

## 5. บทสรุป ข้อคิดเห็นและวิจารณ์

ผลของการศึกษาวิจัยทั้งในปี 2553 และ 2554 คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาอัญมณี 3 ชนิดคือ เบรลล์ ซอชท์ และสปีเนล จำแนกเป็นกลุ่ม ต่างๆ ดังนี้ เบรลล์ฟ้า (อะความารีน) จากแหล่งเคนยา ไนจีเรีย ปากีสถาน เวียดนาม และไม่ว่าบแหล่ง เบรลล์สีเหลือง(เฮลิโอดอร์) จากแหล่งเวียดนาม และเบรลล์สีเหลืองแกมเขียวถึงเขียวแกมเหลืองที่ไม่ว่าบแหล่ง ซอชท์สีน้ำตาล และ สีน้ำเงิน จากแหล่ง แทนซาเนีย ซอชท์สีน้ำตาลแกมเทาจากแหล่งปากีสถาน และสปีเนลสีต่างๆจากแหล่งพม่าและ สปีเนลสีน้ำเงินแหล่งศรีลังกา

### 5.1 ข้อคิดเห็นจากผลการใช้ความร้อนและการอบรังสีแกมมา

#### 5.1.1 เบรลล์

ในปีที่หนึ่งได้ทำการทดลองโดย การใช้ความร้อนกับเบรลล์ ฟ้าแกมเขียว เขียวแกมฟ้า เขียวแกมเหลือง และเหลืองแกมเขียว ที่ไม่ว่าบแหล่งที่มา พบว่า เบรลล์เปลี่ยนเป็นสีฟ้าที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส และมีสีฟ้าเข้มมากขึ้นเมื่อใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสขึ้นไป สำหรับในปีที่สองเป็นเบรลล์ที่ทราบแหล่ง หลังการใช้ความร้อนพบว่า เบรลล์สีฟ้าจากแหล่งเคนยามีสีฟ้าเข้มขึ้นเล็กน้อย ที่อุณหภูมิช่วง 400-500 องศาเซลเซียส และมีสีฟ้าลดลงที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสขึ้นไป เบรลล์สีฟ้าจากแหล่งไนจีเรียมีสีฟ้าเข้มขึ้นเล็กน้อย ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และมีสีฟ้าแกมเขียวถึงแกมเหลืองที่อุณหภูมิ 500-600 องศาเซลเซียส เบรลล์สีฟ้าจากแหล่งปากีสถานสีฟ้าลดลงจนเป็นเกือบไร้สี ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และพลอยแตกเสียหายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ขึ้นไป เบรลล์สีฟ้าจากแหล่งเวียดนามมีสีฟ้าเข้มขึ้นเล็กน้อยที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสขึ้นไป เบรลล์สีเหลืองจากแหล่งเวียดนามมีสีเหลืองลดลงเล็กน้อยที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสและเปลี่ยนเป็นไร้สีที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ขึ้นไป พลอยบางตัวอย่างแตกเสียหายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

การอบรังสีแกมมากับเบรลล์ชุดปีที่สอง พบว่า เบรลล์สีฟ้าจากแหล่งเคนยาเริ่มเปลี่ยนเป็นเขียวที่ 50 Mrad มีสีเขียวแกมเหลืองมากขึ้นที่ 100 Mrad และมีสีเหลืองแกมเขียวที่ 200 Mrad เบรลล์สีฟ้าจากแหล่งไนจีเรีย มีสีเขียวถึงเขียวแกมเหลือง ที่ 50-100 Mrad และมีสีเหลืองแกมเขียวที่ 200 Mrad เบรลล์สีฟ้าจากแหล่งปากีสถานมีสีเขียวถึงเขียวแกมเหลือง ที่ 50-100 Mrad และมีสีเหลืองแกมเขียวที่ 200 Mrad เบรลล์สีฟ้าจากแหล่งเวียดนามเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเขียวที่ 100 Mrad และมีสีเขียวแกมเหลืองที่ 200 Mrad เบรลล์สีเหลืองจากแหล่งเวียดนามไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสีเหลืองอย่างชัดเจน

#### 5.1.2 ซอชท์



ในปีที่หนึ่ง ซอยไซท์สีน้ำตาลจาก แหล่งแทนซาเนียเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินหลัง การใช้ความร้อนที่ 450 องศาเซลเซียส และมีสีน้ำเงินเข้มสดมากขึ้นที่ 550 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปมีสีใกล้เคียงกับชุดซอยไซท์สีน้ำเงินที่ใช้เปรียบเทียบ สำหรับในปีที่สอง ซอยไซท์สีน้ำตาลเกมเทาจากแหล่งปากีสถาน หลังการใช้ความร้อน ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสีอย่างชัดเจน ส่วนการอาบรังสีแกมมาที่ 600 kGy กับ ซอยไซท์สีน้ำตาลเกมเทาจากแหล่งปากีสถาน ก็ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสีอย่างชัดเจน

### 5.1.3 สปีเนล

ในปีที่หนึ่ง สปีเนลชุด สีต่างๆ หลังการใช้ความร้อนถึง 1050 องศาเซลเซียส แสดงการเปลี่ยนแปลงของสีเพียงเล็กน้อย โดยสปีเนลสีม่วงแดงมีสีแดงเจือมากขึ้น สปีเนลสีม่วงน้ำเงิน บางตัวอย่างมีสีน้ำเงินมากขึ้น ส่วนสปีเนลสีฟ้าแกมเขียวและสีเทา มีสีสว่างใสมากขึ้นกว่าเดิม

ในปีที่สอง สปีเนลสีน้ำเงินแกมม่วง จากแหล่งศรีลังกา หลังการใช้ความร้อนถึง 1000 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงของสีเล็กน้อยโดยมีสีแดงเจือมากขึ้นและสว่างมากขึ้น ส่วนสปีเนลสีน้ำเงินแกมเขียว มีสีแดงเจือเล็กน้อยและมีสีสว่างใสมากขึ้นกว่าเดิม

## 5.2 ข้อคิดเห็นจากผลการวิเคราะห์

### 5.2.1 เบรลล์

#### 5.2.1.1 เบรลล์ชุดปีทีหนึ่ง ก่อนและหลังการใช้ความร้อน

เบรลล์ทุกสี เปลี่ยนเป็นสีฟ้าที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส และมีสีฟ้าเข้มมากขึ้นเมื่อใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสขึ้นไป และ สมบัติทางกายภาพและทางแสงของเบรลล์สีต่างๆ ก่อนและหลังการใช้ความร้อนที่ระดับอุณหภูมิ 250 350 450 550 และ 650 องศาเซลเซียส ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน เว้นแต่เบรลล์สีฟ้าแกมเขียว สีเขียวแกมฟ้า สีเขียวแกมเหลืองและสีเหลืองแกมเขียว แสดงการเรืองแสงสีเขียวเล็กน้อยในแสงอัลตราไวโอเล็ตคลื่นสั้น ก่อนการใช้ความร้อน และไม่เรืองแสงหลังการใช้ความร้อน

สำหรับมลทินภายในของเบรลล์แต่ละกลุ่มสีแสดงลักษณะของการเปลี่ยนแปลงก่อนและหลังการใช้ความร้อนค่อนข้างชัดเจน โดยที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส หลายตัวอย่างเริ่มแสดงการเปลี่ยนแปลงให้เห็นเล็กน้อย ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของมลทินชนิดต่างๆ เช่น รอยแตกริ้วค่นชัดเจนมากขึ้น มีรอยแตกรอบมลทินผลึกแร่ภายใน เป็นต้น

จากข้อมูลของ EDXRF พบว่า ไม่สามารถวิเคราะห์ธาตุ เบรลล์เลียม ( Be ) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเบรลล์ได้ นอกจากนี้ข้อมูลของธาตุหลักและธาตุรองของเบรลล์ก่อนและหลังการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน อย่างไรก็ตาม ปริมาณของธาตุเหล็กในเบรลล์สีฟ้า สีเขียวแกมเหลือง และสีเหลืองแกมเขียว จะมากกว่าในเบรลล์สีฟ้าแกมเขียวและเขียวแกมฟ้า



จากข้อมูลของ UV-Vis-NIR พบว่า เบรลล์สีฟ้า เบรลล์สีฟ้าแกมเขียว แสดงพีก 358 370 427 nm ชัดเจนมากขึ้นและพีก 825 nm ลดลง ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงระหว่าง  $Fe^{2+}$  และ  $Fe^{3+}$  ที่ตำแหน่งต่างๆ (Burns, 1993; Viana *et al.*, 2002; Kleismantas, 2003; Abduriyim, 2008; Adamo *et al.*, 2008; Bocchio *et al.*, 2009) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยเฉพาะที่ 550-650 องศาเซลเซียส ส่วนเบรลล์เขียวแกมฟ้า เบรลล์สีเขียวแกมเหลือง และเบรลล์เหลืองแกมเขียว แสดงลักษณะการดูดกลืนที่คล้ายคลึงกัน โดยมีขอบการดูดกลืนน้อยกว่า 370 nm ลงไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกว่า 450 องศาเซลเซียส และพีกที่ 370 และ 427 nm ชัดเจนมากขึ้น

ข้อมูลของ FTIR พบว่า เบรลล์ทุกสี ยังคงแสดงลักษณะการดูดกลืนที่คล้ายคลึงกัน โดยการดูดกลืน 3 กลุ่มหลัก คือ (1) 2000-4000  $cm^{-1}$  (2) 5000-5500  $cm^{-1}$  และ (3) 6800-7200  $cm^{-1}$  ซึ่งสัมพันธ์กับโมเลกุลของน้ำทั้งสองชนิด (Adamo *et al.*, 2008) ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน โดยพีกที่ 3240  $cm^{-1}$  ของน้ำ และ 2358  $cm^{-1}$  ของ  $CO_2$  (Adamo *et al.*, 2008; Huong, 2008; Houng *et al.*, 2011) ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลง

ข้อมูลของ Raman พบว่า เบรลล์ทุกสี ยังคงแสดงลักษณะรามานสเปกตรัมที่คล้ายคลึงกัน โดยมีพีกเด่นที่ 1067 จาก Si-O bonding และ 684, 395 และ 322  $cm^{-1}$  ซึ่งเป็นผลจากการสั่นของโครงสร้างวงแหวน (Huong, 2008) ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน ในขณะที่ Gaft *et al.* (2005) กล่าวว่ากลุ่มรามานพีกดังกล่าว มีสาเหตุเกิดจาก  $Cr^{3+}$  ส่วนข้อมูลโฟโตลูมิเนสเซนซ์ พบว่า เบรลล์ทุกสีแสดงลักษณะ โฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกตรัมที่คล้ายคลึงกันก่อนและหลังการใช้ความร้อน โดยพีกกว้างที่ประมาณ 570 nm ( $Mn^{2+}$ ) และ 715-720 nm ( $Cr^{3+}$ ,  $V^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ) พีกคู่ที่ 680 และ 684 nm ซึ่งเกิดจาก  $Cr^{3+}$  และพีกที่ 692 และ 694 nm ซึ่งเป็นผลจาก  $V^{2+}$  (Gaft *et al.*, 2005) แสดงการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ชัดเจน

#### 5.2.1.2 เบรลล์ชุดปีที่สอง ก่อนและหลังการใช้ความร้อน

หลังการใช้ความร้อน พบว่า เบรลล์สีฟ้าจากแหล่งเคนยาแสดงการเปลี่ยนแปลงของสีฟ้าเข้มขึ้นเล็กน้อย ที่อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส และมีสีฟ้าลดลงที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสขึ้นไป เบรลล์สีฟ้าจากแหล่งไนจีเรียแสดงการเปลี่ยนแปลงของสีฟ้าเข้มขึ้นเล็กน้อย ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และมีสีฟ้าแกมเขียวถึงแกมเหลืองที่อุณหภูมิ 500-600 องศาเซลเซียส เบรลล์สีฟ้าจากแหล่งปากีสถาน แสดงการเปลี่ยนแปลงของสีฟ้าลดลง จนเป็นเกือบไร้สี ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และพลอยแตกเสียหายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ขึ้นไป เบรลล์สีฟ้าจากแหล่งเวียดนาม แสดงการเปลี่ยนแปลงของสีฟ้าเข้มขึ้นเล็กน้อยที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสขึ้นไป เบรลล์สีเหลืองจากแหล่งเวียดนาม แสดงการเปลี่ยนแปลงของสีเหลืองลดลงเล็กน้อยที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสและเปลี่ยนเป็นไร้สีที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ขึ้นไป พลอยบางตัวอย่างแตกเสียหายที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส



ทั้งนี้สมบัติทางกายภาพและทางแสงของเบรลล์สีฟ้าและสีเหลืองจากแหล่งต่างๆ ก่อนและหลังการใช้ความร้อนที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ พบว่า ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงใดๆ ที่ชัดเจน ส่วนมลทินภายในของเบรลล์สีฟ้าและสีเหลืองจากแหล่งต่างๆ ก่อนและหลังการใช้ความร้อนที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ พบว่าแสดงลักษณะของการเปลี่ยนแปลงชัดเจนพอสมควร โดยที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสขึ้นไป เริ่มแสดงการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยของมลทินชนิดต่างๆ เช่น รอยแตกริ้วเด่นชัดมากขึ้น มีรอยแตกรอบมลทินผลึกแร่ภายใน เป็นต้น แต่เบรลล์สีฟ้าจากแหล่งปากีสถานแตกริ้วเสียหายเมื่อใช้อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีมลทินของไหลและรอยแตกค่อนข้างมากกว่าเบรลล์จากแหล่งอื่นๆ

ข้อมูลของ EDXRF พบว่า ไม่สามารถวิเคราะห์ธาตุ เบรลเลียม ( Be) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเบรลล์ได้เช่นกัน นอกจากนี้ข้อมูลผลวิเคราะห์ของธาตุหลักและธาตุรองของเบรลล์จากแหล่งต่างๆ ก่อนและหลังการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน แต่เบรลล์สีฟ้าจากแหล่งเวียดนามมีปริมาณธาตุหลักค่อนข้างสูงกว่า และเบรลล์สีฟ้าจากแหล่งปากีสถานมีปริมาณธาตุหลักค่อนข้างต่ำกว่า แหล่งอื่นๆ ขณะที่ปริมาณธาตุหลักในเบรลล์สีเหลืองจากเวียดนามมีน้อยกว่าเบรลล์สีฟ้าจากแหล่งอื่นๆ นอกจากนี้เบรลล์สีฟ้าและสีเหลืองจากเวียดนามยังมีปริมาณ โครเมียมและวานาเดียมค่อนข้างน้อยกว่าเบรลล์จากแหล่งอื่นๆ

ข้อมูลของ UV-Vis-NIR พบว่า เบรลล์สีฟ้า จากแหล่งเคนยาและไนจีเรีย แสดงพีก 371 และ 427 nm เด่นขึ้นเล็กน้อยและพีก 1146 nm ลดลงเล็กน้อย เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยเฉพาะที่ 500-600 องศาเซลเซียส เบรลล์สีฟ้า จากแหล่ง ปากีสถาน แสดงพีก 371 และ 427 nm ลดลงอย่างเด่นชัด ตั้งแต่ 300 องศาเซลเซียสขึ้นไป เบรลล์สีฟ้าจากแหล่งเวียดนาม แสดงพีก 371 และ 427 nm เด่นขึ้นเล็กน้อย ขอบการดูดกลืน ลดลงอย่างเด่นชัด ตั้งแต่ 400 องศาเซลเซียส ขึ้นไป เบรลล์สีเหลืองจากแหล่งเวียดนาม แสดงพีก 371 และ 427 nm มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงมากขึ้นและขอบการดูดกลืนลดลงอย่างเด่นชัด ตั้งแต่ 400 องศาเซลเซียส ขึ้นไป ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงการดูดกลืนของธาตุหลัก ระหว่าง  $Fe^{2+}$  และ  $Fe^{3+}$  ที่ตำแหน่งต่างๆ (Burns, 1993; Viana *et al.*, 2002; Kleismantas, 2003; Abduriyim, 2008; Adamo *et al.*, 2008; Bocchio *et al.*, 2009) ที่ ตำแหน่ง 371 และ 427 nm ของเบรลล์หลังการใช้ความร้อน มีผลทำให้เบรลล์แสดงการเปลี่ยนแปลงของสี คือ มีสีเหลืองลดลง

ข้อมูล FTIR พบว่า เบรลล์สีฟ้าและสีเหลืองจากแหล่งต่างๆ ยังคงแสดงลักษณะการดูดกลืนที่คล้ายคลึงกัน โดยการดูดกลืน 3 กลุ่มหลัก คือ (1)  $2000-4000\text{ cm}^{-1}$  (2)  $5000-5500\text{ cm}^{-1}$  และ (3)  $6800-7200\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งสัมพันธ์กับโมเลกุลของน้ำทั้งสองชนิด ( Adamo *et al.*, 2008) ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน

ข้อมูลของ Raman พบว่า เบรลล์สีฟ้าจากแหล่งไนจีเรียและปากีสถาน  $421, 768$  และ  $1238\text{ cm}^{-1}$  ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป ขณะที่เบรลล์สีฟ้าจากเวียดนาม  $421, 768$  และ  $1238\text{ cm}^{-1}$  หายไปที่ 500 องศาเซลเซียส ส่วนเบรลล์สีฟ้าจากเคนยาและเบรลล์สีเหลืองจากเวียดนาม พีกที่  $421, 768$  และ  $1238$



$\text{cm}^{-1}$  ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน ส่วนข้อมูล โฟโตลูมิเนสเซนซ์ พบว่า เบรลล์จากแหล่งต่างๆ หลังการใช้ความร้อน ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงของ PL ที่ชัดเจน

### 5.2.1.3 เบรลล์ชุดปีที่สอง ก่อนและหลังการอบรังสีแกมมา

หลังการอบรังสีแกมมา พบว่า เบรลล์สีฟ้าจากแหล่งเคนยา แสดงการเปลี่ยนแปลงของสี โดยเริ่มเปลี่ยนเป็นเขียวที่ 50 Mrad และมีสีเขียวแกมเหลืองมากขึ้นที่ 100 Mrad และมีสีเหลืองแกมเขียวที่ 200 Mrad เบรลล์สีฟ้าจากแหล่งไนจีเรีย แสดงการเปลี่ยนแปลงของสี โดยมีสีเขียวถึงเขียวแกมเหลือง ที่ 50-100 Mrad และมีสีเหลืองแกมเขียวที่ 200 Mrad เบรลล์สีฟ้าจากแหล่งปากีสถาน แสดงการเปลี่ยนแปลงของสี โดยมีสีเขียวถึงเขียวแกมเหลืองที่ 50 ถึง 100 Mrad และมีสีเหลืองแกมเขียวที่ 200 Mrad เบรลล์สีฟ้าจากแหล่งเวียดนาม แสดงการเปลี่ยนแปลงของสี โดยเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเขียวที่ 100 Mrad และมีสีเขียวแกมเหลืองที่ 200 Mrad สอดคล้องกับ Liceni (1993), Nassau (1994) เบรลล์เหลืองจากแหล่งเวียดนาม ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสีเหลืองอย่างชัดเจน บางตัวอย่างมีสีเหลืองมากขึ้นที่ 200 Mrad โดยสมบัติทางกายภาพและทางแสงของเบรลล์สีฟ้าและสีเหลืองจากแหล่งต่างๆ ก่อนและหลังการอบรังสีแกมมา ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงใดๆที่ชัดเจน

สำหรับมลทินภายในของเบรลล์สีฟ้าและสีเหลืองจากแหล่งต่างๆ ก่อนและหลังการอบรังสีแกมมา ที่ 50, 100 และ 200 Mrad พบว่า ไม่แสดงลักษณะของการเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัด อาจกล่าวได้ว่า รังสีแกมมาที่ใช้ไม่มีผลกระทบต่อลักษณะภายในของเบรลล์

ข้อมูลของ EDXRF พบว่า ธาตุหลักและธาตุรองของเบรลล์จากแหล่งต่างๆก่อนและหลังการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลง อย่างมีนัยสำคัญ แต่เบรลล์สีฟ้าจากแหล่งเวียดนามมีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างสูงกว่า และเบรลล์สีฟ้าจากแหล่งปากีสถานมีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างต่ำกว่า แหล่งอื่นๆขณะที่ปริมาณธาตุเหล็กในเบรลล์สีเหลืองจากเวียดนามมีน้อยกว่าเบรลล์สีฟ้าจากแหล่งอื่นๆ

ข้อมูลของ UV-Vis-NIR พบว่า เบรลล์สีฟ้าจากแหล่งเคนยา ขอบการดูดกลืนขยับมาที่มากกว่า 450 nm และพีคที่ 427 และ 371 nm หายไปที่ 200 Mrad เบรลล์สีฟ้าจากแหล่งไนจีเรีย ขอบการดูดกลืนขยับมาที่มากกว่า 450 nm และพีคที่ 427 และ 371 nm หายไปที่ 100 Mrad เบรลล์สีฟ้าจากแหล่งปากีสถานและแหล่งเวียดนามพีคที่ 427 และ 371 nm ลดลงที่ 50 Mrad และหายไปที่ 100 Mrad พร้อมกับขอบการดูดกลืนขยับมาที่มากกว่า 450 nm ส่วนเบรลล์สีเหลืองจากแหล่งเวียดนาม ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน การเปลี่ยนแปลงการดูดกลืนของธาตุเหล็ก ระหว่าง  $\text{Fe}^{2+}$  และ  $\text{Fe}^{3+}$  ที่ตำแหน่งต่างๆ (Burns, 1993; Viana *et al.*, 2002; Kleismantas, 2003; Abduriyim, 2008; Adamo *et al.*, 2008; Bocchio *et al.*, 2009) ที่ตำแหน่ง 371 และ 427 nm ของเบรลล์หลังการใช้ความร้อน มีผลทำให้เบรลล์แสดงการเปลี่ยนแปลงของสี คือ มีสีเหลืองลดลง



ข้อมูลของ FTIR พบว่า เบรลล์สีฟ้าและสีเหลืองจากแหล่งต่างๆ ยังคงแสดงลักษณะการดูดกลืนที่คล้ายคลึงกัน โดยการดูดกลืน 3 กลุ่มหลัก คือ (1) 2000-4000  $\text{cm}^{-1}$  (2) 5000-5500  $\text{cm}^{-1}$  และ (3) 6800-7200  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งสัมพันธ์กับโมเลกุลของน้ำทั้งสองชนิด (Adamo *et al.*, 2008) ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน

ข้อมูลของ Raman พบว่า หลังการอบรังสีแกมมา เบรลล์จากแหล่งต่างๆ ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงของรามานสเปกตรัมที่เด่นชัดเจน และข้อมูลโฟโตลูมิเนสเซนซ์ พบว่า หลังการอบรังสีแกมมา เบรลล์จากแหล่งต่างๆ ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงของ PL สเปกตรัมที่เด่นชัดเจน

โดยสรุป การเปลี่ยนแปลงสีของเบรลล์สีต่างๆ หลังการใช้ความร้อนและการอบรังสีแกมมา จากการทดลองนี้ เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงสถานะประจุของ  $\text{Fe}^{3+}$  และ  $\text{Fe}^{2+}$  โดยความร้อนทำให้เบรลล์มีประจุ  $\text{Fe}^{2+}$  มากขึ้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการดูดกลืน ของแสงในช่วงที่ตามองเห็น ทำให้เบรลล์นั้นมีสีเหลืองลดลงหรือหายไปเป็นไม่มีสี ทำให้สีฟ้าเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่รังสีแกมมาทำให้เบรลล์มีประจุ  $\text{Fe}^{2+}$  ลดลงทำให้เบรลล์มีสีเหลืองปนมากขึ้นจากการดูดกลืนของ  $\text{Fe}^{3+}$  สอดคล้องกับการศึกษาของ Nassau *et al.* (1976), Nassau (1994), Banfield and Cook-Wallace (2002), Kleismantas (2003) และ Mihalyuk and Lett (2004)

## 5.2.2 ซอยโซลต์

### 5.2.2.1 ซอยโซลต์ชุดปีที่หนึ่ง ก่อนและหลังการใช้ความร้อน

ซอยโซลต์สีน้ำตาลทุกตัวอย่างเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินหลังใช้ความร้อนที่ 450 องศาเซลเซียส และมีสีน้ำเงินเข้มสดมากขึ้นที่ 550 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปมีสีใกล้เคียงกับซอยโซลต์สีน้ำเงิน โดยสมบัติทางกายภาพและทางแสงของซอยโซลต์สีน้ำเงิน และซอยโซลต์สีน้ำตาลก่อนและหลังการใช้ความร้อนที่ระดับอุณหภูมิ 450 และ 550 องศาเซลเซียส ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน แต่ลักษณะมลทินภายในแสดงการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

ข้อมูล EDXRF พบว่า ธาตุหลักและธาตุรองของซอยโซลต์ก่อนและหลังการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

ข้อมูลของ UV-Vis-NIR พบว่า ซอยโซลต์สีน้ำเงิน แสดงขอบการดูดกลืนที่ประมาณ 300 nm และแสดงการดูดกลืนแถบกว้างที่ประมาณ 380 nm จาก  $\text{V}^{4+}$  และ 500-600 nm จาก  $\text{V}^{3+}$  (Burns,1993) ส่วนขอบการดูดกลืนที่ประมาณ 400 nm ของซอยโซลต์สีน้ำตาลหลังการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสได้เลื่อนขยับไปต่ำกว่า 400 nm และแสดงแถบการดูดกลืนที่ประมาณ 380 nm ชัดเจนขึ้น และแถบการดูดกลืนที่ 450 nm ซึ่งเป็นผลจาก  $\text{V}^{4+}$  หรือ  $\text{Ti}^{3+}$  (Faye and Nickel,1971) ลดลง และยังคงมีแถบการดูดกลืนกว้างที่ประมาณ 600 และ 755 nm ซึ่งเป็นผลจาก  $\text{V}^{2+}$  (Burns,1993) อยู่



ข้อมูลของ FTIR พบว่า ซอไซท์สีน้ำเงินและสีน้ำตาลก่อนและหลังการใช้ความร้อน แสดงลักษณะการดูดกลืนคล้ายคลึงกัน โดยมีการดูดกลืน กลุ่มหลัก คือ  $2800-3700\text{ cm}^{-1}$  และ ต่ำกว่า  $2000\text{ cm}^{-1}$  ลงไป หลังการใช้ความร้อนพิกที่  $3260\text{ cm}^{-1}$  จาก O-H stretching (Langer (1980)  $3170\text{ cm}^{-1}$  จาก H-bond (Winkler *et al.*, (1989) ชัดเจนขึ้น

ข้อมูลของ Raman พบว่า ซอไซท์สีน้ำเงินและสีน้ำตาลก่อนและหลังการใช้ความร้อน แสดงลักษณะรามานสเปกตรัมที่คล้ายคลึงกัน โดยมีพิกเด่นที่ **927, 492, 311, 1092, 1070, 983, 871, 677** และ  $572\text{ cm}^{-1}$  ส่วนโฟโตลูมิเนสเซนซ์ พบว่า ซอไซท์สีน้ำเงินและสีน้ำตาลก่อนและหลังการใช้ความร้อน แสดงลักษณะ โฟโตลูมิเนสเซนซ์ สเปกตรัมที่คล้ายคลึงกัน โดยมีพิกเด่นที่ 692 และ 709 nm จาก  $V^{2+}$  (Gaft *et al.*, 2005)

#### 5.2.2.2 ซอไซท์ชุดปีที่สอง ก่อนและหลังการใช้ความร้อน

ซอไซท์สีน้ำตาลแกมเทาจากแหล่งปากีสถาน ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงสี ใดๆก็ตาม ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ตัวอย่างส่วนใหญ่มีสีเหลืองแกมมากขึ้น และกลับมีสีเทามากขึ้นที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส โดยสมบัติทางกายภาพและทางแสงของซอไซท์ ก่อนและหลังการใช้ความร้อนไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน สำหรับมลทินภายในของซอไซท์สีน้ำตาลแกมเทา ก่อนและหลังการใช้ความร้อน แสดงการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เช่น มลทินของไหลกระจายตัวมากขึ้น มีรอยแตกเพิ่มมากขึ้น เป็นต้น

ข้อมูลของ EDXRF พบว่า ธาตุองค์ประกอบหลักและธาตุรองไม่แสดงการเปลี่ยนแปลง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับซอไซท์จากแหล่งแทนซาเนีย พบว่า ซอไซท์จากปากีสถานมีปริมาณธาตุเหล็กสูงกว่า และ วาเนเดียม ต่ำกว่าอย่างชัดเจน

ข้อมูลของ UV-Vis-NIR พบว่า ขอบการดูดกลืนที่ประมาณ 350 nm และพิกที่ 427 และ 452 nm จาก  $V^{4+}$  (Burns, 1993) ของซอไซท์สีน้ำตาลแกมเทาหลังการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลง และยังคงมีแถบการดูดกลืนกว้างที่ประมาณ 600 และ 790 nm อยู่

ข้อมูลของ FTIR พบว่า ซอไซท์สีน้ำตาลแกมเทา ก่อนและหลังการใช้ความร้อน ยังคงแสดงลักษณะการดูดกลืนคล้ายคลึงกัน โดยมีการดูดกลืน กลุ่มหลัก คือ  $2800-3700\text{ cm}^{-1}$  และ ต่ำกว่า  $2000\text{ cm}^{-1}$  ลงไป โดยพิกที่  $2362\text{ cm}^{-1}$  จาก OH (Langer, 1980) เค้นชัดขึ้น ส่วน  $3174\text{ cm}^{-1}$  จาก H-bond (Winkler *et al.*, (1989) แสดงการเปลี่ยนแปลงไม่ชัดเจน

ข้อมูลของ Raman พบว่า พิกที่ตำแหน่งประมาณ  $773\text{ cm}^{-1}$  มีแนวโน้มเด่นชัดขึ้นหลังการใช้ความร้อน ส่วนการวิเคราะห์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ พบว่า ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลง

#### 5.2.2.3 ซอไซท์ชุดปีที่สอง ก่อนและหลังการอบรังสีแกมมา



ซอยไซท์สีน้ำตาลแกมเทาจากแหล่งปาเกีสถาน ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสีอย่างชัดเจน บางตัวอย่างมีสีเข้มหรือมีสีเหลืองแกมมากขึ้น บางตัวอย่างมีสีจางลง 50 Mrad และคงสภาพเช่นนี้ แม้เพิ่มความเข้มรังสีที่ 100 และ 200 Mrad โดยสมบัติทางกายภาพและทางแสงของซอยไซท์นี้ ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน และมลทินภายในก็ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงใดๆ

ข้อมูล EDXRF ก่อนและหลังการอาบรังสีแกมมา ปริมาณของธาตุหลักและธาตุรองของซอยไซท์สีน้ำตาลแกมเทา ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

ข้อมูลของ UV-Vis-NIR พบว่า ขอบการดูดกลืนที่ประมาณ 350 nm และพีกที่ 427 และ 452 nm ของซอยไซท์สีน้ำตาลแกมเทาหลังการอาบรังสีด้วยความเข้มรังสีต่างๆ ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลง และยังคงมีแถบการดูดกลืนกว้างที่ประมาณ 600 และ 790 nm อยู่

ข้อมูล FTIR พบว่า ซอยไซท์สีน้ำตาลแกมเทา ก่อนและหลังการอาบรังสีแกมมา ยังคงแสดงลักษณะการดูดกลืนคล้ายคลึงกัน โดยมีการดูดกลืน 2 กลุ่มหลัก คือ 2800-3700  $\text{cm}^{-1}$  และ ต่ำกว่า 2000  $\text{cm}^{-1}$  ลงไป

ข้อมูลของ Raman พบว่า รามานสเปกตรัมไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัด และการวิเคราะห์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัด

โดยสรุป การเปลี่ยนแปลงสีของซอยไซท์สีน้ำตาลจากแหล่งแทนซาเนีย หลังการใช้ความร้อนจากการทดลองนี้เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงสถานะประจุของ  $\text{V}^{3+}$  หรือ  $\text{Ti}^{3+}$  โดยความร้อนทำให้ซอยไซท์ประจุ  $\text{V}^{3+}$  เปลี่ยนเป็น  $\text{V}^{4+}$  หรือ  $\text{Ti}^{3+}$  เปลี่ยนเป็น  $\text{Ti}^{4+}$  มากขึ้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการดูดกลืนของแสง ในช่วงที่ตามองเห็น ทำให้ซอยไซท์มีสีน้ำตาลเข้มเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ Burns (1993) ในขณะที่ซอยไซท์สีน้ำตาลแกมเทาจากแหล่งปาเกีสถาน ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสีหลังการใช้ความร้อนและรังสีแกมมา น่าจะเป็นผลจากการมีปริมาณของธาตุหลักก่อนข้างสูง และปริมาณของธาตวนาเนียมก่อนข้างต่ำ

### 5.2.3 สปีเนล

#### 5.2.3.1 สปีเนลชุดปีที่หนึ่งสีต่างๆ (แหล่งพม่า) ก่อนและหลังการใช้ความร้อน

หลังการใช้ความร้อน พบว่าสปีเนลมีแนวโน้มสีเปลี่ยนแปลงเมื่อใช้ความร้อนถึงอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส โดยกลุ่มที่มีการเปลี่ยนแปลงชัดเจนที่สุดคือกลุ่มที่มีสีม่วงปน ซึ่งพบว่าแนวโน้มสีเปลี่ยนเป็นสีแดงเพิ่มขึ้น ในขณะที่กลุ่มสีอื่นมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

สปีเนลชุดปีที่หนึ่งสีต่างๆ หลังการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิจาก 800 ถึง 1050 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงของสีเพียงเล็กน้อย โดยสปีเนลสีม่วงแดงมีสีแดงเข้มมากขึ้น สปีเนลสีม่วงน้ำเงิน บางตัวอย่างมีสีน้ำตาลเข้มมากขึ้น ส่วนสปีเนลสีฟ้าแกมเขียวและสีเทา มีสีสว่างใสมากขึ้นกว่าเดิม บางตัวอย่างดูคล้ายไม่มีสี และสมบัติทางกายภาพและทางแสงของสปีเนล ก่อนและหลังการใช้ความร้อน ไม่แสดงการ





เปลี่ยนแปลงที่เด่นชัด ส่วนมลทินภายในต่างๆ มีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ขึ้นไป และเปลี่ยนแปลงเด่นชัดมากที่ 1000 องศาเซลเซียส

ข้อมูล EDXRF และ EPMA พบว่า สปีเนลทุกกลุ่มสีก่อนการให้ความร้อนมีองค์ประกอบหลักคือ อะลูมิเนียมและแมกนีเซียม และธาตุร่องรอย คือ เหล็ก สังกะสี วาเนเดียม นิกเกิล ไทเทเนียม โครเมียม โคบอลต์ และแคลเซียม และสปีเนลทุกกลุ่มสี หลังการให้ความร้อน ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงทางองค์ประกอบทางเคมีที่ชัดเจน

ข้อมูล UV-Vis-NIR พบว่า สปีเนลสีม่วงแดงและสีม่วงน้ำเงินก่อนการให้ความร้อน แสดงขอบการดูดกลืนที่ประมาณ 300 nm และแสดงการดูดกลืนที่ประมาณ 455, 385 และ 370 nm ซึ่งเป็นผลจาก  $Fe^{2+}$  (Muhlmeister *et al.*, 1993; Smith and Beesley, 2008) และการดูดกลืนแถบกว้างที่ประมาณ 550, 585 และ 625 nm ซึ่งเป็นผลจาก  $Co^{2+}$  (Shigley and Stockton, 1984; Dharmaratne, 1993; Muhlmeister *et al.*, 1993; Smith and Beesley, 2008) สปีเนลสีฟ้าแกมเขียวและสีเทา ก่อนการให้ความร้อน แสดงขอบการดูดกลืนที่ประมาณ 300 nm และแสดงการดูดกลืนแถบกว้างที่ประมาณ 550 nm พีกที่ประมาณ 455, 385 และ 370 nm ซึ่งเป็นผลจาก  $Fe^{2+}$  (Muhlmeister *et al.*, 1993; Smith and Beesley, 2008) สปีเนลทุกสีหลังการให้ความร้อน แสดงขอบการดูดกลืนที่ประมาณ 300 nm การดูดกลืนที่ 370 และ 455 nm จะมีความเข้มข้นลดลง

ข้อมูล FTIR พบว่า สปีเนลทุกกลุ่มสีก่อนการให้ความร้อน แสดงการดูดกลืนกว้างไม่ชัดเจน ประมาณ 3000-7000  $cm^{-1}$  ซึ่งน่าจะเกิดจากการดูดกลืนของ OH (Lenaz *et al.*, 2008) หลังการให้ความร้อนถึงอุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส สปีเนลทุกกลุ่มสี แสดงการเปลี่ยนแปลงของการดูดกลืนช่วง 3500-4500  $cm^{-1}$  จาก OH (Lenaz *et al.*, 2008; Bromiley *et al.*, 2010) โดยมีความเข้มของการดูดกลืนในช่วงนี้ลดลง

ข้อมูล Raman พบว่า สปีเนลทุกกลุ่มสีก่อนการให้ความร้อน แสดงรามานสเปกตรัมคล้ายคลึงกัน โดยแสดงชุดพีกหลักที่ ประมาณ 407, 665 และ 767  $cm^{-1}$  ซึ่งเป็นผลจากการสั่นของพันธะ Al-O (Tuyen *et al.*, 2001; Sudarat *et al.*, 2009c)

สปีเนลทุกกลุ่มสีหลังการให้ความร้อนถึง อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส พบว่า สเปกตรารามานของสปีเนลทุกสีมีการเปลี่ยนแปลง โดยพีกที่ 407  $cm^{-1}$  มีความกว้างมากขึ้นและความคมชัดลดลง (พีกมี FWHM มากขึ้นกว่าเดิม) ส่วนข้อมูล Photoluminescence พบว่า สปีเนลทุกกลุ่มสีก่อนการให้ความร้อน แสดงพีก PL คล้ายคลึงกัน โดยแสดงชุดพีกหลักที่ ประมาณ 672, 674, 675, 685, 687, 696, 697, 700, 704, 707 และ 709 nm ซึ่งเป็นผลจาก  $Cr^{3+}$  (Deren *et al.*, 1996; Gaft *et al.*, 2005; Sudarat *et al.*, 2009c) โดยชุดพีกมีลักษณะรายละเอียดชัดเจน โดยความเข้มของพีกนั้นแสดงความสัมพันธ์ปริมาณโครเมียม หลังการให้ความร้อนถึงอุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส พบว่า PL สเปกตราของสปีเนลทุกสีมีการเปลี่ยนแปลง โดยที่พีกต่างๆ จะเปลี่ยนแปลงเป็นพีกกว้าง ความคมชัดลดลง และ พีกที่ 685 ลดลงในขณะที่ พีก 687 เพิ่มขึ้น



### 5.2.3.2 สปีเนลชุดที่สองสีต่างๆ (แหล่งศรีลังกา) ก่อนและหลังการใช้ความร้อน

หลังการใช้ความร้อน พบว่า สปีเนลสีน้ำเงินแกมม่วง หลังการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 ถึง 1000 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงของสีเล็กน้อยโดยมีสีแดงเจือมากขึ้นและสว่างมากขึ้น ส่วนสปีเนลสีน้ำเงินแกมเขียว มีสีแดงเจือเล็กน้อยและมีสีสว่างใสมากขึ้นกว่าเดิม โดยสมบัติทางกายภาพและทางแสงของสปีเนลทั้งสองกลุ่มสี ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนเช่นกัน แต่มีผลทึบภายในต่างๆของสปีเนล สีน้ำเงินแกมม่วงและน้ำเงินแกมเขียวจากศรีลังกาแสดงการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

ข้อมูลของ EDXRF และ EPMA พบว่า สปีเนลทุกกลุ่มสีก่อนการใช้ความร้อน มีองค์ประกอบหลักคือ อะลูมิเนียมและแมกนีเซียม และธาตุรองรอยคือ เหล็ก สังกะสี วานาเดียม โครเมียม โคบอลต์ และแคลเซียม โดยสปีเนลสีน้ำเงินแกมม่วงและแกมเขียวจากศรีลังกาจะมีปริมาณโดยเฉลี่ย ของธาตุเหล็ก และสังกะสีค่อนข้างสูง หลังการใช้ความร้อนถึง 1000 องศาเซลเซียส องค์ประกอบและธาตุรองรอย ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน

ข้อมูลของ UV-Vis-NIR พบว่า สีน้ำเงินแกมม่วงและสีน้ำเงินแกมเขียว ก่อนและหลังการใช้ความร้อน แสดงกลุ่มพีกการดูดกลืนคล้ายคลึงกัน โดยแสดงขอบการดูดกลืนที่ประมาณ 300 nm และแสดงพีกการดูดกลืนที่ประมาณ 474 460 388 และ 373 nm ซึ่งเป็นผลจาก  $Fe^{2+}$  (Muhlmeister *et al.*,1993; Smith and Beesley,2008) และการดูดกลืนแถบกว้างที่ประมาณ 560 590 630 nm ซึ่งเป็นผลจาก  $Co^{2+}$  (Shigley and Stockton,1984; Dharmaratne,1993; Muhlmeister *et al.*,1993; Smith and Beesley,2008) แต่สปีเนลสีน้ำเงินแกมเขียว แสดงการดูดกลืนแถบกว้างที่ประมาณ 560, 590 และ 630 nm ที่เด่นชัดกว่า และกลุ่มพีกที่ประมาณ 474, 460, 388 และ 373 nm เด่นชัดน้อยกว่า สปีเนลสีน้ำเงินแกมม่วง หลังการใช้ความร้อนถึง 1000 องศาเซลเซียส แสดง ขอบการดูดกลืนที่ประมาณ 300 nm การดูดกลืนที่ 373 และ 388 nm ( $Fe^{2+}$ ) จะมีความเข้มชัดลดลง ส่วนสปีเนลสีน้ำเงินแกมเขียว หลังการใช้ความร้อนถึง 1000 องศาเซลเซียส แสดงขอบการดูดกลืนที่ประมาณ 300 nm การดูดกลืนที่ 373 และ 388 nm ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน แถบการดูดกลืน 560-630 nm ( $Co^{2+}$ ) เด่นชัดมากที่ 1000 องศาเซลเซียส

ข้อมูลของ FTIR พบว่า สปีเนลสีน้ำเงินแกมม่วงและน้ำเงินแกมเขียวศรีลังกา แสดงการดูดกลืนกว้างประมาณ 3000-7000  $cm^{-1}$  ซึ่งกลุ่มพีกที่ 3000-4000  $cm^{-1}$  เกิดจาก OH (Lenaz *et al.*,2008; Bromiley *et al.*,2010) โดยมีพีกการดูดกลืนเด่นชัด ที่ 1426  $cm^{-1}$  หลังการใช้ความร้อนถึง 1000 องศาเซลเซียส ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน

ข้อมูลของ Raman พบว่า สปีเนลทุกกลุ่มสีก่อนการใช้ความร้อนแสดงรามานสเปกตรัมคล้ายคลึงกัน โดยแสดงชุดพีกหลักที่ ประมาณ 407, 665 และ 767  $cm^{-1}$  ที่ 1000 องศาเซลเซียส แสดงการ



เปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะพีกที่  $407\text{ cm}^{-1}$  มีความกว้างมากขึ้น และความคมชัดลดลง (พีกมี FWHM มากกว่าเดิม) (Tuyen *et al.*, 2001) ส่วนข้อมูล Photoluminescence พบว่า สปีเนลชุดที่สองสีต่างๆก่อนการใช้ความร้อนพบว่า แสดงพีก PL คล้ายคลึงกัน โดยแสดงชุดพีกหลักที่ ประมาณ 672, 674, 675, 685, 687, 696, 697, 700, 704, 707 และ 709 nm ซึ่งเป็นผลจาก  $\text{Cr}^{3+}$  (Deren *et al.*, 1996; Gaft *et al.*, 2005; Sudarat *et al.*, 2009c) ที่ 1000 องศาเซลเซียส PL สเปกตรัมแสดง การเปลี่ยนแปลงเด่นชัด โดยที่พีกต่างๆ จะเปลี่ยนแปลงเป็นพีกกว้าง ความคมชัดลดลง และพีกที่ 685 nm ลดลงในขณะที่ พีก 687 nm เพิ่มสูงขึ้น

โดยสรุป การเปลี่ยนแปลงสีของสปีเนลสีต่างๆจากแหล่งพม่า หลังการใช้ความร้อน จากการทดลองนี้ เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงสถานะประจุของ  $\text{Fe}^{2+}$  ซึ่งไม่มีผลต่อการเกิดสี โดยความร้อนอาจทำให้สปีเนลมีประจุ  $\text{Fe}^{2+}$  ลดลงเล็กน้อย ทำให้เกิด การเปลี่ยนแปลงการดูดกลืน ของแสง ในช่วงที่ตามองเห็นทำให้สปีเนลซึ่งมี  $\text{Cr}^{3+}$  อยู่ คูมีสีแดงเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่สปีเนลสีน้ำเงินจากศรีลังกา ก็มีประจุ  $\text{Fe}^{2+}$  ลดลงเล็กน้อย แต่ประจุ  $\text{Co}^{2+}$  เพิ่มมากขึ้นทำให้คูมีสีน้ำเงินเพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ Muhlmeister *et al.* (1993) และ Smith *et al.* (2008)

แม้ว่า ลักษณะสีและลักษณะมลทินภายในของสปีเนลทั้งสองชุด แสดงการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย หลังการใช้ความร้อน โดยสมบัติทางกายภาพและทางแสงไม่เปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตามสมบัติทางด้านสเปกโทรสโกปี เช่น FTIR, Raman และ PL ของสปีเนลก่อนและหลังการใช้ความร้อนแสดงความแตกต่างกันชัดเจน

### 5.3 ข้อคิดเห็นจากผลการ ทดสอบความคงทนของอัญมณีหลังการ ใช้ความร้อนและการอาบรังสีแกมมา

การทดลองใช้ความร้อนระดับปานกลางและการอาบรังสีแกมมาเพื่อทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของอัญมณีทั้งสามชนิดคือ เบรลล์ ซอไซท์ และสปีเนล พบว่าได้ผลดีพอสมควร และหลังการ ทดสอบความคงทนต่างๆ คือ ความคงทนต่อ ความร้อนและแสงสว่าง ต่อสารละลายเคมี และการทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิก พบว่า อัญมณีทั้งสามชนิดไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพใดๆ มีสีและเนื้อแร่ที่ปกติ ดังนั้น ผลที่ได้จากการใช้ความร้อน และการอาบรังสีแกมมา กับอัญมณีทั้งสามชนิด จึงเป็นการเปลี่ยนแปลงของสีที่มีความคงทน ไม่กลับคืน