Preliminary Study of the Relation between Compositons and Colors in Tourmaline

Chanchai Asvavijnijkulchai, Suriya Patchar and Archara Sangariyavanich
Physics Division, Office of Atomic Energy for Peace, Chatuchak, Bangkok 10900
Tel. 562-0119

ABSTRACT

The relation between compositons and colors of gamma irradiated tourmaline was investigated. Quantitative analysis of various color of tourmaline by neutron activation technique showed that the average contents of color samples were 14.91, 1.13, 0.65 and 0.32 percent, for aluminium, sodium, manganese and iron, respectively. Zinc, cesium and tantalum were found as trace elements. Traces of rubidium and thorium were also detected in some samples.

Colorless tourmaline contained only 10.07 percent of aluminium, but as high as 7.45 percent of sodium with small contents of most trace elements (below the average of color tourmaline). High content of iron was observed in green tourmaline while the pink one contained very less. It can be concluded that gamma radiation will intensify pink color in tourmaline which contains small amount of iron.

1.คำนำ

ทัวมาลีนจัดเป็นพลอยเนื้ออ่อนที่รู้จักกันแพร่หลายว่ามีหลากสี แต่ละสีมีชื่อเรียกแตกต่างกันไป เช่น สีน้ำเงินเรียกว่า อินดิโกไลท์(indigolite) สีเขียวเรียกว่า เวอร์เดไลท์(verdelite) และสีชมพูเรียกว่า รูเบลไลท์(rubellite) สีที่นิยมมากที่สุดคือ รูเบลไลท์ เม็ดที่มีสีสวยงาม ไม่มีตำหนิ มีราคาสูงกว่าสองหมื่นบาทต่อกะรัต[1] ผู้ค้าพลอยจึงได้มีความพยายามในการปรับปรุงสีของทัวมาลีนซึ่งไม่มีราคาให้เป็นสีที่มีราคาสูงขึ้น เช่น สีชมพูเข้ม เป็นต้น และกรรมวิธีหนึ่งที่ใช้ คือ การฉายทัวมาลีนด้วยรังสีชนิดต่างๆ

ทัวมาลีนมีสูตรทางเคมีคือ[2] $(Na,Ca)(Li,Mg,Al)_3Al_6B_3Si_6O_{27}(OH,F)_4$ มีรูปผลึกเป็นเฮกซะโกนอล มีความหนาแน่นระหว่าง 2.9-3.2 กรัม/ลบ.ซม.[3] ความแข็งประมาณ 7 ตามสเกลโมห์และมีค่าดรรชนีหักเหระหว่าง 1.624-1.644 ผลึกที่สวยงามพบมากบริเวณเทือกเขาอูราล ประเทศพม่า ประเทศศรีลังกา บริเวณทิศตะวันตกเฉียงใต้ของทวีปอัฟริกา ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ เกาะมาดากาสคาร์และประเทศสหรัฐอเมริกา

การเกิดสีของทัวมาลีนเป็นขบวนการที่ซับซ้อน เนื่องจากมีต้นตอการเกิดสีที่แตกต่างกันไป เชื่อกันว่า ธาตุเหล็กทำให้เกิดสีเขียวและสีน้ำเงินโดยขบวนการส่งผ่านประจุ(charge transfer) เป็นที่ทราบกันดีว่า ทัวมาลีนสีน้ำเงินอมเขียวสามารถเผาให้สีจางลงที่อุณหภูมิประมาณ 650 $^oซ$ รังสีอาจทำให้เกิดสีขึ้นในทัวมาลีน วัลลภ บุญคง และคณะ[4]ได้ทดลองฉายทัวมาลีนด้วยนิวตรอนพบว่า ด้วยนิวตรอนระดับ $1.15x10^{16}$ นิวตรอน/ตร.ซม. ทำให้ทัวมาลีนสีชมพูบางเม็ดเปลี่ยนเป็นชมพูเข้มหรือสีเหลือง ทัวมาลีนสีน้ำตาลเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอมส้ม สีม่วงอ่อนเป็นสีน้ำตาลอมส้ม และสีเหลืองอมเขียวเปลี่ยนเป็นสีแดงเข้ม

ในการทดลองฉายทัวมาลีนด้วยรังสีแกมมาปริมาณ 120 กิโลเกรย์ พบว่า ทัวมาลีนสีชมพูอ่อนบางเม็ดมีสีเข้มขึ้นหรือเปลี่ยนเป็นสีส้ม เม็ดสีเขียว สีน้ำเงิน อาจเปลี่ยนเป็นสีม่วง บางเม็ดที่มีสีเขียวและไม่มีสีอาจไม่มีการเปลี่ยนแปลงสี แสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนสีของทัวมาลีนขึ้นกับคุณสมบัติของพลอยแต่ละก้อน และมีแนวโน้มว่าสีที่เกิดจากการฉายรังสีคงทนต่อแสงสว่าง

ในการทดลองครั้งนี้ ต้องการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างธาตุที่เป็นองค์ประกอบกับการเปลี่ยนสีของทัวมาลีนเมื่อฉายด้วยรังสีแกมมาโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยการอาบนิวตรอน (Neutron Activation Analysis)

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

2.1 วัสดุที่ใช้ทดลอง

2.1.1 ทัวมาลีนที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาสีต่างๆ

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 ceritfied 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.

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของธาตุปริมาณน้อยในสารมาตรฐาน SOIL-7

Certified concentation values of trace elements:

No.	Element	Concentration μg/g	Confidence interval (significant level 0.05) μg/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.

2.2 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

2.3 วิธีการทดลอง

การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของทัวมาลีนด้วยเทคนิคการอาบนิวตรอนมีขั้นตอนดังนี้

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

2.3.2 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุซึ่งมีครึ่งชีวิตสั้น

นำสารตัวอย่างที่เตรียมไว้ในข้อ 2.3.1 มาเรียงเป็นแถวๆละ 3 ตัวอย่าง จัดให้สารมาตรฐานอยู่กลางระหว่างสารตัวอย่าง นำไปอาบนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว-1/1 ครั้งละ 1 แถว ในท่ออาบนิวตรอนซึ่งมีค่านิวตรอนฟลักซ์ประมาณ $3x10^{11}$ นิวตรอนต่อตร.ซมต่อวินาที เป็นเวลา 10 วินาที

เริ่มวัดรังสีแกมมาของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 ในนาทีที่ 2, 5 และ 8 ตามลำดับ โดยนับจากเวลาเมื่อสิ้นสุดการอาบต้วอย่าง ในการคำนวณปริมาณของอะลูมิเนียม ใช้พีคพลังงาน 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) นำตัวอย่างทั้งหมดไปบรรจุในกระบอกอะลูมิเนียมเพื่อนำไปอาบนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณุวิจัย ปปว-1/1 ในตำแหน่งซึ่งมีค่านิวตรอนฟลักซ์ประมาณ $3x10^{12}$ นิวตรอนต่อตร.ซมต่อวินาที เป็นเวลา 40 ชั่วโมง หลังจากทิ้งไว้ให้สลายตัวประมาณ 5 วัน จึงนำไปวิเคราะห์ปริมาณของโซเดียมจากไอโซโทป Na-24 โดยการวัดรังสีแกมมาพลังงาน 1369 keV ใช้เวลาวัดตัวอย่างละ 500 วินาที

ทิ้งให้สารตัวอย่างสลายตัวอีกประมาณ 25 วัน แล้วนำมาวัดสเปคตรัมของรังสีแกมมาเพื่อวิเคราะห์ปริมาณของซีเซียม 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 ลักษณะการจัดเรียงสารตัวอย่างสำหรับการอาบนิวตรอนเพื่อวิเคราะห์ธาตุครึ่งชีวิตยาว

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 เป็นตัวอย่างแกมมาสเปคตรัมของทัวมาลีน เมื่อวิเคราะห์ธาตุซึ่งมีครึ่งชีวิตสั้น และธาตุครึ่งชีวิตยาว ตามลำดับ ผลจากการคำนวณพื้นที่ใต้พีคของสารตัวอย่างเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน พบว่า ทัวมาลีนสีต่างๆมีธาตุองค์ประกอบดังแสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2

ตารางที่ 3.1 ปริมาณธาตุหลัก และธาตุรอง ในทัวมาลีน

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

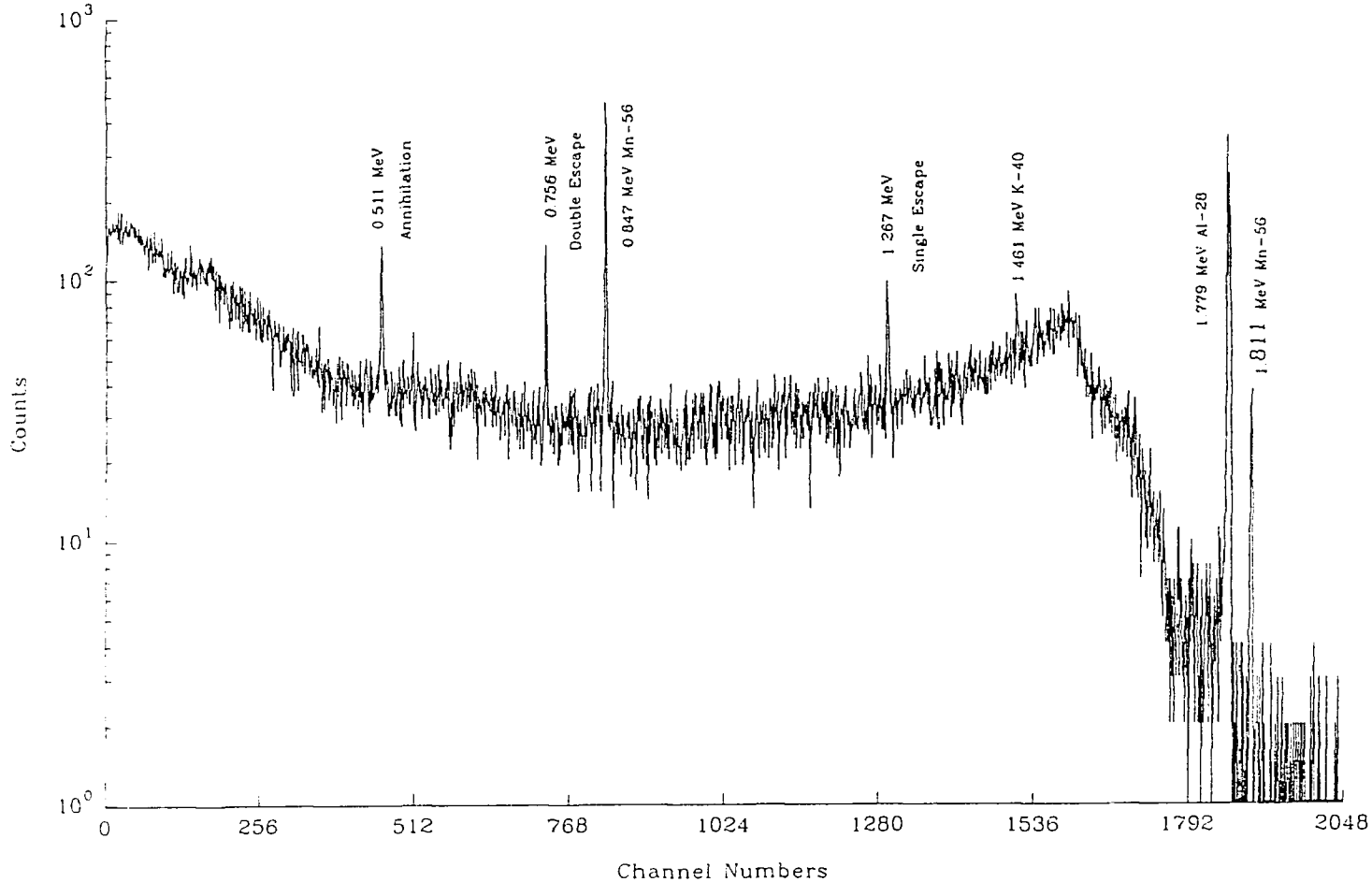
* เป็นค่าเฉลี่ยซึ่งไม่รวม A3

ND - Not Detectable

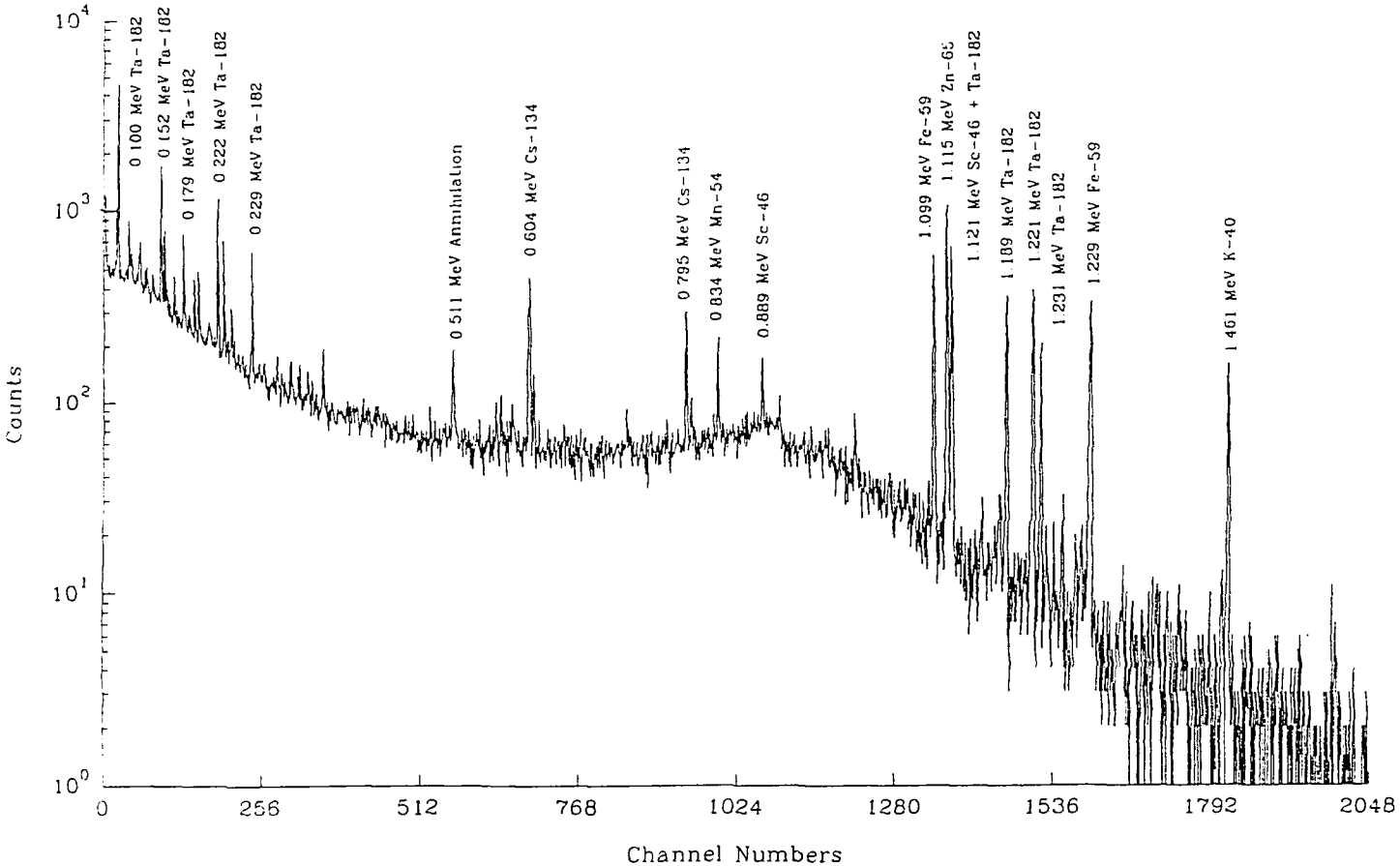
ตารางที่ 3.2 ธาตุปริมาณน้อยในทัวมาลีน

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



รูปที่ 3.1 แกมมาสเปคตรัมของทัวมาลีนซึ่งวัดด้วยหัววัดรังสี GMX ที่ระยะห่างจากหัววัด 20 ซม. ภายหลังการอาบนิวตรอนเป็นเวลา 10 วินาที แล้วทิ้งให้สลายตัว 2 นาที ใช้เวลาวัดตัวอย่าง 2 นาที



รูปที่ 3.2 แกมมาสเปคตรัมของทัวมาลีนซึ่งวัดด้วยหัววัดรังสี GMX ที่ระยะห่างจากหัววัด 1 ซม. ภายหลังการอาบนิวตรอนเป็นเวลา 40 ซม. แล้วทิ้งให้สลายตัว 25 วัน ใช้เวลาวัดตัวอย่าง 20 นาที

4. วิจารณ์และสรุปผล

ผลการวิเตราะห์ปริมาณธาตุหลัก ธาตุรองและธาตุปริมาณน้อยในตัวอย่างทัวมาลีนสีต่างๆ ด้วยเทคนิคการอาบนิวตรอน ในตารางที่ 3.1 และ 3.2 แสดงให้เห็นว่า โดยทั่วไปทัวมาลีนสีต่างๆจะประกอบด้วยธาตุอะลูมิเนียมซึ่งเป็นธาตุหลักโดยเฉลี่ยร้อยละ 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 ในทัวมาลีนที่ไม่มีสีและสีส้มอ่อนมีธาตุแมงกานีส และ สังกะสีเจือปนในปริมาณต่ำ ไม่พบธาตุเหล็กในตัวอย่างทั้งสอง สำหรับทัวมาลีนสีเขียว จะมีธาตุเหล็กเจือปนในปริมาณที่สูงกว่าสีอื่นๆ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Nassau[2] ที่กล่าวว่า เหล็กทำให้เกิดสีเขียวในทัวมาลีน ส่วนทัวมาลีนสีชมพูจะมีธาตุเหล็กเจือปนอยู่เพียงเล็กน้อย คือ มีอยู่เพียงร้อยละ 0.04

สำหรับปริมาณธาตุต่างๆในทัวมาลีนสีชมพูปนเขียวและสีเทา(ซึ่งเกิดจากสีเขียวผสมกับสีอื่นๆ) ให้สอดคล้องกับสีที่กล่าวแล้วข้างต้น

เป็นที่น่าสังเกตว่า ในทัวมาลีนซึ่งไม่มีสีจะมีส่วนประกอบของอะลูมีเนียมอยู่ในปริมาณที่น้อยกว่าสีอื่นๆ กล่าวคือ มีเพียงร้อยละ 10.07 แต่มีโซเดียมสูงถึงร้อยละ 7.45

จึงอาจกล่าวได้ว่า ทัวมาลีนที่นำมาฉายรังสีจะต้องมีธาตุเหล็กเจือปนในปริมาณต่ำจึงจะให้สีชมพูเข้มขึ้น

5. เอกสารอ้างอิง

1. พลอยสี **นิตยสารพลอย** ฉบับที่ 8 พ.ศ. 2534 หน้า36.
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 บุญดงและคณะ "การเพิ่มคุณภาพของพลอยโดยวิธีการอาบรังสี" บทความเสนอในการสัมมนา วิชาการเรื่อง **พลอยอัญมณีมีค่าของไทย** วันที่ 17-21 ธันวาค . 533 หน้า 192