



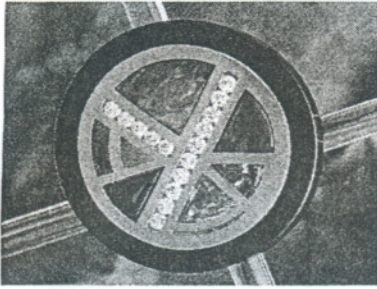
# อัญมณีฉายรังสี



จัดทำโดย สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ

กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

ห้องสมุดพลังงานปรมาณู  
สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ



เครื่องประดับซึ่งได้รับรางวัลที่ 1 ใน Division 1 ในการประกวดเครื่องประดับพลอยประจำปี 1992 ของสมาคม American Gem Trade Association เข็มกลัดนี้ออกแบบโดย Maria Christin Canale จากบริษัท Suna Brothers เป็นการนำเอาออปอลสีดำ ท้วมาลีน(สีชมพู, สีเขียวสด) เบลิล(สีเหลือง) แทนซาไนต์(สีม่วง) โอนิกซ์ดำ และ เพชร มาผสมผสานกันได้อย่างงดงาม

(จากหนังสือ Jewel Siam Vol 3 No 1 January-February 1992 หน้า107)

## คำนำผู้จัดทำ

กองพิสิกส์ สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ จัดทำหนังสือนี้เพื่อเผยแพร่ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับฉายรังสีอัญมณี แก่ประชาชนทั่วไป และเพื่อเป็นการรำลึกถึง คุณวัลลภ บุญคง อธิการบดีของสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติซึ่งเป็นผู้บุกเบิกงานวิจัย ค้นคว้า และทดลองด้านการฉายอัญมณีด้วยรังสีแกมมาและนิวตรอนในประเทศไทย จนสามารถนำไปบริการแก่ภาคเอกชน ก่อให้เกิดประโยชน์อย่างสูงต่ออุตสาหกรรมอัญมณีในประเทศไทย

หนังสือเล่มนี้เป็นการรวบรวมบทความและผลงานวิจัยด้านการฉายรังสีอัญมณีชิ้นใหม่ หลังจากที่ทำหนังสือเรื่อง "การเปลี่ยนแปลงสีของอัญมณีเมื่อฉายรังสี" ซึ่งจัดพิมพ์ขึ้นสำหรับแจกในงานพระราชทานเพลิงศพ คุณวัลลภ บุญคง ในปี พ.ศ. 2537 ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง จากผู้ที่เกี่ยวข้องกับกิจการอัญมณี

อนึ่ง เนื่องจากภาพประกอบในต้นฉบับเดิมไม่ชัดเจน จึงได้มีการจัดทำภาพขึ้นใหม่ หากมีข้อผิดพลาดประการใด คณะผู้จัดทำต้องขออภัยมา ณ ที่นี้

กองพิสิกส์

ปีที่พิมพ์: พ.ศ. 2543

ผู้จัดพิมพ์: สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ

ISBN 974-7400-4-3

## สารบัญ

หน้า เรื่อง

- 1 การใช้ประโยชน์ของดินก้านนิครังสี
- 6 การเปลี่ยนสีของอัญมณีเมื่อฉายรังสี
- 13 การเพิ่มคุณค่าของพลอยโดยวิธีการอาบรังสี
- 23 การใช้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อพัฒนาคุณภาพของรัตนชาติ
- 37 การเสริมคุณภาพของโทแพสด้วยการอาบนิวตรอน
- 39 การศึกษาธาตุปริมาณน้อยในโทปาซ
- 46 การศึกษาเบื้องต้น ความสัมพันธ์ระหว่างธาตุองค์ประกอบกับสีของท้วมาลีน
- 56 การวิเคราะห์ท้วมาลีนด้วยเทคนิคการวาวรังสีเอกซ์

## การใช้ประโยชน์ของต้นกำเนิดรังสี

วัลลภ บุญคง

ต้นกำเนิดรังสีที่กล่าวในที่นี้หมายถึง ทุกสิ่งที่ให้รังสีในรูปร่างสีแอลฟา เบตา แกมมา รังสีเอกซ์ และนิวตรอน อาจแบ่งต้นกำเนิดรังสีออกเป็น 2 แบบ คือ ต้นกำเนิดแบบไอโซโทป และต้นกำเนิดรังสีแบบเครื่องมือนิวเคลียร์ ต้นกำเนิดรังสีแบบไอโซโทปได้จากไอโซโทปรังสีต่างๆ ซึ่งอาจใช้ประโยชน์จากรังสีที่ได้จากไอโซโทปรังสีนั้นโดยตรง หรือให้รังสีจากไอโซโทปนั้นทำปฏิกิริยากับวัสดุอื่น แล้วให้รังสีที่ต้องการใช้ประโยชน์ออกมาอีกทีหนึ่งก็ได้ เช่น ต้นกำเนิดรังสีโคบอลต์-60 ใช้รังสีแกมมาจากโคบอลต์-60มาใช้ประโยชน์โดยตรง ต้นกำเนิดรังสีโพรมิเทียม-147/อะลูมิเนียม ทำขึ้นจากผสมโพรมิเทียม-147 เข้ากับอะลูมิเนียม รังสีเบตาจากโพรมิเทียม-147 จะสังสรค์กับอะลูมิเนียมแล้วให้เอกซ์เรย์ที่นำมาใช้ประโยชน์ หรือต้นกำเนิดนิวตรอนอเมอริเซียม/เบอริลเลียม ทำมาจากไอโซโทป อเมอริเซียม-241 ผสมกับธาตุเบอริลเลียม รังสีแอลฟาจากอเมอริเซียม-241 จะทำปฏิกิริยากับเบอริลเลียม แล้วให้นิวตรอนที่นำไปใช้ประโยชน์ เป็นต้น ต้นกำเนิดรังสีแบบเครื่องมือนิวเคลียร์ ได้แก่ เครื่องผลิตรังสีเอกซ์จากหลอดเอกซ์เรย์ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูและเครื่องเร่งอนุภาคต่างๆ เช่น เครื่อง เร่งอนุภาคอิเล็กตรอนและไซโคลตรอน เป็นต้น

การใช้ประโยชน์ของต้นกำเนิดรังสี ซึ่งเป็นที่ยอมรับมากที่สุดจะเป็นการใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ เช่น การใช้รังสีจากหลอดเอกซ์เรย์ในการตรวจวินิจฉัยโรคของแพทย์ ซึ่งประชาชนทั่วไปจะให้แพทย์ตรวจด้วยเอกซ์เรย์โดยไม่หวาดกลัว หรือการใช้รังสีแกมมาจากต้นกำเนิดโคบอลต์-60 ฉายรักษาโรคมะเร็ง เป็นต้น การวิจัยทางฟิสิกส์ซึ่งประยุกต์ใช้ต้นกำเนิดรังสีเป็นการวิจัยเพื่อให้ได้ข้อมูลและผลผลิตซึ่งเป็นประโยชน์ทางด้านการเกษตร อุตสาหกรรม ทรัพยากรแร่ ข้อมูลทางธรณีวิทยา และการปรับปรุงคุณภาพวัสดุ เป็นต้น ปัจจุบันการค้นคว้าวิจัยและพัฒนาในนานาประเทศ ได้ใช้ประโยชน์ของต้นกำเนิดรังสีมาใช้ในการสำรวจ และนำทรัพยากรทางด้านพลังงานและแร่มาใช้ประโยชน์อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเทคนิคต่างๆ เช่น เทคนิคการ

กระเจิงของรังสีแกมมา การสะท้อนกลับ การทะลุผ่านของรังสีแกมมา และเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแบบไอโซโทป เป็นส่วนใหญ่ในการวิเคราะห์ทางด้านพลังงาน และแร่ มีการใช้นิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูในเทคนิคการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชันอย่างกว้างขวาง

การวิจัยที่ใช้ประโยชน์ของต้นกำเนิดรังสี ซึ่งกองฟิสิกส์กำลังดำเนินการอยู่ตามความเหมาะสมกับกำลังคน ความรู้ ความสามารถของนักวิทยาศาสตร์ งบประมาณ และความต้องการใช้ประโยชน์ของการวิจัยแบ่งได้สอดคล้องตามประเภทของต้นกำเนิดรังสีที่ใช้ ดังนี้คือ

## 1. การใช้ประโยชน์ของต้นกำเนิดรังสีแบบไอโซโทป

ได้ดำเนินการเพื่อใช้ประโยชน์ของต้นกำเนิดรังสีแบบไอโซโทปในงานวิเคราะห์วิจัยต่างๆ คือ

### 1.1 การวิจัยด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยโดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแบบไอโซโทป ที่ให้รังสีเอกซ์หรือรังสีเบตาที่เปลี่ยนเป็นให้รังสีเอกซ์ ตลอดจนต้นกำเนิดที่ให้รังสีแกมมาเป็นรังสีที่เข้ากระตุ้นตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์แล้ววัดฟลูออเรสเซนซ์ที่ได้จากตัวอย่างด้วยระบบวัดรังสีเอกซ์ชนิดกำลังแยกสูง ทำให้ทราบว่ามีธาตุอะไรในตัวอย่าง ปริมาณของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ สามารถหาได้จากความเข้มข้นของฟลูออเรสเซนซ์เอกซเรย์ที่วัดได้โดยเปรียบเทียบตัวอย่างมาตรฐาน การวิเคราะห์วิจัยในเรื่องนี้ผู้วิจัยจะต้องมีความรู้พื้นฐานทางอะตอมฟิสิกส์ โดยเฉพาะด้านเอกซเรย์ และความรู้ทางเครื่องมือนิวเคลียร์ จึงจะดำเนินการวิจัยได้

### 1.2 การวิจัยใช้ประโยชน์ของต้นกำเนิดนิวตรอนอเมอริเซียม เบอร์ลิเดียม ขนาด 50 คูรี

จุดประสงค์ของการวิจัยนี้ เพื่อพัฒนาการวิเคราะห์ โดยใช้ต้นกำเนิดนิวตรอนชนิดไอโซโทป ซึ่งมีนิวตรอนฟลักซ์น้อยกว่าเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูมาก มีข้อดี

ที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ตลอดเวลาเคลื่อนย้ายไปทำงานในที่ต่างๆได้ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานถูกกว่าเครื่องปฏิกรณ์ฯมาก และสามารถถ่ายทอดวิธีการให้ผู้ต้องการใช้ประโยชน์ไปจัดตั้งห้องปฏิบัติการได้เอง แต่จะวิเคราะห์ธาตุต่างๆ ได้น้อยชนิดกว่า และวิเคราะห์ธาตุปริมาณน้อยๆ ได้ไม่ดีเท่าการใช้นิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ฯ การวิจัยในเรื่องนี้ผู้วิจัยจะต้องมีความรู้เบื้องต้นทางนิวตรอนฟิสิกส์ นิวเคลียร์ฟิสิกส์ และเครื่องมือนิวเคลียร์

### 1.3 การปรับปรุงคุณภาพข้อมูลด้วยการฉายรังสีแกมมา

จุดประสงค์ของการวิจัยนี้ เพื่อปรับปรุงข้อมูลราคาถูก เนื่องจากสีไม่เป็นที่นิยมของตลาด ส่วนมากจะเป็นสีขาว ให้อัญมณีมีสีสวยงามขึ้นด้วยการฉายรังสีแกมมา การวิจัยในเรื่องนี้ต้องการผู้วิจัยที่มีความรู้ทางแร่ optical spectroscopy และฟิสิกส์ของของแข็ง

## 2. การใช้ประโยชน์ของต้นกำเนิดรังสีแบบเครื่องมือนิวเคลียร์

การวิจัยใช้ประโยชน์ของต้นกำเนิดรังสีแบบเครื่องมือนิวเคลียร์ใช้เครื่องมือ 2 ชนิดที่มีอยู่ คือ เครื่องผลิตเอกซเรย์ และเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

### 2.1 การวิจัยด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากเครื่องผลิตเอกซเรย์

การวิจัยนี้ใช้คุณสมบัติการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เช่นเดียวกับการเลี้ยวเบนของแสงโดยดิฟแฟรคชันเกรตติง ในการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึก วัดขนาดของอนุภาค ศึกษาวิจัยทรัพยากรแร่ โดยการจำแนกสารประกอบด้วยวิธีนี้ การวิจัยในเรื่องนี้ ผู้วิจัยควรมีความรู้ทางคริสตอลโลกราฟี

### 2.2 การวิจัยโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนนิวตรอน

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยซึ่งมีพื้นฐานคล้ายกับการวิจัยด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เพราะให้ปรากฏการณ์เลี้ยวเบนเช่นเดียวกัน ข้อแตกต่างระหว่างเทคนิคทั้งสองคือ นิวตรอนมีความสามารถสังสรรค์กับนิวเคลียสได้ดีกว่ารังสีเอกซ์ จึง

สามารถบอกตำแหน่งของนิวเคลียสได้ชัดเจนกว่า นอกจากนั้นนิวตรอนยังมีสปิน จึงสามารถสังเคราะห์ได้คัมบอสมของธาตุที่มีค่าแมกเนติกโมเมนต์สูง จึงมีความเหมาะสมในการศึกษาโครงสร้างแม่เหล็กของสาร การวิจัยนี้ต้องการผู้วิจัยที่มีความรู้ทางนิวตรอนฟิสิกส์ คริสตอลโลกราฟี ฟิสิกส์ของของแข็ง วัสดุศาสตร์ และเครื่องมือนิวเคลียร์

### 2.3 การวิจัยด้วยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน

การวิจัยนี้เป็นการใช้นิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเข้าทำปฏิกิริยากับตัวอย่าง ธาตุที่อยู่ในตัวอย่างจะจับนิวตรอนเป็นสารไอโซโทปรังสี ซึ่งมีอายุครึ่งชีวิตแตกต่างกัน และให้รังสีแกมมาที่มีขนาดพลังงานแตกต่างกัน ทำให้สามารถจำแนกได้ว่ามีไอโซโทปรังสีของธาตุใดเกิดขึ้น และสามารถตรวจหาปริมาณของธาตุที่ต้องการทราบได้โดยนิยมเปรียบเทียบความเข้มของรังสีจากสารมาตรฐาน การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้มีประโยชน์ในงานสาขาต่างๆ มาก เพราะสามารถตรวจวิเคราะห์ธาตุต่างๆ ได้หลายชนิดด้วยความเร็วและแม่นยำ การตรวจหาธาตุบางอย่างซึ่งไม่สามารถตรวจหาได้อย่างถูกต้องและรวดเร็วด้วยวิธีอื่น สามารถตรวจวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ได้รวดเร็ว การวิจัยโดยใช้เทคนิคนี้มีประโยชน์ในการสำรวจทรัพยากร ข้อมูลของธาตุในดินและวัสดุต่างๆ สามารถใช้เป็นวิธีการสนับสนุนการควบคุมคุณภาพของวัสดุ การปฏิบัติงานในเรื่องนี้ต้องใช้ความรู้ทางนิวตรอนและนิวเคลียร์ฟิสิกส์ ความรู้ในสาขาที่กำลังทำการวิจัยและเครื่องมือนิวเคลียร์

### 2.4 การวิจัยโดยการวัดรังสีแกมมาฉับพลันจากปฏิกิริยาควมนิวตรอน

การวิจัยนี้เพื่อให้ได้วิธีวิเคราะห์โดยการวัดรังสีแกมมาฉับพลันจากปฏิกิริยาควมนิวตรอน รังสีแกมมาที่ได้ทันทีจากปฏิกิริยาการจับควมนิวตรอนจะเป็นสิ่งที่บอกถึงชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างที่นำมาทดลอง ปริมาณของธาตุที่มีในตัวอย่างสามารถหาได้จากความเข้มของรังสีแกมมาของตัวอย่างกับสารมาตรฐาน การวิจัยนี้จะได้วิธีการเสริมการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอกติเวชัน โดยสามารถวิเคราะห์ธาตุเบาๆ ที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีนิวตรอนแอกติเวชันธรรมดา ผู้วิจัยในเรื่องนี้จะต้องใช้

ความรู้ทางด้านควบคุมนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูให้เป็นลำนิวตรอน รู้จัก  
กำลังนิวตรอน มีความรู้ทางด้านนิวเคลียร์ฟิสิกส์ และเครื่องมือนิวเคลียร์

## 2.5 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

การวิจัยในเรื่องนี้เป็นการดำเนินการเริ่มจากการออกแบบเครื่องกำลัง  
ลำนิวตรอน การกำลังนิวตรอน และการใช้ลำนิวตรอนส่องไปยังตัวอย่างที่ต้องการถ่าย  
ภาพผ่านไปยังแผ่นโลหะที่จับกุ่มนิวตรอนได้ดี และให้รังสีแกมมาไปยังฟิล์มถ่ายภาพ  
อีกทีหนึ่ง การถ่ายภาพจากนิวตรอนจะสามารถถ่ายภาพที่ไม่สามารถถ่ายได้ดีด้วยรังสี  
แกมมาและเอกซ์เรย์ เนื่องจากนิวตรอนสามารถผ่านทะลุวัสดุต่างๆได้ดีกว่า ผู้ปฏิบัติงาน  
งานด้านนี้ควรมีความรู้ทางควบคุมลำนิวตรอน คุณสมบัติของนิวตรอน นิวเคลียร์  
ฟิสิกส์ การถ่ายภาพและความรู้ทางวัสดุต่างๆ

## 2.6 การปรับปรุงคุณภาพอัญมณีด้วยการฉายนิวตรอน

การวิจัยในเรื่องนี้มีจุดหมายเช่นเดียวกับการปรับปรุงคุณภาพอัญมณี  
ด้วยการฉายรังสีแกมมา แต่การฉายรังสีนิวตรอนมีส่วนที่ดีกว่าในด้านสีของอัญมณีจะ  
เกิดเข้มกว่า แต่มีข้อไม่ดีที่อาจเกิดสารรังสีขึ้นในอัญมณี และจะต้องเก็บอัญมณีที่ฉาย  
นิวตรอนไว้จนรังสีหมดไปก่อนจะนำไปใช้ประโยชน์ ผู้ทำการวิจัยด้านนี้นอกจาก  
ต้องการความรู้เช่นเดียวกับการปรับปรุงคุณภาพอัญมณีด้วยรังสีแกมมาแล้ว ยังต้องมี  
ความรู้ทางนิวเคลียร์ฟิสิกส์ และเครื่องมือนิวเคลียร์อีกด้วย

นอกเหนือจากการวิจัยในการใช้ประโยชน์ของดินกำเนิดรังสีตามที่กล่าวมา  
แล้ว กองฟิสิกส์ยังมีแผนในระยะยาวที่จะใช้ประโยชน์ของรังสีจากเครื่องเร่งอนุภาค  
อิเล็กตรอน เครื่องไซโคลตรอน และเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูกำลังสูงที่มีอยู่ในงานวิจัยที่  
ก้าวหน้ายิ่งขึ้น

**ที่มา** การฝึกอบรม “วิทยาศาสตร์กับการแก้ปัญหา” จัดโดย กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและ  
การพลังงาน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อ  
สันติ วันที่ 22-23 สิงหาคม 2534

## การเปลี่ยนสีของอัญมณีเมื่อฉายรังสี

วัลลภ บุญคง

ขณะนี้ มีผู้สนใจการเพิ่มค่าของอัญมณีด้วยการฉายรังสีให้มีสีสวยงามขึ้น ผู้สนใจหลายคนยังมีความเข้าใจในธรรมชาติของการเปลี่ยนสีของอัญมณีด้วยการฉายรังสีไม่ถูกต้องนัก ผู้เขียนจึงได้รวบรวมความรู้จากหนังสือของ Nassau ซึ่งเป็นผู้ทำการทดลองการเปลี่ยนสีของอัญมณีต่างๆ ไว้มาก และขอเสนอให้ผู้สนใจได้ทราบความจริงเกี่ยวกับรังสีที่ใช้ สีที่ได้จากการฉายรังสี และการอธิบายต่างๆ อันเกี่ยวกับการเปลี่ยนสีเมื่อฉายรังสี

ตารางที่ 1 รังสีที่ใช้ฉายอัญมณีและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

ประเภทของรังสี	ขนาดพลังงาน (อิเล็กตรอนโวลต์)	ความสม่ำเสมอ ของสีที่ได้	กำลังไฟฟ้า ที่ต้องใช้	การเกิด สารรังสี	ความร้อน ที่เกิดเฉพาะที่
ก. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า					
แสง	2.3	เปลี่ยนแปลง ไม่แน่นอน	ต่ำ	ไม่เกิด	ไม่เกิด
รังสีเหนือม่วง	5	-	-	-	-
รังสีเอกซ์	10,000	ไม่มี	ปานกลาง	-	-
รังสีแกมมา	1,000,000	ดี	ไม่ต้องใช้	-	-
ข. อนุภาค					
นิวตรอน	1,000,000	ดี	สูงมาก	เกิด	ไม่เกิด
อิเล็กตรอน	1,000,000	ไม่มี	สูง	ไม่เกิด	รุนแรงมาก
อิเล็กตรอน	10,000,000	-	-	เกิด	-
โปรตอน					
ควิเทอร์อน	1,000,000	-	-	-	เกิดบ้าง
แอลฟา ฯลฯ					

กล่าวได้ว่าการใช้รังสีแกมมาไม่สิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้า เพราะคิดว่ารังสีนี้ได้จากต้นกำเนิดรังสี ความจริงต้นกำเนิดรังสี เช่น โคบอลต์-60 ที่ใช้ในการฉายรังสีแกมมามี



ราคาสูงมากเหมือนกัน รังสีที่มีบทบาทในการฉายรังสีอัญมณีเพื่อการค้า คือ รังสีแกมมา อิเล็กตรอน และนิวตรอน ยกเว้นเพชร และโทแพส รังสีแกมมาเป็นรังสีที่ดีที่สุดในการฉายอัญมณีเพื่อเปลี่ยนแปลงสีเนื่องจากให้ความสม่ำเสมอของสีทั่วก้อนอัญมณีดี ไม่ต้องใช้กำลังไฟฟ้ามาก ไม่เกิดความร้อนเฉพาะที่ภายในอัญมณีขณะที่ฉายรังสี และไม่เกิดสารรังสีภายในอัญมณีเช่นที่เกิดเมื่อฉายด้วยนิวตรอน

การเปลี่ยนแปลงสีของอัญมณีต่างๆ เท่าที่ทราบกันคือดังแสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การเปลี่ยนแปลงสีของอัญมณีเมื่อฉายรังสี

อัญมณี	การเปลี่ยนแปลง
เบริลและอะความารีน	จากไม่มีสีเปลี่ยนเป็นสีเหลือง สีฟ้าถึงสีเขียว สีจาง เปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเข้ม (maxixe)*
คอร์นคัม	จากไม่มีสีเปลี่ยนเป็นสีเหลือง** สีชมพูเป็นสีพิศพาราชา** (padparasha)
เพชร	จากไม่มีสีหรือสีจางๆ เปลี่ยนเป็นสีฟ้า เขียว ดำ เหลือง น้ำตาล ชมพู หรือแดง
ไข่มุก	สีจะเปลี่ยนเข้มขึ้นเป็นสีเทา น้ำตาล ฟ้า หรือ ดำ
ควอร์ตซ์	จากไม่มีสี เหลือง หรือเขียวซีด เปลี่ยนเป็นสีควีน อมิติส และอมิติส-ซิดริน
สปอดูมินและควนไซท์	เปลี่ยนเป็นสีเหลืองหรือเขียว
โทแพส	จากไม่มีสีเปลี่ยนเป็นสีเหลือง** ส้ม** น้ำตาล** หรือฟ้า
ทัวมาลีน	จากไม่มีสีหรือสีจางเปลี่ยนเป็นสีเหลือง** น้ำตาล** ชมพู** แดง หรือสองสีเขียว-แดง** สีฟ้าเปลี่ยนเป็นสีม่วง
เซอร์คอน	จากไม่มีสีเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลถึงสีแดง

\* สีจางไปเมื่ออยู่ในแสงสว่าง

\*\* อาจจางเมื่ออยู่ในแสงสว่าง อาจมีศูนย์กลางของสี (color centers) อย่างน้อยสองศูนย์กลางในอัญมณี อย่างหนึ่งเป็นแบบที่จะจางไป และอีกอย่างหนึ่งเป็นแบบไม่จาง

สาเหตุของการเปลี่ยนสีอัญมณีจากการฉายรังสีไม่ได้ศึกษาอย่างละเอียดพอเพื่อให้เข้าใจในขบวนการที่เกิดขึ้น ความรู้ในเรื่องของสเปกโตรสโคปีของการดูดกลืนแสง (optical absorption spectroscopy) จะต้องสนับสนุนด้วยความรู้ด้านพาราแมกเนติกเรโซแนนซ์และเทคนิคที่ซับซ้อนอื่นๆ เพื่อให้ได้คำตอบจากสาเหตุต่างๆ อย่างไรก็ดี

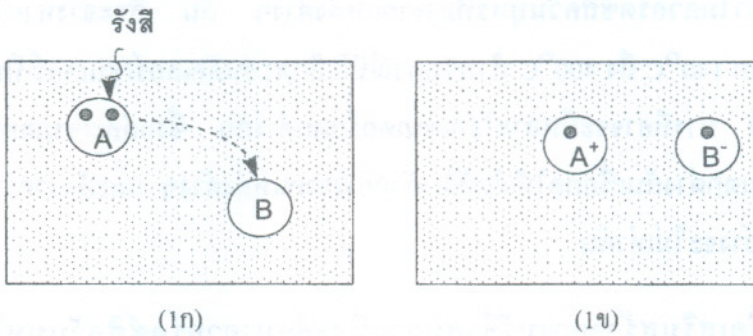
ตามแม้ว่าจะขาดการศึกษาอย่างสมบูรณ์ก็ยังสามารถทำความเข้าใจในหลักสำคัญได้ชัดเจน ส่วนใหญ่ของการเปลี่ยนสีจากการฉายรังสีเกี่ยวข้องกับ “ศูนย์กลางของสี” หรือคลัสเตอร์เซนเตอร์ คุณสมบัติประจำตัวของคลัสเตอร์เซนเตอร์จะรวมถึงผลที่ได้จากการฉายรังสี การให้ความร้อนไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ย้อนกลับโดยที่การวางไว้ในแสงสว่างหรือในที่มืดระยะหนึ่งอาจก่อให้เกิดการจางไปของสีในคลัสเตอร์เซนเตอร์

สารใดที่สามารถเกิดคลัสเตอร์เซนเตอร์ได้จะประกอบด้วยพรีเคอร์เซอร์ (precursor) 2 แบบ ซึ่งมีคุณสมบัติเฉพาะตัวต่างกัน แบบแรก คือ โฮลเซนเตอร์พรีเคอร์เซอร์ (hole center precursor) ได้แก่ อะตอม ประจุ โมเลกุล สิ่งเจือปนหรือสิ่งบกพร่องอื่นๆ ซึ่งประกอบด้วย อิเล็กตรอน 1 คู่ เมื่ออิเล็กตรอนตัวหนึ่งถูกทำให้หลุดออกไปด้วยรังสีพลังงานสูง จะทำให้เกิดโฮลเซนเตอร์ แบบที่สอง คือ อิเล็กตรอนเซนเตอร์พรีเคอร์เซอร์ (electron center precursor) ซึ่งได้แก่อะตอม ประจุ ที่สามารถจับอิเล็กตรอนที่หลุดจากโฮลเซนเตอร์พรีเคอร์เซอร์ทำให้เกิดอิเล็กตรอนเซนเตอร์ขึ้น บทบาทของการฉายรังสี คือ การโยกย้ายอิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดโฮลเซนเตอร์และอิเล็กตรอนเซนเตอร์ขึ้นพร้อมๆ กัน สารส่วนมากที่ไม่มีอิเล็กตรอนเซนเตอร์พรีเคอร์เซอร์จะเป็นโฮลเซนเตอร์พรีเคอร์เซอร์ แต่อย่างไรก็ดี ถ้าอิเล็กตรอนที่ถูกทำให้หลุดออกไปด้วยรังสีกลับมาที่เดิมทันที สารนั้นจะไม่มีเปลี่ยนแปลง

ถ้าโฮลเซนเตอร์พรีเคอร์เซอร์เดิมเป็นกลางกำหนดเรียกว่า A ตามรูป 1ก แล้วโฮลเซนเตอร์ที่ได้จากการฉายรังสีและก่อให้เกิดเสียอิเล็กตรอนไปหนึ่งตัวจะมีประจุเป็นบวก  $A^+$  ดังแสดงในรูป 1ข ในทำนองเดียวกันอิเล็กตรอนเซนเตอร์เดิมเป็นกลางซึ่งเรียกว่า B เมื่อจับอิเล็กตรอนหนึ่งตัว ทำให้กลายเป็นอิเล็กตรอนเซนเตอร์ B โปรดสังเกตว่ายังไม่มีการกล่าวถึงว่าหน่วยใด  $A, A^+, B$  หรือ  $B^-$  เป็นศูนย์กลางของสี

อิเล็กตรอนที่ไม่ได้อยู่เป็นคู่จะอยู่ในสถานะตื่นเดินได้โดยการดูดกลืนพลังงานจากลำแสงสีขาว ซึ่งจะมีสีบางสีของสเปกตรัมถูกดูดกลืนหายไป และปล่อยสีที่เหลือออกมา ไม่ว่าโฮลหรืออิเล็กตรอนเซนเตอร์สามารถก่อให้เกิดปรากฏการณ์นี้ได้ ถ้าเป็นโฮลเซนเตอร์เพียงอย่างเดียวที่ถูกกลืนแสงในช่วงที่มองเห็นจะเกิดโฮลคลัสเตอร์เซน

เตอร์ และถ้าเป็นอิเล็กตรอนเซนเตอร์อย่างเดียวกันที่ลุดกลืนแสง จะได้อิเล็กตรอนคัลเลอรัเซนเตอร์



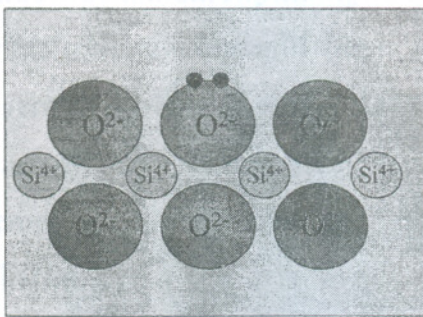
**รูปที่ 1** แสดงการเปลี่ยนแปลงเมื่อฉายรังสีวิสคูดซึ่งอาจฟอร์มศูนย์กลางของสี

ถ้าแสงหรือความร้อนทำให้อิเล็กตรอนที่ถูกกักหลุดจากอิเล็กตรอนเซนเตอร์ B<sup>-</sup> ตามรูป 1ข อิเล็กตรอนสามารถกลับไปยัง A<sup>+</sup> และทำให้อะตอมเปลี่ยนกลับไปเป็น A นั่นคือ สภาวะดั้งเดิมได้กลับคืนมาและสีจะหายไป ขบวนการนี้เรียกว่า การจางสี (fading หรือ bleaching) ถ้ากับดักอิเล็กตรอนไม่แข็งแรง เพียงแต่อุณหภูมิห้องในเวลากลางคืนก็สามารถที่จะให้พลังงานพอเพียง(ประมาณ 0.1 eV) ที่จะปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่ถูกกัก ถ้ากับดักมีความแข็งแรงขึ้น อาจต้องการแสงพลังงาน 1 ถึง 3 eV เพื่อทำให้เกิดการจางของสีเช่นปรากฏการณ์ที่เกิดกับเบริลสีแมกซิชี (Mixixie beryl) และ แซปไฟร์สีเหลืองหรือโทแพสสีน้ำตาลที่เกิดจากการอาบรังสีและสีไม่อยู่ตัว กับดักที่แข็งแรงจะยึดอิเล็กตรอนอย่างมั่นคงจนกระทั่งไม่มีการจางของสีเมื่อถูกต่อแสง เช่น ในควออตซ์สีควันบุหรี่ โทแพสสีฟ้า หรือโทแพสสีน้ำตาลที่มีสีอยู่ตัว การจางสีอาจจะต้องใช้ความร้อนสูงถึง 500°C การจางสีแบบนี้ถ้ายังใช้เวลาและอุณหภูมิสูงขึ้น การจางสีจะยิ่งเกิดเร็วขึ้น

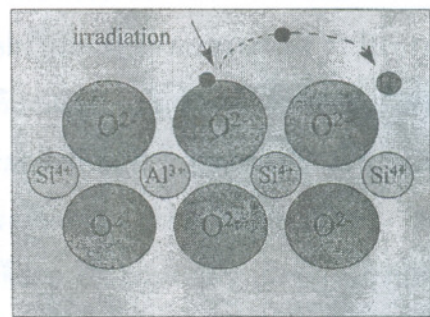
การฉายรังสีก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตามที่แสดงในรูปที่ 1 เป็นที่น่าสังเกตว่าพลังงานที่ต้องการคือ พลังงานที่ก่อให้เกิด A<sup>+</sup> จาก A เมื่อการจางสีเกิดขึ้น ตัวที่ควบคุมขบวนการคือ การเปลี่ยนจาก B<sup>-</sup> เป็น B ในสารที่มีหนึ่งโซลคัลเลอรัเซนเตอร์ฟรีเคอเซอร์และศูนย์กลางเพื่อกักอิเล็กตรอน (electron-trapping center) ที่เป็นไปได้หลายศูนย์

พฤติกรรมที่เกิดขึ้นจากการฉายรังสีจะเป็นไปเหมือนกัน แต่อุณหภูมิที่ใช้ในการจางสี อาจแตกต่างกันมาก ทั้งนี้ขึ้นกับอิเล็กทรอนิกส์ของเซมิคอนดักเตอร์ซึ่งมีอยู่ในตัวว่าเป็นอย่างไร สิ่งนี้อธิบายว่าทำไมควออร์ตซ์สีควันนุหรีที่มาจากแหล่งต่างๆ กัน สีจะจางหายไปในช่วงอุณหภูมิจาก  $140^{\circ}\text{C}$  ถึง  $400^{\circ}\text{C}$  สำหรับกรณีที่มีอิเล็กทรอนิกส์ตัวนำเป็นกึ่งตัวนำทำให้เกิดสี บางทีอาจจะมีหลายโฮลเซมิคอนดักเตอร์แตกต่างกัน ซึ่งแต่ละเซมิคอนดักเตอร์ต้องการพลังงานที่แตกต่างกันเพื่อก่อให้เกิดสีในตัวอย่างจากแหล่งต่างๆ และอัตราการเกิดสีในแต่ละตัวอย่างจะไม่เท่ากัน

เพื่อเสริมสร้างความรู้จึงสมควรที่จะศึกษาควออร์ตซ์สีควันนุหรีเพิ่มขึ้น ควออร์ตซ์ คือ  $\text{SiO}_2$  และโครงสร้างของควออร์ตซ์ประกอบด้วยไอออน  $\text{Si}^{4+}$  และ  $\text{O}^{2-}$  ทั้งหมดมีแต่เพียงอิเล็กตรอนที่จับคู่ในชั้นที่เต็มตามที่แสดงในรูปที่ 2(ก)



(ก)



(ข)

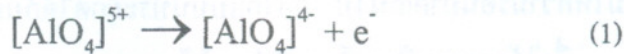
**รูปที่ 2** (ก) แสดงการเรียงตัวของไอออนในควออร์ตซ์

(ข) การเกิดควออร์ตซ์สีควันนุหรีโดยการฉายรังสี เมื่อมีไอออนของอะลูมิเนียมและไฮโดรเจนปนอยู่

ตามธรรมชาติควออร์ตซ์มีอะลูมิเนียมอยู่ปริมาณน้อย กล่าวคือ ใน 10,000 ไอออนซิลิกอน จะมี อะลูมิเนียมเพียง 1 ไอออน อัตราส่วนนี้เป็นจริงสำหรับไฮโดรเจนและ อัลคาไลเมทัลไอออนด้วย เมื่อ  $\text{Al}^{3+}$  แทนที่  $\text{Si}^{4+}$  ประจุบวกจะหายไปหนึ่ง การปรับปรุงประจุให้สมดุลอาจเป็นไปโดย  $\text{H}^+$ ,  $\text{Na}^+$  ฯลฯ สำหรับแต่ละ Al ที่มีอยู่ในที่ว่างใน ควออร์ตซ์

ไอออนตัวใดซึ่งครอบครองตำแหน่งเช่นนี้ ซึ่งปกติจะว่างอยู่เรียกว่า อินเตอร์สติเชียล ไอออน (interstitial ion)

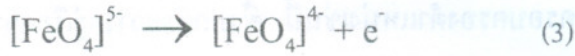
เมื่อรังสี ไล่อิเล็กตรอนตัวหนึ่งจากคู่ของมันตามที่แสดงในรูปที่ 2 (ข) อิเล็กตรอนนั้นอาจจะถูกกักไว้ในที่  $H^+$  ซึ่งอาจเขียนได้เป็น



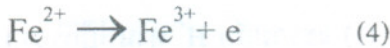
ในที่นี้ไฮดรเจนเดอรัลจะเป็นกลุ่มที่มี Al ร่วมกับ O อีกสี่ตัวรอบๆและอิเล็กตรอนซึ่งเขียนแทนด้วย  $e^-$  ได้เกิดจากปฏิกิริยา (1) จะรวมกับ  $H^+$  ตามปฏิกิริยา (2) กลายเป็นอะตอมของไฮโดรเจน ถ้ามี  $Na^+$  อยู่ภายในควอร์ตซ์มันจะถูกฟอร์มเป็นอะตอมของโซเดียม  $[AlO_4]^-$  ในสมการ (1) คือ ไฮดรอกไซด์เดอรัลซึ่งทำให้ควอร์ตซ์สีควนบุรีมีสีเข้มขึ้น การจางหายของสีเป็นผลมาจากพลังงานความร้อนทำให้ปฏิกิริยา (2) และ (1) ย้อนกลับ

ควอร์ตซ์สีควนบุรีจะเป็นตัวอย่างที่ดีของความซับซ้อนซึ่งอาจพบในสารกัลเลอรัลเดอรัลต่างๆ ที่ได้มีการศึกษามานานหลายปีแล้ว จากการศึกษาเข้าถึงปัญหานี้โดย Nassau และ B.E. Prescott แสดงให้เห็นว่ามีหลายกัลเลอรัลเดอรัลอยู่ในควอร์ตซ์สีควนบุรีส่วนมาก โดยเฉพาะกัลเลอรัลเดอรัลของควอร์ตซ์สีเหลืองอมเขียวที่ไม่ทราบโครงสร้างซึ่งอาจปรากฏขึ้น ณ เวลาใด โดยตัวเอง การรวมของกัลเลอรัลเดอรัลสีควนบุรีกับสีเหลืองอมเขียวและเดอรัลอื่นๆ ทำให้เกิดสีควนบุรีในแนวสีเขียวแดง และเทา

กัลเลอรัลเดอรัลของอเมทิส (amethyst) ทำหน้าที่เช่นเดียวกับควอร์ตซ์สีควนบุรี โดยที่  $Fe^{3+}$  แทนที่  $Al^{3+}$  ในรูปที่ 2 และในสมการ (1) ยกเว้นแต่ว่าสำหรับอเมทิส  $[FeO_4]^-$  เป็นไฮดรอกไซด์เดอรัลที่ก่อให้เกิดสี



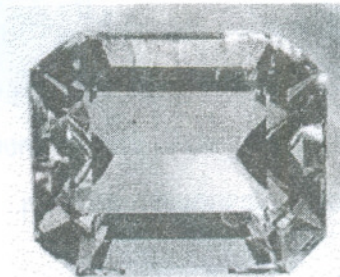
อิเล็กตรอนจะถูกกักอีกครั้งหนึ่งโดยอิเล็กตรอนเซนเตอร์ฟรีเคอเซอร์ ดังเช่นในสมการ (2) เมื่อถูกความร้อนปฏิกิริยาตาม (3) จะย้อนกลับและให้  $[\text{FeO}_4]^{5-}$  ซึ่งให้แต่เพียงสีเหลืองซีดของซิทริน (citrine) ซิทรินนี้อาจเปลี่ยนกลับไปเป็นอเมทิสโดยการฉายรังสีถ้าไม่ให้ความร้อนมากเกินไป กลไกแบบนี้ประยุกต์ได้กับควอร์ตซ์สังเคราะห์สีเหลืองซีด ซึ่งได้จากการเจือเหล็กลงไปภายใต้สภาวะของออกซิไดสจึงจนกระทั่ง  $\text{Fe}^{3+}$  แทนที่  $\text{Si}^{4+}$  แต่ถ้าเจือเหล็กภายใต้สภาวะรีดิวซิง จะได้ควอร์ตซ์สีเขียว  $\text{Fe}^{2+}$  แทนที่  $\text{Si}^{4+}$  เมื่อผลึกนี้ถูกฉายรังสี ชั้นแรก  $\text{Fe}^{2+}$  จะถูกเปลี่ยนเป็น  $\text{Fe}^{3+}$  ตามปฏิกิริยา



เมื่อควอร์ตซ์สังเคราะห์ถูกฉายรังสีนานขึ้น จะทำให้เกิดคัลเลอร์เซนเตอร์ของอเมทิสต่อไปดังปฏิกิริยา (3) การให้ความร้อนจะทำให้เกิดขบวนการย้อนกลับ ของปฏิกิริยา (4) ที่จะทำให้ได้สีเขียวเช่นเดียวกับที่ปรากฏกับอเมทิสตามธรรมชาติบางก้อน ผลิตผลที่ได้เรียกว่า อเมทิสเขียว (Greened amethyst)

### เอกสารอ้างอิง

1. K Nassau and B.E. Prescott, A reinterpretation of smoky quartz, Phys. Status solidi. **A29**, 659 (1975)
2. K. Nassau and B.E. Prescott, Smoky, greenish yellow and other irradiation related colors in quartz, Min. Mag., **41**, 301(1975)



# การเพิ่มคุณค่าของพลอยโดยวิธีการอาบรังสี

วัลลภ บุญคง ชาญชัย อัครวิญญูชัช อารีรัตน์ คอนดวงแก้ว  
นพวรรณ ศรีรัตนประสิทธิ์ และ อัจฉรา แสงอริยวนิช

## บทคัดย่อ

การศึกษาการเปลี่ยนสีของอัญมณีโดยการฉายรังสีแกมมาและนิวตรอน พบว่าไม่ได้ทำให้คุณภาพสีของไพลิน ทับทิม หยก มุกดาหาร เพอริคอต เพชร และควอตซ์ ดีขึ้น สีที่ดีขึ้น พบในการฉายรังสีทิวมาลีน เบริล และโทแพส เมื่อวัดรังสีของอัญมณีที่อาบด้วยนิวตรอนพบไอโซโทปต่างๆ ในอัญมณีแต่ละชนิดแตกต่างกันไป ไอโซโทปรังสีที่จะเป็นปัญหาในการนำอัญมณีที่อาบนิวตรอนไปใช้ คือ แทนทาลัม-182 และซีเซียม-134

## บทนำ

การปรับปรุงอัญมณีหรือการทำของเลียนแบบโดยวิธีการต่างๆ มีมาตั้งแต่สมัยกรีกโบราณ และรวบรวมเป็นหนังสือต่อมาโดย C. Plinius Secundus ซึ่งมีชีวิตอยู่ระหว่างปี ค.ศ. 23 ถึง 79 ตัวอย่างของวิธีการที่ใช้ในขณะนั้นได้แก่ การใช้แผ่นโลหะบางๆ ประคบอัญมณี การจุ่มน้ำมันเพื่อให้กลบรอยแตกและให้สีดีขึ้น การย้อมสีให้มีสีต่างๆ ตามความนิยม ประวัตติและวิธีการแปลกๆ ที่ใช้ในสมัยโบราณ สามารถหาอ่านเพิ่มเติมได้จาก Nassau และเอกสารอ้างอิง<sup>[1]</sup>

การเปลี่ยนสีของพลอยโดยการอาบรังสี กล่าวได้ว่า เริ่มตั้งแต่ศตวรรษที่ 20 ตั้งแต่คูรี ได้บันทึกไว้ว่าพลอดแก้วที่บรรจุเรเดียมเปลี่ยนเป็นสีฟ้า เมื่อปี 1809 Crookes<sup>[2]</sup> ได้รายงานการเปลี่ยนสีเพชรเป็นสีเขียวโดยการฉายรังสีจากเรเดียมในปี 1909 ในปีเดียวกันนี้ Doelter<sup>[3]</sup> ผู้ทำงานด้านนี้อย่างมาก ได้ชี้ให้เห็นว่า สีที่ได้จากการฉายรังสีจะจางลงเมื่อเผชิญแสงสว่าง Michel<sup>[4]</sup> ได้รายงานโดยการรวบรวมจากรายงานการเปลี่ยนสีของอัญมณีต่างๆ ด้วยรังสีในปี 1927 ว่า เพชรเปลี่ยนเป็นสีเหลือง เขียว และ ฟ้าได้ ควอตซ์เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล คอรั้มดัมเป็นสีเหลือง ทิวมาลีนเปลี่ยนเป็นสีแดงหรือเหลือง โทแพสเปลี่ยนเป็นสีส้ม และควินไซต์เปลี่ยนเป็นสีเขียว

การเปลี่ยนสีของโทแพสโดยการฉายรังสี พบตามรายงานตั้งแต่ปี 1947 โดย Roger<sup>[5]</sup> และ Pough<sup>[6]</sup> โดยการฉายรังสีเอกซ์และอิเล็กตรอน ข้อมูลนี้ยังไม่ก่อให้เกิดการผลิตโทแพสสีฟ้าเป็นอุตสาหกรรม การผลิตโทแพสเป็นอุตสาหกรรมเริ่มจากการที่ Nassau<sup>[7]</sup> รายงานว่าตัวอย่างโทแพสที่ติดไปกับควอทซ์ที่อาบรังสี และนำมาเผา จะได้โทแพสสีฟ้า ในปี 1973 การพัฒนาเทคนิคต่างๆ เพื่อผลิตโทแพสสีฟ้าได้มีตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา จนในปัจจุบันนี้สามารถผลิตโทแพสสีน้ำเงินเข้มกว่าโทแพสตามธรรมชาติ

อาจกล่าวได้ว่า ในปัจจุบันข้อมูลการเปลี่ยนสีอัญมณีต่างๆ ด้วยรังสี เป็นที่ทราบกันดีเกือบหมดแล้ว การวิจัยและพัฒนาในระดับเพื่อหาข้อมูลและเทคนิคใหม่จริงๆ มีแต่การพัฒนาวิธีการผลิตเพชรสีเขียว เหลือง น้ำเงิน และชมพู ให้สมบูรณ์ นอกจากนี้เป็นการทดลองฉายเบริลเพื่อให้ได้สีน้ำเงินที่เรียกว่า Maxixe

การเปลี่ยนสีของอัญมณีต่างๆ เมื่อฉายรังสี ได้รวบรวมไว้โดย Nassau<sup>[1]</sup> สำหรับการทดลองศึกษาที่สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ เป็นการทดลองศึกษาเพื่อเปรียบเทียบว่าจะสามารถเปลี่ยนสีอัญมณีได้ตามที่ต่างประเทศทำไว้ได้หรือไม่ และมุ่งทำกับพลอยที่จะมีผลในทางเศรษฐกิจ เช่น โทแพส และทัวมาลีน ด้วยต้นกำเนิดรังสีแกมมา และนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

### การฉายรังสี

รังสีที่ใช้ในการฉายรังสีเพื่อปรับปรุงคุณภาพของพลอย ที่สำคัญในปัจจุบันมี 3 ชนิด คือ รังสีแกมมา อิเล็กตรอนพลังงานสูง และนิวตรอนพลังงานสูง

**รังสีแกมมา** เป็นรังสีที่ได้จากไอโซโทป ต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่ใช้ส่วนใหญ่คือ โคบอลต์-60 มีอายุครึ่งชีวิต 5.27 ปี ให้รังสีแกมมาพลังงาน 1.17 และ 1.33 MeV รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การฉายรังสีอัญมณีด้วยรังสีแกมมา ไม่ก่อให้เกิดสารไอโซโทป ภายในเนื้ออัญมณี จัดว่าเป็นการฉายรังสีซึ่งได้อัญมณีที่ปลอดภัยที่สุด แต่การเปลี่ยนแปลงของสีจะได้ผลน้อยกว่ารังสีอื่นๆ



**อิเล็กตรอนพลังงานสูง** เป็นรังสีที่ได้จากเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูง โดยทั่วไปนิยมใช้อิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง 10 - 20 MeV อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุเป็นลบ และมีมวลขณะนิ่ง  $9.1085 \times 10^{-28}$  กรัม การฉายอัญมณีด้วยอิเล็กตรอน จะทำให้เกิดความร้อนเฉพาะที่ ในอัญมณีสูงมาก และอาจจะทำให้อัญมณีแตกได้ ดังนั้นจะต้องมีการระบายความร้อน โดยให้น้ำเย็นผ่านอัญมณีขณะฉายรังสี เนื่องจากอิเล็กตรอนมีพลังงานสูงอาจเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ขึ้นบ้าง และอาจต้องใช้เวลาคอยให้รังสีลดลงอยู่ในระดับปลอดภัยเป็นเวลา 2 - 3 วัน ถึง 2 - 3 สัปดาห์ อิเล็กตรอนจะให้โดสแก่อัญมณีสูงกว่ารังสีแกมมา เนื่องจากถ่ายทอดพลังงานเกือบทั้งหมดให้กับอัญมณี ดังนั้นการเปลี่ยนสีของอัญมณีจะเกิดขึ้นได้ดีกว่า นั่นคือ การใช้เวลาฉายรังสีสั้นกว่า การฉายรังสี 2 - 3 ชั่วโมง อาจได้โดสสูงถึงหมื่นล้านแรด

**นิวตรอน** เป็นอนุภาคที่เป็นกลางมีมวล  $1.6747 \times 10^{-24}$  กรัม นิวตรอนที่ใช้ในการฉายอัญมณีเป็นนิวตรอนพลังงานสูง 1 - 2 MeV ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ซึ่งให้นิวตรอนตั้งแต่พลังงานต่ำ จนถึงนิวตรอนพลังงานสูง นิวตรอนพลังงานต่ำชนิดที่เรียกว่า เทอร์มัลนิวตรอน ถูกจับได้ดีด้วยนิวเคลียสของธาตุ ซึ่งประกอบเป็นอัญมณีทำให้เกิดไอโซโทปรังสีในอัญมณี จากธาตุหลักและธาตุเจือปนปริมาณน้อยในอัญมณี จึงต้องกันไม่ให้เทอร์มัลนิวตรอนเข้าทำปฏิกิริยากับธาตุ โดยการบรรจุอัญมณีในภาชนะทำด้วยแคดเมียม ก่อนนำไปอบนิวตรอน แคดเมียมจะทำหน้าที่กั้นเทอร์มัลนิวตรอนโดยการจับเทอร์มัลนิวตรอนส่วนใหญ่ไว้ ปล่อยให้นิวตรอนพลังงานสูงเท่านั้นเข้าไปฉายอัญมณี แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีเทอร์มัลนิวตรอนบางส่วนก่อให้เกิดสารไอโซโทปรังสีขึ้นได้บ้างในอัญมณีที่ฉายด้วยนิวตรอน สารไอโซโทปที่เกิดขึ้นนี้จะหมดไปด้วยการทิ้งไว้ให้สลายตัวไปเองตามธรรมชาติเท่านั้น การฉายรังสีนิวตรอนอัญมณีจะได้รับรังสีสม่ำเสมอตลอดทั้งก้อนของอัญมณี เช่นเดียวกับการฉายรังสีแกมมา ถ้าไม่มีไอโซโทปรังสีเกิดขึ้นจากการฉายนิวตรอน จะเป็นวิธีการที่ดีที่สุดในการปรับปรุงคุณภาพอัญมณีด้วยรังสี

## วัตถุประสงค์

การทดลองเพื่อเพิ่มคุณภาพของอัญมณี โดยวิธีการอบรังสี ที่สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติใช้รังสี 2 ชนิด คือ รังสีแกมมา และรังสีนิวตรอน เท่าที่ดำเนินการไปแล้ว การอบรังสีแกมมาใช้รังสีแกมมาจากต้นกำเนิดโคบอลต์-60 ซึ่งเป็นต้นกำเนิดรังสีที่ใช้ในงานทางด้านวิทยาศาสตร์ชีวภาพเป็นหลัก ความแรงของต้นกำเนิดรังสี 4,800,000 คูรี ให้โดสสูงสุดเมื่อทำการทดลองประมาณ 1.4 เมกะเรดต่อชั่วโมง การฉายรังสีนิวตรอนใช้นิวตรอนพลังงานสูงจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ซึ่งเดินเพื่อใช้ในงานผลิตไอโซโทป และงานวิจัยต่างๆเป็นประจำอยู่แล้ว ตำแหน่งที่ทดลองมีนิวตรอนฟลักซ์  $8 \times 10^{10} \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  โดสที่ได้ทดลองฉายด้วยรังสีแกมมาส่วนใหญ่ไม่เกิน 1 เมกะเรดต์ และการฉายนิวตรอนฟลูเอนซ์สูงถึง  $1 \times 10^{18} \text{ n.cm}^{-2}$

พลอยที่ฉายรังสีแล้ว ได้ทำการศึกษาการอยู่ตัวเมื่อถูกแสงสว่างด้วยการวางตัวอย่างทิ้งไว้ให้ถูกแสงสว่าง และมีการตรวจสอบความเข้มของสีเป็นระยะๆ นอกจากนี้ยังใช้ส่องด้วยสเปคโตรไลท์ อัญมณีที่ไม่อยู่ตัวต่อแสง จะเห็นการจางของสีโดยเร็ว ทำให้ทราบว่าอัญมณีใดไม่อยู่ตัว เมื่อถูกแสงสว่างในเวลาสั้นๆ

การตรวจสอบไอโซโทปรังสี ในตัวอย่างอัญมณีที่ฉายด้วยนิวตรอน ตรวจสอบได้ด้วยรังสีแกมมาของอัญมณีที่ฉายรังสีนิวตรอน ด้วยเครื่องแกมมาเรย์สเปคโตรมิเตอร์ ใช้หัววัดแบบเซมิคอนดักเตอร์ และเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง

## ผลการทดลอง

**คอร์ันดัม** ผลการทดลองฉายรังสีแกมมาและนิวตรอน พบว่า แซปไฟร์ขาวใสจะให้สีเหลืองที่สวยงามมาก เมื่อได้รับโดสของรังสีระดับ 0.5 - 1 เมกะเรด แต่สีจะไม่อยู่ตัวและจางไปเมื่อถูกแสงสว่าง การส่องด้วยสเปคโตรไลท์สีจะจางกลับเป็นสีขาวภายในเวลา 5 ชั่วโมง การฉายด้วยฟาสต์นิวตรอนฟลูเอนซ์ขนาด ประมาณ  $1.15 \times 10^{16} \text{ n.cm}^{-2}$  จะได้สีเหลืองสวยงาม แต่ไม่คงทนเช่นกัน สำหรับ ไพลีนและทับทิมที่ฉายด้วยนิวตรอน

โคสขนาดเดียวกับที่ใช้กับแซปไฟร์ขาวใส พบว่า โพลินจะให้สีซีดลงและค่อยๆคืนสู่สีเดิมเมื่อถูกแสงสว่าง ทับทิมไม่พบการเปลี่ยนแปลงของสี

**หยก** พบการเปลี่ยนสีที่เลวลง กล่าวคือ สีเขียวอ่อนจะเปลี่ยนเป็นสีเขียวอมน้ำตาล และสีขาวจะให้สีคล้ำไป สีนี้จะค่อยๆกลับคืนสู่สีเดิมเมื่อถูกแสงสว่างนานๆ

**ควอทซ์** ควอทซ์ใสจะเปลี่ยนให้สีควัน เมื่อได้รับรังสีแกมมาด้วยโดสต่ำๆ และสีเข้มขึ้นเมื่อได้รับ โดสเพิ่มขึ้น โดสในระดับ 1 เมกะแรด สีจะเข้มจนมองดูเหมือนว่าเป็นสีดำ การฉายด้วยนิวตรอนจะให้สีไปทางควันเหมือนกัน

**อิมิตีสีม่วงอ่อน** เมื่อได้รับการฉายรังสีแกมมาจะปรากฏผลออกมาหลายอย่าง บางก้อนจะไม่เปลี่ยนแปลง บางก้อนจะมีสีควันแทรก บางก้อนจะดูเข้มขึ้นในลักษณะทึบ การฉายด้วยนิวตรอน โดสสูงมากๆ บางเม็ดจะมีสีไปทางส้มแทรกขึ้นมาเท่าที่ทดลองยังไม่พบการเปลี่ยนที่ชัดเจน

**โอปอล** โอปอลธรรมชาติขาวทึบ ซึ่งการตรวจทางโครงสร้าง พบว่า เป็นคริสทโทบาลิต เมื่อฉายด้วยรังสีแกมมาในระดับ 1 เมกะแรด จะให้สีฟ้าที่ค่อนข้างอยู่ตัวเมื่อถูกแสงสว่าง แต่จะสังเกตเห็นการจางลงของสีได้ ภายในระยะเวลา 5 ปี โอปอลที่ให้สีเหลืองบรู่โอปอล ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของสี เมื่อฉายด้วยรังสีแกมมาหรือนิวตรอนระดับ 1 เมกะแรด หรือ  $1.5 \times 10^{16} \text{ n.cm}^{-2}$

**มุกดาหาร** เมื่อฉายด้วยรังสีแกมมาในระดับ 1 เมกะแรด ไม่พบการเปลี่ยน แต่เมื่อฉายด้วยนิวตรอนระดับ  $1.15 \times 10^{16} \text{ n.cm}^{-2}$  พบการเปลี่ยนแปลงไปทางสีควันอมสีเขียวอ่อน ซึ่งเมื่อส่องด้วยสปอตไลท์เป็นเวลานานๆ จะสังเกตเห็นว่าสีจางลง

**เพอริคอต** ไม่พบการเปลี่ยนแปลงเมื่อฉายด้วยรังสีแกมมาในระดับ 1 เมกะแรด การฉายด้วยนิวตรอนขนาด  $5 \times 10^{17} \text{ n.cm}^{-2}$  จะพบสีคล้ำๆขึ้นเกิดขึ้น

**คุณไชท์** คุณไชท์สีชมพู เมื่อฉายด้วยรังสีแกมมาระดับ 1 เมกะแรด จะให้สีเขียวสดใสสวยงามมาก แต่จะจางลงอย่างชัดเจนภายในเวลา 2 - 3 วัน การฉายด้วยนิวตรอน ขนาด  $5 \times 10^{17}$  n.cm<sup>-2</sup> จะได้ตัวอย่างที่เปลี่ยนเป็นสีเหลืองซีดคล้ำ

**เพทชาย** เพทชายสีขาวใสและสีฟ้า จะเปลี่ยนเป็นสีแดง เมื่อฉายด้วยรังสีแกมมา และนิวตรอน สีแดงที่บนี้ก็จะคงทนต่อแสงสว่าง เมื่อฉายด้วยนิวตรอนฟลูเอนซ์สูงมาก จะได้สีเหลืองอ่อน

**เพชร** เพชรจะให้สีเขียวอ่อนเมื่อได้รับนิวตรอนในระดับต่ำ เมื่อได้รับนิวตรอนฟลูเอนซ์เพิ่มขึ้น สีเขียวจะเข้มขึ้นเรื่อยๆ ถ้าได้รับนิวตรอนสูงมากจริง จะเขียวเข้มจนมองเห็นเป็นสีดำ ไม่พบการเปลี่ยนสีของเพชรเมื่อฉายด้วยรังสีแกมมา

**ท้วมกลีน** ไม่พบการเปลี่ยนสี เมื่อฉายด้วยรังสีแกมมาขนาด 1 เมกะแรด พบการเปลี่ยนสีที่น่าสนใจ เมื่อฉายด้วยนิวตรอนระดับ  $1.15 \times 10^{16}$  n.cm<sup>-2</sup> สีชมพูบางเม็ดจะเปลี่ยนเป็นสีชมพูเข้มหรือสีเหลือง และบางเม็ดไม่เปลี่ยนสี เมื่อเพิ่มนิวตรอนฟลูเอนซ์เป็น  $5 \times 10^{17}$  n.cm<sup>-2</sup> ท้วมกลีนสีชมพูอ่อนบางเม็ดจะให้สีน้ำตาลแดงอมเขียว ซึ่งเมื่อนำมาเผาที่อุณหภูมิ 200°C-250°C จะได้สีเขียวใส การใช้นิวตรอนขนาด  $1.15 \times 10^{16}$  n.cm<sup>-2</sup> ยังทำให้ท้วมกลีนสีน้ำตาลเป็นสีน้ำตาลส้ม สีม่วงอ่อนเป็นสีน้ำตาลอมส้มและสีเหลืองอมเขียวเป็นสีแดงเข้ม จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนสีของท้วมกลีน เมื่อฉายด้วยนิวตรอนมีการเปลี่ยนสีไปต่างๆ แล้วแต่คุณสมบัติของแต่ละก้อน และจากการเปรียบเทียบข้อมูลกับผู้ทำการทดลองมาบ้างได้ข้อมูลเพิ่มเติมว่า การเปลี่ยนสีขึ้นกับแหล่งของวัตถุด้วย มีแนวโน้มว่าสีของ ท้วมกลีนจากการฉายนิวตรอนคงทนต่อแสงสว่าง

**ไอโอไลท์** ไอโอไลท์สีน้ำเงิน ไม่เปลี่ยนสีเมื่อฉายด้วยรังสีแกมมา ขนาด 1 เมกะแรด แต่จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอมเหลือง เมื่อฉายด้วยนิวตรอนขนาด  $1.15 \times 10^{16}$  n.cm<sup>-2</sup> และเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 250°C จะให้สีเหมือนเดิม เมื่อฉายไอโอไลท์สีน้ำตาลอมชมพูและไม่มีสีด้วยนิวตรอนฟลูเอนซ์ขนาด  $1.0 \times 10^{18}$  n.cm<sup>-2</sup> พบการเปลี่ยนสีเป็นสีแดงคล้ำ และสีเหลืองอนน้ำตาลตามลำดับ

**เบริล** การฉายเบริลขาวด้วยรังสีแกมมาขนาด 1 เมกะเรด ไม่พบการเปลี่ยนสี แต่เมื่อฉายด้วยนิวตรอนขนาด  $1.15 \times 10^{16}$  n.cm<sup>-2</sup> เบริลสีขาวเปลี่ยนเป็นสีเหลือง สีฟ้า เปลี่ยนเป็นสีเหลือง สีเขียวอ่อนเปลี่ยนเป็นสีเขียวเข้มขึ้น แต่จางลงเมื่อถูกแสงสว่าง เบริลสีขาวที่เปลี่ยนเป็นสีเหลืองไม่จางเมื่อถูกแสงสว่าง การทดลองฉายมรกตสีอ่อน ด้วยรังสีแกมมาขนาด 1 เมกะเรด พบว่า บางเม็ดสีเข้มขึ้นแต่ทึบ และจางลงเมื่อส่อง ด้วยสเปคโตรไลท์ บางเม็ดจะปรากฏในลักษณะอมเหลืองเพิ่มขึ้น การทดลองล่าสุดกับ ผลึกมรกตจาก อู่ฟ้าสถานด้วยรังสีแกมมาขนาด 7 เมกะเรด มีสีเหลืองเสริม ขึ้นในสีเขียวเดิมของมรกตเช่นเดียวกัน

**โทแพส** เมื่อฉายโทแพสด้วยรังสีแกมมาระดับ 1 เมกะเรด โทแพสสีขาวบาง เม็ดจะเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาล และบางเม็ดจะไม่เปลี่ยนสี เมื่อนำมาเผาที่อุณหภูมิ 200 - 250°C ประมาณ 1 ชั่วโมง จะเปลี่ยนเป็นสีขาวดังเดิม เมื่อฉายด้วยฟาสต์นิวตรอนขนาด  $1.15 \times 10^{16}$  n.cm<sup>-2</sup> โทแพสบางเม็ดจะให้สีฟ้าจางๆ บางเม็ดไม่เปลี่ยนแปลง และบางเม็ด จะให้สีน้ำตาล เมื่อฉายนิวตรอนเพิ่มขึ้นจนได้นิวตรอนฟลูเอนซ์ขนาด  $5.0 \times 10^{17}$  n.cm<sup>-2</sup> โทแพสบางเม็ดจะให้สีฟ้า บางเม็ดให้สีฟ้าอมน้ำตาลเล็กน้อย บางเม็ดจะให้สีน้ำตาล เมื่อนำมาเผาที่อุณหภูมิ 200°C-250°C ส่วนใหญ่จะให้โทแพสสีฟ้าสดใส ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของโทแพสด้วย โทแพสเม็ดใหญ่จะมองดูสีเข้มกว่าโทแพสเม็ดเล็ก สีฟ้าที่เกิดในโทแพสนี้จะอยู่ตัว ไม่จางเมื่อฉายด้วยสเปคโตรไลท์นานๆ และการเปลี่ยนสี ของโทแพสด้วยการฉายรังสีนี้ เป็นที่ยอมรับของตลาดอัญมณี และก่อให้เกิดการผลิต และการค้าโทแพสสีฟ้าและสีน้ำเงินจากการฉายรังสี เป็นอุตสาหกรรมในต่างประเทศ มากกว่า 10 ปีแล้ว สีฟ้าของโทแพสจากการฉายรังสี มีหลายระดับ และมีชื่อเรียกแตกต่างกันไป แต่เรียกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 3 สี คือ Sky blue, London blue และ Super blue ข้อมูลมากกว่านี้สามารถหาได้จากเอกสาร<sup>[8]</sup>

การเปลี่ยนสีโทแพสในปัจจุบัน มักใช้รังสีอิเล็กตรอนพลังงานสูง ซึ่งให้สี Sky blue แต่รังสีที่เกิดขึ้นน้อยมาก และนำมาใช้ได้ภายในเวลา 2 - 3 สัปดาห์<sup>[9]</sup> นับว่าปลอดภัยดี โทแพสสีเข้มขึ้นระดับ London blue ทำได้โดยการฉายด้วยนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเท่านั้น ข้อเสียของโทแพสสี London blue คือ ต้องใช้เวลานาน

ปล่อยให้รังสีหมดไป อย่างน้อย 3 เดือน สำหรับโทแพสจากศรีลังกา และ 1 ปีหรือมากกว่า สำหรับโทแพสจากไนจีเรีย

### รังสีจากอัญมณีฉายนิวตรอน

ผลการตรวจวัดรังสีแกมมาของอัญมณีที่ฉายนิวตรอน พบไอโซโทปรังสี แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ไอโซโทปรังสีที่ตรวจพบในอัญมณีที่ฉายนิวตรอน

อัญมณี	ไอโซโทปรังสีที่ตรวจพบ
คอร์รั้มดัม	= Na-24, Mg-27, Al-28, Cr-51, Mn-56, Ga-72 (ขาวใส) = Na-24, Mg-27, Al-28, Cr-51, Mn-56, Fe-59, Ga-72, Sm-155 (ม่วงแดงเข้ม) = Na-24, Mg-27, Al-28, Sc-46, Cr-51, Fe-59, Ga-72 (สีฟ้า) = Na-24, Mg-27, Al-28, Sc-46, Ti-51, Cr-51, Mn-56, Ga-72 (สีเขียว)
หยก	= Cr-51
คอปซ์	= Mg-27, A-28
อมีทิส	= Mg-27, Al-28, Mn-54, Fe-59
มุกดาหาร	= Mn-54, Sr-85, Rb-86, Cs-134, Ba-131, Ba-133, Eu-152, Eu-254
เพอริคอต	= Cr-51, Mn-54, Fe-59, Co-58, Ce-141
ไอโโอลิต์	= Sc-46, Mn-54, Co-58, Co-60, Zn-65, Cs-134
เพทาย	= Sc-46, Zr-95, Nb-95, Tb-160, Hf-181, Ta-182
ควินไซต์	= Sc-46, Mn-54, Fe-59, Sn-112, Sn-117m, Sb-124, Cs-134, Hf-181, Ta-182
เบริล	= Na-24, Sc-46, Mn-54, Cs-134
ทิวมาลีน	= Mn-54, Sb-124, Hf-181 (ขาวไม่เปลี่ยนสี) = Sb-124, Ta-182, Ce-139 (ชมพูเปลี่ยนเป็นเขียว)
โทแพส	= Sb-124 (ขาวไม่เปลี่ยนสี) = Sc-46, Ta-182 (วัดรังสีได้เพียงเล็กน้อย ต้องใช้โคสสูงมากจึงสังเกตเห็นการเปลี่ยนสี) = Mn-54, Fe-59, Sb-124 (เปลี่ยนเป็นสีเหลืองอมน้ำตาล เมื่อฉายด้วยนิวตรอน และกลับเป็นสีขาวเมื่อเผาที่ 250°C) = Sc-46, Mn-54, Fe-59, Sb-124, Cs-134, Ta-182, Pa-233 (เปลี่ยนเป็นสีฟ้าที่สวายนาม)

การที่ไม่ปรากฏรายงานไอโซโทปริงส์ของ Na, Al, Si และ Mg ในหอยมุกดาหาร เพอริคอต คุณไชท์ และโทแพส เนื่องจากตัวอย่างอัญมณีเหล่านี้ทิ้งไว้นาน ภายหลังจากการฉายนิวตรอน ทำให้ไอโซโทปริงส์ของอัญมณีเหล่านี้หมดไปก่อนวัดริงส์

### การควบคุมความปลอดภัยทางรังสี

สารไอโซโทปริงส์ที่เกิดขึ้นจากการอาบนิวตรอน จะให้รังสีเบตาและแกมมา ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตราย หากนำมาใช้เมื่อรังสียังแรงอยู่ ดังนั้นอัญมณีภายหลังจากอาบนิวตรอน และได้สีตามที่ต้องการแล้ว จะต้องปล่อยทิ้งไว้ให้สารไอโซโทปริงส์สลายตัวจนมีระดับรังสีอยู่ในระดับที่ปลอดภัย โดยใช้มาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับกันคือ ความแรงรังสีจะต้องไม่เกิน 2 นาโนคูรีต่อกรัม บางแห่งจะกำหนดครึ่งสัปดาห์ไม่เกิน 1 นาโนคูรีต่อกรัม ซึ่งแล้วแต่ข้อกำหนดของแต่ละประเทศ

### สรุป

ผลการทดลองพบว่า อัญมณีฉายรังสีส่วนใหญ่ไม่ได้เปลี่ยนสีในทางที่ดีขึ้น บางอย่างอาจให้สีที่สวยงามแต่ไม่คงทน เมื่อถูกแสงสว่างและความร้อน ในสภาวะธรรมชาติลักษณะการเปลี่ยนสีที่ดีขึ้นพบในเบรล ที่เปลี่ยนจากไม่มีสีเปลี่ยนเป็นสีเหลือง แต่มีปัญหาในเรื่องรังสีจากซีเซียม-134 เมื่ออาบด้วยนิวตรอน จะต้องมีการวิจัยเพื่อลดเทอร์มัลนิวตรอน ในการอาบรังสีนิวตรอนและทดลองฉายรังสีแกมมาที่โคสสูงมากๆ การเปลี่ยนสีของทามาลีนไม่ว่าจะให้สีใด สีชมพูอ่อนอาจจะให้สีเขียว หรือชมพูเข้มไปทางแดง หรือสีเหลืองอมเขียวเปลี่ยนเป็นสีแดงเข้ม เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีทั้งที่คงทนต่อแสงสว่างและไม่ทนต่อแสงสว่าง โทแพสเป็นอัญมณีที่ส่วนใหญ่เปลี่ยนเป็นสีฟ้าเมื่ออาบด้วยรังสีและสีนี้ไม่จางเมื่อถูกแสงสว่าง เป็นอัญมณีที่ให้ผลดีที่สุดที่จะทำเป็นผลิตภัณฑ์ทางการค้า เนื่องจากมีผลึกของโทแพสขนาดใหญ่ในธรรมชาติอยู่มาก และสามารถฉายรังสี สีฟ้า และสีน้ำเงินหลายระดับให้เลือกได้ตามความนิยมของผู้ใช้

## กิติกรรมประกาศ

ในการศึกษาทดลอง ผู้เขียนได้รับข้อมูลและคำปรึกษาในเรื่องอัญมณีอย่างยิ่ง พร้อมทั้งตัวอย่างจำนวนหนึ่ง จาก ดร. โปยม อนุรักษ์กานนท์ และคุณรักษ์ ทรธราเวก ตัวอย่างโทแพส ทัวมาลีน คุณไชท์ คอรัณคัม และไอโอไลท์ ได้รับจาก Mr. Henry Ho แห่งสถาบันอัญมณีศาสตร์แห่งเอเชีย ตัวอย่าง โทแพสและทัวมาลีน จากสมาคมผู้ค้าอัญมณีและเครื่องประดับ จึงใคร่ขอ ขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

## เอกสารอ้างอิง

1. K. Nassau, Gemstone Enhancement, Butterworths, London (1984)
2. W. crookes, Diamonds, london (1909)
3. C. doelter, Ueber die Stabilitat der Durch Radium Erhaltene Farben der Mineralien, Zbl. Miner. Geol. Palaont., 8, 232 (1909)
4. H. Michel, Coloring Precious Stone by Ray, Jewelers' Circ-Keyst., 95, 10 (Sept 9, 1927)
5. F.H. Pough and T.H. Rogers, Experiments in X-Ray Irradiation of Gemstones, Amer. Miner., 32, 31 (1947).
6. F.H. Pough, The Coloration of Gemstones by Electron Bombardment. Z. dt. Gas. Edelstein., 20, 71 (1957)
7. K. Nassau, The Effect of Gamma Rays on the Color of Beryl, Smoky Quartz, Amethyst and Topaz, Lap. J., 28, 20 (1974)
8. C. Kremkow, Topaz : The birth of the Blue, Jewellery News Asia, Issue No. 33, 32 (May 1987)
9. K. Nassau, Altering the Color of Topaz, Gems & Gemology, p. 30 Spring 1985.

---

ที่มา การสัมมนาทางวิชาการ เรื่อง พลอย อัญมณีมีค่าของไทย 17-21 ธันวาคม 2533 ภาควิชา  
วิศวกรรมเหมืองแร่ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่



# การใช้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อพัฒนา คุณภาพของรัตนชาติ

โทยม อรัณยกานนท์ วัลลภ บุญคง และรัก ทรธรรษาเวก

## บทคัดย่อ

การเพิ่มคุณภาพของรัตนชาติ ได้มีการพัฒนาขึ้นมาเรื่อยๆ จนถึงปัจจุบัน กรรมวิธีดังกล่าวมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน เช่น การให้ความร้อน การอบรังสี การฟอกสี การแต่งสี การเชื่อมสี ฯลฯ

เรื่องที่น่าสนใจมานี้ก็เพื่อแสดงหลักการหรือพื้นฐานที่สำคัญๆ ในกรรมวิธีต่างๆ ซึ่งเป็นแนวทางให้เห็นถึงการประยุกต์ด้วยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เพื่อจะได้พัฒนาประเทศในด้านอุตสาหกรรมรัตนชาติต่อไป

## คำนำ

เมื่อประมาณ 20 ปีมาแล้ว ได้มีพ่อค้าพลอยจากจังหวัดจันทบุรี พยายามที่จะทำให้พลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินที่มีลักษณะค่อนข้างทึบให้ใสขึ้นโดยวิธีการเผาเช่นเดียวกับการเผาเพทาย ซึ่งได้มีการทำกันมาตั้งแต่สมัยโบราณนับเป็นร้อยปีมาแล้ว ในระยะแรกๆ นั้น การเผายังไม่เป็นผลสำเร็จ มีการศึกษาหาตัวชาชนิดต่างๆ ทั้งที่มีลักษณะเป็นน้ำและเป็นผงผสมกันหลายชนิด ซึ่งปกติเป็นความลับ แล้วเผาด้วยถ่านไม้ แต่บางรายก็ใช้ถ่านโค้ก ได้ผลดีขึ้นบ้าง ไม่ได้ผลบ้าง อย่างไรก็ตาม ได้พบหลักความจริงว่า การให้ความร้อนสูงถึงจุดๆ หนึ่ง ทำให้พลอยมีความใสได้ ผู้เขียนมีโอกาสดังกล่าวได้มีส่วนเป็นผู้ตรวจสอบพลอยต่างๆ ที่เผากันตั้งแต่เริ่มแรกสมัยยังไม่สำเร็จ จนกระทั่งได้ผลดีในที่สุด ต่อมาก็มีการทดลองกับพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินที่มาจากออสเตรเลีย ซึ่งก็ประสบความสำเร็จร้ายกันไปหลายรายอีกหลายปีต่อมาก็ได้มีการเผาพลอยไพลินจากศรีลังกา (ซีลอน) มีการเปลี่ยนแปลงเตาเผาจากการใช้ถ่านโค้กมาเป็นเตาใช้น้ำมันโซล่า และใช้แก๊สหุงต้ม เพื่อเผาบุษราคัมหรือไพลินในระยะต่อมา นอกจากนี้ยังมีการใช้เตาไฟฟ้า โดยเฉพาะสำหรับการเผาทับทิม เครื่องมือดังกล่าวเหล่านี้ช่วยให้การเผาได้รับความสำเร็จพอสมควรทีเดียว



พลอยในเมืองไทยส่วนใหญ่มักจะดำเนินวิธีการชนิดที่เรียกว่า "ตามอย่าง" หรือ "ตามการบอกเล่าตกทอดกันมา" และส่วนมากจะคิดกันไปเองว่าดีแล้ว ถูกบ้างผิดบ้างเมื่อเทียบกับหลักวิชาการ ผู้ที่จับทางถูกต้องจึงรวกกันไปก็มาก ผู้ที่คลำทางพลาดทำเสียจึงเสียหายกันไปก็มากมาย ผู้ที่เคยเผาพลอยชุดไหนได้ผลดีก็พยายามจะซื้อหรือแสวงหาพลอยดิบชนิดที่คล้ายอย่างนั้นมาทำการเผา บางครั้งแม้ว่าจะเลือกสรรดีแล้ว แต่ก็ไม่วายล้มเหลว คือ เผาไม่ออก และก็ไม่รู้สาเหตุด้วยว่าทำไมถึงเป็นเช่นนั้น ในที่สุดก็ปล่อยความมีคตินี้เป็นส่วนหนึ่งของการเสี่ยงต่อการเผาพลอยแต่ละครั้ง ซึ่งก็นับได้ว่าพอถูกโหลกกับอุปนิสัยคนไทยในเรื่องของการชอบเสี่ยง ผู้เขียนขอยืนยันได้ว่าอัตราการเสี่ยงในการเผาจะหมดไป หรือมีน้อยที่สุดเมื่อได้ทำการศึกษาและวิจัยให้เข้าหลักการทางวิทยาศาสตร์อย่างแท้จริง

โดยปกติการเผาพลอยตระกูลคอร์รัมด์ม (กะรุน) สิ่งสำคัญอันดับแรก คือ ธรรมชาติของพลอยนั้นเอื้ออำนวยต่อการที่จะให้เพิ่มคุณภาพหรือไม่ หรือจะกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ พลอยดังกล่าวจะต้องมีแร่-ธาตุมลทินที่เป็นต้นกำเนิดแห่งสีตามธรรมชาติ เช่น สีน้ำเงินจะต้องมีเหล็กและไทเทเนียมเป็นธาตุมลทิน สีเหลืองจะต้องมีธาตุเหล็ก ส่วนสีแดงจะต้องมีธาตุโครเมียม เป็นต้น จากการศึกษาพบว่า ความเข้มของสีน้ำเงินและสีเหลืองของพลอยตระกูลคอร์รัมด์มไม่เพียงแต่ขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุมลทินของเหล็กเป็นสำคัญ แต่ยังขึ้นอยู่กับวาเลนซ์สเตท (Valence states) ของเหล็กในรูปของเฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ ) หรือเฟอร์ริก ( $Fe^{3+}$ ) ในโครงสร้างผลึกอะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) อีกด้วย กล่าวคือถ้าต้องการให้เกิดสีน้ำเงิน หรือเพิ่มสีน้ำเงินจะต้องเปลี่ยนวาเลนซ์สเตทของเหล็กที่เป็นมลทินให้อยู่ในรูปของเฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ ) นั่นคือ จะต้องเผาภายใต้สภาวะรีดักชัน (รูปที่ 1 และตารางที่ 2) ในทางตรงกันข้าม หากต้องการเผาบุษราคัม (Yellow sapphire) ให้มีสีเหลืองเข้มขึ้นจะต้องพยายามเปลี่ยนวาเลนซ์สเตทของเหล็กที่เป็นมลทินให้อยู่ในรูปของเฟอร์ริก ( $Fe^{3+}$ ) ทั้งหมด นั่นคือ จะต้องเผาภายใต้สภาวะออกซิเดชัน (รูปที่ 2 และตารางที่ 2)

**ตารางที่ 1** การเปลี่ยนสีของพลอยที่สำคัญบางชนิด เมื่อผ่านกรรมวิธีการให้ความร้อนอย่างถูกต้องแล้ว

ชนิดพลอย	สีดั้งเดิมตามธรรมชาติ	สีที่เปลี่ยนแปลงหลังการให้ความร้อน
ทับทิม (Ruby)	แดงอมม่วง, แดงอมน้ำตาล หรือชมพูอมม่วง	แดงสด หรือชมพูสด
แซฟไฟร์สีน้ำเงิน(ไพลิน) (Blue sapphire)	น้ำเงิน	น้ำเงินเข้มขึ้น (กรณีของเดิมสีอ่อน) น้ำเงินสว่างขึ้น (กรณีของเดิมสีเข้มเกินไปจนแลดูดำ)
แซฟไฟร์สีขาว (White sapphire)	ขาวใส, ขาวขุ่นน่านม หรือขาวอมเหลือง	น้ำเงิน, เขียว หรือเหลืองน้ำตาลทอง
สปิเนล (Spinel)	แดงอมม่วง, แดงอมน้ำตาล	แดงสด
เพทาย (Zircon)	น้ำตาล, สีชา	ใสไร้สี, เหลืองน้ำตาลทอง, น้ำเงิน
โทแพส (Topaz)	ขาวใส	น้ำเงิน (ก่อนเผาจะอบรังสีนิวตรอนให้ได้สีทอง-น้ำตาล หรือออกเขียวเสียก่อน)
ควอรตซ์ (แอมethyst) Quartz (Amethyst)	ม่วง	ไร้สี, เหลืองน้ำตาลทอง, เขียว
ครอโรตซ์ (คาร์เนเลียน, คตไม้สัก ฯลฯ) Quartz (Carnelian, Tiger's eye etc.)	เหลือง, น้ำตาล	น้ำตาลแดง, แดง
ครอโรตซ์ (สีควันไฟ) Quartz (Smoky)	ควันไฟ	ควันไฟจางลง, เหลืองอมเขียว, ใสไร้สี
ทัวร์มาลีน (Tourmaline)	น้ำเงินดำหรือเขียวอมน้ำเงิน, แดง	เขียว, หากของเดิมเป็นสีแดงจะทำให้สีจางลงหรือใสไร้สี
ซอไซต์ (แทนซาไนต์) Zoisite Zanzanite)	น้ำตาล-ม่วง-เขียว	น้ำเงิน
เบริล (อะความารีน) Beryl (Aquamarine)	น้ำเงินอมเขียว	น้ำเงิน

ตารางที่ 2 กรรมวิธีในการเพิ่มคุณภาพพลอยทับทิมและแซปไฟร์ด้วยการให้ความร้อน

กรรมวิธีการให้ความร้อน	ผลของการเพิ่มคุณภาพ
1. เเผาในช่วงอุณหภูมิ 1,100°C-1,500°C (ประมาณ 1,300°C) ภายใต้สภาวะออกซิเดชันอ่อนๆ	1. เพิ่มคุณสมบัติการให้เหลือบสตาตาร์
2. เเผาในช่วงอุณหภูมิ 1,500°C-1,700°C (ประมาณ 1,600°C) ปล่อยให้เย็นอย่างรวดเร็ว	2. กำจัดความขุ่นมัว (หม่า) เส้นไหม (Silk) และเหลือบสตาตาร์อันเป็นผลเนื่องจากแร่รูไทล์ซึ่งเป็นมลทินในเนื้อพลอย ทำให้พลอยเกิดความใส
3. เเผาในช่วงอุณหภูมิ 1,500°C-1,700°C (ประมาณ 1,600°C) ภายใต้สภาวะรีดักชัน	3. ทำให้พลอยไพลินมีสีน้ำเงินเข้มขึ้น เป็นการเพิ่มสีน้ำเงิน
4. เเผาในช่วงอุณหภูมิ 1,000°C-1,700°C ภายใต้สภาวะออกซิเดชัน	4. ทำให้พลอยสีน้ำเงินที่ค่อนข้างเข้มดำ มีสีโปร่งสว่างขึ้น ซึ่งเป็นการถอยสีน้ำเงินที่บนอกจากนี้ยังทำให้พลอยบุษราคัมมีสีเหลืองเข้มขึ้น และทำให้ทับทิมมีสีแดงจัดขึ้น ซึ่งเป็นการกำจัดสีแกมน้ำเงินหรือสีอมม่วงของทับทิมออกไป

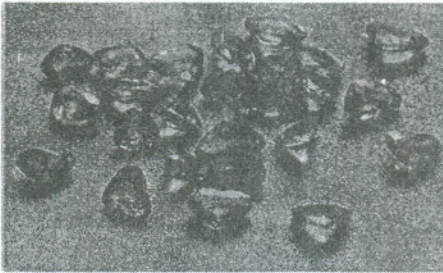
การเพิ่มคุณภาพพลอยทับทิมและแซปไฟร์ด้วยการให้ความร้อนจากที่ได้กล่าวไว้ในตารางที่ 2 ไม่ถือเป็นการหลอกลวงผู้ซื้อ และไม่ถือเป็นการทำเทียม พลอยที่ผ่านการเผาแล้วเป็นที่ยอมรับในตลาดการค้าเพชรพลอยทั่วโลก เพราะเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ดีขึ้นจากสิ่งที่มีอยู่ในเม็ดพลอยตามธรรมชาติ ประการสำคัญ คือ เป็นการเพิ่มคุณภาพที่คงทนถาวร ไม่กลับคืนสู่สภาพเดิม

เมื่อปี พ.ศ. 2524 นี้เอง มีไพลินย้อมเคลือบสี (Color diffused sapphire) ดังที่เรียกกันตามท้องตลาดว่า โคตเต็ดแซปไฟร์ (Coated Sapphire) ผลิตจากประเทศสหรัฐอเมริกาเข้ามาขายในเมืองไทยเป็นครั้งแรก ยังความตื่นตาแก่บรรดานักเพชรพลอยทั้ง

หลายที่ได้พบเห็น เพราะสวยงามเหมือนแซปไฟร์ชนิด อันทึจริงโคตเต้แซปไฟร์เป็นผลผลิตจากกรรมวิธี เพิ่มคุณสมบัติของสีแบบใหม่ซึ่งเรียกว่า การย้อมเคลือบสี (Color diffused sapphire) นับเป็นวิธีการใช้ย้อมเคลือบสีได้ทั้งพลอยสังเคราะห์และพลอยธรรมชาติที่มีสีอ่อนหรือไม่มีสี ทำให้มีสีเข้มสวยงามตามมาตรฐานได้ วิธีการนี้คงจะคิดเอาแบบวิธีเคลือบ (Glazing) ของพวกเครื่องปั้นดินเผาหรือเคลือบกระเบื้องเคลือบนั่นเอง หลักเกณฑ์สำคัญของการย้อมเคลือบก็โดยการเผาพลอยรวมกับสารเคมี ซึ่งมีส่วนผสมของธาตุมลทินที่ให้งานเกิดสีตามธรรมชาติของพลอยตระกูลคอร์ันดัมชนิดนั้นๆ ลงไปด้วย อาทิเช่น ถ้าต้องการสีน้ำเงินจะต้องเจือปนไทเทเนียม ( $TiO_2$ ) และเหล็ก ( $Fe_2O_3$ ) ลงไปเผาด้วย หากต้องการสีแดงก็ต้องเติมโครเมียม ( $Cr_2O_3$ ) ลงไปเผาด้วย เป็นต้น ในกรณีสีน้ำเงินจะต้องให้บรรยากาศแห่งการเผาอยู่ในสภาวะรีดักชัน ถ้าสีแดงอยู่ในสภาวะออกซิเดชันและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาจะต้องสูงมากถึง  $1750^{\circ}C$  ปกติก่อนที่จะนำพลอยมาย้อมเคลือบสีนั้น โดยทั่วไปจะทำการเจียรระไนให้เรียบร้อยเสียดก่อนและหลังจากการย้อมสีเสร็จเรียบร้อยแล้ว ก็จะนำไปเจียรระไนขัดมันเพียงเล็กน้อยอีกครั้งหนึ่ง เนื่องจากสีที่ได้จากการย้อมจะซึมซาบเข้าไปในเนื้อเพียงพื้นผิวบางๆ ของเม็ดพลอยเท่านั้น ดังนั้น เมื่อนำมาตกแต่งขัดมันอีกครั้งหนึ่งจะทำให้สีบางส่วนบนหน้าเจียรระไนเดิมถูกลบไปบ้าง คงเหลือสีแต่เฉพาะบริเวณขอบเหลี่ยมเจียรระไนทั่วทั้งเม็ดพลอย ซึ่งมีลักษณะคล้ายใยแมงมุม (Spiderweb effect) ลักษณะดังกล่าวนี้ หากพิจารณาด้วยตาเปล่าจะสังเกตเห็นได้ยาก แต่จะเห็นได้เด่นชัดขึ้นภายใต้กล้องขยายประมาณ 10 เท่า โดยจุ่มพลอยดังกล่าวลงในน้ำยาเมธิลีนไอโอไดด์ (Methylene iodide) ซึ่งเป็นวิธีตรวจสอบที่สะดวกและง่าย ๆ สำหรับพลอยย้อมเคลือบสีทั้งหลาย การเพิ่มคุณภาพอัญมณีด้วยการเผาเคลือบสีเช่นนี้ในตลาดการค้าอัญมณียังถือว่าเป็นการหลอกลวงผู้ใช้ เนื่องจากสีที่เกิดขึ้นจากการจางใส่สารเคมีใหม่เข้าไปยังตัวเม็ดพลอย ในทำนองเดียวกันกับการทำให้พลอยมีสตาร์ปรากฏขึ้น โดยการเติมไทเทเนียม ( $TiO_2$ ) ลงไปเผาด้วย



**รูปที่ 1** พลอยแซปไฟร์ธรรมชาติก่อนการเผาเป็นสีน้ำเงิน (ซ้าย) และภายหลังการเผาเป็นสีน้ำเงินแล้ว (ขวา)



**รูปที่ 2** พลอยแซปไฟร์ธรรมชาติก่อนการเผาเป็นสีเหลือง (ซ้าย) และภายหลังการเผาเป็นสีเหลืองแล้ว (ขวา)

### การเพิ่มคุณภาพของรัตนชาติด้วยการอบรังสี

การเพิ่มสีของรัตนชาติด้วยรังสีนั้น ในต่างประเทศได้ทดลองศึกษามาเป็นเวลานานแล้ว และพบว่ารังสีหลายประเภททำให้เกิดการเปลี่ยนสีของรัตนชาติได้เหมือนกัน แต่รังสีที่สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนสีได้อย่างสม่ำเสมอทั่วก่อนรัตนชาติที่สำคัญ คือ รังสีแกมมาและนิวตรอน ต้นกำเนิดรังสีแกมมามักนิยมใช้โคบอลต์-60 (รูปที่3) สำหรับนิวตรอนนั้นได้จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (รูปที่ 4)

เท่าที่ได้เคยทดลองอบรังสีตัวอย่างต่างๆ พอได้ผลสรุปว่า การอบแร่เขี้ยวหนูมานหรือควอร์ตซ์สามารถทำให้แร่เขี้ยวหนูมานมีสีออกไปทางควีนไฟ(Smoky quartz) ตั้งแต่อ่อนถึงน้ำตาลคล้ำ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของรังสีที่ได้รับทั้งหมด เมื่อนำไปขัดมันหรือเจียรระไนจะทำให้แลดูดำยิ่งขึ้น จึงเป็นรัตนชาติสีดำที่นับว่าราคาถูกลงชนิดหนึ่ง อย่างไรก็ตามมีสิ่งน่าสนใจอยู่อย่างหนึ่งคือ ควอร์ตซ์จากบางแหล่งคือ

ต่อการอบรังสีดังกล่าว ซึ่งก็ได้พบกันต่อมาว่า การมีสีควันไฟคล้ำเมื่ออบรังสีนั้นสืบเนื่องจากมีอะลูมิเนียมเป็นธาตุมลทินในเนื้อควอร์ตซ์นั่นเอง สำหรับโอปอล (Opal) ธรรมชาติของไทยที่มีลักษณะสีขาวนํ้านมจากลำธารายนธ์ จังหวัดลพบุรี สามารถเปลี่ยนเป็นสีฟ้าได้ รัตนชาติสองชนิดที่กล่าวมานี้สีที่เกิดขึ้นจะคงทนไม่จางหายไป

ในการทดลองกับพวกแร่ตระกูลคอร์ันดัมพบว่า ชนิดสีฟ้าหรือนํ้าเงินเมื่อฉายรังสีจะได้สีจางซีดลงเป็นสีเขียวอมเหลืองไม่สวย และจะค่อยคืนกลับสู่สีเดิมเมื่อปล่อยให้ไว้นานๆ คอร์ันดัมสีออกไปทางแดงอมม่วงอ่อน อาจให้สีออกทางแดงอมแสด แต่จะไม่คงทน สีจะค่อยๆ จางลงเมื่อถูกแสงสว่างหรือความร้อน สำหรับแซปไฟร์ขาวใสไร้สีหรือออกอมเหลืองอ่อน เมื่ออบรังสีจะให้สีเหลืองนํ้าสุราแม่โขงสวยงามมากเหมือนบุษราคัมชั้นดี (รูปที่ 5) ในทำนองเดียวกันกับแซปไฟร์ขาวทึบและเทาดำทึบเมื่ออบรังสีจะให้สีเหลืองทอง แต่สีเหลืองดังกล่าวนี้จะจางไปอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับแสงและความร้อน ถ้าส่องด้วยสปอตไลต์ใกล้ๆ หรือทิ้งตากแดดจัดๆ ไว้ สีจะจางซีดจนเกือบขาวภายในเวลา 5-6 ชั่วโมง เป็นที่น่าสังเกตว่าการอบรังสีแซปไฟร์เหลืองอ่อนอมเขียวของไทยจากจังหวัดจันทบุรี จะมีการเปลี่ยนแปลงของสีน้อยมาก ผิดกับแซปไฟร์เหลืองอ่อนที่ได้จากศรีลังกา การอบรังสีจะช่วยให้สีเหลืองเข้มขึ้นสวยงามเช่นเดียวกับชนิดขาวใส

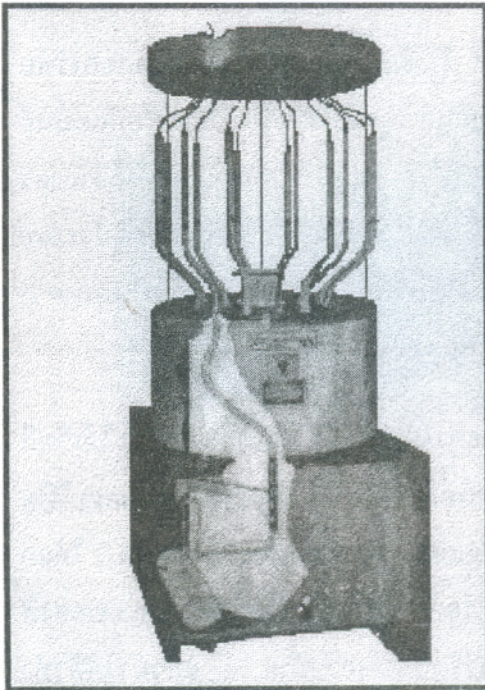
การอบรังสีหยกพบว่า จะได้สีออกไปทางม่วงไม่สวยงาม ทั้งหมดที่กล่าวข้างต้นนี้เป็นการเปลี่ยนสีของรัตนชาติด้วยการอบรังสีแกมมา

การเปลี่ยนสีของเพชรนั้นเกิดจากการอาบนิวตรอนเท่านั้น การอบรังสีแกมมาจะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของเพชรได้เลย แม้ใช้ปริมาณความเข้มสูงๆ ตามรายงานของผู้ทดลองในต่างประเทศ พบว่ามีการเปลี่ยนสีของเพชรเป็นสีต่างๆ เช่น เขียว ชมพู เป็นต้น แต่ในการทดลองเล็กน้อยกับเพชรสีขาวค่อนข้างใสจากลานแร่ดีบุกบริเวณจังหวัดภูเก็ต และพังงาของไทย พบว่า ได้เพียงสีเขียวจืดๆ ซึ่งไม่ได้ทำให้เพชรดังกล่าวมีราคาขึ้นแต่อย่างใด สำหรับโทแพสใสไร้สีเท่าที่เคยทดลองอาบรังสีนิวตรอนพบว่า สีเปลี่ยนออกไปทางเหลืองเล็กน้อย หากทำให้เกิดเป็นสีเหลืองจัดได้ก็จะเป็นการเพิ่ม

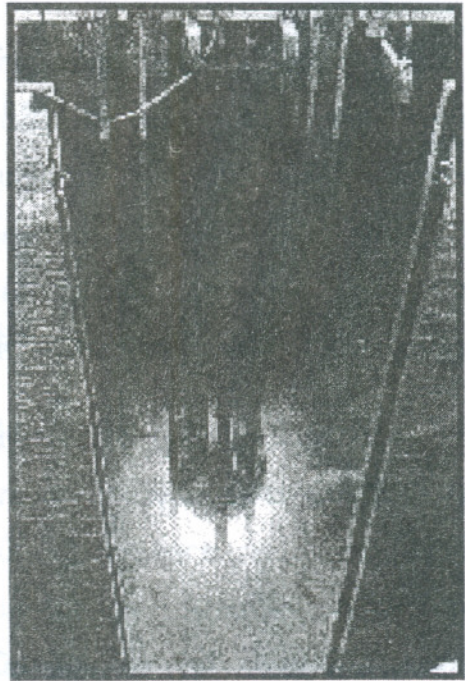


ราคาของมัน โทแพสไฮโดรไลส์จากหลายแห่งของโลก เมื่ออาบรังสีและมีการให้ความร้อน จะให้สีน้ำเงินสวยเด่นขึ้นมา ซึ่งเป็นการเพิ่มคุณภาพที่น่าสนใจอย่างหนึ่ง

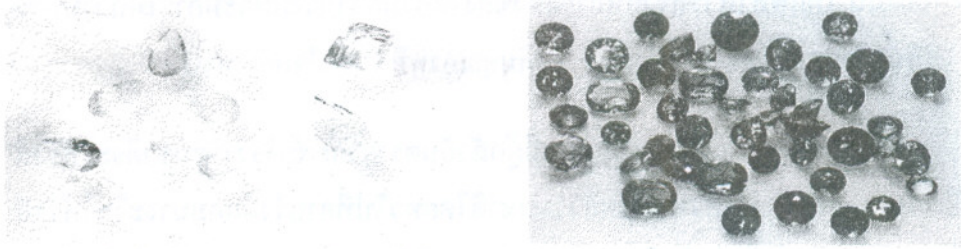
เรื่องการอาบรังสีรัตนชาติ อาจมีผู้กลัวอันตรายโดยเข้าใจว่ารัตนชาติจะให้รังสีที่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้ ความจริงแล้วรัตนชาติโดยทั่วไปที่อาบรังสีแกมมาจะไม่ให้รังสีที่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้แต่อย่างใด ยกเว้นรัตนชาติที่อาบนิวตรอนอาจมีไอโซโทปรังสีบางอย่างเกิดขึ้นภายใน ดังนั้นเพื่อความแน่ใจควรจะต้องมีการตรวจสอบรังสีรัตนชาตินั้นๆ จนแน่ใจว่าไอโซโทปรังสีสลายหมดไปหรือลดลงจนอยู่ในระดับที่ปลอดภัยเสียก่อนจึงจะนำรัตนชาตินั้นไปใช้ ด้วยเหตุที่เพชรเป็นธาตุคาร์บอนที่บริสุทธิ์มาก ฉะนั้น เมื่อถูกอาบนิวตรอนจึงไม่มีไอโซโทปรังสีใดๆ ที่มีอันตรายเกิดขึ้น



รูปที่ 3 ต้นกำเนิดรังสีแกมมา (โคบอลต์-60)



รูปที่ 4 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู



รูปที่ 5 พลอยแซฟไฟร์ชนิดขาวใสก่อนอาบรังสี (ซ้าย) และภายหลังการอาบรังสีแกมมาแล้ว (ขวา)

### การเพิ่มคุณภาพของรัตนชาติด้วยวิธีการอื่นๆ

นอกเหนือจากไปการให้ความร้อนและการอาบรังสี ก็ยังมีวิธีการอื่นๆ ใช้กันอยู่บ้าง อาทิเช่น การฟอก (Bleaching) ไข่มุกหรือปะการัง ที่มีลักษณะคล้ำหรือสกปรกให้เกิดความขาวขึ้น โดยใช้ไฮโดรเจนเพอออกไซด์

การใช้น้ำมันพืชปราศจากสีบางชนิด ให้ซึมแทรกเข้าไปในรอยแตกของรัตนชาติ (colorless impregnations) ทำให้สีที่ปรากฏสมบูรณ์มีชีวิตชีวาวขึ้น หรือมีฉะนั้นก็อาจเจือปนสีต่างๆ ลงไปในน้ำมันนั้นด้วย ทำให้รัตนชาติที่มีสีอ่อนหรือสีต่ำกว่ามาตรฐานกลับมีสีเข้มสวยงามขึ้น (colored impregnations) นิยมใช้กับอัญมณีบางประเภท เช่น มรกต ทับทิม จนมีชื่อเรียกน้ำมันที่ใช้ในการตกแต่งเหล่านี้ติดปากในตลาดว่า “emerald oil” ซึ่งมีสีเขียว และ “ruby oil” ซึ่งมีสีแดง

การย้อมสี (dyeing) อาจนำไปใช้โดยตรงกับแร่รัตนชาติที่ต้องการจะให้เกิดสีต่างๆ หรือต้องการจะพรางจุดอ่อนของรัตนชาติที่มีช่องว่าง หรือรูพรุน (porosity) ให้ดูดีหรือสวยงามขึ้น เช่น พวกควอตซ์เนื้อเนียนละเอียด (cryptocrystalline quartz) ได้แก่ กาลซิโดนี อะเกต (โมรา) การ์เนเลียนและโอนิกส์ เป็นต้น โดยให้สารละลายของสีซึมซาบเข้าไปตามช่องรูพรุนละเอียดของเนื้อแร่รัตนชาติเหล่านั้น แล้วทำให้ตัวทำละลายแห้งหายหมดไป โดยปกติมักจะใช้ความร้อน ซึ่งทำให้สีที่ต้องการติดคงทน การทำให้รัตนชาติมีสีต่างๆ ได้นั้น จึงขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมีต่างๆ ซึ่งทำสำเร็จรูปอยู่

แล้ว ด้วยกรรมวิธีดังกล่าวนอกจากจะให้เห็นพวก “โมรา” ซึ่งเริ่มมีการข้อมกันมากขึ้น รวมทั้งไข่มุกด้วย

การข้อมสีรัตนชาติอีกวิธีหนึ่งเป็นวิธีการใช้น้ำตาล-กรด (sugar-acid process) วิธีนี้ นอกจากจะใช้ข้อมสีพวกอะเกตให้เป็นสีดำแล้ว ยังสามารถเพิ่มคุณสมบัติการเล่นสีเหลือบรุ้งของโอปอล (opal) บางชนิดได้ วิธีการคือจะแช่อิมโอปอลดังกล่าวในน้ำเชื่อมร้อน เพื่อพยายามให้น้ำตาลแทรกเข้าไปบรรจุอยู่ภายในช่องรูพรุนของโอปอล แล้วจึงนำไปแช่ในกรดกำมะถันร้อนอีกทีหนึ่ง กนดกำมะถันจะดึงเอา “น้ำ” ออกจาก “น้ำตาล” ทำให้เหลือแต่ธาตุคาร์บอน (C) จึงเกิดเป็นสีดำขึ้นมา อันมีผลทำให้โอปอลเล่นสีเหลือบรุ้งเข้มเพิ่มขึ้นกว่าเดิมมาก เทียบเคียงได้กับโอปอลชนิดสีดำ ตามที่เรียกกันว่า โอปอลดำ (black opal)

การใช้แผ่นโลหะที่มีความมันวาวติดไว้ใต้รัตนชาติ เพื่อทำให้เกิดการสะท้อนแสงที่ดีก็นับว่าเป็นที่นิยมใช้กันในสมัยโบราณ ปัจจุบันก็ยังมีการใช้กันอยู่บ้าง บางครั้งก็ฉาบปรอทใต้ฐานรัตนชาตินั้นเลย การป้ายสีดำ เช่น หมึกดำใต้ฐานพื้นขัดของโอปอล จะทำให้เกิดสีเหลือบรุ้งเข้มขึ้นอย่างประหลาด

กรรมวิธีของพลอยปะ เช่น ปะสองชั้น (doublet) หรือปะ 3 ชั้น (triplet) ซึ่งกันด้วยสารที่เป็นสี อาจเป็นตัวการที่ใช้ปะเองหรือวัตถุประสงค่อื่น ทำให้รัตนชาตินั้นเกิดสีสวยงาม ก็นับว่าเป็นการเพิ่มคุณภาพรัตนชาติทางหนึ่ง แต่ก็ก็เป็นสิ่งที่ถือกันว่าเป็นการทำเทียม

วิธีการอีกอย่างหนึ่ง ซึ่งถือได้ว่าเป็นการเพิ่มคุณค่าของรัตนชาติได้โดยตรง ซึ่งอาจมองข้าม นั่นคือ วิธีการเจียรระไนนับเป็นตัวแปรตัวหนึ่งซึ่งนำมาใช้ในการประเมินคุณค่าของอัญมณี เพชร พลอยที่มีน้ำมีไฟหรือมีความแพรวพราวดีนั้น ย่อมขึ้นอยู่กับทฤษฎีของการหักเหของแสงและเทคนิคของการเจียรระไน ถ้าให้สมบูรณ์แบบจริงๆ ผู้กำหนดในการเจียรระไนควรจะมีความรู้เกี่ยวกับผลึกและคุณสมบัติทางแสง (optical mineralogy) ของแร่รัตนชาตินั้นๆ ด้วย

การใช้แสงเลเซอร์เจาะเพชรเพื่อกำจัดจุดด่างดำของแร่มลทิน (inclusions) ภายในเนื้อเพชร หรือเป็นช่องสำหรับใส่สารเคมีสีต่างๆ ก็นับว่าเป็นกรรมวิธีการเพิ่มคุณภาพรัตนชาติสมัยใหม่ ซึ่งใช้กันมาในช่วงระยะเวลาไม่เกิน 5 ปีมานี้เอง

### บทสรุป

1. ประเทศไทยนับเป็นประเทศหนึ่งที่มีชื่อเสียงมากในเรื่องของรัตนชาติ โดยเฉพาะทับทิมและไพลิน ซึ่งปัจจุบันเป็นอัญมณีส่งออกมากที่สุดของประเทศ จากสถิติการส่งออกอัญมณี และเครื่องประดับ โดยผ่านกรมศุลกากร เมื่อปี 2527 เป็นเงินถึง 7,400 ล้านบาท ประมาณกันว่าในปี 2528 ที่ผ่านมานี้คงมีมูลค่าประมาณ 10,000 ล้านบาท จากสถิติตัวเลขดังกล่าว พอจะเห็นได้ว่า อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับนั้น มีส่วนที่จะช่วยผลักดันและส่งเสริมการพัฒนาประเทศได้อีกทางหนึ่ง อย่างไรก็ตามเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า สิ่งสำคัญมากประการหนึ่งอันเป็นพื้นฐานสนับสนุนอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับก็คือ “การเพิ่มคุณภาพของรัตนชาติ” ซึ่งถ้าได้มีการศึกษาวิจัยจนถึงที่สุดจริงๆ แล้วเชื่อแน่ว่า ผลของการวิจัยดังกล่าวจะมีส่วนในการเพิ่มรายได้แก่ประเทศเป็นทวีคูณ
2. การใช้ความรู้และเครื่องมือวิทยาศาสตร์ เพื่อตรวจชนิดและปริมาณของธาตุมลทินต่างๆ ในเนื้อรัตนชาติ โดยมีได้ทำลายเม็ดตัวอย่างรัตนชาตินั้น น่าจะได้มีการนำมาใช้ประโยชน์กันอย่างกว้างขวางในด้านการเผาพลอย เพราะนอกจากจะช่วยจำแนกพลอยเม็ดไหนเผาได้ผลหรือไม่แล้ว ยังช่วยในการกำหนดกรรมวิธีต่างๆ ในการเผา เพื่อให้ได้ผลที่ดีที่สุดสำหรับพลอยเม็ดนั้นๆ ด้วย
3. การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเรื่องการเพิ่มคุณภาพของรัตนชาติ จำเป็นจะต้องอาศัยความรู้ทางวิทยาศาสตร์หลายแขนงมาประกอบกัน เป็นต้นว่าจะต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับธรรมชาติการกำเนิด (genesis) ของแร่รัตนชาตินั้นๆ มีความรู้เกี่ยวกับเรื่องของแร่ (mineralogy) และธรรมชาติของการเป็นผลึก

(crystallography) ตลอดจนคุณสมบัติทางแสงของแร่ (optical mineralogy) เพื่อจะได้มีความเข้าใจอย่างลึกซึ้งเกี่ยวกับความเป็นมาของเนื้อแร่รัตนชาติทั้งหลาย ซึ่งโดยปกติแล้วไม่อาจวินิจฉัยได้ด้วยตาเปล่าหรือด้วยกล้องขยายธรรมดา เพราะไม่สามารถแยกแยะถึงความผิดปกติหรือความแตกต่างจากกันได้อย่างถึงที่สุด นอกจากนี้จะต้องใช้ความรู้ทางด้านเคมีและฟิสิกส์ (chemistry and physics) โดยเฉพาะในเรื่องของฟิสิกส์ของแข็ง (solid state physics) เพื่อให้เกิดความรู้ความกระจ่างถึงกำลังงานและกระบวนการเปลี่ยนแปลงทั้งทางเคมีและฟิสิกส์ภายในเนื้อของแร่รัตนชาติเหล่านั้น

### คำขอบคุณ

ขอขอบคุณ คุณกำธร คุณานุกูล ที่ได้ให้สัมภาษณ์อย่างพลอยแจ่มไปไฟร์ธรรมชาติ ก่อนการเผาและภายหลังการเผามาถ่ายภาพประกอบบทความเรื่องนี้ และขอขอบ คุณ อรุณ เอี่ยมพงษ์ ที่ได้ช่วยพิมพ์ ต้นฉบับ

### เอกสารอ้างอิง

- Crowningshield, R. and Nassau, K. 1981. The heat and diffusion treatment of natural and synthetic sapphire. *Journal of Gemmology* 17 : 528-541.
- Jones, B. 1985. The treated gemstones controversy. *Rock and Gem* 15 : 52-55.
- Nassau, K. 1981. Heat treating ruby and sapphire : Technical aspects. *Gems and Gemmology* 17 : 121-131.
- Nassau, K. 1984. *Gemstone enhancement*. Butterworths, London, 221 p.
- Webster, R. 1983. *Gems : Their sources, descriptions and identification*. 4<sup>th</sup> Ed., revised by B.W. Anderson, Butterworths, London, 1006 p.

อรัญยกานนท์, โปยม ; สัมปตตะวนิช, ประพิศ และหรรษาเวก, รัก. 2521. การหุงพลอย  
 ตระกูลคอรันดัม. เอกสารสำหรับประชาชน ฉบับที่ 23 กรมทรัพยากรธรณี  
 เรื่อง "อัญมณี" หน้า 12.

---

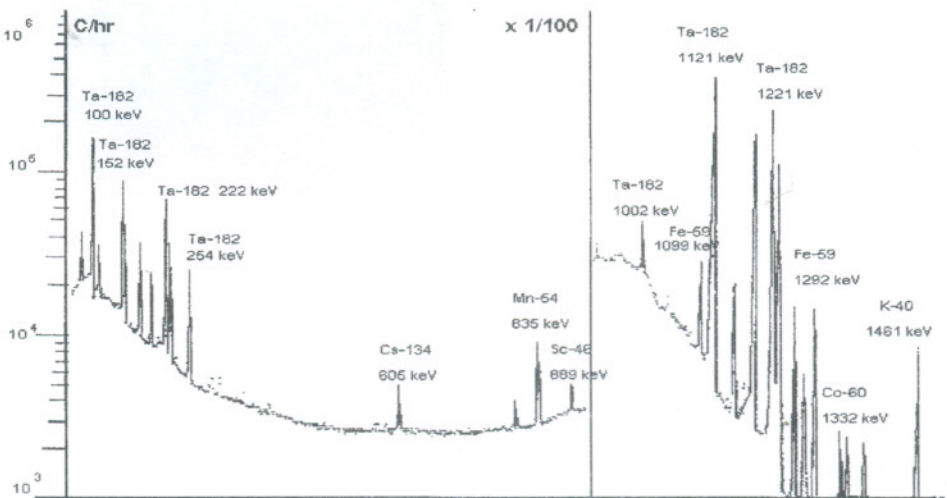
**ที่มา** การสัมมนาทางวิชาการ เรื่อง พลอย อัญมณีมีค่าของไทย 17-21 ธันวาคม 2533 ภาควิชา  
 วิศวกรรมเหมืองแร่ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

## การเสริมคุณภาพของโทแพสด้วยการอบนิวตรอน

ชาญชัย อัครวินิกุลชัย อารีรัตน์ คอนดวงแก้ว และ วัลลภ บุญคง

โทแพสธรรมชาติสีใส เมื่ออบรังสีจะเปลี่ยนเป็นสีฟ้าที่มีค่าในการซื้อขายเพิ่มขึ้น รังสีที่ใช้ในการอบโทแพส คือ รังสีแกมมา อิเล็กตรอนจากเครื่องเร่งอนุภาคและนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย เนื่องจากต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่มีให้ความเข้มของรังสีน้อยไป และยังไม่มีการเร่งอิเล็กตรอน ดังนั้นการทดลองเปลี่ยนสีโทแพสด้วยการอบนิวตรอนของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยจึงเป็นวิธีเดียวที่ทำได้

นำโทแพสที่ใช้ในการทดลองมาบรรจุในกระบอกแคดเมียม และบรรจุในกระบอกเหล็กอีกชั้นหนึ่ง กระบอกที่บรรจุตัวอย่างนี้ นำไปอบนิวตรอน ณ ตำแหน่ง Wet tube ที่มีฟาสต์นิวตรอนฟลักซ์ ประมาณ  $7 \times 10^{11}$  นิวตรอน/ตร.ซม.-วินาที ทดลองอบโดยใช้เวลาต่างๆ กัน และปล่อยตัวอย่างที่อบนิวตรอนแล้ว ให้ระดับรังสีลดลงประมาณ 1 เดือน จึงนำตัวอย่างมาเผาที่อุณหภูมิ  $200^{\circ}\text{C}$  -  $250^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 30 นาที จะได้โทแพสสีฟ้า



ผลการทดลอง พบว่า ด้วยระดับนิวตรอนฟลักซ์ที่ใช้นี้ต้องอาบตัวอย่างเป็นเวลาสะสมนาน 200-300 ชม. จึงจะได้โทแพสซีฟี่ที่เหมาะสมต่อความต้องการในตลาด และโทแพสที่อาบนิวตรอนนี้ จะให้รังสีด้วย จากการวัดรังสีพบว่า เป็นรังสีจาก  $^{182}\text{Ta}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ ,  $^{54}\text{Mn}$  สเปกตรัมของรังสีแกมมาที่วัดได้จากตัวอย่างโทแพสที่อาบนิวตรอนแสดงในรูปที่ 1 เนื่องจากรังสีจาก  $^{182}\text{Ta}$  ก่อนข้างสูง โทแพสที่นิวตรอนจะต้องปล่อยทิ้งไว้ประมาณ 1-3 ปี ให้ไอโซโทปรังสีสลายตัวหมดก่อน จึงจะนำไปใช้ได้

---

ที่มา รายงานวิชาการประจำปี 2529 สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ (พปส-3-9) หน้า 165-166



## การศึกษาธาตุปริมาณน้อยในโทปาซ

สมชาย พงษ์เกษม ชาญชัย อัสววินิจกุลชัย และ อัจฉรา แสงอรียวนิช

### 1. คำนำ

โทปาซมีสูตรทางเคมีเป็น<sup>(1)</sup>  $Al_2(F,OH)_2SiO_4$  โครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิก มีความถ่วงจำเพาะ 3.4-3.6 ความแข็ง 8 (ตามสเกลของโมห์) และมีค่าดัชนีหักเหเป็น 1.62 ลักษณะของผลึกอาจใสหรือขุ่น ไม่มีสี หรือมีสีเหลือง ม่วง ฟ้า เทา และ ม่วง โทปาซที่เป็นผลึกใสใช้ทำเครื่องประดับ สีนิยมได้แก่ สีฟ้า สีเหลือง สีที่มีค่าที่สุดคือ สีเหลืองจากบราซิล ชนิดใสไม่มีสีใช้เป็นเพชรเทียม แต่ในปัจจุบันมีราคาต่ำ เนื่องจากถูกแทนที่ด้วยเพชรเทียมชนิดอื่น ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเพชรในธรรมชาติมากกว่า เช่น เซอร์โคเนีย เป็นต้น โทปาซสีฟ้าเป็นที่นิยมในกลุ่มชาวยุโรปและอเมริกา ที่วางจำหน่ายในท้องตลาดมีทั้งสีที่เกิดตามธรรมชาติและที่เกิดขึ้นจากการฉายรังสี

การเพิ่มคุณค่าโทปาซด้วยการฉายรังสีเริ่มมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2490 และมีการพัฒนาเทคนิคต่างๆ เรื่อยมาจนกระทั่งสามารถผลิตเป็นอุตสาหกรรม รังสีสามารถเปลี่ยนสีโทปาซจากใสไม่มีสีเป็น สีเหลืองหรือส้ม สีน้ำตาล สีควนบุหรี่ และสีฟ้า สีเหลืองที่เกิดจากรังสีแกมมาจะจางหายไปอย่างรวดเร็วในเวลาเพียงสองสามนาที สีน้ำตาลอาจจางลงช้าๆ การเผาโทปาซสีน้ำตาลอมเขียวที่อุณหภูมิประมาณ 2000°C จะทำให้สีน้ำตาลหายไปคงเหลือสีฟ้าไว้ สีที่เกิดขึ้นมักเข้มกว่าสีในธรรมชาติ สีนี้จะอยู่ตัวและไม่สามารถตรวจสอบความแตกต่างระหว่างสีที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติกับสีที่เกิดจากการฉายรังสีด้วยเทคนิคที่มีอยู่ในปัจจุบัน ทั้งนี้เพราะสีในธรรมชาติก็เกิดขึ้นด้วยกลไกเดียวกัน

รังสีที่ใช้ในการเปลี่ยนสีโทปาซมี 3 ชนิด<sup>(2)</sup> คือ รังสีแกมมา นิวตรอน และอิเล็กตรอน ในขบวนการเปลี่ยนสีโทปาซด้วยนิวตรอนนั้น ผลของปฏิกิริยานิวเคลียร์จะทำให้เกิดสารไอโซโทปรังสีขึ้น ดังนั้น จึงต้องเก็บโทปาซที่ฉายนิวตรอนแล้วเป็นระยะเวลาหนึ่งเพื่อให้รังสีสลายตัวลงมาอยู่ในระดับที่ปลอดภัย คือ มีกัมมันตภาพรังสีไม่เกิน 2

นาโนคูรี (ตามกำหนดมาตรฐานในทวีปยุโรป)จึงสามารถนำออกจำหน่ายได้ ระยะเวลาในการเก็บขึ้นกับชนิดของไอโซโทปที่เจือปนในโทปาซ ซึ่งชนิดและปริมาณจะเปลี่ยนไปตามแหล่งต้นกำเนิดของพลอย การศึกษาธาตุปริมาณน้อยจะเป็นประโยชน์ในการจำแนกแหล่งที่มาของโทปาซและพิจารณาเวลาที่เหมาะสมในการฉายรังสี

การทดลองครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาธาตุปริมาณน้อยในโทปาซจากแหล่งต่างๆ

## 2. วัสดุอุปกรณ์

2.1 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว1/1

2.2 ระบบวัดรังสีแกมมา ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ต่อไปนี้

2.2.1 หัววัดรังสีแกมมาเป็นแบบโซลิตสเตรทของบริษัท CANBERRA Model 72229 ใช้ผลึกของเจอร์มันเนียมซึ่งแพร่ด้วยธาตุลิเทียม<sup>(3)</sup>เป็นตัวตรวจวัดรังสี มีค่าFWHMเป็น1.5 keVที่พลังงาน 122 keV

2.2.2 Preamplifier ของบริษัท CANBERRA Model 970C

2.2.3 High Voltage Power Supply ของบริษัท ORTEC Model 459

2.2.4 Spectroscopy Amplifier ของบริษัท ORTEC Model 472A

2.2.5 เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบมัลติแชนเนลของบริษัท Nuclear Data Model ND 62

2.2.6 ไมโครคอมพิวเตอร์IBM PC/AT compatible CPU-286

2.2.7 Printer ของบริษัท Centronics Model 122 Graphics

2.3 เครื่องชั่ง Mettler model H 51 สามารถชั่งได้ละเอียดถึง 0.01 มก.

2.4 โทปาซจากแหล่ง ศรีลังกา ไนจีเรีย สาธารณรัฐประชาชนจีน อินเดียและบราซิล

2.5 สารมาตรฐาน SOIL-7

### 3. การทดลอง

#### 3.1 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ

สุ่มตัวอย่างโทปาซจากแหล่ง ศรีลังกา ไนจีเรีย จีน อินเดีย และบราซิล แหล่งละ 2 ตัวอย่างห่อด้วยแผ่นอะลูมิเนียมแล้วนำไปอบในท่อ A1 ซึ่งมีเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์  $3.1 \times 10^{11} \text{ n.cm}^{-2}.\text{sec}^{-1}$  เป็นเวลา 1 นาที ทิ้งไว้ครึ่งชั่วโมง เพื่อลดการรบกวนของ ไอโซโทปปรังสี  $\text{Al}^{28}$  ซึ่งเป็นธาตุหลักของโทปาซและมีครึ่งชีวิต (Half-life) 2.31 นาที แล้วนำไปวัดรังสีแกมมาเปดรัมด้วยหัววัดรังสี  $\text{Ge(Li)}$  ซึ่งประกอบกับเครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบมัลติแชนเนล เป็นเวลา 30 นาที

นำโทปาซอีกชุดหนึ่งไปอบในท่อ LS8 ซึ่งมีเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ประมาณ  $3.2 \times 10^{12} \text{ n.cm}^{-2}.\text{sec}^{-1}$  เป็นเวลาประมาณ 20 ชั่วโมง ทิ้งให้สลายตัวประมาณ 4 สัปดาห์ นำไปวิเคราะห์ไอโซโทปซึ่งมีครึ่งชีวิตยาว

#### 3.2 การวิเคราะห์เชิงปริมาณ

สารมาตรฐานที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณ คือ SOIL-7 ซึ่งเป็นตัวอย่างของดินจากบริเวณใกล้กับเมือง Ebensee ประเทศออสเตรีย และผ่านการตรวจวิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบผลระหว่างห้องปฏิบัติการต่างๆ

เนื่องจากระยะเวลาของการเก็บพลอยก่อนนำออกจำหน่าย (เพื่อทิ้งให้สารรังสีสลายตัวอยู่ในระดับที่ปลอดภัย) ขึ้นกับปริมาณของไอโซโทปปรังสีที่มีครึ่งชีวิตยาวที่เจือปนอยู่ในเนื้อพลอย ดังนั้น จึงได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณเฉพาะธาตุที่ให้ไอโซโทปปรังสีซึ่งมีครึ่งชีวิตยาว ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

ซึ่งนำหนักของโทปาซจากแหล่งศรีลังกา ไนจีเรีย สาธารณรัฐประชาชนจีน และบราซิลแหล่งละ 2 ตัวอย่างและอินเดีย 1 ตัวอย่าง บรรจุในขวดพลาสติกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 ซม. สูง 1 ซม. ขวดละ 1 ตัวอย่าง ซึ่งสารมาตรฐาน SOIL-7 ตัวอย่างละประมาณ 100 มก. แบ่งตัวอย่างออกเป็น 5 ชุด จัดเป็นแถวโดยให้ตัวอย่างสาร

มาตรฐานอยู่ตรงกลางระหว่างโทปาซจากแหล่งเดียวกันได้เฉลี่ย 3 ตัวอย่าง (ยกเว้น โทปาซจากอินเดียจะมีเพียง 2 ตัวอย่าง) บรรจุตัวอย่างทั้งหมดลงในภาชนะสำหรับอบนิวตรอนอินเดียด้วยกัน แล้วนำไปอบนิวตรอนในท่อLS8 เป็นเวลาประมาณ 20 ชั่วโมง ingsให้สลายตัวประมาณ 4 สัปดาห์ จึงนำไปวิเคราะห์ปริมาณไอโซโทปที่มีครึ่งชีวิตยาว

วัดแบคกราวนด์ในช่วงพลังงานตั้งแต่ประมาณ 200 keV ถึง 2300 keV เป็นเวลา 60 นาที วางตัวอย่างโทปาซติดกับหัววัดรังสี วัดแกมมาสเปกตรัมในช่วงพลังงานเดียวกันเป็นเวลา 60 นาที นำสเปกตรัมของแบคกราวนด์มาหักออกจากสเปกตรัมของสารตัวอย่าง วัดสารมาตรฐานด้วยวิธีเดียวกัน

ในการวิเคราะห์ปริมาณธาตุเจือปนใช้วิธีเปรียบเทียบพื้นที่พีคของสารตัวอย่างกับพื้นที่พีคพลังงานเดียวกันของสารมาตรฐาน การคำนวณพื้นที่พีคใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ASAP โดยคำนวณจากพีคพลังงาน 1221.3 และ 1230.9 keV ของ Ta-182, 1173.2 และ 1332.5 keV ของ Co-60, 604.7 keV ของ Cs-134, 889.3 keV ของ Sc และ 834.8 keV ของ Mn-54<sup>(4)</sup>

#### ขีดจำกัดของการวัด(Limit of detection)

การคำนวณขีดจำกัดของการวัด (Limit of Detection) ใช้วิธีของ Curie<sup>(5)</sup> ซึ่งมีสูตรความสัมพันธ์ดังนี้

$$LD = 3.29 \sqrt{B_g}$$

เมื่อ  $B_g$  เป็นจำนวนนับของแบคกราวนด์

## 4. ผลการทดลอง

### 4.1 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ

จากการตรวจวัดไอโซโทปทั้งที่มีครึ่งชีวิตสั้นและยาว พบว่า นอกจากอะลูมิเนียมซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่แล้ว โทปาซจากแหล่งต่างๆยังมีธาตุต่างๆดังแสดงในตารางที่ 4.1.1

ตารางที่ 4.1.1 ไอโซโทปรังสีที่พบในโทปาซจากแหล่งต่างๆ

แหล่งที่มาของตัวอย่างโทปาซ	ไอโซโทปรังสีที่ตรวจพบ	
	ครึ่งชีวิตสั้น	ครึ่งชีวิตยาว
ศรีลังกา	Al-28,Mg-27,Na-24	ND
ไนจีเรีย	Al-28,Mg-27,Na-24	Ta-182,Mn-54,Sc-46
บราซิล	Al-28,Mg-27,Na-24	Cs-134, Sc-46
สาธารณรัฐประชาชนจีน	Al-28,Mg-27,Na-24	Cs-134,Co-60,Mn-54,Sc-46, Ta-182,Fe-59
อินเดีย	Al-28,Mg-27	Ta-182

4.2 การวิเคราะห์ในเชิงปริมาณ

ปริมาณของธาตุปริมาณน้อยที่เจือปนในโทปาซจากทั้งห้าแหล่งแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4.2.1

ตารางที่ 4.2.1 ปริมาณของธาตุปริมาณน้อยที่เจือปนในโทปาซจากแหล่งต่างๆ

แหล่งที่มาของตัวอย่างโทปาซ	ปริมาณธาตุ(ppm)				
	Ta	Co	Cs	Sc	Mn
ศรีลังกา	ND	ND	ND	ND	ND
ไนจีเรีย *	0-3.55	ND	ND	.04-.05	26.57-77.83
บราซิล	ND	ND	1.95-18.18	0-0.02	ND
สาธารณรัฐประชาชนจีน	0-3.15	.64-.72	0-0.41	.02-.09	0-10.04
อินเดีย	2.28	ND	ND	ND	ND
LOD (av.)	0.11	0.08	0.06	0.006	7.79

\* LOD (Limit of Detection) เฉลี่ย ของ Sc, Mn เป็น .016 ppm และ 30.9 ppm ตามลำดับ

ND - Not Detectable

## 5. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของไอโซโทปรังสีซึ่งมีครึ่งชีวิตสั้นของโทปาซจากแหล่งต่างๆ พบไอโซโทปของ Al-28, Mg-27 และ Na-24 ไอโซโทปเหล่านี้เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ของอะลูมิเนียมซึ่งเป็นธาตุหลักของโทปาซ นั่นคือปฏิกิริยา  $^{27}\text{Al}(n,\gamma)^{28}\text{Al}$ ,  $^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$  และ  $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$  ไม่พบไอโซโทปรังสีของธาตุปริมาณน้อยซึ่งมีครึ่งชีวิตสั้นชนิดอื่น

โทปาซเหล่านี้มีธาตุร่องรอยครึ่งชีวิตยาวที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4.1.1 การอบนิวตรอนทำให้โทปาซจากไนจีเรียเกิดไอโซโทปรังสีของ Ta-182, Mn-54 และ Sc-46 โทปาซจากบราซิลพบ Cs-134 และ Sc-46 โทปาซจากสาธารณรัฐประชาชนจีนพบ Co-60, Fe-59, Cs-134, Mn-54, Sc-46 และ Ta-182 และโทปาซจากอินเดียตรวจพบ Ta-182

ตารางที่ 4.1.2 แสดงให้เห็นว่าโทปาซจากไนจีเรีย สาธารณรัฐประชาชนจีนและอินเดียมีแทนทาลัมเจือปนในปริมาณใกล้เคียงกัน คือมีค่าอยู่ระหว่าง 0-3.15 ppm โทปาซจากไนจีเรียยังเกิดไอโซโทปของ Mn-54 ในปริมาณค่อนข้างสูง เป็นที่น่าสังเกตว่าโทปาซจากศรีลังกามีธาตุปริมาณน้อยซึ่งมีครึ่งชีวิตยาวเจือปนน้อยมากจนไม่สามารถตรวจพบภายใต้เงื่อนไขการทดลองครั้งนี้

จากตารางที่ 4.1.2 แสดงให้เห็นว่าขีดจำกัดของการวัดธาตุสแกนเดียมและแมงกานีส (Limit of Detection) ของโทปาซจากไนจีเรียมีค่าค่อนข้างสูง เนื่องจากฟลักซ์พลังงาน 0.889 MeV และ 0.834 MeV ของสแกนเดียมและแมงกานีสที่ใช้ในการคำนวณอยู่บนฟลักซ์ Compton ซึ่งเกิดจากฟลักซ์ 1.12 MeV ของสแกนเดียม ทำให้แบคกราวนด์บริเวณนั้นมีค่าสูง

ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า โทปาซจากศรีลังกามีความเหมาะสมต่อขบวนการเปลี่ยนสีด้วยนิวตรอนมากที่สุด เพราะมีธาตุซึ่งให้ไอโซโทปรังสีครึ่งชีวิตยาวเจือปนในปริมาณน้อย โทปาซที่มีความเหมาะสมรองลงมาคือโทปาซจากประเทศอินเดีย

เนื่องจากมีธาตุแทนทาลัมเจือปนเพียงอย่างเดียว การฉายนิวตรอนด้วยขนาดที่พอเหมาะ อาจทำให้ปริมาณรังสีเกิดขึ้นในระดับที่ไม่สูงนัก ส่วนโทปาซจากไนจีเรียนอกจากมีแทนทาลัมแล้วยังมีธาตุแมงกานีสเจือปนในปริมาณสูง ทำให้เกิดไอโซโทปของแมงกานีส-54 ซึ่งมีครึ่งชีวิตยาวถึง 312.5 วัน จากการทดลองพบว่า ต้องใช้เวลาในการสลายตัวนานกว่า 2 ปี จึงสามารถนำออกจำหน่ายได้

โทปาซจากสาธารณรัฐประชาชนจีนไม่เหมาะสมสำหรับการเปลี่ยนสีด้วยวิธีนี้ เนื่องจากให้สารไอโซโทปรังสีซึ่งมีครึ่งชีวิตยาวตั้งแต่ 100 วันขึ้นไปหลายชนิด โดยเฉพาะโคบอลต์-60 ซึ่งมีครึ่งชีวิตยาวถึง 5 ปี สำหรับโทปาซจากบราซิลที่พบไอโซโทปรังสีของ Cs-134 ในปริมาณสูง อาจต้องใช้เวลาจนถึง 20 ปี

ถึงแม้ว่า โทปาซจากแหล่งศรีลังกาจะมีธาตุซึ่งให้ไอโซโทปรังสีครึ่งชีวิตยาวเจือปนในปริมาณน้อย แต่หากได้รับนิวตรอนในปริมาณสูงเกินไป อาจทำให้เกิดรังสีในปริมาณสูงได้เช่นกัน จากการทดลองพบว่า ปริมาณนิวตรอนที่เหมาะสมสำหรับการฉายโทปาซจากศรีลังกาคือ  $2 \times 10^{17} \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$  ซึ่งต้องใช้เวลาประมาณ 3-6 เดือน รังสีจึงจะลดลงมาอยู่ในระดับที่กำหนด (2 นาโนคูรีต่อกรัม) การวิเคราะห์ปริมาณในการทดลองครั้งนี้อาจมีข้อผิดพลาดเนื่องจากรูปร่างที่แตกต่างกันระหว่างสารตัวอย่างกับสารมาตรฐาน ซึ่งในที่นี้สารตัวอย่างที่ใช้เป็นเม็ดพลอยเจียรไนแล้ว แต่สารมาตรฐานมีลักษณะเป็นผง ทำให้ระยะทางที่แท้จริงระหว่างหัววัดรังสีกับตัวอย่างทั้งสองแตกต่างกัน

## 6. เอกสารอ้างอิง

1. E.H. Kraus, W.F. Hunt and L.S. Ramsdell. **Mineralogy** fifth edition, McGraw-Hill Book Company, Inc., N.Y., Toronto, London (1959) 372-373.
2. K.Nassau. **Gemstone Enhancement**. Butterworths, London (1984) 46-60.
3. สุรพงษ์ พิมพ์จันทร์ วิทยานิพนธ์ เรื่อง "การวัดแกมมาสเปกตรัมด้วยหัววัดเซอร์มันเนียมลิเทียม" (2518)
4. G. Erdtmann and W. Soyka. **Die -Linien der Radionuklide**. Band I, Jul-1003-AC., 1973.
5. L.A. Curie. *Anal.Chem.*, **40**, (1968) 586-593.

เนื่องจากมีธาตุแทนทาลัมเจือปนเพียงอย่างเดียว การฉายนิวตรอนด้วยขนาดที่พอเหมาะ อาจทำให้ปริมาณรังสีเกิดขึ้นในระดับที่ไม่สูงนัก ส่วนโทปาซจากไนจีเรียนอกจากมีแทนทาลัมแล้วยังมีธาตุแมงกานีสเจือปนในปริมาณสูง ทำให้เกิดไอโซโทปของแมงกานีส-54 ซึ่งมีครึ่งชีวิตยาวถึง 312.5 วัน จากการทดลองพบว่า ต้องใช้เวลาในการสลายตัวนานกว่า 2 ปี จึงสามารถนำออกจำหน่ายได้

โทปาซจากสาธารณรัฐประชาชนจีนไม่เหมาะสมสำหรับการเปลี่ยนสีด้วยวิธีนี้ เนื่องจากให้สารไอโซโทปรังสีซึ่งมีครึ่งชีวิตยาวตั้งแต่ 100 วันขึ้นไปหลายชนิด โดยเฉพาะโคบอลต์-60 ซึ่งมีครึ่งชีวิตยาวถึง 5 ปี สำหรับโทปาซจากบราซิลที่พบไอโซโทปรังสีของ Cs-134 ในปริมาณสูง อาจต้องใช้เวลาจนถึง 20 ปี

ถึงแม้ว่า โทปาซจากแหล่งศรีลังกาจะมีธาตุซึ่งให้ไอโซโทปรังสีครึ่งชีวิตยาวเจือปนในปริมาณน้อย แต่หากได้รับนิวตรอนในปริมาณสูงเกินไป อาจทำให้เกิดรังสีในปริมาณสูงได้เช่นกัน จากการทดลองพบว่า ปริมาณนิวตรอนที่เหมาะสมสำหรับการฉายโทปาซจากศรีลังกาคือ  $2 \times 10^{17} \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$  ซึ่งต้องใช้เวลาประมาณ 3-6 เดือน รังสีจึงจะลดลงมาอยู่ในระดับที่กำหนด (2 นาโนคูรีต่อกรัม) การวิเคราะห์ปริมาณในการทดลองครั้งนี้อาจมีข้อผิดพลาดเนื่องจากรูปร่างที่แตกต่างกันระหว่างสารตัวอย่างกับสารมาตรฐาน ซึ่งในที่นี้สารตัวอย่างที่ใช้เป็นเม็ดพลอยเจียรไนแล้ว แต่สารมาตรฐานมีลักษณะเป็นผง ทำให้ระยะทางที่แท้จริงระหว่างหัววัดรังสีกับตัวอย่างทั้งสองแตกต่างกัน

## 6. เอกสารอ้างอิง

1. E.H. Kraus, W.F. Hunt and L.S. Ramsdell. **Mineralogy** fifth edition, McGraw-Hill Book Company, Inc., N.Y., Toronto, London (1959) 372-373.
2. K.Nassau. **Gemstone Enhancement**. Butterworths, London (1984) 46-60.
3. สุรพงษ์ พิมพ์จันทร์ วิทยานิพนธ์ เรื่อง "การวัดแกมมาสเปกตรัมด้วยหัววัดเซอร์มันเนียมลิเทียม" (2518)
4. G. Erdtmann and W. Soyka. **Die -Linien der Radionuklide**. Band I, Jul-1003-AC., 1973.
5. L.A. Curie. *Anal.Chem.*, **40**, (1968) 586-593.



# การศึกษาเบื้องต้นความสัมพันธ์ระหว่าง ธาตุองค์ประกอบกับสีของท้วมาลิน

ชาญชัย อัครวินิกุลชัย สุริยะ ปังฉา และ อัจฉรา แสงอรียวนิช

## บทคัดย่อ

ในการทดลองนี้ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างธาตุองค์ประกอบกับการเกิดสีของท้วมาลินที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุในตัวอย่างท้วมาลินสีต่างๆ ด้วยเทคนิคการอาบนิวตรอน (Neutron Activation Analysis) แสดงให้เห็นว่า ท้วมาลินโดยทั่วไปประกอบด้วยธาตุอะลูมิเนียมเป็นธาตุหลักมีปริมาณโดยเฉลี่ยร้อยละ 14.92 ธาตุโซเดียม แมงกานีสและเหล็กโดยเฉลี่ยร้อยละ 1.13, 0.65 และ 0.32 ตามลำดับ ธาตุปริมาณน้อยที่พบ ได้แก่ สังกะสี ซีเซียมและแทนทาลัม ส่วนธาตุรูบิเดียมและโครเรียมพบในบางตัวอย่างเท่านั้น

ท้วมาลินที่ไม่มีสีจะมีส่วนประกอบของอะลูมิเนียมน้อยกว่าสีอื่นๆ กล่าวคือ มีเพียงร้อยละ 10.07 แต่มีโซเดียมสูงถึงร้อยละ 7.45 และมีธาตุปริมาณน้อยเจือปนในปริมาณที่ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของท้วมาลินที่มีสีมาก นอกจากนี้ ยังพบว่า ท้วมาลินสีเขียว จะมีธาตุเหล็กเจือปนในปริมาณที่สูงกว่าสีอื่นๆ ส่วนท้วมาลินสีชมพูจะมีธาตุเหล็กเจือปนอยู่เพียงเล็กน้อย จึงอาจสรุปได้ว่า รังสีแกมมาสามารถทำให้ท้วมาลินซึ่งมีธาตุเหล็กเจือปนน้อยมีสีชมพูเข้มขึ้น

## 1. คำนำ

ท้วมาลินจัดเป็นพลอยเนื้ออ่อนที่รู้จักกันแพร่หลายว่ามีหลากสี แต่ละสีมีชื่อเรียกแตกต่างกันไป เช่น สีน้ำเงินเรียกว่า อินดิโกไลท์(indigolite) สีเขียวเรียกว่า เวอร์เดลไลท์(verdelite) และสีชมพูเรียกว่า รูเบลไลท์(rubellite) สีที่นิยมมากที่สุดคือ รูเบลไลท์เม็ดที่มีสีสวยงาม ไม่มีตำหนิ มีราคาสูงกว่าสองหมื่นบาทต่อกะรัต<sup>(1)</sup> ผู้ค้าพลอยจึงได้มีความพยายามในการปรับปรุงสีของท้วมาลินซึ่งไม่มีราคาให้เป็นสีที่มีราคาสูงขึ้น เช่น สีชมพูเข้ม เป็นต้น และกรรมวิธีหนึ่งที่ใช้ คือ การฉายท้วมาลินด้วยรังสีชนิดต่างๆ

ทัวมาลีนมีสูตรทางเคมีคือ<sup>(2)</sup>  $(\text{Na,Ca})(\text{Li,Mg,Al})_3\text{Al}_6\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH,F})_4$  มีรูปผลึกเป็นเฮกซะโกนอล มีความหนาแน่นระหว่าง 2.9-3.2 กรัม/ลบ.ซม.<sup>(3)</sup> ความแข็งประมาณ 7 ตามสเกลโมห์และมีค่าดัชนีหักเหระหว่าง 1.624-1.644 ผลึกที่สวยงามพบมากบริเวณเทือกเขาอูราล ประเทศพม่า ประเทศศรีลังกา บริเวณทิศตะวันตกเฉียงใต้ของทวีปแอฟริกา ประเทศสวีตเซอร์แลนด์ เกาะมาดากาสการ์และประเทศสหรัฐอเมริกา

การเกิดสีของทัวมาลีนเป็นขบวนการที่ซับซ้อน เนื่องจากมีขั้นตอนการเกิดสีที่แตกต่างกันไป เชื่อกันว่า ธาตุเหล็กทำให้เกิดสีเขียวและสีน้ำเงินโดยขบวนการส่งผ่านประจุ(charge transfer) เป็นที่ทราบกันดีว่า ทัวมาลีนสีน้ำเงินอมเขียวสามารถเผาให้สีจางลงที่อุณหภูมิประมาณ 650 °ซ รังสีอาจทำให้เกิดสีขึ้นในทัวมาลีน วัลทก บุญคง และคณะ<sup>(4)</sup> ได้ทดลองฉายทัวมาลีนด้วยนิวตรอนพบว่า ด้วยนิวตรอนระดับ  $1.15 \times 10^{16}$  นิวตรอน/ตร.ซม. ทำให้ทัวมาลีนสีชมพูบางเม็ดเปลี่ยนเป็นชมพูเข้มหรือสีเหลือง ทัวมาลีนสีน้ำตาลเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอมส้ม สีม่วงอ่อนเป็นสีน้ำตาลอมส้ม และสีเหลืองอมเขียวเปลี่ยนเป็นสีแดงเข้ม

ในการทดลองฉายทัวมาลีนด้วยรังสีแกมมาปริมาณ 120 กิโลเกรย์ พบว่าทัวมาลีนสีชมพูอ่อนบางเม็ดมีสีเข้มขึ้นหรือเปลี่ยนเป็นสีส้ม เม็ดสีเขียว สีน้ำเงินอาจเปลี่ยนเป็นสีม่วง บางเม็ดที่มีสีเขียวและไม่มีสีอาจไม่มีการเปลี่ยนแปลงสี แสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนสีของทัวมาลีนขึ้นกับคุณสมบัติของพลอยแต่ละก้อน และมีแนวโน้มว่าสีที่เกิดจากการฉายรังสีคงทนต่อแสงสว่าง

ในการทดลองครั้งนี้ ต้องการศึกษาค้นคว้าความสัมพันธ์ระหว่างธาตุที่เป็นองค์ประกอบกับการเปลี่ยนสีของทัวมาลีนเมื่อฉายด้วยรังสีแกมมาโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยการอาบนิวตรอน (Neutron Activation Analysis)

## 2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

### 2.1 วัสดุที่ใช้ทดลอง

#### 2.1.1 ทัวมาลีนสีต่างๆ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา

2.1.2 สารมาตรฐาน SOIL-7 ซึ่งเป็น Certified Reference Material จากทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ และมีองค์ประกอบของธาตุปริมาณหลัก ปริมาณรอง และปริมาณน้อย ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2

**ตารางที่ 2.1** องค์ประกอบของธาตุปริมาณหลักและปริมาณรองในสารมาตรฐาน SOIL-7

No.	Element	Concentration* mg/g	Confidence interval (significant level 0.05) mg/g
1	Aluminium	47	44 - 51
2	Calcium	163	157 - 174
3	Iron	25.7	25.2 - 26.3
4	Magnesium	11.3	11.0 - 11.8
5	Potassium	12.1	11.3 - 12.7
6	Silicon	180	169 - 201
7	Sodium	2.4	2.3 - 2.5
8	Titanium	3.0	2.6 - 3.7

\* expressed on a dry-weight basis (constant weight at 105°C)

**NOTE** The concentration values of the major and minor elements passed all test criteria for certified values with the exception of one: their confidence interval are larger than those normally allowed for major components of reference materials, therefore, these values could not be certified.

## 2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

2.2.1 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว-1/1

2.2.2 เครื่องชั่ง Mettler model H54AR ชั่งได้ละเอียด 0.00001 กรัม

2.2.2 หัววัดรังสี HPGe ของบริษัท ORTEC model GMX 18210

2.2.3 ORTEC 456 High voltage supply

2.2.4 ORTEC 575A Spectroscopy amplifier

2.2.5 Multichannel Analyzer ของบริษัท Nuclear Data model ND-62

2.2.6 Microcomputer ของ Microway

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของธาตุปริมาณน้อยในสารมาตรฐาน SOIL-7

Certified concentration values of trace elements

No.	Element	Concentration	Confidence interval
		mg/g	(significant level 0.05) mg/g
1	Antimony	1.7	1.4 - 1.8
2	Arsenic	13.4	12.5 - 14.2
3	Cerium	61	50 - 63
4	Cesium	5.4	4.9 - 6.4
5	Chromium	60	49 - 74
6	Cobalt	8.9	8.4 - 10.1
7	Copper	11	9 - 13
8	Dysprosium	3.9	3.2 - 5.3
9	Europium	1.0	0.9 - 1.3
10	Hafnium	5.1	4.8 - 5.5
11	Holmium*	1.1	(0.8 ; 1.5)
12	Lanthanum	28	27 - 29
13	Lead	60	55 - 71
14	Manganese	631	604 - 650
15	Neodymium	30	22 - 34
16	Rubidium	51	47 - 56
17	Samarium	5.1	4.8 - 5.5
18	Scandium	8.3	6.9 - 9.0
19	Strontium	108	103 - 114
20	Tantalum	0.8	0.6 - 1.0
21	Terbium	0.6	0.5 - 0.9
22	Thorium	8.2	6.5 - 8.7
23	Uranium	2.6	2.2 - 3.3
24	Vanadium	66	59 - 73
25	Ytterbium	2.4	1.9 - 2.6
26	Yttrium	21	15 - 27
27	Zinc	104	101 - 113
28	Zirconium	185	180 - 201

\* expressed on a dry-weight basis (constant weight at 105°C)

\*\* only two laboratories provided results. These results are shown in brackets in the place of confidence limits.

## 2.3 วิธีการทดลอง

การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของตัวมาลีนด้วยเทคนิคการอาบนิวตรอนมีขั้นตอนดังนี้

2.3.1 เลือกตัวมาลีนสีชมพูเข้ม ชมพูปนเขียว ไม่มีสี เขียว ส้ม และเทา อย่างละ 1 ชิ้น นำมาบดให้เป็นผง แบ่งตัวอย่างออกเป็นสองชุด ใช้สัญลักษณ์ A1, A2, ..... A6 และ B1, B2, ..... B6 สำหรับตัวอย่างชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ตามลำดับ ชั่งสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน SOIL-7 ให้มีน้ำหนักตัวอย่างละประมาณ 100 มก. ใส่ในขวดโพลีเอทิลีนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 ซม. สูง 1 ซม. ปิดฝาแล้วผืนึกด้วยความร้อน

### 2.3.2 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุซึ่งมีครึ่งชีวิตสั้น

นำสารตัวอย่างที่เตรียมไว้ในข้อ 2.3.1 มาเรียงเป็นแถวๆละ 3 ตัวอย่าง จัดให้สารมาตรฐานอยู่กลางระหว่างสารตัวอย่าง นำไปอาบนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว-1/1 ครั้งละ 1 แถว ในท่ออาบนิวตรอนซึ่งมีค่านิวตรอนฟลักซ์ประมาณ  $3 \times 10^{11}$  นิวตรอนต่อตร.ซมต่อวินาที เป็นเวลา 10 วินาที

เริ่มวัดรังสีแกมมาของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 ในนาทีที่ 2, 5 และ 8 ตามลำดับ โดยนับจากเวลาเมื่อสิ้นสุดการอาบตัวอย่าง ในการคำนวณปริมาณของอะลูมิเนียมใช้พีคพลังงาน 1779 keV ของ Al-28 ใช้เวลาวัดตัวอย่างละ 2 นาที

ทิ้งให้สารตัวอย่างสลายตัวอีกประมาณ 2 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาวัดพีคพลังงาน 846.8 keV ของ Mn-56 เพื่อวิเคราะห์ปริมาณของแมงกานีส โดยใช้เวลาวัดตัวอย่างละ 3 นาที

### 2.3.3 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุซึ่งมีครึ่งชีวิตยาว

นำสารตัวอย่างที่เตรียมไว้ข้างต้นมาเรียงเป็นแถว ให้ขวดสารมาตรฐานอยู่กลางระหว่างขวดสารตัวอย่างให้ได้แถวละ 6 ตัวอย่างได้ทั้งหมด 3 แถว (ดังรูปที่ 2.1)

นำตัวอย่างทั้งหมดไปบรรจุในกระบอกอะลูมิเนียมเพื่อนำไปอบนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว-1/1 ในตำแหน่งซึ่งมีค่านิวตรอนฟลักซ์ประมาณ  $3 \times 10^{12}$  นิวตรอนต่อตร.ซมต่อวินาที เป็นเวลา 40 ชั่วโมง หลังจากทิ้งไว้ให้สลายตัวประมาณ 5 วัน จึงนำไปวิเคราะห์ปริมาณของโซเดียมจากไอโซโทป Na-24 โดยการวัดรังสีแกมมาพลังงาน 1369 keV ใช้เวลาวัดตัวอย่างละ 500 วินาที

ทิ้งให้สารตัวอย่างสลายตัวอีกประมาณ 25 วัน แล้วนำมาวัดสเปกตรัมของรังสีแกมมาเพื่อวิเคราะห์ปริมาณของซีเซียม เหล็ก ธอเรียม รูบิเดียม แทนทาลัมและสังกะสี โดยวิเคราะห์จากพีคพลังงาน 604 keV ของ Cs-134, 1099 keV ของ Fe-59, 311 keV ของ Pa-233 1077 keV ของ Rb-86, 1221 keV ของ Ta-182 และ 1115 keV ของ Zn-65 ตามลำดับ ใช้เวลาวัดตัวอย่างละ 20 นาที

A1	A5	B1
ST	ST	ST
A2	A6	B2
A3	B5	B3
ST	ST	ST
A4	B6	B4

ST = สารมาตรฐาน

A1....A6, B1..B6 = สารตัวอย่าง

**รูปที่ 2.1** ลักษณะการจัดเรียงสารตัวอย่างสำหรับการอบนิวตรอนเพื่อวิเคราะห์ธาตุครึ่งชีวิตยาว

#### 2.3.4 การคำนวณปริมาณธาตุต่างๆ

ในการคำนวณปริมาณธาตุที่สนใจ ใช้วิธีเปรียบเทียบพื้นที่ใต้พีคที่กล่าวแล้วในข้อ 2.3.2 และ 2.3.3 ของสารตัวอย่างกับของสารมาตรฐานที่พลังงานเดียวกัน การคำนวณพื้นที่ใต้พีคใช้วิธีของโคเวลล์ (Covell's method)

### 3. ผลการทดลอง

รูปที่ 3.1 และ 3.2 เป็นตัวอย่างแกมมาสเปกตรัมของทัวมาลิน เมื่อวิเคราะห์ธาตุ ซึ่งมีครึ่งชีวิตสั้น และธาตุครึ่งชีวิตยาว ตามลำดับ ผลจากการคำนวณพื้นที่ใต้พีคของสารตัวอย่างเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน พบว่า ทัวมาลินสีต่างๆมีธาตุองค์ประกอบดังแสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2

ตารางที่ 3.1 ปริมาณธาตุหลัก และธาตุรอง ในทัวมาลิน

Sample no.	Al (%)	Mn (%)	Na (%)	Fe (%)
A1 (ชมพู)	15.66 ± 1.54	0.77 ± 0.01	1.22 ± 0.02	0.04 ± 0.00
A2 (ชมพู เขียว)	15.11 ± 0.56	0.95 ± 0.05	1.15 ± 0.01	0.36 ± 0.03
A3 (ไม่มีสี)	10.07 ± 0.30	0.04 ± 0.00	8.45 ± 0.14	ND
A4 (เขียว)	15.02 ± 0.25	0.78 ± 0.05	1.10 ± 0.04	0.68 ± 0.01
A5 (ส้มอ่อน)	14.42 ± 0.27	0.02 ± 0.00	1.13 ± 0.08	ND
A6 (เทา)	14.37 ± 0.01	0.71 ± 0.04	1.06 ± 0.03	0.54 ± 0.00
Average*	14.92	0.65	1.13	0.32

ตารางที่ 3.2 ธาตุปริมาณน้อยในทัวมาลิน

Sample no.	Cs (ppm)	Rb (ppm)	Ta (ppm)	Th (ppm)	Zn (ppm)
A1 (ชมพู)	0.78 ± 0.12	ND	5.55 ± 1.48	0.48 ± 0.03	128.61 ± 8.09
A2 (ชมพู เขียว)	4.83 ± 0.13	17.69 ± 1.47	8.76 ± 2.43	ND	232.42 ± 16.78
A3 (ไม่มีสี)	52.73 ± 1.08	78.18 ± 0.21	2.41 ± 0.04	ND	70.77 ± 0.96
A4 (เขียว)	3.03 ± 0.50	ND	5.90 ± 0.41	ND	159.79 ± 5.50
A5 (ส้มอ่อน)	3.92 ± 1.13	ND	52.00 ± 23.75	ND	88.34 ± 1.49
A6 (เทา)	82.81 ± 10.68	78.30 ± 22.90	2.07 ± 0.31	ND	154.29 ± 17.95
Average*	19.07	19.20	14.98	0.10	152.69

\* เป็นค่าเฉลี่ยซึ่งไม่รวม A3

ND - Not Detectable

#### 4. วิจารณ์และสรุปผล

ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุหลัก ธาตุรองและธาตุปริมาณน้อยในตัวอย่างทัวมาลินสีต่างๆ ด้วยเทคนิคการอาบนิวตรอน ในตารางที่ 3.1 และ 3.2 แสดงให้เห็นว่า โดยทั่วไปทัวมาลินสีต่างๆจะประกอบด้วยธาตุอะลูมิเนียมซึ่งเป็นธาตุหลักโดยเฉลี่ยร้อยละ 14.92 ธาตุรองได้แก่ธาตุโซเดียมมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 1.13 ธาตุแมงกานีสร้อยละ 0.65 และธาตุเหล็กร้อยละ 0.32

ธาตุปริมาณน้อยที่เจือปนในปริมาณมากที่สุด ได้แก่ ธาตุสังกะสี ซึ่งพบว่ามีค่าเฉลี่ย 152.69 พีพีเอ็ม รองลงมาได้แก่ธาตุซีเซียมและแทนทาลัมซึ่งมีค่าเฉลี่ย 19.07 และ 14.98 พีพีเอ็ม ตามลำดับ ส่วนธาตุรูบิเดียมและทอเรียมพบในบางตัวอย่างเท่านั้น

นอกจากนั้นยังพบว่า ในทัวมาลินที่ไม่มีสีและสีส้มอ่อนมีธาตุแมงกานีส และ สังกะสีเจือปนในปริมาณต่ำ ไม่พบธาตุเหล็กในตัวอย่างทั้งสอง สำหรับทัวมาลินสีเขียว จะมีธาตุเหล็กเจือปนในปริมาณที่สูงกว่าสีอื่นๆ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Nassau<sup>(2)</sup> ที่กล่าวว่า เหล็กทำให้เกิดสีเขียวในทัวมาลิน ส่วนทัวมาลินสีชมพูจะมีธาตุเหล็กเจือปนอยู่เพียงเล็กน้อย คือ มีอยู่เพียง 0.04 %

สำหรับปริมาณธาตุต่างๆในทัวมาลินสีชมพูปนเขียวและสีเทา(ซึ่งเกิดจากสีเขียวผสมกับสีอื่นๆ) ให้สอดคล้องกับสีที่กล่าวแล้วข้างต้น

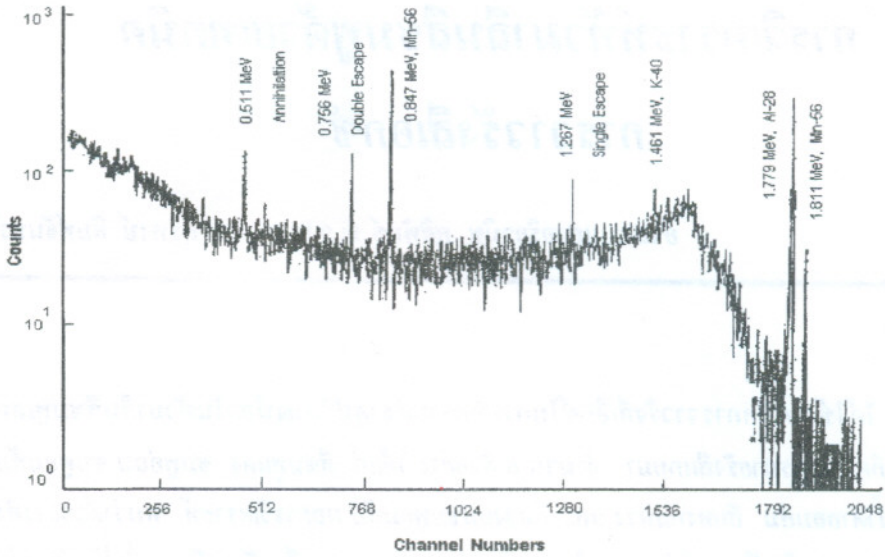
เป็นที่น่าสังเกตว่า ในทัวมาลินซึ่งไม่มีสีจะมีส่วนประกอบของอะลูมิเนียมอยู่ในปริมาณที่น้อยกว่าสีอื่นๆ กล่าวคือ มีเพียงร้อยละ 10.07 แต่มีโซเดียมสูงถึงร้อยละ 7.45

จึงอาจกล่าวได้ว่า ทัวมาลินที่นำมาฉายรังสีจะต้องมีธาตุเหล็กเจือปนในปริมาณต่ำจึงจะให้สีชมพูเข้มขึ้น

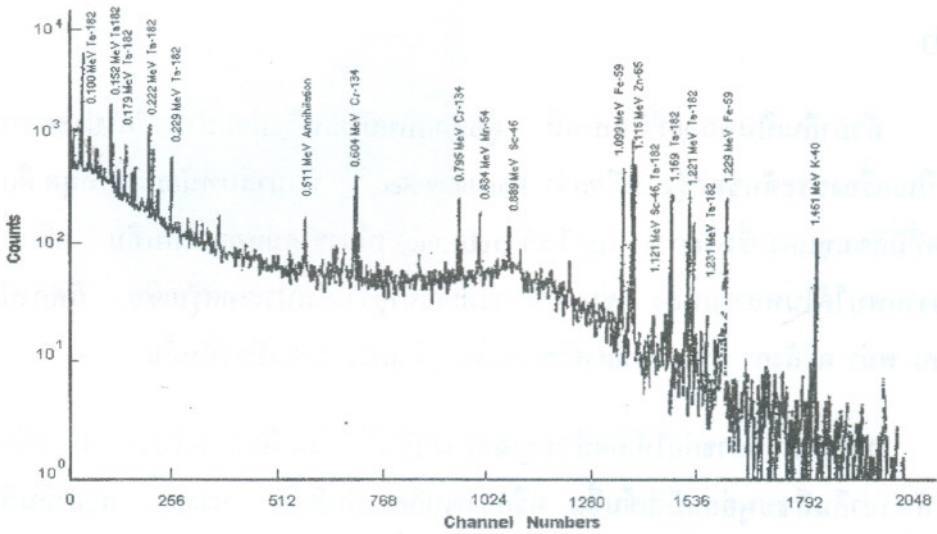


## 5. เอกสารอ้างอิง

1. พลอยสี นิตยสารพลอย ฉบับที่ 8 พ.ศ. 2534 หน้า136.
2. K. Nassau. **Gemstone Enhancement**. Butterworths, London(1984)p.167.
3. E.H. Kraus, W.F Hunt and L.S. Ramsdell. **Mineralogy**. McGraw-Hill Book Company, Inc. (1959) pp.382-383.
4. วัลลภ บุญคงและคณะ "การเพิ่มคุณภาพของพลอยโดยวิธีการอบรังสี" บทความเสนอในการสัมมนา วิชาการเรื่อง **พลอยอัญมณีมีค่าของไทย** วันที่ 17-21 ธันวาคม 2533 หน้า 192



**รูปที่ 3.1** แกมมาสเปกตรัมของท่วมวลินซึ่งวัดด้วยหัววัดรังสี GMX ที่ระยะห่างจากหัววัด 20 ซม. ภายหลังจากการอาบนิวตรอนเป็นเวลา 10 วินาที แล้วทิ้งให้สลายตัว 2 นาที ใช้เวลาวัดตัวอย่าง 2 นาที



**รูปที่ 3.2** แกมมาสเปกตรัมของท่วมวลินซึ่งวัดด้วยหัววัดรังสี GMX ที่ระยะห่างจากหัววัด 1 ซม. ภายหลังจากการอาบนิวตรอนเป็นเวลา 40 ชม. แล้วทิ้งให้สลายตัว 25 วัน ใช้เวลาวัดตัวอย่าง 20 นาที

# การวิเคราะห์ทัวมาลีนสีชมพูด้วยเทคนิค การวาวรังสีเอกซ์

อัจฉรา แสงอริยวณิช ศศิพันธุ์ ณ สงขลา และ สุรพงษ์ พิมพ์จันทร์

## บทคัดย่อ

ได้ใช้เทคนิคการวาวรังสีเอกซ์ในการวิเคราะห์ธาตุปริมาณน้อยในทัวมาลีนสีชมพูเกรดต่างๆซึ่งเกิดจากการฉายรังสีแกมมา จำนวน 6 ตัวอย่าง ได้แก่ สีชมพูแดง ชมพูอ่อน ชมพูอมส้ม ชมพูมน้ำตาลอมส้ม สีแดงอมม่วง และ สีม่วงอมชมพูอมส้ม ผลการวิเคราะห์ พบว่าตัวอย่างทั้งหมดมีธาตุแมงกานีสเป็นองค์ประกอบ ในบางตัวอย่างอาจพบธาตุเหล็ก สังกะสี ตะกั่ว บิสมัทหรือแคลเซียม เจือปนอยู่ด้วย ทั้งนี้ขึ้นกับเจดสีของตัวอย่างนั้นๆ เนื่องจากว่าไม่พบธาตุมลทินเหล่านี้ในทัวมาลีนสีชมพูแดง ดังนั้น จึงอาจกล่าวได้ว่า แมงกานีสเป็นธาตุสำคัญที่ทำให้เกิดสีชมพูในทัวมาลีน ส่วนธาตุมลทินอื่นๆเป็นเพียงองค์ประกอบเสริมให้เกิดสีชมพูเกรดต่างๆขึ้น

## คำนำ

ทัวมาลีนเป็นพลอยที่มีหลากสี ผู้ออกแบบอัญมณีจึงนิยมนำมาเรียงประกอบกันเป็นเครื่องประดับชุดสีรุ้ง ที่เรียกว่า Rainbow Set <sup>(1)</sup> ทัวมาลีนที่นิยมมากที่สุดคือชนิดที่มีสีชมพูแดง ซึ่งเรียกว่า รูเบลไลต์ (rubellite) เนื่องจากมีสีคล้ายทับทิม ผลึกที่สวยงามพบได้ในหลายแหล่ง เช่น บริเวณเทือกเขาอูราลในประเทศรัสเซีย อัฟกานิสถาน พม่า ศรีลังกา แทนซาเนีย สวิตเซอร์แลนด์ และ แชนเบีย เป็นต้น

การฉายรังสีอาจก่อให้เกิดสีชมพูเกรดต่างๆขึ้นในทัวมาลีนไม่มีสีบางชนิด หรือทำให้ทัวมาลีนสีชมพูอ่อนมีสีเข้มขึ้น หรืออาจเปลี่ยนเป็นสีส้ม บางครั้ง ทัวมาลีนสีเขียวอ่อนอาจเปลี่ยนเป็นสีชมพู และทัวมาลีนสีน้ำเงินจากบางแหล่งอาจเปลี่ยนเป็นสีแดงม่วง<sup>(2)</sup> ในปี 1992 มีการค้นพบแหล่งทัวมาลีนแหล่งใหญ่ในมลรัฐ Minas Gerlas ประเทศบราซิล ซึ่งประกอบด้วยทัวมาลีน สีดำ และ สีชมพู การฉายทัวมาลีนที่ไม่มีสีจากแหล่งนี้ด้วยรังสีแกมมา พบว่า ทัวมาลีนบางส่วนต้องใช้รังสีปริมาณสูงตั้งแต่ 150 -

200 เมกะแรงแด จึงจะเปลี่ยนเป็นสี่ชมพูมน้ำตาล ซึ่งเป็นผลสีที่แตกต่างจากที่พบในแหล่งอื่นๆ

เป็นที่ทราบกันดีว่า ธาตุปริมาณน้อยมีผลต่อการเกิดสีของพลอย ในการทดลองนี้ ได้ทำการศึกษาชนิดของธาตุปริมาณน้อยที่เจือปนอยู่ในทัวมาลีนสี่ชมพูเฉดต่างๆเพื่อใช้เป็นแนวทางในการกำหนดปริมาณรังสีที่ต้องการ และคาดคะเนสีของทัวมาลีนที่เกิดขึ้นหลังจากการฉายรังสี นอกจากนี้ ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำมาประกอบกับข้อมูลอื่นๆเพื่ออธิบายกลไกของการเกิดสีในทัวมาลีนด้วย การที่เลือกใช้เทคนิคการวาวรังสีเอ็กซ์ในการศึกษาธาตุปริมาณน้อย เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ สะดวก รวดเร็ว และไม่ต้องทำลายตัวอย่าง

### วิธีทดลอง

นำทัวมาลีนสี่ชมพูเฉดสีต่างๆที่เกิดจากการฉายรังสีแกมมา ได้แก่ ชมพูแดง (รูเบลไลท์) ชมพูอ่อน ชมพูมน้ำตาล ชมพูอมส้ม แดงอมม่วง และม่วงอมชมพูอมส้ม มาอย่างละ 2-3 เม็ด มาวิเคราะห์ธาตุปริมาณน้อยโดยใช้เทคนิคการวาวรังสีเอ็กซ์ ต้นกำเนิดรังสีเอ็กซ์ที่ใช้ คือ Pu-238 ซึ่งให้รังสีเอ็กซ์ของยูเรเนียม ไปกระตุ้นให้ตัวอย่างเกิดการวาวรังสีเอ็กซ์ วัดสเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวที่เกิดขึ้นด้วยหัววัด Si(Li) ซึ่งประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์พัลส์ดิแซนเนล นำสเปกตรัมที่ได้ไปวิเคราะห์พลังงานเพื่อจำแนกชนิดของธาตุปริมาณน้อยที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่าง

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

ผลการวัดรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวของทัวมาลีนสี่ชมพูชนิดต่างๆได้สเปกตรัมดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเมื่อนำมาวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของตัวอย่างเหล่านี้ ได้ผลดังสรุปไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ธาตุปริมาณน้อยที่พบในท้วมาลีนสีชมพูเฉดต่างๆ

ตัวอย่าง	ธาตุมลทิน					
	Bi	Fe	Ga	Mn	Pb	Zn
ชมพูแดง (รูเบลไลท์)				✓		
ชมพูอ่อน(จากประเทศแซมเบีย)	✓	✓		✓		
แดงอมม่วง			✓	✓		✓
ชมพูอมน้ำตาลอมส้ม		✓	✓	✓	✓	
ชมพูอมส้ม	✓	✓	✓	✓		
ม่วงอ่อนอมชมพูอมส้ม		✓	✓	✓		

ตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างท้วมาลีนเหล่านี้ มีองค์ประกอบของธาตุมลทินที่แตกต่างกันขึ้นกับสีของตัวอย่าง ธาตุปริมาณน้อยที่พบว่าเป็นองค์ประกอบรวมคือ ธาตุแมงกานีส ซึ่งพบในท้วมาลีนทุกๆสี ธาตุที่พบมากรองลงมา ได้แก่ ธาตุเหล็กและแคลเซียม ซึ่งพบในท้วมาลีนสีชมพูอมส้มเป็นส่วนใหญ่ สำหรับธาตุปริมาณน้อยอื่นๆที่พบแตกต่างกันไปตามเฉดสีของตัวอย่าง ได้แก่ ธาตุสังกะสี พบในท้วมาลีน สีแดงอมม่วง ตะกั่ว พบในท้วมาลีนสีชมพูอมน้ำตาลอมส้ม และบิสมัทพบในท้วมาลีนสีชมพูอ่อนและชมพูอมส้ม

ดังนั้น ธาตุมลทินในตัวอย่างจึงสามารถใช้เป็นข้อมูลในการประเมินปริมาณรังสีที่ใช้ และการเปลี่ยนสีของตัวอย่างภายหลังการฉายรังสี เช่น ท้วมาลีนที่มีไม่มีธาตุอื่นเป็นมลทินยกเว้นแมงกานีสเมื่อได้รับรังสี มักเปลี่ยนเป็นสีชมพูแดงซึ่งเป็นสีที่นิยมในท้องตลาด ส่วนท้วมาลีนที่มี ธาตุตะกั่วเป็นมลทินมักเปลี่ยนเป็นสีชมพูอมน้ำตาล ซึ่งโดยทั่วไป ปริมาณรังสีแกมมาที่ต้องใช้ในการฉายท้วมาลีนชนิดหลังนี้ อาจสูงถึง 300 - 400 เมกะแรด

การวิเคราะห์ธาตุปริมาณน้อยด้วยวิธีการวาวรังสีเอ็กซ์ที่ใช้มีข้อดี คือ สะดวก รวดเร็ว ไม่ต้องทำลายตัวอย่าง และสามารถวิเคราะห์ธาตุหลายชนิดได้ในคราวเดียวกัน

แต่มีข้อจำกัดคือ วิธีการนี้ไม่ไวต่อการตรวจวัดธาตุปริมาณน้อยๆ ที่มีเลขอะตอมตั้งแต่ 20 ลงมา

กลไกของการเกิดสีชมพูในทัวมาลีนยังไม่เป็นที่แน่ชัด Nassau เชื่อว่า<sup>(3)</sup> สีชมพูในรูเบลไลท์อาจเกิดจากสีของธาตุมลทิน  $Mn^{3+}$  แต่ทั้งนี้ในตัวอย่างจะต้องมีธาตุเหล็กเจือปนอยู่ในปริมาณน้อย ความเห็นนี้ คล้ายคลึงกับสมมติฐานของ Manning ที่คาดว่า<sup>(4)</sup> สีชมพูอาจเกิดจาก charge transfer ระหว่าง  $Mn^{2+}$  กับ  $Mn^{3+}$  หรือ  $Mn^{2+}$  กับ  $Fe^{3+}$  อย่างไรก็ตาม Berchovi และคณะเชื่อว่า สีชมพูเป็นผลของศูนย์กลางสี (color center) ซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องจากอิเล็กตรอนถูกจับไว้ที่ตำแหน่งว่างซึ่งเป็นของออกซิเจน

ผลการทดลองในตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่า แมงกานีสเป็นธาตุปริมาณน้อยที่พบในทัวมาลีนสีชมพูทุกตัวอย่าง เป็นที่น่าสังเกตว่า ไม่พบเหล็กในทัวมาลีนสีชมพูแดงหรือรูเบลไลท์ ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กในทัวมาลีนโดยใช้เทคนิคการอาบนิวตรอน<sup>(6)</sup> ซึ่งพบว่า มีธาตุเหล็กในทัวมาลีนสีชมพูน้อยกว่าสีอื่นๆ (< 0.04%) ดังนั้น จึงมีแนวโน้มว่า สีชมพูของทัวมาลีนเกิดจาก  $Mn^{3+}$  ตามสมมติฐานของ Nassau ดังกล่าวแล้วในข้างต้น

สำหรับต้นตอการเกิดสีของทัวมาลีนสีชมพูอมส้ม อาจเกิดจากธาตุเหล็ก  $Fe^{3+}$  ทำให้เกิดสีเหลืองในพลอยบางชนิด เช่น เบริล<sup>(5)</sup> จึงเป็นไปได้ว่า ในทัวมาลีน ธาตุเหล็กเจือปนอาจอยู่ในรูปของ  $Fe^{2+}$  ซึ่งไม่มีสี เมื่อได้รับรังสีอาจเกิดปฏิกิริยา  $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+} + e$  ซึ่งให้สีเหลือง เมื่อผสมกับสีชมพูจึงเกิดเป็นสีส้มขึ้น

กลไกของการเกิดสีในทัวมาลีนสีอื่นๆ ยังไม่ทราบแน่ชัด การตรวจพบธาตุแคลเซียม บิสมัท ตะกั่วและสังกะสีในตัวอย่างเหล่านี้ ทำให้เชื่อว่า ธาตุเหล่านี้ น่าจะมีบทบาทสำคัญในการก่อให้เกิดเฉดสีต่างๆ ขึ้น

### สรุปผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์ธาตุปริมาณน้อยตัวอย่างทัวมาลีนด้วยเทคนิคการวาวรังสีเอ็กซ์ สามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลในการประเมินผลของรังสีแกมมาต่อการเปลี่ยนสีของ

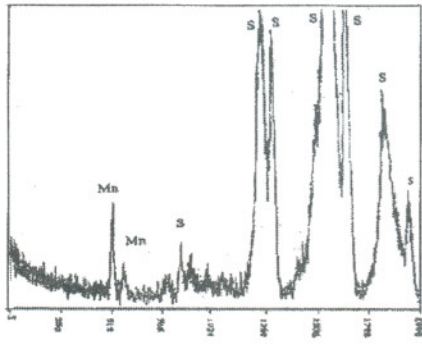
ท้วมาลิน มีแนวโน้มว่าท้วมาลินที่แมงกานีสเป็นธาตุมลทิน แต่มีเหล็กเจือปนในปริมาณน้อยจะเป็นสีชมพูแดงเมื่อได้รับรังสี ตัวอย่างที่มีธาตุเหล็กเป็นมลทินจะเปลี่ยนเป็นสีชมพูอมส้ม และที่มีธาตุตะกั่วเป็นมลทินจะเปลี่ยนเป็นสีชมพูอมน้ำตาล การทดลองนี้สนับสนุน ข้อสมมติฐานของ Nassau ที่กล่าวว่า สีชมพูในท้วมาลินเกิดจากสีของ  $Mn^{3+}$

### เอกสารอ้างอิง

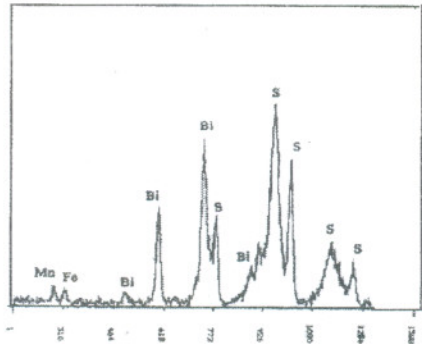
1. พลอยสี “ท้วมาลิน รุ่งหลากสี ฤาพลอยผสม” พลอย ฉบับที่ 8 พ.ศ. 2534 หน้า 32-37
2. Kurt Nassau. Gemstone Enhancement. Butterworths, London (1984) p. 168
3. Kurt Nassau. Am. Mineral. **60**, (1973) 710-713.
4. P.G.Manning. Can.Mineral. **9** (1969) 678-690.
5. Kurt Nassau. The Physics and Chemistry of Color. Butterworths, London (1983) p. 101.
6. A. Sangariyanich, C. Asvavijnikulchai, S. Pongkasem and P. Tungpittayakul. Proceedings 5<sup>th</sup> Asian Conference on Research Reactors, May 29-31, 1996. Taejon, Korea. pp. 396-399.

---

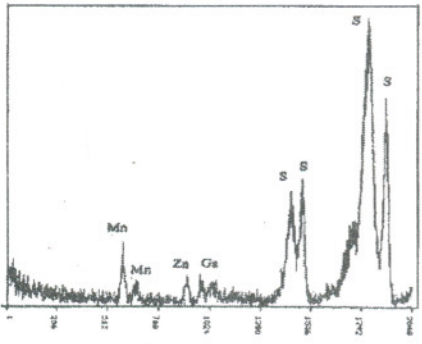
ที่มา เอกสารการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิเวศลิขร์ครั้งที่ 7 จัดโดย สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ วันที่ 1-2 ธันวาคม 2541 หน้า 590



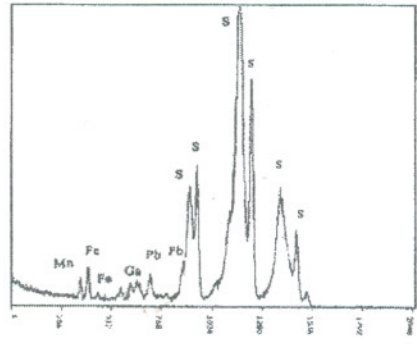
(ก) สีมหุองตอง (รูบนถัโถง)



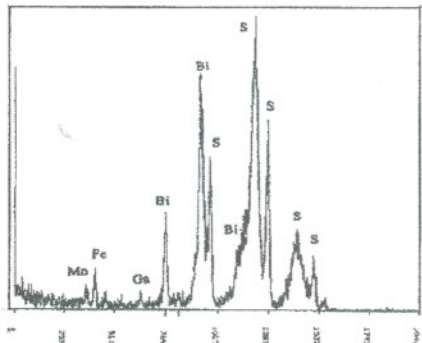
(ข) สีมหุองอน (ถอประเทชเมมเบม)



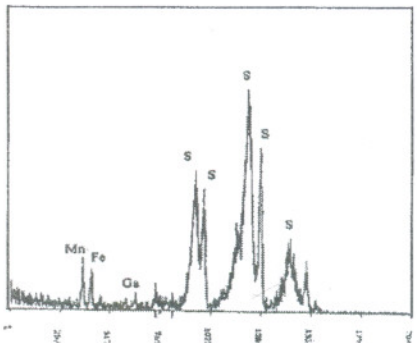
(ค) สีมองมอวง



(ง) สีมหุองมอเกอคอมด้อม



(จ) สีมหุองด้อม



(ฉ) สีมอองอองมอหุองด้อม

รูปที่ 1 เปรียบเทียบเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกตรัมของทัวมาลีนสีชมพูเจดต่างๆ

S = Source (Pu-238)



