

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

การเปลี่ยนแปลงสีพลอยทับทิมและแซปไฟร์โดยกรรมวิธีการใช้ความร้อน:
กรณีที่มีเบอริลเลียม

Color Change in Ruby and Sapphires by Heat Treatment: Case of Beryllium

อรุณี เทอดเทพพิทักษ์
ปริญญา ชินดุษฎีกุล

BU 0094452
- 9 ส.ค. 2552

25 15 4 2

เริ่มบริการ
- 3 ส.ย. 2552

มีนาคม พ.ศ 2549

วิทยาลัยอัญมณี

มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี

การเปลี่ยนแปลงสีพลอยทับทิมและแซปไฟร์โดยกรรมวิธีการใช้ความร้อน: กรณีที่มีเบอริลเลียม

Color Change in Ruby and Sapphires by Heat Treatment: Case of Beryllium

อรุณี เทอดเทพพิทักษ์ ปริญา ชินดุขฎิกุล
วิทยาลัยอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี

บทคัดย่อ

ตัวอย่างพลอยที่นำมาศึกษาการเปลี่ยนแปลงสี มาจาก 3 แหล่ง คืออิลลากา ประเทศ มาดากัสการ์ แหล่งของเจีย ประเทศแทนซาเนีย และพลอยไทย บางกะจะ จันทบุรี ในแต่ละแหล่งของกลุ่มพลอยที่แบ่งเป็นไม่เผา (untreated), กลุ่มพลอยเผาแบบธรรมดา(heat treated) และเผาแบบแพร่เบอริลเลียมในรูปของคริโซเบอริล(new heat treatment) กระบวนการเผากระทำในเตาแก๊สในบรรยากาศออกซิเดชัน ช่วงอุณหภูมิ 1720 – 1770 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงและ 8 ชั่วโมงสำหรับพลอยบางกะจะ ในแต่ละกลุ่มพลอย นำมาวัดสเปกตรัมในช่วงอุลตราไวโอเลตถึงใกล้อินฟราเรด วัดองค์ประกอบธาตุโดย Energy dispersive X-ray Fluorescence(EDXRF) วัดดัชนีสีด้วยระบบ CIE L*a*b* และตรวจสอบตำหนิภายใน (inclusions) ผลการศึกษาพบว่า ภายใต้การเผาที่สภาวะเดียวกัน กลุ่มพลอยที่เผาแบบแพร่เบอริลเลียม สามารถดัดแปลงสีพลอยได้ ศูนย์กลางสีและอัตราส่วนของเหล็กและโครเมียม มีอิทธิพลต่อสาเหตุของสีที่เกิดขึ้น การเปลี่ยนแปลงตำหนิภายในผลึกพลอย ไม่สามารถนำมาเป็นตัวชี้บอกความแตกต่างการเผาด้วยกรรมวิธีทั้งสองได้

บทนำ

อุตสาหกรรมการผลิตพลอยเนื้อแข็งของประเทศไทย เจริญเติบโตและพัฒนาการอย่างต่อเนื่อง มาจากการที่ประเทศไทยมีความสามารถในการเผาพลอยด้วยความร้อน ทำให้ไทยเป็นศูนย์กลางค้าพลอยสีที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก ในประเทศไทย การเผาพลอยตระกูลคอรันดัม (ทับทิมและแซปไฟร์) เกิดขึ้นด้วยการค้นพบโดยบังเอิญของนายสามเมือง แก้วแหวน ปัจจุบันอายุ 78 ปี เป็นชาวจังหวัดจันทบุรี จวบจนกระทั่งปัจจุบัน นวัตกรรมการเผาพลอย ก็ได้เกิดขึ้นที่จังหวัดจันทบุรีเรื่อยมา ซึ่งล้วนเป็นภูมิปัญญาไทยที่เกิดจากความเป็นผู้ชำนาญการ โดยไม่ต้องอาศัยเทคโนโลยีจากต่างประเทศ เตาเผาที่ล้วนผลิตขึ้นในจังหวัดจันทบุรี แต่เป็นที่น่าเสียดายที่ทุกครั้งที่มีการผลิตออกมาเมื่อใดก็จะมีปัญหาการถูกโจมตีกล่าวหาให้เกิดความเสียหายกับภาคการผลิต ซึ่งส่งผลโดยตรงกับการค้าขายพลอย ซึ่งเป็นปัญหาการแข่งขันและกีดกันทางการค้าขายพลอย

ประมาณปี พ.ศ 2538 การเผาทับทิมและแซปไฟร์แบบแพร่เบอร์ิลเลียมที่อุณหภูมิสูงได้เขย่าวงการคำอัญมณี การเผาพลอยเนื้อแข็งด้วยสารเบอร์ิลเลียมได้เกิดขึ้นครั้งแรกที่จังหวัดจันทบุรี (ธวัชชัย สมใจนิก 2548) เป็นการค้นพบโดยบังเอิญที่มีพลอยเนื้ออ่อนติดมากับพลอยเหลือง หลังเผาทำให้พลอยเหลืองมีความใส และสีเหลืองเข้มขึ้น ในเวลาใกล้เคียงกัน ได้มีการค้นพบแหล่งพลอยอิลากากา (Ilakaka) ในประเทศมาดากัสการ์ (Madagascar) เมื่อนำพลอยเนื้อแข็งมาเผากับพลอยเนื้ออ่อน แซปไฟร์สีเหลืองและติดชมพู เผาด้วยวิธีดังกล่าวเบื้องต้นนี้ทำให้พลอยเปลี่ยนเป็นสีเหลืองและสีส้ม-ชมพู หรือสีชมพู-ส้ม เหมือนสีของพลอยแพดพาราชา (padparadscha) แม้แต่พลอยที่มีคุณภาพต่ำ เมื่อนำมาเผากับพลอยเนื้ออ่อนดังกล่าว พลอยเหลืองบางส่วนจะเปลี่ยนเป็นสีชมพู- ส้ม และสีส้มที่มีขอบเหลือง แซปไฟร์เหลืองเขียวกลายเป็นเหลืองเข้ม คอรันดัมประเภทสีอมม่วงถึงม่วงจากแหล่งซองเจีย (Songea) ประเทศแทนซาเนีย (Tanzania) และซึ่งแต่เดิมแหล่งพลอยอิลากากา ประเทศมาดากัสการ์ ที่เผาโดยวิธีความร้อนธรรมดา ก็ไม่สามารถเปลี่ยนสีให้เป็นพลอยทับทิมหรือแซปไฟร์สีชมพูที่มีสีสดใสเพิ่มขึ้นได้ แต่หลังจากใช้กรรมวิธีการเผาแบบแพร่เบอร์ิลเลียม สามารถให้ได้พลอยสีส้มทอง ส้ม และสีของพลอยแพดพาราชา และพลอยใสขึ้น (Themelis, 2003) ผลของการค้นพบกรรมวิธีการเผาดังกล่าวแล้วข้างต้น ทำให้มีการผลิตพลอยสีเลียนแบบสีพลอยแพดพาราชามากมายในตลาด โดยเฉพาะตลาดพลอยญี่ปุ่น ทำให้วงการพลอยปั่นป่วนไประยะหนึ่ง ซึ่งเกิดความสงสัยในสีพลอยแพดพาราชา ซึ่งโดยปกติจะเป็นพลอยธรรมชาติที่ราคาสูงและค่อนข้างหายาก ประการสำคัญยิ่งคือพลอยที่ผ่านการเผาแบบแพร่สารเบอร์ิลเลียมไม่สามารถตรวจสอบได้โดยวิธีอัญมณีที่เคยปฏิบัติกันมา (standard gemological testing) ว่าแตกต่างจากการเผาแบบธรรมดา

ปัจจุบัน เป็นที่ยอมรับว่าเทคนิคการเผาด้วยสารเบอร์ิลเลียม ซึ่งเรียกว่า "การเผาแบบใหม่ (New heat treatment)" เกี่ยวข้อง กับการแพร่ของเบอร์ิลเลียมจากแหล่งภายนอก ซึ่งคือพลอยเนื้ออ่อน คริโซเบอร์ิล (Chrysoberyl, BeAl_2O_4) หรือสาร BeO เข้าไปในแลททิซคอรันดัม (corundum lattice) (Emmet et al, 2003; Schmetzer and Schwarz, 2004; Pisultha-Arnold, et al, 2003; Peretti and Gunther, 2002; Wang and Green, 2002)

ทับทิมและแซปไฟร์เป็นแร่ตระกูลเดียวกัน คือ แร่คอรันดัมมีส่วนประกอบทางเคมีเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ แบ่งเป็น 2 ชนิด ตามลักษณะสีของพลอย คือ ทับทิม (ruby) เป็นพลอยคอรันดัมสีแดงไปจนกระทั่งม่วงแดง (purple – red) แซปไฟร์เป็นพลอยคอรันดัมที่มีสีอื่น ๆ นอกเหนือไปจากสีแดงได้แก่ ไพลิน (blue sapphires) บุษราคัม (yellow sapphires) เขียวส่องหรือเขียวมรกต (green sapphires) และแพดพาราชา สีส้มอมชมพู เป็นต้น (กฤติยา บัมมาลัย และ รัก ธรรมชาติ 2549)

การเผาด้วยความร้อนเป็นเทคนิคที่ใช้ในการเพิ่มสีของทับทิมและแซปไฟร์มาตั้งแต่โบราณกาล ในทางปฏิบัติการเผาพลอยมีวัตถุประสงค์ เผาเพิ่มสี ลดสี และการเผาใส ตัวแปรสำคัญในการเผาพลอย

ที่สำคัญ ๆ คือความสัมพันธ์ของอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการเผากับเวลา บรรยายกาสที่ใช้เผาเป็น ออกซิเดชันหรือรีดักชัน และองค์ประกอบทางเคมีของสารที่สามารถเกิดอันตรกิริยาในพอลอย ในทางปฏิบัติได้มีผู้เขียนสรุปไว้ดังนี้ (ประจักษ์ อังคะหิรัญ, 2546; รัก หรรษาเวก 2544 ;Emmett and Douthit, 1993; Nassau, 1944)

พอลอยสีน้ำเงิน ถ้ามี Fe^{2+} และ Ti^{4+} พอเหมาะ เผาแล้วให้สีน้ำเงิน($Fe^{2+} + Ti^{4+}$) แต่ถ้ามี Fe^{3+} มากกว่า Fe^{2+} ดังนั้นปริมาณของ Fe^{2+} มีไม่เพียงพอที่จะให้สีน้ำเงิน สีของพอลอยน้ำเงินจึงเห็นเป็นสีฟ้าอ่อน ๆ สีเหลือง สีเขียว หรือสีอื่น ๆ พอลอยสีน้ำเงินดังกล่าว นำมาเพิ่มสีโดยการเผาอีกรีดักชันเปลี่ยน Fe^{3+} เป็น Fe^{2+} ถ้ามี Ti^{4+} มากเกินไป พอลอยจะขุ่นมัวหรือมีตำหนิได้ ต้องใช้เทคนิคการเผาใด กรณีที่ต้องการลดสีในพอลอย ทำการเผาลดสี นั่นคือเผาในบรรยากาศตรงข้ามกับการเผาเพิ่มสี เช่น ต้องการลดสีพอลอยน้ำเงิน เผาออกซิเดชันเปลี่ยน Fe^{2+} เป็น Fe^{3+} เป็นต้น สำหรับพอลอยบางเม็ด ถ้าไปเผาเพิ่มสีมากไป สีจะเข้มมาก ไม่โปร่งแสง ก็ให้เผาออกซิเดชันเปลี่ยน Fe^{2+} เป็น Fe^{3+} บางกรณีพบพอลอยลักษณะขุ่นนํ้านม (milky) เรียกว่าพอลอยหม่า เนื่องจากมีตำหนิ TiO_2 (เข็มรูไทร์) มากเกินไป เมื่อเผาด้วยความร้อนสูง ทำให้รูไทร์หลอม ไทเทเนียมเข้าไปใน solid solution ขณะเดียวกัน บรรยายกาสรีดิวซ์เปลี่ยน Fe^{3+} เป็น Fe^{2+} แล้วทำให้เย็นตัวรวดเร็วเพื่อป้องกันไทเทเนียมที่ละลาย (exsolved) กลับเข้าไปอยู่ในรูปรูไทร์ โดยที่ทั้ง Fe^{2+} และ Ti^{4+} มีอยู่ร่วมกัน ดังนั้นพอลอยสีที่ขุ่นมัว จะใส และให้สีน้ำเงิน

ทับทิม ธาตุมลทินที่ให้สีคือ Cr^{3+} ซึ่งให้สีชมพูถึงแดง และไม่สามารถเปลี่ยนวาเลนซ์ของ Cr^{3+} โดยการเผาได้ เพราะต้องใช้อุณหภูมิสูงจนกระทั่งทำให้ตัวพอลอยหลอมได้ ดังนั้นการเผาเพิ่มสีพอลอยทับทิม หรือการเผาพอลอยแดง ก็เพื่อลดสีม่วงหรือสีดำคล้ำที่เกิดจาก Fe^{2+} ในพอลอยมีมาก ($Fe^{2+} + Ti^{4+}$) หลังเผาออกซิเดชันเปลี่ยน Fe^{2+} เป็น Fe^{3+} ทำให้พอลอยแดงนั้นมีสีแดงและมีความใสเพิ่มขึ้น กรณีพอลอยแดง สามารถเพิ่มสีพอลอยและแก้ไขสีพอลอยขุ่นในเวลาเดียวกัน

พอลอยสีเหลือง การเผาเพิ่มสีพอลอยเหลือง เผาออกซิเดชัน เปลี่ยน Fe^{2+} เป็น Fe^{3+} ต้องเผาอุณหภูมิสูง เผาลดสีพอลอยเหลืองในบรรยากาศรีดักชัน เปลี่ยน Fe^{3+} เป็น Fe^{2+} การเผาใสพอลอยเหลืองนิยมเผาที่บรรยากาศ อุณหภูมิสูง และเวลายาวนาน

แซปไฟร์บริสุทธิ์ ประกอบด้วยอลูมิเนียมและออกซิเจน (Al_2O_3) แซปไฟร์บริสุทธิ์จึงไม่มีสี สีทั้งหลายที่ปรากฏในแซปไฟร์เป็นผลของมลทินธาตุ (trace elements) อื่น หรือ point defects ในผลึก (Fritch and Rossman, 1987, 1988) point defects อื่นเหล่านี้อาจเป็น เช่น อะตอมที่สูญหายไป (vacancy ในแลททิซ) การมีอะตอมแทรกเพิ่มเติม (interstitial) หรือตัวพาประจุ (charge carriers) เช่นอิเล็กตรอนที่เกิน (extra electrons) การเผาพอลอยที่อุณหภูมิสูงสามารถชักนำเกิดปฏิกิริยาเคมี ในหมู่มลทินธาตุและ point defects อื่น ๆ ในแซปไฟร์ ดังนั้นจึงให้สเปคตรัมดูดกลืนที่แตกต่างกันออกไปที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของสี โดยเฉพาะการเผาพอลอยที่อุณหภูมิสูงสามารถ 1) เปลี่ยนสภาวะ

เวเลนซ์ ของมลทิน ดังนั้นทำให้สเปกตรัมดูดกลืนเปลี่ยน 2) ชักนำมลทินที่โดดเดี่ยวเกิดเป็นคู่ ที่ค่าดูดกลืนแสงแตกต่างจาก มลทินที่อยู่โดดเดี่ยว 3) อนุภาคเล็ก ๆ ของแร่ (exsolved minerals) เกิดการละลาย ซึ่งอาจทำให้เกิดมลทินใหม่เข้าไปในสารละลาย ทำให้เกิดการดูดกลืนแสงใหม่ขึ้นมา 4) มลทินที่เกิดจากการกระจายอนุภาคหรือมลทินตะกอน เข้าไปในสารละลาย ดังนั้นเปลี่ยนแปลงการดูดกลืนที่เกิดจากการผสมผสานของมลทินในสารละลาย

การทำความเข้าใจการแปลงสีที่สามารถชักนำโดยกรรมวิธีการเผาต่าง ๆ จำเป็นต้องเข้าใจถึง สีดั้งเดิมในแซปไฟร์ว่ามาจากสาเหตุอะไร กล่าวโดยย่อดังนี้ (Nassau, 1983; Fritch and Rossman, 1987, 1988)

สีของทับทิม สีแดง เกิดจากอเล็กตรอนทรานซิชันที่เกี่ยวข้องกับ Cr^{3+} ซึ่ง Al^{3+} ถูกแทนที่โดย Cr^{3+} ในปริมาณประมาณ $1\%Cr_2O_3(Al_2O_3:1\%Cr)$ โครเมียมแทนที่อลูมิเนียมและจะนั้นอยู่ในรูปออกไซด์ไฮดรอกไซด์ของ Cr^{3+} ใหญ่กว่า Al^{3+} เล็กน้อย (1.2 และ 1.1 Å ตามลำดับ) สามารถดูดกลืนช่วงแสงวิชิเบิลเมื่อดูดกลืนแสงขาว เกิดอเล็กตรอนทรานซิชันที่มีพลังงานสมนัยกับการดูดกลืนย่านสเปกตรัมเหลือง-เขียว คายสีแดงซึ่งเป็นสีที่ตาเห็น และการดูดกลืนไวโอเลตคายสีน้ำเงินเล็กน้อย ดังนั้นทับทิมมีสีแดงที่ติดม่วงเล็กน้อย การดูดกลืนจะเป็นแถบแทนที่เป็นเส้นแคบ ๆ และเกยกันบ้าง ดังนั้นมีการส่งผ่านแดงมาก และส่งผ่านสีน้ำเงินเล็กน้อย ทำให้เห็นทับทิมสีแดงที่อมม่วง สมมติมีการแทนที่ของ Cr_2O_3 และ MgO เกิดขึ้น ถ้าเป็น Mg^{2+} จะมี 1 ประจุบวกขาดไป ถ้าแทนที่โดย Mg^{2+} 1 ตัว กลไกการชดเชยประจุ คือ ออกซิเจนหนึ่งตัวออกไป (ประจุ -2) การชดเชยประจุให้ผลึกเป็นกลาง เป็นการแทนที่ของ Mg^{2+} 2 ตัว ดังนั้นผลรวมประจุดุลพอดี [(+6 -4) - 2)] อีกกลไกหนึ่ง Cr^{3+} อาจเข้าไปในรูป Cr^{4+} 1 ตัว (Hoskin and Soffer, 1964) และ Mg^{2+} 1 ตัว แทนที่ Al^{3+} 2 ตัว ซึ่งจากการทดลองเกิดกลไกที่สอง คือแทนที่จะเป็นสีแดงให้สีส้ม - น้ำตาล ผลจาก Cr^{4+} เรียกชนิดพลอยแพดพาราซาที่เกิดในธรรมชาติ

แซปไฟร์สีน้ำเงิน ประมาณ 0.2 – 0.3 % ของไทเทเนียม ในคอร์ันดัมไม่ให้สี และ 0.2 – 0.3 % ของเหล็กในคอร์ันดัมให้สีเหลืองซีด แต่ถ้าไอออน Fe^{2+} และ Ti^{4+} อยู่ร่วมกันให้สีน้ำเงินเข้ม ทั้ง Fe และ Ti แทนที่ Al ในโครงสร้างผลึกคอร์ันดัม ซึ่งเหล็กอาจอยู่ในรูป Fe^{2+} หรือ Fe^{3+} ขณะที่ไทเทเนียมอยู่ในรูป Ti^{4+} ถ้า Fe^{2+} และ Ti^{4+} ทั้งคู่อยู่ใกล้กันพอเพียง เกิดอันตรกิริยาการถ่ายโอนอิเล็กตรอนตัวหนึ่งกระโดดจากไอออนเหล็กไปยังไอออนไทเทเนียม เมื่อเร้าด้วยรังสีดูดกลืนย่านวิชิเบิล $Fe^{2+} + Ti^{4+} \rightarrow Fe^{3+} + Ti^{3+}$ กลไกการถ่ายโอนประจุ (intervalence charge transfer, IVCT) ที่ให้สีน้ำเงิน ที่ประสิทธิภาพสูง กล่าวคือให้สีเข้มกว่า 100 – 1000 เท่า เมื่อเทียบกับทับทิมที่ต้องการประมาณ 1% Cr^{3+} ให้แดงเข้ม ขณะที่ใช้แค่ สองสามส่วนในร้อยละของ 1% Fe และ Ti ให้ สีน้ำเงินเข้ม

ตัวเหล็กเองให้สีเขียวซีด เหลือง หรือ สีสมน้ำตาล แต่ถ้ามี Ti อยู่ ให้แซปไฟร์ สีอื่น ๆ ด้วย คือเขียว น้ำเงินเขียว และ IVCT ให้สีน้ำเงิน

แซปไฟร์สีเหลืองและสีส้ม แซปไฟร์สีเหลือง ที่เกิดจาก Fe^{3+} และหรือ Fe^{3+}/Fe^{3+} คอรัันดัมไม่มีสีใส เขียว หรือเหลืองอ่อน บางเม็ดอาจมีเหล็กในรูปของ Fe^{2+} จึงไม่แสดงสีเหลืองชัดเจน การเผาออกซิเดชันเปลี่ยนเป็น Fe^{3+} ได้สีที่เข้มขึ้น แซปไฟร์สีเหลืองไทยและออสเตรเลีย Fe^{3+} เป็นสาเหตุ แม้ว่าไม่จำเป็นต้องเป็นเหล็กที่แทนที่ แสดงแถบการดูดกลืนเด่นชัด สำหรับพลอยศรีลังกา สีเหลืองไม่ได้เนื่องจาก Fe^{3+} เท่านั้น แต่เกิดจากการแทนที่ของ Al^{3+} โดย Mg^{2+} และจากศูนย์กลางสี (color centre) แซปไฟร์สีเหลืองจากศรีลังกา ประกอบด้วยศูนย์กลางสีที่เสถียรและไม่เสถียร ที่ควบคู่กับ Fe^{3+} เป็นสีที่ปรากฏให้เห็นในพลอยพัคพาราชา แซปไฟร์สีส้ม – ชมพู จากศรีลังกา มีโครเมียมอยู่ด้วย ซึ่งไปเติม ชมพู ดังนั้นให้สีส้มอมชมพู

สีอื่น ๆ ของแซปไฟร์ ส่วนใหญ่เนื่องมาจากส่วนผสมของธาตุที่ให้สีน้ำเงิน แดงและเหลือง เช่น แซปไฟร์ สีไวโอเล็ตและม่วง เป็นการผสมของสีแดงและน้ำเงิน ($Cr^{3+}, Ti^{4+} - Fe^{2+}$) แซปไฟร์สีเขียวเป็นการผสมของสีน้ำเงินและเหลือง ($Ti^{4+} - Fe^{2+}, Fe^{3+}$) และแซปไฟร์สีส้มตามธรรมชาติ สีเกิดจากการผสมของสีแดง (Cr^{3+}) และ (Fe^{3+}) และอาจแสดงการซ้อนทับของแถบสเปคตรัม Fe และ Cr ดังเช่น แซปไฟร์สีเหลืองบางตัว

โดยสรุป ทั้งทับทิมและแซปไฟร์ ตระกูลคอรัันดัม ประกอบด้วยแร่อลูมิน่า Al_2O_3 สีทับทิมผลจากสารมลทิน Cr^{3+} ที่แทนที่ Al^{3+} ในแลททิซผลึก สีของแซปไฟร์อื่น ๆ ซึ่งมีสีน้ำเงิน ถึงเหลือง เขียว และม่วง เกิดจากสารมลทินตัวเดียวหรือหลายตัว ของ $Fe^{3+}, Ti^{4+}, Mg^{2+}$ และ Cr^{3+} เป็นต้น

กรรมวิธีการเผาพลอย

การเผาแบบธรรมดา (heat treatment) เป็นการปรับปรุงคุณภาพพลอยโดยใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียว (อุณหภูมิสูง – เวลา) ในบรรยากาศออกซิเดชันหรือรีดักชัน นอกเหนือจากนี้อาจมีการเผาแบบใส่สารเชื่อมประสานรอยร้าวของพลอย

การเผาโดยใช้สารเคมีจากแหล่งภายนอกแพร่เข้าไป ในการเพิ่มคุณค่าพลอย เช่น โดยการแพร่ไทเทเนียมเข้าไปในแลททิซของคอรัันดัมสังเคราะห์ชนิด Verneuil หลังจากการเผา เกิดเข็มรุทร์และเป็นสาเหตุเกิด asterism ในตัวอย่าง ต่อมาได้แพร่ไทเทเนียมเข้าไปในคอรัันดัมธรรมชาติ เพื่อพัฒนาหรือปรับปรุงสีน้ำเงินแซปไฟร์ตามต้องการ กลไกปฏิกิริยาสามารถอธิบายได้ชัดเจน สามารถตรวจสอบถึงความแตกต่างได้โดยอุปกรณ์อัญมณี การแพร่ชนิดนี้เข้าไปแคผิว ๆ ดังนั้นการนำมาเจียรในใหม่สีก็จะหลุดออก เรียกว่าไฟลินแพร่สีผิว (blue diffused sapphire) หรือที่เรียกว่า coated sapphire (Themelis, 1992)

การเผาตัดแปลงสีที่เกี่ยวข้องกับแพร่ของเบอริลเลียม การเผาด้วยวิธีการเติมธาตุเบอริลเลียม การแพร่ของ เบอริลเลียมเมื่อเข้าไปมีพันธะทางเคมีกับธาตุตัวอื่นที่อยู่ภายในโครงสร้างเดิม ทำให้เกิดกลุ่มโครงสร้างย่อยของ $BeTiO_3$ ซึ่งนอกจากจะมีผลทำให้พลอยขุ่นมัวเนื่องจาก TiO_2 เกิดความใสแล้ว

ยังมีผลเกี่ยวเนื่องทำให้เกิดศูนย์กลางสี เกิดความบกพร่องทางโครงสร้างของผลึกพลอย ทำให้เกิดสีเหลือง และเมื่อสีเหลืองที่เกิดขึ้นนี้ไปผสมกับสีชมพู หรือแดงที่เกิดจากธาตุมลทิน Cr^{3+} ในเนื้อพลอยตามธรรมชาติ ทำให้เกิดเป็นสีส้ม หรือชมพูส้ม – แดงส้ม ปราภฏลักเข้าไปในเนื้อมิโซแคผิว บางกรณีก็สีเต็มเม็ด ประการสำคัญที่สุด คือ สีที่ได้นี้คงทนถาวร การเผาพลอยเพื่อดัดแปลงสี หรือเรียกว่า New Heat Treatment (รัก หรรษาเวก, 2548)

ดังได้กล่าวในบทนำ เป็นที่ยอมรับว่ามีการแพร่ของเบอริเรียมเข้าไปในแลททิซผลึก การแพร่จะเกิดขึ้นได้ ต้องการความบกพร่องของแลททิซ (lattice defects) และเนื่องจากร้อยละบกพร่องเพิ่มตามอุณหภูมิ วิธีที่ดีที่สุดการสร้างบกพร่อง โดยผ่านกรรมวิธีการเผา ความบกพร่องของแลททิซ ยอมให้มีเคลื่อนที่หรือแพร่ของอะตอมมลทินผ่าน การแพร่ของ oxidizing defects เข้าไปในคอร์นดัม (บรรยากาศออกซิไดซิงค์) สามารถเปลี่ยน Fe^{2+} เป็น Fe^{3+} , ขณะที่การแพร่ของ oxidizing defects ออกจากพลอย (บรรยากาศรีดิวซิงค์) เปลี่ยน Fe^{3+} เป็น Fe^{2+} นี้สามารถมีผลกับสี

คอร์นดัมประกอบด้วย Al_2O_3 , อลูมิเนียมในรูป Al^{3+} ธาตุมลทินที่มีเวเลนซ์เดียวกัน เช่น Cr^{3+} , Fe^{3+} และ V^{3+} ซึ่งมีวาเลนซ์เหมือนกัน เรียก *isovalent* ซึ่งจะไปแทนที่ Al^{3+} ในโครงสร้างคอร์นดัม การแทนที่ 0.1–3% ที่จะให้สี

การเกิดสีอีกชนิด เหตุจากศูนย์กลางสี และเนื่องจากมลทินธาตุปริมาณน้อยกว่ามาก ในกรณีนี้ *aliovalent ions* หมายถึงไอออนที่มีเวเลนซ์แตกต่างจากที่จะเข้าไปแทนที่ ตัวอย่าง Mg^{2+} และ Ti^{4+} . เมื่อเข้าแทนที่ ไม่ค่อยสะดวกนัก ซึ่งสร้างความบกพร่องที่ดูดกดินแสง เช่นไอออน Mg^{2+} (เวเลนซ์ต่ำกว่า Al^{3+}) ที่มีปริมาณมากกว่าปริมาณของ Ti^{4+} (เวเลนซ์สูงกว่า Al^{3+}) สามารถให้ Mg^{2+} trapped-hole color centers ให้สีเหลืองถึงเหลืองส้ม (Cox, 1971; Wang, Lee, and Kröger, 1983; Schmetzer et al, 1983; Emmett and Douthit, 1993; Häger, 2001)

การเผาในบรรยากาศออกซิเจนสามารถเข้าศูนย์กลางสีในคอร์นดัม แชนไปไฟร์ศรีลังกาสีอ่อนเผาให้เหลือง เหลืองทอง ในบรรยากาศออกซิไดซิงค์ เพราะว่าพลอยเหล่านี้มี Mg^{2+} ฉะนั้นการเผาพลอยสีชมพู และเมื่อเติมศูนย์กลางสีสีเหลืองให้กับพลอยสีชมพู จะให้สีของแพดพาราชา การเผาพลอยแดงม่วง เมื่อเติมศูนย์กลางสีสีเหลือง ทำให้สีแดงชัดขึ้น คล้ายทับทิมมากขึ้น และถ้าเผาพลอยน้ำเงิน การเติมศูนย์กลางสีสีเหลือง ทำให้ได้สีตื้น ๆ

ถ้าในตัวพลอยไม่มีไอออนที่ต้องการ เราสามารถแพร่จากแหล่งภายนอก การแพร่ *isovalent ions* เช่น Cr^{3+} , Fe^{3+} และ V^{3+} เกิดช้ามาก ๆ การแพร่ธาตุ *aliovalent* เช่น Mg^{2+} และ Ti^{4+} แพร่ได้ 1000–10,000 เร็วกว่า ดังนั้นสามารถเติมสีให้กับคอร์นดัม โดยการแพร่ปริมาณน้อยจากแหล่งภายนอก

การที่ *aliovalent titanium* (Ti^{4+}), magnesium (Mg^{2+}), lithium (Li^+), calcium (Ca^{2+}) or sodium (Na^+) แพร่เข้าไปในคอร์นดัม 1000–10,000 เท่าเร็วกว่า Fe^{3+} หรือ Cr^{3+} เพราะว่าการแทนที่

ของ Al^{3+} โดยมีลทิน aliovalent รั่วให้เกิด defects ไอออน Be^{2+} ซึ่งขนาดเล็กมากและเป็น aliovalent ที่สามารถแพร่อย่างสมบูรณ์เข้าไปในคอร์นดัมช่วงระยะเวลาชั่วโมงหรือวัน

กระบวนการเผาผลายให้อุณหภูมิสูง 1750 ถึง 1850 °C เวลา 25 ถึง 300 ชั่วโมง ยิ่งใช้เวลาการเผานานเบอริลเลียมจะแพร่เข้าไปในพลอยระยะทางไกลมากขึ้น การเผา 300 ชั่วโมง จะแพร่ระยะทาง 6.2 mm เข้าไปในพลอย พอเพียงที่จะสีของแซปไฟร์ 12.4 mm เกิดสมบูรณ์

การแพร่ของเบอริลเลียมเข้าไปในคอร์นดัมธรรมชาติ แตกต่างอย่างมาก โดยที่เบอริลเลียมมีขนาดเล็กมาก (ionic radius = 0.35 Å) สามารถแพร่ไปในผลึกด้วยระยะทางไกล และไปเกิดอันตรกิริยากับธาตุมลทินในคอร์นดัม และธาตุมลทินที่สำคัญในเรื่องการเกิดสีได้แก่ Mg, Ti, V, Cr และ Fe และองค์ประกอบเคมีหลักของคอร์นดัมคือ อลูมิเนียมและออกซิเจน กระบวนการเหล่านี้หรือกลไกการเกิดสีค่อนข้างซับซ้อน และยังเป็นความคิดหลากหลาย ในคอร์นดัมธรรมชาติที่มีมลทินเหล็กและโครเมียม ปฏิกริยาและกลไกการแพร่เบอริลเลียม เป็นสาเหตุให้เกิด ศูนย์กลางสีที่มีสีส้ม ที่มีแถบการดูดกลืนที่กว้าง ค่าการดูดกลืนสูงสุดอยู่ในช่วงวิซิเบิลที่ประมาณ 460 ถึง 470 nm กับองค์ประกอบการดูดกลืนในย่านยูวี ลักษณะการดูดกลืนเหล่านี้เป็นสาเหตุสำคัญของการเปลี่ยนสี เช่น จากชมพูไปเป็นเขดสีต่าง ๆ ของสีส้ม ดังนั้นสีต่าง ๆ ของตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเผาและผ่านการเผา ผลมาจากองค์ประกอบที่แตกต่างของ Fe และ Cr และความเข้มข้นของศูนย์กลางสี (Schmetzer and Schwartz, 2004)

การวิเคราะห์พบเบอริลเลียมในแซปไฟร์โดย Secondary Ionization Mass Spectrometry (SIMS) และ Laser ICP-MS ที่ผ่านกระบวนการเผาแบบแพร่เบอริลเลียม เป็นก้าวสำคัญในการเข้าใจกลไกการเปลี่ยนสีโดยการแพร่ของเบอริลเลียม (Peretti and Günther, 2002; Emmett et al., 2003; Peretti et al., 2003)

โมเดลสำหรับการเข้าใจสาเหตุการเกิดสีและการเปลี่ยนแปลงสีในแซปไฟร์ที่มี Mg-, Fe- และ Ti- พัฒนาโดย Häger (2001) การนำเสนอ วางบนพื้นฐานการทดลองในการเผาด้วยความร้อน ผสมผสานกับสเปกตรัมดูดกลืน และการวิเคราะห์ธาตุมลทิน โดยการใช้ไดอะแกรมสามเหลี่ยม Mg-Fe-Ti แทนธาตุมลทินในแซปไฟร์ธรรมชาติ หรือสังเคราะห์ ไดอะแกรมประยุกต์กับแซปไฟร์ธรรมชาติหรือสังเคราะห์ที่มีเหล็กค่อนข้างต่ำ ดังนั้นแถบการดูดกลืนของ Fe^{3+} จะอ่อน ไม่ให้สีเหลือง สรุปว่าคอร์นดัมที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ เมื่อมีปริมาณเท่ากันของ Mg และ Ti อะตอม จะไม่มีสี เนื่องจากการมีการชดเชยประจุสมบูรณ์โดยคลัสเตอร์ Mg - Ti หรือ อันตรกิริยา Mg - Ti กรณีนี้ไม่มีการเกิดทั้ง Mg^{2+} trapped hole color centre หรือ การแลกเปลี่ยนประจุ Fe - Ti (ที่ทำให้เกิดสีน้ำเงิน) สำหรับคอร์นดัมที่มี $Mg > Ti$ แสดง Mg^{2+} color centre และเกิดสีเหลือง ส้ม หรือไวโอเลตอมน้ำตาล (brownish - violet) และกรณีที่ $Ti > Mg$ ให้สีน้ำเงิน ซึ่งเกิดจากการถ่ายโอนประจุ Fe^{2+}/Ti^{4+}

Emmett et al (2003) ได้ปรับโมเดลนี้มาใช้อธิบายกลไกปฏิกริยาและการเปลี่ยนสีที่มีสาเหตุจากการแพร่ของเบอริลเลียมในคอร์นดัมแลททิซ ได้อธิบายการเติมเบอริลเลียมเข้าไป จะไปทำให้การ

กระจายของธาตุมลทินเปลี่ยนไปจากที่เป็นอยู่ โดยเฉพาะอัตราส่วน Mg :Ti ไปเป็นอัตราส่วนใหม่ (Mg + Be):Ti ซึ่งถ้า (Mg + Be) > Ti เกิดศูนย์กลางสีส้ม และมีการเปลี่ยนแปลงสี ซึ่งอาจสมมติได้ว่า เบอริลเลียมทำหน้าที่ชดเชยประจุสำหรับ Ti และโดยวิธีทางนี้ จะปลดปล่อย Mg เป็นอิสระ ซึ่ง Mg อิสระนี้อาจเกิดศูนย์กลางสีของ 'orange' Mg หรือคลัสเตอร์ของ (Mg - Fe) หรือ (Mg - Cr) หรือ (Mg - Fe - Cr) กล่าวคือเกิด trapped hole centre ของ Mg หรือ (Mg - Fe) หรือ (Mg - Cr) หรือ (Mg - Fe - Cr) ที่มีการดูดกลืนสูงสุดที่ความยาวคลื่น 470 และ 380 nm และ/หรือ ช่วงอัลตราไวโอเล็ต อาจสมมติเช่นกันว่าตัวเบอริลเลียมเองสามารถเกิดเป็น 'orange' Be หรือ (Be - Fe) หรือ (Be - Cr) หรือ trapped hole centre ของ (Be - Fe - Cr) ที่มีการดูดกลืนสูงสุดที่ความยาวคลื่น 470 และ 380 nm และ/หรือ ช่วงอัลตราไวโอเล็ต โดยพื้นฐานเบอริลเลียม สร้าง trapped hole color center. การสร้างศูนย์กลางสี ขึ้นกับหลายสิ่ง รวมถึงปริมาณไทเทเนียมที่อยู่ใกล้ ๆ ในการวิเคราะห์ระดับไมโคร (ppma, parts per million atomic) ได้เสนอข้อสรุปว่า Ti^{4+} จะชดเชยประจุกับ Be^{2+} ก่อน Fe^{2+} ซึ่งเป็นเงื่อนไขการเกิด trapped - hole color centre สีเหลือง ในบรรยายภาคออกซิไดซ์คือ $[Mg^{2+} + Be^{2+}] > [Ti^{4+} + Si^{4+}]$ ซึ่งสามารถทำนายการเกิดสีได้ดังนี้

- พลอยสีเขียวย่อน น้ำเงินอ่อน (ของเจีย) ไร้สี ซึ่ง $[Ti^{4+} + Si^{4+}] \geq [Mg^{2+}]$ การแพร่เบอริลเลียมยังผลให้ $[Mg^{2+} + Be^{2+}] > [Ti^{4+} + Si^{4+}]$ ซึ่งการมีมากเกินไปของ $[Mg^{2+} + Be^{2+}]$ จะให้ trap hole ให้สีเหลืองเข้มถึงส้ม

- พลอยที่เกือบไม่มีสีหรือเหลืองซีด $[Mg^{2+}] > [Ti^{4+} + Si^{4+}]$ เมื่อเผาในบรรยากาศออกซิไดซ์ และแพร่เบอริลเลียม จะปรับให้ $[Mg^{2+} + Be^{2+}] \gg [Ti^{4+} + Si^{4+}]$ ได้สีส้ม

- พลอยมาดากัสการ์สีชมพู $[Ti^{4+} + Si^{4+}] \geq [Mg^{2+}]$ เมื่อเผาแพร่เบอริลเลียมในออกซิเจนยังผลให้ $[Mg^{2+} + Be^{2+}] \gg [Ti^{4+} + Si^{4+}]$ ให้ trap hole สีเหลืองผสมกับชมพูให้สีส้ม

- พลอยทับทิมของเจียที่มี Fe, Ti ดังนั้นมีสีน้ำเงินของ $Fe^{2+} - Ti^{4+}$ การเผาแพร่เบอริลเลียมในบรรยากาศออกซิเจน $[Ti^{4+} + Si^{4+}] > [Mg^{2+}]$ ปรับเป็น $[Mg^{2+} + Be^{2+}] \gg [Ti^{4+} + Si^{4+}]$ ให้ trap hole สีเหลือง กล่าวคือสีน้ำเงินกลายเป็นเหลือง

กล่าวโดยสรุป ธาตุเบาหรือในกรณีนี้เบอริลเลียมเข้าไปแทนที่ อลูมิเนียมในแลททิซแซปไฟร์ สร้างสิ่งๆ เรียกว่า "trapped - hole color centers." ซึ่ง trapped-hole color center ในคอร์ันดัมเป็นสาเหตุให้เกิดสีเหลือง สีเหลืองอ่อนทับกับสีชมพูปรากฏเป็นสีส้มของพลอย พลอยที่ไร้สี ปรากฏเป็นสีเหลือง แต่เป็นสีเหลืองที่แตกต่างกับที่เกิดจากมลทินเหล็ก ลักษณะอีกประการหนึ่งเช่นในกรณีแซปไฟร์ แหล่งมอทานา trapped-hole color center เกี่ยวข้องกับแมกนีเซียมที่มีอยู่ในพลอย ไวต่ออุณหภูมิและความดันย่อย (Emmett and Douthit, 1993)

ปัจจุบัน ยังไม่ทราบแน่ชัดว่า Be เกี่ยวข้องอย่างไรในสิ่งที่เรียกว่า ศูนย์กลางสีส้ม หรือ คลัสเตอร์ของ (Be - Mg - Fe - Cr) หรือเป็นเพียงเบอริลเลียมเท่านั้นที่เกี่ยวข้องในกลไกชดเชยประจุสำหรับ

Ti กล่าวอีกนัยหนึ่ง ความแตกต่างระหว่างศูนย์กลางสี่สี่ล้ม ที่ให้การดูดกลืนสูงสุด ที่ 470 nm และศูนย์กลางสี่สี่ล้ม ที่ให้การดูดกลืนสูงสุดที่ 420 nm ที่เกิดจากการแพร่ของเบอริลเลียม ไม่ได้มีความเข้าใจที่ชัดเจน นอกจากนั้น บทบาทของ Fe^{2+} , Fe^{3+} ภายในปฏิกิริยาที่ซับซ้อน และบทบาทขดเชยประจุสำหรับ Ti ใน Be-, Mg-, Ti- และ Fe- ของเซปไฟร์ที่ผ่านการเผาเบอริลเลียม ยังไม่เป็นที่เข้าใจ ทำนองเดียวกันเป็นไปได้หรือไม่ที่ใคร่เมียมอยู่ในรูป Cr^{4+} ในการขดเชยประจุสำหรับ Mg^{2+} และ/หรือ Be^{2+}

ในการศึกษาครั้งนี้ เพื่อศึกษากลไกการเกิดสีจากกรรมวิธีเพิ่มคุณภาพพลอยโดยการเผาแบบแพร่เบอริลเลียมในรูปของพลอยเนื้ออ่อนผงคริสโตเบอริล

วัสดุอุปกรณ์และการทดลอง

พลอยที่นำมาทดลองได้จัดหาในจังหวัดจันทบุรี ซึ่งรู้แหล่งกำเนิดของพลอย ดังนี้

1) พลอยอิลลาซากา ประเทศมาดากัสการ์ ไม่มีสีและเกือบไม่มีสีที่มีสีชมพูอ่อน ๆ สีเขียวอ่อน และสีฟ้าอ่อน ๆ

2) พลอยอิลลาซากา ประเทศมาดากัสการ์ เป็นพลอยที่ผ่านการเผาแบบแพร่เบอริลเลียม

3) ทับทิมของเจีย สีแดงคล้ำแดงม่วง

4) พลอยของเจีย ประเทศแทนซาเนีย สีเขียวอ่อน

5) พลอยบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี สีเขียวแก่ - น้ำเงิน - น้ำตาล

ตัวอย่างพลอยที่ได้มา (ข้อ 1,3,4,5) จะนำมาทำความสะอาด แห้ด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก ล้างด้วยน้ำประปา ผึ่งให้แห้ง เนื่องจากพลอยอิลลาซากา มาดากัสการ์ ชนิดเกือบไม่มีสี (ข้อ 1) โดยธรรมชาติจะปะปนด้วยพลอยเนื้ออ่อน จึงนำไปอบด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิไม่เกิน $1400^{\circ}C$ เพื่อคัดพลอยเนื้ออ่อนออก ก่อนนำไปทดลองต่อไป

จากนั้นแบ่งพลอยแต่ละชนิดออกเป็น 3 กลุ่ม (ยกเว้นพลอยข้อ 2 เป็นกลุ่มที่ผ่านการเผาแบบแพร่เบอริลเลียมแล้วเพียงกลุ่มเดียว) คือกลุ่มพลอยที่ไม่ผ่านการเผา (untreated) กลุ่มที่นำไปเผาด้วยความร้อนสูงแบบธรรมดา (heat treated) และกลุ่มที่สามนำไปเผาด้วยความร้อนสูงแบบเดียวกับกลุ่มสองแต่เติมสารเบอริลเลียมในรูปของคริสโตเบอริล จัดเป็นกลุ่มการเผาแบบแพร่เบอริลเลียม เตาแก๊สที่ใช้เป็นชนิด 8 หัวผลิตในจังหวัดจันทบุรี ตัวอย่างที่จะเผาวางในครุชีเบิ้ลอลูมิน่า ขนาดที่ใช้ทดลอง เส้นผ่าศูนย์กลาง 6 - 10 ซม ตรงกันเจาะเป็นรูสำหรับท่อออกซิเจน จึงต้องรองกันด้วยเศษครุชีเบิ้ลอีกชั้นหนึ่งก่อนวางตัวอย่างพลอย สภาวะการเผาพลอยคอร์ันดัมและพลอยสังเคราะห์ชนิด Flame Fusion ดังสรุปในตาราง 1

ตาราง 1 สภาวะที่ใช้ในการเผาภายใต้บรรยากาศออกซิโดซิงค์ ในเตาแก๊ส และการเปลี่ยนสีสำหรับ ชนิดต่าง ๆ ของทับทิมและแซปไฟร์

ชนิดพลอย	อุณหภูมิ - เวลา	สีเปลี่ยนเป็น
แซปไฟร์ อิลลาากา มาดากัสการ์ ไม่มีสีและเกือบไม่มีสี(ชมพูอ่อน เขียวอ่อน ฟ้ำอ่อน)	1740 °C + ผงคริโซเบอริล 4 ชั่วโมง	เหลือง และเหลืองเข้ม
	1740°C ,4 ชั่วโมง	ยังคงไม่มีสี สีเดิมกลุ่มเกือบไม่มีสี เข้มขึ้นเล็กน้อย พลอยใสขึ้น
แซปไฟร์ อิลลาากา มาดากัสการ์ ที่ได้ผ่าน กระบวนการเผาแบบแพร่เบอร์ริล เลียมแล้ว สีชมพู สีส้มถึงส้มอม เหลืองและสีเหลือง	ไม่ทราบ	-
ทับทิมของเจีย (แทนซาเนีย) สี แดงคล้ำ ม่วงแดง	1720 °C + ผงคริโซเบอ ริล , 4 ชั่วโมง	ใสขึ้น สีแดง-ส้ม สีแดงอมม่วง
	1720 °C , 4 ชั่วโมง	พลอยใสขึ้น สีไม่เปลี่ยนชัดเจน
แซปไฟร์ของเจีย (แทนซาเนีย) สี เขียวอ่อน	1770 °C+ ผงคริโซเบอ ริล, 4 ชั่วโมง	เหลือง และเหลืองเข้ม
	1720 °C , 4 ชั่วโมง	พลอยใสขึ้น สีเดิมเข้มขึ้นเล็กน้อย
แซปไฟร์บางกะจะ สีเขียวเข้ม- น้ำตาล - น้ำเงิน	1750°C + ผงคริโซเบอริล, 8 ชั่วโมง	พลอยใสขึ้น เปลี่ยนเป็นเหลือง บางส่วน
	1750 °C , 8 ชั่วโมง	พลอยใสขึ้น เขียว-น้ำเงิน
แซปไฟร์สังเคราะห์ชนิด Flame Fusion ไม่มีสี	1750 °C + ผงคริโซเบอ ริล , 4 ชั่วโมง	สีน้ำตาล- ส้ม
	1720 °C , 4 ชั่วโมง	ไม่เปลี่ยนแปลง

พลอยทั้ง 3 กลุ่มของแต่ละชนิด จะทำการสุ่มตัวอย่างออกมา นำมาขัดหน้าเรียบทั้งสองด้าน สำหรับตัวอย่างพลอยบางกะจะ ที่ศึกษาจะทำการวัดคุณสมบัติก่อนนำไปเผาแบบธรรมดา และเผาแบบแพร่เบอร์ริลเลียม โดยติดตามผลก่อนเผาและหลังเผาเม็ดต่อเม็ด ตัวอย่างที่นำมาขัดหน้าเรียบทั้งสองด้าน และเตรียมไว้สำหรับศึกษาด้านสเปคโตรสโคปี วิเคราะห์เชิงเคมีโดยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ และ

ตรวจสอบอินคลูชัน (inclusions) ดังนี้

1. ในแต่ละกลุ่มของพลอยแต่ละชนิด นำมาซึ่ง หาความถ่วงจำเพาะ และวัดค่าดรรชนีหักเหของแสง

2. วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของพลอยโดยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (energy-dispersive X-Ray Fluorescence, EDXRF) รุ่น ED2000 ยี่ห้อ Oxford โดยดัดแปลงโปรแกรมสำเร็จที่วิเคราะห์ธาตุสำหรับวิเคราะห์ แบบ Semi quantitative เพื่อให้ผลวิเคราะห์ถูกต้องยิ่งขึ้น ได้นำตัวอย่างมาตรฐาน Nist (NIST SRM 610) ที่ทราบความเข้มข้นมาเทียบมาตรฐาน (assigned similar standards)

3. บันทึกสเปกตรากูดกลืนและสีของพลอยในช่วง อุลตราไวโอเลตถึงใกล้อินฟราเรด (UV-VIS-NIR spectrophotometer, Hitachi Model U-4100) และวัดสเปกตรัม คำนวณสีอิงระบบ CIEL*a*b ด้วยเครื่องเดียวกัน

สเปกตรากการดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเลตถึงอินฟราเรดระยะใกล้ของพลอยแต่ละกลุ่มรวบรวมไว้ในภาคผนวก 1

4. ตรวจสอบอินคลูชันด้วยกล้องสเตอริโอไมโครสโคป OLYMPUS Japan รุ่น C 5060

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. สมบัติเบื้องต้นของพลอยทับทิมและแซปไฟร์จากแหล่งต่าง ๆ ไม่เปลี่ยนแปลงแตกต่างจากคอร์นดัม โดยเฉลี่ย ค่าความถ่วงจำเพาะช่วง 3.95 – 4.01 ค่าดรรชนีหักเห 1.76 – 1.77 ทำการบันทึกภาพสีของพลอยแต่ละกลุ่มดังแสดงในรูป 1 - 6

2. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุโดย EDXRF

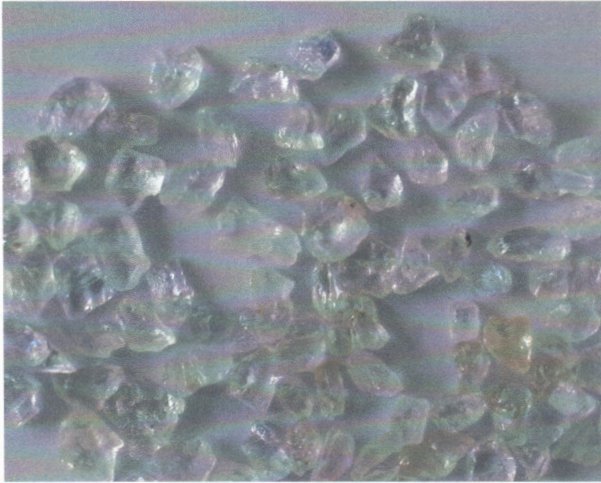
ปริมาณเหล็กและโครเมียมซึ่งเป็นธาตุทรานซิชันที่สำคัญ และธาตุไทเทเนียมและแมกนีเซียมซึ่งเป็นองค์ประกอบที่เกี่ยวข้อง ดังสรุปในตาราง 2

ข้อมูลที่วัดจาก EDXRF เป็นผลวิเคราะห์บัลค์ (bulk) ไม่สามารถเจาะจงเฉพาะพื้นที่ตำแหน่งตัวอย่างได้ การกระจายตัวของธาตุมลทินไม่สามารถบอกความแตกต่างได้ระหว่างตัวอย่างพลอยกลุ่มไม่เผา เผาแบบธรรมดา และเผาแบบแพร่เบอริลเลียม ซึ่งแต่ละแหล่งเป็นดังนี้

อิลากากา มาดากัสการ์

1) กลุ่มตัวอย่างพลอยที่ไม่มีสีและใกล้ไร้สี (near-colorless)

ทำการสุ่มตัวอย่างในแต่ละกลุ่มพลอย วัดองค์ประกอบธาตุโดย EDXRF จำนวน 21 ตัวอย่าง พบปริมาณเหล็กมากกว่าโครเมียมในทุกตัวอย่าง ช่วงความเข้มข้นค่า MgO ช่วง bdl – 2.03%wt (bdl= below detection limit 5 ตัวอย่าง) ค่า TiO₂ อยู่ในช่วง .02 - .06 %wt และอัตราส่วนของ Mg/Ti มีค่ามากกว่า 1 ในทุกตัวอย่าง (ยกเว้น 5 ตัวอย่างที่คำนวณค่าไม่ได้)



รูปที่ 1a ตัวอย่างพลอยอิลลาากา มาดากัสการ์ ที่
ได้คัดแยกพลอยเนื้ออ่อนออกในขั้นตอนการให้ความ
ความร้อนไม่เกิน 1400 °C จัดเป็นกลุ่มพลอยไม่เผา
(untreated)



รูปที่ 1b ตัวอย่างพลอยอิลลาากา มาดากัสการ์ เผาแบบแพร่เบอร์วิลเลียม
ซึ่งให้สีเหลืองและเหลืองเข้ม



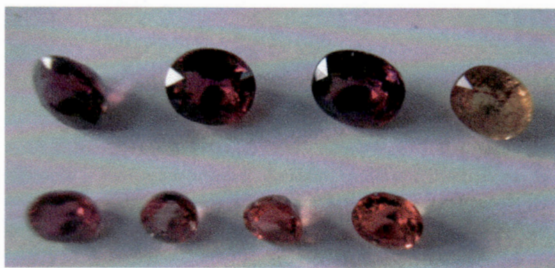
รูปที่ 2a พลอยก้อนอิลลาากา น้ำหนัก 0.5-1.2 กะรัต ที่ได้ผ่านการเผาแบบแพร่เบอร์วิลเลียม สีชมพู ส้ม
ถึงส้มอมเหลือง และเหลืองเป็นส่วนน้อย



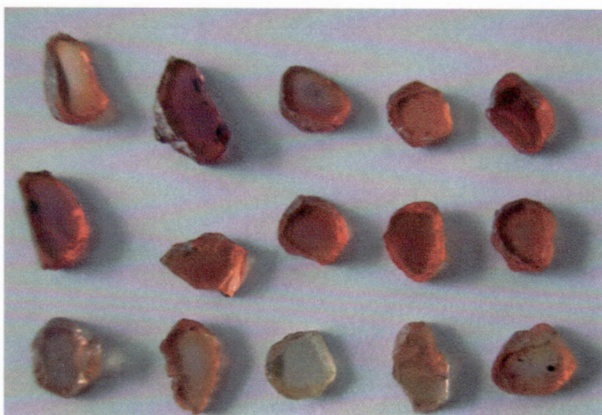
รูปที่ 2b พลอยอิลลาากาจากรูป 2a
นำมาเจียระไน น้ำหนักประมาณ 0.2-
0.7 กะรัต สีชมพู ส้มถึงส้มอมเหลือง
และเหลือง



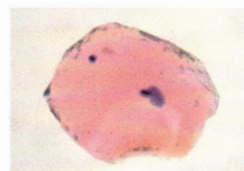
รูปที่ 3a พลอยก้อนของเจียแดง น้ำหนัก 0.2-0.5 กะรัต ก่อนเผา(ซ้าย) หลังเผาแบบธรรมดา(กลาง) หลังเผาแบบแพร่เบอร์ลิเลียม(ขวา)



รูป 3b ตัวอย่างพลอยทับทิมของเจียที่ผ่านการเผา แบบแพร่เบอร์ลิเลียม และนำมาเจียระไน สีแดงอมม่วงแดงอมส้ม และแดงน้ำตาล



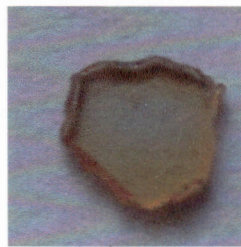
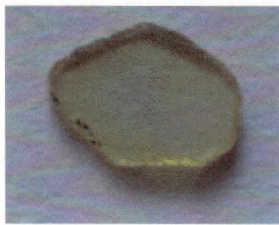
รูป3c ตัวอย่างพลอยทับทิมของเจียขัดหน้าเรียบสองหน้า ที่ผ่านการเผาแบบแพร่เบอร์ลิเลียม ความเข้มสีอยู่ขอบนอก ตรงกลางใส และมักเห็นจุดน้ำเงิน สีแดงอมน้ำเงินหรืออมเหลือง



รูป3d แสดงบริเวณขอบพลอยมีสีส้ม แกนในเป็นสีชมพู และผลึกที่ล้อมรอบด้วยสีน้ำเงิน



รูปที่ 4a พลอยก้อนของเจียเขียว น้ำหนัก 0.3-0.4 กะรัต หลังเผาแบบธรรมดา (ซ้าย)
และเผาแบบแพรวเบอริลเลียม ซึ่งให้สีเหลืองและเหลืองเข้ม (กลางและขวา)



รูป 4b ขอบสีเหลืองและส้ม (color rim) ที่ปรากฏ ตรงกลางไต ที่ผ่านการเผาแบบแพรวเบอริลเลียม



รูปที่ 5a กลุ่มพลอยบางกะจะ น้ำหนัก 1.7 - 2.7 กะรัต ก่อนเผา (ซ้าย)
และหลังเผาแบบธรรมดา (ขวา) พลอยใสขึ้นสีน้ำตาลจางลง



ก่อนเผา



หลังเผาแบบแพร์เบอร์ริลเลียม

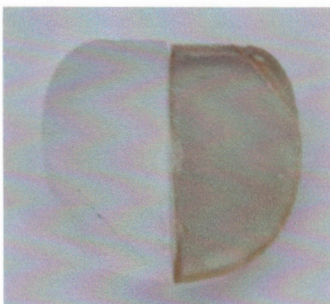


ก่อนเผา



หลังเผาแบบแพร์เบอร์ริลเลียม

รูปที่ 5b กลุ่มพลอยบางกะจะ น้ำหนัก 1.7 - 2.7 กะรัต ก่อนเผา (ซ้าย)
และหลังเผาแบบแพร์เบอร์ริลเลียม (ขวา)



รูปที่ 6 พลอยสังเคราะห์ชนิด Flame Fusion ไม่มีสี (ก่อน
เผา) และพลอยเผาแบบแพร์เบอร์ริลเลียม สีน้ำตาลอมส้ม

ตาราง 2 ปริมาณธาตุมลทินที่พบในตัวอย่างพลอยจากแหล่งต่าง ๆ

ตัวอย่างพลอย	องค์ประกอบธาตุมลทิน %wt			
	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	MgO
แซปไฟร์ อิลลาากา มาดากัสการ์ กลุ่มไม่เผา เผาธรรมชาติ เผาแบบแพร่เบอร์ริลเลียม	0.14 – 0.43	0.01 - 0.02	.02 - .06	bdl-0.35
แซปไฟร์ อิลลาากา มาดากัสการ์ ที่ผ่านการเผาแบบแพร่เบอร์ริลเลียม สีชมพู สีส้ม ถึงส้มเหลือง และสีเหลือง	0.09 – 0.96	0.01 – 0.19	.02 - .09	bdl - .67
ทับทิมของเจีย แทนซาเนีย กลุ่มไม่เผา เผาธรรมชาติ เผาแบบแพร่เบอร์ริลเลียม	0.59 – 1.07	0.08 – 0.74	.02 - .08	bdl - .92
แซปไฟร์ของเจีย แทนซาเนีย กลุ่มไม่เผา เผาธรรมชาติ เผาแบบแพร่เบอร์ริลเลียม	0.66 – 2.74	.004 – 0.14	.03 - .12	bdl - .86
แซปไฟร์จากบางกะจะ กลุ่มไม่เผา เผาธรรมชาติ เผาแบบแพร่เบอร์ริลเลียม	.970 – 1.73	.003 - .020	.02-.12	bdl - .24
พลอยสังเคราะห์แบบ Flame Fusion	.03	.001*	.01*	0.12*

bdl = below detection limit

* ค่าใกล้ detection limit

2) กลุ่มตัวอย่างพลอยที่ได้ผ่านการเผาด้วยเบอร์ริลเลียม (สีชมพู สีส้มถึงส้มอมเหลือง และสีเหลือง)

กลุ่มตัวอย่างที่นำมาวัด EDXRF 45 ตัวอย่าง ปริมาณเหล็กมากกว่าโครเมียม ในทุกตัวอย่างที่วัด ช่วงความเข้มข้นค่า MgO : bdl – 0.67%wt (bdl= 10 ตัวอย่าง) ค่า TiO₂ อยู่ในช่วง .02 - .08 %wt และอัตราส่วนของ Mg/Ti มีค่ามากกว่า 1 ในทุกตัวอย่าง (ยกเว้น 10 ตัวอย่างที่คำนวณค่าไม่ได้)

ของเจีย แทนซาเนีย

1) กลุ่มตัวอย่างพลอยทับทิมของเจีย แทนซาเนีย

ทำการสุ่มตัวอย่างในแต่ละกลุ่ม มาวัด EDXRF 41 ตัวอย่าง ปริมาณเหล็กมากกว่าโครเมียมในทุกตัวอย่าง ช่วงความเข้มข้นค่า MgO bdl – 0.92 %wt (bdl 10 ตัวอย่าง) ค่า

TiO₂ อยู่ในช่วง .02 - .08 %wt และอัตราส่วนของ Mg/Ti มีค่ามากกว่า 1 ในทุกตัวอย่าง (ยกเว้น 10 ค่าที่คำนวณไม่ได้)

2) กลุ่มตัวอย่างแชปไฟร์ของเจีย แทนซาเนีย

ทำการสุ่มตัวอย่างในแต่ละกลุ่ม วัดองค์ประกอบธาตุโดย EDXRF จำนวน 26 ตัวอย่าง พบปริมาณเหล็กมากกว่าโครเมียม ในทุกตัวอย่าง ช่วงความเข้มข้นค่า MgO bdl – 0.86 %wt (bdl 6 ตัวอย่าง) ค่า TiO₂ อยู่ในช่วง .03 - .12 %wt และอัตราส่วนของ Mg/Ti มีค่ามากกว่า 1 ในทุกตัวอย่าง (ยกเว้น 6 ค่าที่คำนวณไม่ได้)

แชปไฟร์ไทย บางกะจะ

กลุ่มตัวอย่างพลอยก่อนเผา มีสีเขียวเข้ม-น้ำเงิน-น้ำตาล จะเปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผา เเผาแบบธรรมดา 8 ชั่วโมง จำนวน 10 ตัวอย่าง และเปรียบเทียบระหว่างไม่เผา กับเผาแพร่เบอริลเลียม 8 ชั่วโมง จำนวน 25 ตัวอย่าง เวลาที่ใช้ยังเผาไม่สมบูรณ์ ซึ่งมีพลอยจำนวนหนึ่งใน 25 ตัวอย่าง เปลี่ยนเป็นเหลือง – เขียว อีกจำนวนหนึ่งมีสีน้ำตาลเขียว โดยมากแถบสีน้ำตาลจะจางลงมาก ดังรูป 5b

กลุ่มตัวอย่างที่วัด EDXRF 32 ตัวอย่าง ปริมาณเหล็กมากกว่าโครเมียมมาก ในทุกตัวอย่าง ช่วงความเข้มข้นค่า MgO bdl – 0.35%wt (bdl 7 ตัวอย่าง) ค่า TiO₂ อยู่ในช่วง .01 - .12 %wt และอัตราส่วนของ Mg/Ti มีค่ามากกว่า 1 ในทุกตัวอย่าง (ยกเว้นค่าที่คำนวณไม่ได้)

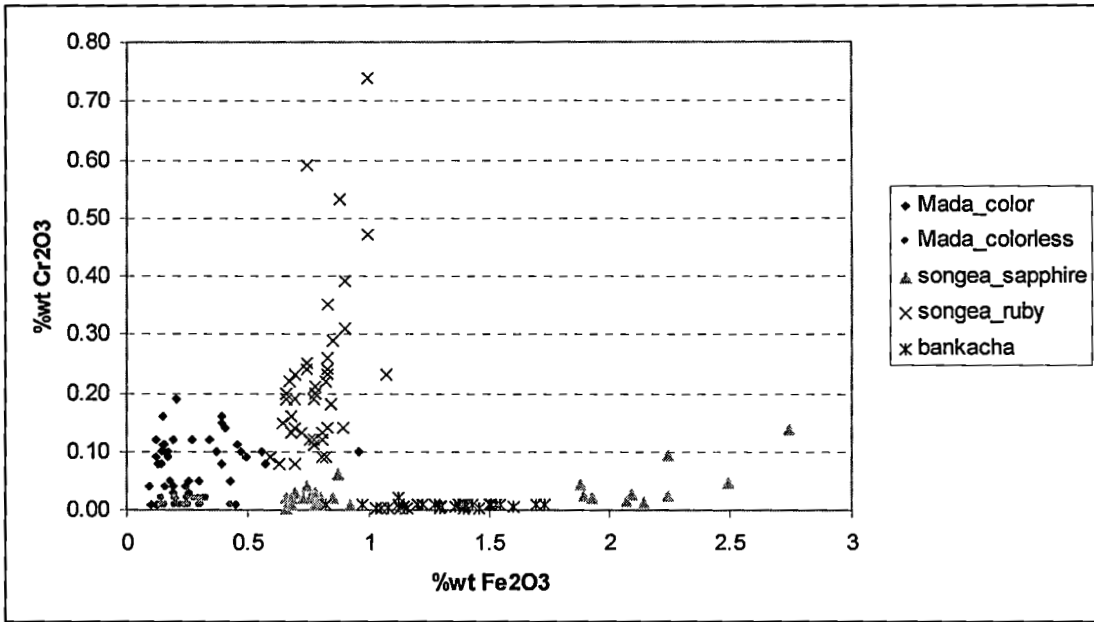
เมื่อพลอตหาความสัมพันธ์ของเหล็กและโครเมียม ของพลอยกลุ่มไม่เผา เเผาธรรมดา เเผาแบบแพร่เบอริลเลียม ของพลอยแหล่งต่าง ๆ ดังรูปที่ 7 และพลอตอัตราส่วนเหล็กต่อโครเมียม ของพลอยแต่ละเม็ดดังแสดงในรูป 8

3. ผลการศึกษาการดูดกลืนรังสีของพลอยทับทิมและแชปไฟร์ก่อนเผาและหลังเผา ดังต่อไปนี้ และการกำหนดตำแหน่งพีค อ้างตามตาราง 3

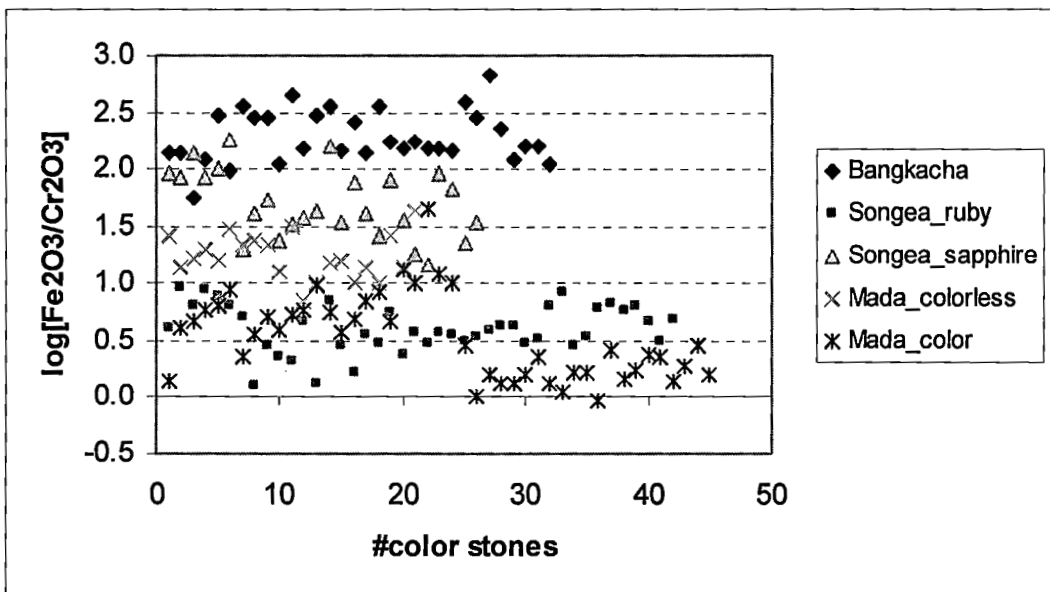
อิลลาากา มาดากัสการ์

กลุ่มแชปไฟร์(ไม่มีสีและใกล้ไร้สี)

ตัวอย่างของแต่ละกลุ่ม (กลุ่มไม่เผา เเผาธรรมดา เเผาแบบแพร่เบอริลเลียม) กลุ่มละ 20 ตัวอย่าง นำมาวัดสเปคตรา กลุ่มพลอยแหล่งอิลลาากา มาดากัสการ์ เริ่มต้นไม่มีสี และใกล้ไร้สีของพลอยสีชมพูอ่อน ฟ้ำและเขียวอ่อนบ้าง เมื่อเผาแบบธรรมดา สีเดิมเข้มข้น และพลอยใสขึ้น ลักษณะเส้นสเปคตรัมเหมือนกับพลอยกลุ่มไม่เผา(รูปที่ 9 เส้น1-3) การดูดกลืนสเปคตรัมที่ตำแหน่งพีค 450 และหรือ 388 และหรือ 377 nm ซึ่งที่ 388 nm เป็น single Fe³⁺ ion, แถบการดูดกลืนที่ 377 และ 450 nm ถูกกำหนดเป็น Fe³⁺ /Fe³⁺ ion pairs (Ferguson and Fielding, 1971, 1972; Krebs and Maisch, 1971) พีคอ่อน ๆ ที่ช่วง 550 – 570 nm (Fe²⁺-Ti⁴⁺) เป็น



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์เหล็กและโครเมียมของพลอยแหล่งมาดากัสการ์ ซองเจีย และบางกะจะ



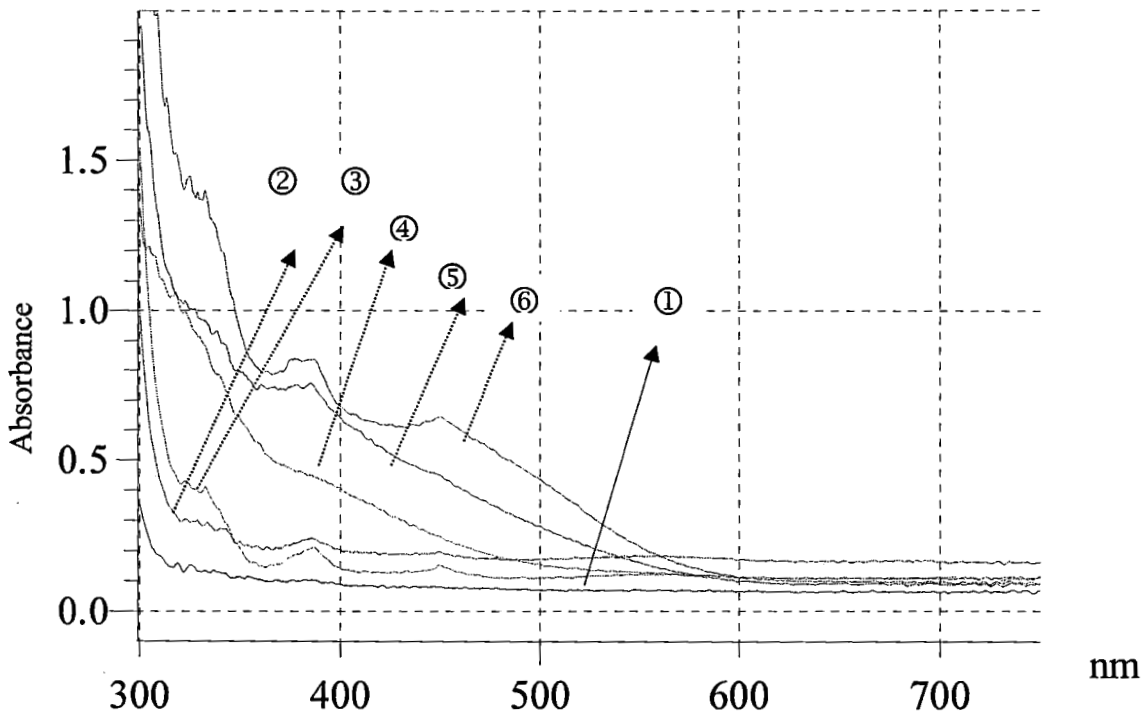
รูปที่ 8 การกระจายตัวของอัตราส่วนของ $\log[\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Cr}_2\text{O}_3]$ ของพลอยแต่ละเม็ด (กลุ่มไม่เผาเผาธรรมชาติ เผาแบบแพร่เบอร์ิลเลียม) จากแหล่งมาดากัสการ์ ซองเจีย และบางกะจะ

ตาราง 3 ความยาวคลื่นสูงสุดที่สมนัยกับองค์ประกอบธาตุที่ให้สี (Themelis, 1992., Schmetzer and Schwarz, 2004)

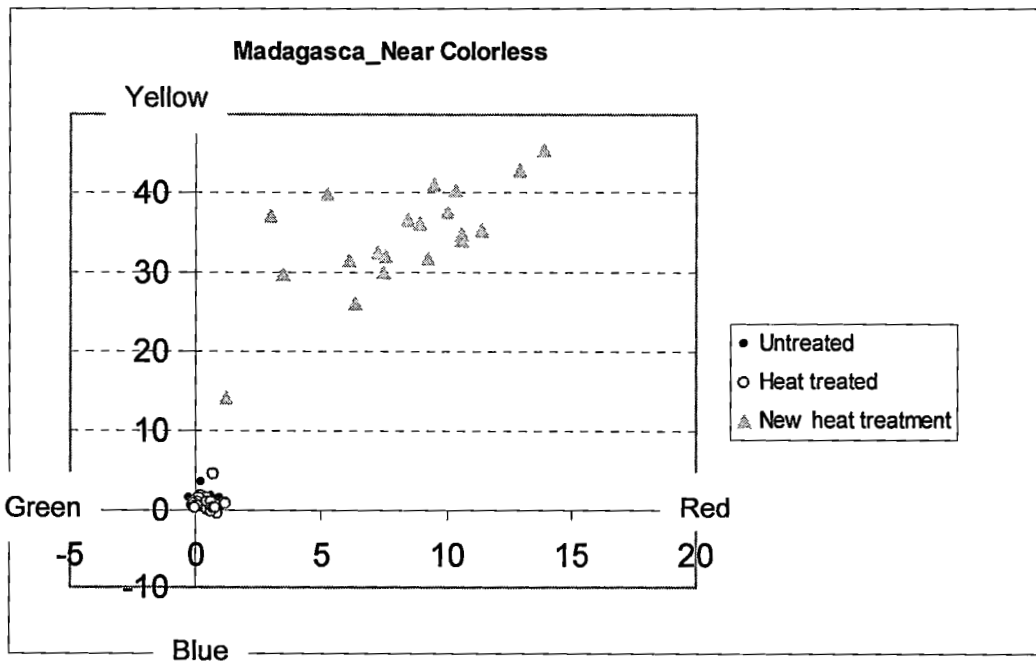
ความยาวคลื่นที่พิกสูงสุด(nm)	สาเหตุการเกิดสี
699, 697	Fe^{2+} / Ti^{4+}
693/694	Cr^{3+}
565	Fe^{2+} / Ti^{4+}
565	Fe^{2+} / Ti^{4+}
693/694	Cr^{3+}
565	Fe^{2+} / Ti^{4+}
693/694	Cr^{3+}
565	Cr^{3+}
565	Cr^{3+}
565	Fe^{3+} / Fe^{3+}
603/694	Cr^{3+}
397	Cr^{3+}
693/694	Cr^{3+}
374/377,376	Fe^{3+} / Fe^{3+}

สาเหตุเห็นเป็นสีเขียวอ่อน ๆ และสีฟ้า พลอยไม่มีสีให้เส้นสเปกตรัมที่ไม่ปรากฏตำแหน่งพิกของสารให้สี(เส้น 1 ของรูปที่ 9) แต่เมื่อเผาแบบแพร์เบอร์ริเดียม พลอยทั้งหมดเปลี่ยนเป็นสีเหลืองและสีเหลืองเข้ม สเปกตรัมดังแสดงในรูปที่ 9 (เส้น 4,5,6) ลักษณะเส้นที่ยกตัวขึ้นจากประมาณที่ความยาวคลื่น 600 nm ขึ้นไป บางเส้นมีการปรากฏของพิกเหล็กที่ 450 nm และหรือที่ 377 และหรือที่ 388 nm(เส้น 5,6) ซึ่งเป็นองค์ประกอบธาตุเหล็ก

การวัดสีและความสว่างของพลอยโดยเครื่อง UV-VIS-NIR spectrophotometer (Hitachi Model U-4100) ผลการวัดสีและความสว่างของพลอยทั้ง 3 กลุ่มแสดงในระบบ C.I.E. L^*, a^*, b^* ที่สัมพันธ์กับสเปกตราราดูดกลืน (รูปที่ 10) ซึ่งกลุ่มไม่เผา และเผาแบบธรรมดา อยู่ใกล้ (0,0) แสดงใกล้ไม่มีสี พลอยที่ผ่านการเผาแบบแพร์เบอร์ริเดียม ค่า a^*, b^* ในทิศทางเครื่องหมายบวก ซึ่งเป็นสีผสมของเหลืองและแดง ซึ่งค่าของ b^* มากกว่า a^* สอดคล้องกับตัวอย่างพลอยที่มีสีเหลือง และเหลืองเข้ม



รูปที่ 9 ตัวอย่างสเปกตรัมดูดกลืนของกลุ่มพลอยมาดากัสการ์ไม่มีสีและเกือบไร้สี พลอยไม่เผา (①②) เเผาแบบธรรมดา (③) และเผาแบบแพร่เบอร์ริลเลียม (เส้น④⑤⑥) ให้พลอยสีเหลืองและเหลืองเข้ม ตำแหน่งพีคที่ 377, 388 และ 450 nm ของ Fe^{3+} และ Fe^{3+}/Fe^{3+}



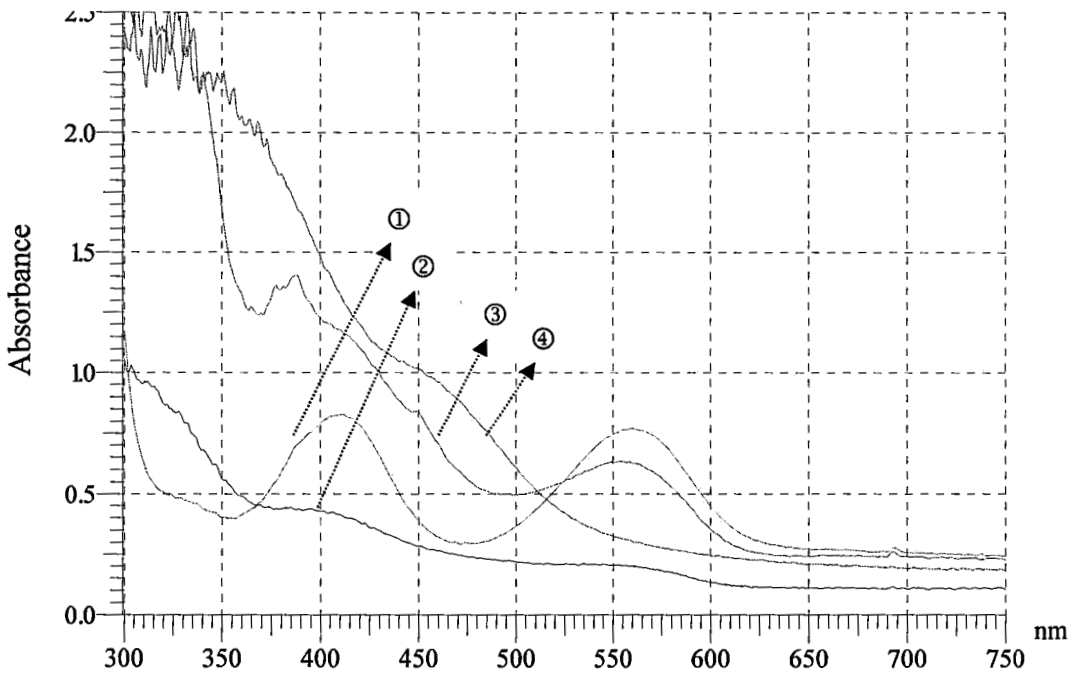
รูปที่ 10 CIE $L^*a^*b^*$ index ของกลุ่มพลอยมาดากัสการ์ไม่เผา(●), เเผาธรรมดา(○), เเผาแบบแพร่เบอร์ริลเลียม(△) (แกน $x = a^*$, แกน $y = b^*$)

แชปไฟร์อิไลลาจากาที่ผ่านการเผาแบบแพร่เบอร์ลิเดียม

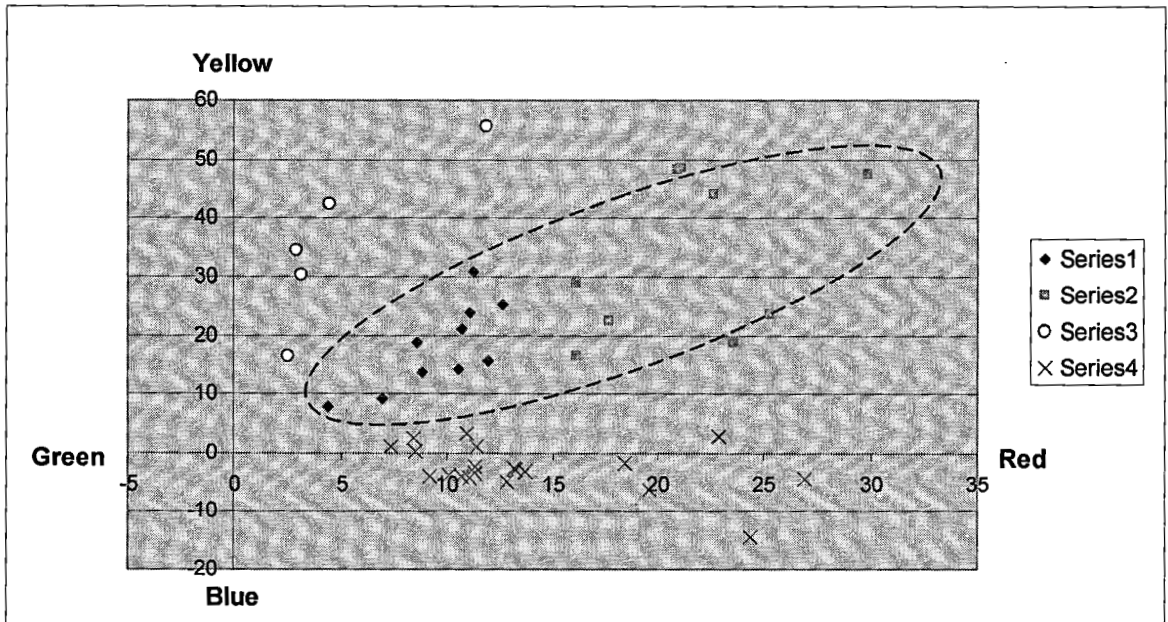
แชปไฟร์ที่ผ่านการเผาแบบแพร่เบอร์ลิเดียม แสดงช่วงของสีค่อนข้างกว้าง สีชมพู สีส้ม ถึงส้มอมเหลืองที่มีเขตสีต่าง ๆ กัน และสีเหลือง (รูป 3 a) สเปกตรัมแชปไฟร์อิไลลาจากาแสดง พิคดูดกลืนที่ 556 และ 410 nm ของ Cr^{3+} (สีชมพู รูปที่ 11 เส้น 1) และมีตำแหน่งพิค 559 nm ของ ($\text{Fe}^{2+} - \text{Ti}^{4+}$) ที่ซ้อนทับตำแหน่งพิค Cr^{3+} ที่ 556 nm พलयปรากฏเป็นสีชมพูติดม่วง เล็กน้อย เส้นสเปกตรัมพิคดูดกลืนของ Cr^{3+} และ พิคที่ 450, 388, 377 nm ของ $\text{Fe}^{3+} / \text{Fe}^{3+}, \text{Fe}^{3+}$ ที่ความเข้มข้นปริมาณต่าง ๆ ให้สีของแชปไฟร์ สีส้มถึงส้มอมเหลือง อัตราส่วนของ Fe : Cr มี ผลให้เขตสีต่าง ๆ (รูปที่ 11 เส้น 2,3) และแถบดูดกลืน(รูปที่ 11 เส้น 4) เส้นที่ยกตัวขึ้นจาก ประมาณ 600 nm ขึ้นไป การดูดกลืนเพิ่มสูงเข้าไปในย่านอุลตราไวโอเล็ต ให้สีเหลือง สาเหตุ จากศูนย์กลางสี

แม้ยังไม่เข้าใจชัดเจน ในกรณีนี้ น่าจะเกี่ยวข้องกับมลทินเบอร์ลิเดียมเป็นตัวก่อเกิด (initiated) point defects ในผลึกแชปไฟร์ (Mohapatra and Kröger, 1977; Moon and Phillips, 1994) ฉะนั้นสเปกตรัมดูดกลืนสามารถอธิบายการผสมผสานของ แถบดูดกลืน ของอัตราส่วนเหล็กต่อโครเมียมกับ color center สีเหลืองที่เสถียร รูปที่ 13 เปรียบเทียบความ เหมือนของเส้นสเปกตราที่แสดงลักษณะสาเหตุการเกิดสีเนื่องจากศูนย์กลางสีของพलयสี เหลืองแหล่งมาดากัสการ์ที่ผ่านการเผาแบบแพร่เบอร์ลิเดียม

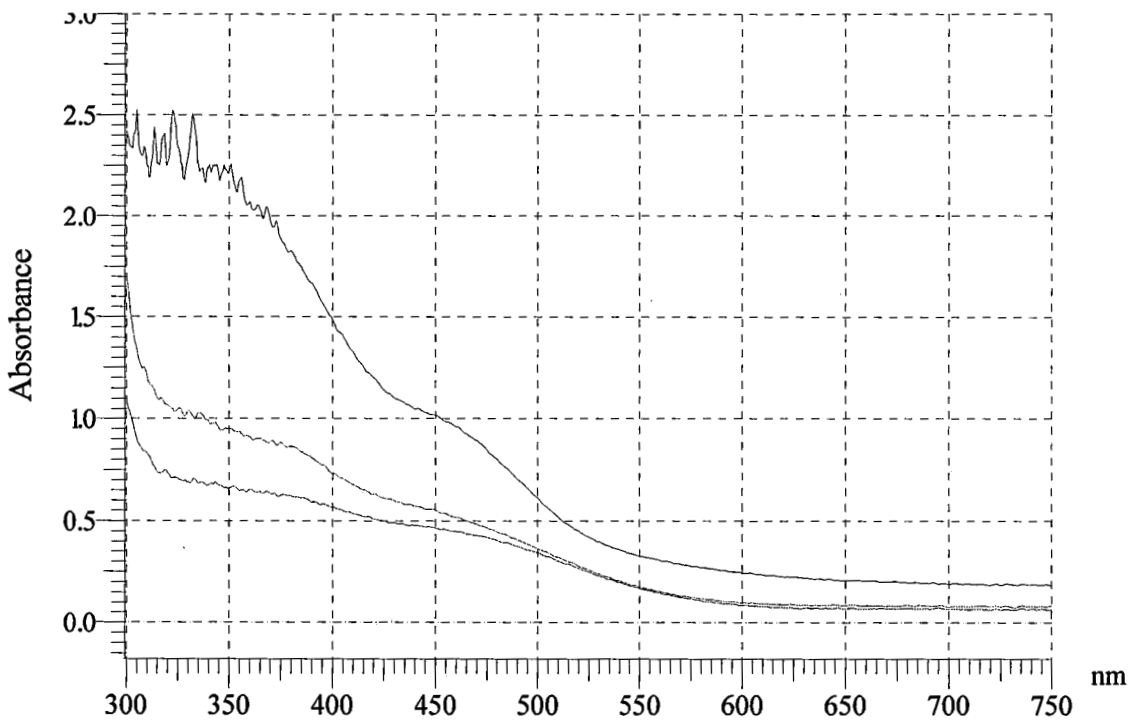
ผลการวัดสีและความสว่างของพलयทั้ง 3 กลุ่มดังแสดงในระบบ C.I.E. L^*, a^*, b^* ที่ สัมพันธ์กับสเปกตราดูดกลืน ดังแสดงในรูป 12



รูปที่ 11 สเปกตรากการดูดกลืนของแชปไฟร์ที่เผาแบบแพร่เบอร์ิลเลียม จากแหล่งพลอยอิลากา มาดากัสการ์ ตำแหน่งพีกดูดกลืนของ Cr^{3+} และ $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ (เส้น①) พลอยสีชมพู, ตำแหน่งพีกดูดกลืนของ Cr^{3+} ผสมกับพีกของเหล็กที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ กัน ให้สีส้มถึงส้มเหลือง (เส้น ② และ ③), เส้นสเปคตรัม (④) แสดงการยกตัวขึ้นสูงการดูดกลืนเข้าไปในย่านอุลตราไวโอเลต สีเหลืองที่เกิดจาก ศูนย์กลางสี



รูปที่ 12 CIE $L^*a^*b^*$ index ของกลุ่มพลอยมาดากัสการ์ ที่ผ่านการเผาแบบแพร่เบอร์ิลเลียม สีชมพู(x) สีส้มถึงส้มอมเหลือง (*, °) และสีเหลือง(O)



รูปที่ 13 เปรียบเทียบสเปกตราดูดกลืนฟลอยด์สีเหลืองแหล่งอิลาจากา มาดากัสการ์ ที่ผ่านการเผาแบบแพร์เบอร์ลิเดียม (เส้นบนสุด) และสองเส้นล่างมาจากการเผาแบบแพร์เบอร์ลิเดียมของฟลอย มาดากัสการ์เกือบไร้สี

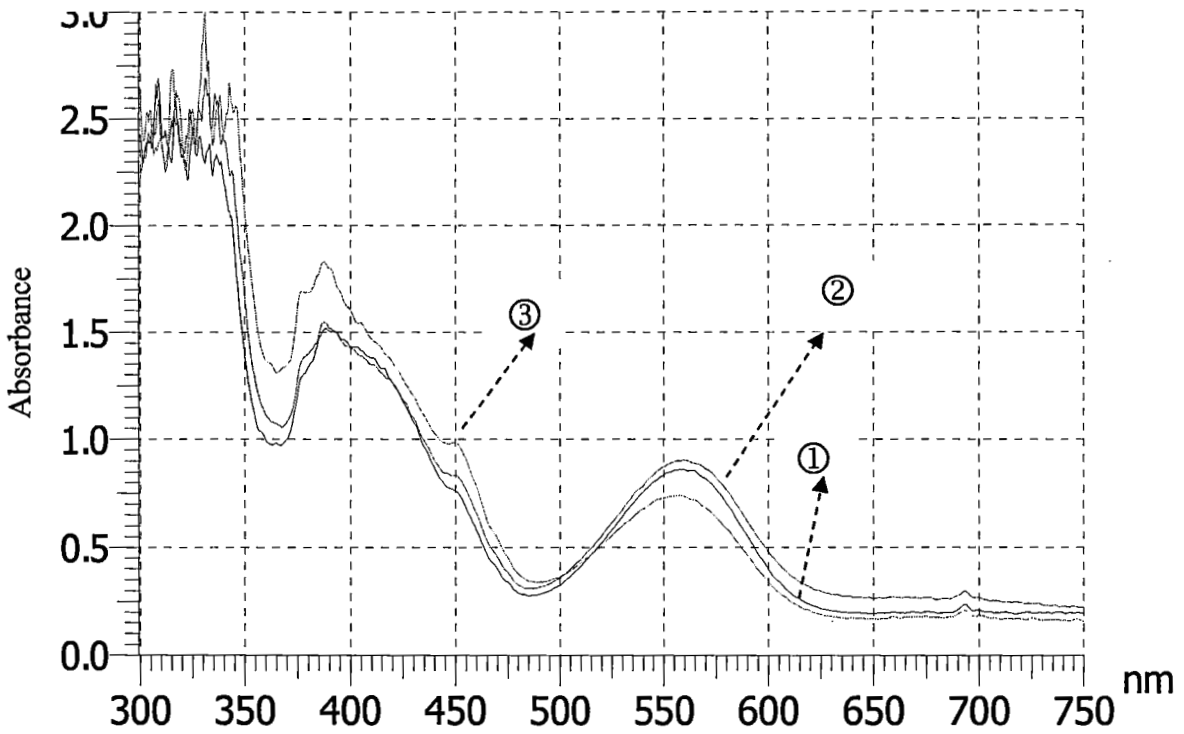
ของเจีย แทนซาเนีย

ทับทิมของเจีย ก่อนเผาสีแดงคล้ำ สีม่วงถึงไวโอเล็ต แดงน้ำตาล ตัวอย่างสเปกตราดูดกลืนฟลอย 3 กลุ่ม ดังรูปที่ 14 ประกอบด้วยสเปกตราดูดกลืนของโครเมียม ซ้อนทับกับ $Fe^{2+} - Ti^{4+}$ ช่วง 500 - 600 nm องค์ประกอบสีน้ำเงินที่ลดลงเมื่อเผาในสภาวะออกซิไดซิงค์ มีสเปกตราดูดกลืนของเหล็ก Fe^{3+} ปรากฏในตัวอย่างส่วนมาก เมื่อเผาแบบแพร์เบอร์ลิเดียม ฟลอยสีขึ้น องค์ประกอบสีน้ำเงินลดลงอย่างนัยสำคัญ และสีเหลืองจะปรากฏชัดเจนมากขึ้นในตัวฟลอย

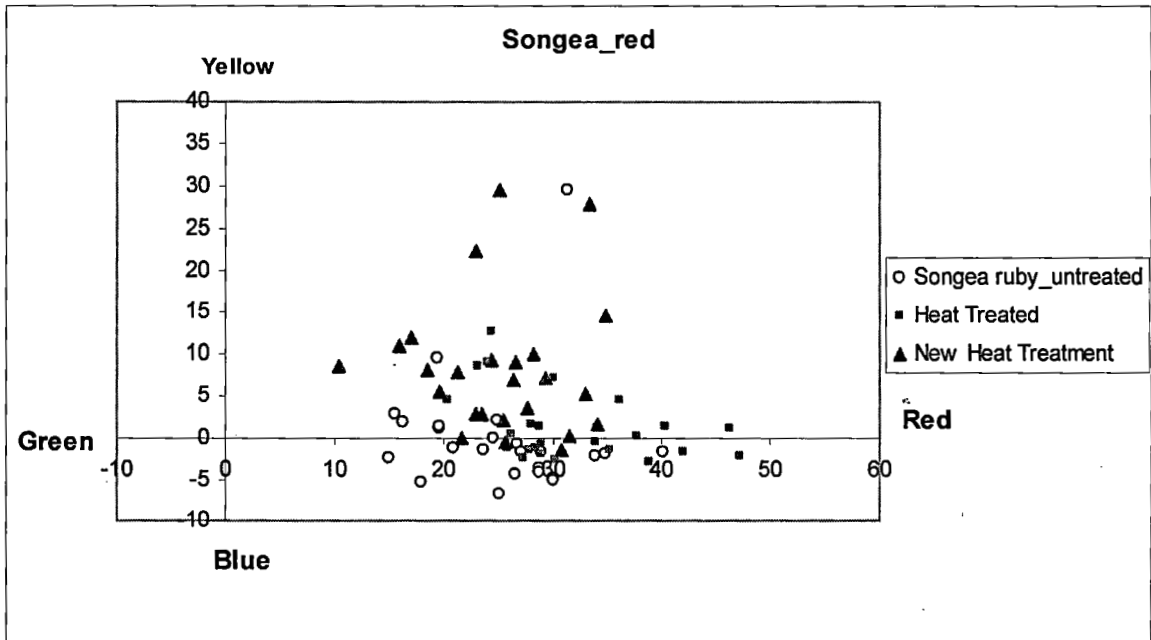
ผลการวัดสีและความสว่างของฟลอยทั้ง 3 กลุ่ม ดังแสดงในระบบ C.I.E. L^*, a^*, b^* ที่สัมพันธ์กับสเปกตราดูดกลืน(รูป 15) ฟลอยกลุ่มไม่เผา ค่า a^* เครื่องหมายเป็นลบ ปนสีน้ำเงิน กลุ่มเผาแบบธรรมดา โดยเฉลี่ยค่าความสว่าง L^* เพิ่มขึ้น ฟลอยสีขึ้น ฟลอยกลุ่มที่เผาแบบแพร์เบอร์ลิเดียม ส่วนมากค่า a^*, b^* เครื่องหมายเป็นบวก เป็นส่วนผสมของแดงและเหลือง จากรูป 3c, 3d เห็นว่าสีที่เห็นแกนกลางใต้ แต่สีอยู่ที่ขอบ และมักเห็นจุดสีน้ำเงินของ ($Ti^{4+} + Fe^{2+}$)

838.278
 ๐๖/๘/๑
 ก.ป

25 15 4 2



รูปที่ 14 สเปกตรากการดูดกลืนของทับทิมแหล่งของเจีย ประกอบด้วยสเปกตราดูดกลืน Cr^{3+} ผสมกับสีน้ำเงิน ($\text{Fe}^{2+} + \text{Ti}^{4+}$) และ Fe^{3+} ปริมาณต่าง ๆ ก่อนเผาคือเส้น ② เผาแบบธรรมดาคือเส้น①และเผาแบบแพร่เบอร์ิลเลียม③



รูปที่ 15 พลอยทับทิมกลุ่มไม่เผา (◊) ติดสีน้ำเงินเป็นส่วนมาก หลังเผาธรรมดา (◻) สีน้ำเงินจะลดลงบ้าง สำหรับพลอยเผาแบบแพร่เบอร์ิลเลียม (▲) พลอยส่วนมากจะให้สีแดงอมเหลือง

แซปไฟร์ของเจีย ที่เริ่มด้วยเขียวอ่อน เมื่อเผาแบบธรรมดา สเปกตราดังแสดงในรูป 16 สีเดิมเข้มขึ้นและพลอยใสขึ้น จะเห็นว่าลักษณะสเปกตราเหมือนกับพลอยไม่เผา รูป 16 และเผาแบบแพร์เบอร์ิลเลียมจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองและเหลืองเข้ม เส้นสเปกตรัมแสดงการยกตัวขึ้นที่ 600 nm และมีพีคเหล็กผสม แสดงว่า สีมาจากศูนย์กลางสี สีเหลือง ที่เสถียรผสมกับพีคเหล็ก ซึ่งในพลอยกลุ่มนี้ไม่พบสเปกตราที่ลักษณะเดียวกับพลอยแหล่งอิลลาากาการ์ กล่าวคือมีพีคของเหล็กปนอยู่ด้วย

สีเขียวอ่อนมาจากการผสมของ Fe^{3+}/Fe^{3+} เหลืองกับปริมาณเล็กน้อยของ $Fe^{2+}-Ti^{4+}$ สีน้ำเงิน อัตราส่วนสัมพัทธ์ของการดูดกลืน 450 nm ของเหล็ก กับช่วง (500 – 600) nm (รูป 16 เส้น b) ซึ่งถ้า การดูดกลืน 450 nm แรงกว่า การดูดกลืนในช่วง (500 – 600) nm $Fe^{2+}-Ti^{4+}$ จะปรากฏสีเหลือง และถ้า ตรงข้ามจะมีสีจากเหลืองเป็นสีเขียว

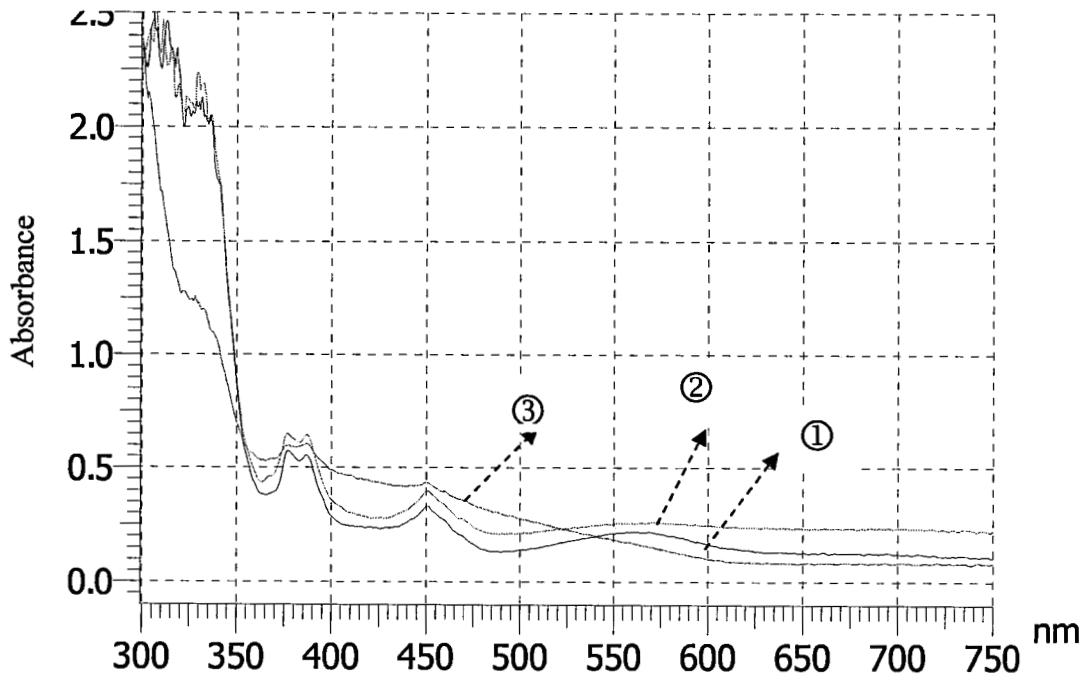
การเผาแบบแพร์เบอร์ิลเลียม เป็นการลดของพีค $Fe^{2+}-Ti^{4+}$ สีน้ำเงิน สาเหตุการเกิดสีเนื่องจาก ศูนย์กลางสี กับการลดลงของสีน้ำเงิน ให้สีเหลืองที่ผสมกับสีแดงเป็นสีแดงทับทิมของเจียซึ่งมักจะอมเหลือง

ผลการวัดสีและความสว่างของพลอยทั้ง 3 กลุ่ม ดังแสดงในระบบ C.I.E. L^*,a^*,b^* ที่สัมพันธ์กับสเปกตราดูดกลืน ดังแสดงในรูป 17

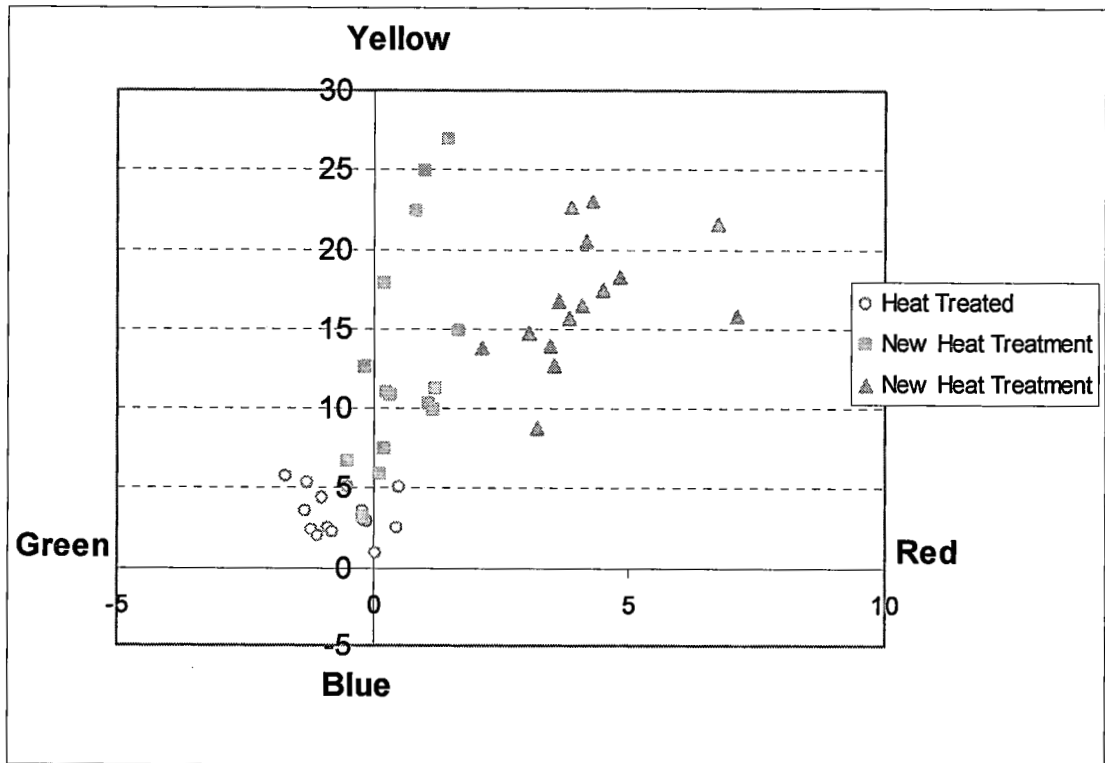
แซปไฟร์ไทย บางกะจะ

เมื่อเปรียบเทียบสเปกตรัมพลอยเม็ดเดียวกันก่อนเผาและเผาแบบธรรมดาแสดงในรูปที่ 18 เปรียบเทียบก่อนเผาและเผาแบบแพร์เบอร์ิลเลียม พลอยใสขึ้น สีน้ำตาลจะหายไป (รูปอินคลูชันที่ 55 และ 56) การเผาในบรรยากาศออกซิเดชัน รูไทล์ละลายให้ Ti^{4+} ในสารละลายของแข็งให้สีน้ำเงิน-เขียว (greenish blue) ชนิดพลอยที่มีความเข้มข้นของเหล็กสูง จะปรากฏแถบการดูดกลืนที่กว้างของ Fe^{2+}/Fe^{3+} (รูปที่ 21) ศูนย์กลางที่ประมาณความยาวคลื่น 875 nm (Ferguson and Fielding, 1971, 1972) และแถบดูดกลืน 560 nm สีน้ำเงินให้สีเขียว น้ำเงิน พลอยที่เผาแบบแพร์เบอร์ิลเลียม(รูปที่ 19, 20) ให้สีเขียว-เหลือง แถบดูดกลืน 560, 875 nm ลดหายไป เหลือแต่สเปกตราดูดกลืนของเหล็กที่เข้มข้นให้สีเหลือง การเผาแบบธรรมดา โอกาสให้เหลืองเป็นไปได้ยาก

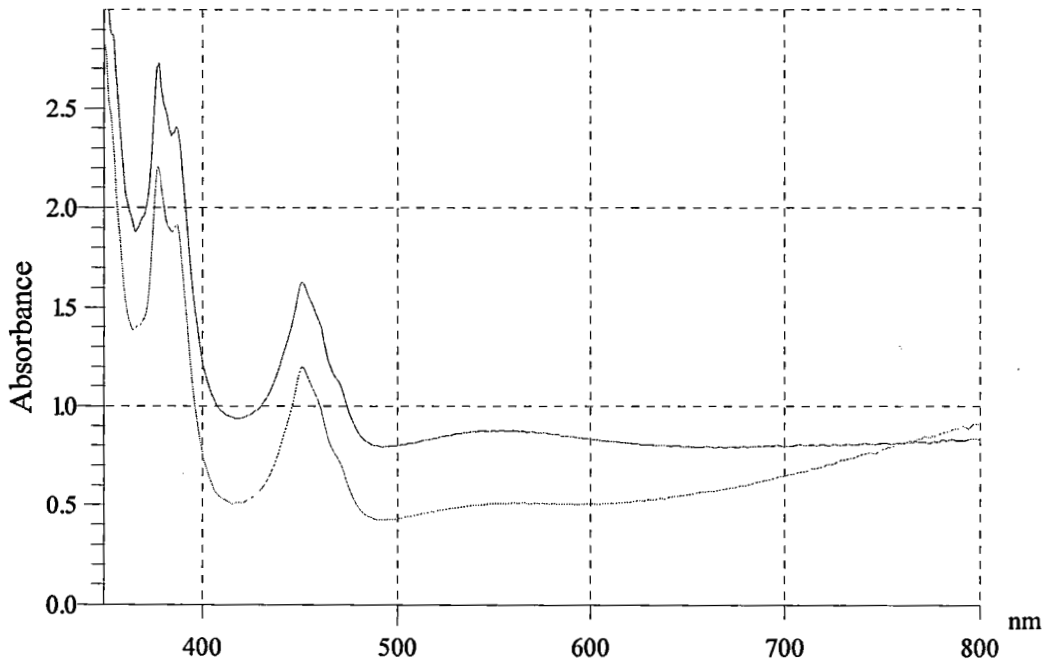
ผลการวัดสีและความสว่างของพลอยทั้ง 3 กลุ่มดังแสดงในระบบ C.I.E. L^*,a^*,b^* ที่ สัมพันธ์กับสเปกตราดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 21



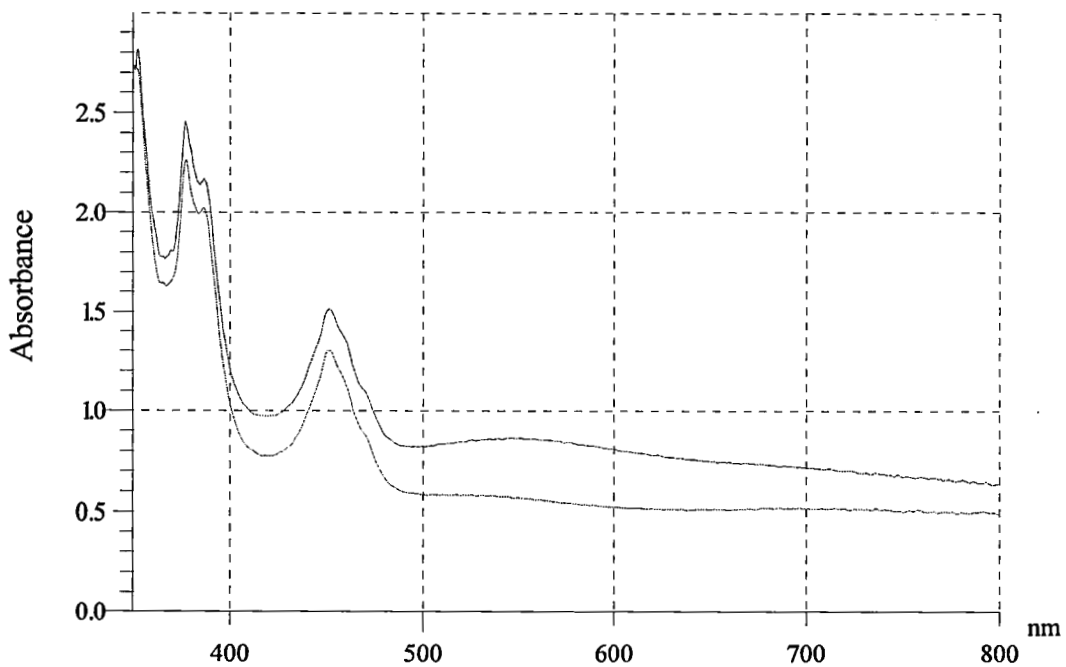
รูปที่ 16 สเปกตรากการดูดกลืนของแซปไฟร์แหล่งของเจียที่ไม่เผา (①) เผาธรรมดา (②) และเผาแบบแพร์เบอริลเลียม ให้สีเหลืองและเหลืองเข้ม (③)



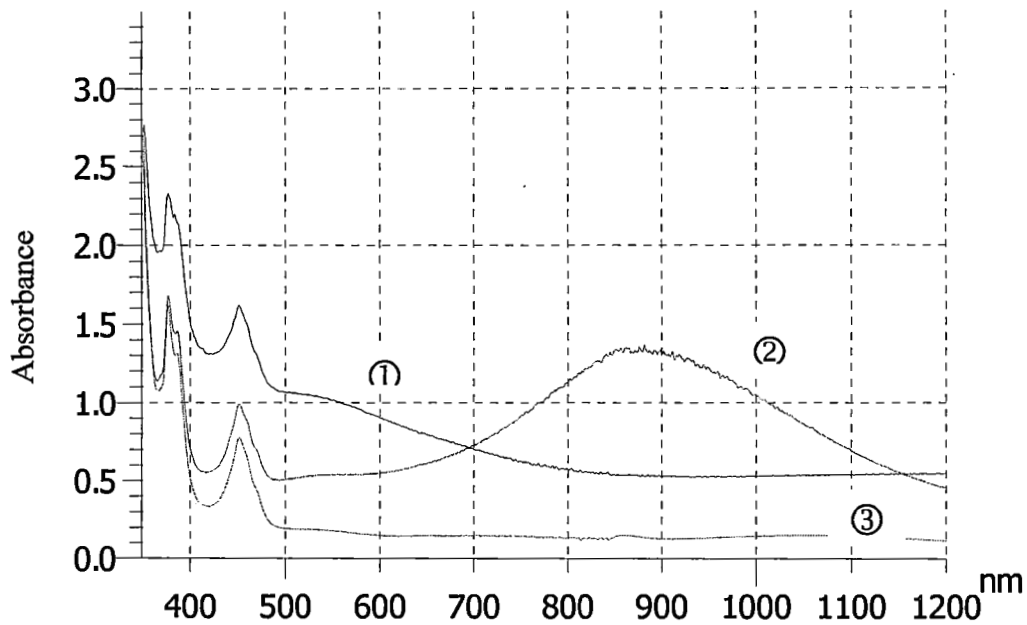
รูปที่ 17 พลอยแซปไฟร์ของเจียสีเขียวอ่อน กลุ่มเผาแบบธรรมดา (○) เผาแบบแพร์เบอริลเลียม (▪, ▲)



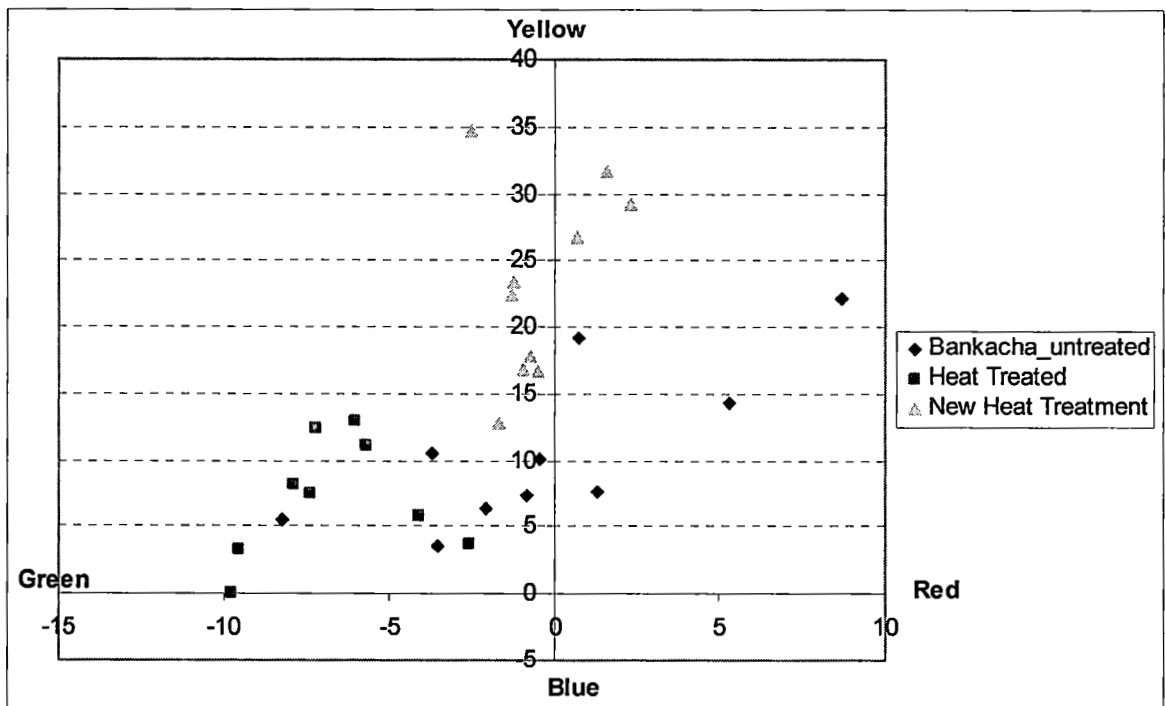
รูปที่ 18 สเปกตรากการดูดกลืนของแชปไฟร์บางกะจะ พลอยไม่เผา (เส้นบน) และเผาแบบธรรมดา (เส้นล่าง)



รูปที่ 19 สเปกตรากการดูดกลืนของแชปไฟร์บางกะจะ พลอยไม่เผา (เส้นบน) และเผาแบบแพร่เบอร์ริเยียม (เส้นล่าง) แถบดูดกลืนของ Fe^{2+}/Ti^{4+} เกือบหายไปหมด ดังนั้น จึงไม่ปรากฏในพลอยที่ผ่านการเผาแบบแพร่เบอร์ริลเลียม

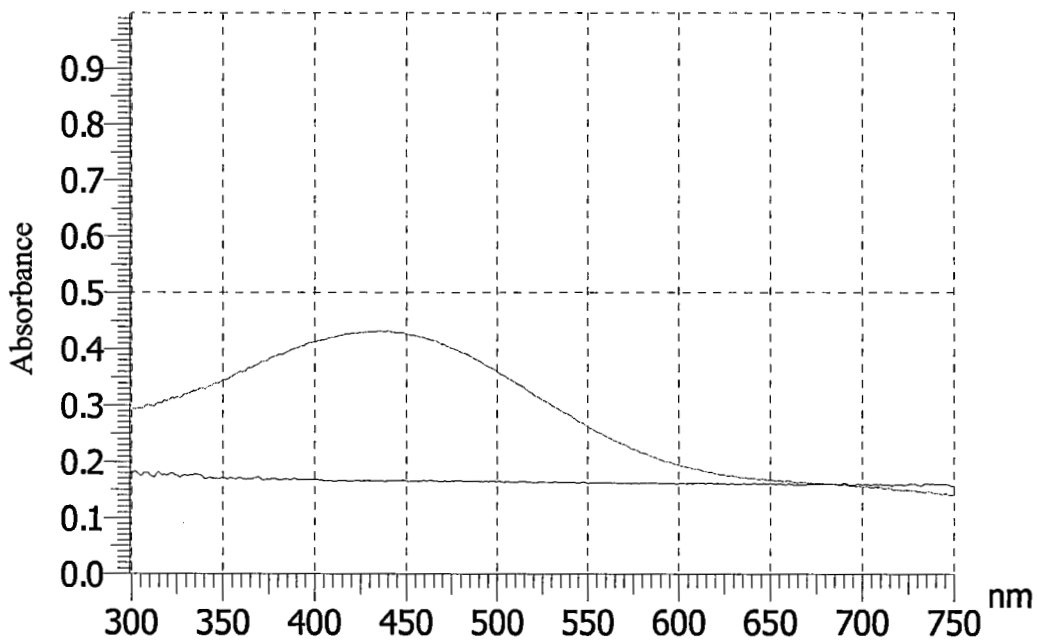


รูปที่ 20 สเปกตรัมพลอยบางกะจะ พลอยไม่เผา① แสดงตำแหน่งพีก Fe^{3+} (450, 388, 377 nm) พีกของ $Fe^{2+} - Ti^{4+}$ (560 nm) หลังการเผาแบบธรรมดา②เป็นสีเขียว สีน้ำตาลหายไป ตำแหน่งพีก 875 nm ที่เกิดการถ่ายโอนประจุ $Fe^{2+} - Fe^{3+}$ ที่แสดงถึงตัวอย่างที่เกิดกับแร่ที่มีเหล็กมาก เส้นสเปกตรัม③การเผาแบบแพร่เบอร์ลิเดียม ซึ่งพีก (560,875 nm)ลดหายไป ทำให้พลอยเป็นสีเหลือง



รูปที่ 21 พลอยแซปไฟร์บางกะจะ ไม่เผา(♦) เผาธรรมดา(■) และเผาแบบแพร่เบอร์ลิเดียม(▲)

ผลการเผาแบบธรรมดา และเผาแบบแพร่เบอร์ิลเลียมของพลอยสังเคราะห์ สเปคตราก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 22 พีคสูงสุดที่ 435 nm ให้สีน้ำตาลอมส้ม (รูปที่ 6)



รูปที่ 22 สเปคตรากของพลอยสังเคราะห์ชนิด Flame Fusion ที่เผาแบบธรรมดา (เส้นล่าง) ไม่มีสี และเผาแบบแพร่เบอร์ิลเลียมพีคสูงสุดที่ 435 nm สีน้ำตาลอมส้ม

ผลทางสเปคโตรสโคปี สัมพันธ์กับข้อมูลองค์ประกอบเคมีของตัวอย่าง อัตราส่วน $\log[\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Cr}_2\text{O}_3]$ ที่น้อยกว่า 0.5 โดยประมาณจะให้สีชมพู กลุ่มที่ค่า $\log[\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Cr}_2\text{O}_3]$ ไม่มากไปกว่า 1.0 โดยประมาณ จะมีสีเหลืองของเหล็กผสมด้วยอัตราส่วนต่าง ๆ ทำให้ได้พลอยสีชมพูอมส้ม อมเหลือง และกลุ่มที่ $\log[\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Cr}_2\text{O}_3]$ มากกว่า 1 จะให้สีเหลือง

4. ชนิดของตำหนิ (inclusions) ในตัวอย่างพลอย

จากการสังเกตตำหนิภายในที่เกิดขึ้นในพลอยหลังการเผาแบบธรรมดา และการเผาแบบแพร่เบอร์ิลเลียม พบว่าตำหนิภายในที่เกิดขึ้นมีลักษณะเดียวกัน ดังนั้นจึงไม่สามารถแยกพลอยทั้ง 2 ประเภทออกจากกันได้ด้วยตำหนิภายใน ยกเว้นสีที่เกิดขึ้นที่บริเวณขอบพลอย (Color rim) ที่เกิดขึ้นในพลอยหลังการเผาแบบแพร่เบอร์ิลเลียม ซึ่งก็ไม่เสมอไป เพราะถ้าเผาเวลายานานขึ้น ให้โอกาสการแพร่เข้าไปได้เต็มเม็ดพลอย

ลักษณะภายในและชนิดของตำหนิที่พบในพลอยคอร์ันดัมสรุปได้ดังนี้

1. ตำหนิภายในพลอยอิลากากา ที่ผ่านการเผาแบบแพร่เบอร์ริลเดียว รูปที่ 1-12

1. กลุ่มผลึกแร่ที่มีลักษณะเป็นแท่ง กำลังขยาย 10 เท่า
2. ตำหนิ 2 สถานะ เป็นของเหลวซึ่งมีฟองอากาศอยู่ภายใน กำลังขยาย 20 เท่า
3. ตำหนิของเหลว กำลังขยาย 40 เท่า
4. ผลึกแร่ (Zircon?) ลักษณะเป็นชุก สีขาวขุ่น กำลังขยาย 20 เท่า
5. ตำหนิเส้นเข็มที่เริ่มสลายตัว กำลังขยาย 20 เท่า
6. ตำหนิฝุ่น ส่วนมากจะพบในพลอยที่ผ่านการเผาด้วยความร้อนสูง กำลังขยาย 20 เท่า
7. ผลึกแร่ (Zircon?) สีขาวขุ่นซึ่งเกิดการบิดเบี้ยว และมีฟองอากาศอยู่ภายใน กำลังขยาย 40 เท่า
8. ผลึกแร่ (Zircon?) ที่เกิดการบิดเบี้ยวเนื่องจากการเผาด้วยความร้อนสูง กำลังขยาย 30 เท่า
9. ลักษณะของเส้นเข็มที่เริ่มเกิดการสลายตัว กำลังขยาย 40 เท่า
10. ลักษณะของรอยแตกที่มีการตกผลึกใหม่จากของเหลวที่เคยมีอยู่ภายใน กำลังขยาย 10 เท่า
11. ผลึกแร่ที่ถูกล้อมรอบด้วยตำหนิฝุ่น กำลังขยาย 20 เท่า
12. กลุ่มของตำหนิเส้นเข็มที่เริ่มเกิดการสลายตัว กำลังขยาย 20 เท่า

2. ตำหนิภายในพลอยมาดากัสการ์

ก่อนเผา รูปที่ 13-17

13. ผลึกแร่ และเส้นเข็ม กำลังขยาย 35 เท่า
14. กลุ่มผลึกแร่ (Zircon?) ที่ยังแสดงรูปร่างของผลึกบางส่วนอยู่ กำลังขยาย 50 เท่า
15. ผลึกแร่สีน้ำตาลที่มีรอยแตกล้อมรอบ กำลังขยาย 60 เท่า
16. แร่ที่มีลักษณะเป็นแท่งยาว กำลังขยาย 10 เท่า
17. ตำหนิของเหลวรูปรอยนิ้วมือ กำลังขยาย 50 เท่า

หลังเผาแบบธรรมดา รูปที่ 18-24

18. ตำหนิของเหลวรูปรอยนิ้วมือ กำลังขยาย 30 เท่า
19. กลุ่มของตำหนิเส้นเข็มที่เริ่มสลายตัว กำลังขยาย 20 เท่า
20. กลุ่มของผลึกแร่ (Zircon?) และตำหนิเส้นเข็มที่เริ่มสลายตัว กำลังขยาย 35 เท่า
21. กลุ่มของรอยแตกที่ของเหลวภายในมีการตกผลึกใหม่ กำลังขยาย 35 เท่า
22. แร่ที่เกิดการตกผลึกใหม่ในตำหนิรอยนิ้วมือ กำลังขยาย 25 เท่า
23. ลักษณะของการตกผลึกใหม่ของแร่ในรอยแตกของพลอย กำลังขยาย 46 เท่า
24. กลุ่มของผลึกที่มีฟองอากาศ (Zircon?) ที่เกิดการบิดเบี้ยวเนื่องจากได้รับความร้อนสูง กำลังขยาย 40 เท่า

หลังเผาแบบแพร่เบอริลเลียม รูปที่ 25-30

กลุ่มของผลึก (Zircon?) สีขาวขุ่นที่มีฟองอากาศอยู่ภายใน กำลังขยาย 30 เท่า

25. ลักษณะของเส้นเข็มที่เริ่มสลายตัว กำลังขยาย 30 เท่า
26. แร่ที่เกิดการตกผลึกใหม่ในรอยแตก กำลังขยาย 44 เท่า
27. ผลึกกวางที่ถูกล้อมรอบด้วยตำหนิของเหลวรูปรอยนิ้วมือ กำลังขยาย 50 เท่า
28. ผลึกลักษณะกลมมนเกิดจากการได้รับความร้อนสูง กำลังขยาย 40 เท่า
29. กลุ่มของผลึกที่มีฟองอากาศ (Zircon?) มีสีขาวยุ่น เกิดการบิดเบี้ยวเนื่องจากได้รับความร้อนสูง กำลังขยาย 40 เท่า

3. ตำหนิภายในแซปไฟร์ของเจีย แทนซาเนีย

ก่อนเผา รูปที่ 31-36

30. กลุ่มผลึกแร่ที่มีรูปร่างค่อนข้างสมบูรณ์ในพลอยดิบ กำลังขยาย 30 เท่า
31. ผลึกแร่สีน้ำตาลดำล้อมรอบด้วยรอยแตก กำลังขยาย 40 เท่า
32. กลุ่มเส้นไหม Rutile สีน้ำตาลแดง กำลังขยาย 40 เท่า
33. กลุ่มเส้นไหม Rutile กำลังขยาย 20 เท่า
34. ตำหนิเส้นเข็มก่อนการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน กำลังขยาย 40 เท่า
35. ผลึกแร่สีน้ำตาลแดง (Rutile?) ซึ่งพบมากในพลอยของเจีย กำลังขยาย 40 เท่า

หลังเผาแบบธรรมดา รูปที่ 37-40

36. กลุ่มผลึก (Rutile?) ที่ล้อมรอบด้วยสีน้ำเงิน กำลังขยาย 40 เท่า
37. ผลึกกวางล้อมรอบด้วยของเหลวรูปรอยนิ้วมือ กำลังขยาย 40 เท่า
38. ผลึกล้อมรอบด้วยตำหนิของเหลว กำลังขยาย 40 เท่า
39. ลักษณะของแร่ที่เกิดการตกผลึกใหม่เป็นแนวเส้นตรง กำลังขยาย 40 เท่า

หลังเผาแบบแพร่เบอริลเลียม รูปที่ 41-44

ผลึกแร่สีขาวยุ่นล้อมรอบด้วยตำหนิของเหลวรูปรอยนิ้วมือ กำลังขยาย 40 เท่า

40. ผลึกแร่สีเข้มล้อมรอบด้วยตำหนิของเหลวรูปรอยนิ้วมือ กำลังขยาย 40 เท่า
41. ผลึกแร่ (Rutile?) ลักษณะกลมมนล้อมรอบด้วยสีน้ำเงิน กำลังขยาย 40 เท่า
42. กลุ่มของผลึกแร่ (Rutile?) ที่มีสีน้ำเงินล้อมรอบ กำลังขยาย 30 เท่า

4. ตำหนิภายในทับทิมของเจีย

ก่อนเผา รูปที่ 45-48

43. ผลึกแร่สีน้ำตาลเข้ม กำลังขยาย 10 เท่า
44. กลุ่มตำหนิเส้นเข็ม กำลังขยาย 30 เท่า
45. ผลึกแร่สีเข้ม และเส้นเข็มที่เริ่มสลายตัว กำลังขยาย 50 เท่า

46. กลุ่มผลึกแร่ใสไม่มีสี รูปร่างค่อนข้างสมบุรณ์ กำลังขยาย 20 เท่า

หลังเผาแบบธรรมดา รูปที่ 49-51

47. ผลึกแร่ (Rutile?) ลักษณะกลมมน มีสีน้ำตาลอมรอบ กำลังขยาย 30 เท่า

48. ตำหนิของเหลวรูปรอยนิ้วมือ กำลังขยาย 30 เท่า

49. ตำหนิของเหลว กำลังขยาย 25 เท่า

หลังเผาแบบแพร่เบอริลเลียม รูปที่ 50-52

50. ตำหนิของเหลวสีขาวขุ่น กำลังขยาย 20 เท่า

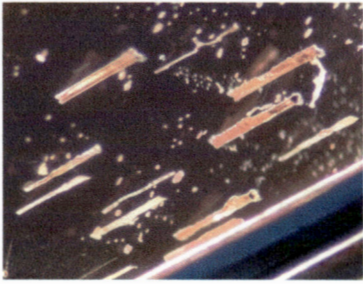
51. ผลึกแร่ (Rutile?) มีสีน้ำตาลอมรอบ กำลังขยาย 30 เท่า

52. ลักษณะการสลายตัวของเส้นเข็ม และตำหนิรอยนิ้วมือ กำลังขยาย 30 เท่า

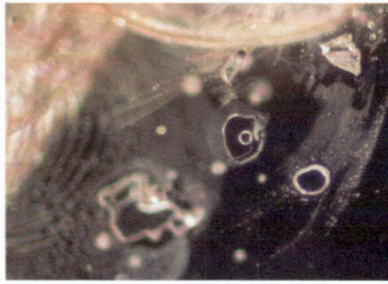
5. พลอยบางกะจะ รูปที่ 53-54

53. ภาพเปรียบเทียบแสดงการเปลี่ยนแปลงหลังจากการเผาพลอยเขียวบางกะจะแบบธรรมดา แถบสีน้ำตาลเข้มของพลอยด้านซ้ายก่อนการเผา เปลี่ยนเป็นแถบสีน้ำตาลหลังจากการเผา ในรูปด้านขวา กำลังขยาย 10 เท่า ในสารละลายเมธิลีนไอโอดีน (methylene iodide)

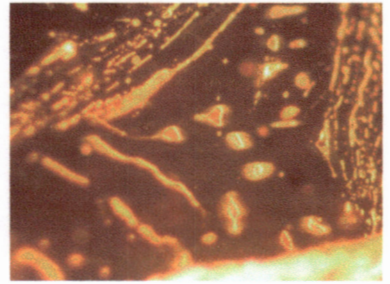
54. ภาพเปรียบเทียบแสดงการเปลี่ยนแปลงหลังจากการเผาพลอยเขียวบางกะจะเมื่อเผาแบบแพร่เบอริลเลียม แถบสีน้ำตาลเข้มของพลอยก่อนการเผาด้านซ้าย เปลี่ยนเป็นสีเหลืองหลังจากการเผาในรูปด้านขวา กำลังขยาย 10 เท่า ในสารละลายเมธิลีนไอโอดีน



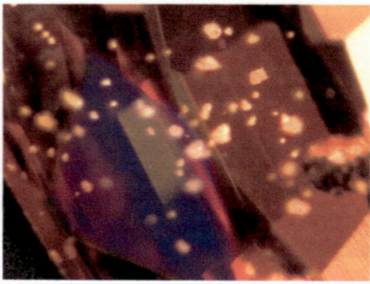
1



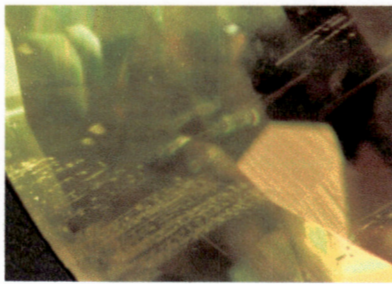
2



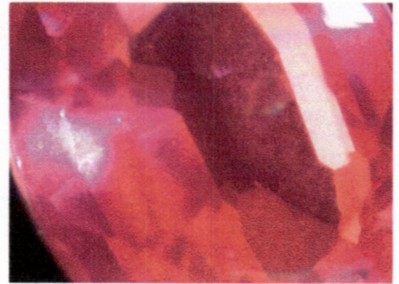
3



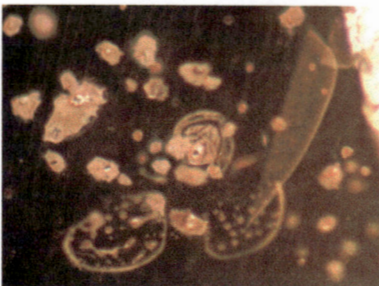
4



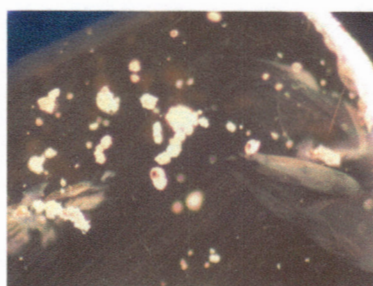
5



6



7



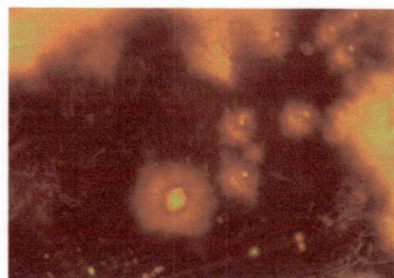
8



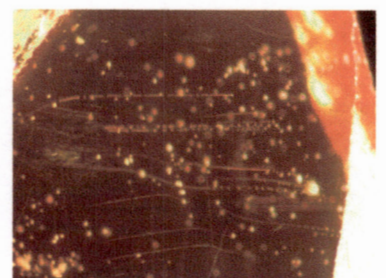
9



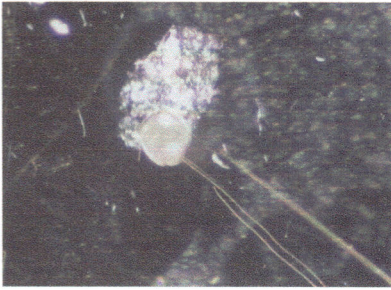
10



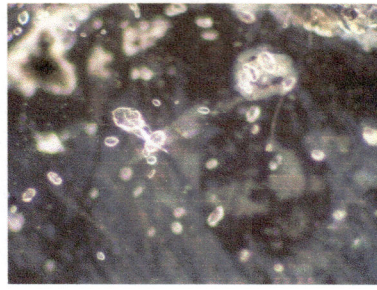
11



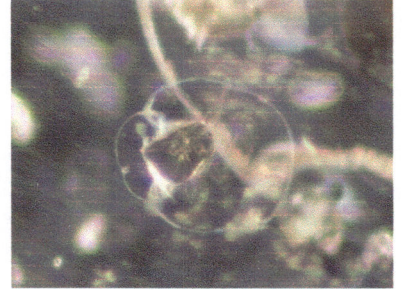
12



13



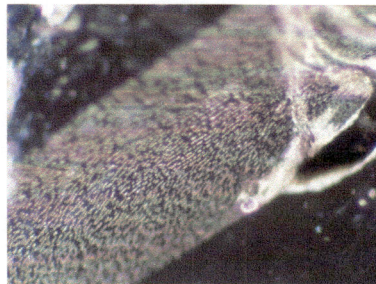
14



15



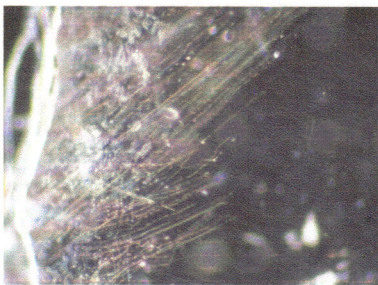
16



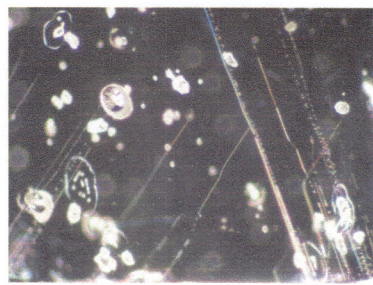
17



18



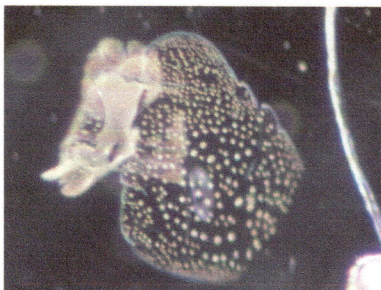
19



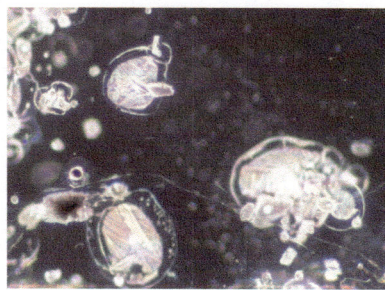
20



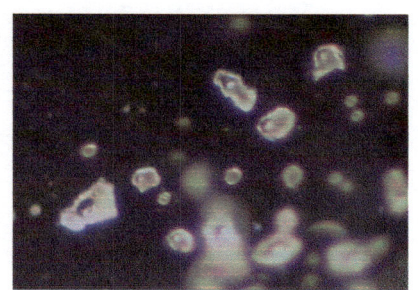
21



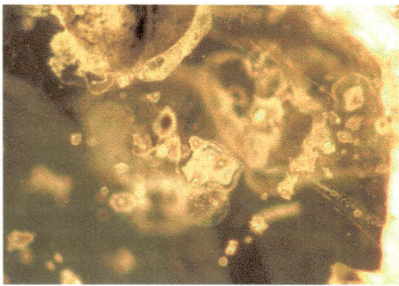
22



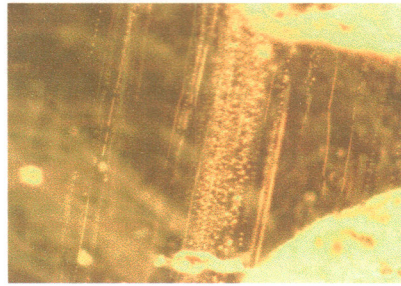
23



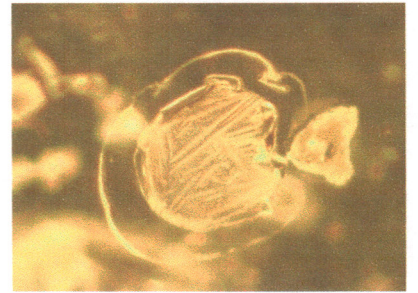
24



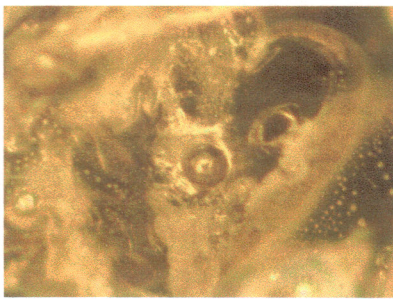
25



26



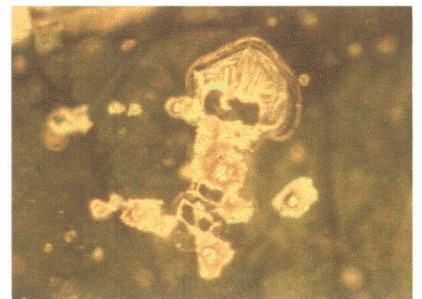
27



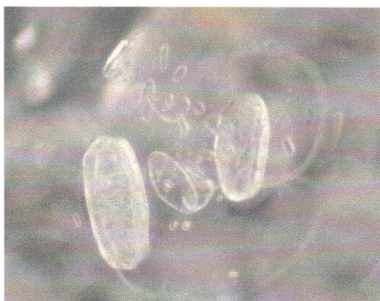
28



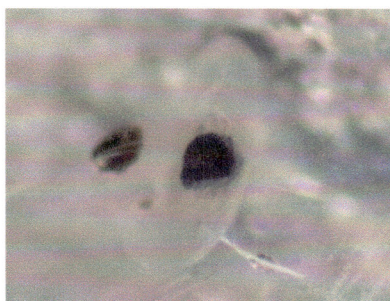
29



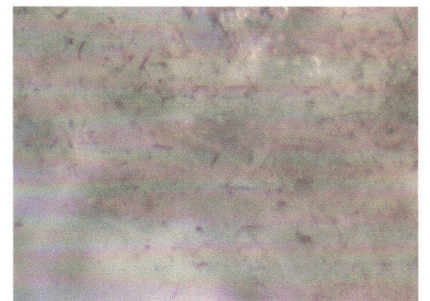
30



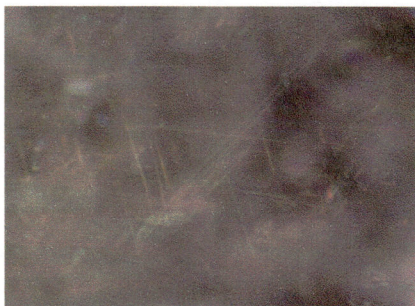
31



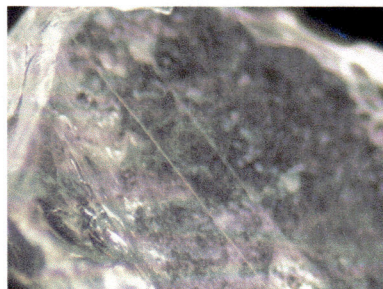
32



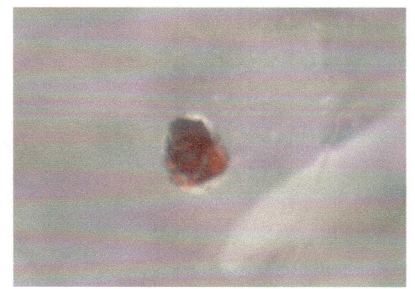
33



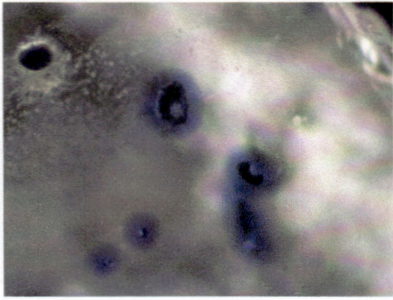
34



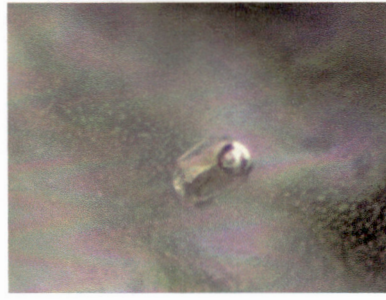
35



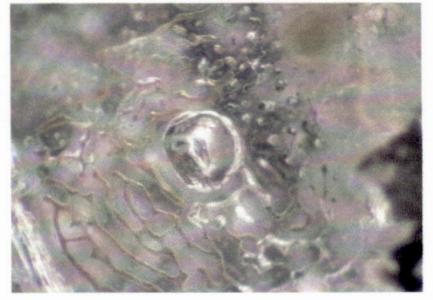
36



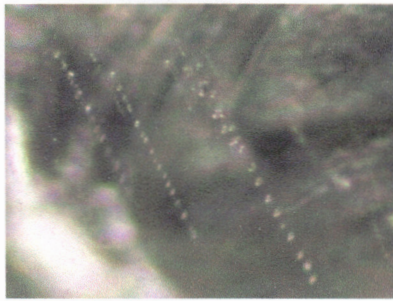
37



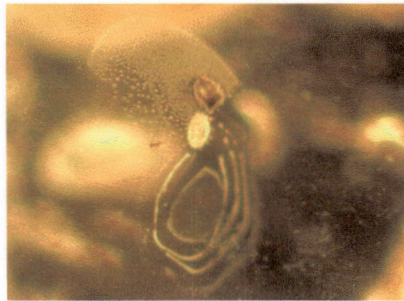
38



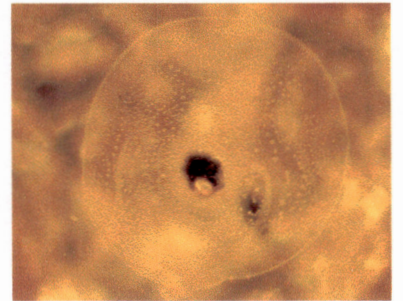
39



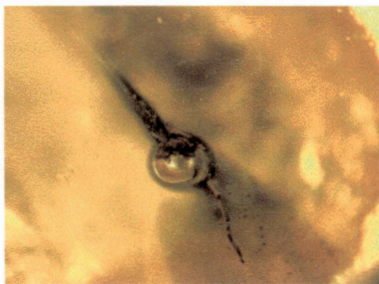
40



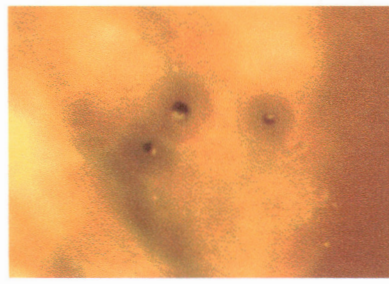
41



42



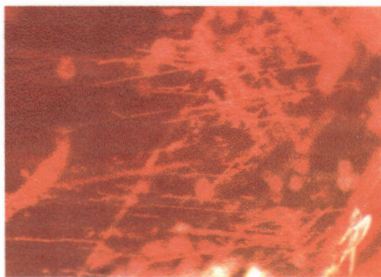
43



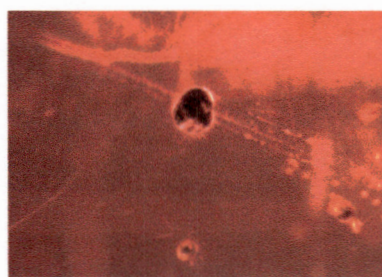
44



45



46



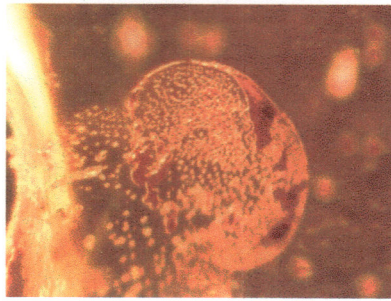
47



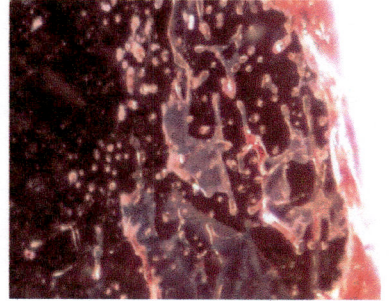
48



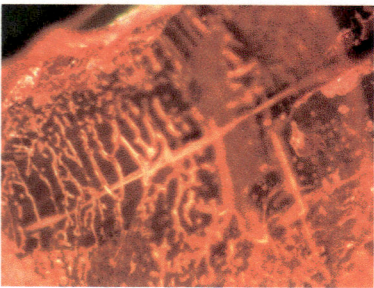
49



50



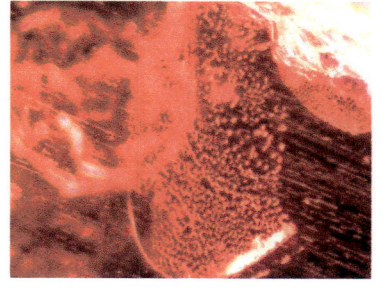
51



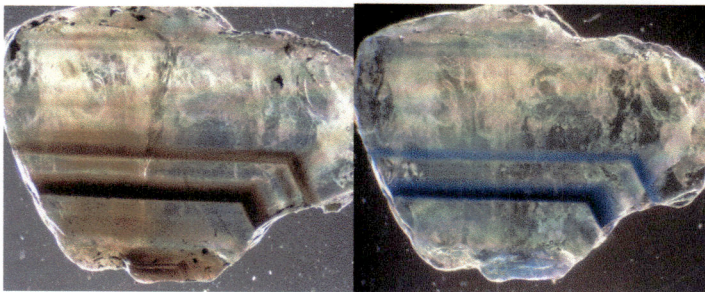
52



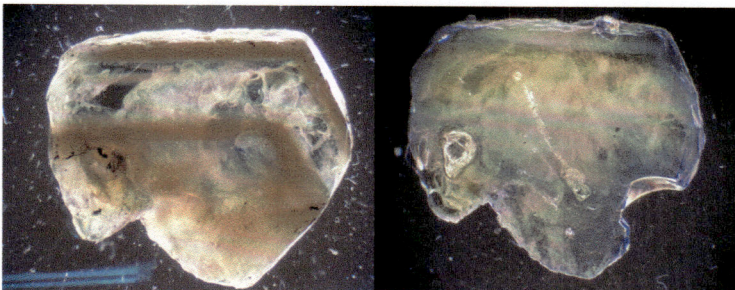
53



54



55



56

บทสรุป

ผลการทดลอง ของตัวอย่างพลอยจากแหล่งอิลลาากา ซองเจีย และบางกะจะ พบว่าทุกตัวอย่างมีองค์ประกอบของเหล็ก เมื่อพิจารณาองค์ประกอบเหล็กและโครเมียม(รูป 7) พบว่า พลอยแหล่งอิลลาากา มาดากัสการ์ ช่วงปริมาณของ %wt Fe_2O_3 , Cr_2O_3 จะแคบกว่าของแหล่งของเจีย และพลอยบางกะจะมีปริมาณเหล็กสูง จากการทดลอง พลอยที่เหมาะสมในการนำมาปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาแบบแพร่เบอร์ิลเลียม คือพลอยแหล่งอิลลาากา มาดากัสการ์ ซึ่งให้สีที่สวยงาม แม้แต่พลอยที่ไม่มีสี ก็สามารถให้สีเหลืองได้ สำหรับพลอยบางกะจะ ซึ่งมีปริมาณเหล็กค่อนข้างสูง ผลสัมฤทธิ์ไม่ดี กล่าวคือ ต้องใช้เวลายาวนานกว่ามาก

เป็นที่ทราบกันดีว่าสีของพลอยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบธาตุมลทิน(Nassau, 1994) ในการศึกษาครั้งนี้พบว่า อัตราส่วนของเหล็กกับโครเมียมมีผลกับสีที่ปรากฏ ถ้าค่า $\log[Fe_2O_3/Cr_2O_3]$ มีค่าลบนั้นหมายความว่าโครเมียมมากกว่าเหล็ก ดังนั้นพลอยมีสีชมพูถึงแดง พิจารณาในรูป 8 อัตราส่วน $\log[Fe_2O_3/Cr_2O_3]$ ไม่เกิน 0.5 โดยประมาณ ก็ให้สีชมพูถึงแดง แดงอมเหลืองได้ ถ้าค่าอยู่ในช่วง 0.5 - 1 โดยประมาณ จะให้สีส้มถึงสีส้มอมเหลือง ถ้าค่ามากกว่า 1 ให้สีเหลือง ทั้งนี้พลอยก่อนที่ไม่มีสี แต่มีสัดส่วนขององค์ประกอบเหล็กและโครเมียมเหมาะสมรออยู่ นำมาเผาแบบแพร่เบอร์ิลเลียมก็จะให้สีสำหรับทับทิมของเจีย ค่อนข้างดีเหลือง เพราะอัตราส่วนของเหล็กต่อโครเมียมที่สูงกว่าทับทิมแหล่งอื่น

ผลการเปรียบเทียบสีของการเผาแบบธรรมดาและเผาแบบแพร่เบอร์ิลเลียมในสภาวะเดียวกันที่ได้สรุปไว้ในตาราง 1 สีพลอยที่ได้จากการเผาแบบแพร่เบอร์ิลเลียม ซึ่งสีที่ถูกดัดแปลงสอดคล้องกับการทำนายของ Emmett ,et al.,(2004) กล่าวคือ พลอยตั้งต้นเกือบไม่มีสี สีเขียวอ่อน จะให้สีเหลือง พลอยที่มีโครเมียมปน ทับทิมของเจียเริ่มต้นม่วงแดง จะให้สีแดงปนเหลือง เพราะน้ำเงินของ ($Fe^{2+} - Ti^{4+}$) ลดลงเหลืองชัดขึ้น เป็นต้น

ผลการทดลอง การเปลี่ยนแปลงสีในการเผาแบบธรรมดาและเผาแบบแพร่เบอร์ิลเลียม ให้ผลแตกต่างอย่างชัดเจน ภายใต้สภาวะเดียวกัน(อุณหภูมิ -เวลา) เป็นการเน้นให้เห็นความสำคัญของเบอร์ิลเลียมที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของสี

1. โดยการเผาแบบแพร่เบอร์ิลเลียม Be^{2+} ในสภาวะออกซิไดซ์ สร้างศูนย์กลางสี สีเหลือง(ตัวอย่างสเปคตราในรูป 13) ผนวกกับสีเกิดจากมลทินธาตุที่ให้สีในพลอย จะให้สีต่าง ๆ ซึ่งกล่าวได้ว่า เหตุการเกิดสีที่เกิดจากการแพร่เบอร์ิลเลียมเกี่ยวข้องกับศูนย์กลางสีและมลทินธาตุที่ให้สีในพลอย ซึ่งองค์ประกอบมลทินธาตุ เช่นเหล็กและหรือโครเมียมมีผลทำให้ศูนย์กลางสี ให้สีแตกต่างกัน ในการศึกษาพลอยสังเคราะห์ที่ไม่มีสีชนิด Flame Fusion ซึ่งปริมาณธาตุมลทินน้อยมาก(ตาราง 2) เมื่อนำไปเผาแบบแพร่เบอร์ิลเลียม ให้สีน้ำตาลอมส้ม ให้ศูนย์กลางสีที่ 435 nm ซึ่งงานวิจัยของ Emmett et al., (2003) โดยพลอยสังเคราะห์ต่างชนิดกัน รายงานที่ตำแหน่งสี 420 nm และให้สีทำนองเดียวกัน งานวิจัยอื่น ๆ เกี่ยวกับ ศูนย์กลางสี เช่นโดยการโคปพลอยสังเคราะห์ ด้วย Be และ Cr ให้พลอยมีสีส้ม ลักษณะเส้น

สเปกตรัมการดูดกลืนที่เพิ่มขึ้นจากย่านแดงไปยังย่านอัลตราไวโอเล็ต มีสาเหตุจากศูนย์กลางสีสี่เหลี่ยม สำหรับเส้นสเปกตรัมที่มีตำแหน่งพีค 470 nm 380 nm และหรือการดูดกลืนที่เพิ่มขึ้นจากย่านแดงไปยังย่านอัลตราไวโอเล็ตสาเหตุจากศูนย์กลางสีสี่เหลี่ยม (อ้างตาม Schmetzer and Schwartz , 2004) สามารถอธิบายในแง่การแพร่สารมลทิน Be^{2+} เข้าไปในคอร์นัคที่มีโครงสร้างของออลูมิน่า ในสถานะอุณหภูมิสูงในบรรยากาศออกซิไดซ์ จะเกิด lattice defect สร้างศูนย์กลางสีชนิด 'trapped hole color centre' สีเหลือง สีส้ม สีนํ้าตาลหรือส่วนผสม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบมลทินธาตุในพลอย

2. การเผาแบบแพร่เบอร์ริลเลียมในบรรยากาศออกซิเดชัน จะช่วยทำให้พีคของ $Fe^{2+} - Ti^{4+}$ ลดลง ทำให้ลดสีน้ำเงิน กล่าวคือ Fe^{2+} ถูกออกซิไดซ์เป็น Fe^{3+} ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนในการเผาพลอยบางกะจะ ที่เผาแบบธรรมดา แมงูไทร์ TiO_2 จะสลายออกมา ทำปฏิกิริยากับ Fe^{2+} ให้สีน้ำเงิน และปรากฏพีค Fe^{2+}/Fe^{3+} ซึ่งเมื่อเผาด้วยเบอร์ริลเลียม แม้แต่ ตำแหน่งพีค $Fe^{2+} - Ti^{4+}$ และ Fe^{2+}/Fe^{3+} ก็ลดลงไป แสดงว่าการเผาแบบแพร่เบอร์ริลเลียม ประสิทธิภาพการออกซิไดซ์เหล็กค่อนข้างสูง

ในงานวิจัยของ Emmett et al (2004) เงื่อนไขที่อธิบายได้ใช้ผลวิเคราะห์ในระดับไมโคร (parts per million atomic) โดยเครื่อง SIMS อธิบายผลของการแพร่เบอร์ริลเลียม ทำให้ $[Mg^{2+} + Be^{2+}] > [Ti^{4+} + Si^{4+}]$ จึงทำให้เกิดการดัดแปลงของสีได้ ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ต้องพิสูจน์แน่ชัดต่อไป (Schmetzer and Schwartz, 2004) ในการศึกษาครั้งนี้ การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุแบบบัลค์โดย EDXRF เท่าที่ศักยภาพในการตรวจสอบปริมาณ Mg ได้ ปรากฏว่า ไม่ว่าพลอยก่อนเผา พลอยเผาแบบธรรมดาหรือพลอยเผาแบบแพร่เบอร์ริลเลียม ซึ่งเริ่มต้น $Mg > Ti$ อยู่แล้วประกอบกับเบอร์ริลเลียมแพร่เข้าไประดับเพียง parts per million atomic คงไม่มีผลนัยสำคัญในแง่ของปริมาณ ซึ่งมีความเห็นว่า ความน่าจะเป็นไปได้คือ Be^{2+} ที่แพร่เข้าไปในพลอยมีประสิทธิภาพมากในการสร้าง trapped hole color centre ที่คล้ายกับ Mg^{2+} ซึ่งมีสีโทนเหลือง สิ่งที่น่าจะศึกษาวิจัยต่อไปถึงโครงสร้างออลูมิน่าเมื่อถูกแทนที่ด้วย Be^{2+} โครงสร้างจะแตกต่างหรือมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรระหว่างการเผาแบบธรรมดาและเผาแบบแพร่เบอร์ริลเลียม

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณหน่วยงานที่ให้ทุนสนับสนุน(งบประมาณแผ่นดิน 2548) ขอขอบคุณ คุณประจักษ์ อังคะหิรัญ ที่ให้คำปรึกษาและได้บริจาคพลอยมาดักสการ์ที่เผาแพร่เบอร์ริลเลียมแล้ว คุณศุภฤกษ์ ฤทธิสิทธิกุลชัย และนิสิตสาขาเทคโนโลยีอัญมณี ที่มีส่วนช่วยในการเผาพลอย ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา โดยเฉพาะอาจารย์นิติกรณ์ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์ EDXRF

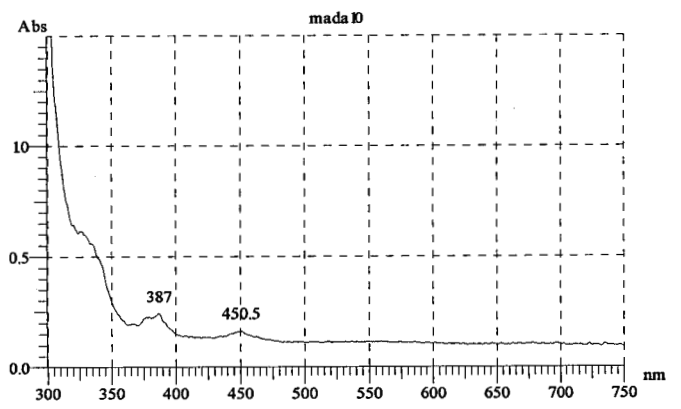
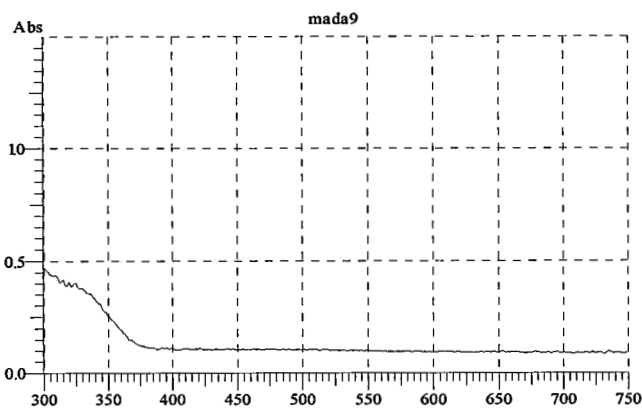
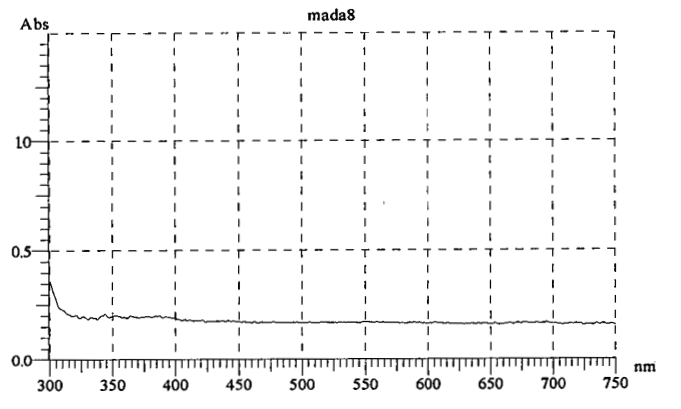
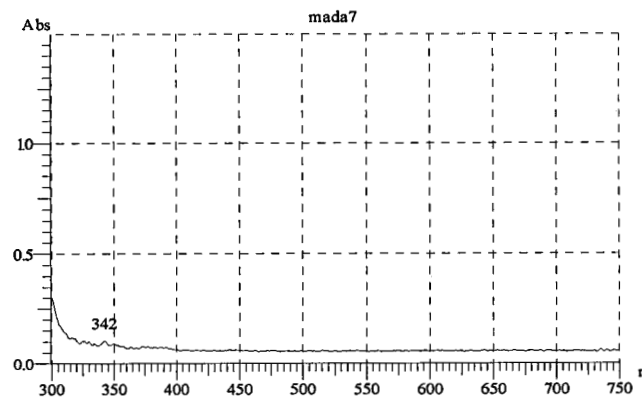
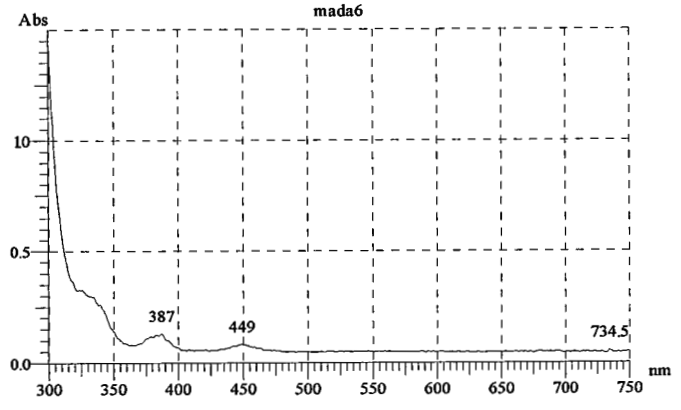
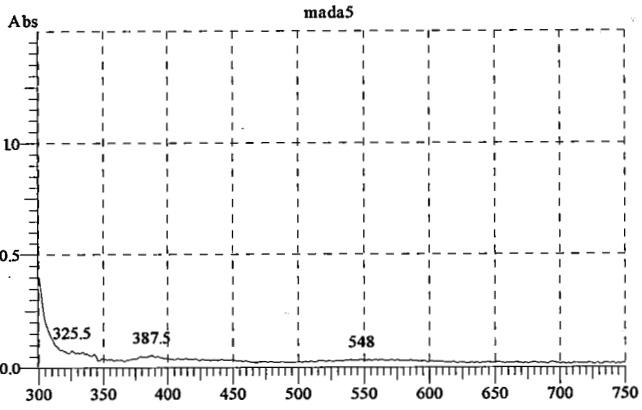
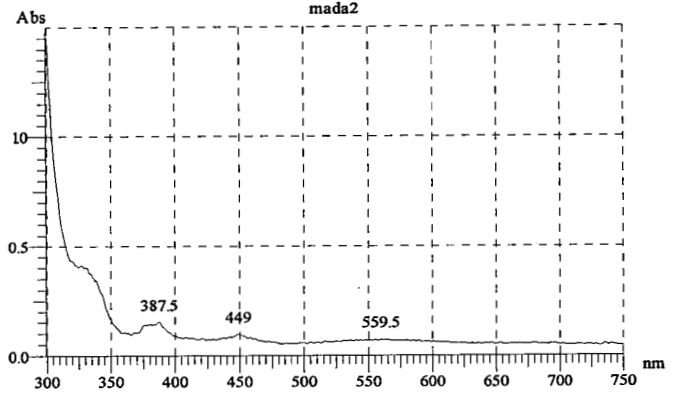
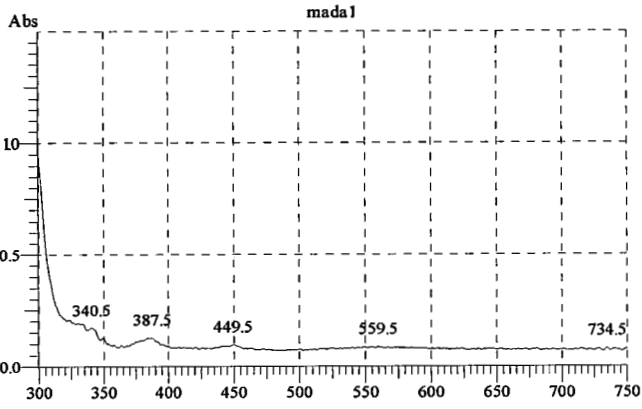
บรรณานุกรม

- กฤตยา ปัทมาลัย และ รัก หรรษาเวก(2548) การเพิ่มคุณภาพพลอยทับทิมและแซปไฟร์มาดากัสการ์ ด้วยกรรมวิธีการใช้ความร้อน ในเอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง "ก้าวนำโลกอัญมณีด้วยเทคนิคการเผาพลอยทับทิมและแซปไฟร์" 21 กันยายน 2548 จัดพิมพ์โดยกรมทรัพยากรธรณี กรุงเทพฯ หน้า 22 - 48
- ประจักษ์ อังคะหิรัญ(2546) บทความเผาพลอย. เอกสารคำสอนประกอบกระบวนการวิชาการเผาพลอย สาขาอัญมณีและเครื่องประดับ และสาขาเทคโนโลยีอัญมณี วิทยาลัยอัญมณี วิทยาเขต สารสนเทศ จันทบุรี มหาวิทยาลัยบูรพา, 48 หน้า
- รัก หรรษาเวก(2544) การเผาพลอยทับทิมและแซปไฟร์. เอกสารประกอบการแสดงปาฐกถาชุดสิรินธร ครั้งที่ 17 เรื่อง "รัตนชาติของไทย" โดย ดร. โยยม อรัญยกานนท์, หน้า 36 – 46
- รัก หรรษาเวก(2548) หลักการเพิ่มคุณภาพพลอยทับทิมและแซปไฟร์ด้วยความร้อน เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง ในเอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง "ก้าวนำโลกอัญมณีด้วยเทคนิคการเผาพลอยทับทิมและแซปไฟร์" 21 กันยายน 2548 จัดพิมพ์โดยกรมทรัพยากรธรณี กรุงเทพฯ หน้า 116 - 124
- ธวัชชัย สมใจนึก (2548) กว่าจะรู้ว่าพลอยเนื้ออ่อนเป็นสารเบริลเลียม ในเอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง "ก้าวนำโลกอัญมณีด้วยเทคนิคการเผาพลอยทับทิมและแซปไฟร์" 21 กันยายน 2548 จัดพิมพ์โดยกรมทรัพยากรธรณี กรุงเทพฯ หน้า 6 – 7
- Cox, RT., (1971) Electron spin resonance studies of holes trapped at Mg^{2+} , Li^+ and cation vacancies in Al_2O_3 *Solid State Communications*, 9, 1989-92
- Emmett, J.L, and Douthit, TR, (1993) Heat treating the sapphires of Rock Creek, Montana. *Gems & Gemology*, 29(4), 250-72
- Emmett, J. L., Scarratt, K., McClure, S. F., Moses, T., Douthit, T. R., Hughes, R., Novak, Shigley, J. E., Wang, W., Bordelon, O. and Kane. R. E. (2003). "Beryllium Diffusion of Ruby and Sapphire." *Gems & Gemology* 39(2): 84-135
- Ferguson J & Fielding P E (1971) The origins of the colours of yellow, green, and blue sapphires. *Chemical Physics Letters* 10: 262-265.
- Fritsch E and Rossman, G (1987) An Update on Color in Gems. Part 1: Introduction and Colors Caused by Dispersed Metal ions. *Gems & Gemology* 23(3): 126-139
- Fritsch E and Rossman, G (1988) Part 2: Colors Involving Multiple Atoms and Color Centers *Gems & Gemology* 24(1): 3-15

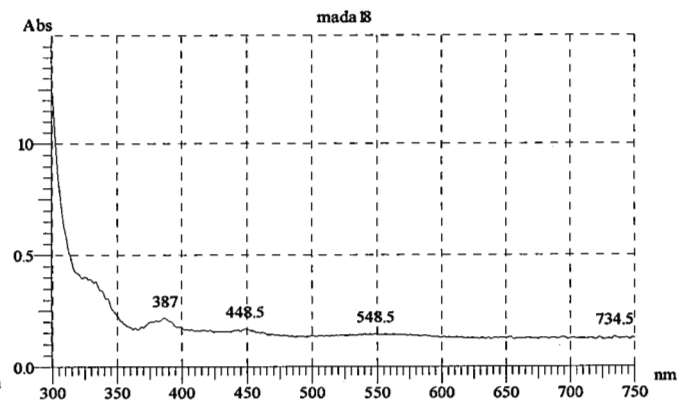
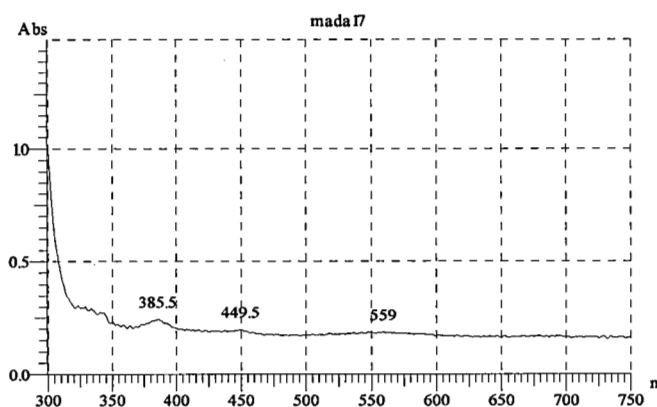
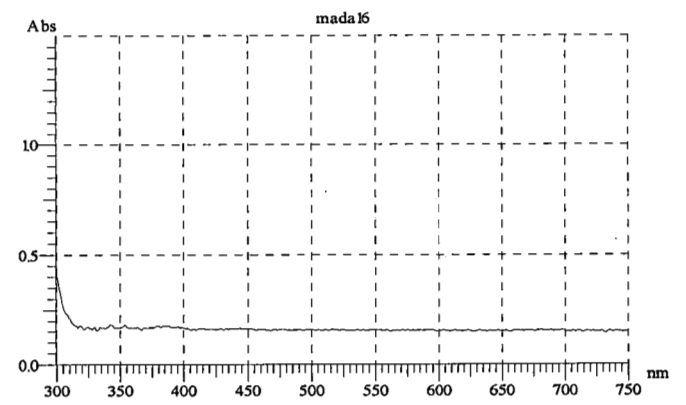
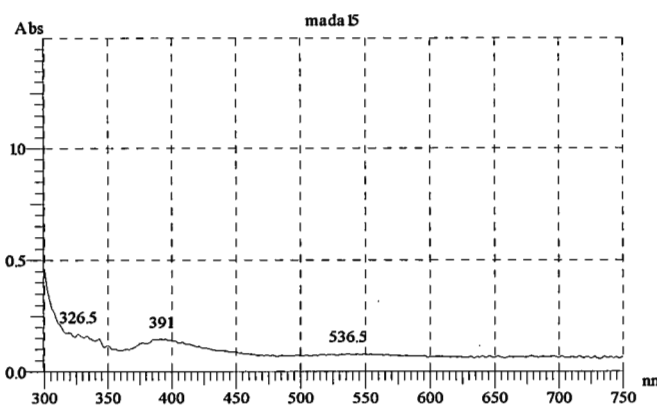
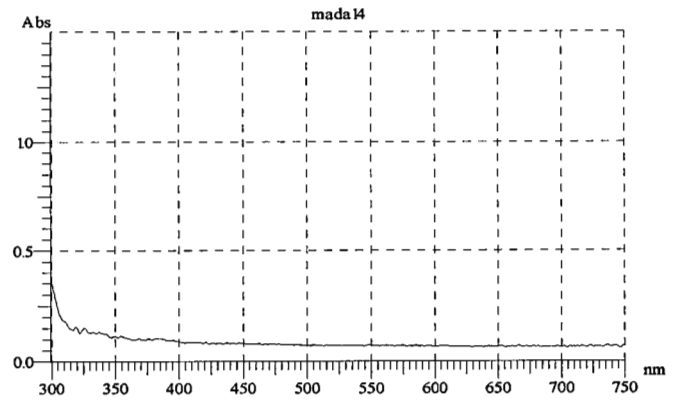
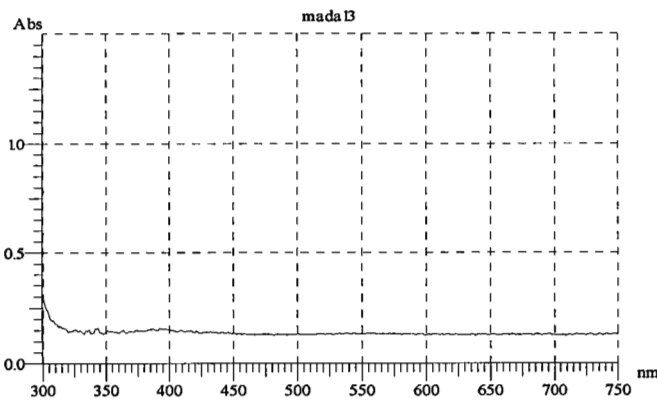
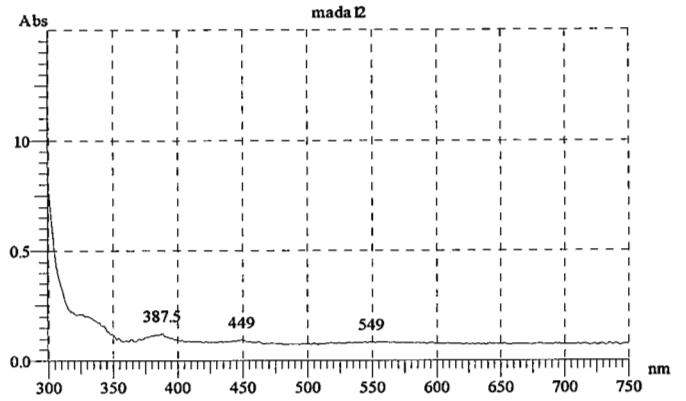
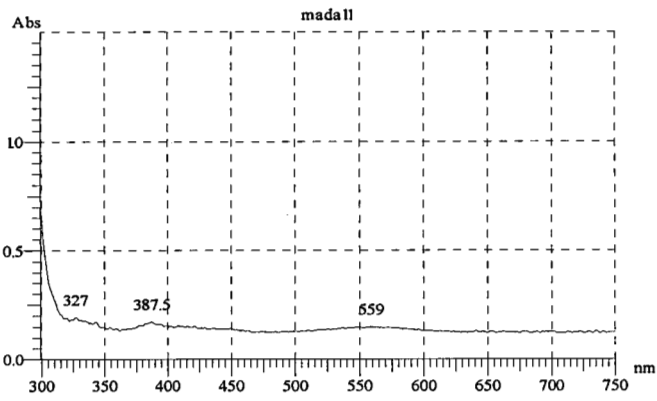
- Häger, T.,(2001) High temperature treatment of natural corundum. In: Hofmeister, E., Dao, N.Q., and Quang VoX.(eds), *Proceedings of the International Workshop on Material Characterization by Solid State Spectroscopy:The Minerals of Vietnam; Hanoi, April 4-10, 2001*, 24-37
- Hoskins, RH., and Soffer, B.H., 1964. Observation of Cr⁴⁺ in α -Al₂O₃ *Physical Review*, 133(2A), A490-3
- Krebs J J & Maisch W G (1971) Exchange effects in optical-absorption spectrum of Fe³⁺ in Al₂O₃ *Physical Review (B)* 4: 757-769.
- Mohapatra, S.K., and Kröger, EA, (1977) Defect structure' of α -Al₂O₃ doped with magnesium. *Journal of the American Ceramic Society*, 60(3 - 4),141-8
- Moon A R & Phillips M R (1994) Defect Clustering and Color in Fe, Ti: -Al₂O₃ *Journal of the American Ceramic Society*, 77: 356-367.
- Nassau, K. (1994) Gemstone Enhancement.- Butterworths, London.
- Nassau, K.(1983) The Physics and Chemistry of Color, THE FIFTEEN CAUSES OF COLOR, John Wiley & Sons, New York, 454p.
- Peretti, A, and Günther, D., (2002) The color enhancement (E) of fancy sapphires with a new heat -treatment technique (Part A): inducing color zoning by internal (1) migration (M) and formation of color centers. *Contributions to Gemology*, 1, 1-48
- Peretti, A, Günther, D., and Graber, A-L, (2003) The beryllium treatment of fancy sapphires with a new heat-treatment technique (part B).*Contributions to Gemology*,2, 21-33
- Pisutha-Armond, v., Hager, T., Wathanakul, P., and Atichat, W., (2004) Yellow and brown coloration in beryllium-treated sapphires. *Journal of Gemmology*, 29(2),77-103
- Schmetzer, K., and Schwarz, D., (2004) The causes of colour in untreated, heat treated and diffusion treated orange and pinkish – orange sapphires – a review. *Journal of Gemmology*, 29(3), 149-182
- Schmetzer K, Bosshard G & Hanni H A (1983) Naturally colored and treated yellow and orange - brown sapphires. *Journal of Gemmology*, 18: 607-622.
- Themelis, T., (1992) *The heat treated of Ruby and Sapphires*. GemLab Inc.
- Themelis, T., (2003) *Beryllium-treated rubies and sapphires*. Themelis, Bangkok, 48 pp
- Wang, H.A., Lee, CH., and Kröger, EA., (1983) Point defects in α -Al₂O₃: Mg studied by electrical conductivity, optical absorption, and ESR *Physical Review B*, 27(6),3821-41

Wang, W., and Green, B., (2002) An update on Be-diffused corundum. *Gems & Gemology*,
38(4), 363-5

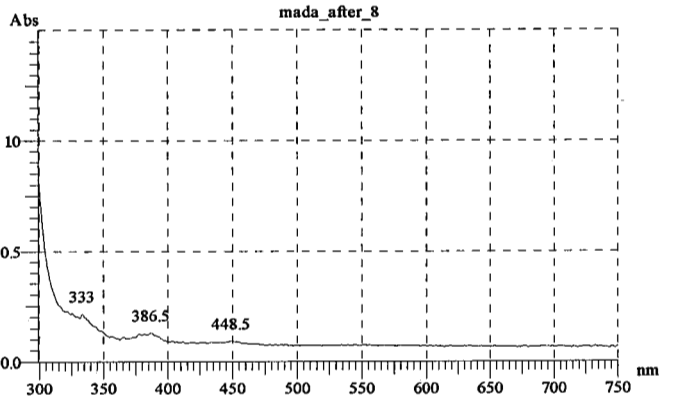
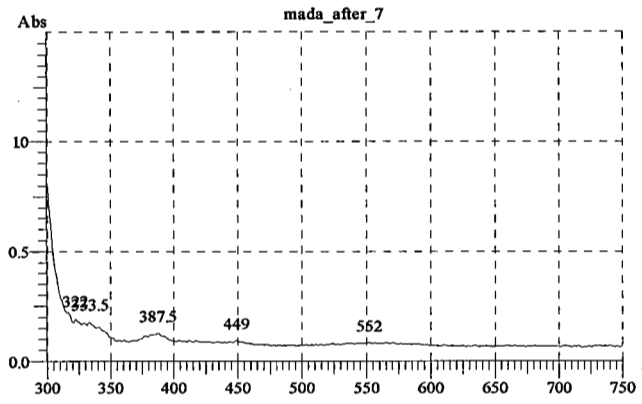
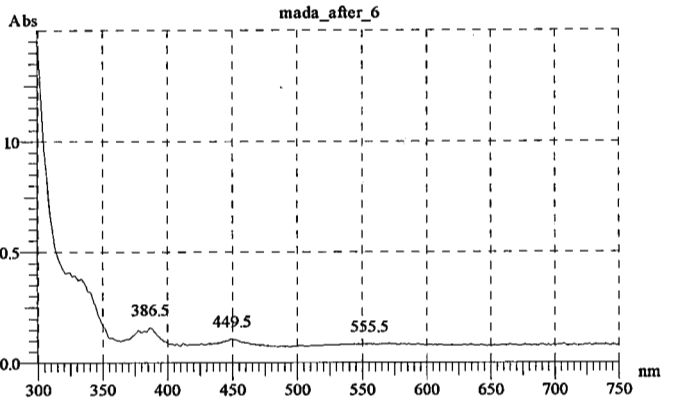
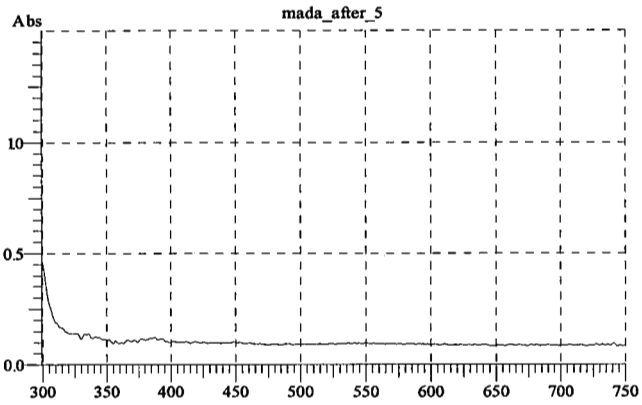
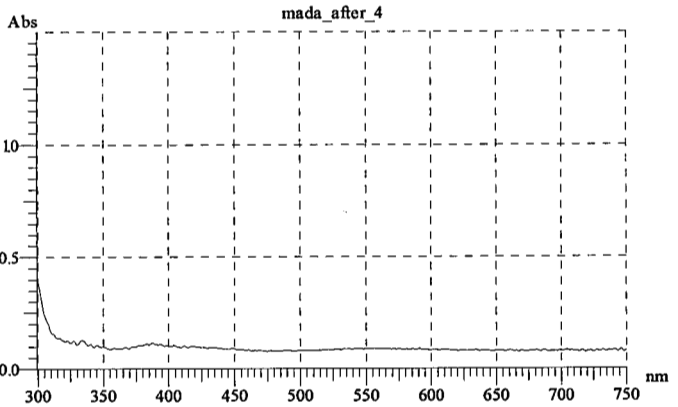
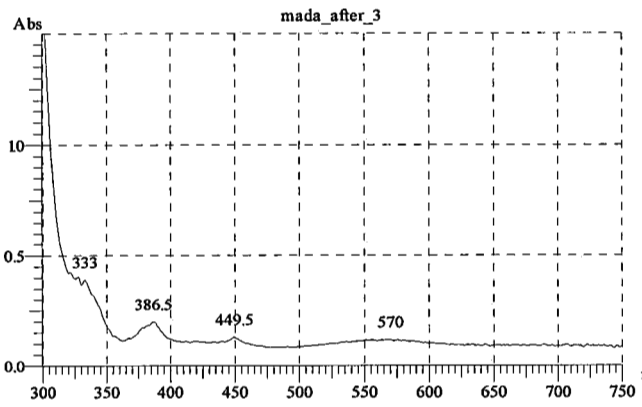
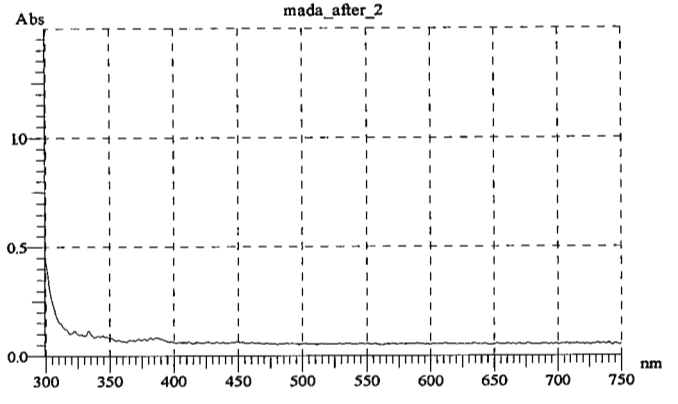
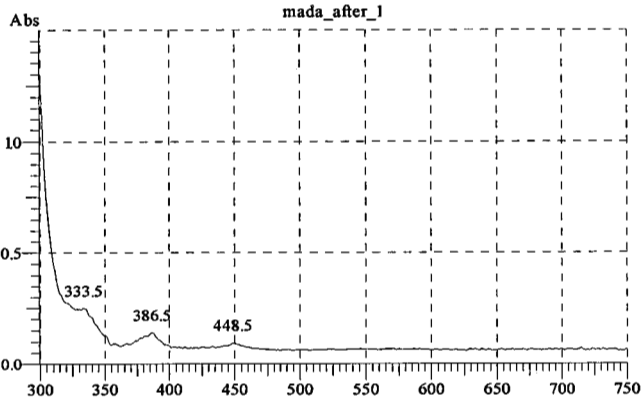
สเปกตรอดูดกลืนของแซบไฟรีอิลลาจากา มาดากัสการ์ กลุ่มไม่มีสีและใกล้ไร้สี



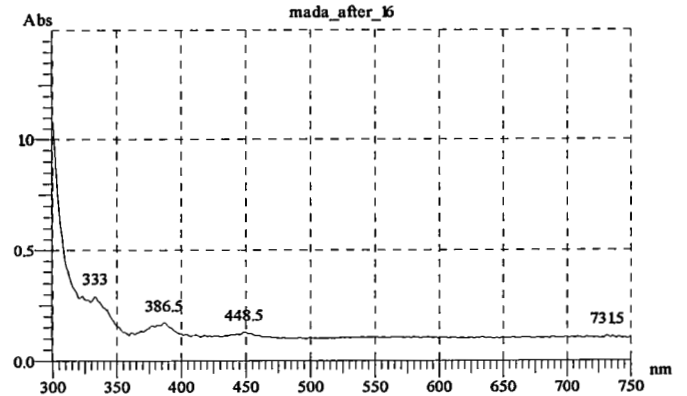
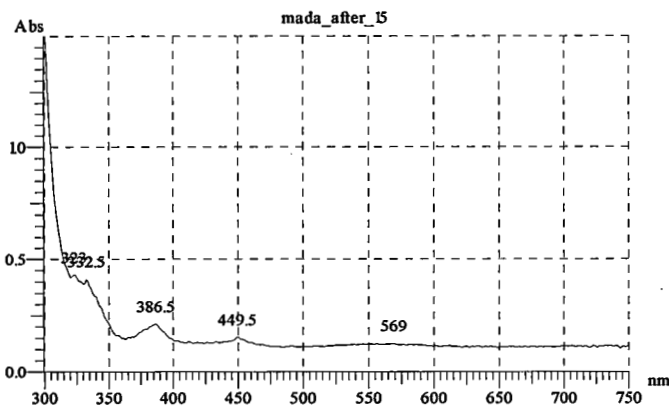
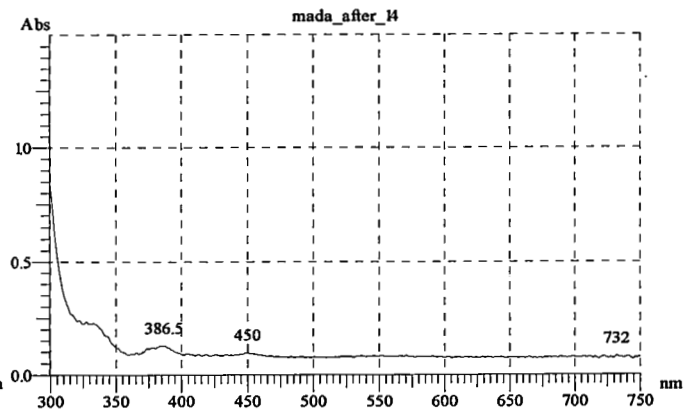
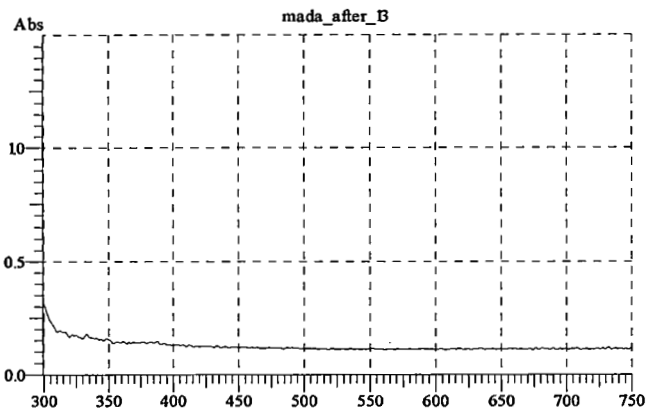
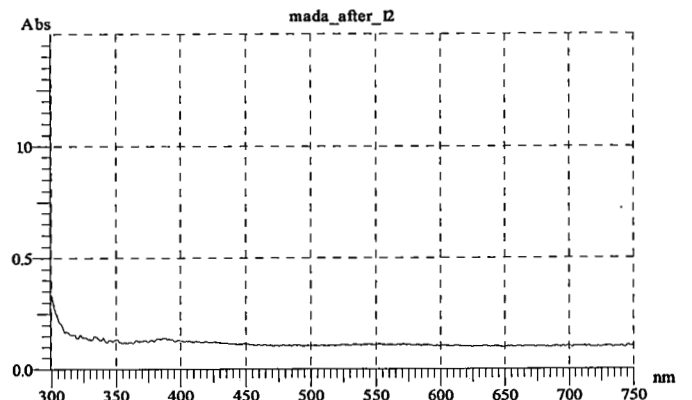
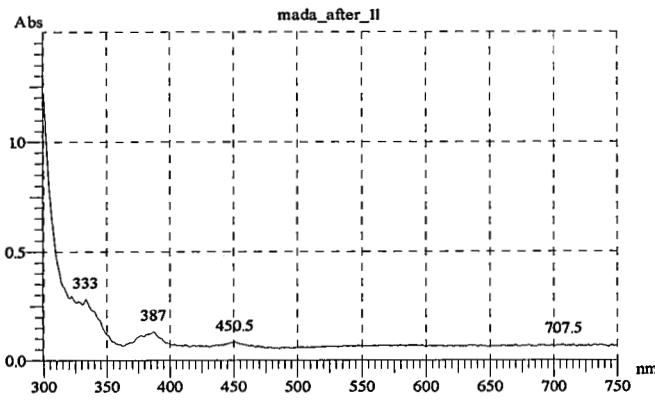
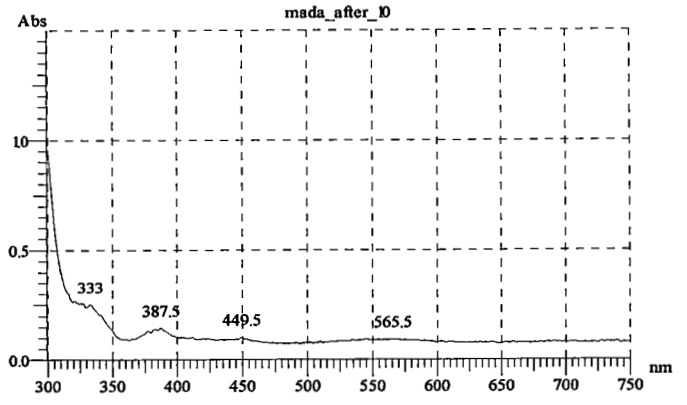
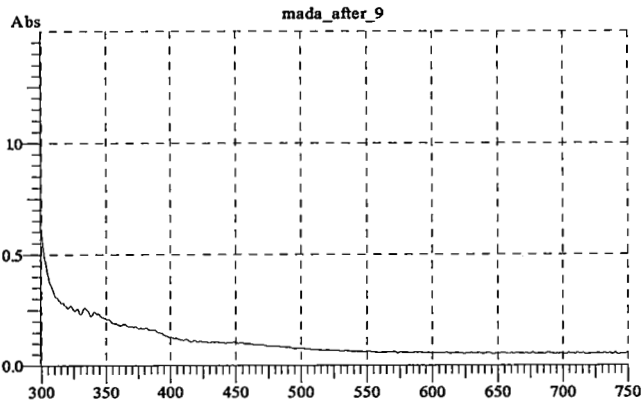
สเปกตราดูดกลืนของแชนไฟโวลลาจากา มาดากัสการ์ กลุ่มไม่มีสีและใกล้ไร้สี



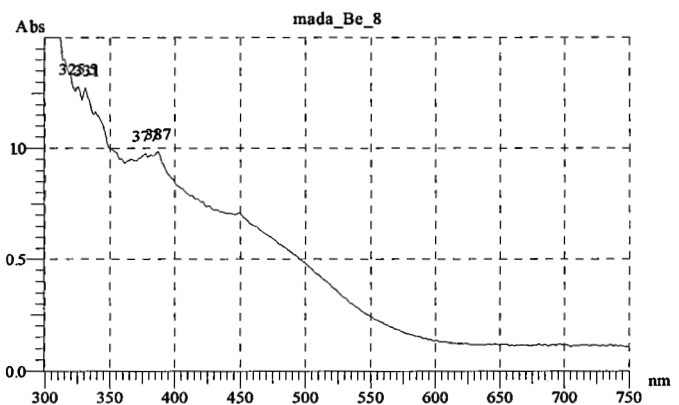
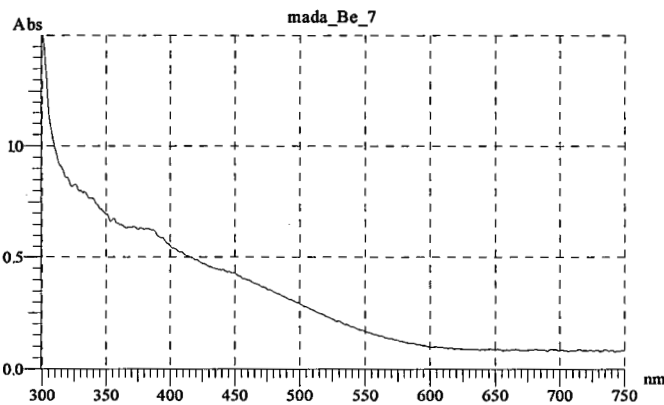
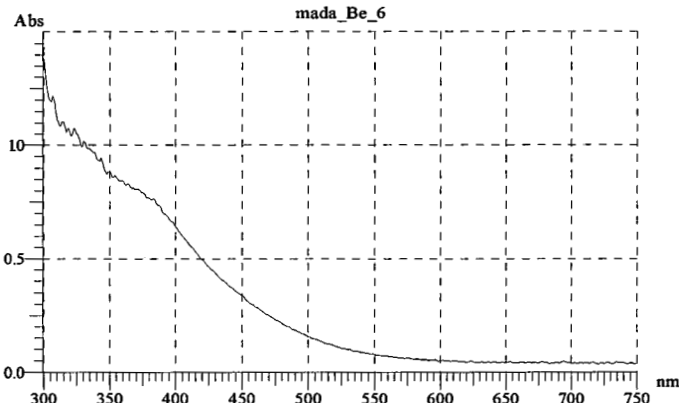
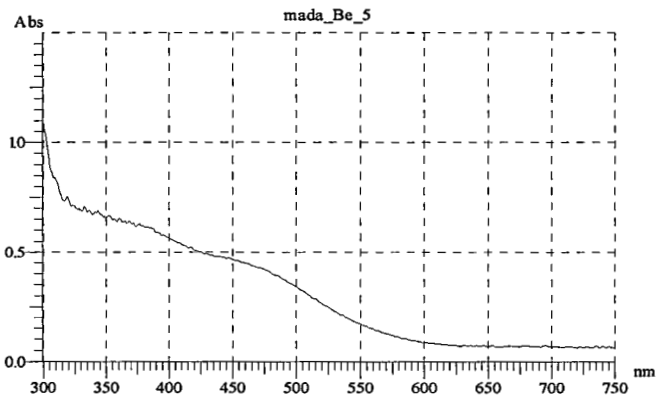
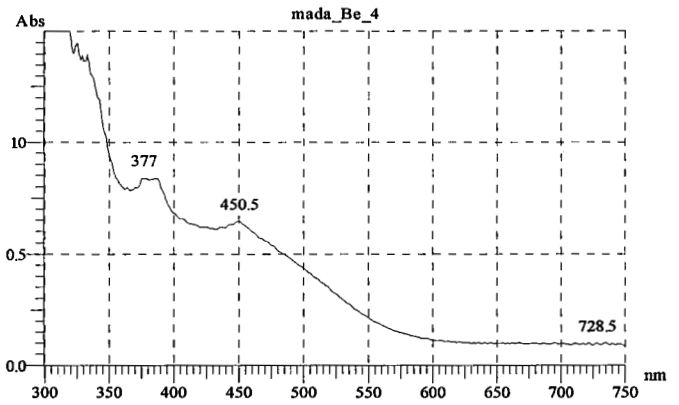
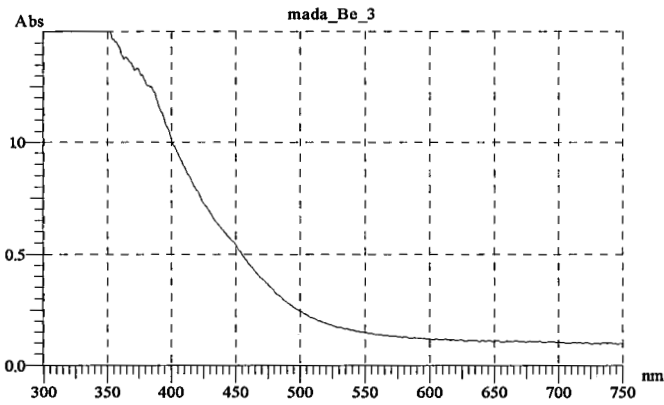
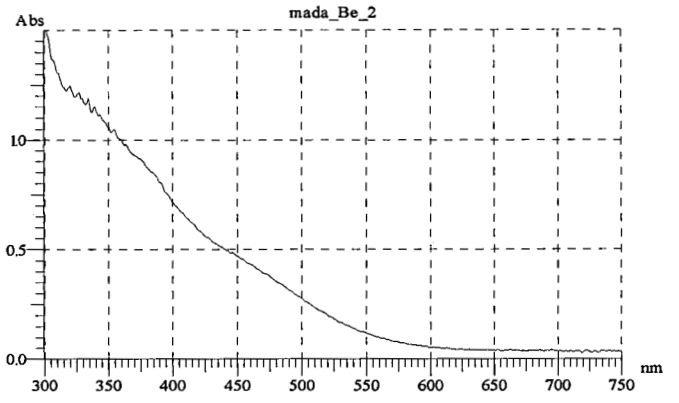
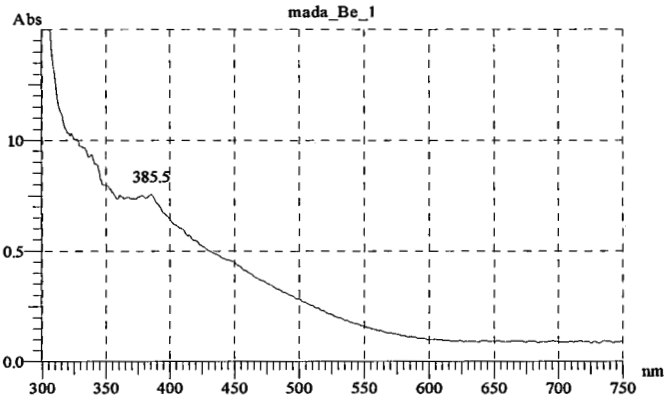
สเปกตราดูดกลืนของแชปไฟรอลลาจากา มาดากัสการ์ กลุ่มเผาแบบธรรมดา



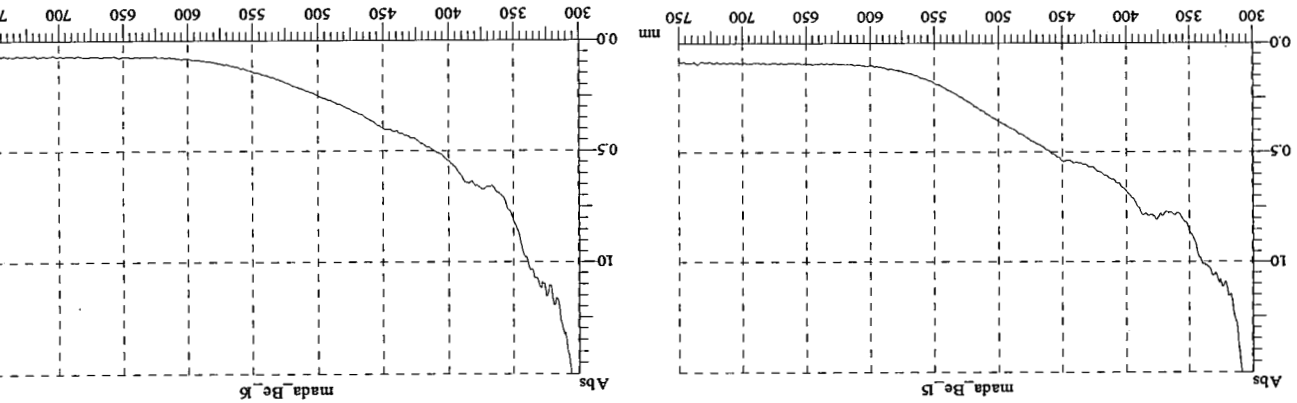
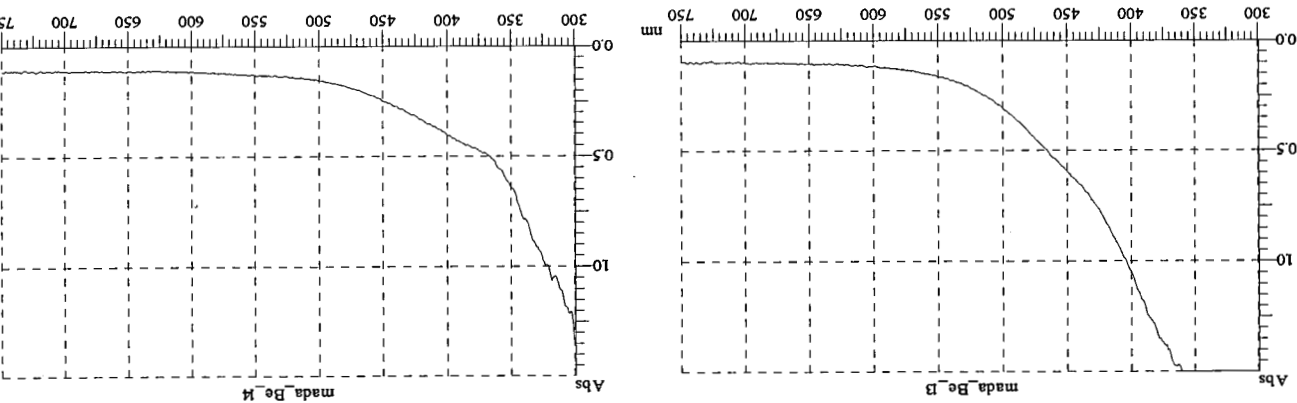
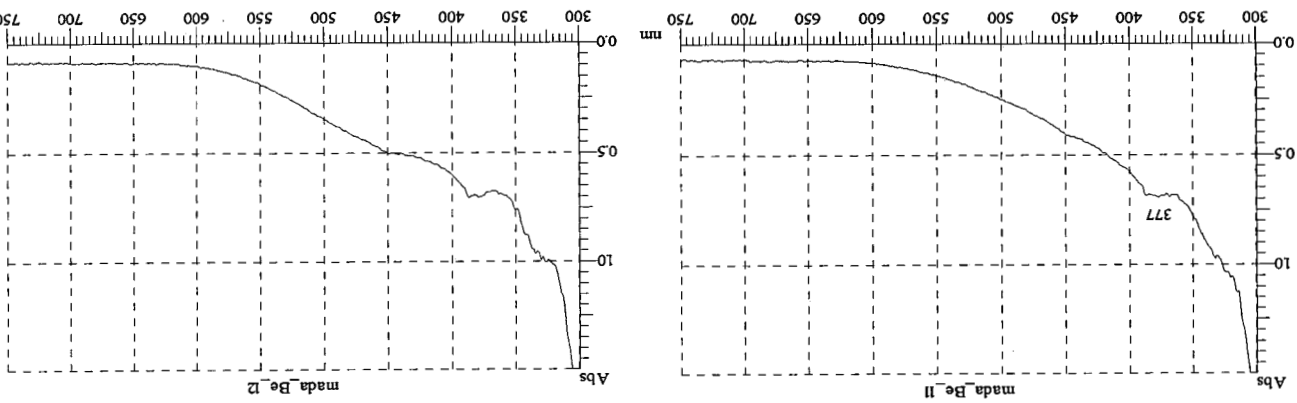
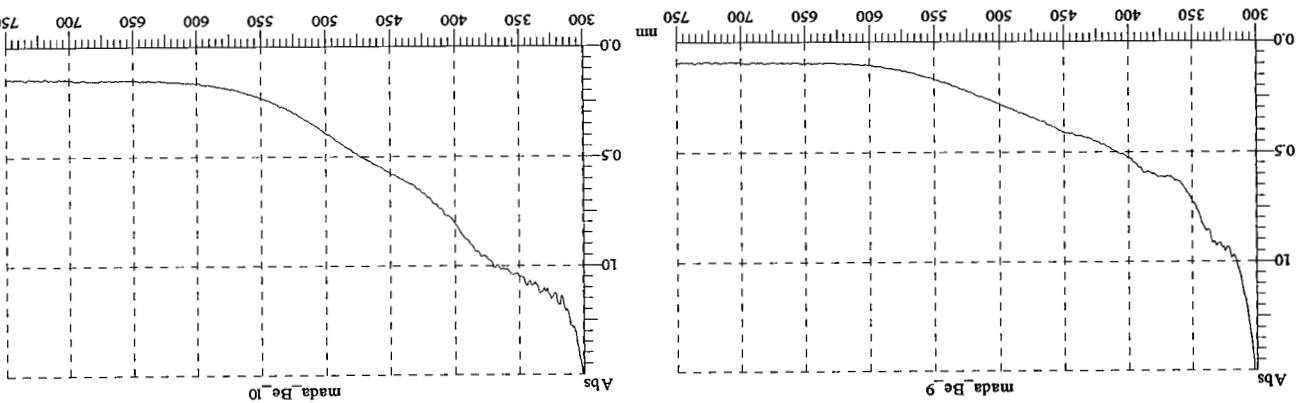
สเปกตรอดูดกลืนของเซปไฟรียูไลลาจากกา มาดากัสการ์ กลุ่มเหาแบบธรรมชาติ



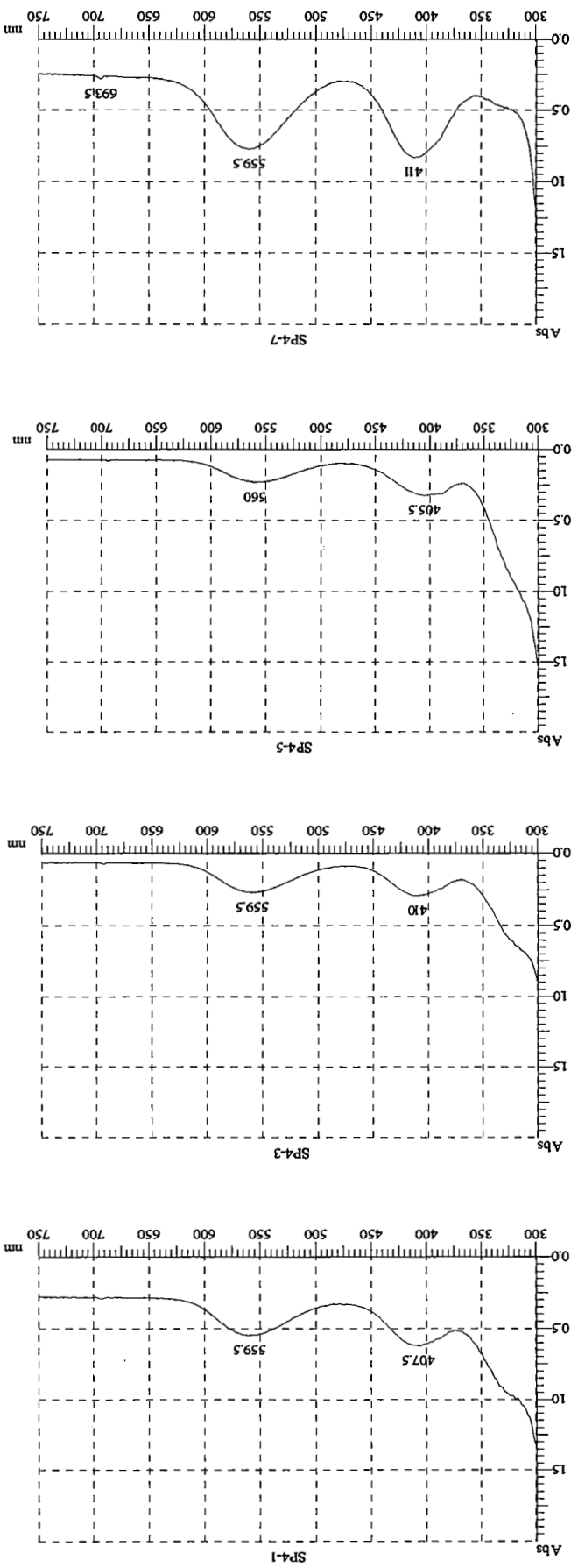
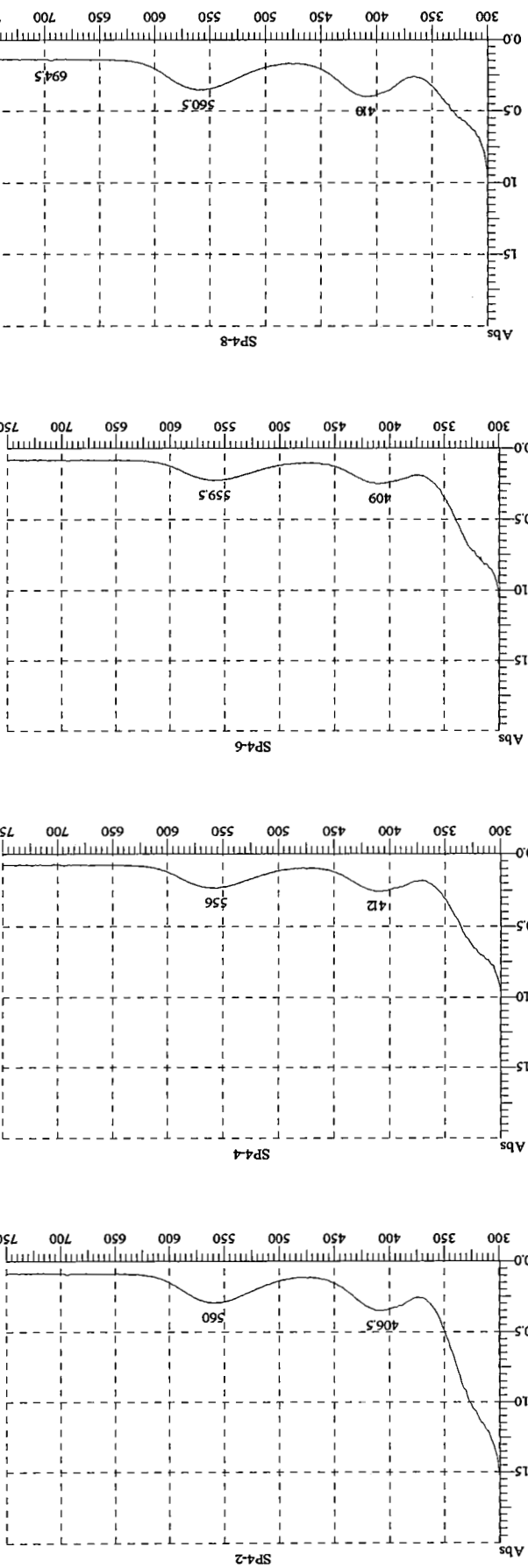
สเปกตราดูดกลืนของแซปไฟรียาลากากา มาดากัสการ์ กลุ่มเผาแบบแพรวบอริเดียม ให้ดีเหลืออง



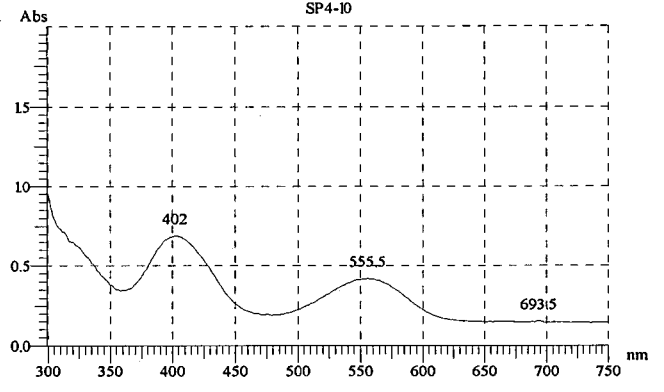
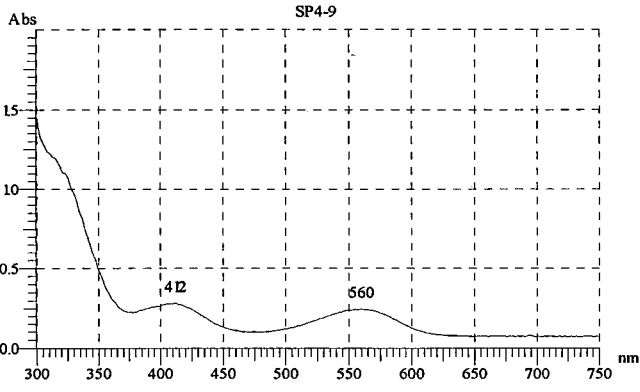
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของพอลิเมอร์ที่ได้



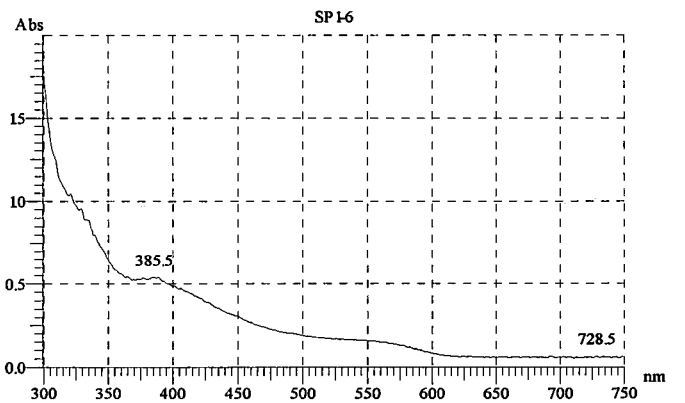
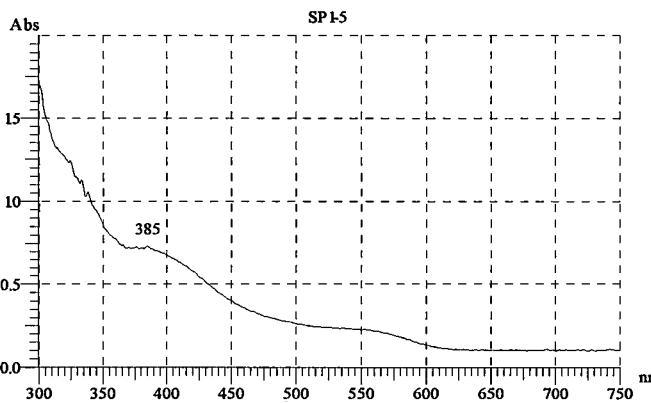
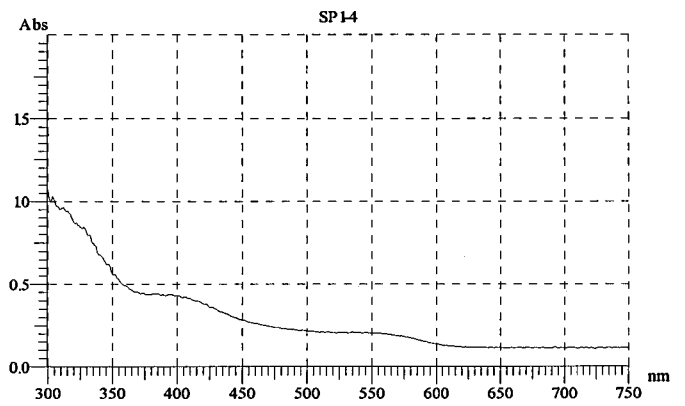
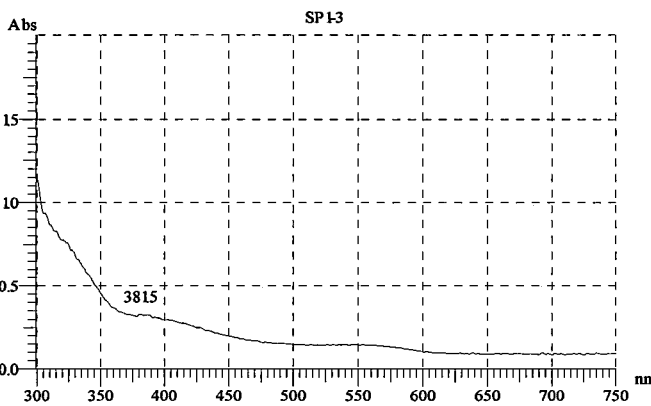
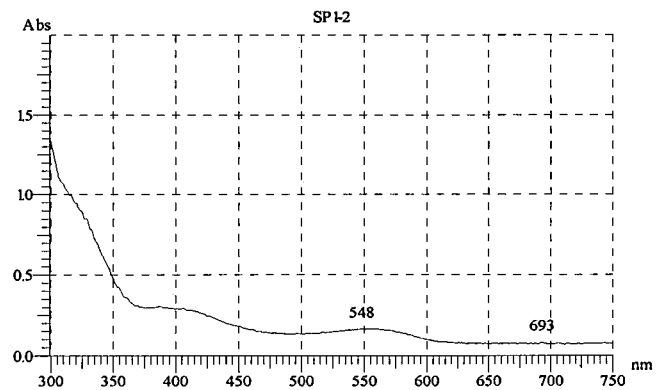
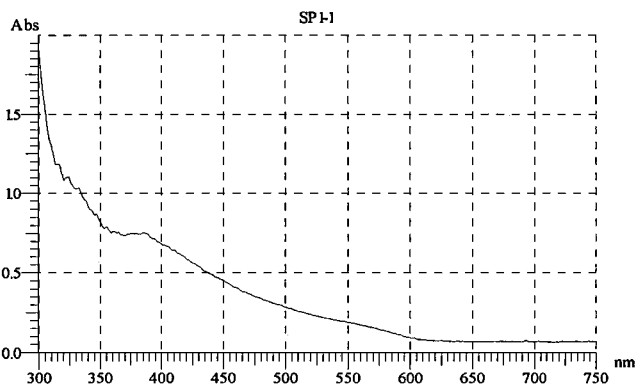
การวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย



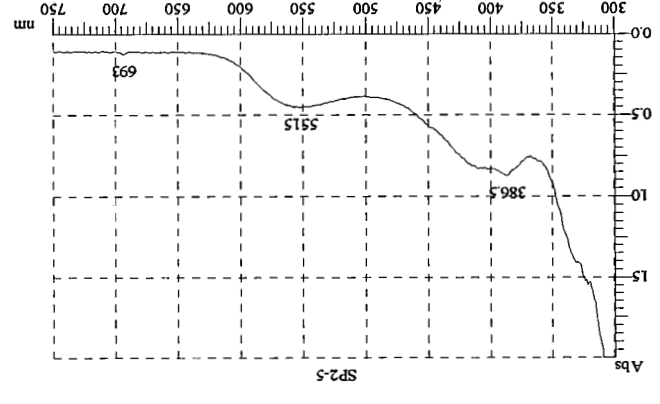
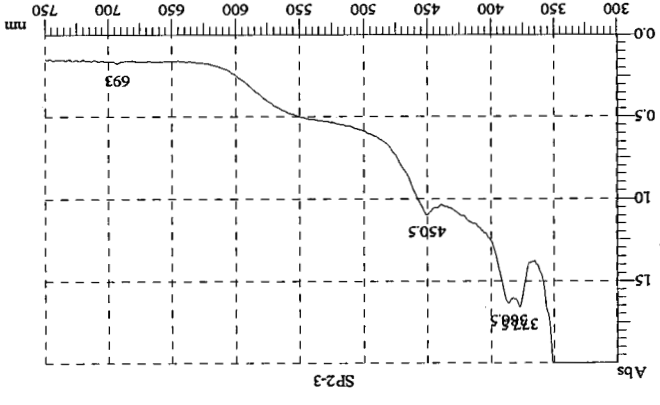
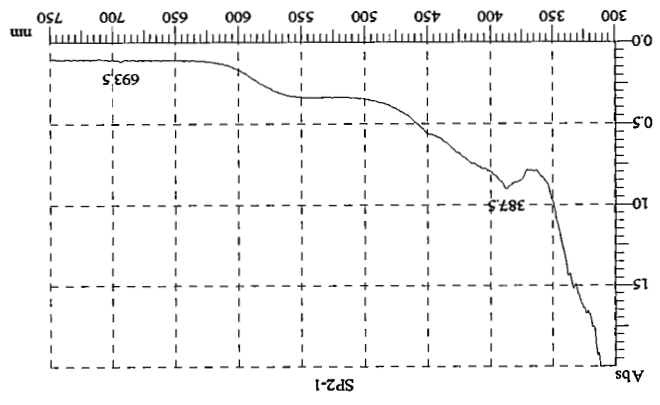
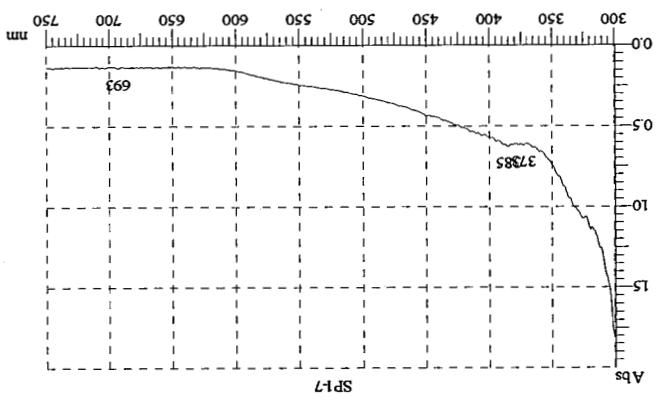
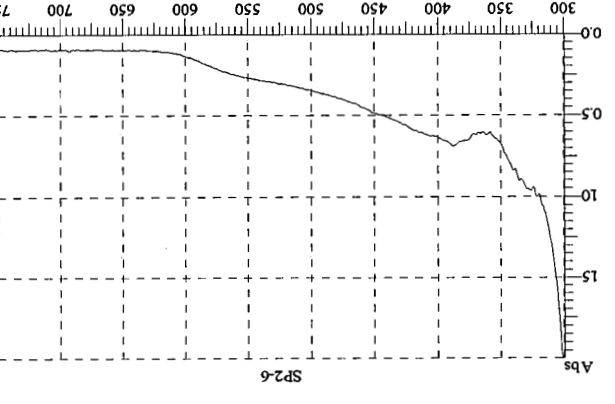
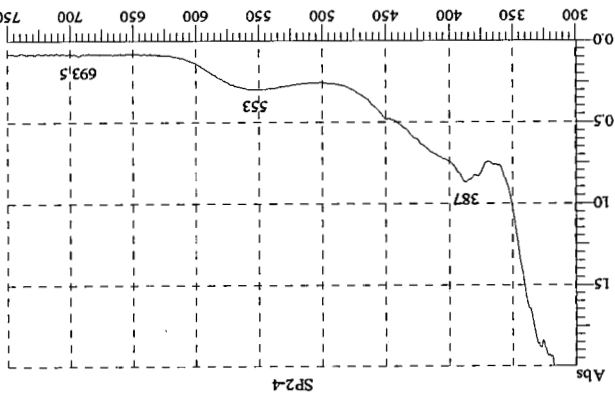
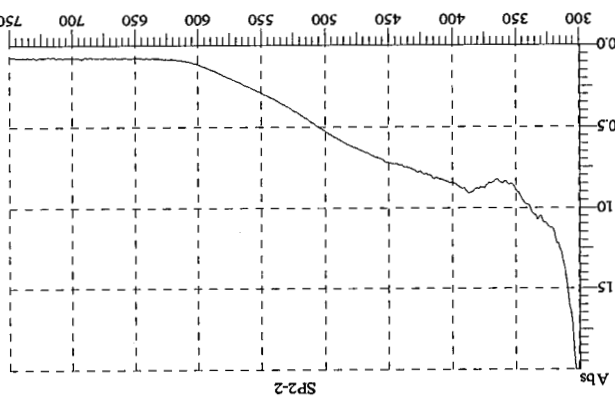
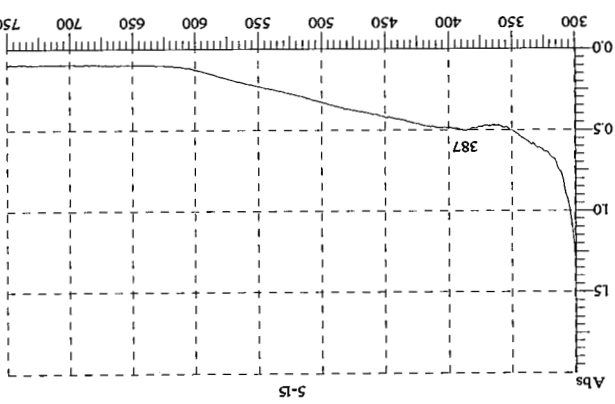
สเปกตรัมพลอยอิลลาการ์ มาดากัสการ์ ที่ผ่านการเผาแบบแพร่เบอร์ริลเลียม สีชมพู



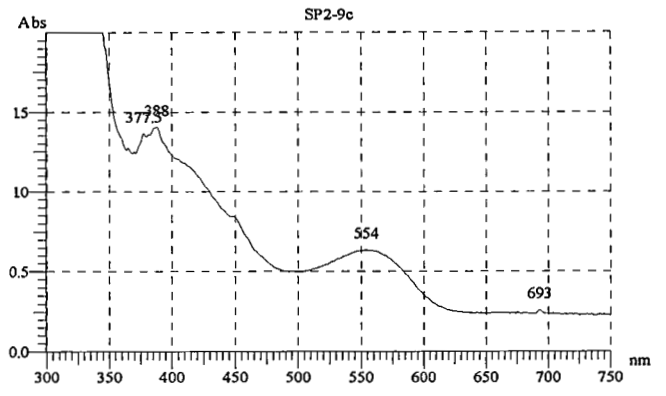
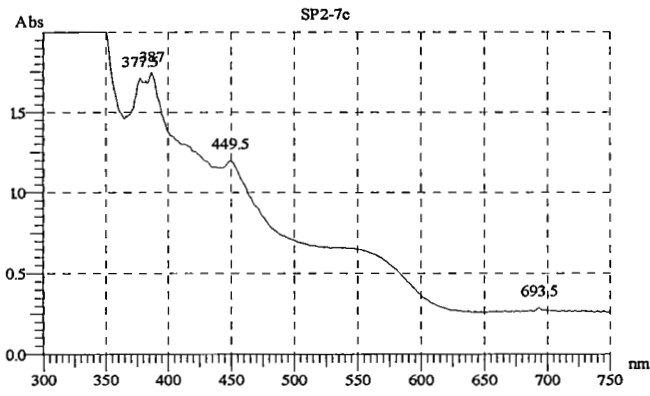
สเปกตรัมพลอยอิลลาการ์ มาดากัสการ์ ที่ผ่านการเผาแบบแพร่เบอร์ริลเลียม สีส้มถึงส้มเหลือง



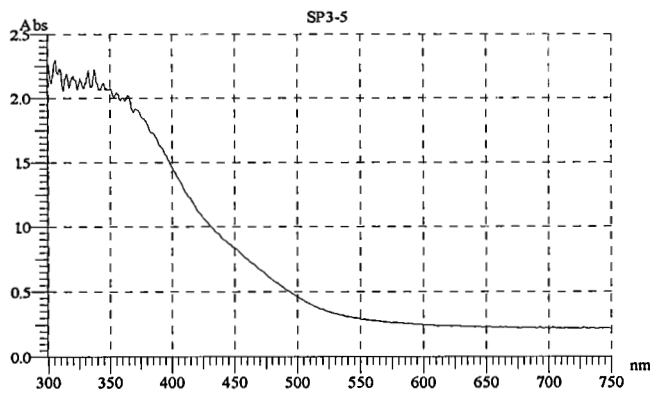
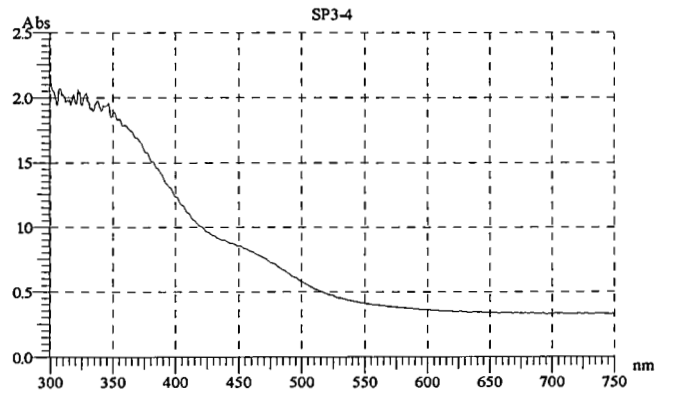
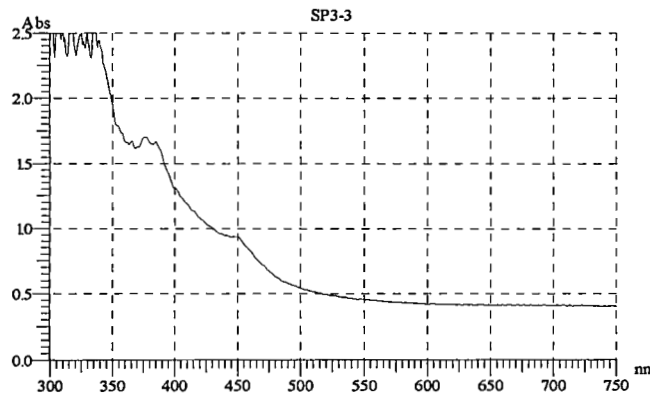
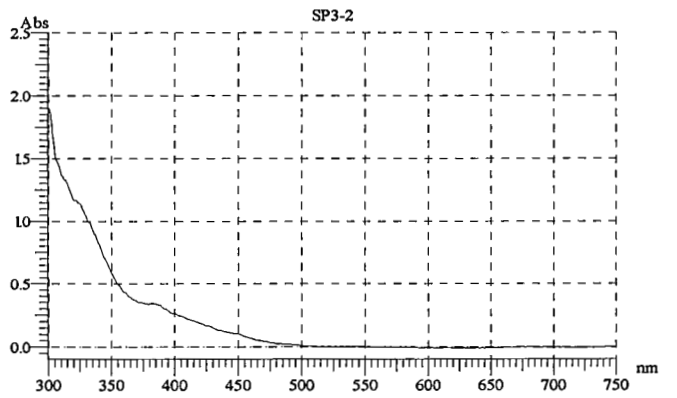
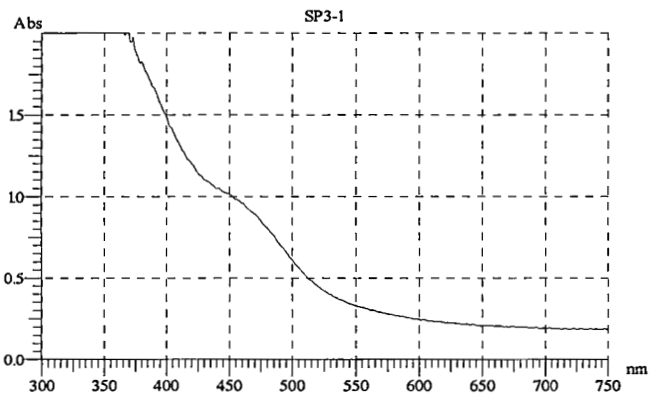
ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารสกัดจากพืชสมุนไพรพื้นบ้านที่ใช้รักษาโรคเบาหวาน



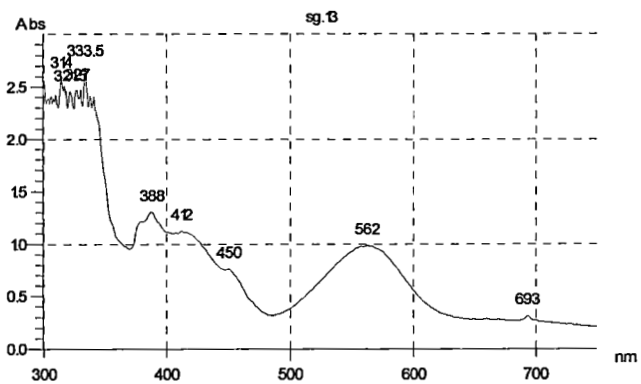
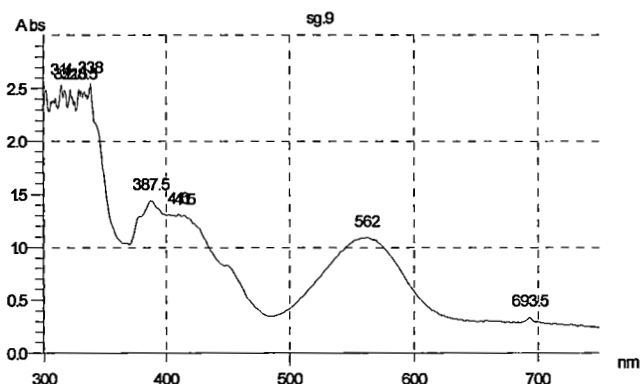
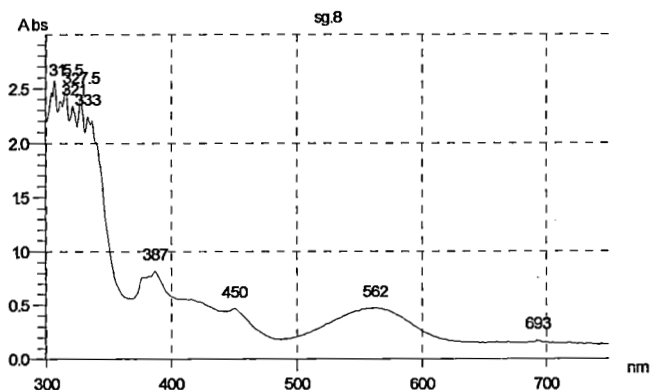
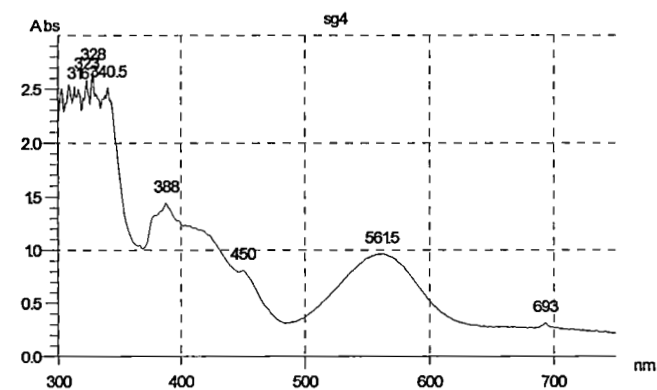
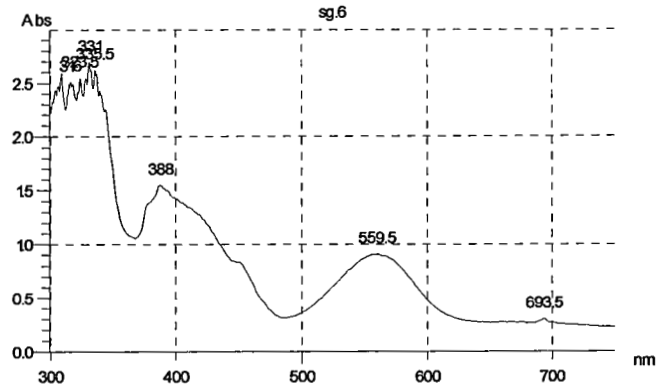
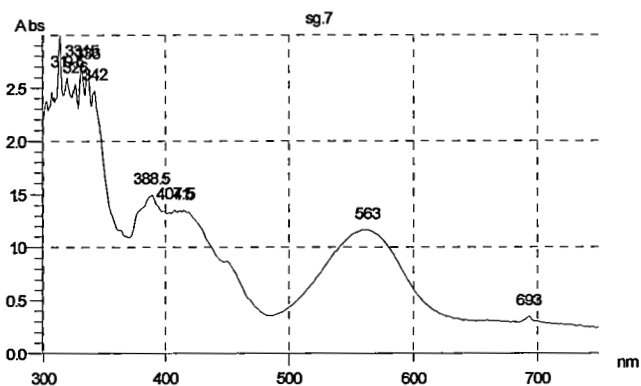
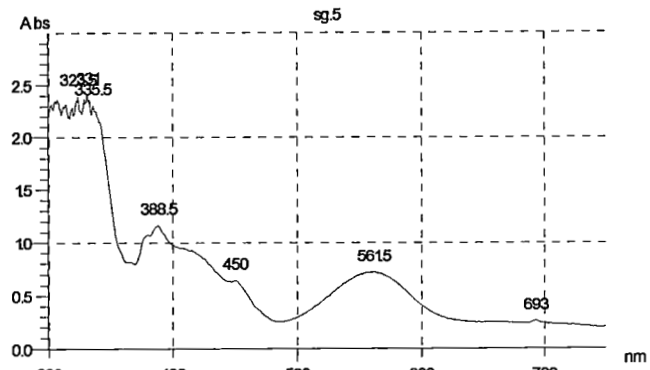
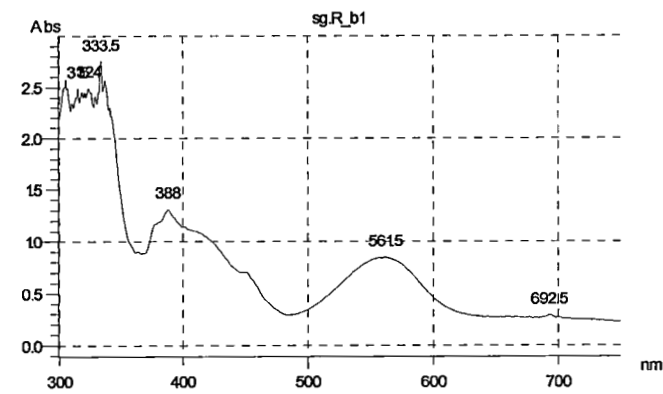
สเปกตรัมพลอยอิดลาการี่ มาดากัสการ์ ที่ผ่านการเผาแบบแพร่เบอร์ริลเลียม สีส้มถึงส้มเหลือง



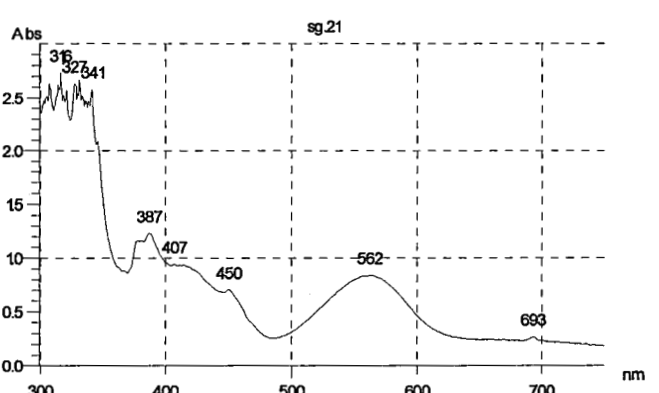
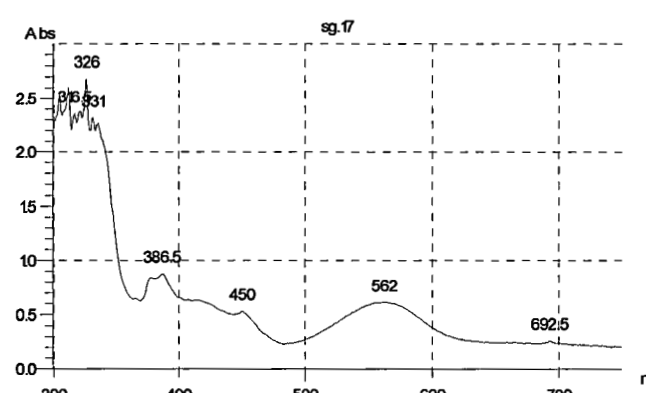
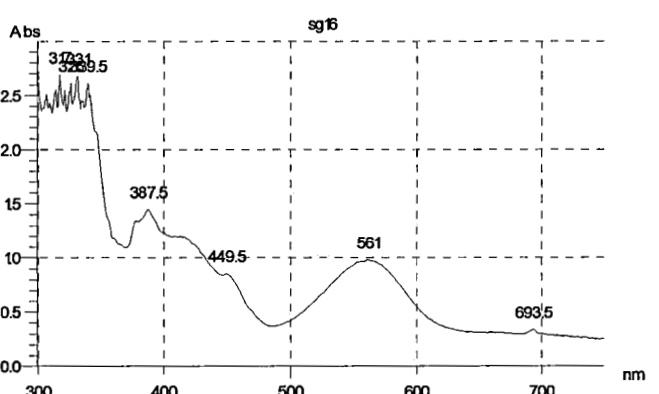
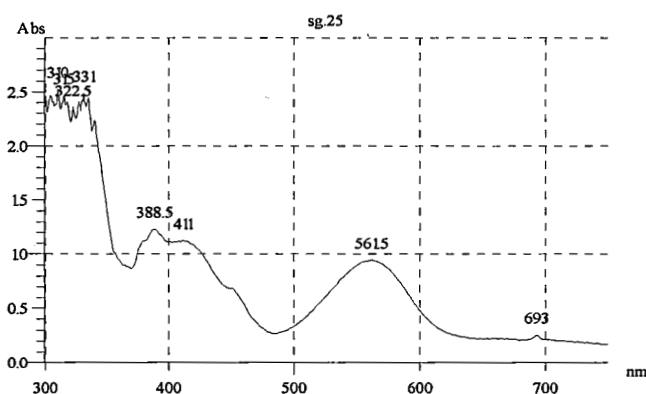
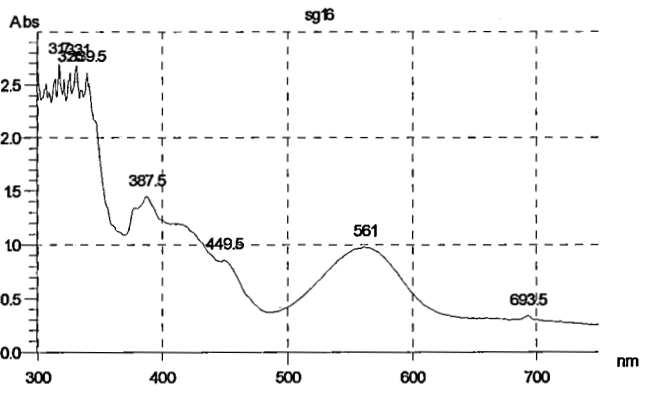
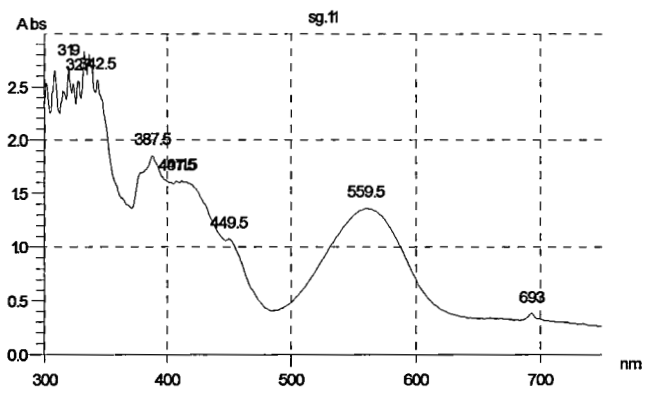
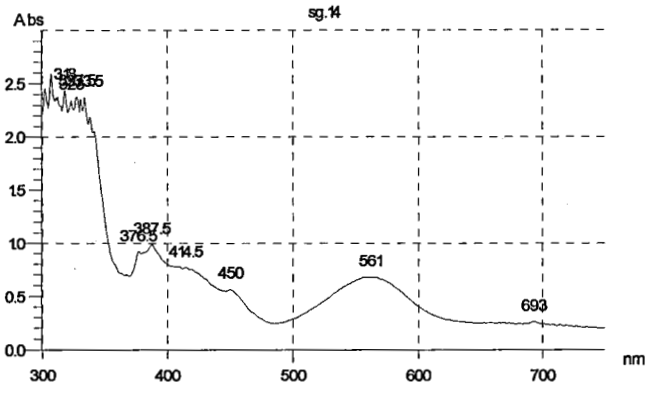
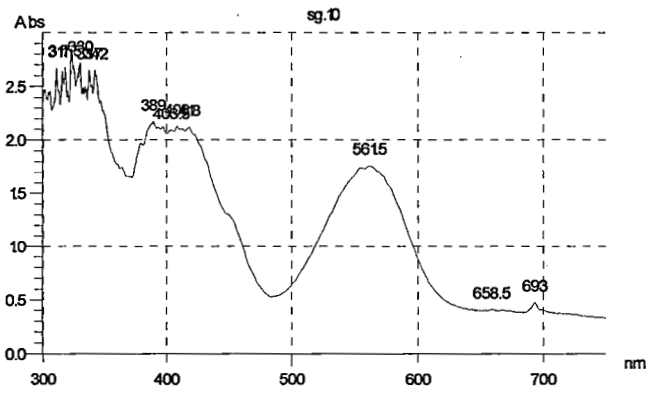
สเปกตรัมพลอยอิดลาการี่ มาดากัสการ์ ที่ผ่านการเผาแบบแพร่เบอร์ริลเลียม สีเหลือง



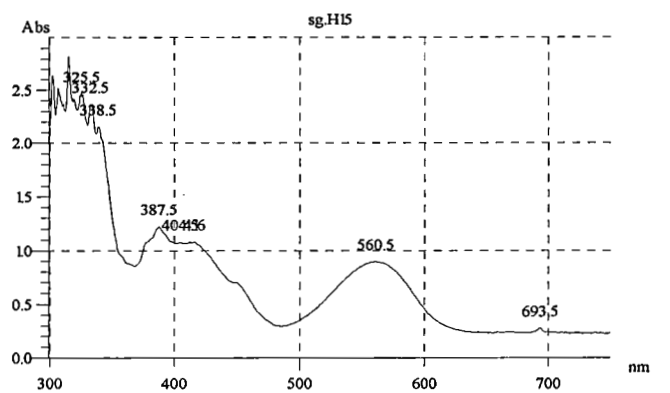
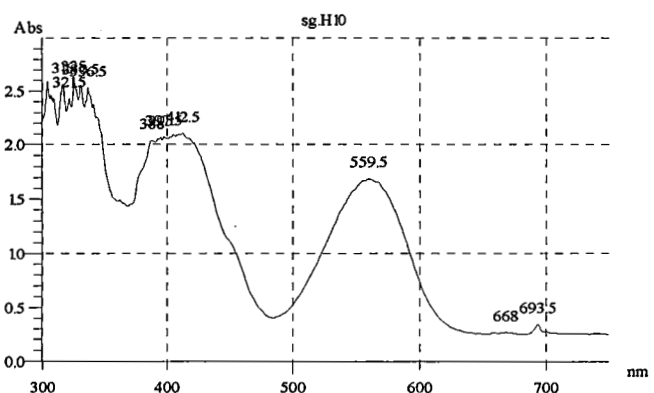
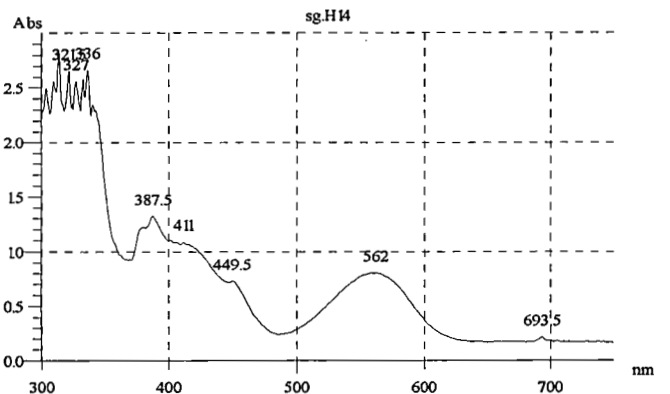
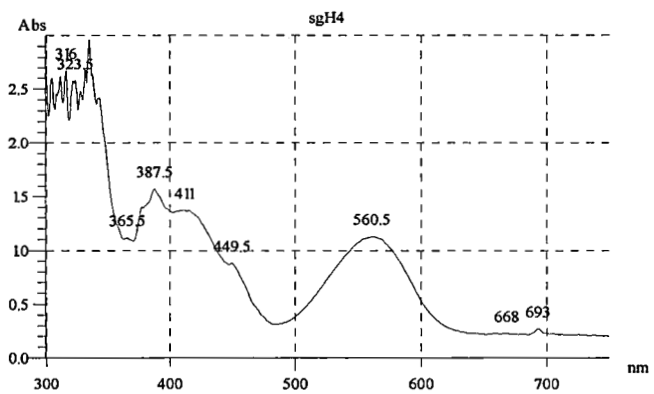
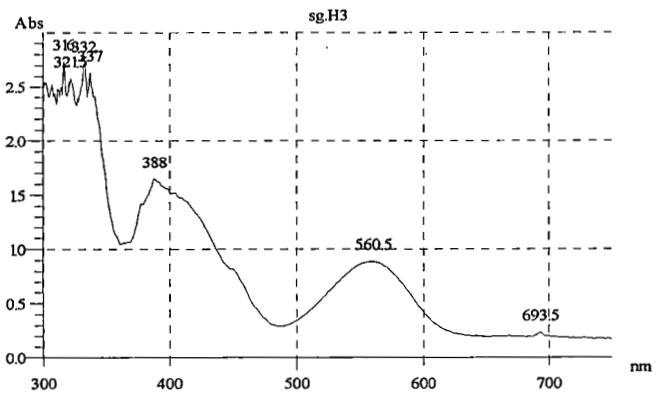
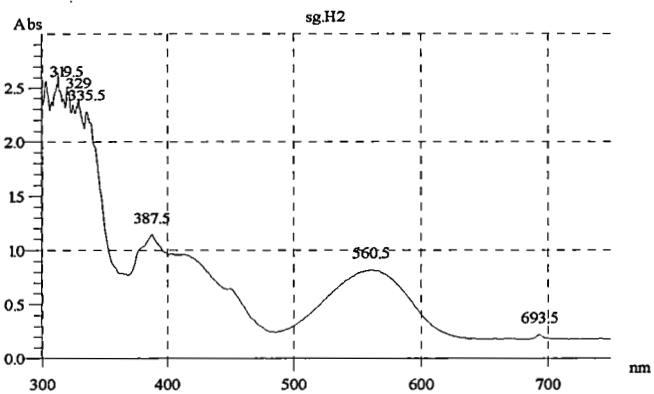
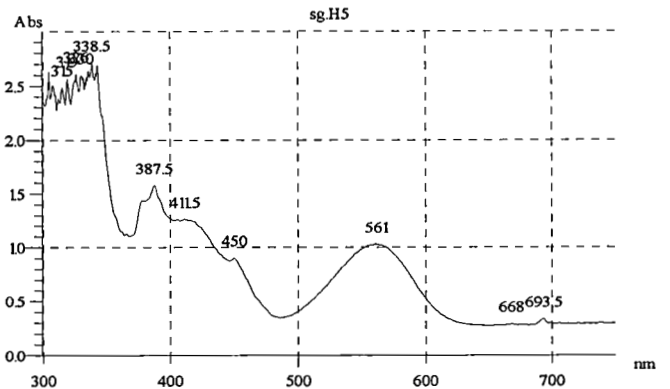
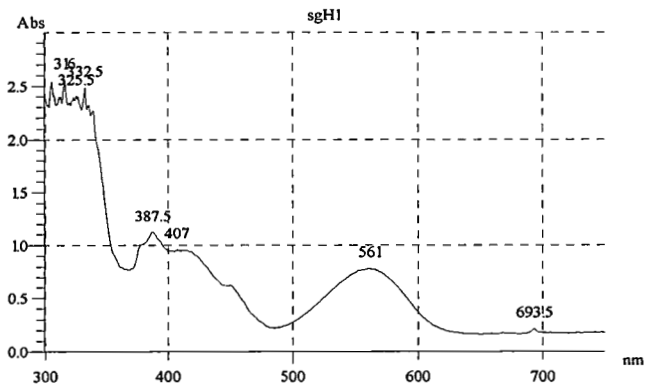
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของพอลอยทัปทิมสีแดงม่วงก่อนเผา



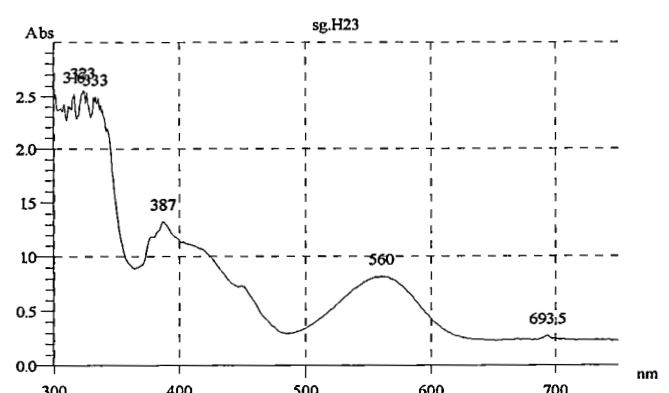
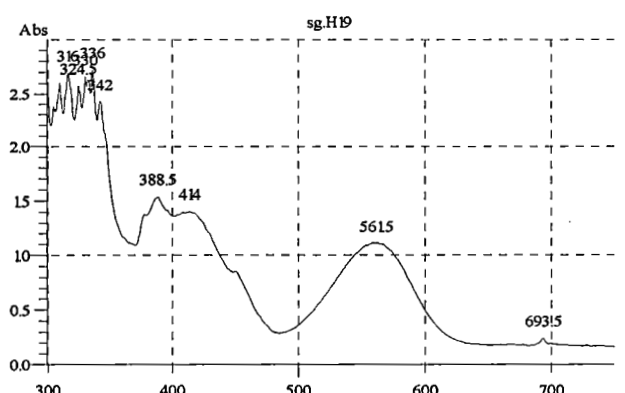
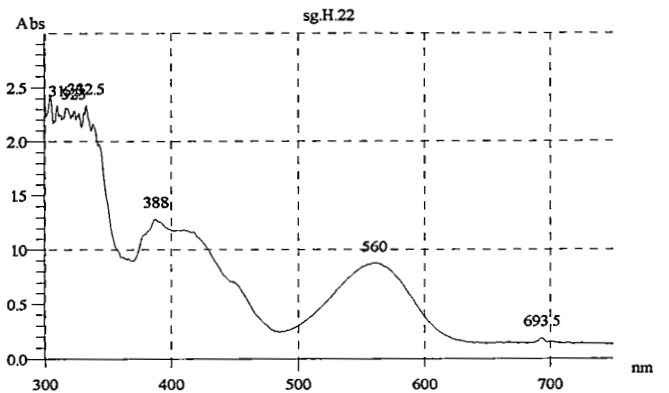
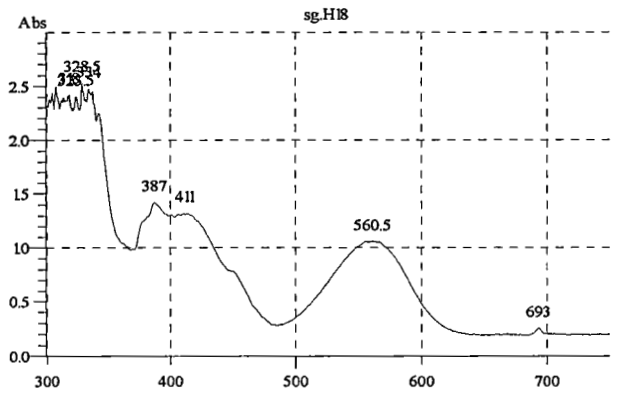
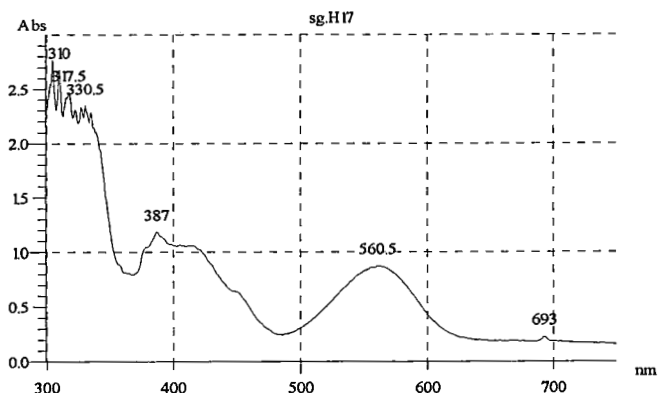
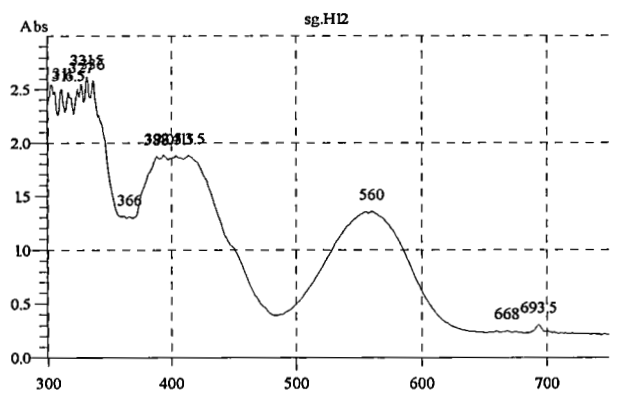
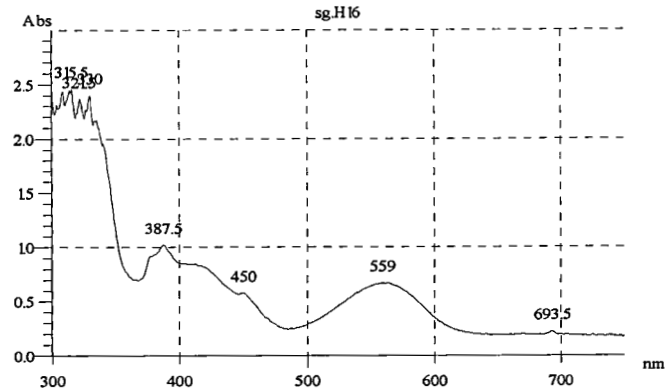
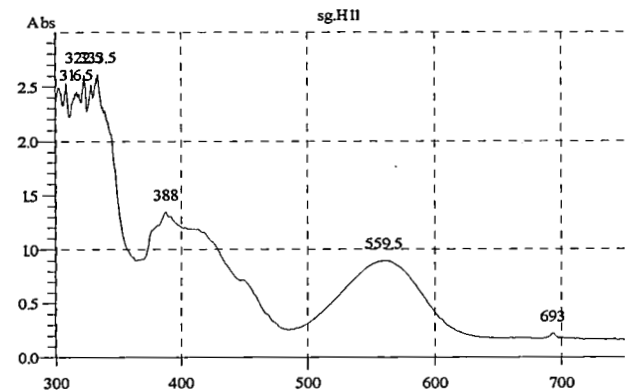
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของพอลอยทัปทิมสีแดงม่วงก่อนเผา



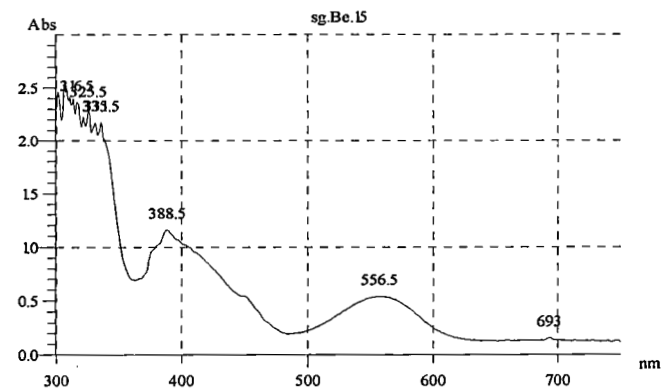
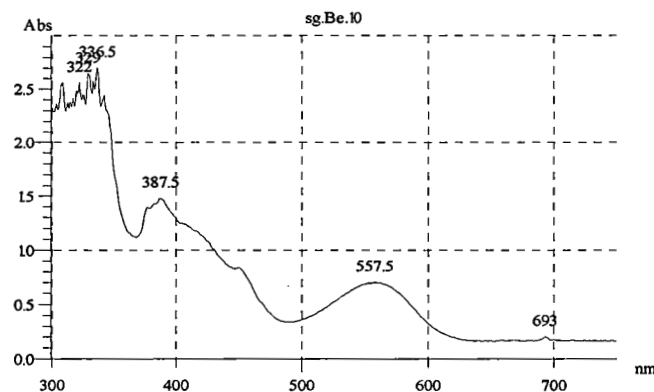
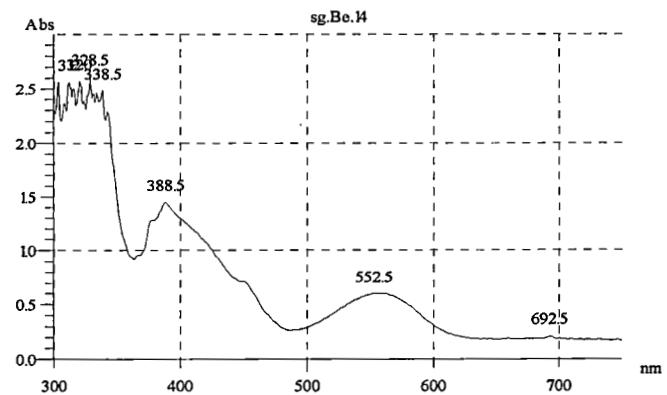
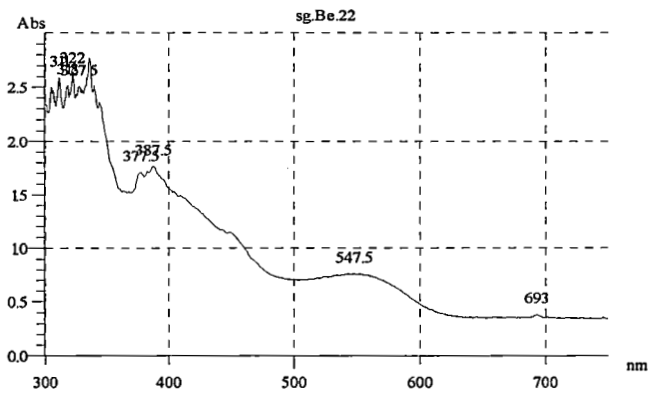
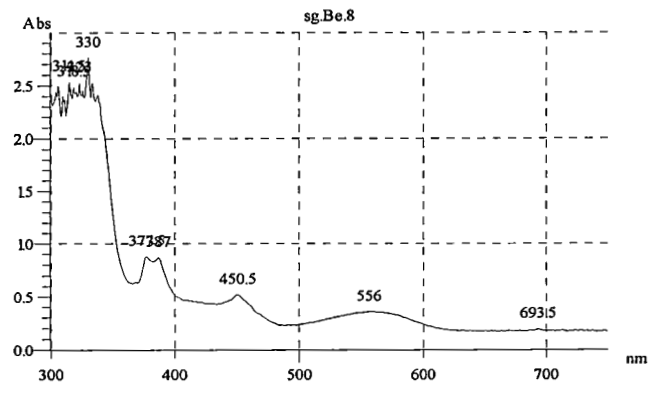
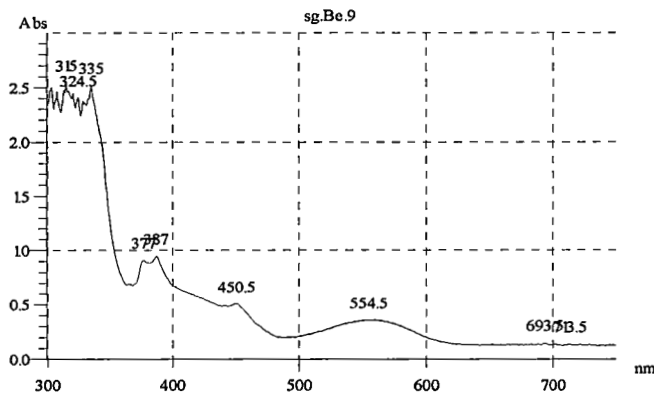
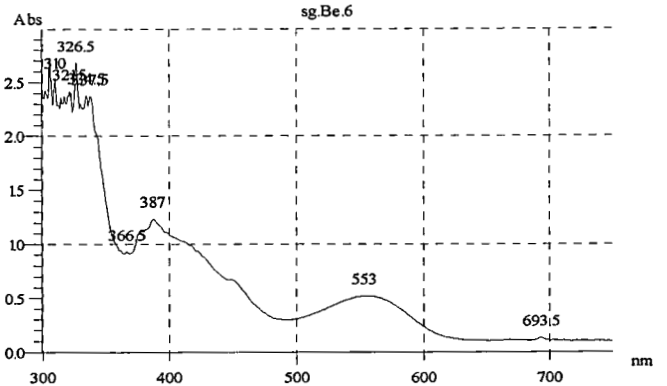
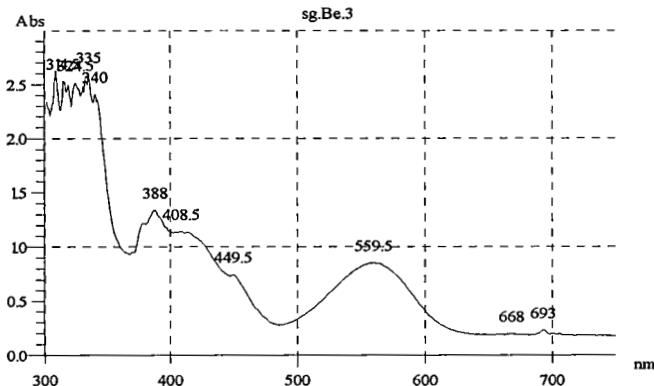
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของพอลอยทัปทิมสีแดงม่วง เผาแบบธรรมดา



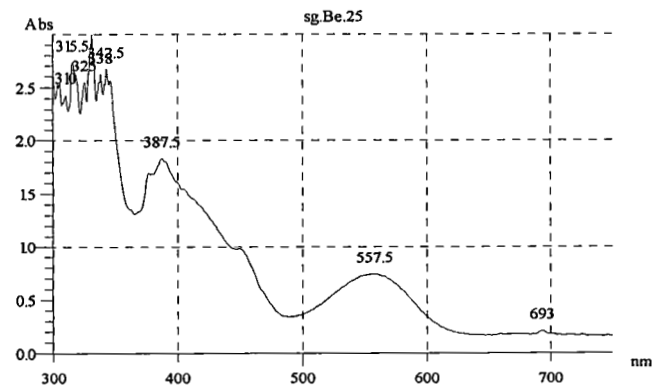
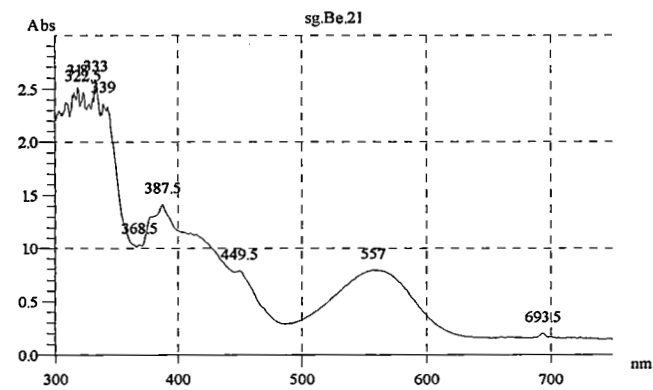
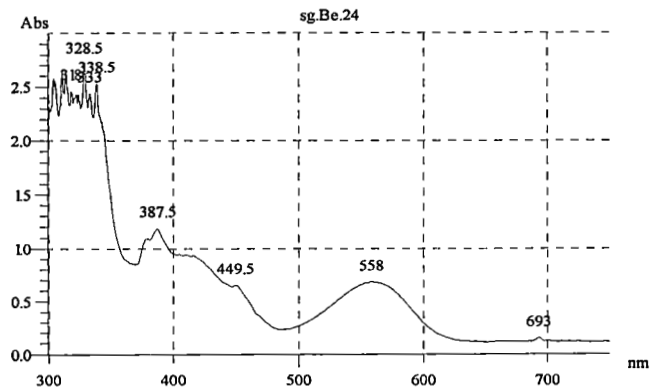
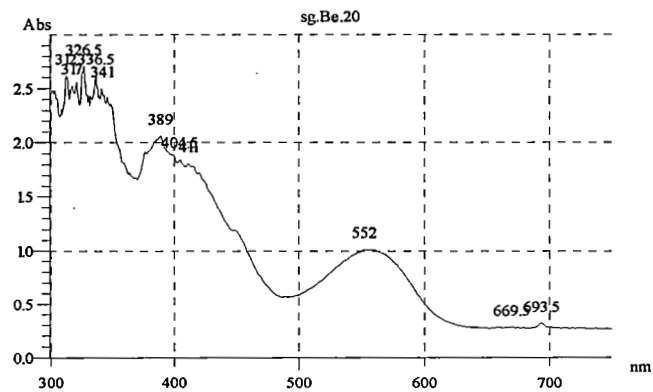
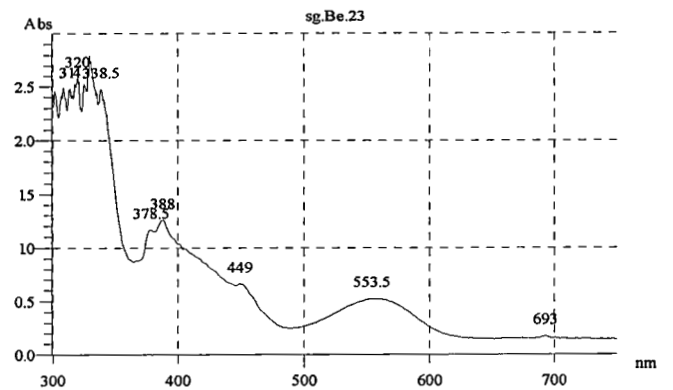
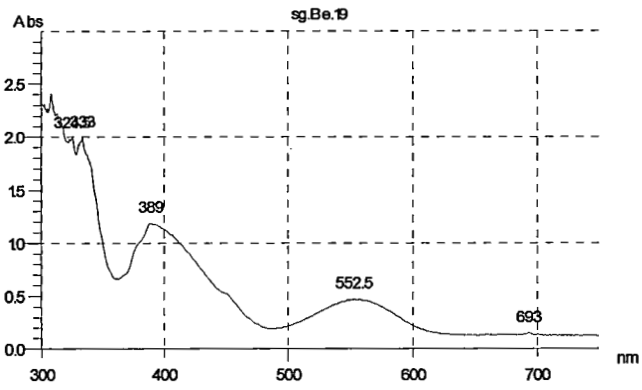
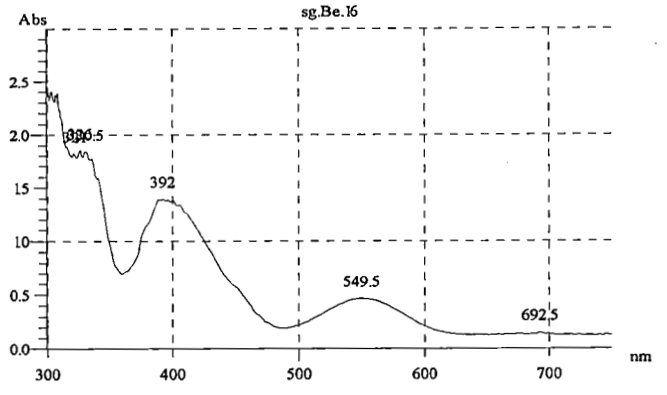
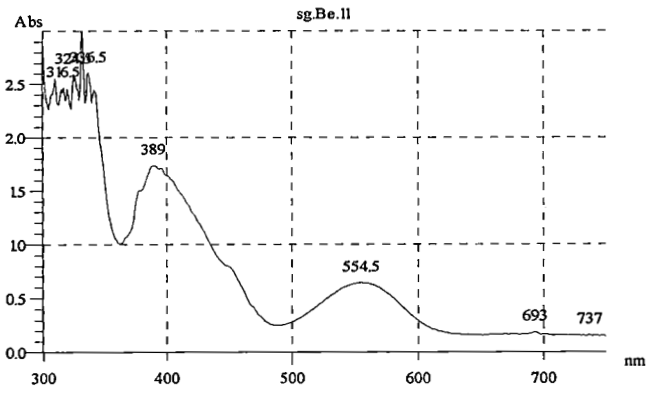
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของพอลอยทีบิทีมดีแดงม่วง เผาแบบธรรมชาติ



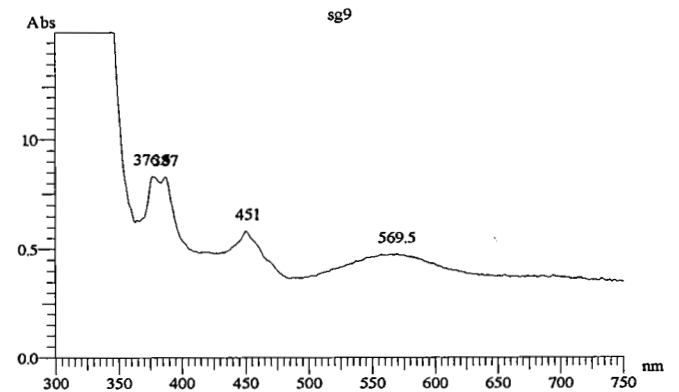
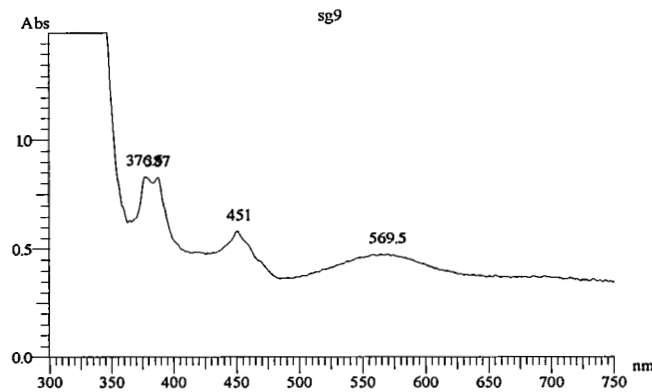
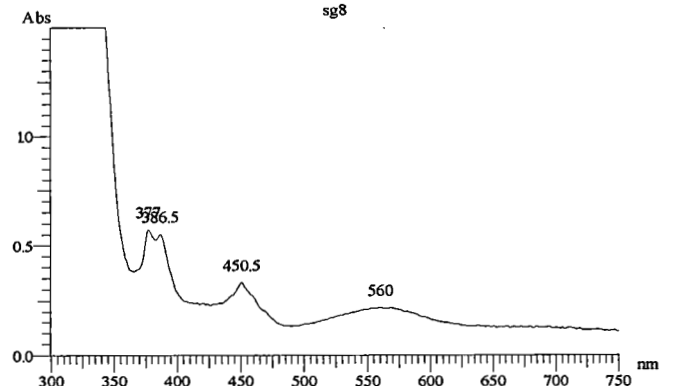
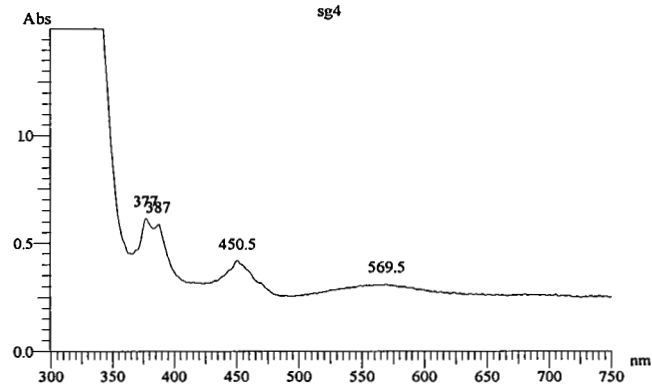
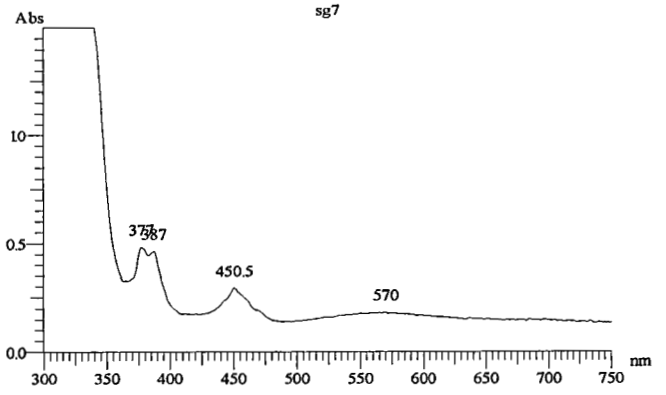
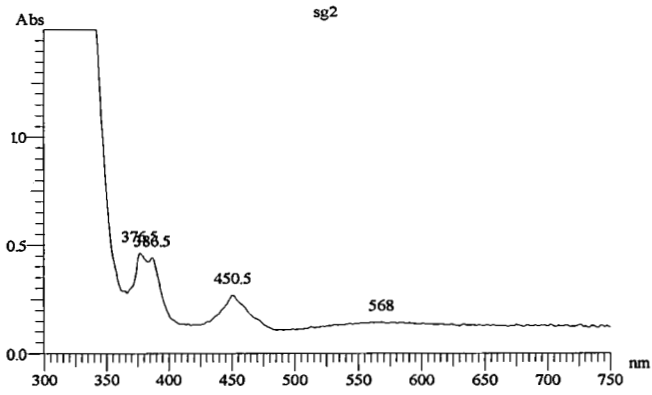
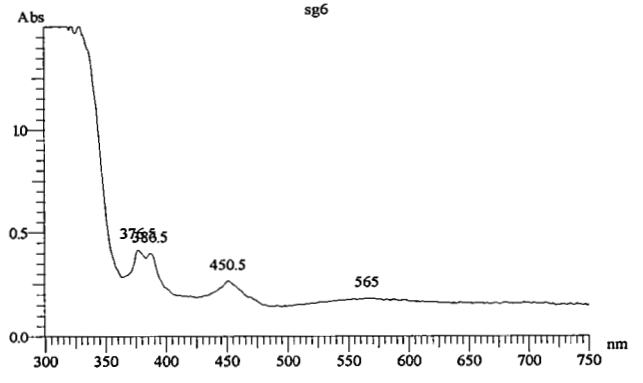
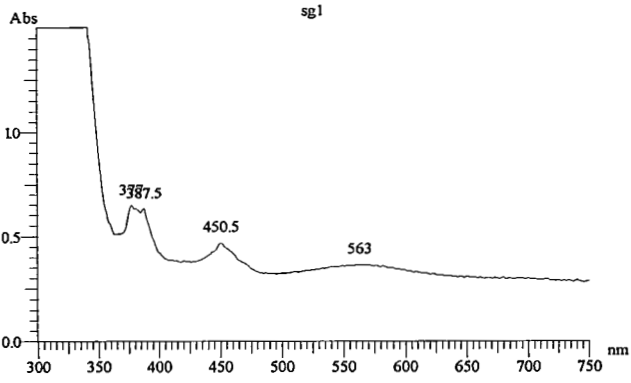
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของพอลอยทัปทิมสีแดงม่วงเผาแบบแพร่เบอริลเลียมให้สีแดงอมเหลือง



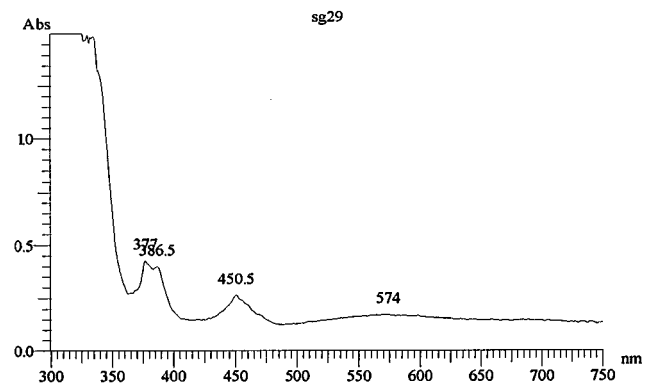
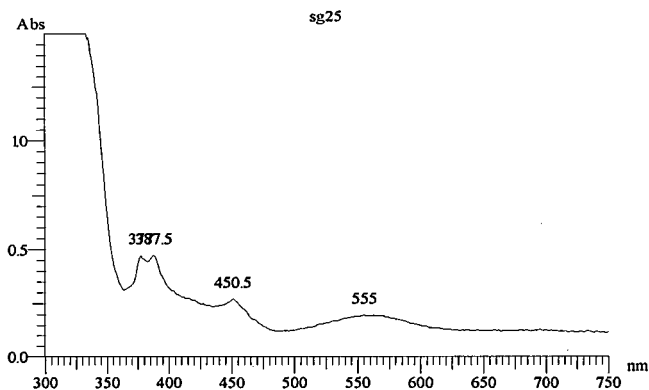
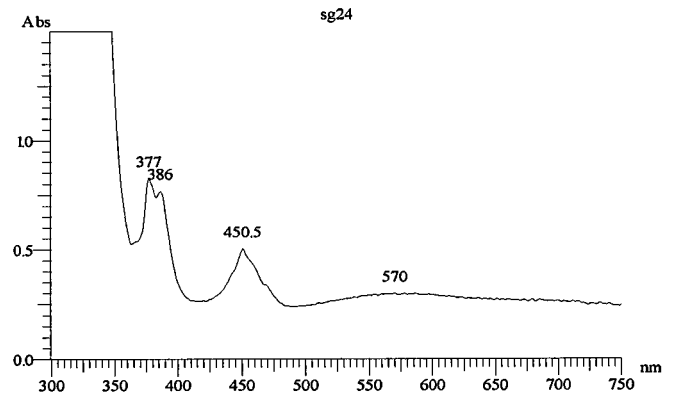
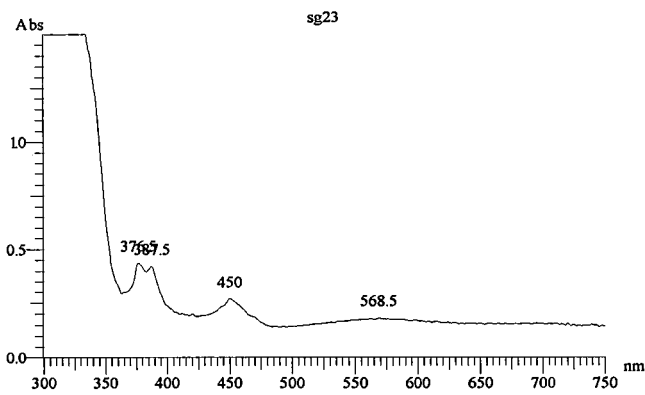
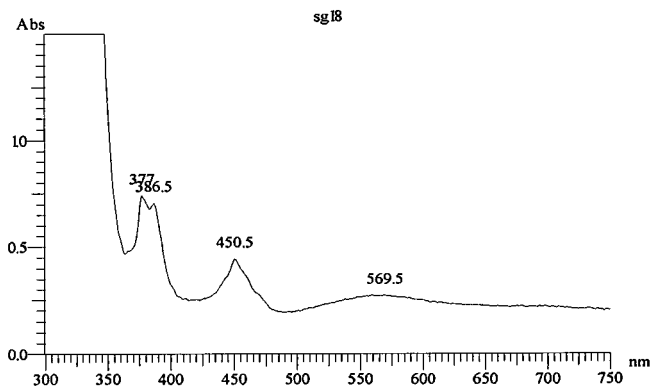
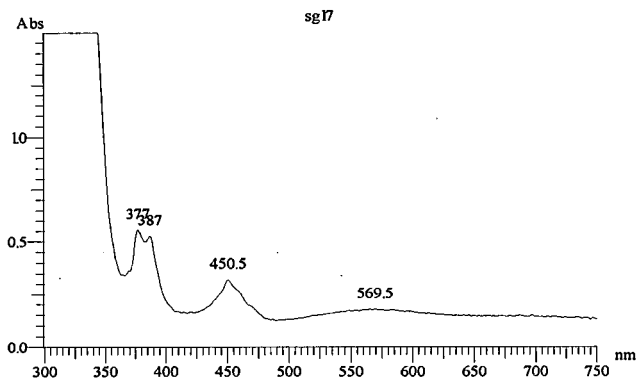
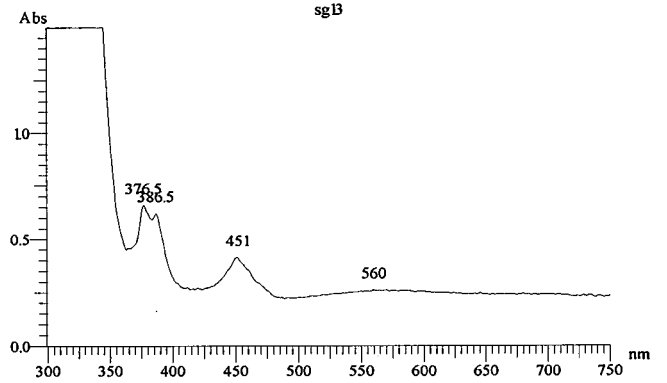
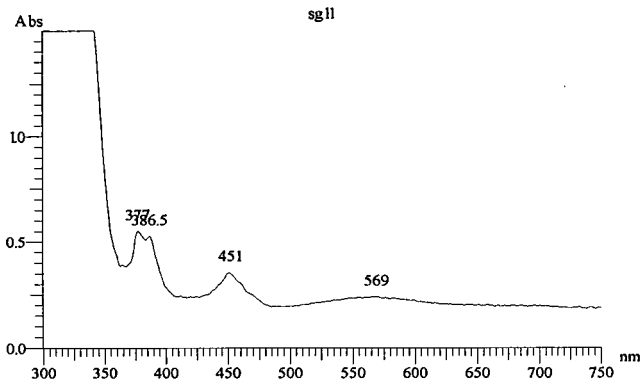
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของพอลอยทัมทิมสีแดงม่วงเผาแบบแพร์เบอร์ลิเลียมให้สีแดงอมเหลือง



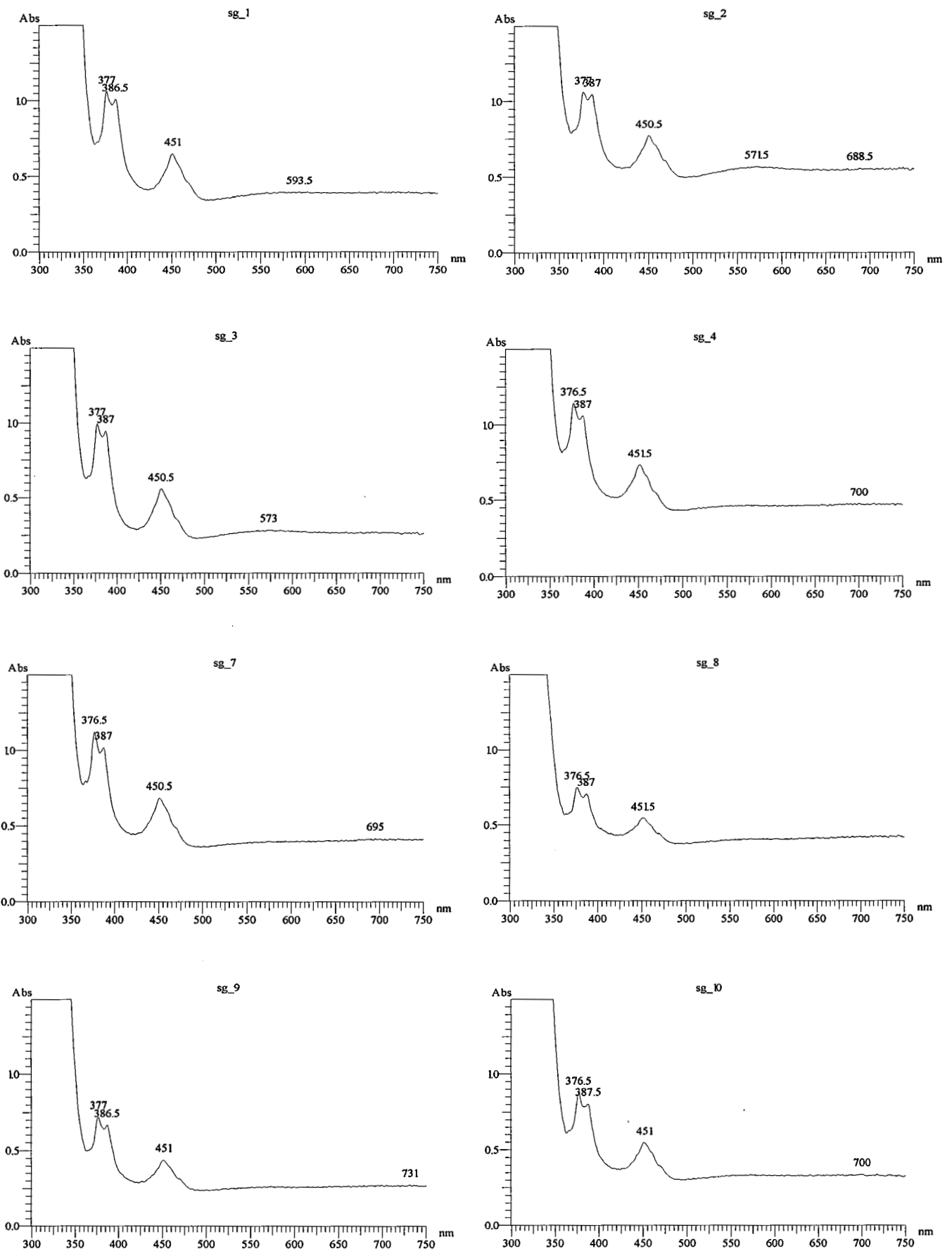
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของแซปไฟร์ของเจีย แทนซาเนีย กลุ่มไม่เผา สีเขียวอ่อน



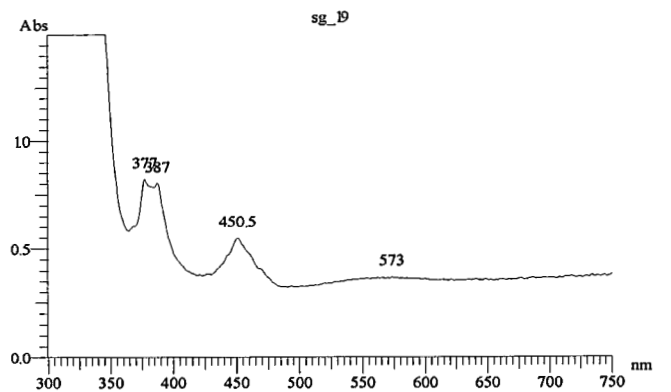
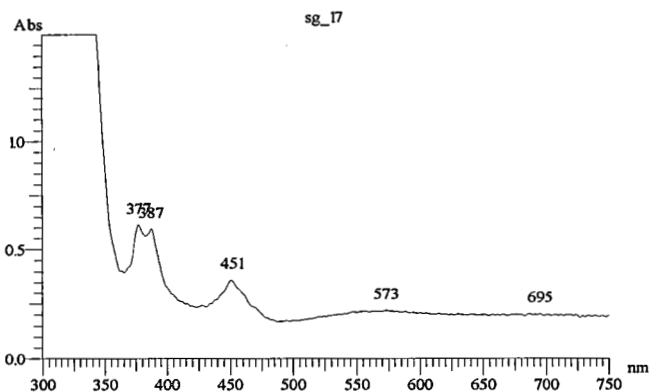
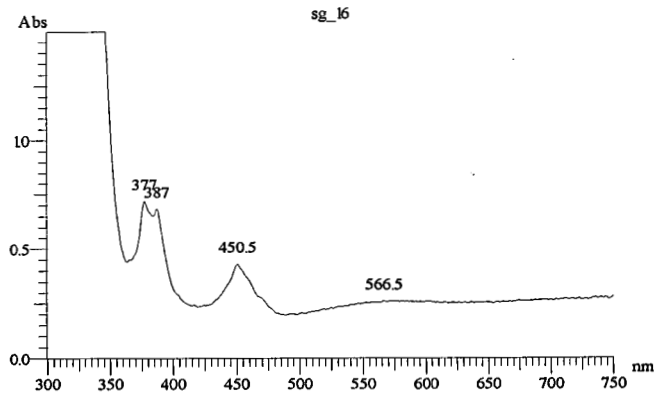
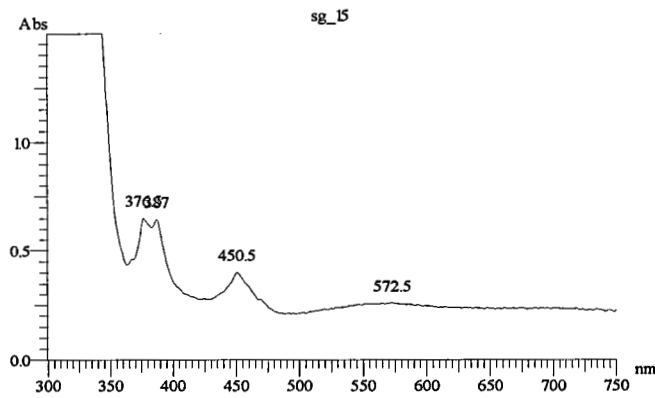
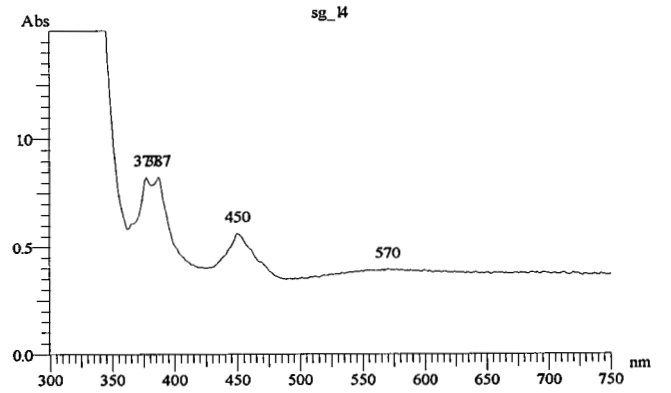
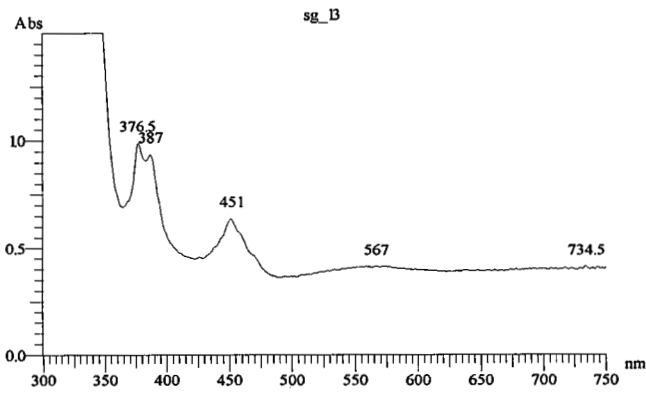
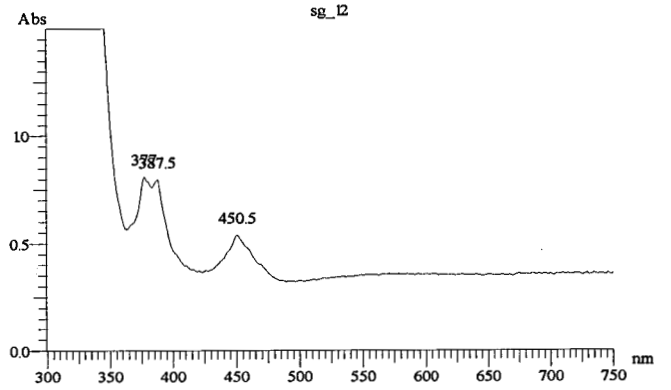
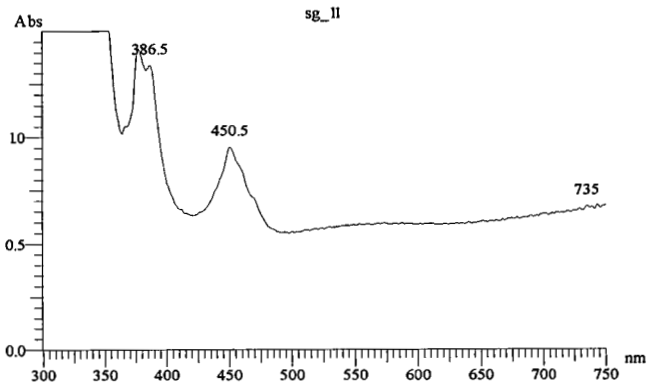
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของแซปไฟร์ของเจีย แทนซาเนีย กลุ่มไม่เผา สีเขียวอ่อน



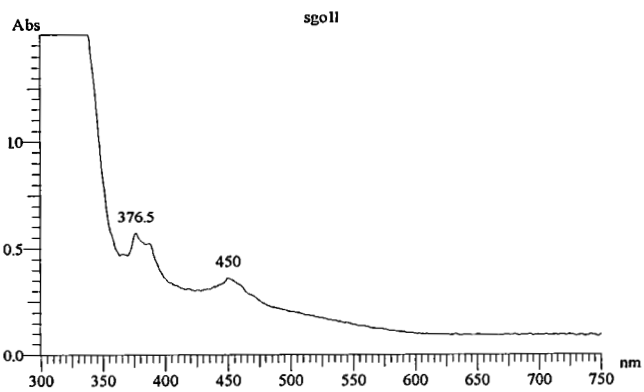
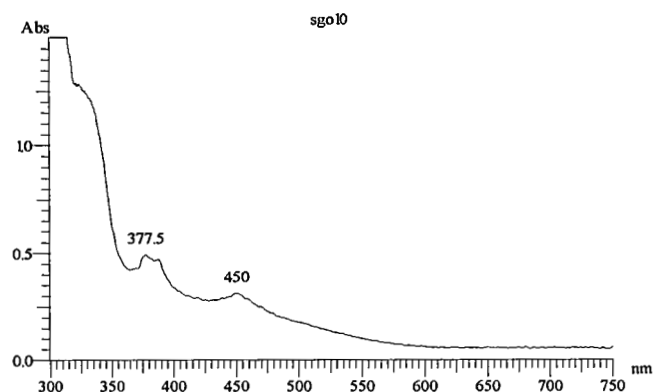
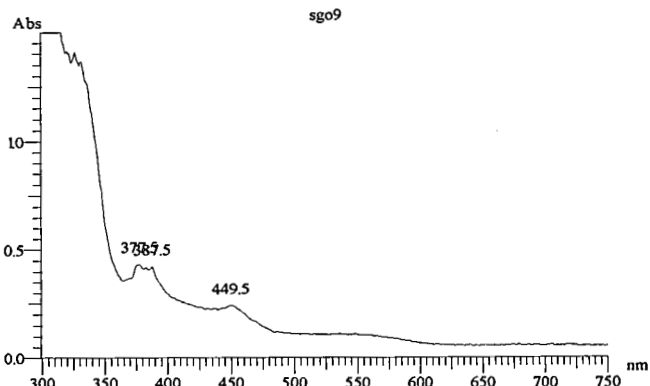
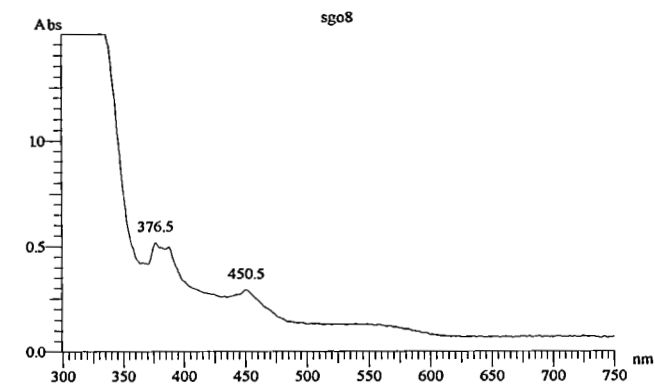
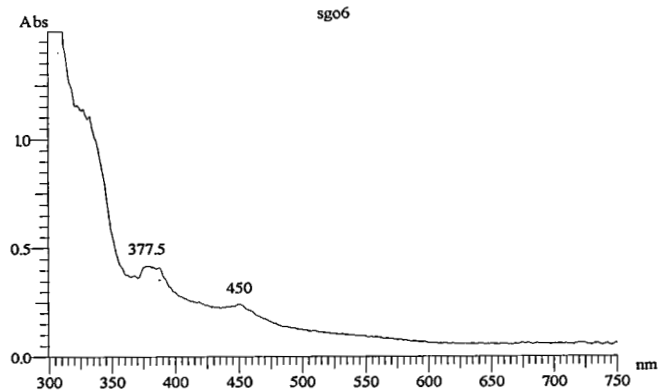
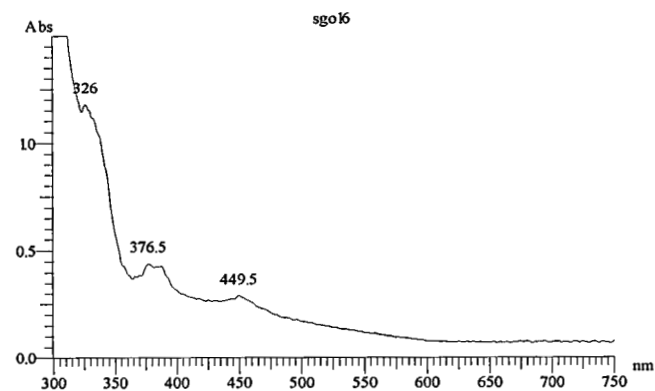
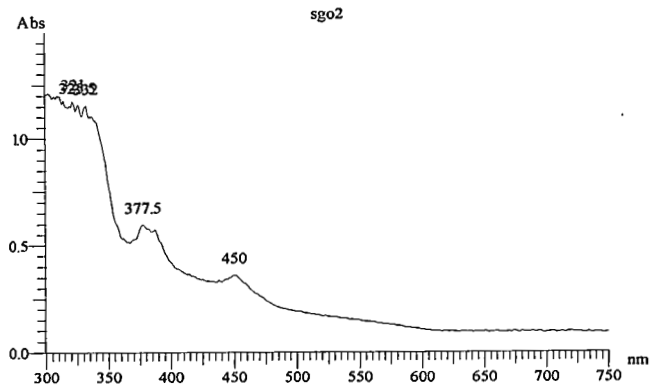
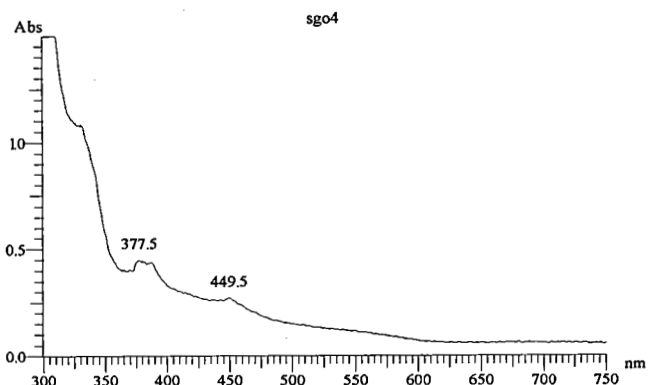
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของแซปไฟร์ของเจีย แทนชานีเย เผาแบบธรรมดา สีเขียวอ่อน



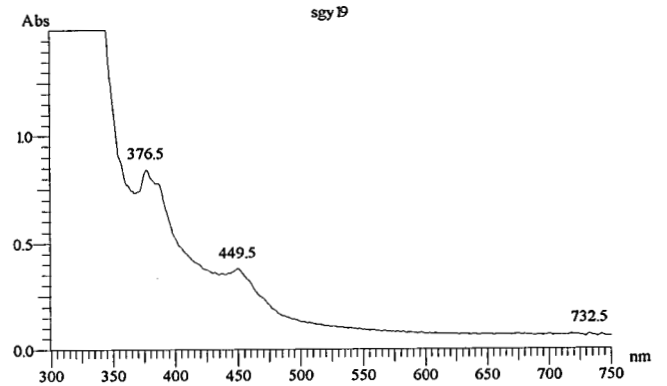
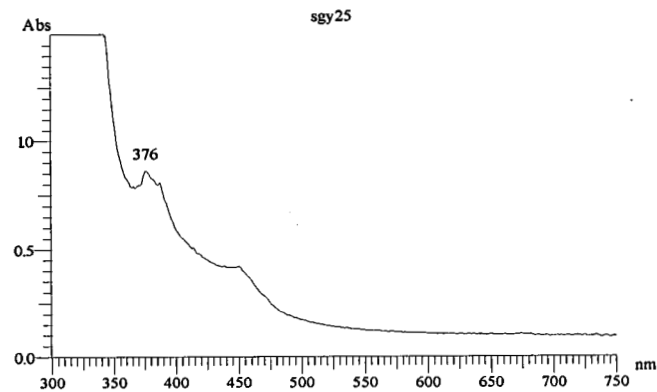
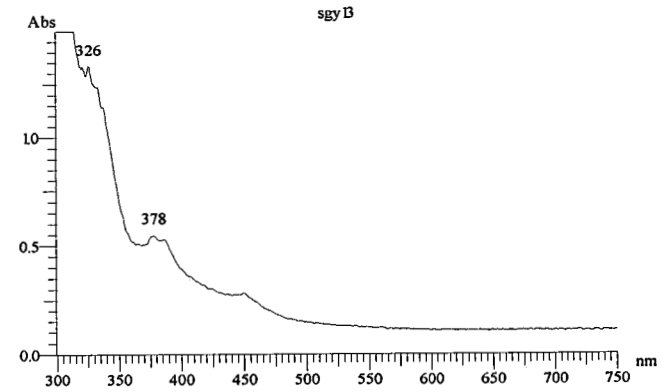
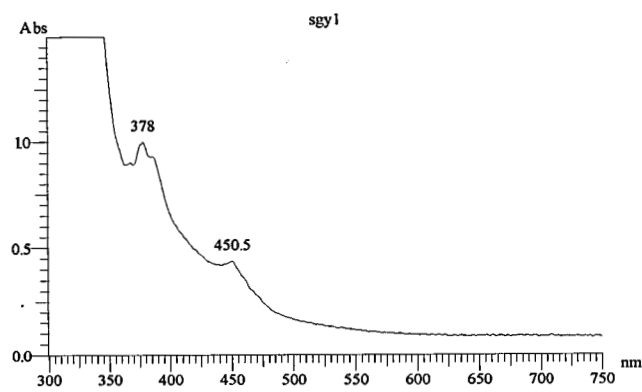
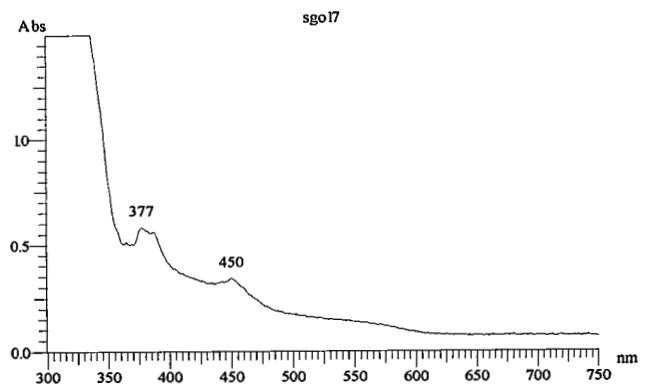
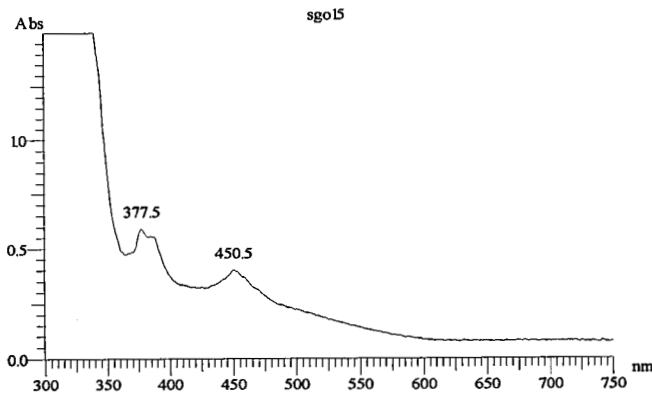
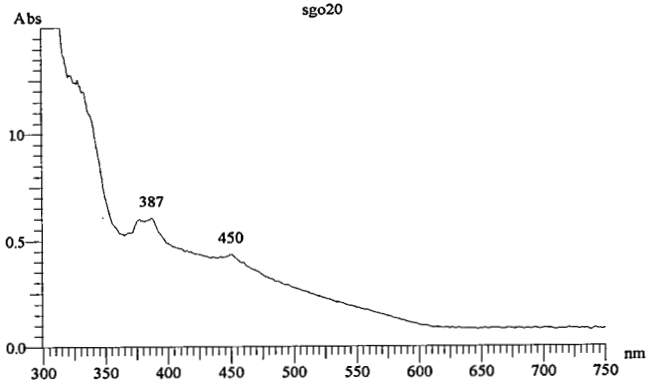
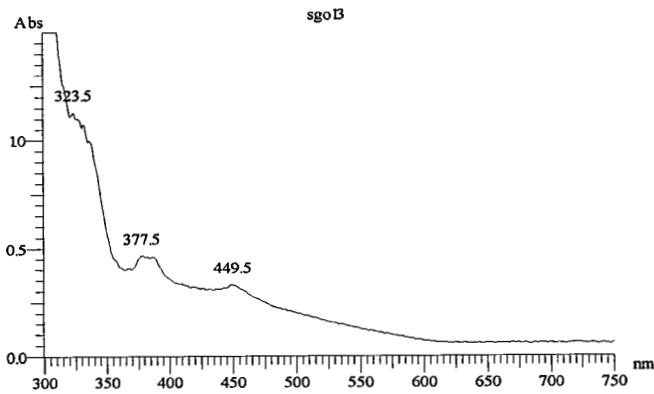
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเซปไฟร์ของเจีย แทนซาเนีย เผาแบบธรรมชาติ สีเขียวอ่อน



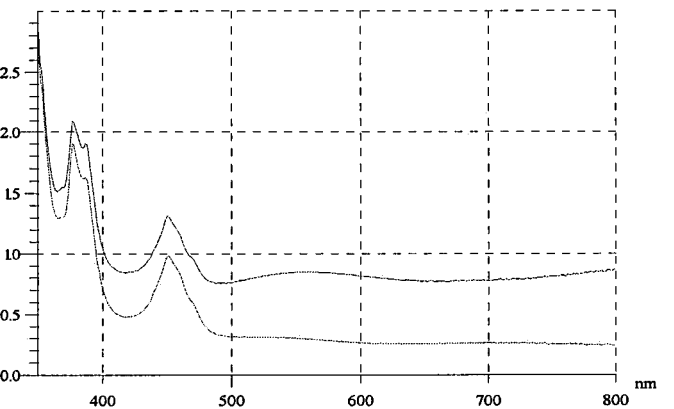
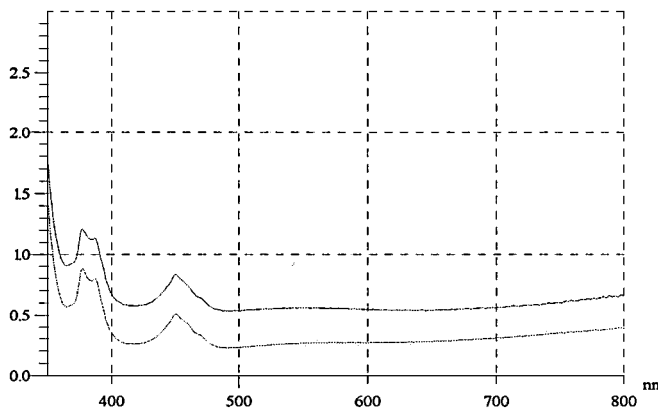
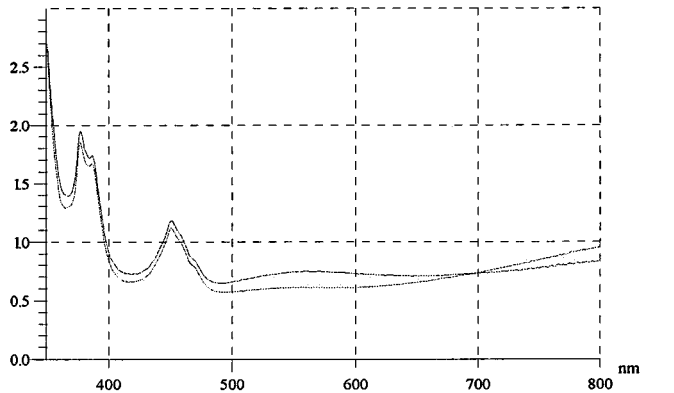
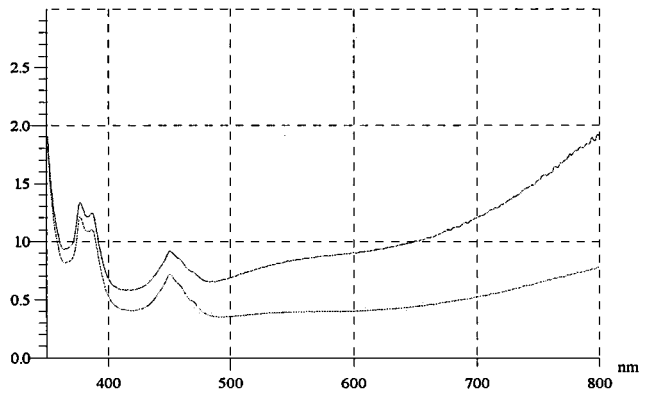
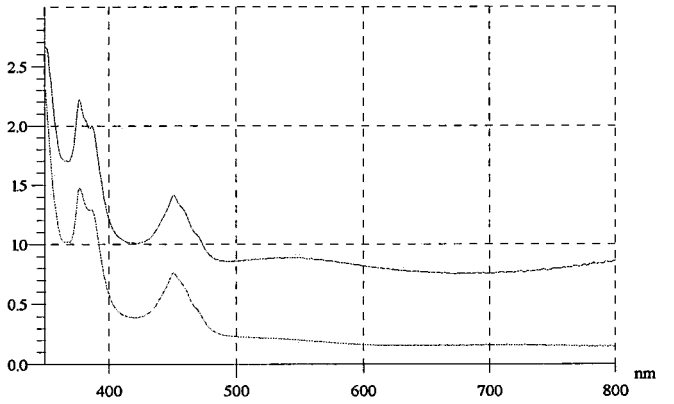
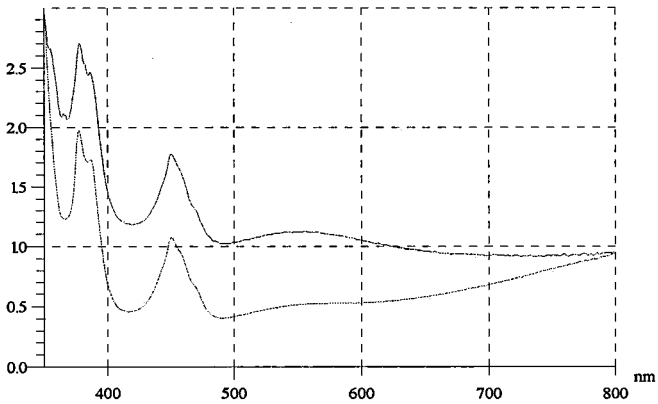
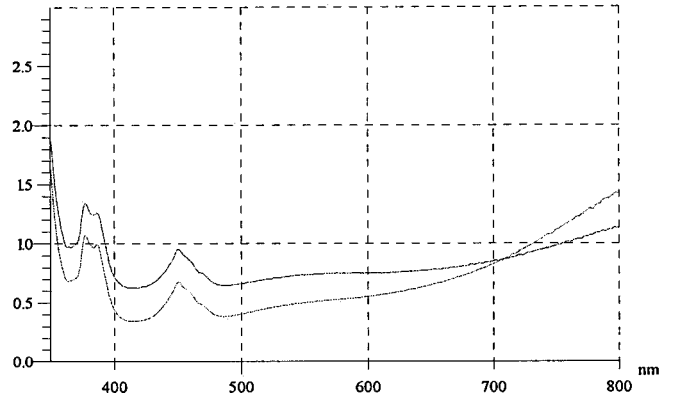
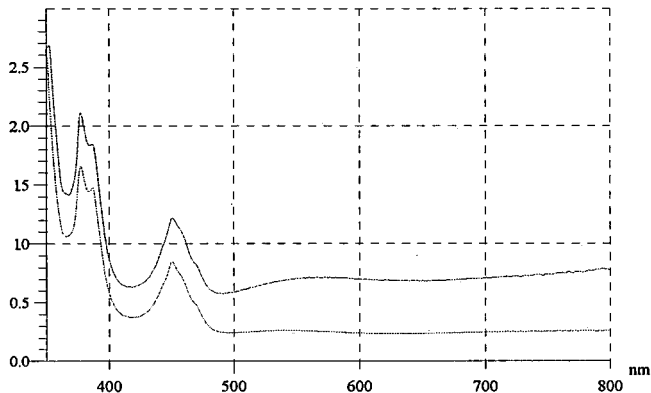
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเซปไฟร์ของเจีย แทนซาเนีย เผาแบบแพร์เบอร์ลิลเดียม ให้สีเหลือง



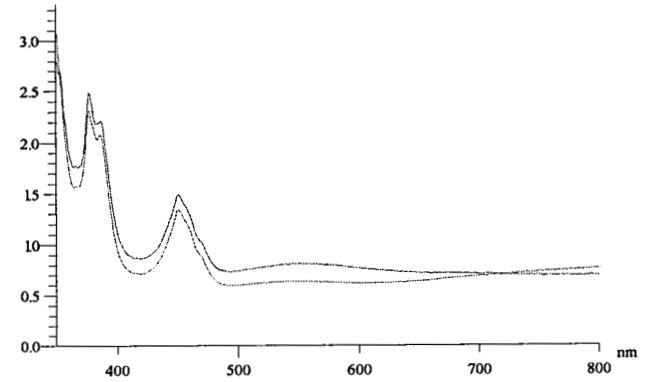
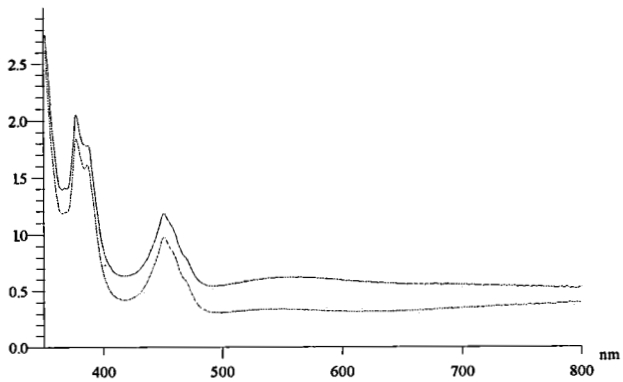
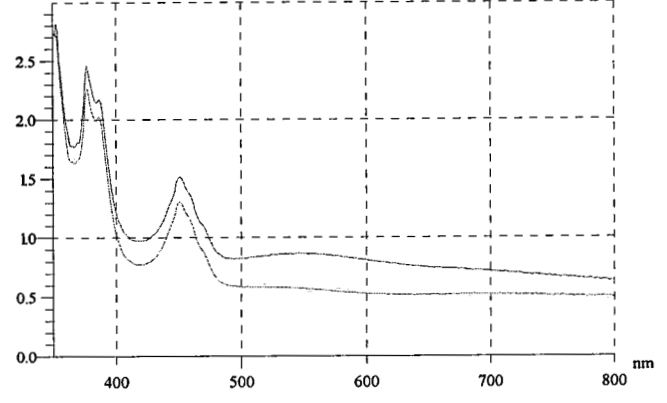
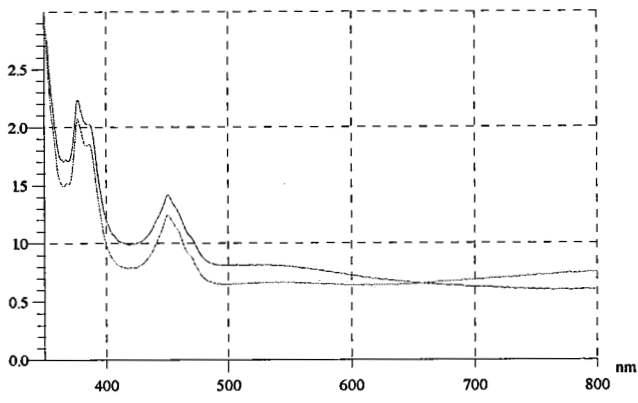
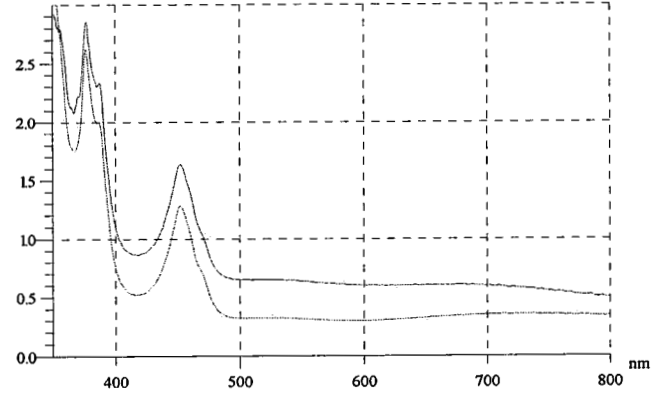
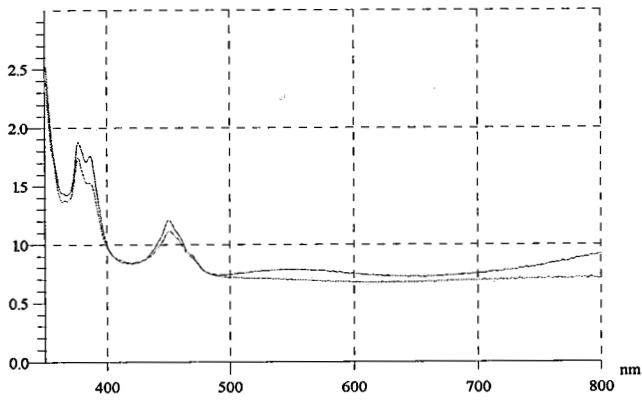
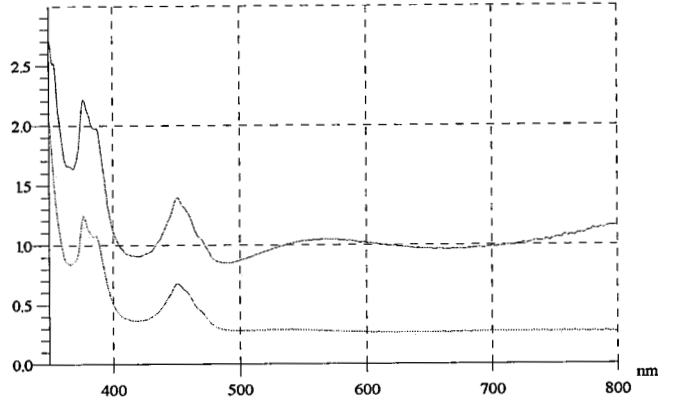
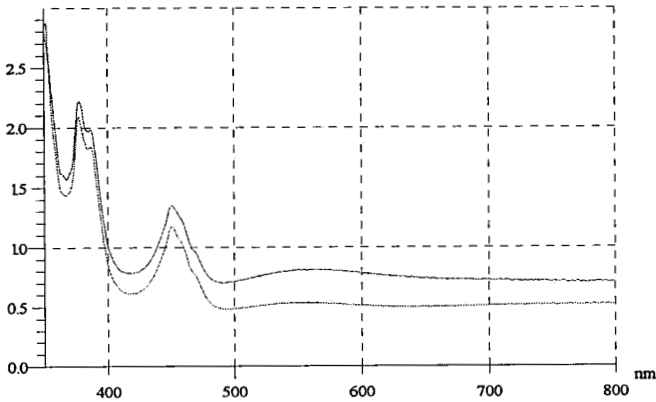
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของแซปไฟร์ของเจีย แทนซาเนีย ผ่าแบบแพร์เบอร์ิลเลียม ให้สีเหลือง



พลอยบางกะจะ เปรียบเทียบไม่เผากับเผาแบบแพรวเบอริดเลียม(เส้นล่าง)



พลอยบางกะจะ เปรียบเทียบไม่เผากับเผาแบบแพร่เบอริลเลียม(เส้นล่าง)



พลอยบางกะจะ เปรียบเทียบไม่เผากับเผาแบบธรรมดา(เส้นล่าง)

