	4440	4440	4440	4440	4440	4440	4440	4440	4440	4440	4440	4440	4440	4440	4440
	4199	4199	4199	4199	4199	4199	4199	4199	4199	4199	4199	4199	4199	4199	4199	4199	4199	4199
	4036	4036	4036	4036	4036	4036	4036	4036	4036	4036	4036	4036	4036	4036	4036	4036	4036	4036
อื่นๆ	6794	6794	6794	6794	6794	6794	6794	6794	6794	6794	6794	6794	6794	6794	6794	6794	6794	6794
	5178	5178	5178	5178	5178	5178	5178	5178	5178	5178	5178	5178	5178	5178	5178	5178	5178	5178
	2992	2992	2992	2992	2992	2992	2992	2992	2992	2992	2992	2992	2992	2992	2992	2992	2992	2992



ตารางที่ 5.1.5 ข้อมูลเปรียบเทียบลักษณะตำแหน่งรามานสเปกตราของทัวร์มาลีน

สาเหตุ	ตำแหน่งรามานสเปกตรา (cm ⁻¹)			
	Reddy <i>et al.</i> (2007)	Burzo (2005)	บุญทวี ศรีประเสริฐ และคณะ (2551)	
			ทัวร์มาลีนสีแดง ม่วง	ทัวร์มาลีนสีเขียว ถึงน้ำเงิน
การยืดตัวของ Y-O		230		
Fe (ทัวร์มาลีนที่มีองค์ประกอบระหว่าง Buergerite กับ Schorl)		282 635 674 697	630-635	
Mg (ในดราไวต์)		215 237 698		
Mg-O	225			
การยืดตัวของ Al-O	375 400	370	369-372 376 399-404	369-371
การโค้งงอของ O-Al-O	250			
การสั่นที่สมมูลของ Si-O-Si		670		
การสั่นของ B-O		750		750
การยืดตัวของ Si-O	1100	1020	1115	1114-1115
การยืดตัวไม่สมมูล ของ B-O		1400		
การยืดตัว ของ B-O, การโค้งงอของ O-B-O, B-O-Al และการเปลี่ยนรูปสมมูลของ Si-O-Si	700		703-709	700-705



ตารางที่ 5.1.6 ข้อมูลเปรียบเทียบลักษณะตำแหน่งรามานสเปกตราของทัวร์มาลีนที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้ ทั้งก่อนเผา หลังเผา และหลังการอบรังสี

สาเหตุ	ตำแหน่งรามานสเปกตรา (cm ⁻¹)																	
	สีเขียวแกมเหลือง			สีเขียว			สีเขียวแกมฟ้า			สีเขียว-ดำ			สีม่วง			สีชมพู		
	ก่อน	หลัง เผา	หลัง อบ	ก่อน	หลัง เผา	หลัง อบ	ก่อน	หลัง เผา	หลัง อบ	ก่อน	หลังเผา	หลัง อบ	ก่อน	หลัง เผา	หลัง อบ	ก่อน	หลัง เผา	หลัง อบ
Fe (ใน Buergerite กับ Schorl)		637								637	637	637	639	637	639		637	
Mg (ในคราไวต์)	214		214	212	212	212												
Mg-O		223					223	223	223	223	223	223	224	223	224		223	
การยึดตัวของ Al-O		408					408	408	408	408	408	408	407	408	407	413	408	413
	372	371	372	375	375	375	376	376	376	371	371	371	375	371	375	380	371	380
การโค้งงอของ O-Al-O	243	244	243	243	243	243	244	244	244	244	244	244	247	244	247	240	244	240
การสั่นของ B-O	760		760	759	759	759												
		751								751	751	751	751	751	751		751	
การยึดตัวของ Si-O	1070		1070	1070	1070	1070							1091		1091			
	1062		1062				1062	1062	1062							1067		1067
		1056								1056	1056	1056		1056			1056	
การยึดตัวไม่สมดุลของ B-O																1394		1394
การยึดตัวของ B-O, การโค้งงอของ O-B-O, B-O-Al และการเปลี่ยนรูปสมดุลของ Si-O-Si	709		709										712		712			
		704								704	704	704		704			704	
อื่นๆ		841								841	841	841		841			841	
				818	818	818												
				724	724	724	730	730	730							735		735
		514					514	514	514	514	514	514		514			514	



5.2 การ์เน็ต

5.2.1 ผลที่ได้จากการใช้ความร้อน

การ์เน็ตสีแดงแกมม่วง มีสีเข้มดำขึ้น เนื่องจากเกิดคราบของแร่เหล็กฮีมาไทต์เคลือบที่ผิว หลังจากขัดผิวใหม่ พบว่าสีเปลี่ยนไปทางสีส้มมากขึ้นเล็กน้อย

การ์เน็ตสีแดงส้มแกมน้ำตาล มีสีเข้มดำขึ้น เนื่องจากเกิดคราบของแร่เหล็กฮีมาไทต์เคลือบที่ผิว หลังจากขัดผิวใหม่ พบว่าสีเปลี่ยนไปทางสีส้มมากขึ้นเล็กน้อย

การ์เน็ตสีส้ม (อัตราเร่งอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อ 1 วินาที) มีสีเข้มขึ้น เนื่องจากเกิดคราบของแร่เหล็กฮีมาไทต์เคลือบที่ผิว และหลายตัวอย่างแตกร้าวกว่าที่ 800 องศาเซลเซียสหลังจากขัดผิวใหม่ พบว่าสีเปลี่ยนไปทางสีดำมากขึ้น

การ์เน็ตสีส้ม (อัตราเร่งอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียสต่อ 1 วินาที) มีสีเข้มขึ้น เนื่องจากเกิดคราบของแร่เหล็กฮีมาไทต์เคลือบที่ผิว หลังจากขัดผิวใหม่ พบว่าสีเปลี่ยนไปทางสีดำมากขึ้นเล็กน้อย

การ์เน็ตสีส้ม ที่ใช้ความร้อนด้วยการใช้อัตราเร่ง 10 องศาเซลเซียสต่ออนาที ณ ระดับอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส มีการแตกหักเสียหาย อาจเนื่องจากมลทินภายในของตัวอย่างและอัตราเร่งอุณหภูมิที่เร็วเกินไป ดังนั้นจึงได้ใช้อัตราเร่งที่ 1 องศาเซลเซียสต่ออนาที ผลที่ได้ไม่มีความแตกต่างจากที่กล่าวมา ยกเว้นว่าตัวอย่างไม่มีการแตกหักเสียหายเลย

สำหรับมลทินภายในของการ์เน็ตแต่ละกลุ่มสีแสดงลักษณะของการเปลี่ยนแปลงก่อนและหลังการใช้ความร้อนค่อนข้างชัดเจน โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงของมลทินชนิดต่างๆ เช่น รอยแตกรูปจานจากมลทินผลึกแร่ รอยแตกยาวจากภายในเนื้อพลอย การสลายตัวของมลทินเส้นเข็ม การเข้มข้นของคราบเหล็กออกไซด์ เป็นสีแดงปนน้ำตาลเข้ม คราบแร่ฮีมาไทต์บนพื้นผิว (Eeckhout *et al*, 2004; Gubelin and Koivula, 2005) เป็นต้น จะสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 800 องศา ขึ้นไป และที่ 1000 องศา พบว่าพลอยกลุ่มสีส้มมีรอยแตกร้าวก่อเกิดขึ้นจำนวนมาก

จากการตรวจสอบด้วยเครื่องมือพื้นฐานพบว่า สมบัติทางกายภาพและทางแสงของการ์เน็ตแต่ละกลุ่มสีก่อนและหลังการใช้ความร้อน ไม่เปลี่ยนแปลง

ข้อมูล EDXRF พบว่า ผลการวิเคราะห์การ์เน็ตทั้งก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ นั้นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ข้อมูล UV-Vis-NIR พบว่า

การ์เน็ตสีแดงแกมม่วง ส่วนใหญ่แสดงการยกตัวดูดกลืนที่ประมาณ 300-500 nm ขึ้นเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

การ์เน็ตสีแดงส้มแกมน้ำตาล ส่วนใหญ่แสดงการยกตัวดูดกลืนที่ประมาณ 300-500 nm ขึ้นเล็กน้อย เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

การ์เน็ตสีส้ม แสดงการเปลี่ยนแปลงไม่เด่นชัด



คาร์เนตสีแดงแกมม่วงและแดงส้มแกมน้ำตาลหลังการใช้ความร้อนมีการดูดกลืนในย่านสีน้ำเงินเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับสีที่ปรากฏว่าพลอยมีความเข้มและมีสีน้ำตาลคล้ำขึ้น และความเด่นชัดของฟิสิกการดูดกลืนลดลงเมื่อใช้ความร้อนเพิ่มขึ้น ส่วนคาร์เนตสีส้ม ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัด

ข้อมูล FTIR พบว่า

การใช้ความร้อนนั้นไม่ส่งผลกระทบต่ออย่างชัดเจนต่อการดูดกลืนแสงในช่วงกลางอินฟราเรด (Mid-IR) ของคาร์เนตที่ทำการทดลองทุกกลุ่มสี

ข้อมูล Raman พบว่า

การใช้ความร้อนนั้นไม่ส่งผลกระทบต่อรามานสเปกตรัมของคาร์เนตที่ทำการทดลองทุกกลุ่มสี และการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์นั้นปรากฏว่า คาร์เนตทุกกลุ่มไม่แสดงฟลักซ์ใดๆทั้งก่อนและหลังใช้ความร้อน

5.2.2 ผลที่ได้จากการฉายรังสีแกมมา

คาร์เนตสีแดงแกมม่วง ประเภทแอลมันไดต์-ไพโรป ที่ 100 Mrad ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงสีที่ชัดเจน บางตัวอย่างมีความเข้มของสีลดลง ที่ 200 Mrad แสดงการเปลี่ยนแปลงสีที่ชัดเจนขึ้น ส่วนใหญ่มีสีแดงใสมากขึ้นค่าดัชนีหักเห ค่าความถ่วงจำเพาะ และการเรืองแสงในแสงอัลตราไวโอเล็ต ไม่มีความแตกต่างจากก่อนการฉายรังสี

คาร์เนตสีแดงส้มแกมน้ำตาล ประเภทแอลมันไดต์-ไพโรป ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงสีที่ชัดเจน ส่วนค่าดัชนีหักเห ค่าความถ่วงจำเพาะ และการเรืองแสงในแสงอัลตราไวโอเล็ต ไม่มีความแตกต่างจากก่อนการฉายรังสี

คาร์เนตสีส้ม ประเภทสเปสซาร์ไทต์ ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงสีที่ชัดเจน ค่าดัชนีหักเห ค่าความถ่วงจำเพาะ และการเรืองแสงในแสงอัลตราไวโอเล็ต ไม่มีความแตกต่างจากก่อนการฉายรังสี

รังสีแกมมาที่ใช้ไม่มีผลกระทบต่อลักษณะมลทินภายในของคาร์เนตที่ทำการทดลองทุกกลุ่มสี

ข้อมูล EDXRF พบว่าผลจากการฉายรังสีแกมมา ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบอย่างมีนัยสำคัญ

ข้อมูล UV-Vis-NIR พบว่า

คาร์เนตกลุ่มสีแดงแกมม่วงและแดงส้มแกมน้ำตาล นั้น ความเด่นชัดของฟิสิกการดูดกลืนโดยรวมลดลงเล็กน้อยหลังการฉายรังสีแกมมา ส่วนคาร์เนตสีส้มไม่แสดงการเปลี่ยนแปลง

ข้อมูล FTIR พบว่า

การฉายรังสีแกมมานั้นไม่ส่งผลกระทบต่ออย่างชัดเจนต่อการดูดกลืนแสงในย่าน Mid-IR ของคาร์เนตที่ทำการทดลองทุกกลุ่มสี



ข้อมูล Raman พบว่า

การอาบรังสีไม่มีผลกับรามานสเปกตรัมของการ์เนตทุกกลุ่ม และการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์นั้นปรากฏว่า การ์เนตทุกกลุ่มไม่แสดงฟีกใดๆทั้งก่อนและหลังอาบรังสีที่ความเข้ม 100 และ 200 Mrad

5.2.3 การเปรียบเทียบผลการศึกษา

การเปรียบเทียบลักษณะการดูดกลืนแสงที่สำคัญในช่วง UV-Vis-NIR และรามานสเปกตรัมของการ์เนตชุดแอลมันไคต์-ไพโรปและสเปสซาร์ไทต์จากการศึกษาในครั้งนี้กับงานวิจัยที่มีผู้เคยศึกษามาแล้ว แสดงดังตารางที่ 5.2.1 ถึง 5.2.6 และดูรายละเอียดเพิ่มเติมของการ์เนตและข้อมูลทางสเปกโทรสโกปีที่มีผู้เคยศึกษามาแล้วได้ในบทที่ 2



ตาราง 5.2.1 ข้อมูลเปรียบเทียบลักษณะการดูดกลืนแสงที่สำคัญในช่วง UV-Vis-NIR ของการ์เน็ต

ธาตุ	ตำแหน่งการดูดกลืน (nm)											
	Burns (1993)	Lauris and Knox (2001) ^S	Schmetzer and Bernhardt (1999) ^C	Schmetzer <i>et al.</i> (2001) ^{PS}	Guastoni and Pezzotta (2001) ^P	Krzemnicki <i>et al.</i> (2001)	Siriprakaysak (2007)	Schmetzer and Bernhardt (2002) ^{GS}	Schmetzer <i>et al.</i> (2002) ^{PS}	Phichaika m-jornwut (2005)	Eeckhout <i>et al.</i> (2004)	Hainschwang and Notari (2006)
Cr ³⁺	606.1 ^G 573.1 ^A 568.0 ^A 562.1 ^A 448.6 ^G 414.1 ^A 412.5 ^A 412.0 ^A				569	573 ^C			688 571			
Fe ³⁺	803.0 ^{An} 762.7 ^G 600.6 ^{An} 490.2 ^G 440.5 ^{An} 423.9 ^G 416.7 ^{An} 370.4 ^{An} 369.8 ^G		429	430						430 327-329	370 ^H	860 ^{An} 440 ^{An}

หมายเหตุ: A-แอลมันไดต์ An-แอนคราไดต์ C-การ์เน็ตเจ้าสามสี G-กรอสซูลาไรต์ H-เฮสโซไนต์ P-ไพโรป S-สเปซซาร์ไทต์



ตาราง 5.2.1 ข้อมูลเปรียบเทียบลักษณะการดูดกลืนแสงที่สำคัญในช่วง UV-Vis-NIR ของคาร์เนต (ต่อ)

ธาตุ	ตำแหน่งการดูดกลืน (nm)											
	Burns (1993)	Laurs and Knox (2001) ^S	Schmetzer and Bernhardt (1999) ^C	Schmetzer <i>et al.</i> (2001) ^{PS}	Guastoni and Pezzotta (2001) ^P	Krzemnicki <i>et al.</i> (2001)	Siriprakaysak (2007)	Schmetzer and Bernhardt (2002) ^{GS}	Schmetzer <i>et al.</i> (2002) ^{PS}	Phichaika m-jornwut (2005)	Eeckhout <i>et al.</i> (2004)	Hainschwang and Notari (2006)
Fe ²⁺		690 610 570 525 504	 518 503 459	687 610 525 503 459	 575-579 521-524 501-503 495		573 525 505	687 610 569 525 503 459	 525 503 459	690-697 570-575 520-527 501-505	570 ^{P, AP, AS} 529 ^{AS, S} 526 ^{P, AP, AS} 505 ^{P, AP, AS} 459 ^{AS, S}	
Mn ²⁺		483 460 430 421 409	483 422 408	525 483 459 430 421 410	 458-462 419-422 398 363-365	 431 ^S 422 ^S 408 ^S	461 427 401 368	525 483 459 430 421 410	525 483 459	420-430 405-410 363-365	529 ^{AS, S} 482 ^{AS, S} 459 ^{AS, S} 429 ^{AS, S} 421 ^{AS, S} 410 ^{AS, S}	
Mn ³⁺	588.2 ^G 490.2 ^G											
V ³⁺	606.0 ^G 588.2 ^A 490.2 ^A 420.0 ^G		571	569		573 ^C			571			

หมายเหตุ: A-แอลมันไดต์ An-แอนคราไดต์ C-คาร์เนตเจ้าสามสี G-กรอสชูลาไรต์ H-เฮสโซไนต์ P-ไพโรป S-สปสซาร์ไทต์



ตาราง 5.2.2 ข้อมูลเปรียบเทียบลักษณะการดูดกลืนแสงในช่วง UV-Vis-NIR ของคาร์เนตที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้ ทั้งก่อนเผา หลังเผา และหลังการอบรังสี

ธาตุ	ตำแหน่งการดูดกลืน (nm)								
	สีแดงแกมม่วง (โรดไนต์)			สีแดงส้มแกมน้ำตาล (แอลมันไดต์-ไพโรป)			สีส้ม (สเปสซาร์ไทต์)		
	ก่อน	หลังเผา	หลังอบ	ก่อน	หลังเผา	หลังอบ	ก่อน	หลังเผา	หลังอบ
Cr ³⁺	572	572	572	572	572	572	572	572	572
Fe ²⁺	695	695	695	695	695	695	695	695	695
	618	618	618	618	618	618	618	618	618
	572	572	572	572	572	572	572	572	572
	524	524	524	524	524	524	524	524	524
	504	504	504	504	504	504	504	504	504
	460	460	460	460	460	460	460	460	460
Mn ²⁺	524	524	524	524	524	524	524	524	524
	460	460	460	460	460	460	460	460	460
	426	426	426	426	426	426	426	426	426
	408	408	408	408	408	408	408	408	408
	396	396	396	396	396	396	396	396	396



ตาราง 5.2.3 ข้อมูลเปรียบเทียบลักษณะการดูดกลืนรังสีที่สำคัญในช่วง IR ของคาร์เนต

สาเหตุ	ตำแหน่งการดูดกลืน (cm ⁻¹)						
	McMilan <i>et al.</i> (1989) ^P	Guastoni and Pezzotta (2001) ^P	Johnson (2003) ^{GAn}	Phichaikam-jornwut (2005)	Mareski <i>et al.</i> (2005)	Siriprakaysak (2007)	Katerinopoulou <i>et al.</i> (2009) ^{An}
H ₂ O				5200			
OH-band		3600-3660	3645				
OH stretching				3200-3700			3695
Si-O stretching	1003 976 907 877						
ν_4 mode ของ SiO ₄ tetrahedra					640 ^A 571 ^A 530 ^A		
ν_3 -asymmetric stretching mode ของ SiO ₄ tetrahedra						800-1150	
ν_3 mode ของ SiO ₄ tetrahedra					998 ^A 976 ^S 967 ^A 944 ^S 901 ^A 881 ^S 877 ^A 859 ^S		
ν_2 -symmetric และ ν_4 mode -asymmetric bending mode ของ SiO ₄ tetrahedra						450-650	

หมายเหตุ: A-แอลมัน ไคต์ An-แอนดราไคต์ C-คาร์เนตเจ้าสามสี G-กรอสซูลาไรต์ H-เฮสโซไนต์ P-ไพโรป S-สเปสซาร์ไคต์



ตาราง 5.2.3 ข้อมูลเปรียบเทียบลักษณะการดูดกลืนรังสีที่สำคัญในช่วง IR ของการ์เน็ต (ต่อ)

สาเหตุ	ตำแหน่งการดูดกลืน (cm ⁻¹)						
	McMilan <i>et al.</i> (1989) ^P	Guastoni and Pezzotta (2001) ^P	Johnson (2003) ^{GAn}	Phichaikam-jornwut (2005)	Mareski <i>et al.</i> (2005)	Siriprakaysak (2007)	Katerinopoulou <i>et al.</i> (2009) ^{An}
Ti-O bonds หรือ Ti-O ใน [TiO ₄] tetrahedron							700
Ti-O bonding ใน TiO ₆ octahedron							655
[FeO ₄] tetrahedron							595
(Fe ³⁺ , Al ³⁺) - O octahedron							522 445 407
SiO ₄ rotations					380 ^{A,S}		



ตาราง 5.2.4 ข้อมูลเปรียบเทียบลักษณะการดูดกลืนแสงในช่วง IR ของคาร์เนตที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้ ทั้งก่อนเผา หลังเผา และหลังการอบรังสี

สาเหตุ	ตำแหน่งการดูดกลืน (cm ⁻¹)								
	สีแดงแกมม่วง (โรโดไนต์)			สีแดงส้มแกมน้ำตาล (แอลมันไดต์-โพโรป)			สีส้ม (สเปสซาร์ไทต์)		
	ก่อน	หลังเผา	หลังอบ	ก่อน	หลังเผา	หลังอบ	ก่อน	หลังเผา	หลังอบ
ν_4 mode ของ SiO ₄ tetrahedra	524	524	524	524	524	524	524	524	524
ν_3 -asymmetric stretching mode ของ SiO ₄ tetrahedra	1116	1116	1116	1116	1116	1116	1116	1116	1116
ν_3 mode ของ SiO ₄ tetrahedra	943	943	943	943	943	943	943	943	943
	886	886	886	886	886	886	886	886	886
ν_2 -symmetric และ ν_4 mode -asymmetric bending mode ของ SiO ₄ tetrahedra	633	633	633	633	633	633	633	633	633
	552	552	552	552	552	552	552	552	552
	467	467	467	467	467	467	467	467	467
ไม่มีข้อมูล	2342	2342	2342	2342	2342	2342	2342	2342	2342
	418	418	418	418	418	418	418	418	418



ตาราง 5.2.5 ข้อมูลเปรียบเทียบตำแหน่งรามานสเปกตราที่สำคัญของคาร์เนต (ต่อ)

สาเหตุ	ตำแหน่งรามานสเปกตรา (cm ⁻¹)		
	Kolesov and Geiger (1998)	Markreski <i>et al.</i> (2005)	Bersania <i>et al.</i> (2009)
R (SiO ₄) ⁺	355 ^A 353 ^P 350 ^S 344 ^P 342 ^A 323 ^A 322 ^P 321 ^S 314 ^A 302 ^S		
T (SiO ₄) ⁺	222 ^P 211 ^P 172 ^S 170 ^A 167 ^A 162 ^S		
T (X ²⁺)	284 ^P 269 ^S 256 ^A 221 ^S 216 ^A		

สาเหตุ	ตำแหน่งรามานสเปกตรา (cm ⁻¹)		
	Kolesov and Geiger (1998)	Markreski <i>et al.</i> (2005)	Bersania <i>et al.</i> (2009)
T (X ²⁺)	196 ^S 171 ^A 135 ^P		
Symmetric stretching mode ของ SiO ₄ tetrahedra		920	
Antisymmetric ของ SiO ₄ stretching vibration		1025 976 838	
SiO ₄ tetrahedra และ divalent cation translation			377 ^P 373 ^S 371 ^A 363 ^P 350 ^S 343 ^A

หมายเหตุ: A-แอลมันไดต์ An-แอนดราไดต์ C-คาร์เนตเจ้าสามสี G-กรอสชูลาไรต์ H-เฮสโซไนต์ P-ไพโรป S-สเปซซาร์ไทต์



ตาราง 5.2.6 ข้อมูลเปรียบเทียบตำแหน่งรามานสเปกตราก่อนการเผาไหม้ที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้ ทั้งก่อนเผา หลังเผา และหลังการอบรังสี

สาเหตุ	ตำแหน่งรามานสเปกตราน (cm ⁻¹)								
	สีแดงแกมม่วง (โรโดไนต์)			สีแดงส้มแกมน้ำตาล (แอลมันไดต์-ไพโรป)			สีส้ม (สเปสซาร์ไทต์)		
	ก่อน	หลังเผา	หลังอบ	ก่อน	หลังเผา	หลังอบ	ก่อน	หลังเผา	หลังอบ
Si-O stretching							1029	1029	1029
	917	917	917	917	917	917			
							908	908	908
	861	861	861	861	861	861			
Si-O bending									
							848	848	848
	637	637	637	637	637	637			
							630	630	630
	558	558	558	558	558	558			
							552	552	552
	504	504	504	504	504	504			
							499	499	499
	482	482	482	482	482	482			
							472	472	472
R (SiO ₄) ⁺							371	371	371
							472	472	472
	352	352	352	352	352	352			
							371	371	371
	315	315	315	315	315	315			
							349	349	349
							320	320	320
						300	300	300	



ตาราง 5.2.6 ข้อมูลเปรียบเทียบตำแหน่งรามานสเปกตร้าของคาร์เนตที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้ ทั้งก่อนเผา หลังเผา และหลังการอบรังสี (ต่อ)

สาเหตุ	ตำแหน่งรามานสเปกตร้า (cm ⁻¹)								
	สีแดงแกมม่วง (โรโดไนต์)			สีแดงส้มแกมน้ำตาล (แอลมันไดต์-ไพโรป)			สีส้ม (สเปสซาร์ไทต์)		
	ก่อน	หลังเผา	หลังอบ	ก่อน	หลังเผา	หลังอบ	ก่อน	หลังเผา	หลังอบ
Antisymmetric ของSiO ₄ stretching vibration							970	970	970
SiO ₄ tetrahedra และdivalent cation translation							371	371	371
T (X ²⁺)							220	220	220
ไม่มีข้อมูล				1331	1331				
							1257	1257	1257
							1166	1166	1166
	1048	1048	1048	1048	1048	1048			
			669	669			815	815	815



5.3 ข้อคิดเห็นและวิจารณ์

5.3.1 ทัวร์มาลีน

การจัดแบ่งชนิดทัวร์มาลีนชนิดดราไวต์และเอลบาไอต์ นั้น สามารถใช้เทคนิค EDXRF, PL, Raman และ UV-Vis-NIR

ทัวร์มาลีนชนิดดราไวต์ สีเขียวแกมเหลือง เมื่อนำมาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 650 องศาเซลเซียส ทัวร์มาลีนมีการเปลี่ยนแปลงของสี โดยมีสีอ่อนลงเล็กน้อย ส่วนทัวร์มาลีนชนิดเอลบาไอต์นั้น การใช้ความร้อน 450 องศาเซลเซียสขึ้นไป จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของสีค่อนข้างชัดเจน โดยทัวร์มาลีนชนิดเอลบาไอต์ สีเขียวแกมฟ้า จะมีสีอ่อนลงเล็กน้อยที่อุณหภูมิตั้งแต่ 550 องศาเซลเซียสขึ้นไป ทัวร์มาลีนสีเขียวแกมดำ จะมีสีเขียวใสมากขึ้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ทัวร์มาลีนชนิดสีม่วง เปลี่ยนเป็นสีฟ้าแกมเขียว โดยที่อุณหภูมิประมาณ 650 องศาเซลเซียส จะมีสีฟ้าเข้มสดมากขึ้น ส่วนทัวร์มาลีนสีชมพู จะมีสีลดลงที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสขึ้นไป และสีลดลงจนเปลี่ยนเป็นไร้สีที่อุณหภูมิประมาณ 650 องศาเซลเซียส ขณะที่ลักษณะทางสเปกโทรสโกปี ก็มีการเปลี่ยนแปลงด้วยทั้งในช่วง UV-Vis-NIR, Mid-IR และ PL

ผลการฉายรังสีแกมมาแก่ทัวร์มาลีน ที่ระดับความเข้มรังสี 100 และ 200 Mrad พบว่า ทัวร์มาลีนประเภทดราไวต์ ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงสีที่ชัดเจน ส่วนทัวร์มาลีนประเภทเอลบาไอต์แสดงการเปลี่ยนแปลงของสีแตกต่างกัน โดยชนิดสีเขียวแกมฟ้า เปลี่ยนเป็นสีม่วงแกมน้ำตาลถึงม่วงแกมเขียว ชนิดสีเขียวแกมดำ บางตัวอย่างมีสีแดงม่วงปนเล็กน้อย บางตัวอย่างมีสีเขียวเข้มดำมากขึ้น ชนิดสีม่วงและสีชมพูมีสีเข้มขึ้นตามความเข้มรังสีที่เพิ่มขึ้น และแสดงการเปลี่ยนแปลงในช่วง UV-Vis-NIR

การใช้ความร้อนในระดับปานกลางในสภาวะมีออกซิเจนและการฉายรังสีแกมมาที่ความเข้มรังสีต่างๆ สามารถเปลี่ยนแปลงสีของทัวร์มาลีนได้ แต่จะเปลี่ยนแปลง มากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับชนิด ธาตุองค์ประกอบ ธาตุให้สี ระยะเวลาที่ใช้ และสภาวะแวดล้อมที่ใช้

5.3.2 การ์เน็ต

การจัดแบ่งชนิดของการเนตซูดสเปสเซอร์ไทต์ และ แอลมันไดต์-ไพโรป สามารถทำได้โดยใช้เทคนิค EPMA และ EDXRF สำหรับการให้ความร้อนแก่การ์เน็ตที่อุณหภูมิไม่เกิน 1,000 องศาเซลเซียส พบว่า การ์เน็ตชนิดสเปสเซอร์ไทต์ และชนิดแอลมันไดต์-ไพโรป เปลี่ยนแปลงสีน้อยมาก โดยมีสีเข้มดำขึ้นเนื่องจากเกิดแร่อิมาไทต์เคลือบที่ผิว นอกจากนี้ถ้าใช้อัตราเร่งของอุณหภูมิที่เร็วเกินไป (10 องศาเซลเซียสต่ออนาที) จะทำให้การ์เน็ตชนิดสเปสเซอร์ไทต์แตกร้าวเสียหายได้ แต่ลักษณะทางสเปกโทรสโกปีมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก โดยในช่วง UV-Vis-NIR การ์เน็ตซูดแอลมันไดต์-ไพโรป หลังการใช้ความร้อนจะมีการดูดกลืนในย่านสีน้ำเงินเพิ่มมากขึ้น ส่วนการ์เน็ตสีส้มสเปสเซอร์ไทต์ ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัด



การใช้ความร้อนไม่เกิน 1,000 องศาเซลเซียสในสภาวะมีออกซิเจน ทำให้การเนตชุดสเปสเซอร์ ไรต์ และแอลมันไคต์-ไฟโรป เปลี่ยนแปลงสีน้อยมาก และการใช้รังสีแกมมากับการเนตทั้งสองกลุ่ม ไม่แสดงผลชัดเจน จึงอาจสรุปได้ว่า วิธีการปรับปรุงคุณภาพทั้งสองวิธีในการทดลองครั้งนี้ ไม่สามารถเพิ่มมูลค่าให้การเนตได้

5.3.3 ผลที่ได้จากการทดลอง

การทดลองปรับปรุงคุณภาพทัวร์มาลีนและการเนตสีต่างๆโดยการใช้ความร้อนและรังสีแกมมา ได้ผลโดยสรุปในตารางที่ 5.3.1 ถึง ตารางที่ 5.3.2

ตารางที่ 5.3.1 ผลการปรับปรุงคุณภาพทัวร์มาลีนโดยการใช้ความร้อน 450-650 องศาเซลเซียส

ชนิด	การเปลี่ยนแปลง	หมายเหตุ
ดราไวต์		
สีเหลืองแกมเขียว	มีสีสด และความใสดีขึ้นเล็กน้อย	สีคงทน
สีเขียว	ไม่ชัดเจน	-
เอลบาไอต์		
สีเขียวแกมฟ้า	มีสีอ่อนลงเล็กน้อย	สีคงทน
สีเขียว	มีสีเขียวใสขึ้นเล็กน้อย	สีคงทน
สีม่วง	เปลี่ยนเป็นสีฟ้าที่ 550 องศาเซลเซียสขึ้นไป	สีคงทน
สีชมพู	เปลี่ยนเป็นสีชมพูอ่อนถึงไร้สีที่ 550 องศาเซลเซียสขึ้นไป	สีคงทน

จากตาราง 5.3.1 จะเห็นว่า ความร้อนที่ 550 องศาเซลเซียส ขึ้นไป ทำให้ทัวร์มาลีนชนิดเอลบาไอต์แสดงการเปลี่ยนแปลงของสีได้ชัดเจนกว่าทัวร์มาลีนดราไวต์

ตารางที่ 5.3.2 ผลการปรับปรุงคุณภาพทัวร์มาลีนโดยการฉายรังสีแกมมา ที่ 100 และ 200 Mrad

ชนิด	การเปลี่ยนแปลง	หมายเหตุ
ดราไวต์		
สีเหลืองแกมเขียว	เปลี่ยนแปลงไม่ชัดเจน	-
สีเขียว	เปลี่ยนแปลงไม่ชัดเจน	-
เอลบาไอต์		
สีเขียวแกมฟ้า	มีสีแดงม่วงเกิดขึ้นที่ 100 และ 200 Mrad	สีคงทน
สีเขียว	มีสีแดงม่วงเกิดขึ้นที่ 100 และ 200 Mrad	สีคงทน
สีม่วง	มีสีแดงเข้มมากขึ้นที่ 100 และ 200 Mrad	สีคงทน
สีชมพู	มีสีแดงเข้มมากขึ้นที่ 100 และ 200 Mrad	สีคงทน

จากตาราง 5.3.2 จะเห็นว่า รังสีแกมมาที่ความเข้มรังสี 100 Mrad ขึ้นไป ทำให้ทัวร์มาลีนชนิดเอลบาไอต์แสดงการเปลี่ยนแปลงของสีได้ชัดเจนกว่าทัวร์มาลีนดราไวต์



ตารางที่ 5.3.3 ผลการปรับปรุงคุณภาพการ์ดเน็ตโดยการใช้ความร้อน 800-1000 องศาเซลเซียส

ชนิด	การเปลี่ยนแปลง	หมายเหตุ
แอลมันไดต์-ไฟโรป		
สีแดงแกมม่วง	มีสีเข้มดำขึ้น	เนื่องจากเกิดคราบของแร่เหล็กฮีมาไทต์เคลือบที่ผิว หลังจากขัดผิวใหม่ พบว่าสีเปลี่ยนไปทางสีส้มมากขึ้นเล็กน้อย
สีแดงส้มแกมน้ำตาล	มีสีเข้มดำขึ้น	เนื่องจากเกิดคราบของแร่เหล็กฮีมาไทต์เคลือบที่ผิว หลังจากขัดผิวใหม่ พบว่าสีเปลี่ยนไปทางสีส้มมากขึ้นเล็กน้อย
สเปสซาร์ไทต์		
สีส้ม	มีสีเข้มดำขึ้น	เนื่องจากเกิดคราบของแร่เหล็กฮีมาไทต์เคลือบที่ผิว หลังจากขัดผิวใหม่ พบว่าสีเปลี่ยนไปทางสีส้มมากขึ้นเล็กน้อย นอกจากนี้การใช้ความร้อนในอัตราเร่ง 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ณ ระดับอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ตัวอย่างเกิดการแตกหักเสียหาย อาจเนื่องจากมลทินภายในของตัวอย่างและอัตราเร่งอุณหภูมิที่เร็วเกินไป ส่วนอัตราเร่งที่ 1 องศาเซลเซียสต่อนาที ผลที่ได้ไม่มีความแตกต่างจากการใช้อัตราเร่ง 10 องศาเซลเซียสต่อนาที แต่ตัวอย่างไม่แตกหักเสียหายเลย

จากตาราง 5.3.3 จะเห็นว่า ความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียสขึ้นไป ไม่ทำให้การ์ดเน็ตแอลมันไดต์-ไฟโรป และ สเปสซาร์ไทต์ แสดงการเปลี่ยนแปลงของสีที่ดีขึ้น

ตารางที่ 5.3.4 ผลการปรับปรุงคุณภาพการ์ดเน็ตโดยการฉายรังสีแกมมา ที่ 100 และ 200 Mrad

ชนิด	การเปลี่ยนแปลง	หมายเหตุ
แอลมันไดต์-ไฟโรป		
สีแดงแกมม่วง	ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงสีที่ชัดเจน	-
สีแดงส้มแกมน้ำตาล	ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงสีที่ชัดเจน	-
สเปสซาร์ไทต์		
สีส้ม	ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงสีที่ชัดเจน	-

จากตาราง 5.3.4 จะเห็นว่า รังสีแกมมาไม่ทำให้การ์ดเน็ตแอลมันไดต์-ไฟโรป และ สเปสซาร์ไทต์ แสดงการเปลี่ยนแปลงของสีเลย



5.3.4 วิจัย

การทดลองปรับปรุงคุณภาพทัวร์มาลีนและคาร์เนตซ์สีต่างๆ โดยการใช้ความร้อนและรังสีแกมมา ได้ผลในระดับหนึ่ง ทั้งลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสีและลักษณะทางสเปกโทรสโกปี อย่างไรก็ตาม เนื่องจากสภาวะแวดล้อมในการใช้ความร้อน อาจยังไม่เหมาะสมเท่าที่ควรทำให้การเปลี่ยนแปลงของสีมีจำกัด นอกจากนี้การศึกษานี้ยังไม่ได้ศึกษาถึงสภาวะการเผาอบต่อ การขึ้นระยะของอุณหภูมิและการเผาซ้ำ รวมถึงเทคนิคการวิเคราะห์อื่นๆ เช่น Cathodoluminescence, Thermoluminescence, Reflectance UV-Vis-NIR เป็นต้น ซึ่งควรที่จะมีการศึกษาต่อขุดต่อไปในอนาคต

