

ผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากพลอยคอร์ันดัมและเบ้าที่ผ่านกระบวนการเผา
ด้วยแก๊วตะกั่วและเบริลเลียม

นางสาว กนิษฐา กาญจนบัตร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ENVIRONMENTAL IMPACT OF CORUNDUM AND CRUCIBLE UNDERGONE
LEAD-GLASS AND BERYLLIUM HEATING PROCESSES

Miss Kanitta Kanjanabut

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science
(Interdisciplinary Program)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากพลอยคอรัลดำและเบ้าที่ผ่าน
กระบวนการเผาด้วยแก๊วตะกั่วและเบริลเลียม

โดย

นางสาวกนิษฐา กาญจนบัตร

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรุบล โชติพงศ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จักรพันธ์ สุทธิรัตน์


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โสมจิตานนท์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรุบล โชติพงศ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จักรพันธ์ สุทธิรัตน์)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิสุทธิ์ พิสุทธิอนนท์)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. สุรินทร์ อินทะยศ)

กนิษฐา กาญจนบัตร : ผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากพลอยคอร์นดัมและเบ้าที่ผ่านกระบวนการเผาด้วยแก้วตะกั่วและเบริลเลียม. (ENVIRONMENTAL IMPACT OF CORUNDUM AND CRUCIBLE UNDERGONE LEAD-GLASS AND BERYLLIUM HEATING PROCESSES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.อรุบล โชติพงศ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ.ดร.จักรพันธ์ สุทธิรัตน์, 81 หน้า.

การศึกษาปริมาณตะกั่วในพลอยทับทิมและเบริลเลียมในพลอยบุษราคัมที่ผ่านกระบวนการเผาด้วยสารประกอบตะกั่วและเบริลเลียมด้วยการย่อยอย่างสมบูรณ์ พบว่า ค่าความเข้มข้นทั้งหมดของตะกั่วและเบริลเลียมเท่ากับ 1,610-2,963 และ 80.05-124.00 มก./กก. ตามลำดับ ส่วนการศึกษาการชะละลายของสารประกอบดังกล่าวในพลอยโดยวิธี Three-Stage Sequential Extraction Procedure (BCR three stages) ซึ่งประกอบด้วย 3 สภาวะ คือ 1) exchangeable 2) reducible และ 3) oxidisable พบว่า ตะกั่วในพลอยผงและพลอยเม็ดมีค่าของทุกขั้นตอนอยู่ระหว่าง 0.14-31.84 และ 0.32-16.44 มก./กก. ตามลำดับ ส่วนเบริลเลียมในพลอยผงมีค่าอยู่ระหว่าง 0.55-1.33 มก./กก. แต่พลอยเม็ดมีค่าต่ำกว่าค่าต่ำสุดที่เครื่อง ICP-MS สามารถวิเคราะห์ได้ (0.001 มก./กก.) ส่วนลักษณะทางกายภาพภายหลังการสกัดพบว่า พลอยทับทิมภายหลังการทดสอบมีลักษณะกร่อน และซีดจางมากขึ้นในทุกๆ สภาวะ ขณะที่พลอยบุษราคัมไม่พบการเปลี่ยนแปลง สำหรับคุณลักษณะทางอัญมณีพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงในพลอยทั้งสองชนิด และเมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นตะกั่วในพลอยผงกับมาตรฐานการทดสอบปริมาณตะกั่วในตัวเรือนเครื่องประดับ พบว่ามีความเข้มข้นเท่ากับ 910-1,530 มก./กก. ซึ่งสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ 600 มก./กก. แต่พลอยเม็ดมีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 70.67-169.00 มก./กก. ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐาน

สำหรับการศึกษาความเป็นของเสียอันตรายจากเบ้าที่ใช้ในการปรับปรุงพลอยตามมาตรฐานสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่เป็นของเสียอันตรายตามประกาศของกรมโรงงานอุตสาหกรรม พบว่า เบ้าที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิม มีค่าความเข้มข้นตะกั่วเท่ากับ 1,990.33-42,278.67 มก./กก. ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานกำหนดไว้ จึงจัดว่าเบ้าที่ใช้ในการปรับปรุงพลอยทับทิมเป็นของเสียอันตราย ขณะที่เบ้าที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอยบุษราคัม มีความเข้มข้นเบริลเลียมเท่ากับ 19.67-35.33 มก./กก. ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ ดังนั้นเบ้าที่ใช้ในการปรับปรุงบุษราคัมจึงไม่จัดเป็นของเสียอันตราย

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต กนิษฐา กาญจนบัตร
ปีการศึกษา 2553 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก อรุณ โชติพงศ์
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม จักรพันธ์ สุทธิรัตน์

5187103920 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORDS : LEAD / BERYLLIUM / CORUNDUM / CRUCIBLE

KANITTA KANJANABUT:ENVIRONMENTAL IMPACT OF CORUNDUM AND CRUCIBLE UNDERGONE LEAD-GLASS AND BERYLLIUM HEATING PROCESSES. ADVISOR: ASST.PROF. ARUBOL CHOTIPONG, CO-ADVISOR: ASST.PROF. CHAKKAPHAN SUTTHIRAT, 81 pp.

Lead (Pb) concentrations in Pb-treated rubies and beryllium (Be) concentrations in beryllium-treated sapphires were carried out using total digestion method; consequently, ranges of Pb contents in ruby and Be contents in sapphires ranged from 1,610-2,963 mg/kg and from 80.05-124.00 mg/kg, respectively. Subsequently, leaching tests for both types of stone were experimented using Three-stage Sequential Extraction Procedure (BCR three stages) which has been designed for different chemical binding forms, i.e., acid-extractable form, reducible form and oxidisable form. This procedure was applied for powdered samples and whole-stone samples for both types of treated stone. Pb contents of all leaching steps were recorded within the ranges of 0.14-31.84 mg/kg and 0.32-16.44 mg/kg for powdered samples and whole stones of Pb-treated rubies, respectively. On the other hand, Be contents yielded at 0.55-1.33 mg/kg for powdered samples and below detection limit (0.001mg/kg) for whole stones of Be-treated sapphires. Moreover, all Pb-treated rubies showed somehow altered appearance throughout the experiment whereas Be-treated sapphires were unchanged. However, gemological properties of both stone types still remained the same as before testing. International standard testing procedure for Pb content in Jewelry was additionally applied to Pb-treated rubies; consequently, powdered samples yielded at 910-1,530 mg/kg which were mostly higher than the standard level (≤ 600 mg/kg); however, testing of whole stones resulted a lot lower contents falling within a range of 70.67-169.00 mg/kg.

Assessment of hazardous waste, suggested by Department of Industrial Works, was carried out for crucibles undergone Pb and Be-heating processes. As the result, Pb-heated crucibles, the ranges of Pb contents were 1,990.33-42,278.67 mg/kg, which are higher than the standard level; consequently, they are defined as hazardous waste. For Be-heated crucibles, Be contents are yielded at 19.67-35.33 mg/kg, which are lower than the standard level; therefore, they are recognized as non-hazardous waste.

Field of Study : Environmental Science..... Student's Signature Kanitta Kanjanabut
 Academic Year : 2010..... Advisor's Signature Arubol Chotipong
 Co-advisor's Signature L. S. J. D.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีด้วยความกรุณาของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรุณ โชติพงษ์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรพันธ์ สุทธิรัตน์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งได้ให้คำปรึกษา ข้อชี้แนะ และความช่วยเหลือในหลายสิ่งหลายอย่างจนกระทั่งลุล่วงไปได้ ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ ประธานกรรมการ สอบวิทยานิพนธ์ และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ พิสุทธิอนันท์ และ ดร.สุรินทร์ อินทะยศ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์เสียสละเวลาร่วมเป็นคณะกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ พร้อมให้ข้อคิดเห็น และชี้แนะแนวทางต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความ สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ คุณจินดา เตชะศรีรินทร์ ผู้อำนวยการศูนย์วิจัยและพัฒนา สิ่งแวดล้อมโรงงานภาคตะวันออก กรมโรงงานอุตสาหกรรม จังหวัดชลบุรี รวมทั้งขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมโรงงานภาคตะวันออก ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ใช้ สถานที่ในการปฏิบัติงานทางห้องปฏิบัติการสำหรับวิเคราะห์ตัวอย่าง และวิเคราะห์ตัวอย่างที่ใช้ ในงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ คุณวลีพร ศรีเพ็ญประภา และเจ้าหน้าที่สถาบันวิจัยสภาวะ แวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องปฏิบัติการ

ขอกราบขอบพระคุณ คุณจิระประภา เนียมปาน และเจ้าหน้าที่ภาควิชาธรณีวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องปฏิบัติและให้ความช่วยเหลือใน การศึกษาวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ คุณสุนันทา ที่กรุณาให้คำแนะนำ และอำนวยความสะดวกในการ ติดต่อประสานงาน

ขอกราบขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนอุดหนุนในการ ศึกษาวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อปรีดา กาญจนบัตร และ คุณแม่ศิริพร กาญจนบัตร ที่ ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ คำปรึกษาความอบอุ่น โอกาสและกำลังใจเสมอมา ขอขอบคุณ พี่ชายและน้องสาวที่คอยให้กำลังใจและคำปรึกษาที่ดีมาโดยตลอด ขอขอบคุณน้องนุ่น ที่ช่วยให้ คำปรึกษาและตกแต่งภาพในการจัดทำรูปเล่ม และขอบคุณพี่ๆ และเพื่อนๆ ทุกคนที่เป็นกำลังใจ และให้คำปรึกษาที่ดีเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมุติฐาน.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ทับทิมและแชปไฟร์.....	3
2.1.1 คุณสมบัติทางเคมี.....	3
2.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพ.....	4
2.1.3 คุณสมบัติทางแสง.....	4
2.1.4 มลทินเนื้อใน.....	5
2.2 การเกิดสีในคอรัมดัม.....	7
2.3 ประวัติและพัฒนาการการเผาพลอยในจังหวัดจันทบุรี.....	8
2.4 การเผาด้วยการเติมสารประกอบแก้วตะกั่ว.....	10
2.5 การเผาด้วยการเติมสารประกอบเบริลเลียม.....	10
2.6 เบ้าที่ใช้ในกระบวนการปรับปรุงพลอยด้วยความร้อน.....	12
2.7 การทดสอบความเข้มข้นของสารที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอยด้วยความ ร้อนในพลอยคอรัมดัม.....	13
2.7.1 การทดสอบด้วยวิธี Three-Stage Sequential Extraction Procedure.....	13
2.7.2 การทดสอบด้วยวิธีการทดสอบตะกั่วในตัวเรือนเครื่องประดับ.....	14

2.8 ตะกั่ว.....	14
2.8.1 ลักษณะทางกายภาพและเคมี.....	14
2.8.2 การเข้าสู่ร่างกาย.....	15
2.8.3 พิษของสารตะกั่ว.....	15
2.8.4 ผลกระทบของตะกั่วต่อมนุษย์.....	15
2.9 เบริลเลียม.....	16
2.9.1 ลักษณะทางกายภาพและเคมี.....	16
2.9.2 กลไกความเป็นพิษ.....	16
2.9.3 ผลกระทบต่อมนุษย์.....	16
2.10 ของเสียอันตราย.....	17
2.10.1 การจัดการของเสียอันตรายในประเทศไทย.....	18
2.10.2 การจัดการของเสียอันตรายอุตสาหกรรม.....	19
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	21
3.1 ศึกษาความเข้มข้นของตะกั่วและเบริลเลียมจากพลอยคอร์นดัมที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบแก้วตะกั่วในทับทิมและสารประกอบเบริลเลียมในบุษราคัม.....	21
3.1.1 ตัวอย่างพลอยที่ใช้ในการศึกษา.....	21
3.1.2 การเตรียมตัวอย่างพลอยที่ใช้ในการศึกษา.....	22
3.1.3 ศึกษาปริมาณโลหะทั้งหมดในพลอยคอร์นดัมด้วยวิธี Total digestion.....	24
3.1.4 ศึกษาปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วและเบริลเลียมด้วยวิธี Three-stages sequential extraction procedure (BCR three stage) และลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงในสถานะต่างๆ.....	24
3.1.5 ศึกษาปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในพลอยทับทิมด้วย Method C-02.4 เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของตะกั่วในเครื่องประดับของ U.S.CONSUMER PRODUCT SAFETY COMMISSION (CPSC).....	25
3.1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โลหะ ลักษณะทางกายภาพ และคุณสมบัติทางอัญมณีของพลอย.....	26
3.2 ศึกษาความเป็นของเสียอันตรายของแก้วที่ใช้เป็นภาชนะใส่พลอยคอร์นดัมเพื่อใช้ในการกระบวนการปรับปรุงโดยการเติมสารประกอบตะกั่วและสารประกอบ	

เบริลเลียม.....	26
3.2.1 ตัวอย่างเบ้าที่ใช้ในการศึกษา.....	26
3.2.2 การเตรียมตัวอย่างเบ้าที่ใช้ในการศึกษา.....	26
3.2.3 ศึกษาปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วและเบริลเลียมจากเบ้าในสภาพ ของแข็ง (Total Threshold Limit Concentration, TTLC).....	27
3.2.4 ศึกษาปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วและเบริลเลียมจากเบ้าในน้ำสกัด Soluble Threshold Limit Concentration, STLC).....	27
3.2.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โลหะในเบ้าเผาพลอย.....	28
4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	29
4.1 ความเข้มข้นของตะกั่วและเบริลเลียมทั้งหมดจากการสกัดพลอยคอรัันดัมด้วย วิธี Total digestion.....	29
4.2 ความเข้มข้นของตะกั่วและเบริลเลียมจากการสกัดพลอยคอรัันดัมด้วย วิธี BCR three stage และการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพหลังการสกัด แต่ละขั้นตอน.....	31
4.2.1 ความเข้มข้นของโลหะจากพลอยคอรัันดัมที่บดเป็นผง.....	31
4.2.2 ความเข้มข้นของตะกั่วและลักษณะทางกายภาพของพลอยคอรัันดัมเม็ด...	34
4.3 ความเข้มข้นของตะกั่วจากการสกัดพลอยคอรัันดัมด้วยวิธีการทดสอบปริมาณ ตะกั่วในตัวเรือนเครื่องประดับ Standard Operating Procedure for Determining Lead.....	41
4.3.1 ความเข้มข้นของตะกั่วจากพลอยทับทิมบดเป็นผงและทับทิมเม็ด.....	41
4.4 ความเข้มข้นของตะกั่วและเบริลเลียมจากเบ้าที่ใช้งานแล้วของกระบวนการ ปรับปรุงพลอยด้วยความร้อนโดยการเติมสารเคมี.....	43
4.4.1 เบ้าจากกระบวนการปรับปรุงพลอยทับทิม.....	43
4.4.2 เบ้าจากกระบวนการปรับปรุงพลอยบุษราคัม.....	45
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	48
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	48
5.1.1 พลอยทับทิมที่ผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบ ตะกั่ว.....	48
5.1.2 พลอยบุษราคัมที่ผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบ	

เบริลเลียม.....	49
5.1.3 เบ้าที่ใช้ในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพพลอยด้วยความร้อนและสารเคมี	50
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	52
รายการอ้างอิง.....	53
ภาคผนวก.....	56
ภาคผนวก ก.....	57
ภาคผนวก ข.....	59
ภาคผนวก ค.....	64
ภาคผนวก ง.....	73
ภาคผนวก จ.....	76
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	81

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงขั้นตอนการทดสอบด้วยวิธี BCR three-stage sequential extraction	14
2.2	การจัดการของเสียอันตรายจากอุตสาหกรรม ปี 2551.....	18
4.1	ความเข้มข้นของตะกั่วที่สกัดได้จากพลอยทับทิมด้วยวิธี Total digestion.....	30
4.2	ความเข้มข้นของเบริลเลียมที่สกัดได้จากพลอยบุษราคัมด้วยวิธี Total digestion.....	31
4.3	ความเข้มข้นของตะกั่วที่สกัดจากพลอยทับทิมบดเป็นผงด้วยวิธี BCR three stage.....	32
4.4	ความเข้มข้นของเบริลเลียมที่สกัดได้จากพลอยบุษราคัมบดเป็นผงด้วยวิธี BCR three stage.....	33
4.5	สรุปคุณสมบัติทางอัญมณีของพลอยทับทิมเม็ดก่อนการชะละลายด้วยวิธี BCR three stage.....	35
4.6	สรุปคุณสมบัติทางอัญมณีของพลอยทับทิมเม็ดภายหลังการชะละลายด้วยวิธี BCR three stage.....	35
4.7	การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพและความเข้มข้นตะกั่วของพลอยทับทิม ภายหลังการทดสอบด้วยวิธี BCR Three stage (โรงงานที่ 1).....	36
4.8	การเปลี่ยนแปลงทางลักษณะกายภาพและความเข้มข้นตะกั่วของพลอยทับทิม ภายหลังการทดสอบด้วยวิธี BCR Three stage (โรงงานที่ 2).....	37
4.9	สรุปคุณสมบัติทางอัญมณีของพลอยบุษราคัมเม็ดก่อนการชะละลายด้วยวิธี BCR three stage.....	39
4.10	สรุปคุณสมบัติทางอัญมณีของพลอยบุษราคัมเม็ดภายหลังการชะละลายด้วยวิธี BCR three stage.....	39
4.11	การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพและความเข้มข้นเบริลเลียมของพลอยบุษราคัมภายหลังการทดสอบด้วยวิธี BCR Three stage (โรงงานที่ 1).....	40
4.12	การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพและความเข้มข้นเบริลเลียมของพลอยบุษราคัมภายหลังการทดสอบด้วยวิธี BCR Three stage (โรงงานที่ 2).....	41
4.13	ความเข้มข้นตะกั่วที่สกัดได้จากพลอยทับทิมบดเป็นผงและทับทิมเม็ดด้วยวิธี ทดสอบตะกั่วในตัวเรือนเครื่องประดับ.....	42

4.14	ค่า TTLC ของตะกั่วจากการสกัดเบ้าเผาพลอยทับทิม.....	44
4.15	ค่า STLC ของตะกั่วจากน้ำสกัดเบ้าเผาพลอยทับทิม.....	45
4.16	ค่า TTLC ของเบริลเดี่ยวจากการสกัดเบ้าเผาพลอยบุษราคัม.....	46
4.17	ค่า STLC ของเบริลเดี่ยวจากการสกัดเบ้าเผาพลอยบุษราคัม.....	47

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	แสดงโครงสร้างของคอรัลด์มีในการมองที่แตกต่างกัน.....	3
2.2	แสดงขั้นตอนการเชื่อมประสานรอยแตกกร้าว (Healing process).....	6
2.3	แสดงลักษณะมลทินต่างๆ ภายในทับทิม.....	7
2.4	แสดงภาพเบ้าที่ใช้ในกระบวนการปรับปรุงพลอยด้วยความร้อน.....	12
3.1	แผนผังแสดงวิธีการดำเนินงานศึกษาวิจัย.....	23
4.1	เปอร์เซ็นต์ตะกั่วที่สกัดได้จากพลอยทับทิมบดเป็นผงในแต่ละขั้นตอนของ BCR Three stage เมื่อเทียบกับปริมาณตะกั่วทั้งหมดที่สกัดได้.....	32
4.2	เปอร์เซ็นต์เบริลเลียมที่สกัดได้จากพลอยบุษราคัมบดเป็นผงในแต่ละขั้นตอนของ BCR Three stage เมื่อเทียบกับปริมาณเบริลเลียมทั้งหมดที่สกัดได้.....	34
4.3	เปอร์เซ็นต์ตะกั่วที่สกัดได้จากพลอยทับทิมเม็ดในแต่ละขั้นตอนของ BCR Three stage เมื่อเทียบกับปริมาณตะกั่วทั้งหมดที่สกัดได้.....	38

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางการผลิตและการค้าอัญมณีที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก เนื่องจากเคยเป็นแหล่งพลอยธรรมชาติโดยเฉพาะพลอยตระกูลคอรัันดัม (corundum) ทั้งทับทิม (ruby) และแซปไฟร์ (sapphire) ที่มีคุณภาพดี ประกอบกับฝีมือการออกแบบ การเจียรไนที่ ประณีตสวยงาม ส่งผลให้ผลผลิตอัญมณีมีคุณภาพสูง ประณีตสวยงามเป็นที่ต้องการของตลาด ในอดีตจังหวัดจันทบุรีเคยเป็นแหล่งพลอยธรรมชาติที่มีชื่อเสียง จึงทำให้ประชาชนส่วนใหญ่ใน จังหวัดจันทบุรีประกอบธุรกิจการค้าอัญมณีและเป็นศูนย์กลางการซื้อ-ขายอัญมณี เมื่อความ ต้องการพลอยคุณภาพดีนั้นมีมากขึ้น แต่พลอยคุณภาพดีที่พบในธรรมชาติมีจำนวนลดลงอย่าง มาก ทำให้ผู้ประกอบการจำนวนมากให้ความสนใจกับพลอยคุณภาพต่ำที่สามารถนำมาปรับปรุง ให้มีคุณภาพดีขึ้นได้ กระบวนการปรับปรุงพลอยที่นิยม คือ การปรับปรุงด้วยความร้อนซึ่ง สามารถปรับปรุงคุณภาพพลอยให้มีความสวยงามขึ้นจนใกล้เคียงพลอยคุณภาพดีได้ และใน ปัจจุบันกระบวนการปรับปรุงพลอยด้วยความร้อนได้มีการเติมสารเคมีในกระบวนการ เช่น การ เติมสารประกอบตะกั่วในการเผาพลอยทับทิมที่อุณหภูมิสูง ภายใต้บรรยากาศของก๊าซออกซิเจน ซึ่งทำให้สารประกอบตะกั่วแทรกซึมไปตามรอยแตกของพลอยทำให้มีความใสมากยิ่งขึ้น และการ เติมสารประกอบเบริลเลียมในการเผาพลอยบุษราคัมที่อุณหภูมิสูงภายใต้บรรยากาศของก๊าซ ออกซิเจน ทำให้เบริลเลียมสามารถแทรกเข้าไปเกิดปฏิกิริยาทางเคมีฟิสิกส์ขึ้นภายในโครงสร้าง ของพลอยทำให้สีเปลี่ยนเป็นสีเหลือง และสีที่เกิดขึ้นจะอยู่อย่างคงทน ส่วนของเสียที่เกิดขึ้นคือ ควันที่ใช้ไฟพลอยผสมสารเคมีที่ผ่านกระบวนการเผา

เนื่องจากการปรับปรุงพลอยด้วยความร้อนนั้นยังเป็นอุตสาหกรรมขนาดเล็กใน ครัวเรือน ยังไม่ถูกกำหนดไว้ในประเภทโรงงานอุตสาหกรรมตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม หลังจากกระบวนการปรับปรุงแล้วควันจะถูกเก็บไว้ในครัวเรือน เพื่อใช้ในการปรับปรุงครั้ง ต่อไป แต่หากเกิดการชำรุดเสียหายก็จะนำไปทิ้งรวมกับขยะทั่วไป ซึ่งอาจทำให้เกิดการปนเปื้อน และส่งผลกระทบต่อภายในครัวเรือนและสิ่งแวดล้อมได้ โดยควันแล้วดังกล่าวยังไม่มี การตรวจสอบ ว่าเป็นของเสียอันตรายหรือไม่

มีการศึกษาพบว่าถ้าร่างกายได้รับตะกั่วและเบริลเลียมในปริมาณมากและสะสม เป็นเวลานานจะก่อให้เกิดผลเสียต่อระบบต่างๆในร่างกาย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551) และ การศึกษาทางพิษวิทยาพบว่า ธาตุตะกั่วและเบริลเลียมนั้นจัดเป็นสารก่อมะเร็ง (carcinogenic) (IARC, 1993) อย่างไรก็ตามยังไม่มีรายงานการศึกษาปริมาณเบริลเลียมและตะกั่วที่ใช้ในการ

ปรับปรุงพลอยด้วยความร้อนและไม่เคยมีการตรวจสอบแนวโน้มผลกระทบต่อผู้ใช้เนื่องจากไม่มีมาตรฐานผลิตภัณฑ์ดังกล่าว จึงยังคงเป็นความกังวลของกลุ่มผู้ใช้บางกลุ่มทั้งในและต่างประเทศ การศึกษาในประเด็นนี้จึงเป็นการสร้างความมั่นใจให้กับผู้ใช้พลอยซึ่งมีผลในด้านการส่งออกของประเทศต่อไป นอกจากการศึกษาถึงความมั่นคงของแร่ที่ผ่านกระบวนการเผาแล้ว ยังเป็นประโยชน์ในการนำไปสู่การจัดทำร่างมาตรฐานสำหรับอุตสาหกรรมประเภทใหม่ เพื่อจัดทำแนวทางจัดการป้องกันผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยและสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ประเมินผลกระทบของพลอยคอร์ันดัมที่ผ่านการเผาด้วยแก้วตะกั่วและเบริลเลียมต่อผู้ใช้
2. ประเมินการปนเปื้อนของแร่ที่ผ่านกระบวนการเผาด้วยแก้วตะกั่วและเบริลเลียมสู่สิ่งแวดล้อม

1.3 สมมติฐาน

1. พลอยที่ผ่านการเผาด้วยแก้วตะกั่วและเบริลเลียมมีสภาพคงทนไม่มีผลต่อสุขภาพของผู้สวมใส่
2. แร่ที่ใช้ในการเผาด้วยแก้วตะกั่วและเบริลเลียมแล้ว เกิดเป็นของเสียอันตราย และมีแนวโน้มการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. ตัวอย่างพลอยจากโรงงานปรับปรุงพลอยด้วยความร้อนที่เผาด้วยแก้วตะกั่วและเบริลเลียม อย่างละ 2 โรงงานในเขตจังหวัดจันทบุรี
2. ตัวอย่างแร่ที่ใช้ในการปรับปรุงพลอยด้วยความร้อนทั้งที่เผาด้วยแก้วตะกั่วและเบริลเลียมจากโรงงานเผาในจังหวัดจันทบุรี อย่างละ 2 โรงงาน และแร่ที่ยังไม่ได้ผ่านการเผา

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบแนวโน้มผลกระทบของพลอยที่ผ่านการเผาต่อผู้ใช้
2. เป็นแนวทางการจัดทำมาตรฐานเพื่อการตรวจสอบพลอยที่ผ่านการเผาโดยการเดิมสารเคมี
3. ทราบแนวโน้มที่ทำให้เกิดของเสียอันตรายจากการเผาพลอย

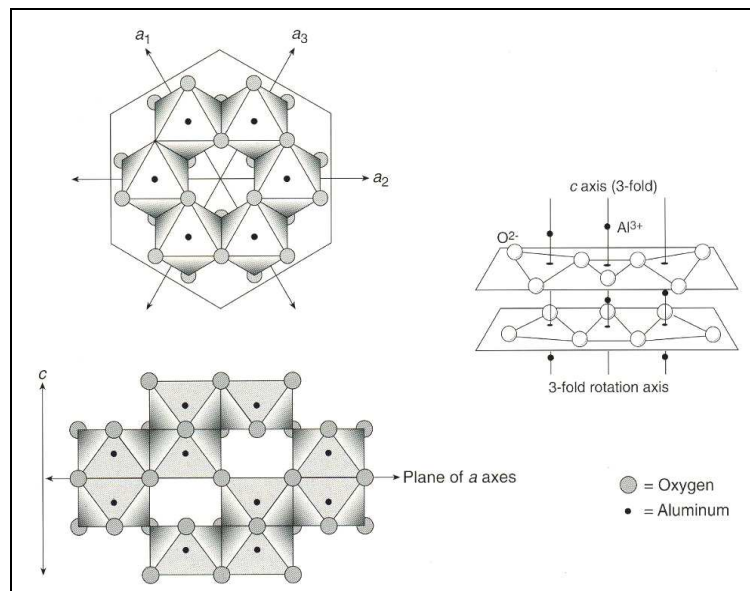
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทับทิมและแซปไฟร์ (Ruby and Sapphire)

ทับทิมและแซปไฟร์จัดอยู่ในกลุ่มแร่ชนิดเดียวกันคือ กลุ่มแร่ตระกูลคอรัันดัม (Corundum) เป็นอัญมณีหรือพลอยที่รู้จักกันดีและเป็นที่ยอมรับมากที่สุด โดยจะเรียกพลอยกลุ่มนี้ว่า พลอยเนื้อแข็ง เนื่องจากมีความแข็งเท่ากับ 9 ซึ่งรองจากเพชรที่มีความแข็งสูงสุดตามสเกลความแข็งของโมห์ และอัญมณีหรือพลอยตระกูลคอรัันดัมนั้นจะมีการเรียกชื่อตามสีที่แตกต่างกันคือ สีแดง เรียกว่า ทับทิม (Ruby) และสีอื่นๆ เรียกว่า แซปไฟร์ (Sapphire) เช่น สีน้ำเงิน เรียกว่า ไพลิน (Blue Sapphire) สีเหลือง เรียกว่า บุชรากัม (Yellow Sapphire) ซึ่งอัญมณีหรือพลอยตระกูลนี้สามารถพบได้เกือบทุกสีและในพลอยเม็ดเดียวกันอาจมีถึง 2 หรือ 3 สี

2.1.1 คุณสมบัติทางเคมี

พลอยตระกูลคอรัันดัม (Corundum) มีสูตรทางเคมี คือ Al_2O_3 จัดเป็นแร่ในกลุ่มฮีมาไทต์ (Hematite group) ซึ่งประกอบด้วยออกซิเจนอะตอมอัดตัวกันแน่นแบบหกเหลี่ยมและมีอะลูมิเนียมอะตอมที่มีขนาดเล็กกว่าแทรกอยู่ในตำแหน่งที่ล้อมรอบด้วยออกซิเจน 6 อะตอม โดยเข้าไปอยู่เพียง 2 ใน 3 ของช่องว่างที่มีอยู่ (ภาพที่ 2.1)



ภาพที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของคอรัันดัมในการมองที่แตกต่างกัน มองตามแนวแกน C (ภาพบน) มองแนวตั้งฉากกับแกน C (ภาพล่าง) มองระนาบเดียวกับแกน C (ภาพขวา) (Hughes, 1997)

2.1.2 สมบัติทางกายภาพ

(1) รูปผลึก (Crystal form) อยู่ในระบบเฮกซะโกนอล กลุ่มรวมโบฮีตรอน (Rhombohedral division) สามารถพบรูปผลึกได้หลายลักษณะ เช่น กระจวยทอผ้า (Spindle) แท่งหกเหลี่ยมรูปร่างต่างๆ และเป็นแผ่นหกเหลี่ยม

(2) ความแข็ง (Hardness) พลอยคอรัันดัมมีค่าความแข็งเท่ากับ 9 ซึ่งจัดว่าเป็นพลอยเนื้อแข็งที่มีความแข็งรองจากเพชรที่มีความแข็งสูงสุดตามสเกลความแข็งของโมห์ จึงทำให้มีความสามารถในการต้านทานต่อการขีดขูด ขัดสี สึกกร่อนได้ดี

(3) แนวแตกเรียบ (Cleavage) แนวแตกเรียบของแร่แต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของแร่และลักษณะผลึก โดยพลอยคอรัันดัมนั้นไม่แสดงแนวแตกเรียบ แต่มีแนวแยก (Parting) ตามแนวระนาบฐาน {0001}

(4) ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) คือ อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของแร่ในอากาศต่อความหนาแน่นของน้ำ (ในอุณหภูมิ 4°C) โดยความถ่วงจำเพาะของคอรัันดัมโดยประมาณ เท่ากับ 4.00 (+0.10,-0.05) หาได้จาก ความถ่วงจำเพาะ = น้ำหนักของแร่ในอากาศ / (น้ำหนักของแร่ในอากาศ - น้ำหนักของแร่ในน้ำ)

(5) รอยแตก (Fracture) การแตกเป็นสมบัติเฉพาะของพลอยแต่ละชนิด คือ เมื่อทำให้พลอยแตกจะเห็นรอยแตกของพลอยแต่ละชนิดในลักษณะที่แตกต่างกัน ซึ่งในพลอยคอรัันดัมนั้นจะแสดงรอยแตกแบบก้นหอย (Conchoidal) ผิวที่แตกออกมาจะเป็นเส้นโค้งเรียงซ้อนกันเหมือนลวดลายในฝาหอย และกึ่งฝาหอย (Sub - conchoidal) ซึ่งจะมีลักษณะเหมือนแบบก้นหอยแต่ลายเส้นโค้งเห็นไม่ชัดเจนเท่าแบบก้นหอย

2.1.3 สมบัติทางแสง

(1) สี (Color) พลอยคอรัันดัมสามารถพบได้ทุกสี ตั้งแต่ใสไร้สี แดง ชมพู ม่วง ฟ้ำ น้ำเงิน เหลือง เขียว น้ำตาลจนถึงสีเทาดำที่บดแสง โดยมีชื่อเรียกทางการค้าที่แตกต่างกัน คือสีแดง เรียกว่าทับทิม (Ruby) สีฟ้าหรือน้ำเงิน (น้ำเงินสด น้ำเงินอมเขียว น้ำเงินอมม่วง) เรียกว่า แซปไฟร์หรือไพลิน (Blue Sapphire) สีเหลือง เรียกว่าบุษราคัม (Yellow Sapphire) สีเขียว เรียกว่า เขียวส่อง (เขียวอมน้ำเงิน) หรือเขียวบางกะจะ (เขียวอมเหลือง) บางเม็ดสามารถเห็น 2 หรือ 3 สีในเม็ดเดียวซึ่งเป็นลักษณะของปรากฏการณ์การเปลี่ยนสี (Color Change Sapphire) สีส้มปนชมพู เรียกว่า แพดพาราชา (Padparascha) เป็นสีที่พบน้อยและมีราคาสูงมาก ทับทิมสตาร์ (Star Ruby) และแซปไฟร์สตาร์ (Star Sapphire) เป็นคอรัันดัมโปร่งแสงถึงทึบแสงที่มีมลทินรูปเข็มเป็นจำนวนมากอัดกันแน่น เรียงตัวเป็นระเบียบ 3 ทิศทาง จึงเห็นเป็นเส้นเหล็บแสง 3 เส้นที่กึ่งไปมาได้เมื่อหมุนเม็ดพลอย เรียกว่า สหแหวก หรือสตาร์ (Star)

(2) ค่าดัชนีหักเห (Refractive index) เป็นค่าเฉพาะสำหรับพลอยแต่ละชนิดโดยค่าดัชนีหักเหของพลอยคอรัลด์มี เท่ากับ 1.762-1.770 (+0.009 ถึง -0.005) และค่าดัชนีหักเหของพลอยแต่ละชนิดอาจมี 1 ค่า 2 ค่า หรือ 3 ค่า ขึ้นอยู่กับระบบผลึกของแร่ดัชนีหักเหของแสง

(3) ความวาว (Luster) ความวาวของพลอยคอรัลด์จัดเป็นความวาวแบบแก้ว (Vitreous) คือเป็นประกายใสเหมือนแก้ว จนถึงความวาวแบบกึ่งเพชร (Sub-adamantine) คือเป็นประกายคล้ายเพชร ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าดัชนีหักเหและลักษณะของผิวเนื้อแร่

(4) การเรืองแสง (Fluorescence) การเรืองแสงเกิดจากปฏิกิริยาของธาตุในพลอยที่มีต่อแสงความยาวคลื่นต่างๆ โดยในพลอยคอรัลด์ส่วนใหญ่จะไม่มีเรืองแสง ยกเว้นพลอยคอรัลด์สีม่วงอาจเรืองแสงสีแดงปานกลางถึงแดงเข้มทั้งในช่วงรังสีคลื่นยาว (LWUV) และช่วงรังสีคลื่นสั้น (SWUV) ทั้งทับทิมและแซปไฟร์สีชมพูจะเรืองแสงในช่วงรังสีคลื่นยาว (LWUV) ชัดกว่าในช่วงรังสีคลื่นสั้น (SWUV) เป็นสีแดงอมส้มถึงแดงเข้ม ขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุต่างๆ ภายในพลอย

2.1.4 มลทินเนื้อใน (Inclusion)

(1) มลทินที่เกิดขึ้นก่อนการเกิดผลึกคอรัลด์ (Protogenetic) คือ มลทินที่เป็นของแข็งเท่านั้น โดยเป็นผลึกแร่ที่เกิดขึ้นก่อนที่อัญมณีนั้นจะเกิด เช่น ผลึกแร่สปีเนลภายในพลอยคอรัลด์

(2) มลทินที่เกิดขึ้นพร้อมกับผลึกคอรัลด์ (Syngenetic) ได้แก่ ผลึกแร่ และ/หรือ แก้ว เช่น ผลึกแร่ไดโลไมต์และแคลไซต์ในทับทิมที่เกิดจากหินแปร

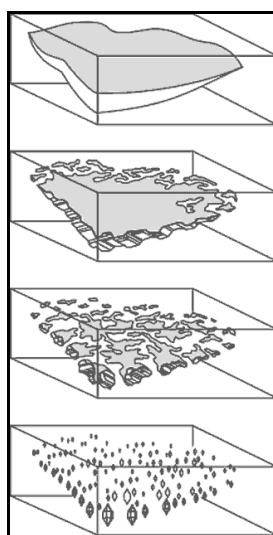
(3) มลทินช่องว่าง หากพบลักษณะเหมือนผลึกจะเรียกว่า ผลึกเนกาทีฟ (Negative crystal) โดยมลทินช่องว่างนั้นเกิดจากการเจริญเติบโตของผลึกอัญมณีอย่างรวดเร็วหรือเป็นช่องว่างที่เคยมีผลึกแร่อยู่แล้วสลายตัวไป ทำให้เกิดเป็นมลทินช่องว่างขึ้น โดยพลอยคอรัลด์จะพบมลทินแบบนี้ได้ใน 3 ลักษณะ คือ 1. ช่องว่างที่มีของเหลวเข้าไปอยู่เรียกว่า 1 เฟส (Single phase) 2. ช่องว่างที่มีของเหลวและแก๊สเข้าไปอยู่ เรียกว่า มลทิน 2 สถานะ หรือ 2 เฟส (Two phases) และ 3. ช่องว่างที่มีทั้งของเหลว ของแข็ง และแก๊สเข้าไปอยู่เรียกว่ามลทิน 3 สถานะ หรือ 3 เฟส (Three phases)

(4) ลักษณะที่แสดงการเติบโตของผลึกที่พบในพลอยคอรัลด์ ได้แก่ การแฝดปฐมภูมิ (Primary twinning) ซึ่งพบได้ในพลอยคอรัลด์จากศรีลังกา และโซนสี (Color zoning) ลักษณะเป็นแถบสีเข้มสลับกับสีอ่อน วางตัวตามรูปร่างภายนอกของผลึก ใช้ในการแยกจากคอรัลด์สังเคราะห์แบบเวอร์นอยล์ ที่แสดงแถบหรือเส้นโค้งตามรูปร่างของแท่งผลึกที่สังเคราะห์ได้ ซึ่งต่างจากแสดงแถบสีหรือโซนสีของคอรัลด์ธรรมชาติที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงขนานกันและหักมุมเหมือนบั้งจ๋า

(5) มลทินที่เกิดภายหลังการเกิดผลึกคอรัลด์ม (Postgenetic) อาจเกิดขึ้นที่หลังการแข็งตัวของผลึกคอรัลด์ม หรืออาจเกิดหลังจากนั้นหลายล้านปีต่อมา ซึ่งมลทินเหล่านี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพทางเคมี การตกผลึกของของเหลวที่ถูกขังอยู่ในอัญมณี การแยกตัวออกมาของแร่อื่นเมื่ออัญมณีเย็นตัวลง (Exsolution) หรือการแทรกตัวของสารต่างๆ เข้าไปในรอยแตกหรือรอยร้าว ลักษณะของมลทินเหล่านี้ได้แก่

- มลทินของแข็ง (Solid inclusion) เกิดจากแร่ต่างๆที่ยังคงฝังตัวอยู่ในลักษณะของแข็งรูปเข็มที่มีขนาดเล็กจำนวนมากภายในคอรัลด์ม เช่น รูไทล์ (Rutile : TiO_2) ฮีมาไทต์ (Hematite : Fe_2O_3) อิลเมนไนต์ (Ilmenite : $FeTiO_3$) ทำให้เห็นเป็นเส้นใยคล้ายเส้นไหม (Silk) ถ้าจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ 3 ทิศทาง ตัดกันเป็นมุม $60^\circ/120^\circ$ ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนแสงเป็นเส้นสีขาว 3 เส้นตัดกันเรียกว่า สตาร์ (Star หรือ Asterism)

- ช่องว่างทุติยภูมิ (Secondary cavities) หรือรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นหลังจากการเจริญเติบโตของผลึกคอรัลด์ม โดยรอยแตกร้าวนี้สามารถเชื่อมประสานได้ด้วยสารละลายเมื่อพลอยได้รับความร้อนสูงพอ แต่ส่วนใหญ่การเชื่อมประสานมักจะไม่เสร็จสมบูรณ์ จนเกิดเป็นเม็ดขนาดเล็กจำนวนมากกระจายอยู่ในรอยแตกร้าวและเห็นเป็นลักษณะของรอยพิมพ์นิ้วมือ (Fingerprint) หรือลักษณะขนนก (Feather) โดยกระบวนการเชื่อมประสานนี้แสดงไว้เป็นขั้นตอนในภาพที่ 2.2

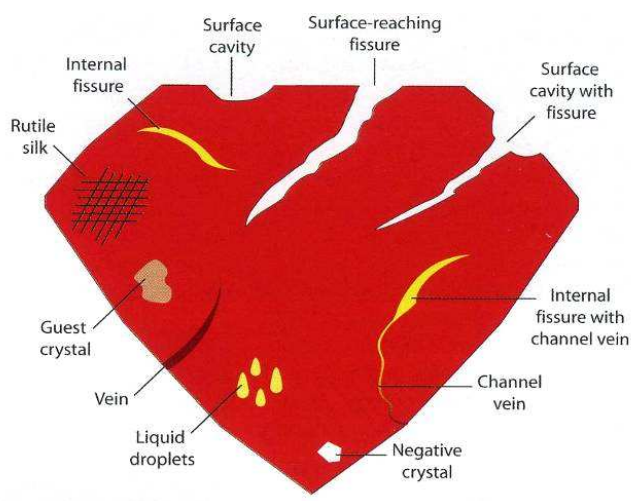


ภาพที่ 2.2 แสดงขั้นตอนการเชื่อมประสานรอบแตกร้าว (Healing process) ทำให้เกิดเป็นรอยพิมพ์ลายนิ้วมือ ภาพด้านบนสุดแสดงรอยแตกร้าวที่เกิดหลังจากการเจริญเติบโตของผลึก ภาพที่สองจากด้านบนแสดงสารละลายภายในเริ่มเกิดการเชื่อมประสานรอยแตกร้าว ภาพที่สามจากด้านบนแสดงการเกิดกระบวนการเชื่อมประสานรอยแตกร้าว โดย

สารละลายสามารถละลายกำแพงของช่องว่างได้ และภาพด้านล่างสุดแสดงช่องว่างรอยแตกร้าว ซึ่งมีขนาดเล็กและรูปร่างไม่แน่นอน จนเกิดเป็นเม็ดขนาดเล็กจำนวนมากกระจายอยู่ในรอยร้าว (Roedder, 1962)

- การแฝดทุติยภูมิ (Secondary twinning) เกิดหลังจากการตกผลึกของพลอยคอร์รันดัม โดยเกิดการซ้ำกันของผลึกทั้งผลึก เรียกว่า แฝดโพลีซินเทติก (Polysynthetic twin) ทำให้ระนาบของอะตอมเกิดการเลื่อนหรือเคลื่อนไปจากตำแหน่งเดิมเล็กน้อยโดยเลื่อนไปพร้อมกันหลายระนาบตลอดทั้งผลึกในทิศทางขนานกัน ในคอร์รันดัมจะเกิดในทิศทางหน้าระนาบโบฮีตรอนของผลึก คือ หน้า {1011} และจะเห็นได้ชัดในกล้องจุลทรรศน์ในแนวประมาณ $33^{\circ}/57^{\circ}$ จากแนวแกน C หรือจากหน้าเทเบิล

มลทินต่างๆ อาจพบได้ในพลอยเจียรนัยดังแสดงในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 แสดงลักษณะมลทินต่างๆ ภายในทับทิม (Themelis, 2005)

2.2 การเกิดสีในคอร์รันดัม

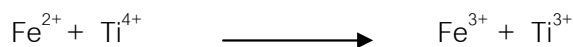
การเกิดสีในพลอยคอร์รันดัมเกิดจาก การแทนที่อะตอมอะลูมิเนียมด้วยธาตุทรานซิชันจำนวน 1 ชนิด หรือหลายชนิด (Nassau อ้างถึงใน ปัญจวรรณ, 2551) ดังนี้

สีแดงในทับทิม เกิดจากการเข้าแทนที่ของธาตุโครเมียม (Cr^{3+}) ในปริมาณเล็กน้อยประมาณ 1-3% โดยสีจะเข้มขึ้นตามปริมาณของธาตุโครเมียม

สีชมพู เกิดจากโครเมียมเข้าไปแทนที่อะลูมิเนียมในปริมาณน้อยมากไม่เกิน 1%

สีน้ำเงินในไพลิน มีสาเหตุการเกิดสี 2 ประการ คือ

- ธาตุเหล็ก (Fe^{2+}) และไทเทเนียม (Ti^{4+}) เข้าแทนที่พร้อมกันในตำแหน่งใกล้เคียงกันจนเกิดการเคลื่อนย้ายประจุซึ่งกันและกัน เรียกว่ากระบวนการ $Fe^{2+} - O - Ti^{4+}$ Intervalence Charge Transfer (IVCT) ดังสมการ



ปริมาณของไทเทเนียมที่ทำให้เกิดสีน้ำเงินมีน้อยมากเพียง 0.01-0.03% เท่านั้น

- การเข้าแทนที่ของธาตุเหล็กเพียงอย่างเดียว ในรูปของเหล็กเฟอร์ริก (Fe^{3+}) และเหล็กเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ที่เข้ามาอยู่ใกล้กันในโครงสร้างของคอรัันดัม ทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน เรียกว่า กระบวนการ $Fe^{2+} - O - Fe^{3+}$ Intervalence Charge Transfer

สีเหลืองและสีส้ม มีสาเหตุการเกิดสี 2 ประการ คือ

- การเข้าแทนที่ของเหล็กเฟอร์ริก (Fe^{3+}) และจับกันเป็นคู่ เรียกว่า Fe^{3+} / Fe^{3+} pair
- ความผิดปกติของโครงสร้างจากการเข้าแทนที่ของธาตุแมกนีเซียม (Mg^{2+})

สีส้มอมชมพู เกิดจากสาเหตุของการเกิดสีเหลืองร่วมกับการเข้าแทนที่ของโครเมียมที่ให้สีชมพู

สีม่วง เกิดจากสาเหตุของสีน้ำเงินเกิดร่วมกับการเข้าแทนที่ของโครเมียมซึ่งให้สีชมพูหรือแดง

สีเขียว เกิดจากการจับคู่กันของเหล็กเฟอร์ริก (Fe^{3+} / Fe^{3+}) ซึ่งให้สีเหลืองร่วมกับกระบวนการ $Fe^{2+} - O - Ti^{4+}$ IVCT ที่ให้สีน้ำเงิน จึงมีทั้งเขียวอมเหลือง และเขียวอมน้ำเงิน

สีเทาดำ เกิดจากมลทินแร่ฮีมาไทต์ขนาดเล็กจำนวนมาก เรียงกันเป็นระเบียบ 3 ทิศทาง จึงแสดงลักษณะสตาร์เสมอ

2.3 ประวัติและพัฒนาการการเผาพลอยในจังหวัดจันทบุรี

การเผาพลอยในอดีตไม่มีหลักฐานปรากฏชัดเจน และถือเป็นความลับไม่สามารถเปิดเผยได้ แต่ได้มีการเล่าต่อกันมาคือ ในอดีตพ่อค้าพลอยจังหวัดจันทบุรีได้เดินทางไปซื้อพลอยที่จังหวัดตราด ในเวลากลางคืนจึงใช้กองไฟกันยุ่ง ระหว่างพักพ่อค้าพลอยจะทำการพิจารณาพลอยที่ซื้อโดยเม็ดใดที่มีคุณภาพดีก็จะเก็บไว้ ส่วนเม็ดใดที่มีคุณภาพต่ำไม่สามารถนำมาทำเป็นเครื่องประดับได้ ก็จะโยนเข้ากองไฟ ต่อมาพบว่าพลอยคุณภาพต่ำที่โยนลงไปนั้นมีคุณภาพที่ดีขึ้น ทำให้ทราบว่าพลอยสามารถปรับปรุงคุณภาพด้วยการเผาได้ หลังจากนั้นจึงได้นำพลอยที่ซื้อมาทดลองเผาในเตาอั้งโล่ด้วยถ่านไม้โกงกางซึ่งเป็นวัสดุเชื้อเพลิง (ไม้โกงกางเป็นไม้ที่มีตามชายฝั่งทะเลชายเลนซึ่งมีมากในจังหวัดจันทบุรี และเป็นถ่านไม้ที่ให้ความร้อนดีกว่าไม้ชนิด

อื่น) และมีการพัฒนานำพลอยมาห่อด้วยดินเหนียว นำไปตากให้แห้งแล้วจึงนำไปเผา แต่การทำเช่นนี้ไม่แพร่หลายมากนัก (ประจักษ์ อังคะหิรัญ, 2548) โดยการเผาพลอยนั้นสามารถแบ่งออกเป็นยุคต่างๆ ดังต่อไปนี้

การเผาพลอยในยุคเก่า

ในสมัยเริ่มแรกของการเผาพลอย จะใช้ถ่านไม้โกงกางเป็นเชื้อเพลิง โดยมีขั้นตอนดังนี้ นำดินที่มีลักษณะเป็นสีแดงค่อนข้างเหนียวซึ่งพบได้บริเวณเหมืองพลอย บันเป็นทรงกลมและทำรูปบริเวณตรงกลางของทรงกลม เพื่อใส่พลอยลงไปด้านใน จากนั้นนำดินชนิดเดียวกันมาปิดรูและบันเพื่อให้มีลักษณะเป็นทรงกลมดั้งเดิม นำถ่านมาเรียงไว้ในเตาอั้งโล่ให้มีระดับความสูงพอประมาณจากนั้นนำลูกบันดินที่มีพลอยอยู่ด้านในใส่ลงไป และนำถ่านมาใส่จนเต็มเตา ทำการจุดไฟแล้วรอจนกว่าไฟในเตาจะเริ่มอ่อนลงหรือถ่านเริ่มมอด เมื่อความร้อนลดลงในระดับหนึ่งจึงนำคีมคีบถ่านคีบเอาลูกดินบันออกมาและรอให้เย็นเต็มที่ สุดท้ายนำกระดาษรองลูกดินบันแล้วค่อยๆ เอาค้อนทุบลูกดินบันให้แตก เพื่อที่จะนำเอาพลอยออกมา (ชโย สาธุกิจชัย, 2548)

การเผาพลอยในยุคกลาง

การเผาในยุคกลางนี้เริ่มประมาณปี พ.ศ. 2515 ซึ่งเป็นยุคที่มีการพัฒนาเปลี่ยนแปลงของการเผาพลอยอย่างมาก เป็นยุคที่มีการนำเอาเทคโนโลยีที่ทันสมัยมาใช้คือระบบการเผาด้วยเตาไฟฟ้า ซึ่งในตอนนั้นจังหวัดจันทบุรียังประสบปัญหาเรื่องของกระแสไฟฟ้าอยู่มาก ทำให้ผู้ที่มีเตาไฟฟ้ามีอยู่เพียงรายหรือสองรายเท่านั้น ความสามารถของเตาในขณะนั้นเผาได้เพียงอุณหภูมิ 1,400-1,600 องศาเซลเซียส แต่ผลที่ได้ก็แตกต่างจากการเผาด้วยถ่านไม้โกงกางอย่างเห็นได้ชัด และในยุคนี้ได้มีการเริ่มนำเทคนิคต่างๆ มาใช้ เช่น นำพลอยไปแช่ในกรดกัดแก้ว เพื่อทำความสะอาดในรอยแยกหรือรอยแตกของพลอย การใช้สารบอแรกซ์ ซิลิกา หรือโซเดียมต่างๆ ใส่ในเบ้าเผาพร้อมกับพลอยเพื่อที่จะช่วยประสานรอยร้าวหรือรอยแยกของพลอย (ชโย สาธุกิจชัย, 2548)

การเผาพลอยในยุคใหม่

การเผาพลอยในยุคใหม่ เริ่มต้นเมื่อประมาณปี พ.ศ. 2540 เป็นต้นมา การเผาพลอยในยุคนี้ได้มีการพัฒนารูปแบบของเตาเผาพลอย เช่น สามารถใช้ออกซิเจนเข้าไปช่วยในระหว่างการเผาได้ ซึ่งเตาในยุคก่อนๆไม่มี และได้มีการทดลองใช้สารเคมีต่างๆเข้ามาเป็นตัวช่วยในการเผา เช่น สารประกอบของธาตุเบริลเลียม สารประกอบของตะกั่วออกไซด์ เป็นต้น (ชโย สาธุกิจชัย, 2548)

2.4 การเผาด้วยการเติมสารประกอบแก้วตะกั่ว

การเผาพลอยคอรัันดัมด้วยแก้วตะกั่ว (ภาคผนวก ก) ครั้งแรกทำเพื่อเพิ่มคุณภาพทัศนภาพคุณภาพต่ำจากประเทศมาดากัสการ์ที่มีลักษณะที่บดแสงถึงโปร่งแสง และมีสีชมพูแดงหรือแดงอมม่วง ให้มีความใสพอสำหรับนำไปใช้ทำเครื่องประดับได้ โดยการเผาด้วยแก้วตะกั่วเป็นวิธีที่เคยใช้กับเพชรมาก่อน ซึ่งเป็นการอุดรอยแตกในช่องว่าง โดยแก้วที่ผสมสารตะกั่วหรือบิสมาทเพื่อช่วยเพิ่มค่าดัชนีหักเหของแก้วให้ใกล้เคียงกับพลอย และสารประกอบดังกล่าวจะหลอมละลายแทรกเข้าไปตามรอยแตกของเนื้อพลอย (Hughes, 1984) มีผลให้ไม่เห็นรอยแตกของช่องว่าง ทำให้พลอยดูมีสีสวยและใสสะอาดขึ้น ปัจจุบันพบทัศนภาพที่ผ่านการเผาโดยการเติมสารประกอบแก้วตะกั่วได้ทั่วไป และมีจำหน่ายกันในปริมาณมาก ทั้งแบบหลังเบี้ยและแบบเจียเหลี่ยม

แก้วตะกั่ว (Lead Glass) หรือแก้วเจียรนัย (Lead crystal glass) ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพทัศนภาพ จะมีส่วนผสมของตะกั่วออกไซด์ (PbO) มากกว่า 24 % โดยน้ำหนัก ค่าดัชนีหักเหของแสงในแก้วตะกั่วมีค่าสูงกว่าแก้วชนิดอื่นมาก จึงทำให้แก้วชนิดนี้มีประกายแวววาวสวยงาม (ชาตินัย ชูสาย, 2552) การเติมตะกั่วในแก้วส่งผลให้ค่าความหนืดของแก้วลดลง แก้วตะกั่วจึงมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าแก้วทั่วไป การที่ตะกั่วมีน้ำหนักอะตอมสูงถึง 207.2 จึงทำให้ความหนาแน่นของแก้วสูงขึ้น การที่มีปริมาณตะกั่วสูงในแก้วจะทำให้เนื้อแก้วนิ่ม มีความแข็งลดลง เมื่อทดสอบวัดความแข็งด้วย Knoop hardness (KHN) แก้วโซดาไลม์ (แก้วที่ใช้ทำภาชนะบนโต๊ะอาหาร) มี KHN ที่ประมาณ 500 ขณะที่แก้วตะกั่วมี KHN ไม่ถึง 300 สมบัติด้านนี้อาจไม่สำคัญมากนักเพราะลักษณะการใช้งานของพลอยนั้นใช้เป็นเครื่องประดับ ไม่ได้ต้องรับแรงกระแทกมากนัก แต่สมบัติที่สำคัญกว่าคือ ความทนทานต่อสารเคมี ความทนทานต่อการกัดกร่อนและความเสถียร แก้วตะกั่วทนต่อการกัดกร่อนจากสภาวะอากาศ (Weathering) ได้ดี แต่ถูกกัดกร่อนได้ง่ายขึ้นเมื่อเทียบกับโซดาไลม์ (เทพีวรรณ จิตรวัชรโกมล, 2548)

2.5 การเผาด้วยการเติมสารประกอบเบริลเลียม

เป็นวิธีการเผาที่เกิดขึ้นโดยบังเอิญในปี พ.ศ.2544 โดยผู้เผาพลอยในจังหวัดจันทบุรีทำการเผาแซปไฟร์คุณภาพต่ำจากประเทศมาดากัสการ์ แต่มีแร่คริโซเบริล (Chrysoberyl : $BeAl_2O_4$) ผสมติดเข้าไปอยู่ในแก้วรวมกับแซปไฟร์ ทำให้แซปไฟร์ที่เผาได้มีสีสวยงามใสสะอาดกว่าการเผาแบบเดิมมาก โดยในช่วงแรกใช้เวลาในการเผาสั้นเกินไป ทำให้การเปลี่ยนแปลงสีเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณขอบนอกของเม็ดพลอย แต่เข้าไปได้ลึกกว่าการเผาแบบชานสีระดับต้น (Diffusion) ซึ่งการเผาแบบชานสี นั้นเป็นการทำให้เกิดสีบนผิวคอรัันดัม โดยสารให้สีจะแทรกซึมเข้าไปในพลอยเป็นชั้นบางมาก ไม่เกิน 1 มิลลิเมตรหรือในระดับอะตอมเท่านั้น จึงเข้าใจว่าเป็นการเผาแบบชานสีและไม่ใช่ย้อมรับ ต่อมามีการพัฒนาวิธีการและระยะเวลาในการเผาใหม่จนสีเปลี่ยนทั้งเม็ดและสีที่ได้คงทนถาวรไม่ซีดจาง จึงเป็นที่ยอมรับกันมากขึ้น ส่วนใหญ่ได้ผลดี ทำให้แซปไฟร์สี

อ่อนราคาถูกที่ไม่สามารถเผาเพิ่มมูลค่าด้วยวิธีเดิมได้ กลายเป็นแชปไฟร์สีสด เนื้อใสสะอาด มีสีหลากหลายกว่าที่พบในธรรมชาติ จึงขายได้ราคาสูง นับได้ว่าเป็นการค้นพบที่มีประโยชน์อย่างมหาศาลต่ออุตสาหกรรมอัญมณีของไทย ซึ่งกลไกของเบริลเลียมที่ช่วยในการเปลี่ยนสีของพลอยสรุปได้ดังนี้

การเผาพลอยคอรัันดัมด้วยสารประกอบเบริลเลียม (รายละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก ก) ซึ่งธาตุเบริลเลียม (Be^{2+}) ที่ใช้เป็นส่วนประกอบของสารประกอบที่ใช้ในการปรับปรุงพลอย เป็นธาตุเบา มีขนาดเล็ก สามารถแทรกซึมเข้าไปในคอรัันดัมได้ง่ายซึ่งเบริลเลียมไม่ได้เป็นตัวทำให้เกิดสีด้วยตัวมันเอง แต่มีส่วนช่วยในกลไกการเกิดของสีเหลืองภายในโครงสร้างของพลอยร่วมกับธาตุที่มีอยู่ในพลอยอยู่แล้ว ได้แก่ ธาตุเหล็ก แมกนีเซียม และไททาเนียม ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความบกพร่องของโครงสร้างผลึกภายในเนื้อพลอยและสภาวะบรรยากาศการเผาที่ต้องมีปริมาณออกซิเจนเพียงพอ โดยธาตุเบริลเลียมนั้นจะทำหน้าที่เช่นเดียวกับธาตุแมกนีเซียม (Mg^{2+}) ซึ่งมีอยู่แล้วในตัวคอรัันดัม คือไปจับเป็นกลุ่มโครงสร้างย่อย BeTiO_3 และ MgTiO_3 ที่ไม่มีสีก่อน หลังจากนั้นถ้ามีธาตุเบริลเลียมและ/หรือแมกนีเซียมเหลืออยู่อีก (หรือมีอัตราส่วน $(\text{Be}+\text{Mg})/\text{Ti}$ มากกว่า 1) ธาตุทั้งสองดังกล่าวที่เหลือจะไปทำหน้าที่ยึดศูนย์กลางสีเหลือง (หรือ Yellow colour center ที่เกิดจากความบกพร่องของโครงสร้างผลึกร่วมกับธาตุเหล็กในสภาวะการเผาที่มีออกซิเจนพอเพียง) ทำให้เกิดสีเหลืองที่เสถียรและไม่หายไป การเข้าแทนที่อะลูมิเนียม (Al^{3+}) โดยแมกนีเซียมทำให้เกิดกระบวนการทดแทนหรือปรับจำนวนประจุโดยการเกิดช่องว่าง เรียกว่า Mg^{2+} induced trapped hole (O^{-1} ion) ซึ่งดูดกลืนแสงในช่วงสีน้ำเงินอย่างมาก ทำให้แชปไฟร์มีสีเหลืองถึงเหลืองอมส้ม กรณีของเบริลเลียมทำให้เกิดการทดแทนประจุโดยกระบวนการ Be^{2+} induced trapped hole และทำให้เกิดสีเหลืองเช่นเดียวกัน (Pisutha-Armond et al., 2002, 2003, 2004)

พลอยคอรัันดัมที่มีธาตุไททาเนียม (Ti^{4+}) ร่วมกับแมกนีเซียม (Mg^{2+}) และเหล็ก ไทเทเนียมจะจับตัวกับแมกนีเซียมก่อนจับกับเหล็ก เกิดเป็น MgTiO_3 cluster จึงไม่เกิดสีเหลือง แต่ถ้าปริมาณไทเทเนียมมีมากกว่าแมกนีเซียมจะเกิดสีน้ำเงิน โดยไทเทเนียมที่เกินมาจะไปจับตัวกับเหล็ก กรณีที่แมกนีเซียมมีปริมาณเท่ากับไทเทเนียมจะไม่เกิดสีหรือมีสีเหลืองอ่อนๆ ดังนั้นแชปไฟร์ที่มีสีเหลืองต้องมีปริมาณแมกนีเซียมมากกว่าไทเทเนียม ($\text{Mg}^{2+} + \text{Be}^{2+} > \text{Ti}^{4+}$) จึงทำให้เกิดสีเหลืองมากขึ้น โดยปริมาณของเบริลเลียมเพียง 10-30 ppm เพียงพอที่จะทำให้เกิดสีเหลืองได้ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดจากเบริลเลียม จะขึ้นอยู่กับสีเดิมของพลอย ปริมาณธาตุแมกนีเซียมและไทเทเนียม ตลอดจนความลึกจากผิวที่เบริลเลียมแทรกเข้าไปได้

2.6 เบ้าที่ใช้ในกระบวนการปรับปรุงพลอยด้วยความร้อน

เบ้าที่ใช้ในการปรับปรุงพลอยด้วยความร้อน คือ เบ้าอะลูมินา (ภาพที่ 2.4) โดยมีอะลูมินาเป็นส่วนประกอบหลัก มีคุณสมบัติทนความร้อนสูง มีความแข็งแรง ทนต่อการขีดสี และทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีได้ดี เบ้าอะลูมินาจึงเป็นที่นิยมใช้เป็นเบ้าเผาพลอยในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ โดยการทำเบ้าอะลูมินาสำหรับใช้เผาพลอยมีขั้นตอน ดังนี้

1. วัตถุดิบหลักที่ใช้คือ อะลูมินา ซึ่งมีจุดหลอมตัวที่อุณหภูมิสูงถึง 2,050 องศาเซลเซียส ดังนั้นการเผาผนึก (Sinter) อะลูมินาให้มีคุณสมบัติที่ต้องการ จะต้องเผาที่อุณหภูมิสูง และต้องใส่สารช่วยเผาผนึก (Sintering aids) เพื่อลดอุณหภูมิการเผาผนึก และช่วยยับยั้งไม่ให้ผลึกของอะลูมินาโตมากเกินไป เพราะจะส่งผลให้คุณสมบัติของอะลูมินาต่ำลง ซึ่งสารที่ใส่ช่วยเผาผนึก ได้แก่ ซิลิกา (SiO_2) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)

2. การบดผสม ทั้งส่วนผสมตามสูตรแล้วทำการบดผสมในหม้อบด โดยใช้ น้ำเป็นตัวกลาง ซึ่งการบดเปียกจะให้ประสิทธิภาพดีกว่าการบดแห้ง เมื่อบดเสร็จจะได้ของเหลวที่เรียกว่า สลิปอะลูมินา

3. การขึ้นรูป เป็นการขึ้นรูปโดยการหล่อแบบ เทสลิปอะลูมินาลงในแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ที่มีรูแบบเบ้า เมื่อได้ความหนาตามต้องการแล้วให้เทสลิปอะลูมินาออก ทิ้งให้เบ้าร้อนออกจากพิมพ์แล้วจึงค่อยแกะเบ้าออกจากพิมพ์ปูนปลาสเตอร์

4. การตกแต่ง นำเบ้าที่หล่อเสร็จแล้วทำการตกแต่งให้เรียบร้อยโดยใช้ฟองน้ำ

5. การเผาผนึก นำเบ้าที่ตกแต่งแล้วไปเผาในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1,700 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง (วรรณา ต.แสงจันทร์, 2548)



ภาพที่ 2.4 แสดงภาพเบ้าที่ใช้ในกระบวนการปรับปรุงพลอยด้วยความร้อน

2.7 การทดสอบความเข้มข้นของสารที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอยด้วยความร้อนภายในพลอยคอรัันดัม

เนื่องจากในปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานหรือวิธีการเพื่อใช้ในการทดสอบความเข้มข้นของสารต่างๆ ที่เข้าไปอยู่ในเนื้อพลอยที่ผ่านการปรับปรุงโดยการเติมสารประกอบต่างๆ ด้วยความร้อน เช่น การเติมสารประกอบแก้วตะกั่วในการปรับปรุงพลอยทับทิม และการเติมสารประกอบเบริลเลียมในการปรับปรุงพลอยบุษราคัม ซึ่งสารประกอบดังกล่าวสามารถส่งผลเสียต่อสุขภาพอนามัยของผู้สวมใส่ได้ หากได้รับในปริมาณที่มากและสะสมเป็นเวลานาน การศึกษาวิจัยนี้จึงได้นำวิธีการทดสอบที่มีความใกล้เคียงในการทดสอบหาปริมาณความเข้มข้นของสารในเนื้อพลอยด้วยกันมาทำการศึกษาวิจัย ดังนี้

2.7.1 การทดสอบด้วยวิธี Three-Stage Sequential Extraction Procedure (BCR)

วิธีการทดสอบนี้เป็นการทดสอบหาความเข้มข้นของโลหะในตัวอย่างดิน หรือตัวอย่างกากตะกอนดิน ที่อาจมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ตามวิธีการของ the Standards, Measurements and Testing programme (SM & T-formerly BCR), European Union (Quevauiller, 2002) โดยโลหะที่เหมาะสมกับวิธีการทดสอบนี้ ได้แก่ Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb และ Zn

เนื่องจากยังไม่มีวิธีการทดสอบปริมาณโลหะในพลอยที่เป็นมาตรฐาน จึงเลือกการทดสอบนี้มาทดสอบกับพลอย เพราะการทดสอบนี้เป็นการจำลองสภาวะต่างๆ ซึ่งพบในชีวิตประจำวัน เพื่อศึกษาถึงปริมาณโลหะและลักษณะกายภาพของพลอยที่เปลี่ยนแปลงในสภาวะต่างๆ แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน (ตาราง 2.1) โดยใช้สารเคมีที่แตกต่างกันเป็นตัวเร่งและทำให้เกิดสภาวะต่างๆ คือ ขั้นที่ 1 ใช้ Acetic acid (0.11 mol/l) เป็นตัวเร่งและทำให้เกิดสภาวะ Exchangeable ขั้นที่ 2 ใช้ Hydroxylamine hydrochloride (0.5 mol/l) เป็นตัวเร่งและทำให้เกิดสภาวะ Reducible และขั้นที่ 3 ใช้ Hydrogen peroxide (8.8 mol/l) กับ Ammonium acetate (1.0 mol/l) เป็นตัวเร่งและทำให้เกิดสภาวะ Oxidisable ซึ่งสภาวะต่างๆ ดังกล่าวนั้น สามารถพบได้ในชีวิตประจำวัน เช่น สภาวะที่เป็นกรดอ่อน (Exchangeable) พบได้จาก น้ำฝน น้ำประปา เหงื่อ และกรดน้ำส้ม เป็นต้น สภาวะรีดิวซิ่ง (Reducing) อาจเกิดจากปฏิกิริยาของก๊าซต่างๆ ที่มีอยู่ในบรรยากาศ เช่น ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น และสภาวะออกซิไดซิ่ง (Oxidising) พบได้จากสารเคมีต่างๆ ที่ใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น สารฟอกขาว และก๊าซออกซิเจน เป็นต้น จึงได้นำวิธีการศึกษานี้มาประยุกต์ใช้กับพลอยคอรัันดัมที่ผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบต่างๆ เพื่อศึกษาว่าในสภาวะต่างๆ นั้นสามารถชะละลายสารในเนื้อพลอยได้หรือไม่ มากน้อยเพียงใด

ตารางที่ 2.1 แสดงขั้นตอนการทดสอบด้วยวิธี BCR three-stage sequential extraction

Extraction step	Reactive/concentration	Solid phase
1	Acetic acid (0.11 mol/l)	Exchangeable, water and acid soluble(e.g., carbonates)
2	Hydroxylamine hydrochloride (0.5 mol/l)	Reducible(e.g.,iron/ manganese oxides)
3	Hydrogen peroxide(8.8 mol/l) followed by Ammonium acetate (1.0 mol/l)	Oxidisable(e.g.,organic substance and sulphides)

ที่มา : ดัดแปลงจาก Serife (2001)

2.7.2 การทดสอบด้วยวิธีการทดสอบตะกั่วในตัวเรือนเครื่องประดับ

วิธีการทดสอบปริมาณตะกั่วในตัวเรือนเครื่องประดับจัดว่าเป็นวิธีการทดสอบที่มีความใกล้เคียงกับการศึกษาปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในพลอยคอร์นดัม และยังไม่มีความรู้หรือวิธีการทดสอบที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบตะกั่วภายในพลอย จึงเลือกการทดสอบนี้มาประยุกต์ใช้กับพลอยเพื่อหาความเข้มข้นของตะกั่วจากพลอยทับทิมที่ผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบแก้วตะกั่ว วิธีมาตรฐานสำหรับตรวจสอบตะกั่วในตัวเรือนเครื่องประดับ (Standard Operating Procedure for Determining Lead) หาปริมาณตะกั่วด้วยวิธี C-02.4 เป็นวิธีการทดสอบของ United States Consumer Safty Commission (CPSC) (CPSC, 2005) (ภาคผนวก ข) ซึ่งเป็นหน่วยงานที่ดูแลและคุ้มครองผู้บริโภค โดยวิธีการนี้จะใช้ Nitric acid กับ Hydrochloric acid ในการทดสอบปริมาณตะกั่ว และ United States Consumer Safty Commission (CPSC) ได้กำหนดมาตรฐานตะกั่วในตัวเรือนเครื่องประดับ ไว้ไม่เกิน 0.06 percent lead (600 parts per million) หรือ ไม่เกิน 175 ไมโครกรัม (CPSC, 2005)

2.8 ตะกั่ว

2.8.1 ลักษณะทางกายภาพและเคมี

ตะกั่ว (Lead; Pb) เป็นธาตุที่มีเลขอะตอม 82 เป็นธาตุโลหะ เนื้ออ่อนนุ่มสามารถยืดได้ เมื่อตัดใหม่ ๆ จะมีสีขาวอมน้ำเงิน แต่เมื่อถูกกับอากาศสีจะเปลี่ยนเป็นสีเทา ตะกั่ว

เป็นโลหะหนักที่มีพิษ ใช้ทำวัสดุก่อสร้าง แบตเตอรี่ กระสุนปืนโลหะผสม (กรมทรัพยากรธรณี, 2543)

2.8.2 การเข้าสู่ร่างกาย

ตะกั่วสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง ได้แก่

(1) ทางปาก จากการรับประทานสิ่งที่มีตะกั่วปนเปื้อนอยู่ หรือจากการใช้เครื่องมือหรือภาชนะต่างๆที่มีตะกั่วปนเปื้อน

(2) ทางจมูก จากการหายใจหรือสูดดม ควัน ไอรระเหย ฝุ่นละอองที่มีตะกั่วผสมอยู่ในอากาศเข้าสู่ร่างกาย

(3) ทางผิวหนัง จากการสัมผัสเครื่องใช้ สีนํ้าอุปโภคบริโภคที่มีตะกั่วเจือปน ทำให้ตะกั่วซึมผ่านผิวหนังและเข้าสู่ระบบไหลเวียนโลหิตของร่างกาย

2.8.3 พิษของสารตะกั่ว

ตะกั่วที่เข้าสู่ร่างกายมนุษย์ก่อให้เกิดความเป็นพิษได้ 2 ลักษณะ ได้แก่

1. ความเป็นพิษเฉียบพลัน

ผู้ได้รับสารตะกั่วจะรู้สึกผิดปกติ มีกลิ่นโลหะในปาก กระจายน้ำ คอแห้ง ปวดแสบหน้าท้อง คลื่นไส้ อาเจียน อาเจียนอาจมีลักษณะขาวขุ่นจากเลือดคอกไรต์ ผู้ได้รับสารตะกั่วมากจะมีอาการท้องร่วง และส่วนน้อยท้องผูก อุจจาระมีเลือดปนหรือมีสีดำอันเนื่องมาจากเลือดซัลไฟด์ ผู้ที่ได้รับตะกั่วบางรายอาจเกิดอาการช็อค กล้ามเนื้อกระตุก อ่อนเพลีย เป็นตะคริว โดยเฉพาะที่ขาทั้งสองข้าง หรือมีอาการของระบบประสาทส่วนกลาง เช่น ปวดศีรษะ นอนไม่หลับ หรืออาจมีอาการผิดปกติที่ไร้สาเหตุ เช่น ไข้สควา ซึมเศร้า ถึงขั้นโคม่าและเสียชีวิตในที่สุด อาการที่รองลงมา ได้แก่ ภาวะไตเสื่อม ทำให้ปัสสาวะน้อยลงกว่าปกติ มีอัลบูมิน และมีเม็ดในปัสสาวะ เจ็บไต นอกจากนี้ จะมีการสลายตัวของเม็ดเลือดแดง อาจทำให้เสียชีวิตภายใน 2-3 วัน

2. ความเป็นพิษเรื้อรัง

ผู้ได้รับตะกั่วเรื้อรังอาจมีอาการทางระบบทางเดินอาหาร เช่น เบื่ออาหาร เหม็นเฟื้อนในลำคอ ท้องผูก และทางระบบประสาท เช่น ช้อมือตก ไม่มีแรง เยื่อหุ้มสมองอักเสบ เป็นต้น (ไมตรี สุทธิจิตต์, 2531)

2.8.4 ผลกระทบของตะกั่วต่อมนุษย์

ผลกระทบที่มีต่อผู้ใหญ่

1. ระบบทางเดินอาหาร ได้แก่ เบื่ออาหาร คลื่นไส้ อาเจียน ท้องผูก บางรายท้องเสียและปวดท้องอย่างรุนแรง

2. ระบบประสาท ได้แก่ กล้ามเนื้อแขนขาไม่มีแรง ปวดตามกล้ามเนื้อและข้อต่อต่างๆ กล้ามเนื้อเป็นอัมพาต

3. ระบบเลือด ได้แก่ เลือดจางซีดขาว อ่อนเพลีย ปวดศีรษะ มึนงง ตัวและตาเหลือง

ผลกระทบที่มีต่อเด็ก

1. ระบบประสาท ตะกั่วจะทำลายระบบประสาทส่วนกลางและส่วนปลาย ซึ่งเด็กอายุยิ่งน้อยเท่าไร ระบบประสาทจะถูกทำลายมากขึ้นเท่านั้น ดังนั้น จึงเป็นอันตรายต่อเด็กเล็กเป็นอย่างยิ่ง

2. ระบบปัสสาวะ ทำลายไตและทำให้ที่กรองปัสสาวะฝ่อลีบ

3. ระบบเลือด ทำให้เม็ดเลือดแดงแตกง่าย และขัดขวางการสร้างฮีโมโกลบิน ทำให้ซีดและโลหิตจาง

4. ระบบทางเดินอาหาร ทำให้ปวดท้องและเกร็งกล้ามเนื้อท้อง

5. การเจริญเติบโต ในกรณีที่มีตะกั่วในเลือดตั้งแต่ 25 ไมโครกรัมในเลือด 1 เดซิลิตร จะยับยั้งการเจริญเติบโตของเด็ก ทำให้เด็กเจริญเติบโตไม่สมกับอายุ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551)

2.9 เบริลเลียม

2.9.1 ลักษณะทางกายภาพและเคมี

เบริลเลียม (Beryllium; Be) มีเลขอะตอม 4 เป็นธาตุเบาเลนส์ที่มีพิษ เบริลเลียมเป็นโลหะแอลคาไลน์เอิร์ธ มีสีขาวแวววาว น้ำหนักเบา มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูง โดยทั่วไปที่อุณหภูมิห้อง จะอยู่ในสถานะของแข็ง (Taylor et al., 2003) ทนต่อความร้อนสูง ทนต่อการกัดกร่อน ไม่เกิดประกายไฟ และไม่เป็นแม่เหล็ก

2.9.2 กลไกความเป็นพิษ

เมื่อเบริลเลียมเข้าไปในร่างกายในรูปของเกลือหรือออกไซด์ จะแตกตัวเป็น Be^{2+} ก่อน Be^{2+} จะทำปฏิกิริยากับสารจำพวก Phenolic ที่มีอยู่ในร่างกาย เช่น Tyrosine และ Catecholamines ซึ่ง Be^{2+} จะยับยั้งการทำงานของเอนไซม์หลายชนิด โดยเบริลเลียมสามารถเข้าไปสู่เซลล์ทุกชนิดทั่วร่างกาย สามารถกระตุ้นการเจริญเติบโตของเซลล์และทำให้เกิดมะเร็งของปอด และกระดูกในสัตว์ทดลอง เช่น กระต่าย หนูพุกขาว และหนูตะเภา มีรายงานว่าคนงานที่ได้รับเบริลเลียมติดต่อกันเป็นระยะเวลาอันยาวนานจะมีโอกาสเป็นมะเร็งที่ปอด ตับ ท่อน้ำดี และกระเพาะปัสสาวะ ได้มากกว่าคนธรรมดา จึงเป็นที่ยอมรับว่าเบริลเลียมเป็นสารก่อกลายพันธุ์และสารก่อมะเร็ง (ไมตรี สุทธิจิตต์, 2531)

2.9.3 ผลกระทบต่อมนุษย์

เบริลเลียมที่เข้าสู่ร่างกายมนุษย์ก่อให้เกิดความเป็นพิษได้ 2 ลักษณะ ได้แก่

1. ความเป็นพิษอย่างรุนแรง ส่วนใหญ่เกิดจากการหายใจเอาสารประกอบของเบริลเลียมเข้าไปในปริมาณมาก จะมีอาการอักเสบระยะเฉียบพลันของตาและทางเดินหายใจ โดยความผิดปกติดังกล่าวอาจเกิดขึ้นภายในเวลาไม่กี่ชั่วโมง ถึง 1 – 2 วันหลังจากการรับสัมผัส จะมีอาการระคายเคืองตา แสบตา น้ำตาไหล ตาแดง มีการระคายเคืองทางเดินหายใจส่วนบน ทำให้เกิดอาการแสบจมูกและคอบหอย คัดจมูก น้ำมูกไหล เลือดกำเดาไหล เยื่อจมูกและคอบหอยบวม การระคายเคืองทางเดินหายใจส่วนล่างทำให้เกิดอาการ ไอ แน่นและเจ็บหน้าอก หายใจลำบาก หายใจมีเสียงหวีด เกิดอาการปอดอักเสบและปอดบวม

2. ความเป็นพิษเรื้อรัง เกิดจากการรับสัมผัสสารเบริลเลียมหรือสารประกอบที่ไม่สามารถละลายได้ ความผิดปกติที่เกิดขึ้นอาจเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาอันยาวนานเป็นปี หลังจากหยุดการรับสัมผัส ลักษณะความผิดปกติที่พบจะเป็นแบบ Granulomatous ที่เนื้อปอด และยังพบความผิดปกติดังกล่าวที่อวัยวะอื่นๆ เช่น ตับ หรือม้ามได้ อาการในระยะเริ่มแรกที่พบจะมีอาการหายใจไม่สะดวก โดยเฉพาะตอนออกกำลังกาย ไอและมีไข้ต่อมาจะมีอาการเหนื่อยอ่อนเพลีย และน้ำหนักตัวลดลงอย่างรวดเร็ว อาการแสดงที่ตรวจพบได้ ได้แก่ นิ้วปุ่ม ตับและม้ามโต ต่อม้ำเหลืองโต นอกจากนี้ในผู้ป่วยที่มีอาการของโรคมานานอาจมีอาการแสดงของความดันหลอดเลือดปอดสูง ได้แก่การขยายตัวของหลอดเลือดดำ Jugular มีการยกขึ้นของทรวงอกจากหัวใจห้องขวา และ เสียงหัวใจ S2 ดัง (สำนักงานประกันสังคม, 2547) นอกจากนี้แล้วเบริลเลียมและสารประกอบเบริลเลียม ยังได้ถูกจัดประเภทเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์โดยองค์การวิจัยมะเร็งระหว่างประเทศ (International Agency for Research on Cancer หรือ IARC) โดยมีพื้นฐานมาจากอัตราการเป็นมะเร็งปอดที่เพิ่มขึ้นในหมู่คนงานผลิตเบริลเลียม (IARC, 1993)

2.10 ของเสียอันตราย

ของเสียอันตราย หมายถึง สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีองค์ประกอบ หรือปนเปื้อนสารอันตราย หรือมีคุณสมบัติที่เป็นอันตราย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548) ตามลักษณะและคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้

1. สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วประเภทสารไวไฟ (Ignitable substance) ซึ่งมีรายละเอียดดังภาคผนวก ค
2. สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วประเภทสารกัดกร่อน (Corrosive substance) ซึ่งมีรายละเอียดดังภาคผนวก ค
3. สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วประเภทสารที่เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย (Reactive substances) ซึ่งมีรายละเอียดดังภาคผนวก ค

4. สิ่งปนื้อกฏหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วประเภทสารพิษ (Toxic substances) ซึ่งมีรายละเอียดดังภาคผนวก ค

5. สิ่งปนื้อกฏหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีองค์ประกอบของสิ่งเจือปน ดังนี้

(1) เมื่อพบว่ามื้องค์ประกอบของสารอนินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตราย ในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อหนึ่งกิโลกรัมของสิ่งปนื้อกฏหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว (mg/kg; wet weight) เท่ากับหรือมากกว่าค่า Total Threshold Limit Concentration (TTL) ที่กำหนดไว้ (ภาคผนวก ค)

(2) สิ่งปนื้อกฏหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วเมื่อนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) และวิธีวิเคราะห์น้ำสกัดแล้ว มื้องค์ประกอบของสารอนินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตรายในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อลิตรของน้ำสกัด (mg/L) เท่ากับหรือมากกว่าค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) ที่กำหนดไว้ (ภาคผนวก ค)

2.10.1 การจัดการของเสียอันตรายในประเทศไทย

กระทรวงอุตสาหกรรมโดยกรมโรงงานอุตสาหกรรมและการนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย (กนอ.) เป็นหน่วยงานที่ทำหน้าที่กำกับดูแลการดำเนินงานจัดการของเสียที่เกิดจากการประกอบกิจการโรงงานอุตสาหกรรมทั่วประเทศ โดยพบว่าในปี 2551 มีปริมาณของเสียอันตรายได้รับการจัดการประมาณ 1.836 ล้านตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 75 ของปริมาณของเสียอันตรายจากอุตสาหกรรมที่คาดว่าจะเกิดขึ้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2553) (ตารางที่ 2.2)

ตารางที่ 2.2 การจัดการของเสียอันตรายจากอุตสาหกรรม ปี 2551

วิธีการจัดการของเสียอันตราย	ปริมาณ (ตัน/ปี)	ร้อยละ
1.ฝังกลบอย่างปลอดภัย	318,500.82	17.35
2.เผาทำลายในเตาปูนซีเมนต์และเผาของเสียอันตราย	151,468.59	8.25
3.รีไซเคิลในประเทศ	1,074,931.43	58.55
4.รีไซเคิลต่างประเทศ	218,618.14	11.91
5.คัดแยกและเก็บรวบรวมในโรงงาน	1,224.04	0.07
6.อื่นๆ	71,330.46	3.88
รวม	1,836,073.48	100

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551

2.10.2 การจัดการของเสียอันตรายอุตสาหกรรม

การจัดการของเสียอันตรายอุตสาหกรรมภายใต้ความรับผิดชอบของกระทรวงอุตสาหกรรม และการนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย (กนอ.) มีมาตรการในการจัดการของเสีย ดังนี้

(1) กรมโรงงานอุตสาหกรรม

โรงงานซึ่งสังกัดกรมโรงงานอุตสาหกรรมมีตั้งแต่ขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ ทั้งสิ้นประมาณ 103,751 โรงงาน (สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย, 2554) โรงงานขนาดใหญ่มักมีระบบบำบัดของเสียที่ไม่ได้มาตรฐาน และโรงงานขนาดเล็กจำนวนมาก มักแอบปล่อยของเสียโดยมิได้ผ่านการบำบัด กรมโรงงานอุตสาหกรรมจึงก่อตั้งศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรม เพื่อรับบำบัดของเสียจากอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดเล็ก ซึ่งมีเงินทุนและบุคลากรไม่เพียงพอ

ปัจจุบันศูนย์บริการกำจัดกากมี 2 แห่ง คือ (1) ศูนย์บริการกำจัดกากแขวงแสมดำ เขตบางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร เป็นศูนย์แห่งแรก โดยศูนย์นี้สามารถรองรับของเสียประเภท กรด ต่าง และโลหะหนัก มีความสามารถในการรับน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม 800 ลบ.ม./วัน น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ 200 ลบ.ม./วัน และกากตะกอนของแข็งที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนัก 100 ตัน/วัน กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียภายในศูนย์รวมทั้งกากตะกอนและของแข็งที่รับจากภายนอก จะถูกทำให้คงตัวแล้วจะถูกส่งไปทำการฝังกลบ (Secure landfill) ยังศูนย์ราชบุรี (2) ศูนย์กำจัดกากนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จ.ระยอง ให้บริการการเก็บรวบรวม การขนส่ง การบำบัดและกำจัด รวมทั้งให้คำปรึกษา แนะนำด้านการจัดการกับวัสดุเหลือใช้หรือของเสียทุกประเภท โดยศูนย์นี้มีศักยภาพในการจัดการกากของเสียได้ 500-1,000 ตันต่อวัน การให้บริการของทั้ง 2 ศูนย์นี้ ประกอบด้วย 6 ขั้นตอน ได้แก่ (1) การขนส่งกากของเสีย (2) การศึกษาวิเคราะห์ของเสียก่อนการบำบัด (3) การบำบัดน้ำเสีย (4) การปรับเสถียรกากของเสีย (5) การฝังกลบอย่างปลอดภัย และ (6) การผสมกากเป็นเชื้อเพลิง (สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย, 2554)

(2) การนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย (กนอ.)

การนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย มีหน้าที่รับผิดชอบในการดูแลนิคมอุตสาหกรรมทั้งหมด 23 นิคม ซึ่งมีโรงงานทั้งสิ้นประมาณ 2,200 โรงงาน โดย กนอ. ทำการแยกขยะในนิคมอุตสาหกรรม เพื่อให้ผู้ประกอบการทำการแยกขยะตามชนิดของขยะ เพื่อสะดวกต่อการจัดเก็บและทำลาย โดยเฉพาะการป้องกันมิให้มีการทิ้งขยะอันตรายปะปนกับขยะทั่วไป และกำหนดให้มีการจัดการขยะทั้ง 2 ประเภท ด้วยวิธีที่แตกต่างกัน สำหรับขยะทั่วไปที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะมีรถเก็บขนและนำมากำจัดโดยวิธีการเผาในเตาเผาขยะมูลฝอย หรือวิธีการฝัง

กลบ (Sanitary landfill) สำหรับของเสียอันตราย นิคมอุตสาหกรรมจัดสร้างโรงพักกากชั่วคราว เพื่อพักรอการส่งไปกำจัดที่ศูนย์บริการกำจัดกากโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป (สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย, 2554)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ เป็นการศึกษาความเข้มข้นของตะกั่วและเบริลเลียมจากพลอยคอรันด์ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบตะกั่วในทับทิมและสารประกอบเบริลเลียมในบุษราคัม เพื่อทราบถึงความเข้มข้นของตะกั่วและเบริลเลียมและโอกาสในการปนเปื้อนสู่มนุษย์และสิ่งแวดล้อม และทำการศึกษาความเข้มข้นของตะกั่วและเบริลเลียมจากแร่ที่ใช้ในกระบวนการปรับปรุงพลอยด้วยการเติมสารประกอบตะกั่วและสารประกอบเบริลเลียม เพื่อทดสอบความเป็นของเสียอันตรายของแร่ที่ใช้กระบวนการปรับปรุง โดยวิธีการศึกษาสามารถสรุปได้ดังภาพที่ 3.1

3.1 ศึกษาความเข้มข้นของตะกั่วและเบริลเลียมจากพลอยคอรันด์ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบแก้วตะกั่วในทับทิมและสารประกอบเบริลเลียมในบุษราคัม

3.1.1 ตัวอย่างพลอยที่ใช้ในการศึกษา

3.1.1.1 พลอยทับทิมที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบแก้วตะกั่วจำนวน 2 โรงงาน แบ่งออกเป็นดังนี้

- 1) พลอยทับทิมจากโรงงานที่ 1 มีขนาดตั้งแต่ 3.00-4.00 กรัม ลักษณะที่โปร่งแสง มีรูปร่างแบบรูปไข่ (Oval) และเจียรระโนแบบเหลี่ยมผสม (Mix cut)
- 2) พลอยทับทิมจากโรงงานที่ 2 มีขนาดตั้งแต่ 0.16-0.50 กรัม ลักษณะที่โปร่งแสง มีรูปร่างแบบรูปไข่ (Oval) และเจียรระโนแบบเหลี่ยมผสม (Mix cut)

3.1.1.2 พลอยบุษราคัมที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบเบริลเลียมจำนวน 2 โรงงาน แบ่งออกเป็นดังนี้

- 1) พลอยบุษราคัมจากโรงงานที่ 1 มีขนาดตั้งแต่ 0.86-1.32 กรัม ลักษณะที่โปร่งแสง มีรูปร่างแบบรูปไข่ (Oval) และเจียรระโนแบบเหลี่ยมผสม (Mix cut)
- 2) พลอยบุษราคัมจากโรงงานที่ 2 มีขนาดตั้งแต่ 0.01-0.03 กรัม ลักษณะที่โปร่งแสง มีรูปร่างแบบกลม (Round) และเจียรระโนแบบเหลี่ยมผสม (Mix cut)

3.1.2 การเตรียมตัวอย่างพลอยที่ใช้ในการศึกษา

เนื่องจากตัวอย่างพลอยในแต่ละโรงงานมีขนาดที่แตกต่างกัน จึงมีการเตรียมตัวอย่างที่แตกต่างกัน ดังนี้

กลุ่มที่ 1 พลอยทับทิมจากโรงงานที่ 1

- นำตัวอย่างพลอยประมาณ 30 เม็ด บดรวมกันให้เป็นผง เพื่อใช้ในการทดสอบด้วยวิธี Total digestion และวิธี C-02.4
- นำตัวอย่างพลอย 1 เม็ด ทำการตัดแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยในส่วนที่ 1 ของแต่ละเม็ดจะทำการบดรวมกันให้เป็นผง เพื่อใช้ในการทดสอบด้วยวิธี BCR three stages และพลอยเม็ด 2 ส่วนที่เหลือจะนำไปทำการทดสอบด้วยวิธี BCR three stages และวิธี C-02.4

กลุ่มที่ 2 พลอยทับทิมจากโรงงานที่ 2

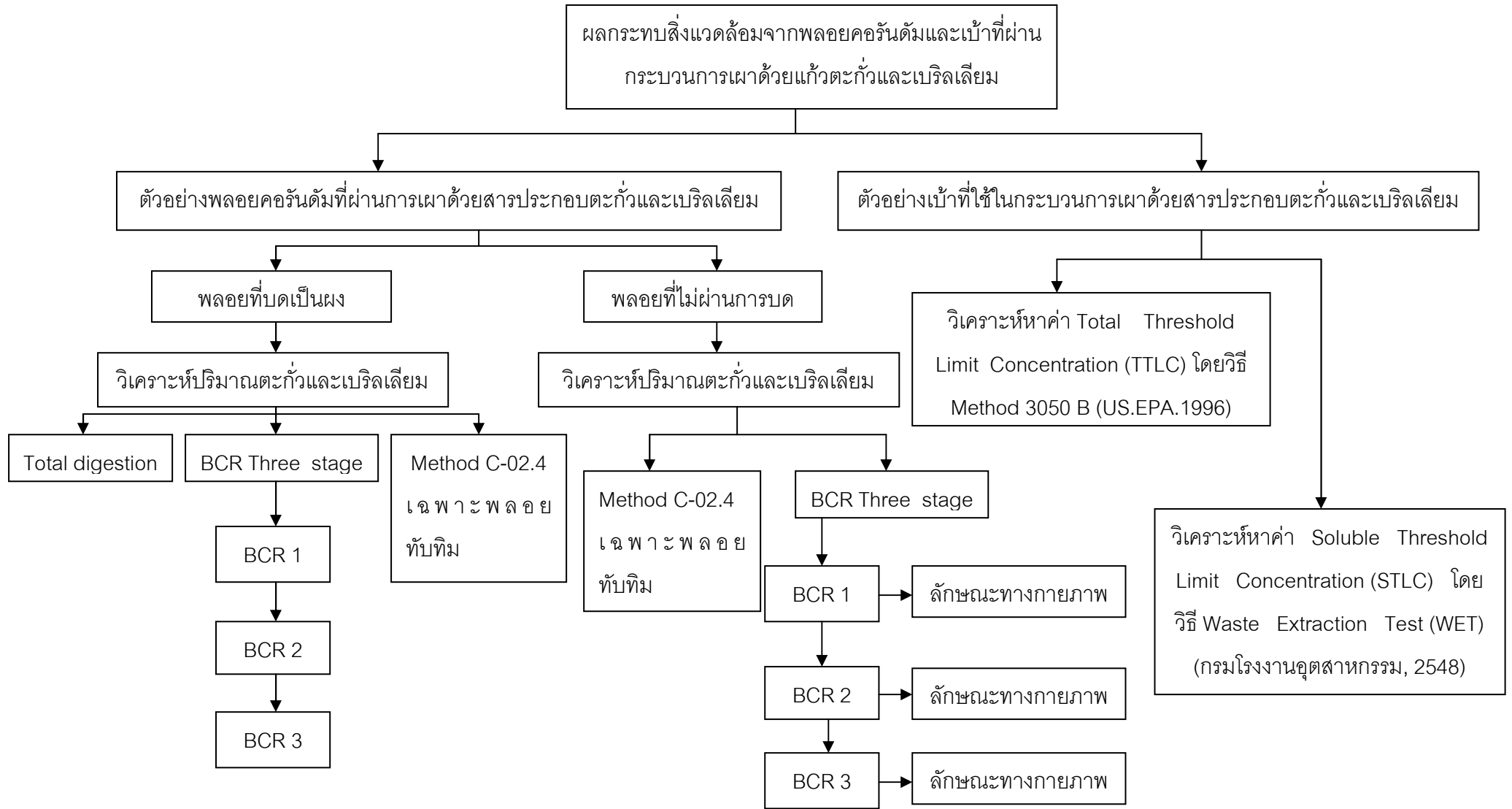
- นำตัวอย่างพลอยประมาณ 50 เม็ด บดรวมกันให้เป็นผง เพื่อใช้ในการทดสอบด้วยวิธี Total digestion และวิธี C-02.4
- นำตัวอย่างพลอย 1 เม็ด ทำการตัดออกเป็น 2 ส่วน โดยในส่วนที่ 1 ทำการบดรวมกันให้เป็นผงเพื่อทำการทดสอบด้วยวิธี BCR three stages และในส่วนที่ 2 ทำการทดสอบด้วยวิธี BCR three stages
- นำตัวอย่างพลอยทั้งเม็ดเพื่อทำการทดสอบด้วยวิธี C-02.4

กลุ่มที่ 3 พลอยบุษราคัมจากโรงงานที่ 1

- นำตัวอย่างพลอยประมาณ 30 เม็ด บดรวมกันให้เป็นผง เพื่อใช้ในการทดสอบด้วยวิธี Total digestion
- นำตัวอย่างพลอย 1 เม็ด ทำการตัดออกเป็น 2 ส่วน โดยในส่วนที่ 1 ทำการบดรวมกันให้เป็นผงเพื่อทำการทดสอบด้วยวิธี BCR three stages และในส่วนที่ 2 ทำการทดสอบด้วยวิธี BCR three stages

กลุ่มที่ 4 พลอยบุษราคัมจากโรงงานที่ 2

- นำตัวอย่างพลอยประมาณ 50 เม็ด บดรวมกันให้เป็นผง เพื่อใช้ในการทดสอบด้วยวิธี Total digestion และวิธี BCR three stages
- นำตัวอย่างพลอยทั้งเม็ดเพื่อทำการทดสอบด้วยวิธี BCR three stages



ภาพที่ 3.1 แผนผังแสดงวิธีการดำเนินงานศึกษาวิจัย

3.1.3 ศึกษาปริมาณโลหะทั้งหมดในพลอยคอร์ันดัมด้วยวิธี Total digestion

นำตัวอย่างพลอยที่ผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อนโดยมีการเติมสารประกอบของตะกั่วและเบริลเลียมไปวิเคราะห์หาค่า Total digestion โดยใช้ดัดแปลงจากวิธี Total digestion (Leonard, 1975) (ภาคผนวก ง) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. ชั่งตัวอย่าง 0.5 กรัม ลงในบีกเกอร์ชนิดเทฟลอน ขนาด 100 มิลลิลิตร
2. เติม Solution B acid mixture ที่เตรียมไว้ 15 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ ผสมให้เข้ากัน
3. ปิดบีกเกอร์ด้วยกระจกนาฬิกาชนิดเทฟลอน นำไปให้ความร้อนบน เตาแผ่นความร้อน ประมาณ 12 ชั่วโมง
4. เปิดฝาดอกและให้ความร้อนต่อไปประมาณ 1 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งไม่เกิดควันของกรดอีก
5. ทิ้งไว้ให้เย็นจากนั้นเติม Conc. HNO_3 5 มิลลิลิตร
6. ให้ความร้อนจนกระทั่งสารละลายเดือด หากเกิดตะกอนสีน้ำตาลของ MnO_2 หลังจาก ที่สารละลายเดือดให้เติม Hydrazine sulfate และให้ความร้อนต่อไปประมาณ 30 นาที
7. ทิ้งไว้ให้เย็นและถ่ายใส่ขวดเพื่อทำการปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น และกรองด้วยกระดาษกรอง
8. นำสารละลายที่ได้วิเคราะห์โลหะด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS) ต่อไป

3.1.4 ศึกษาปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วและเบริลเลียมด้วยวิธี Three-stage sequential extraction procedure (BCR three stages) และลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงในสภาวะต่างๆ มีขั้นตอนดังนี้

ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพต่างๆ ของพลอยเม็ดก่อนและหลังทำการทดสอบ เช่น น้ำหนัก ค่าดัชนีหักเห ค่าความถ่วงจำเพาะ และการเรืองแสงภายใต้แสงเหนือม่วง และทำการทดสอบพลอยที่บดเป็นผงและพลอยเม็ดตามขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 : ชั่งตัวอย่าง 1 กรัม ลงในหลอดทดลองขนาด 50 มิลลิลิตร จากนั้นเติม 0.11 mol/L Acetic acid 40 มิลลิลิตร แล้วนำไปเข้าเครื่องเขย่าเป็นเวลา 16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นล้างตัวอย่างด้วยการเติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร และเขย่าด้วยเครื่องปั่นด้วยแรงเหวี่ยงเป็นเวลา 10 นาที แล้วนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของเบริลเลียมและตะกั่วด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS)

ขั้นที่ 2 : นำตัวอย่างจากขั้นที่ 1 ใส่ลงในหลอดทดลอง จากนั้นเติม 0.5 mol/L Hydroxylamine hydrochloride 40 มิลลิลิตร แล้วนำไปเข้าเครื่องเขย่าเป็นเวลา 16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นล้างตัวอย่างด้วยการเติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร และเขย่าด้วยเครื่องปั่นด้วยแรงเหวี่ยงต่อเป็นเวลา 10 นาที แล้วนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของเบริเลียมและตะกั่วด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS)

ขั้นที่ 3 : นำตัวอย่างจากขั้นที่ 2 ใส่ลงในหลอดทดลอง เติม 8.8 mol/L Hydrogen peroxide 10 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน จากนั้นถ่ายใส่ปิកเกอร์ขนาด 30 มิลลิลิตร ให้ความร้อนที่ 80 ± 2 องศาเซลเซียส จนปริมาตรลดลงเป็น 3 มิลลิลิตร จากนั้นเติม 8.8 mol/L Hydrogen peroxide 10 มิลลิลิตร ทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85 ± 2 องศาเซลเซียส จนปริมาตรลดลงเหลือ 1 มิลลิลิตร เติม 1.0 mol/L Ammonium acetate 50 มิลลิลิตร แล้วนำไปเขย่าเป็นเวลา 16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง และนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของเบริเลียมและตะกั่วด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS)

หมายเหตุ : ปริมาณสารละลายที่ใช้ให้ปรับตามน้ำหนักของตัวอย่างพลอยเม็ดที่นำมาทดสอบ

3.1.5 ศึกษาปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในพลอยทับทิม ด้วย Method C-02.4 เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของตะกั่วในเครื่องประดับของ U.S.CONSUMER PRODUCT SAFETY COMMISSION (CPSC) ทั้งในพลอยที่บดเป็นผงและพลอยเม็ดดังนี้

1. ชั่งตัวอย่าง 50 มิลลิกรัม ลงในปิกเกอร์ ขนาด 50 มิลลิลิตร
2. เติม Conc. HNO_3 8 มิลลิลิตร นำไประเหยบนเตาแผ่นความร้อน จนปริมาตรของสารลดลงเหลือประมาณ 3 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ให้เย็น
3. เติม Conc. HCl 2 มิลลิลิตร จากนั้นเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 20 มิลลิลิตร
4. ทำการเขย่าและให้ความร้อนด้วยเครื่องเขย่าและให้ความร้อน (Shaker Bath) เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
5. ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนปริมาตรสุดท้ายเป็น 50 มิลลิลิตร
6. นำสารละลายที่ได้วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS) เพื่อหาปริมาณความเข้มข้นของตะกั่ว

หมายเหตุ : ปริมาณสารละลายที่ใช้ให้ปรับตามน้ำหนักของตัวอย่างพลอยเม็ดที่นำมาทดสอบ

3.1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โลหะ ลักษณะทางกายภาพ และคุณสมบัติทางอัญมณีของพลอย

1. เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมและทดสอบตัวอย่างพลอย

- เครื่องชั่งอย่างละเอียด (Analytical Balance)
- เครื่องบดตัวอย่าง (Ball Mill)
- เครื่องตัดพลอย (Low Speed Saw)
- เครื่องเขย่า (Table Shaker)
- เครื่องหมุนเหวี่ยงความเร็วสูง (Centrifuge)
- เตาแผ่นความร้อน (Hot Plate)

2. อุปกรณ์ และเครื่องมือสำหรับการศึกษาลักษณะทางกายภาพ

- เครื่องฉายรังสีเหนือม่วง (Ultraviolet Fluorescence/UV Lamp)
- เครื่องวัดค่าดัชนีหักเห (Refractometer)
- เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity Balance)

3. เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นโลหะ

- เครื่อง Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS) ยี่ห้อ Agilent รุ่น 7500ce

3.2 ศึกษาความเป็นของเสียอันตรายของเบ้าที่ใช้เป็นภาชนะใส่พลอยคอร์นดัมเพื่อใช้ในระบบการปรับปรุงโดยการเติมสารประกอบตะกั่วและสารประกอบเบริลเลียม

3.2.1 ตัวอย่างเบ้าที่ใช้ในการศึกษา

1. เบ้าที่ใช้เป็นภาชนะใส่พลอยคอร์นดัมเพื่อใช้ในระบบการปรับปรุงโดยการเติมสารประกอบตะกั่วจำนวน 2 โรงงาน
2. เบ้าที่ใช้เป็นภาชนะใส่พลอยคอร์นดัมเพื่อใช้ในระบบการปรับปรุงโดยการเติมสารประกอบเบริลเลียมจำนวน 2 โรงงาน
3. เบ้าที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน

3.2.2 การเตรียมตัวอย่างเบ้าที่ใช้ในการศึกษา

กลุ่มที่ 1 เบ้าที่ใช้ในระบบการปรับปรุงโดยการเติมสารประกอบตะกั่วของแต่ละโรงงาน นำมาบดเป็นผงเพื่อทำการทดสอบด้วยวิธี Method 3050B และ วิธี Waste extraction test

กลุ่มที่ 2 เบ้าที่ใช้ในกระบวนการปรับปรุงโดยการเติมสารประกอบเบริลเลียมของแต่ละโรงงานนำมาดเป็นผงเพื่อทำการทดสอบด้วยวิธี Method 3050B และ วิธี Waste extraction test

กลุ่มที่ 3 เบ้าที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน นำมาดเป็นผงเพื่อทำการทดสอบด้วยวิธี Method 3050B และ วิธี Waste extraction test

3.2.3 ศึกษาปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วและเบริลเลียมจากเบ้าในสภาพของแข็ง (Total Threshold Limit Concentration, TTLC) มีขั้นตอนดังนี้

1. ชั่งตัวอย่าง 1 กรัม ใส่ในปิ๊กเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร
2. เติม Conc. HNO_3 10 มิลลิลิตร นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ประมาณ 10-15 นาที ระวังอย่าให้เดือดและทิ้งไว้ให้เย็น เติม Conc. HNO_3 5 มิลลิลิตร และปิดด้วยกระจกนาฬิกา หากเกิดควันสีน้ำตาลให้เติม Conc. HNO_3 ครั้งละ 5 มิลลิลิตร จนกระทั่งควันสีน้ำตาลหายไป และนำไปต้มจนได้ปริมาตรสุดท้าย 5 มิลลิลิตร ประมาณ 2 ชั่วโมง รอจนกระทั่งเย็น
3. เติมน้ำกลั่น 2 มิลลิลิตร และ 30% H_2O_2 3 มิลลิลิตร ปิดด้วยกระจกนาฬิกา และให้ความร้อนต่อจนกระทั่งสารละลายเดือดและทิ้งไว้ให้เย็น
4. เติม 30% H_2O_2 1 มิลลิลิตร และให้ความร้อนจนกระทั่งได้ปริมาตรสุดท้าย 5 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ให้เย็น และปรับปริมาตรสุดท้ายเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น จากนั้นกรองด้วยกระดาษกรอง
5. นำสารละลายที่ได้วิเคราะห์เครื่อง Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS) เพื่อหาปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วและเบริลเลียม

3.2.4 ศึกษาปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วและเบริลเลียมจากเบ้าในน้ำสกัด (Soluble Threshold Limit Concentration, STLC) มีขั้นตอนดังนี้

1. ชั่งตัวอย่าง 50 กรัม ใส่ลงในขวดพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีนที่มีฝาปิด
2. เติมน้ำสกัด 500 มิลลิลิตร ลงในตัวอย่าง จากนั้นนำของผสมไปใส่อากาศด้วยก๊าซไนโตรเจน เป็นเวลา 15 นาที เพื่อไล่ออกซิเจนในน้ำสกัดออกไป และป้องกันไม่ให้ออกซิเจนในอากาศละลายลงไปในตัวอย่าง เมื่อเสร็จแล้วให้ทำการปิดฝาภาชนะอย่างรวดเร็ว และนำไปเขย่าโดยใช้ Table Shaker หรือ Overhead Stirrer หรือ Rotary Extractor ซึ่งสามารถทำให้ของผสมอยู่ในสภาพถูกวนผสมอยู่ตลอดเวลา (Vigorously Agitated Suspension) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

3. จากนั้นนำของผสมไปกรอง หรือตกตะกอนด้วยเครื่องปั่นด้วยแรงเหวี่ยง (Centrifuged) แล้วนำมากรองผ่านแผ่นกรองเมมเบรน (Membrane Filter) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน โดยใช้ Thick-walled Suction Flask

4. ปิเปตตัวอย่าง 100 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ เดิม Conc. HNO_3 3 มิลลิลิตร และ ปิดด้วยกระจกนาฬิกาตั้งทิ้งไว้บนเตาแผ่นความร้อน จนมีปริมาตรเหลือประมาณ 5 มิลลิลิตร

5. เดิม Conc. HNO_3 5 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้บนเตาแผ่นความร้อน ประมาณ 15 นาที

6. เดิม HCL 1:1 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น 15 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้บนเตาแผ่นความร้อน ประมาณ 15 นาที

7. กรองตัวอย่างด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 และปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น

8. นำสารละลายที่ไปได้วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS) เพื่อหาปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วและเบริลเลียม

หมายเหตุ : ภาชนะที่ใช้ในการสกัด ควรผ่านการแช่เครื่องแก้วในสารละลาย Nitric Acid อย่างต่อเนื่อง ซึ่งสามารถเตรียมได้จากการนำเอา Nitric Acid Solution มาผสมกับ Deionized Water ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร

3.2.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โลหะในบ้ำเผาพลอย

1. เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมและทดสอบตัวอย่างบ้ำ

- เครื่องชั่งอย่างละเอียด (Analytical Balance)
- เครื่องบดตัวอย่าง (Ball Mill)
- เครื่องเขย่า (Table Shaker)
- เครื่องหมุนเหวี่ยงความเร็วสูง (Centrifuge)
- เตาแผ่นความร้อน (Hot Plate)

2. เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นโลหะ

- เครื่อง Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS) ยี่ห้อ Agilent

รุ่น 7500

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาความเข้มข้นของตะกั่วและเบริลเลียมจากพลอยคอรัลด์ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบตะกั่วและสารประกอบเบริลเลียม แบ่งการศึกษาออกเป็นสี่ส่วน คือ 1.) ศึกษาความเข้มข้นของตะกั่วและเบริลเลียมทั้งหมดในพลอยคอรัลด์ 2.) ศึกษาความเข้มข้นของตะกั่วและเบริลเลียมพร้อมทั้งลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงในสภาวะที่แตกต่างกัน 3.) ศึกษาความเข้มข้นของตะกั่วเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของตะกั่วในเครื่องประดับ และ 4.) การศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความเป็นของเสียอันตรายของเบ้าที่ใช้เป็นภาชนะใส่พลอยคอรัลด์เพื่อใช้ในกระบวนการปรับปรุงโดยการเติมสารประกอบตะกั่วและสารประกอบเบริลเลียม โดยแบ่งการศึกษาออกเป็นสองส่วน คือ ศึกษาความเข้มข้นของตะกั่วและเบริลเลียม (TTLC) และศึกษาความเข้มข้นของตะกั่วและเบริลเลียมจากน้ำสกัด (STLC) ซึ่งผลการศึกษาทั้งหมดมีรายละเอียดดังนี้

4.1 ความเข้มข้นของตะกั่วและเบริลเลียมทั้งหมดที่สกัดได้จากพลอยคอรัลด์ด้วยวิธี Total digestion

(1) ความเข้มข้นของตะกั่วจากพลอยทับทิม

การศึกษาพบว่า ความเข้มข้นเฉลี่ยของตะกั่วทั้งหมดของพลอยทับทิม จากโรงงานที่ 1 และ 2 (ตารางที่ 4.1) มีค่าเท่ากับ $2,963.33 \pm 83.27$ และ $1,610 \pm 25.00$ มก./กก. ตามลำดับ การที่ความเข้มข้นเฉลี่ยของตะกั่วจากพลอยโรงงานที่ 1 สูงกว่าโรงงานที่ 2 เนื่องจากคุณภาพของพลอยที่นำมาปรับปรุงมีลักษณะที่แตกต่างกันคือ พลอยทับทิมจากโรงงานที่ 1 นั้นมีลักษณะที่ทึบแสงและรอยแตกร้าวมากกว่าพลอยทับทิมจากโรงงานที่ 2 ทั้งนี้เนื่องจกวิธีการปรับปรุงพลอยทับทิมด้วยแก้วตะกั่ว โดยเป็นวิธีการอุดรอยแตกและช่องว่างในพลอยทับทิม จึงทำให้สารประกอบตะกั่วที่เข้าไปอุดในรอยแตกร้าว (Hughes, 1984) ที่พบในพลอยจากโรงงานที่ 1 มีปริมาณมากกว่าพลอยจากโรงงานที่ 2 ทำให้ความเข้มข้นของตะกั่วที่พบจากพลอยโรงงานที่ 1 สูงกว่าพลอยจากโรงงานที่ 2

ตารางที่ 4.1 ความเข้มข้นของตะกั่วที่สกัดได้จากพลอยทับทิมด้วยวิธี Total digestion

โรงงาน	ตัวอย่าง	ความเข้มข้นตะกั่ว (มก./กก.)	ค่าเฉลี่ย (มก./กก.)
1	Pb 1-1	2,990.00	2,963.33 ± 83.27
	Pb 1-2	3,030.00	
	Pb 1-3	2,870.00	
2	Pb 2-1	1,585.00	1,610 ± 25.00
	Pb 2-1	1,610.00	
	Pb 2-3	1,635.00	

(2) ความเข้มข้นของเบริลเลียมจากพลอยบุษราคัม

จากการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นเฉลี่ยของเบริลเลียมทั้งหมดของพลอยบุษราคัม จากโรงงานที่ 1 และ 2 (ตารางที่ 4.2) มีค่าเท่ากับ 124.03 ± 3.24 และ 80.05 ± 3.60 มก./กก. ซึ่งการที่ความเข้มข้นเฉลี่ยของเบริลเลียมจากพลอยโรงงานที่ 1 สูงกว่าโรงงานที่ 2 อาจเกิดจากสัดส่วนของเบริลเลียมที่ใช้ในการปรับปรุงแต่ละโรงงานไม่เท่ากันซึ่งถือเป็นความลับและเทคนิคของแต่ละโรงงานและจำนวนครั้งของการปรับปรุงพลอยในแต่ละเม็ดไม่เท่ากัน คือ ในการปรับปรุงนั้นผู้เผาจะทำการเผาครั้งละจำนวนมาก หลังจากเผาเสร็จในแต่ละครั้งก็จะคัดเฉพาะเม็ดที่มีสีตามที่ต้องการเก็บไว้ หากเม็ดใดที่ยังไม่ได้สีตามที่ต้องการก็จะทำการเผาต่อจนกว่าจะได้สีที่ผู้เผาต้องการ ดังนั้นพลอยแต่ละเม็ดจึงมีจำนวนครั้งในการเผามากน้อยแตกต่างกัน ทำให้ความเข้มข้นของเบริลเลียมมีความแตกต่างกัน และสีของพลอยก่อนทำการปรับปรุงของแต่ละโรงงานมีความแตกต่างกัน คือ พลอยบุษราคัมก่อนปรับปรุงของโรงงานที่ 1 มีสีโทนน้ำเงินแกมเขียว ส่วนโรงงานที่ 2 มีสีโทนเหลืองแกมเขียว โดยพลอยที่มีโทนสีน้ำเงินแกมเขียวจะมีปริมาณไททาเนียมมากกว่าพลอยที่มีโทนสีเหลืองแกมเขียว ซึ่งในการปรับปรุงพลอยให้มีสีเหลืองเพิ่มมากขึ้นนั้น พลอยที่มีโทนสีน้ำเงินแกมเขียวจากโรงงานที่ 1 จะใช้ปริมาณเบริลเลียมมากกว่าพลอยที่มีโทนสีเหลืองแกมเขียวจากโรงงานที่ 2 เนื่องจากธาตุเบริลเลียมจะทำหน้าที่เช่นเดียวกับธาตุแมกนีเซียม (Mg^{2+}) ที่มีอยู่แล้วในตัวคอร์รันดัม คือไปจับเป็นกลุ่มโครงสร้างย่อย $BeTiO_3$ และ $MgTiO_3$ ที่ไม่มีสีก่อน หลังจากนั้นถ้ามีธาตุเบริลเลียมและ/หรือแมกนีเซียมเหลืออยู่อีก (ในเม็ดพลอยมีอัตราส่วน $(Be+Mg)/Ti$ มากกว่า 1) ธาตุทั้งสองดังกล่าวที่เหลือจะไปทำหน้าที่ยึดศูนย์กลางสีเหลือง หรือ Yellow colour center ทำให้เกิดสีเหลืองที่เสถียร ซึ่งปริมาณเบริลเลียมที่มากกว่าไททาเนียม ($Mg^{2+} + Be^{2+} > Ti^{4+}$) จะทำให้เกิดสีเหลืองมากขึ้น (Pisutha-Armond et al.,

2002, 2003, 2004) ดังนั้นการที่ความเข้มข้นเบริลเลียมจากพลอยโรงงานที่ 1 มากกว่าโรงงานที่ 2 อาจเป็นผลจากปริมาณสัดส่วนของธาตุไททาเนียมที่มีอยู่แล้วในพลอยและเบริลเลียมที่เข้าไปในพลอยคอร์นดัมนั้นปริมาณที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.2 ความเข้มข้นของเบริลเลียมที่สกัดได้จากพลอยบุษราคัมด้วยวิธี Total digestion

โรงงาน	ตัวอย่าง	ความเข้มข้นเบริลเลียม (มก./กก.)	ค่าเฉลี่ย (มก./กก.)
1	Be 1-1	121.80	124.03 ± 3.24
	Be 1-2	127.75	
	Be 1-3	122.55	
2	Be 2-1	76.55	80.05 ± 3.60
	Be 2-2	79.85	
	Be 2-3	83.75	

4.2 ความเข้มข้นของตะกั่วและเบริลเลียมที่สกัดได้จากพลอยคอร์นดัมด้วยวิธี BCR three stage และการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพหลังทำการสกัดแต่ละขั้นตอน

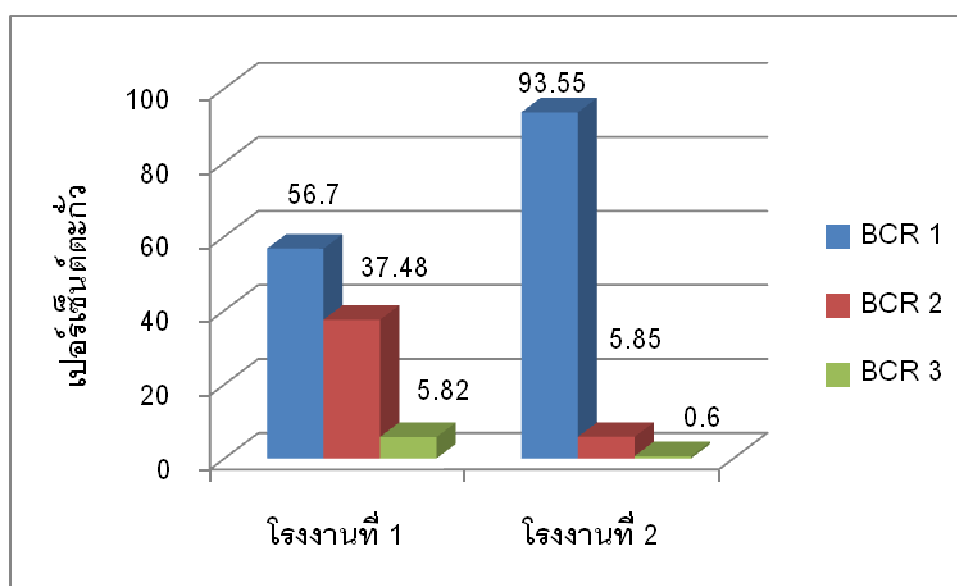
4.2.1 ความเข้มข้นของโลหะจากพลอยคอร์นดัมที่บดเป็นผง

(1) ความเข้มข้นของตะกั่วจากพลอยทับทิม

การศึกษาพลอยทับทิมที่บดเป็นผงในสภาวะที่แตกต่างกัน (BCR three stage) พบว่า ความเข้มข้นเฉลี่ยของตะกั่วจากโรงงานที่ 1 และ 2 ในแต่ละขั้น (ตารางที่ 4.3) มีค่าดังนี้ BCR 1 เท่ากับ 31.84 ± 1.97 และ 21.76 ± 1.37 มก./กก. BCR 2 เท่ากับ 21.05 ± 2.91 และ 1.36 ± 0.11 มก./กก. และ BCR 3 เท่ากับ 3.27 ± 0.17 และ 0.14 ± 0.02 มก./กก. ตามลำดับ โดยเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นตะกั่วเฉลี่ยในแต่ละขั้นเทียบกับปริมาณตะกั่วทั้งหมดที่ได้จากการสกัด (ภาพที่ 4.1) พบว่าเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นเฉลี่ยของตะกั่วมีค่าสูงสุดใน ขั้นที่ 1 (Exchangeable) ของทั้ง 2 โรงงาน ทั้งนี้เพราะในขั้นที่ 1 เป็นขั้นตอนของการสกัดด้วยกรดอ่อน และแก้วที่มีการผสมตะกั่วลงไป จะทำให้ความหนืดของแก้วลดลง (เทพีวรรณ จิตรัชรโกมล, 2548) จึงทำให้แก้วที่มีตะกั่วผสมอยู่ไม่ทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดจึงทำให้เกิดการชะละลายของตะกั่วปริมาณสูงในสภาวะนี้

ตารางที่ 4.3 ความเข้มข้นของตะกั่วที่สกัดจากพลอยทับทิมบดเป็นผงด้วยวิธี BCR three stage

โรงงาน	ตัวอย่าง	ความเข้มข้นตะกั่ว (มก./กก.)		
		BCR 1	BCR 2	BCR 3
1	Pb 1-1	30.38	19.60	3.16
	Pb 1-2	31.07	24.40	3.19
	Pb 1-3	34.08	19.14	3.47
	ค่าเฉลี่ย	31.84 ± 1.97	21.05 ± 2.91	3.27 ± 0.17
2	Pb 2-1	23.35	1.32	0.12
	Pb 2-2	20.97	1.48	0.16
	Pb 2-3	20.97	1.28	0.13
	ค่าเฉลี่ย	21.76 ± 1.37	1.36 ± 0.11	0.14 ± 0.02



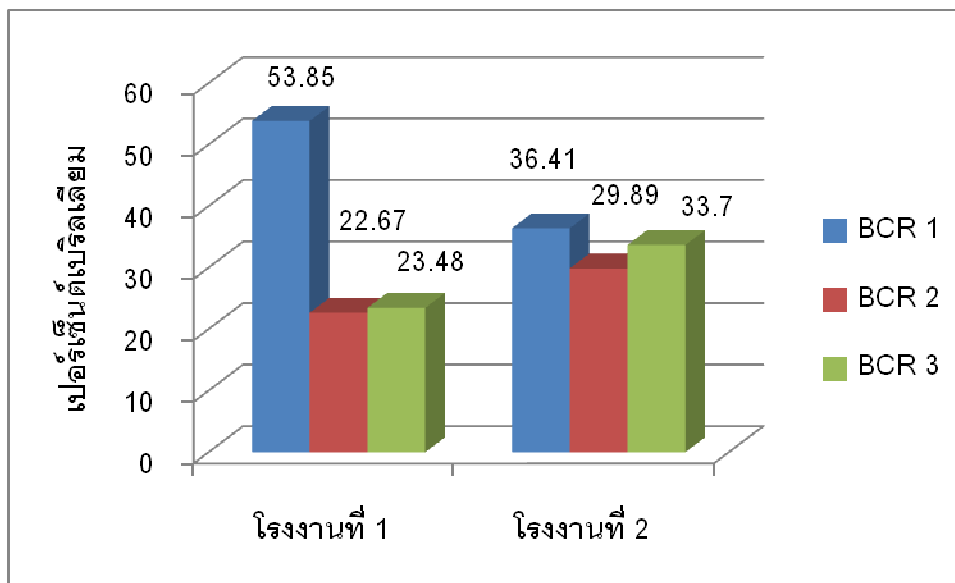
ภาพที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์ตะกั่วที่สกัดได้จากพลอยทับทิมบดเป็นผงในแต่ละขั้นตอนของ BCR three stage เมื่อเทียบกับปริมาณตะกั่วทั้งหมดที่สกัดได้

(2) ความเข้มข้นของเบริลเลียมจากพลอยบุษราคัม

การศึกษาพลอยบุษราคัมบดเป็นผงในสภาวะที่แตกต่างกัน (BCR three stage) พบว่า ความเข้มข้นเฉลี่ยของเบริลเลียมจากโรงงานที่ 1 และ 2 ในแต่ละชั้น (ตารางที่ 4.4) มีค่าดังนี้ BCR 1 เท่ากับ 1.33 ± 0.10 และ 0.67 ± 0.06 มก./กก. BCR 2 เท่ากับ 0.56 ± 0.05 และ 0.55 ± 0.04 มก./กก. และ BCR 3 เท่ากับ 0.58 ± 0.06 และ 0.62 ± 0.11 มก./กก. ตามลำดับ โดยเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นเฉลี่ยของเบริลเลียมในแต่ละชั้นเทียบกับปริมาณเบริลเลียมทั้งหมดที่ได้จากการสกัด (ภาพที่ 4.2) พบว่าเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นเฉลี่ยของเบริลเลียมมีค่าสูงสุดใน ชั้นที่ 1 (Exchangeable) ของทั้ง 2 โรงงาน อาจมีสาเหตุมาจากการที่อนุภาคมีขนาดเล็กจึงทำให้มีพื้นที่ผิวในการถูกชะละลายจากสารละลายได้มาก ทำให้การสกัดในชั้นที่ 1 นั้นสามารถชะละลายออกมาได้มากที่สุด แต่ความเข้มข้นเบริลเลียมที่พบในทุกๆ ชั้นนั้นเป็นความเข้มข้นที่ต่ำมาก แสดงให้เห็นว่าเบริลเลียมถูกชะละลายออกมาได้ยากในทุกๆ สภาวะเนื่องจากกลไกการเกิดสีเหลืองของเบริลเลียมนั้นเกิดจากการที่เบริลเลียมเข้าไปทำหน้าที่ยึดศูนย์กลางสี (Yellow colour center) ที่เกิดจากความบกพร่องของโครงสร้างผลึก ซึ่งการที่เบริลเลียมเข้าไปทำหน้าที่ยึดศูนย์กลางสีในโครงสร้างของพลอยทำให้เกิดความเสถียรมาก (Pisutha-Arnod et al., 2002, 2003, 2004) จึงยากต่อการถูกสกัดในสภาวะต่างๆ

ตารางที่ 4.4 ความเข้มข้นของเบริลเลียมที่สกัดได้จากพลอยบุษราคัมบดเป็นผงด้วยวิธี BCR three stage

โรงงาน	ตัวอย่าง	ความเข้มข้นเบริลเลียม (มก./กก.)		
		BCR 1	BCR 2	BCR 3
1	Be 1-1	1.38	0.57	0.65
	Be 1-2	1.21	0.51	0.55
	Be 1-3	1.40	0.60	0.54
	ค่าเฉลี่ย	1.33 ± 0.10	0.56 ± 0.05	0.58 ± 0.06
2	Be 2-1	0.74	0.52	0.72
	Be 2-2	0.66	0.54	0.62
	Be 2-3	0.62	0.60	0.51
	ค่าเฉลี่ย	0.67 ± 0.06	0.55 ± 0.04	0.62 ± 0.11



ภาพที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์เบริลเลียมที่สกัดได้จากพลอยบุราคัมบดเป็นผงในแต่ละขั้นตอนของ BCR three stage เมื่อเทียบกับปริมาณเบริลเลียมทั้งหมดที่สกัดได้

4.2.2 ความเข้มข้นของตะกั่วและลักษณะทางกายภาพของพลอยคอร์ันดัมเม็ด

(1) ความเข้มข้นของตะกั่วจากพลอยทับทิม

การศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของตะกั่วจากพลอยทับทิมจากการสกัดในสภาวะที่แตกต่างกัน มีค่าดังนี้ (ตารางที่ 4.7 และ 4.8) ความเข้มข้นของตะกั่วเฉลี่ยจากโรงงานที่ 1 และ 2 ในแต่ละชั้น คือ BCR 1 เท่ากับ 0.94 ± 0.73 และ 0.23 ± 0.20 มก./กก. BCR 2 เท่ากับ 4.49 ± 3.52 และ 0.32 ± 0.16 มก./กก. และ BCR 3 เท่ากับ 16.44 ± 10.20 และ 5.27 ± 0.29 มก./กก. ตามลำดับ โดยเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นตะกั่วเฉลี่ยในแต่ละชั้นเทียบกับปริมาณตะกั่วทั้งหมดที่ได้จากการสกัด (ภาพที่ 4.3) พบว่าเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นเฉลี่ยของตะกั่วมีค่าสูงสุดใน ชั้นที่ 3 (Oxidisable) ของทั้ง 2 โรงงาน ซึ่งเห็นได้ว่าความเข้มข้นตะกั่วเพิ่มขึ้นตามลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงเริ่มจากชั้นที่ 1 (Exchangeable) โดยมีลักษณะกร่อนเล็กน้อยบริเวณผิวและสีซีดลงเล็กน้อย ในชั้นที่ 2 (Reducible) เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพมากขึ้นกว่าชั้นที่ 1 และเห็นได้ชัดเจนที่สุดในชั้นสุดท้ายคือ ชั้นที่ 3 เนื่องจากวิธีการปรับปรุงด้วยแก๊วตะกั่วนั้นเป็นการอุดรอยแตกร้าวในเนื้อพลอย พลอยที่นำมาปรับปรุงจึงมีลักษณะที่ไม่ทนทานต่อการกัดกร่อนเมื่อถูกชะด้วยสารละลายเป็นเวลานาน

(2) การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของพลอยทับทิม

การศึกษาพลอยทับทิมที่มีลักษณะทึบแสง (Opaque) จากโรงงานที่ 1 และลักษณะโปร่งแสง (Transparent) จากโรงงานที่ 2 ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยความร้อน โดยการเติมสารประกอบแก้วตะกั่ว รายละเอียดโดยสรุปคุณสมบัติทางอัญมณีก่อนและหลังจากทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.5 และ 4.6

ตารางที่ 4.5 สรุปคุณสมบัติทางอัญมณีของพลอยทับทิมเม็ดก่อนการชะละลายด้วยวิธี BCR three stage

โรงงาน	SG	RI		Bi	Fluorescence	
		N _o	N _e		LW	SW
1	3.96 - 4.00	1.770 - 1.771	1.761	0.008 - 0.009	St. (red)	inert
2	3.96 - 3.99	1.770	1.761 - 1.762	0.008 - 0.009	St. (red)	inert













ตารางที่ 4.6 สรุปคุณสมบัติทางอัญมณีของพลอยทับทิมเม็ดภายหลังจากการชะละลายด้วยวิธี BCR three stage

โรงงาน	SG	RI		Bi	Fluorescence	
		N _o	N _e		LW	SW
1	3.96 - 4.00	1.770 - 1.771	1.761	0.008 - 0.009	St. (red)	inert
2	3.96 - 3.99	1.770	1.761 - 1.762	0.008 - 0.009	St. (red)	inert













การทดสอบการกัดกร่อนของพลอยทับทิมในสภาวะที่แตกต่างกันทั้ง 3 ขั้นตอน พบว่าคุณสมบัติทางอัญมณีของพลอยทั้ง 2 โรงงาน มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากโดยรายละเอียดของตัวอย่างทั้งหมดอยู่ในภาคผนวก ง แต่พลอยทั้ง 2 โรงงานมีลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไป (ตารางที่ 4.5 และ 4.6) อย่างชัดเจนโดยเฉพาะพลอยคอร์ันดัมจากโรงงานที่ 1 คือ เมื่อเปรียบเทียบในแต่ละชั้นจะเห็นถึงลักษณะรอยแตกร้าวที่เพิ่มมากขึ้น มีร่องรอยของการผุกร่อนของพลอยเพิ่มมากขึ้นโดยจะเห็นได้ชัดเจนที่สุดในชั้นที่ 3 (Oxidizable) ของทุกเม็ดจากพลอยโรงงานที่ 1 ส่วนลักษณะทางกายภาพของโรงงานที่ 2 นั้นก็มีแนวโน้มเป็นไปในทางเดียวกันกับโรงงานที่ 1 คือมีรอยแตกร้าวเพิ่มมากขึ้นในแต่ละชั้น และเห็นได้ชัดเจนที่สุดในชั้นที่ 3 เช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบทั้ง 2 โรงงานแล้วพบว่าพลอยจากโรงงานที่ 1 มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพมากและชัดเจนกว่าโรงงานที่ 2 เนื่องจากลักษณะของพลอยดิบที่นำมาปรับปรุงคุณภาพนั้นมีคุณภาพ

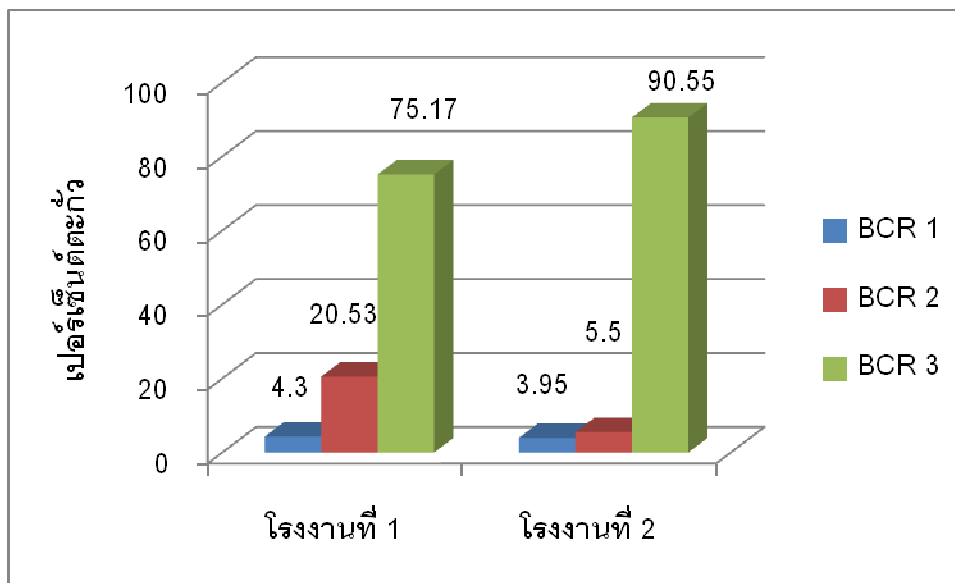
ที่แตกต่างกัน เนื้อพลอยของโรงงานที่ 1 นั้นมีคุณภาพต่ำกว่าของเนื้อพลอยของโรงงานที่ 2 ซึ่งเนื้อพลอยที่มีคุณภาพดีกว่าย่อมมีความทนทานต่อสารเคมีและปฏิกิริยาได้มากกว่า จึงทำให้เมื่อผ่านการทดสอบแล้วจึงเห็นลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปของโรงงานงานที่ 1 มากกว่าโรงงานที่ 2

ตารางที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพและความเข้มข้นตะกั่วของพลอยทับทิมภายหลังจากทดสอบด้วยวิธี BCR Three stage (โรงงานที่ 1)

ตัวอย่างก่อนทำ BCR	ลักษณะทางกายภาพและปริมาณตะกั่ว (มก./กก.)		
	BCR 1	BCR 2	BCR 3
Pb1-1_BCR  1 cm	Pb1-1_BCR1  1 cm 0.37	Pb1-1_BCR2  1 cm 1.40	Pb1-1_BCR3  1 cm 6.53
Pb1-2_BCR  1 cm	Pb1-2_BCR1  1 cm 1.76	Pb1-2_BCR2  1 cm 8.33	Pb1-2_BCR3  1 cm 26.90
Pb1-3_BCR  1 cm	Pb1-3_BCR1  1 cm 0.68	Pb1-3_BCR2  1 cm 3.76	Pb1-3_BCR3  1 cm 15.88
ค่าเฉลี่ย	0.94 ± 0.73	4.49 ± 3.52	16.44 ± 10.20

ตารางที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงทางลักษณะกายภาพและความเข้มข้นตะกั่วของพลอยทับทิม ภายหลังจากทดสอบด้วยวิธี BCR Three stage (โรงงานที่ 2)

ตัวอย่างก่อนทำ BCR	ลักษณะทางกายภาพและปริมาณตะกั่ว (มก./กก.)		
	BCR 1	BCR 2	BCR 3
Pb2-1_BCR 	Pb2-1_BCR1  0.45	Pb2-1_BCR2  0.39	Pb2-1_BCR3  5.02
Pb2-2_BCR 	Pb2-2_BCR1  0.06	Pb2-2_BCR2  0.14	Pb2-2_BCR3  5.59
Pb2-3_BCR 	Pb2-3_BCR1  0.18	Pb2-3_BCR2  0.43	Pb2-3_BCR3  5.19
ค่าเฉลี่ย	0.23 ± 0.20	0.32 ± 0.16	5.27 ± 0.29



ภาพที่ 4.3 เปอร์เซนต์ตะกั่วที่สกัดได้จากพลอยทับทิมเม็ดในแต่ละขั้นตอนของ BCR three stage เมื่อเทียบกับปริมาณตะกั่วทั้งหมดที่สกัดได้

(3) ความเข้มข้นของเบริลเลียมจากพลอยบุษราคัม

การศึกษาพบว่าความเข้มข้นเฉลี่ยของเบริลเลียมจากโรงงานที่ 1 ในแต่ละขั้นตอนของ BCR three satage มีค่าต่ำกว่าเข้มข้นต่ำสุดที่เครื่องสามารถวิเคราะห์ (Detection Limit = 0.001 มก./กก.) และความเข้มข้นเฉลี่ยของเบริลเลียมจากโรงงานที่ 2 มีค่าดังนี้ BCR 1 มีค่าต่ำกว่าปริมาณความเข้มข้นต่ำสุดที่เครื่องสามารถวิเคราะห์ได้ BCR 2 เท่ากับ 0.01 มก./กก. และ BCR 3 เท่ากับ 0.01 มก./กก. (ตารางที่ 4.11 และ 4.12) การที่ความเข้มข้นของเบริลเลียมจากโรงงานที่ 2 สูงกว่าโรงงานที่ 1 เล็กน้อยอาจมีสาเหตุมาจากขนาดและพื้นที่ผิวที่มีมากกว่า จึงทำให้มีโอกาสถูกชะล้างได้มากกว่าค่าความเข้มข้นที่ได้จึงสูงกว่า แต่ปริมาณความเข้มข้นของทั้ง 2 โรงงานนั้นยังเป็นปริมาณที่น้อยมาก เนื่องจากกลไกการเกิดสีเหลืองของเบริลเลียมนั้นเกิดจากการที่เบริลเลียมเข้าไปทำหน้าที่ยึดศูนย์กลางสี (Yellow colour center) ที่เกิดจากความบกพร่องของโครงสร้างผลึก ซึ่งการที่เบริลเลียมเข้าไปทำหน้าที่ยึดศูนย์กลางสีในโครงสร้างของพลอยทำให้เกิดความเสถียรมาก (Pisutha-Armond et al., 2002, 2003, 2004) จึงยากมากต่อการชะล้างของเบริลเลียมภายในพลอยคอรันด์

(4) การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของพลอยบุษราคัม

การศึกษาพลอยบุษราคัมที่มีลักษณะกึ่งโปร่งแสง (Semi - Transparent) จากโรงงานที่ 1 และลักษณะโปร่งแสง (Transparent) จากโรงงานที่ 2 ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบเบริลเลียม รายละเอียดโดยสรุปคุณสมบัติทางอัญมณีก่อนและหลังการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.9 และ 4.10

ตารางที่ 4.9 สรุปคุณสมบัติทางอัญมณีของพลอยบุษราคัมเม็ดก่อนการชะละลายด้วยวิธี BCR three stage













โรงงาน	SG	RI		Bi	Flourescence	
		N _o	N _e		LW	SW
1	3.98 - 4.10	1.771 - 1.772	1.761 - 1.762	0.009 - 0.010	inert	inert
2	3.95 - 4.05	1.769 - 1.771	1.760 - 1.762	0.008 - 0.010	inert	inert

ตารางที่ 4.10 สรุปคุณสมบัติทางอัญมณีของพลอยบุษราคัมเม็ดภายหลังการชะละลายด้วยวิธี BCR three stage

โรงงาน	SG	RI		Bi	Flourescence	
		N _o	N _e		LW	SW
1	3.98 - 4.10	1.771 - 1.772	1.761 - 1.762	0.009 - 0.010	inert	inert
2	3.95 - 4.05	1.769 - 1.771	1.760 - 1.762	0.008 - 0.010	inert	inert













การทดสอบการกัดกร่อนของพลอยในสภาวะที่แตกต่างกันทั้ง 3 ขั้นตอน พบว่า คุณสมบัติทางอัญมณีของพลอยบุษราคัมทั้งสองโรงงานมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากโดยรายละเอียดของตัวอย่างทั้งหมดอยู่ในภาคผนวก ง โดยลักษณะทางกายภาพของพลอยทั้ง 2 โรงงาน (ตารางที่ 4.11 และ 4.12) พบว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ทั้งในด้านของสีและรอยแตกร้าวของพลอยหรือลักษณะทางกายภาพหลังการทดสอบไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ มีลักษณะเหมือนก่อนการทดสอบทุกประการ ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ไม่พบการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของพลอยบุษราคัมที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงโดยการเติมสารประกอบเบริลเลียม เนื่องจากเบริลเลียมนั้นเข้าไปในโครงร่างผลึกของพลอย (Pisutha-Armond et al., 2002, 2003, 2004) ทำให้พลอยที่ได้มีสีที่สวยขึ้น ไม่ได้ช่วยผลสานหรืออุดรอยแตกร้าวเหมือนกับการปรับปรุงโดยการเติมแก้วตะกั่ว ทั้งนี้เพราะพลอยดิบที่นำมาปรับปรุงด้วยเบริลเลียมนั้นเป็นพลอยที่มีคุณภาพดีแต่มีสีที่ไม่เป็นที่ต้องการของตลาด จึงต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงเพื่อให้ได้สีที่ต้องการ

ตารางที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพและความเข้มข้นเบริลเลียมของพลอยบุษราคัมภายหลังการทดสอบด้วยวิธี BCR Three stage (โรงงานที่ 1)

ตัวอย่างก่อนทำ BCR	ลักษณะทางกายภาพและปริมาณเบริลเลียม (มก./กก.)		
	BCR 1	BCR 2	BCR 3
Be1-1_BCR 	Be1-1_BCR1  ND	Be1-1_BCR2  ND	Be1-1_BCR3  ND
Be1-2_BCR 	Be1-2_BCR1  ND	Be1-2_BCR2  ND	Be1-2_BCR3  ND
Be1-3_BCR 	Be1-3_BCR1  0.001	Be1-3_BCR2  ND	Be1-3_BCR3  ND
ค่าเฉลี่ย	-	-	-

หมายเหตุ : ND = not detected

ตารางที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพและความเข้มข้นเบริลเลียมของพลอยบุษราคัมภายหลังจากทดสอบด้วยวิธี BCR Three stage (โรงงานที่ 2)

ตัวอย่างก่อนทำ BCR	ลักษณะทางกายภาพและปริมาณเบริลเลียม (มก./กก.)		
	BCR 1	BCR 2	BCR 3
Be2-1_BCR 	Be2-1_BCR1  ND	Be2-1_BCR2  0.01	Be2-1_BCR3  ND
Be2-2_BCR 	Be2-2_BCR1  ND	Be2-2_BCR2  0.01	Be2-2_BCR3  0.01
Be2-3_BCR 	Be2-3_BCR1  ND	Be2-3_BCR2  0.01	Be2-3_BCR3  0.01
ค่าเฉลี่ย	-	0.001	0.001

หมายเหตุ : ND = not detected

4.3 ความเข้มข้นของตะกั่วจากการสกัดพลอยคอร์ันดัมด้วยวิธีการทดสอบปริมาณตะกั่วในตัวเรือนเครื่องประดับ Standard Operating Procedure for Determining Lead

4.3.1 ความเข้มข้นของตะกั่วจากพลอยทับทิมบิดเป็นผงและทับทิมเม็ด

การศึกษาค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของตะกั่วจากพลอยทับทิมที่บิดเป็นผง พบว่าโรงงานที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ $1,530 \pm 65.57$ และ 910 ± 30 มก./กก. ตามลำดับ และความเข้มข้นเฉลี่ยของตะกั่วจากพลอยทับทิมเม็ด พบว่า โรงงานที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 156.33 ± 11.37 และ 70.67 ± 7.37 มก./กก. ตามลำดับ (ตารางที่ 4.13) ซึ่งพลอยทับทิมที่บิดเป็นผงมี

ความเข้มข้นตะกั่วสูงกว่าพลอยเม็ด เนื่องจากขนาดอนุภาคของพลอยที่บดเป็นผงมีขนาดเล็กกว่าพลอยเม็ด ซึ่งอนุภาคขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวในการถูกสกัดมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ทำให้สารละลายสามารถสกัดตะกั่วจากพลอยที่ผ่านการบดได้มากกว่าพลอยเม็ดจึงทำให้ความเข้มข้นตะกั่วของพลอยที่ผ่านการบดมีปริมาณสูงกว่าพลอยเม็ด และเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานปริมาณตะกั่วในตัวเรือนเครื่องประดับซึ่งกำหนดไว้ไม่เกิน 600 ppm หรือ 600 mg/kg (CPSC, 2005) แล้วพบว่ามีความสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ แต่เนื่องจากพลอยที่ใช้ตกแต่งเครื่องประดับเป็นพลอยเม็ด ซึ่งความเข้มข้นตะกั่วในพลอยเม็ดมีต่ำกว่าค่ามาตรฐานปริมาณตะกั่วที่กำหนดไว้ (ไม่เกิน 600 มก./กก.) (CPSC, 2005) จึงสรุปได้ว่าพลอยทับทิมที่ไม่ผ่านการบดไม่สามารถส่งผลเสียและอันตรายต่อผู้สวมใส่ได้

ตารางที่ 4.13 ความเข้มข้นตะกั่วที่สกัดได้จากพลอยทับทิมบดเป็นผงและทับทิมเม็ดด้วยวิธีทดสอบตะกั่วในตัวเรือนเครื่องประดับ

โรงงาน	ตัวอย่าง	ปริมาณตะกั่ว (มก./กก.)	
		ผ่านการบด	ไม่ผ่านการบด
1	Pb 1-1	1,460.00	147.00
	Pb 1-2	1,540.00	153.00
	Pb 1-3	1,590.00	169.00
ค่าเฉลี่ย		1,530 ± 65.57	156.33 ± 11.37
2	Pb 2-1	940.00	79.00
	Pb 2-2	910.00	65.00
	Pb 2-3	880.00	68.00
ค่าเฉลี่ย		910 ± 30	70.67 ± 7.37
มาตรฐานปริมาณตะกั่วในตัวเรือนเครื่องประดับ (CPSC, 2005)		600	

4.4 ความเข้มข้นของตะกั่วและเบริลเลียมจากเบ้าที่ใช้งานแล้วของกระบวนการปรับปรุงพลอยด้วยความร้อนโดยการเติมสารเคมี

4.4.1 เบ้าจากกระบวนการปรับปรุงพลอยทับทิม

(1) ค่า TTLC (Total Threshold Limit Concentration) ของตะกั่วจากเบ้าเผาพลอยทับทิม

การศึกษาความเข้มข้นของตะกั่วจากเบ้าที่ใช้ในกระบวนการปรับปรุงพลอยด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบตะกั่วพบว่า (ตารางที่ 4.14) ความเข้มข้นของตะกั่วจากเบ้าที่ยังไม่ผ่านการใช้งานมีค่าความเข้มข้นเฉลี่ย เท่ากับ 8.87 ± 2.15 มก./กก. ความเข้มข้นของตะกั่วเฉลี่ยจากเบ้าที่ผ่านการใช้งานของโรงงานที่ 1 และ 2 เท่ากับ $42,278.67 \pm 7,058$ และ $1,990.33 \pm 598$ มก./กก. ตามลำดับ ซึ่งเบ้าที่ผ่านการใช้งานแล้วมีความเข้มข้นของตะกั่วสูงกว่าเบ้าที่ไม่ผ่านการใช้งานมาก แสดงว่าหลังจากการใช้นั้นมีตะกั่วติดอยู่ภายในเบ้าเป็นจำนวนมาก เนื่องจากตะกั่วเป็นโลหะหนัก ฝุ่นกระจายภายในอากาศได้ยาก (กรมทรัพยากรธรณี ธรณี, 2543) และสัดส่วนของตะกั่วที่ใช้ในกระบวนการปรับปรุงเป็นสัดส่วนที่มากเนื่องจากตะกั่วมีราคาที่ไม่สูงมาก จึงทำให้ภายหลังการปรับปรุงแล้วเหลือตะกั่วติดอยู่ภายในเบ้าปริมาณมาก และเมื่อเทียบกับค่า Total Threshold Limit Concentration (TTLC) ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานองค์ประกอบสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่เป็นของเสียอันตรายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว พ.ศ. 2548 ซึ่งกำหนดไว้ที่ความเข้มข้นไม่เกิน 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดังนั้นเบ้าที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารประกอบตะกั่วจึงจัดเป็นของเสียอันตราย

ตารางที่ 4.14 ค่า TTLC ของตะกั่วจากการสกัดเบ้าเผาพลอยทับทิม

โรงงาน	ตัวอย่าง	ปริมาณตะกั่ว (มก./กก.)	ค่าเฉลี่ย (มก./กก.)
ยังไม่ผ่านการใช้ งาน	Blank 1	6.70	8.87 ± 2.15
	Blank 2	8.90	
	Blank 3	11.00	
1	Pb 1-1	49,915.00	42,278.67 ± 7,058
	Pb 1-2	35,992.00	
	Pb 1-3	40,929.00	
2	Pb 2-1	2,676.00	1,990.33 ± 598
	Pb 2-2	1,725.00	
	Pb 2-3	1,570.00	
มาตรฐานปริมาณตะกั่วหรือสารประกอบตะกั่วไม่เกิน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548)			1,000

(2) ค่า STLC (Soluble Threshold Limit Concentration) ของตะกั่วจากน้ำสกัดเบ้าเผาพลอยทับทิม

การศึกษาความเข้มข้นของตะกั่วจากเบ้าที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงพลอยด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบตะกั่วพบว่า (ตารางที่ 4.15) ความเข้มข้นของตะกั่วจากเบ้าที่ยังไม่ผ่านการใช้งานมีค่าความเข้มข้นเฉลี่ย เท่ากับ 0.76 ± 0.03 มก./ล. ความเข้มข้นเฉลี่ยของตะกั่วจากเบ้าที่ผ่านการใช้งานของโรงงานที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ $3,595.67 \pm 70.36$ และ 277.33 ± 10.07 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งเบ้าที่ผ่านการใช้งานแล้วมีความเข้มข้นสูงกว่าเบ้าที่ไม่ผ่านการใช้งานมาก แสดงว่าหลังจากการใช้งานแล้วนั้นจะมีตะกั่วติดอยู่ภายในเบ้าเป็นจำนวนมาก เนื่องจากตะกั่วเป็นโลหะหนัก ฟุ้งกระจายภายในอากาศได้ยาก (กรมทรัพยากรธรณี, 2543) และสัดส่วนของตะกั่วที่ใช้ในกระบวนการปรับปรุงเป็นสัดส่วนที่มากเนื่องจากตะกั่วมีราคาที่ไม่สูงมาก จึงทำให้ภายหลังจากการปรับปรุงแล้วเหลือตะกั่วติดอยู่ภายในเบ้าปริมาณมาก และเมื่อเทียบกับค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานองค์ประกอบสิ่งปนเปื้อนหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่เป็นของเสียอันตรายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปนเปื้อนหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว พ.ศ. 2548 พบว่าปริมาณความเข้มข้นที่ได้จากเบ้ามีค่าเกินมาตรฐาน

ซึ่งกำหนดไว้ที่ความเข้มข้นไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นเบ้าเผาพลอยทับทิมที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนและสารประกอบตะกั่วจึงจัดเป็นของเสียอันตราย

ตารางที่ 4.15 ค่า STLC ของตะกั่วจากน้ำสกัดเบ้าเผาพลอยทับทิม

โรงงาน	ตัวอย่าง	ปริมาณตะกั่ว (มก./ล.)	ค่าเฉลี่ย (มก./ล.)
ยังไม่ผ่านการใช้งาน	Blank 1	0.73	0.76 ± 0.03
	Blank 2	0.76	
	Blank 3	0.79	
1	Pb 1-1	3,566.00	3,595.67 ± 70.36
	Pb 1-2	3,676.00	
	Pb 1-3	3,545.00	
2	Pb 2-1	268.00	277.33 ± 10.07
	Pb 2-2	288.00	
	Pb 2-3	276.00	
มาตรฐานปริมาณตะกั่วหรือสารประกอบตะกั่วไม่เกิน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548)			5.00

4.4.2 เบ้าจากกระบวนการปรับปรุงพลอยบุษราคัม

(1) ค่า TTLC (Total Threshold Limit Concentration) ของเบริลเลียมจากเบ้าเผาพลอยบุษราคัม

การศึกษาความเข้มข้นของเบริลเลียมจากเบ้าที่ใช้ในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพพลอยด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบเบริลเลียมพบว่า (ตารางที่ 4.16) ความเข้มข้นของเบริลเลียมจากเบ้าที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน มีค่าความเข้มข้นเฉลี่ย เท่ากับ 0.54 ± 0.01 มก./กก. ความเข้มข้นเฉลี่ยของเบริลเลียมจากเบ้าที่ผ่านการใช้งานของโรงงานที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 19.67 ± 0.58 และ 35.33 ± 0.58 มก./กก. ตามลำดับ ซึ่งเบ้าที่ผ่านการใช้งานแล้วมีความเข้มข้นสูงกว่าเบ้าที่ไม่ผ่านการใช้งานเพียงเล็กน้อย แสดงว่าหลังจากการใช้นั้น มีความเข้มข้นของเบริลเลียมภายในเบ้า มีปริมาณต่ำมากเนื่องจากเบริลเลียมเป็นธาตุที่มีน้ำหนักเบา สามารถลอยและฟุ้งกระจายไปในอากาศได้ง่าย (Taylor et al., 2003) และการปรับปรุงพลอยด้วยเบริลเลียมนั้นจะใช้สัดส่วนของเบริลเลียมไม่มากนักเนื่องจากราคาที่สูงของเบริลเลียมเมื่อเทียบกับค่า Total Threshold Limit Concentration (TTLC) ซึ่งเป็นค่ามาตรฐาน

องค์ประกอบสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เป็นของเสียอันตรายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 พบว่าความเข้มข้นเบริลเลียมที่ได้จากเบ้ามีค่าไม่เกินมาตรฐาน ซึ่งกำหนดไว้ที่ความเข้มข้นไม่เกิน 75 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดังนั้นเบ้าที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารประกอบเบริลเลียมจึงไม่จัดเป็นของเสียอันตราย

ตารางที่ 4.16 ค่า TTLC ของเบริลเลียมจากการสกัดเบ้าเผาพลอยบุษราคัม

โรงงาน	ตัวอย่าง	ปริมาณเบริลเลียม (มก./กก.)	ค่าเฉลี่ย (มก./กก.)
ยังไม่ผ่านการใช้งาน	Blank 1	0.54	0.54 ± 0.01
	Blank 2	0.55	
	Blank 3	0.54	
1	Be 1-1	19.00	19.67 ± 0.58
	Be 1-2	20.00	
	Be 1-3	20.00	
2	Be 2-1	35.00	35.33 ± 0.58
	Be 2-2	35.00	
	Be 2-3	36.00	
มาตรฐานปริมาณเบริลเลียมหรือสารประกอบเบริลเลียมไม่เกิน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548)			75.00

(2) ค่า STLC (Soluble Threshold Limit Concentration, STLC) ของเบริลเลียมจากน้ำสกัดเบ้าเผาพลอยบุษราคัม

การศึกษาความเข้มข้นของเบริลเลียมจากเบ้าที่ใช้ในกระบวนการปรับปรุงพลอยด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบเบริลเลียมพบว่า (ตารางที่ 4.17) ความเข้มข้นของเบริลเลียมจากเบ้าที่ยังไม่ผ่านการใช้งานมีค่าความเข้มข้นเฉลี่ย เท่ากับ 0.45 ± 0.02 มก./ล. ความเข้มข้นเฉลี่ยของเบริลเลียมจากเบ้าที่ผ่านการใช้งานของโรงงานที่ 1 มีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นต่ำสุดที่เครื่องสามารถวิเคราะห์ได้ (Detection Limit = $0.001 \mu\text{g}/\text{kg}$) และความเข้มข้นเฉลี่ยของเบริลเลียมจากเบ้าที่ผ่านการใช้งานของโรงงานที่ 2 มีค่าเท่ากับ 0.21 ± 0.01 มก./ล. ซึ่งเบ้าที่ผ่านการใช้งานแล้วมีความเข้มข้นต่ำกว่าเบ้าที่ไม่ผ่านการใช้งาน อาจมีสาเหตุมาจากเบ้าที่ไม่ผ่านการใช้งานนั้นเป็นเบ้าที่ผลิตขึ้นในช่วงเวลาที่แตกต่างกับเบ้าที่ผ่านการใช้งานแล้ว และ

ผลิตโรงงานที่แตกต่างกันซึ่งแต่ละโรงงานจะมีการใช้สัดส่วนในการผลิตที่แตกต่างกัน จึงทำให้พบว่าความเข้มข้นเบริลเลียมในเบ้าที่ยังไม่ผ่านการใช้งานที่สูงกว่าเบ้าที่ผ่านการใช้งาน และเบ้าที่ผ่านการใช้งานนั้นพบว่ามีความเข้มข้นเบริลเลียมติดอยู่ภายในเบ้าเป็นจำนวนเล็กน้อย เนื่องจากเบริลเลียมเป็นธาตุที่มีน้ำหนักเบา สามารถลอยและฟุ้งกระจายไปในอากาศได้ง่าย (Taylor et al., 2003) และเมื่อเทียบกับค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานองค์ประกอบสิ่งปนเปื้อนหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่เป็นของเสียอันตรายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำหนดสิ่งปนเปื้อนหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว พ.ศ. 2548 พบว่ามีปริมาณความเข้มข้นเบริลเลียมที่ได้จากเบ้ามีค่าไม่เกินมาตรฐาน ซึ่งกำหนดไว้ที่ความเข้มข้นไม่เกิน 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นเบ้าที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารประกอบเบริลเลียมจึงไม่จัดเป็นของเสียอันตราย

ตารางที่ 4.17 ค่า STLC ของเบริลเลียมจากการสกัดเบ้าเผาพลอยบุษราคัม

โรงงาน	ตัวอย่าง	ปริมาณเบริลเลียม (มก./ล.)	ค่าเฉลี่ย (มก./ล.)
ยังไม่ผ่านการใช้งาน	Blank 1	0.45	0.45 ± 0.02
	Blank 2	0.47	
	Blank 3	0.44	
1	Be 1-1	ND	-
	Be 1-2	ND	
	Be 1-3	ND	
2	Be 2-1	0.21	0.21 ± 0.01
	Be 2-2	0.22	
	Be 2-3	0.20	
มาตรฐานปริมาณเบริลเลียมหรือสารประกอบเบริลเลียมไม่เกิน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548)			0.75

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ผลของทับทิมที่ผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบตะกั่ว

(1) ผลของทับทิมที่ผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบตะกั่วที่บดเป็นผง

จากการศึกษาผลของทับทิมที่ผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบตะกั่วที่ผ่านการบดพบว่า ความเข้มข้นของตะกั่วที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธี Total digestion ซึ่งเป็นวิธีทดสอบเพื่อหาปริมาณสารทั้งหมดภายในผลของ มีความเข้มข้นสูงสุด คือ โรงงานที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ $2,963.33 \pm 83.27$ และ $1,610 \pm 25.00$ มก./กก. ตามลำดับ รองลงมาคือ การทดสอบปริมาณตะกั่วในตัวเรือนเครื่องประดับ คือ โรงงานที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ $1,530 \pm 65.57$ และ 910 ± 30 มก./กก. ตามลำดับ แต่ค่าความเข้มข้นที่ได้ก็ยังคงต่ำกว่ามาตรฐาน และวิธีที่ได้ความเข้มข้นของตะกั่วต่ำที่สุด คือ วิธี BCR three stages มีค่าดังนี้ โรงงานที่ 1 และ 2 ในแต่ละชั้น คือ BCR 1 เท่ากับ 31.84 ± 1.97 และ 21.76 ± 1.37 มก./กก. BCR 2 เท่ากับ 21.05 ± 2.91 และ 1.36 ± 0.11 มก./กก. และ BCR 3 เท่ากับ 3.27 ± 0.17 และ 0.14 ± 0.02 มก./กก. ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสารเคมีและสถานะของแต่ละวิธีนั้น พบว่าวิธี BCR three stages เป็นวิธีที่สามารถพบได้ในชีวิตประจำวันมากที่สุด เนื่องจากวิธีนี้เป็นการจำลองสถานะต่างๆ 3 สถานะ คือ 1) exchangeable 2) reducible และ 3) oxidisable ซึ่งเป็นสถานะที่พบได้ในทุกๆ วัน และเมื่อพิจารณาความเข้มข้นที่ได้โดยวิธี BCR three stages จากทั้งสองโรงงานในแต่ละชั้น พบว่าความเข้มข้นเฉลี่ยของตะกั่วเป็นความเข้มข้นที่ต่ำมาก

(2) ผลของทับทิมเม็ดที่ผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบตะกั่ว

จากการศึกษาผลของทับทิมที่ผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบตะกั่วในผลของที่ไม่ผ่านการบดพบว่า ความเข้มข้นเฉลี่ยตะกั่วจากวิธีการทดสอบปริมาณตะกั่วในตัวเรือนเครื่องประดับมีความเข้มข้นสูงกว่าการทดสอบด้วยวิธี BCR Three stages ดังนี้ ความเข้มข้นตะกั่วจากวิธีการทดสอบปริมาณตะกั่วในตัวเรือนเครื่องประดับของโรงงานที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 156.33 ± 11.37 และ 70.67 ± 7.37 มก./กก. ตามลำดับ และ ความเข้มข้นตะกั่วจากวิธี BCR Three stages ของโรงงานที่ 1 และ 2 ในแต่ละชั้นมีค่าเท่ากับ

BCR 1 เท่ากับ 0.94 ± 0.73 และ 0.23 ± 0.20 มก./กก. BCR 2 เท่ากับ 4.49 ± 3.52 และ 0.32 ± 0.16 มก./กก. และ BCR 3 เท่ากับ 16.44 ± 10.20 และ 5.27 ± 0.29 มก./กก. ตามลำดับ ซึ่งค่าความเข้มข้นที่ได้จากทั้งสองการทดสอบเป็นค่าที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานความเข้มข้นตะกั่วในตัวเรือนเครื่องประดับที่กำหนดไว้ไม่เกิน 600 มก./กก.(CPSC, 2005) จึงไม่เป็นอันตรายต่อผู้สวมใส่ และจากการทดสอบด้วยวิธี BCR Three stages ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบในสภาวะต่างๆ ที่สามารถพบได้ในชีวิตประจำวัน พบว่ามีค่าความเข้มข้นตะกั่วต่ำมาก ทำให้มั่นใจได้ว่าพลอยทับทิมที่ผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบตะกั่วที่เป็นพลอยเม็ดที่ใช้ตกแต่งตัวเรือนเครื่องประดับ มีโอกาสได้น้อยมากที่ตะกั่วภายในพลอยทับทิมจะถูกชะละลายจากกิจกรรมต่างๆ ในชีวิตประจำวัน จนทำให้เกิดเป็นอันตรายต่อผู้สวมใส่

(3) พลอยทับทิมที่ผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบตะกั่ว ทั้งที่เป็นเม็ดและบดเป็นผงด้วยวิธีการทดสอบเดียวกัน

จากการศึกษาพลอยทับทิมที่ผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบตะกั่ว ทั้งในพลอยที่ผ่านการบดและไม่ผ่านการบดจากโรงงานและวิธีการทดสอบเดียวกัน พบว่าพลอยที่ผ่านการบดมีความเข้มข้นของตะกั่วสูงกว่าพลอยที่ไม่ผ่านการบด ทั้งในสองวิธีที่ทำการทดสอบ คือ วิธีการทดสอบ BCR Three stages และวิธีการทดสอบปริมาณตะกั่วในตัวเรือน จากผลการทดลองทำให้แน่ใจว่าถึงแม้ นำพลอยเม็ดมาบดซึ่งจะเป็นการเพิ่มการชะละลายของสารเคมีในพลอยให้มากขึ้นนั้น ก็ยังพบค่าความเข้มข้นตะกั่วที่ในปริมาณที่ต่ำ จึงทำให้มั่นใจได้ว่าพลอยเม็ดที่ใช้ตกแต่งเครื่องประดับมีความปลอดภัย สามารถนำพลอยเม็ดที่ผ่านการบดมาปรับปรุงด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบตะกั่วมาใช้ได้โดยไม่เป็นอันตรายต่อผู้สวมใส่

5.1.2 พลอยบุษราคัมที่ผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบเบริลเลียม

(1) พลอยบุษราคัมที่ผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบเบริลเลียมที่บดเป็นผง

จากการศึกษาพลอยบุษราคัมที่ผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบเบริลเลียมในพลอยที่บดเป็นผงพบว่า การทดสอบด้วยวิธี Total digestion ซึ่งเป็นวิธีทดสอบเพื่อหาปริมาณสารทั้งหมดภายในพลอยจากโรงงานที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 124.03 ± 3.24 และ 80.05 ± 3.60 มก./กก. ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าการทดสอบด้วยวิธี BCR Three stages คือจากโรงงานที่ 1 และ 2 ในแต่ละขั้น มีค่าดังนี้ BCR 1 เท่ากับ 1.33 ± 0.10 และ 0.67 ± 0.06 มก./กก. BCR 2 เท่ากับ 0.56 ± 0.05 และ 0.55 ± 0.04 มก./กก. และ

BCR 3 เท่ากับ 0.58 ± 0.06 และ 0.62 ± 0.11 มก./กก. ตามลำดับ ซึ่งวิธี BCR Three stages เป็นการทดสอบที่จำลองสภาวะที่สามารถพบได้ในชีวิตประจำวัน จึงสรุปได้ว่าเป็นการยากมากที่เบรลเดียมภายในโครงสร้างของพลอยบุษราคัมนั้น จะเป็นอันตรายต่อผู้สวมใส่ได้

(2) พลอยบุษราคัมเม็ดที่ผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบเบรลเดียม

จากการศึกษาพลอยบุษราคัมเม็ดที่ผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบเบรลเดียมด้วยวิธี BCR three stages พบว่า ความเข้มข้นจากโรงงานที่ 1 และ 2 โดยเฉลี่ยในแต่ละชั้นมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นต่ำสุดที่เครื่องสามารถวิเคราะห์ได้ (0.001 มก.ก./กก.) ซึ่งความเข้มข้นที่ได้จากการทดสอบจัดว่าเป็นค่าต่ำมากหรือไม่สามารถหาค่าได้ โดยวิธีการทดสอบ BCR three stages นั้นเป็นการทดสอบที่จำลองสภาวะที่สามารถพบได้ในชีวิตประจำวันที่แตกต่างกัน และจากการที่ความเข้มข้นของเบรลเดียมที่ได้มีปริมาณความเข้มข้นที่ต่ำมาก จึงสรุปได้ว่าเบรลเดียมที่อยู่ในโครงสร้างของพลอยเม็ด ซึ่งเป็นพลอยที่ใช้ในการตกแต่งเครื่องประดับนั้น ไม่เป็นอันตรายต่อผู้สวมใส่

(3) พลอยบุษราคัมที่ผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบเบรลเดียม ทั้งที่เป็นเม็ดและบดเป็นผงบดด้วยวิธีการทดสอบเดียวกัน

จากการศึกษาพลอยบุษราคัมที่ผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบเบรลเดียม ทั้งในพลอยที่ผ่านการบดและไม่ผ่านการบดจากโรงงานด้วยวิธี BCR three stages พบว่าพลอยที่ผ่านการบดและไม่ผ่านการบดมีความเข้มข้นของเบรลเดียมต่ำมากหรือบางเม็ดมีค่าความเข้มข้นต่ำกว่าความเข้มข้นต่ำสุดที่เครื่องสามารถวิเคราะห์ได้ (0.001 มก.ก./กก.) ซึ่งจากทฤษฎีการเกิดสีของเบรลเดียมที่เข้าไปในโครงสร้างของพลอย ทำให้เกิดสีที่เสถียรและยากต่อการชะละลายโดยสารเคมี และจากผลการทดสอบดังกล่าวทำให้เห็นว่าเบรลเดียมที่เข้าไปภายในโครงสร้างของพลอยคอร์ันดัมนั้นยากต่อการหลุดออกมาทั้งในพลอยที่ผ่านการบด และในพลอยเม็ดที่ใช้ในการตกแต่งบนตัวเรือนของเครื่องประดับ จึงทำให้ผู้สวมใส่มั่นใจได้ว่าพลอยบุษราคัมที่ผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบเบรลเดียมนั้น ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของผู้สวมใส่

5.1.3 เบ้าที่ใช้ในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพพลอยด้วยความร้อนและสารเคมี

(1) เบ้าที่ใช้ในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิมด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบตะกั่ว

จากการศึกษาความเป็นของเสียอันตรายของเบ้าที่ผ่านการใช้งานในกระบวนการการปรับปรุงพลอยทับทิมโดยการเติมสารประกอบตะกั่ว พบว่าความเข้มข้นของสิ่งเจือปนทั้งหมดของเบ้าในสภาพของแข็ง (TTLC) ของตะกั่วจาก โรงงานที่ 1 และโรงงานที่ 2 มีค่าเท่ากับ $42,278.67 \pm 7,058$ และ $1,990.33 \pm 598$ มก./กก. ตามลำดับ เมื่อนำมาเทียบกับค่ามาตรฐานสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุไม่ใช่แล้ว ที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดให้ ตะกั่ว และ/หรือสารประกอบตะกั่ว (Lead and/or Lead Compounds) มีความเข้มข้นได้ไม่เกิน 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม นั้น พบว่าความเข้มข้นตะกั่วจากเบ้ามีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐาน จึงจัดว่าเบ้าที่ผ่านการใช้งานในกระบวนการการปรับปรุงพลอยทับทิมโดยการเติมสารประกอบตะกั่วจัดเป็นของเสียอันตราย และเมื่อได้ทำการศึกษาในส่วนของสิ่งเจือปนน้ำสกัด (STLC) พบว่าค่าความเข้มข้นของโรงงานที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ $3,595.67 \pm 70.36$ และ 277.33 ± 10.07 มก./ล. ตามลำดับซึ่งเป็นค่าที่ได้สูงกว่าค่ามาตรฐานกำหนด คือ ตะกั่ว และ/หรือสารประกอบตะกั่ว (Lead and/or Lead Compounds) ในน้ำสกัด มีความเข้มข้นได้ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตรเช่นกัน จึงจัดว่าเบ้าที่ผ่านการใช้งานในกระบวนการการปรับปรุงพลอยทับทิมโดยการเติมสารประกอบตะกั่วเป็นของเสียอันตราย อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยและส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมได้ ซึ่งการจัดการของเสียอันตรายที่เกิดขึ้นนั้น สามารถส่งไปยังศูนย์บริการกำจัดกากของเสีย โดยศูนย์ที่สะดวกและใกล้ต่อการขนส่งของจังหวัดจันทบุรี คือ ศูนย์บริการกำจัดกากนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จ.ระยอง โดยทางศูนย์จะให้บริการตั้งแต่ในด้าน การขนส่ง การวิเคราะห์กากของเสีย จนไปถึงการบำบัดของเสีย และกำจัดอย่างถูกวิธี

(2) เบ้าที่ใช้ในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพพลอยบุษราคัมด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบเบริลเลียม

จากการศึกษาความเป็นของเสียอันตรายของเบ้าที่ผ่านการใช้งานในกระบวนการการปรับปรุงพลอยบุษราคัมโดยการเติมสารประกอบเบริลเลียม พบว่าความเข้มข้นเฉลี่ยของเบริลเลียมจากเบ้าในสภาพของแข็ง (TTLC) ของทั้งสองโรงงานมีค่าเท่ากับ 19.67 ± 0.58 และ 35.33 ± 0.58 มก./กก. ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานคือ ค่ามาตรฐานสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุไม่ใช่แล้วที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดให้ เบริลเลียม และ/หรือสารประกอบเบริลเลียม (Beryllium and/or Beryllium Compounds) ได้ไม่เกิน 75 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และเมื่อศึกษาสิ่งเจือปนด้วยน้ำสกัด (STLC) ผลการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นเฉลี่ยของเบริลเลียมในน้ำสกัดของเบ้าที่ผ่านการใช้งานของโรงงานทั้งสองโรงงาน พบว่า โรงงานที่ 1 มีความเข้มข้นต่ำกว่าค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่เครื่อง ICP-MS สามารถวิเคราะห์ได้ และโรงงานที่ 2 ค่าเท่ากับ 0.21 ± 0.01 มก./ล. ซึ่งค่าความเข้มข้นเฉลี่ยจากทั้งสองโรงงานมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนดให้คือ เบริลเลียม และ/หรือสารประกอบเบริลเลียม (Beryllium and/or Beryllium

Compounds) มีค่าได้ไม่เกิน 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงจัดว่าเบาที่ผ่านการใช้งานในกระบวนการการปรับปรุงพลอยบุษราคัมโดยการเติมสารประกอบเบริลเลียมไม่เป็นของเสียอันตราย

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากสัดส่วนของสารประกอบต่างๆ ที่ใช้ในการปรับปรุงพลอยนั้น ยังคงเป็นความลับของแต่ละโรงงาน จึงยากที่จะบอกปริมาณสารภายในพลอยได้อย่างชัดเจน และเป็นข้อจำกัดในเรื่องการหาตัวอย่างของพลอยจากโรงงานเพื่อทำการวิจัย ทำให้การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้ตัวอย่างจากโรงงานเพียงอย่างละ 2 โรงงาน ดังนั้นในการศึกษาในครั้งต่อไปจึงควรเพิ่มจำนวนโรงงานให้มีจำนวนมากยิ่งขึ้นเพื่อจะได้สามารถหาค่าเฉลี่ยของปริมาณสารที่พบในพลอยที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่ถูกต้องยิ่งขึ้นและง่ายต่อการศึกษาวิจัยต่อไป

2. เนื่องจากในปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานการทดสอบปริมาณโลหะและความปลอดภัยของพลอยที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบต่างๆ อย่างชัดเจน ซึ่งการศึกษาวิจัยนี้เป็นเพียงการทดสอบพลอยโดยใช้การทดสอบของตัวอย่างอื่นๆ ที่มีความใกล้เคียงกัน จึงควรมีการศึกษาถึงการทดสอบปริมาณโลหะในพลอยและความปลอดภัยต่อผู้ใช้ต่อไป เพื่อจัดทำเป็นมาตรฐานในการทดสอบพลอยที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยความร้อนโดยการเติมสารประกอบต่างๆ อย่างชัดเจน

3. ความเข้มข้นของเบริลเลียมที่พบได้จากเบาที่ผ่านการใช้งานแล้วมีค่าต่ำกว่าเบาที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน เนื่องจากเบาที่ไม่ผ่านการใช้งานที่นำมาทำการศึกษานั้นเป็นเบาที่ผลิตในเวลาและแหล่งผลิตที่แตกต่างกับเบาที่ผ่านการใช้งาน เบาที่นำมาศึกษาจึงควรมีแหล่งผลิตเดียวกันและผลิตเวลาใกล้เคียงกัน และควรเพิ่มจำนวนโรงงานของเบาที่ผ่านการใช้งานเพื่อจะได้ทราบค่าความเข้มข้นที่ถูกต้องและแน่นอน

4. การศึกษาวิจัยนี้พบว่าความเข้มข้นของเบริลเลียมจากเบาที่ผ่านการใช้งานแล้วมีค่า TTLC สูงประมาณ 25-45 % ของมาตรฐาน แต่ถึงแม้ความเข้มข้นของเบริลเลียมจากน้ำสกัดยังมีค่า STLC ต่ำกว่ามาตรฐาน แต่เพื่อความปลอดภัยจึงควรมีการทดสอบการชะละลายในสภาวะต่างๆ เพื่อหาโอกาสที่จะมีการแพร่กระจายของเบริลเลียมจากเบาสู่สิ่งแวดล้อมได้

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กรมควบคุมมลพิษ. 2553. รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2551. กรุงเทพมหานคร : กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- กรมทรัพยากรธรณี. 2543. แหล่งแร่ตะกั่ว-สังกะสีของจังหวัดกาญจนบุรี : แผนที่และข้อมูลแหล่งแร่ของไทย. ฉบับที่ 2. แหล่งแร่โลหะของไทย. กรุงเทพมหานคร : กองเศรษฐกิจธรณีวิทยา
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2548. การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว. กรุงเทพมหานคร : กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2551. ตะกั่วและพิษของตะกั่ว. กรุงเทพมหานคร : กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.
- ชโย สาธุกิจชัย. 2548. การเผาผลายทับทิมกับประเด็นปัญหาการออกใบรับรอง. ในเอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง ก้าวนำโลกอัญมณีด้วยเทคนิคการเผาผลายทับทิมและแซปไฟร์, 16-19. กรุงเทพฯ : กรมทรัพยากรธรณี.
- ชาตินัย ชูสาย. 2552. แก้วในครัวเรือน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://www.dpim.go.th/articles/article?catid=120&articleid=177>. [2553 ธันวาคม 20].
- เทพีวรรณ จิตรวัชรโกมล. 2548. แก้วตะกั่วกับพลอย. ในเอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง เทคโนโลยีอัญมณีไทยก้าวไกลอย่างยั่งยืน, 111-114. กรุงเทพฯ : กรมทรัพยากรธรณี.
- ประจักษ์ อังคะหิรัญ. 2548. การพัฒนาการเผาผลายของไทย. ในเอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง ก้าวนำโลกอัญมณีด้วยเทคนิคการเผาผลายทับทิมและแซปไฟร์, 20-21. กรุงเทพมหานคร: กรมทรัพยากรธรณี.
- ปัญจวรรณ ธนสุทธิพิทักษ์. 2551. อัญมณีธรรมชาติ อัญมณีสังเคราะห์ อัญมณีเลียนแบบ อัญมณีปรับปรุงคุณภาพ. เชียงใหม่ : สาขาวิชาอัญมณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ภิญโญ พานิชพันธ์. 2543. วัตถุดิบทราย : ทำอย่างไรจึงปลอดภัย. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://www.kmitnbxmie8.com/index.php?lay=show&ac=article&id=416584&Ntype=3>. [2553 สิงหาคม 25].
- ไมตรี สุทธจิตต์. 2531. ตะกั่ว. สารพิษรอบตัวเรา, 75-89. เชียงใหม่ : คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ไมตรี สุทธจิตต์. 2531. เบอริลเลียม. สารพิษรอบตัวเรา, 95-97. เชียงใหม่ : คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

วรรณภา ต. แสงจันทร์. 2548. การทำน้ำเฝ้าพลอย. ใน เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง ก้าวนำโลกอัญมณีด้วยเทคนิคการเฝ้าพลอยทับทิมและแซปไฟร์, 95-96. กรุงเทพฯ : กรมทรัพยากรธรณี.

สำนักงานประกันสังคม. 2547. แนวทางและเกณฑ์วินิจฉัยโรคจากการทำงาน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.npc-se.co.th/pdf/book_safety/GuidelineForDianosis.pdf [2552 ธันวาคม 18].

สำนักงานสิ่งแวดล้อมไทย. 2554. การจัดการของเสียอันตรายในประเทศไทย. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://teenet.tei.or.th/DatabaseGIS/hazard_manage_thai.html[2554 กุมภาพันธ์ 25].

ภาษาอังกฤษ

Gemological Institute of America. (2009). Ruby. [online]. Available from : <http://www.Gia.edu/Research-resources/library/featured-gemstones/ruby/index.html>[2010 December 18].

Hänni, Henry A. (2001). Beobachtungen an hitzegehandeltem Rubin mit künstlicher Rissheilung (Observations on heat-treated ruby with artificially healed fissures). Vol. 50, No. 3, pp. 123–136. Zeitschrift der Deutschen Gemmologischen Gesellschaft.

Hughes, R.W. 1984. Surface repaired rubies-a new gem treatment. Jewellery News Asia. P1.

Hughes, R.W. 1997. Ruby & sapphire. Colorado : RWH publishing, 511p.

International Agency for Research on Cancer, IARC. 1993. Beryllium and beryllium compounds. International Agency for Research on Cancer (IARC) monograph; Beryllium, Cadmium, Mercury, and Exposures in the Glass Manufacturing. IARC monograph, ISBN 928321258458, 58, 444pp.

Leonard, S. 1975. Rapid Analysis of Silicate, Carbonate, and Phosphate Rock-Revised Edition. U.S. Geol. survey BULL. 1401, p76.

Pisutha-Arnond, V., Häger, T., Wathanakul, P., and Atichat, W., 2002. A brief summary on a cause of colour in pink-orange, orange and yellow sapphires produced by the “new” heating technique. Journal of Gem and Jewelry : Gem and Jewelry Institute of Thailand (GIT), Vol.3, No.18, p.11-12.

- Pisutha-Arnond, V., et al. 2003. Beryllium-treated Vietnamese and MongHsu rubies, In : Hofmeister, W., Quang, V.X., Doa, N.Q., and Nghi, T.,(eds) in Proceedings of the 2 nd International Workshop on Geo and material-science on Gem-Minerals of Vietnam, 1-8 October 2003, Hanoi, p.171-5.
- Pisutha-Arnond, V., Häger, T., Wathanakul, P., and Atichat, W., 2004. Yellow and brown colouration in beryllium treated sapphires. Journal of Gemology, Vol.29, No.2, p.77-103.
- Quevauviller. 2002. Sequential Extraction Procedures for Sediment Analysis. Methodologies in Soil and Sediment Fractionation Studies single and Sequential Extraction Procedures. UK : The Royal Society of Chemistry.
- Roedder, E.1962. Ancient fluids in crystals. Vol. 207. Scientific American , 38–47p.
- Taylor, T.P., et al. 2003. Beryllium in the environment : A review. Environmental Science and Health Part A-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering, 38(2) : 439-469.
- Themelis, T. 2005. Glass-Filled rubies-clarity-enhanced rubies with glass-forming additives. The Australian Gemologist. 20(8) : 360-365
- U.S.CONSUMER PRODUCT SAFETY COMMISSION. 2005. Standard operating Procedure for Determining Lead (Pb) and Its Availability in Children's Metal Jewelry. [online]. Available from : <http://www.cpsc.gov/businfo/pbjeweltest.pdf> [2009 December 20].
- US.EPA. 1996. METHOD 3050B ACID DIGESTIION OF SEDIMENTS, SLUDGES AND SOILS. [online]. Available from : <http://www.epa.gov/waste/hazard/testmethod/sw846/pdf>. [2009 February 25].
- Vincent Pardieu. 2005. Lead Glass Filled/Repaired Rubies. [online]. Available from: http://www.filedegemology.org/Ruby_lead_glass_treatment.pdf[2009 April 19].
- Wathanakul, P., et al. 2006. Nanoinclusions and coloration in corundum (in Thai). Thailand Research Expo., National Research Council of Thailand.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
การปรับปรุงคุณภาพพลอยด้วยความร้อนโดยการเติมสารเคมี

วิธีการเผาโดยการเติมสารประกอบแก้วตะกั่ว

เติมสารประกอบแก้วตะกั่ว เช่น Lead (II) oxide, Aluminum Oxide, Sodium tetraborate deca-hydrate และน้ำกลั่น ซึ่งสัดส่วนในการใส่ยังคงเป็นความลับของแต่ละโรงงาน ผสมส่วนประกอบต่างๆ ลงในภาชนะ เติมน้ำกลั่นเล็กน้อยเพื่อให้ส่วนผสมเข้ากันนำพอลอยคอรันต์ผสมลงในสารประกอบที่เตรียมไว้ให้ทั่วและเทลงในเบ้าอะลูมินานำเข้าเตาเผาไฟฟ้า (Electric furnace) โดยอุณหภูมิของเตาจะสูงขึ้น 200 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง จนความร้อนสูง 900 -1,000 องศาเซลเซียส ใช้เวลาทั้งสิ้นประมาณ 10 ชั่วโมงในการปรับปรุงภายใต้บรรยากาศของก๊าซออกซิเจน (Vincent, 2005) บางกรณีต้องเผาหลายครั้งจึงจะได้ผลดี

วิธีการเผาโดยการเติมสารประกอบเบริลเลียม

เริ่มจากนำผงแร่คริโอเบริล (BeAl_2O_4) หรือผงสารเคมีที่มีเบริลเลียมเป็นส่วนประกอบผสมกับสารละลายฟลักซ์ เช่น แคลเซียมโบเรต ผสมกับผงอะลูมิเนียมออกไซด์และเซอร์โคเนียมออกไซด์ เพื่อให้เกิดความเหนียวเมื่อเผาถึงอุณหภูมิสูง นำส่วนผสมทั้งหมดมาละลายในน้ำหรือแอลกอฮอล์ที่มีตัวเชื่อมประสาน เช่น เมโทเซล (Methocel) กรณีใช้น้ำและชะล้าง กรณีใช้แอลกอฮอล์พอลอยที่จะเผาจุ่มลงในส่วนผสมที่เตรียมไว้แล้วปล่อยให้แห้งหรือใช้แปรงจุ่มส่วนผสมทาลงบนผิวทุกด้าน ใช้เตาไฟฟ้าเผาในสภาวะออกซิไดซิ่งโดยการเติมแก๊สออกซิเจนจนอุณหภูมิสูงถึง 1,780 องศาเซลเซียส หรือ 1,800 องศาเซลเซียส เป็นเวลาดั้งแต่ 25 ถึง 100 ชั่วโมง บางกรณีต้องเผาหลายครั้งจึงจะได้ผลดี (อ้างถึงในปัญจวรรณ ธนสุทธิทัตย์, 2551)

ภาคผนวก ข
มาตรฐานปริมาณตะกั่วในเครื่องประดับ



U.S. CONSUMER PRODUCT SAFETY COMMISSION

WASHINGTON, DC 20207

Interim Enforcement Policy Lead Levels*

2/14/2005

Accessible lead

Accessible lead from a lead-containing consumer product could be associated with increased lead exposure, as determined by increased levels of lead in blood. If a jewelry item contains a high enough amount of accessible lead, then even an acute exposure could result in the blood lead level being chronically elevated. This is because lead has a long half-life in the blood, especially in younger children. This situation would be as deleterious as would chronic exposure to small amounts of lead. The CPSC staff's acid extraction test is used to assess products for accessible lead. Acid extractable lead represents the estimated lead intake from ingestion of an item.

CPSC staff recommends that children not ingest more than 175 μg of accessible lead. This value is based on review of the scientific literature and calculation of the effect of ingested lead on the blood lead level, taking into account a child's physiology (e.g., body weight, blood volume), the bioavailability of lead, body compartmentalization of the lead, and normal elimination of an ingested item from the gastrointestinal tract. Based on factors relating to the elimination of lead from the blood over time, 93% of the initial blood lead concentration remains after one month. Therefore, an initial blood lead level of 10.8 $\mu\text{g}/\text{dL}$ would result in chronic elevation of the blood lead level above 10 $\mu\text{g}/\text{dL}$. This level represents an increase of 8.6 $\mu\text{g}/\text{dL}$ above the geometric mean blood lead level in U.S. children.

Assumptions:

- Chronic elevation of at least one month of blood lead levels above the 10 µg/dL level of concern is considered deleterious.
- NHANES 1999-2000 estimated that the geometric mean blood lead level in children ages 1-5 is 2.2 µg/dL, and 2.2% of this population have blood lead levels that exceed 10 µg/dL.
- Initially, the bioavailable lead enters the blood compartment of the body.
- Elimination of lead from the blood compartment is based on first order kinetics.
- The blood lead half- life is approximately 10 months for short-term lead exposures in young children.
- A 14.5 kg child (average for ages 2-5 years) has a total blood volume of about 1.0 L (based on blood volume of 0.072 L/kg body weight).
- Fifty percent of the acid extractable lead is bioavailable (based on bioavailability of lead in food or water).

Total lead content

CPSC staff evaluated the data on total lead content and acid extractable lead obtained from analysis of children's metal jewelry. The staff determined that jewelry items that contained greater than 0.06 percent lead (600 parts per million) were associated with an increased likelihood of a result greater than 175 µg lead in the acid extraction test, while items containing 0.06 percent lead or less were not associated with acid extraction results greater than 175 µg.

SAMPLE PREPARATION METHODS

1. If the item is coated with paint or a similar surface coating, the coating should be removed and analyzed separately from the base metal for lead content, as described in the CPSC Standard Operating Procedure for Determining Lead (Pb) in Paint. Care should be taken to remove as little of the substrate metal as possible.
 2. Weigh out a 30-100mg aliquot of a component part in a labeled 50ml digestion vessel. Component parts of children's products including metal jewelry items generally weigh
- 1 Determination of Total Lead in Metallic Consumer Products 2 Microwave

Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, Soils, and Oils several grams or more, and an aliquot (with no paint or similar surface coating, but including any electroplated coating which is considered to be part of the substrate) will have to be obtained. Samples should be cut or ground into many small pieces to increase the dissolution rate. If a grinding apparatus (such as a rotary grinding tool with disposable grinding bits) is used, then any contaminated parts must be thoroughly cleaned or disposed of between uses to prevent cross-contamination. Record the actual weight of the aliquot of the ground up component part to the nearest 0.1mg.

3. In a chemical fume hood, add 8ml of concentrated nitric acid to each beaker and evaporate to approximately 3ml on a hot block digester at $105\pm 3^{\circ}\text{C}$.

4. After cooling to below 50°C , add 2ml of concentrated hydrochloric acid and stir.

5. Dilute with distilled water, washing the side of the beaker, to 20ml.

6. Warm up the solution to at least 60°C without boiling and gently agitate on an orbital shaker or with a stirrer or shaker bath for a minimum of 4 hours.

7. Transfer quantitatively into a 50ml volumetric flask or disposable volumetric digestion cups and dilute to 50ml with distilled water.

8. Dilute samples so that Pb results are within the calibration range of the instrument.

Generally a 1:50 dilution is sufficient.

References

ATSDR (1999) Toxicological Profile for Lead (Update). Prepared by Research Triangle Institute for Agency for Toxic Substances and Disease Registry. U.S. Department of Health and Human Services. July.

Centers for Disease Control and Prevention. 2003. Surveillance Summaries, September 12, 2003. MMWR 2003:52 (No. SS-10).

Centers for Disease Control and Prevention. 2003.

<http://www.cdc.gov/nceh/lead/research/kidsbll.htm>.

Derelanko MJ. 2000. Toxicologist's Pocket Handbook. Boca Raton: CRC Press.

Manton WI, Angle CR, Stanek KL, Reese YR, Kuehnemann TJ. 2000. Acquisition and retention of lead by young children. Environ Res 82(1): 60-80.

Snyder RG, Schneider LW, Owings CL, Reynolds HM, Golomb DH, and Schork MA. 1977.

Anthropometry of Infants, Children, and Youths to Age 18 for Product Safety Design. Prepared for Consumer Product Safety Commission. Highway Safety Research Institute, University of Michigan. Report UM-HSRI-77-7. 31 May.

ภาคผนวก ค

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว

ราชกิจจานุเบกษา
เล่มที่ ๑๒๓ ตอนพิเศษ ๑๑ ง ลงวันที่ ๒๔ มกราคม ๒๕๔๙
ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม
เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว พ.ศ. ๒๕๔๘
สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่มีองค์ประกอบของสิ่งเจือปน ที่กำหนดไว้ดังนี้

ภาคผนวกที่ 2

ลักษณะและคุณสมบัติของสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่เป็นของเสียอันตราย

ข้อ 1 สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วประเภทสารไวไฟ (Ignitable substances) ที่มีลักษณะและคุณสมบัติ ดังนี้

1.1 เป็นของเหลวที่มีจุดวาบไฟ (Flash point) ต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียส แต่ไม่รวมถึงสารละลายที่มีแอลกอฮอล์ผสมอยู่น้อยกว่า 24 % โดยปริมาตร วิธีทดสอบหรือวิธีวิเคราะห์ ทำโดยการวัดด้วยเครื่องมือ Pensky-Martens Closed Cup Tester ตามวิธีทดสอบของมาตรฐาน ASTM Standard D-93-79 หรือ D-93-80 หรือ การวัดด้วยเครื่องมือ Setaflash Closed Cup Tester ตามวิธีทดสอบของมาตรฐาน ASTM Standard D-3278-78

1.2 เป็นสารที่ไม่ใช่ของเหลวแต่สามารถลุกเป็นไฟได้ เมื่อมีการเสียดสี หรือเมื่อมีการดูดความชื้น หรือเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขึ้นเองภายในสารนั้น และเมื่อเกิดลุกเป็นไฟจะเกิดขึ้นอย่างรุนแรงและอย่างต่อเนื่องที่ก่อให้เกิดอันตรายร้ายแรงได้ ภายใต้อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (ความดัน 1 บรรยากาศ และอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส)

1.3 เป็นก๊าซอัดที่จุดระเบิดได้ (Ignitable compressed gas) ซึ่งก๊าซอัดนี้ให้หมายถึงวัสดุหรือของผสมใด ๆ ที่บรรจุอยู่ในถังบรรจุที่มีความดันสมบูรณ์ (Absolute pressure) มากกว่า 2.81 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส หรือมีความดันสมบูรณ์ มากกว่า 7.31 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส วิธีทดสอบหรือวิธีวิเคราะห์ทำโดยการวัดตามวิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM D-323

1.4 เป็นสารออกซิไดเซอร์ (Oxidizer) ซึ่งสามารถไปกระตุ้นให้เกิดการเผาไหม้ของสารอินทรีย์ขึ้นได้ ได้แก่ สารประกอบจำพวก chlorate permanganate inorganic peroxide และ nitrate

ข้อ 2 สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วประเภทสารกัดกร่อน (Corrosive substances) ที่มีลักษณะและคุณสมบัติดังนี้

2.1 เป็นสารละลาย (Aqueous solution) ที่มีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) เท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า และค่าความเป็นกรดต่าง (pH) เท่ากับ 12.5 หรือสูงกว่า วิธีทดสอบหรือวิธีวิเคราะห์ ทำโดยการวัดด้วย pH-meter ตามวิธีทดสอบของ USEPA Method 9040

2.2 เป็นของเหลวที่กัดกร่อนเหล็กกล้าชั้น SAE 1020 ได้ในอัตราสูงกว่า 6.35 มิลลิเมตรต่อปี ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส วิธีทดสอบหรือวิธีวิเคราะห์ทำโดยการใช้วิธีทดสอบของ NACE (National Association of Corrosion Engineers) Standard TM-01-69

ข้อ 3 สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วประเภทสารที่เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย (Reactive substances) ที่มีลักษณะและคุณสมบัติ ดังนี้

3.1 เป็นสารที่มีสภาพไม่คงตัว สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วและอย่างรุนแรงโดยไม่มีภาวะระเบิดเกิดขึ้น

3.2 เป็นสารซึ่งทำปฏิกิริยาอย่างรุนแรงกับน้ำ

3.3 เป็นสารซึ่งเมื่อรวมกับน้ำจะได้ของผสมที่จะระเบิดได้

3.4 เป็นสารซึ่งเมื่อผสมกับน้ำ จะทำให้เกิดมีก๊าซพิษ ไอพิษ หรือควันพิษขึ้น ในปริมาณที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพบุคคลและสิ่งแวดล้อมได้

3.5 เป็นสารที่มีองค์ประกอบของไฮยาไนต์หรือซิลไฟด์ เมื่อต้องอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ระหว่าง 2 ถึง 11.5 แล้ว สามารถก่อให้เกิดก๊าซพิษ ไอพิษ หรือควันพิษขึ้นในปริมาณที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพบุคคลและสิ่งแวดล้อมได้

3.6 เป็นสารซึ่งเมื่อถูกทำให้ร้อนในที่จำกัดจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาระเบิดรุนแรงได้

3.7 เป็นสารซึ่งสามารถระเบิดได้ทันที หรือเกิดปฏิกิริยาระเบิดได้ ในสภาวะอุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (ความดัน 1 บรรยากาศและอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส) จะมีปฏิกิริยารุนแรง

ข้อ 4 สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วประเภทสารพิษ (Toxic substances) ที่มีลักษณะและคุณสมบัติ ดังนี้

4.1 เป็นสารที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพหรือสิ่งแวดล้อม เพราะมีคุณสมบัติของความเป็นสารก่อมะเร็ง สารพิษแบบเฉียบพลัน สารพิษแบบเรื้อรัง สารที่มีคุณสมบัติสะสมในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต หรือตกค้างยาวนานในสิ่งแวดล้อม เช่น สารเคมีที่ก่อให้เกิดมะเร็งตามบัญชีรายชื่อในกลุ่มที่ 1 กลุ่มที่ 2A และกลุ่มที่ 2B ของ International Agency for Research on Cancer เป็นต้น

4.2 เป็นสารที่มีค่าความเป็นพิษ ดังต่อไปนี้

เป็นสารที่มีค่า Acute oral LD50 น้อยกว่า 2,500 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัวหนึ่ง กิโลกรัมเมื่อใช้หนู (Rat) เป็นสัตว์ทดลอง หรือมีค่า Acute inhalation LC50 น้อยกว่า 10,000 ส่วนในล้านส่วนในสภาพของไอหรือก๊าซ หรือเมื่อใช้กระต่ายเป็นสัตว์ทดลอง มีค่า acute dermal LD50 น้อยกว่า 4,300 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัวหนึ่งกิโลกรัม ทั้งนี้ ค่า LD50 หมายถึง ค่า(ปริมาณ) เฉลี่ยของสารพิษ (Mediumlethal dosage) ที่ทำให้สัตว์ที่ใช้ในการทดลองเสียชีวิตไปครึ่งหนึ่ง (50%) ค่า LD50 มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมของสารพิษต่อน้ำหนักตัวสัตว์ทดลองหนึ่งกิโลกรัม และค่า LC50 หมายถึง ค่า(ความเข้มข้น)เฉลี่ยของสารพิษ (Medium lethal concentration) ในตัวกลางที่ทำให้สัตว์ที่ใช้ในการทดลองเสียชีวิตไปครึ่งหนึ่ง(50%) ค่า LC50 มีหน่วยเป็นส่วน (โดยปริมาตรหรือน้ำหนัก) ของสารพิษต่อล้านส่วน(โดยปริมาตรหรือน้ำหนัก) ของตัวกลาง

4.3 เป็นสารที่มีค่า Acute aquatic 96-hour LC50 น้อยกว่า 500 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อวัดในน้ำอ่อน (ความกระด้างทั้งหมด เท่ากับ 40-48 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต) กับปลา fathead minnows (*Pimephales promelas*) ปลา rainbow trout (*Salmo gairdneri*) หรือปลา golden shiners (*Notemigonus crysoleucas*) ตามที่กำหนดใน Part 800 ของ the "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (16th Edition)," American Public Health Association, 1985

4.4 เป็นสารที่มีองค์ประกอบของสารที่ระบุข้างล่างนี้ ในปริมาณความเข้มข้นของสารใดสารหนึ่งหรือปริมาณรวมของสารทั้งหมด มากกว่าหรือเท่ากับ 0.001% โดยน้ำหนัก

4.4.1 2-Acetylamino fluorene (2-AAF)

4.4.2 Acrylonitrile

4.4.3 4-Aminodiphenyl

4.4.4 Benzidine and its salts

4.4.5 bis (Chloromethyl) ether (BCME)

4.4.6 Methyl chloromethyl ether

4.4.7 1,2-Dibromo-3-chloropropane (DBCP)

4.4.8 3,3'-Dichlorobenzidine and its salts (DCB)

4.4.9 4-Dimethylaminoazobenzene (DAB)

4.4.10 Ethyleneimine (EL)

4.4.11 alpha-Naphthylamine (1-NA)

4.4.12 beta-Naphthylamine (2-NA)

4.4.13 4-Nitrobiphenyl (4-NBP)

4.4.14 N-Nitrosodimethylamine (DMN)

4.4.15 beta-Propiolactone (BPL)

4.4.16 Vinyl chloride (VCM)

ข้อ 5 สิ่งปนื้อกฏหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีองค์ประกอบของสิ่งเจือปน ที่กำหนดไว้ดังนี้

5.1 เมื่อนำมาหาค่าความเข้มข้นทั้งหมดของสิ่งเจือปน พบว่ามีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตราย ในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อหนึ่งกิโลกรัมของสิ่งปนื้อกฏหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว (mg/kg; wet weight) เท่ากับหรือมากกว่าค่า Total Threshold Limit Concentration (TTL)C ที่กำหนดไว้ดังต่อไปนี้

แอนติโมนี และ/หรือสารประกอบแอนติโมนี (Antimony and/or antimony compounds)	500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
สารหนู และ/หรือสารประกอบของสารหนู (Arsenic and/or arsenic compounds)	500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
แร่ใยหินหรือแอสเบสตอส (Asbestos)	1.0 (ร้อยละ)
แบเรียม และ/หรือสารประกอบแบเรียม (ยกเว้นแบไรท์และแบเรียมซัลเฟต) (Barium and/or barium compounds (excluding barite and barium sulfate)	10,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
เบริลเลียม และ/หรือสารประกอบเบริลเลียม (Beryllium and/or beryllium compounds)	75 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
แคดเมียม และ/หรือสารประกอบแคดเมียม (Cadmium and/or cadmium compounds)	100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
สารประกอบของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Chromium (VI) compounds)	500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
โครเมียม และ/หรือ สารประกอบของโครเมียมไตรวาเลนต์ (Chromium and/or chromium (III) compounds)	2,500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
โคบอลท์ และ/หรือ สารประกอบของโคบอลท์ (Cobalt and/or cobalt compounds)	8,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ทองแดง และ/หรือ สารประกอบทองแดง (Copper and/or copper compounds)	2,500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
สารประกอบเกลือของฟลูออไรด์ (Fluoride salts)	18,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ตะกั่ว และ/หรือสารประกอบตะกั่ว (Lead and/or lead compounds)	1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ปรอท และ/หรือสารประกอบปรอท (Mercury and/or mercury compounds)	20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
โมลิบดีนัม และ/หรือสารประกอบโมลิบดีนัม (ไม่รวมโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์) (Molybdenum and/or molybdenum compounds; excluding molybdenum disulfide)	3,500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
นิกเกิล และ/หรือสารประกอบนิกเกิล (Nickel and/or nickel compounds)	2,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ซีลีเนียม และ/หรือสารประกอบซีลีเนียม (Selenium and/or selenium compounds)	100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
เงิน และ/หรือสารประกอบของเงิน (Silver and/or silver compounds)	500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ทาลเลียม และ/หรือสารประกอบทาลเลียม (Thallium and/or thallium compounds)	700 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
วานาเดียม และ/หรือสารประกอบวานาเดียม (Vanadium and/or vanadium compounds)	2,400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
สังกะสี และ/หรือสารประกอบสังกะสี (Zinc and/or zinc compounds)	5,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
แอลดริน (Aldrin)	1.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
คลอเดน (Chlordane)	2.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ดีดีที ดีดีอี หรือ ดีดีดี (DDT, DDE, DDD)	1.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
2,4-ดี (2,4-Dichlorophenoxyacetic acid)	100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ดีลดริน (Dieldrin)	8.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ไดออกซิน (Dioxin (2,3,7,8-TCDD))	0.01 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
เอนดริน (Endrin)	0.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
เฮปตาคลอร์ (Heptachlor)	4.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
คีโปน (Kepone)	21 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
สารประกอบอินทรีย์ของตะกั่ว (Lead compounds, organic)	13 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ลินเดน (Lindane)	4.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
เมททอกซีคลอรั (Methoxychlor)	100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ไมเร็กซ์ (Mirex)	21 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
เพนตาคลอโรฟีนอล (Pentachlorophenol)	17 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
โพลีคลอริเนตเต็ดไบฟีนิล (Polychlorinated biphenyls (PCBs))	50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ทอกซาฟีน (Toxaphene)	5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene)	2,040 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ซิลเว็กซ์ (Silvex; 2,4,5-Trichlorophenoxypropionic acid)	10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

(หมายเหตุ – ค่าที่กำหนดของสารอินทรีย์ เป็นค่าที่วัดเป็นความเข้มข้นของธาตุ ไม่ใช่ของสารประกอบ

– ในกรณีของแอสเบสตอสและโลหะธาตุ ค่าที่กำหนดไว้ให้ใช้กับสารที่อยู่ในสภาพร่วนเป็นผง ละเอียดเท่านั้น ทั้งนี้ แอสเบสตอส จะรวมถึง chrysotile amosite crocidolite tremoliteanthophyllite และ actinolite)

5.2 สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เมื่อนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) และวิธีวิเคราะห์น้ำสกัดแล้ว มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตรายในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อลิตรของน้ำสกัด (mg/L) เท่ากับหรือมากกว่าค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) ที่กำหนดไว้ดังต่อไปนี้

สารหนู และ/หรือสารประกอบของสารหนู (Arsenic and/or arsenic compounds)	5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
แบเรียม และ/หรือสารประกอบแบเรียม (ยกเว้นแบไรท์และแบเรียมซัลเฟต) (Barium and/or barium compounds (excluding barite and barium sulfate)	100 มิลลิกรัมต่อลิตร
เบริลเลียม และ/หรือสารประกอบเบริลเลียม (Beryllium and/or beryllium compounds)	0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร
แคดเมียม และ/หรือสารประกอบแคดเมียม (Cadmium and/or cadmium compounds)	1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
สารประกอบของโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ (Chromium (VI) compounds)	5 มิลลิกรัมต่อลิตร

โครเมียม และ/หรือ สารประกอบของโครเมียมไตรวาเลนต์ (Chromium and/or chromium (III) compounds)	5 มิลลิกรัมต่อลิตร
โคบอลท์ และ/หรือ สารประกอบของโคบอลท์ (Cobalt and/or cobalt compounds)	80 มิลลิกรัมต่อลิตร
ทองแดง และ/หรือ สารประกอบทองแดง (Copper and/or copper compounds)	25 มิลลิกรัมต่อลิตร
สารประกอบเกลือของฟลูออไรด์ (Fluoride salts)	180 มิลลิกรัมต่อลิตร
ตะกั่ว และ/หรือสารประกอบตะกั่ว (Lead and/or lead compounds)	5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
ปรอท และ/หรือสารประกอบปรอท (Mercury and/or mercury compounds)	0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
โมลิบดีนัม และ/หรือสารประกอบโมลิบดีนัม (ไม่รวมโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์) (Molybdenum and/or molybdenum compounds; excluding molybdenum disulfide)	350 มิลลิกรัมต่อลิตร
นิกเกิล และ/หรือสารประกอบนิกเกิล (Nickel and/or nickel compounds)	20 มิลลิกรัมต่อลิตร
ซีลีเนียม และ/หรือสารประกอบซีลีเนียม (Selenium and/or selenium compounds)	1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
เงิน และ/หรือสารประกอบของเงิน (Silver and/or silver compounds)	5 มิลลิกรัมต่อลิตร
ทาลเลียม และ/หรือสารประกอบทาลเลียม (Thallium and/or thallium compounds)	7.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
วานาเดียม และ/หรือสารประกอบวานาเดียม (Vanadium and/or vanadium compounds)	24 มิลลิกรัมต่อลิตร
สังกะสี และ/หรือสารประกอบสังกะสี (Zinc and/or zinc compounds)	250 มิลลิกรัมต่อลิตร
แอลดริน (Aldrin)	0.14 มิลลิกรัมต่อลิตร
คลอเดน (Chlordane)	0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
ดีดีที ดีดีดี หรือ ดีดีดี (DDT, DDE, DDD)	0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร

2,4-ดี (2,4-Dichlorophenoxyacetic acid)	10 มิลลิกรัมต่อลิตร
ดีลดริน (Dieldrin)	0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร
ไดออกซิน (Dioxin (2,3,7,8-TCDD))	0.001 มิลลิกรัมต่อลิตร
เอนดริน (Endrin)	0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร
เฮปตาคลอร์ (Heptachlor)	0.47 มิลลิกรัมต่อลิตร
คีโปน (Kepone)	2.1 มิลลิกรัมต่อลิตร
ลินเดน (Lindane)	0.4 มิลลิกรัมต่อลิตร
เมททอกซีคลอร์ (Methoxychlor)	10 มิลลิกรัมต่อลิตร
ไมเร็กซ์ (Mirex)	2.1 มิลลิกรัมต่อลิตร
เพนตาคลอโรฟีนอล (Pentachlorophenol)	1.7 มิลลิกรัมต่อลิตร
โพลีคลอริเนตเตดีไบฟีนิล (Polychlorinated biphenyls (PCBs))	5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
ทอกซาฟีน (Toxaphene)	0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร
ไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene)	204 มิลลิกรัมต่อลิตร
ซิลเว็กซ์ (Silvex; 2,4,5-Trichlorophenoxypropionic acid)	1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

(หมายเหตุ – ค่าที่กำหนดของสารอินทรีย์ เป็นค่าที่วัดเป็นความเข้มข้นของธาตุ ไม่ใช่ของสารประกอบ)

การทดสอบสิ่งปนเปื้อนหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว โดยนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) จะทำขึ้นก็ต่อเมื่อ ค่าความเข้มข้นทั้งหมด (Total Concentration) ของสารอันตรายใดๆ มีค่าไม่เกินค่า TTLC ในข้อ 5.1 แต่มีค่าเท่ากับหรือมากกว่าค่า STLC ของสารนั้นที่กำหนดในข้อ 5.2 หรือเมื่อต้องการนำสิ่งปนเปื้อนหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วนั้น ไปกำจัดโดยวิธีฝังกลบ

ภาคผนวก ง
วิธีทดสอบปริมาณสารทั้งหมดในพลอย
(Total digestion)

Preparation of Solution B

Solution B is used in the determination of total iron, MgO, CaO, TiO₂, P₂O₅, MnO, Na₂O, and K₂O.

The samples are digested on a steam bath overnight with a mixture of HF, H₂SO₄, and HNO₃. This procedure decomposes almost all the minerals that are normally present.

Organic matter is destroyed by the addition of a few drops of a mixture of perchloric and nitric acids after heating to sulfuric acid fumes. Any manganese dioxide formed by oxidation is then reduced and rendered soluble by the addition of hydrazine sulfate.

Rarely, appreciable residues do remain. If so, they should be removed, identified, and analyzed by suitable methods.

Reagents

Solution B acid mixture : Working under a fume hood, transfer the contents of a 454 g bottle of HF (48 percent) to a 1-l polyethylene bottle. Chill the HF in a bath of cold water. Keep the polyethylene bottle in the cold-water bath, add 165 ml of concentration H₂SO₄, mix, and allow to cool. Add 40 ml of concentrated HNO₃ and mix.

HClO₄-HNO₃ mixture : Mix 100 ml of HClO₄ (72 percent) and 100 ml of concentrated HNO₃. Store in a 200 ml glass-stoppered Pyrex bottle.

Hydrazine-sulfate solution, 0.2 percent : Dissolve 0.2 g NH₂NH₂SO₄ in 100 ml of water. Prepare fresh solution for each run.

Procedure

1. Transfer 0.500 g of each sample to special Teflon beakers
2. Under a fume hood, add 15 ml of the solution B acid mixture to each Teflon beaker and swirl to wet the sample powder.
3. Cover the Teflon beakers with the Teflon covers, place the beakers in the stream bath so that most of each beaker is suspended in stream, and heat overnight.
4. Remove the covers and continue to heat the beaker on the stream bath for about 1 hr or until acid fumes are no longer emitted.
5. Completely transfer the contents of the Teflon beakers to 400 ml Vycor beakers, using a minimum of water and a policeman to effect the transfer.
6. Place the Vycor beakers on a hot plate and heat until SO_3 fumes evolve, then remove the beakers.
7. When SO_3 fuming stops, add about 4 drops of the $\text{HClO}_4\text{-HNO}_3$ mixture to each beaker from a dropping bottle and replace the beakers on the hot plate. Heat each until strong fumes are evolved and any color caused by organic matter had disappeared. Repeat this step if necessary.
8. Remove the beakers from the hot plate, allow them to cool for a few minutes, and then add about 225 ml of water, 5 ml of concentrated HNO_3 , and 1 ml of the hydrazine sulfate solution.
9. Replace the beakers on the hot plate, and heat to boiling, if a brown precipitate of MnO_2 remains after the solutions have boiled for a few minutes, an additional milliliter of hydrazine sulfate should be added. If a residue remains after the solutions have been boiled for a few minutes, boiling should be continued for a additional half hours. A small residue can be ignored ; an appreciable residue should be separated, identified, and analyzed by suitable means.
10. Cool the solutions to room temperature, then transfer them to 250 ml volumetric flasks.
11. Dilute to volume, mix, and transfer to polyethylene bottles.

ภาคผนวก จ

คุณลักษณะทางอ้อมของพลอยทับทิมและพลอยบุษราคัม
ก่อนและหลังการทดสอบด้วยวิธี BCR Three stage

ตารางที่ จ-1 คุณลักษณะทางอัญมณีของพลอยทับทิมก่อนทดสอบด้วยวิธี BCR Three stage

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g)	SG	RI		Bi	Fluorescence	
			N _o	N _e		LW	SW
Pb 1-1	3.0585	3.96	1.770	1.761	0.009	Strong (red)	inert
Pb 1-2	1.0636	4.00	1.771	1.761	0.010	Strong (red)	inert
Pb 1-3	1.5886	3.98	1.770	1.761	0.009	Strong (red)	inert
Pb 2-1	0.1710	3.98	1.770	1.761	0.009	Strong (red)	inert
Pb 2-2	0.2356	3.99	1.770	1.762	0.008	Strong (red)	inert
Pb 2-3	0.1589	3.96	1.770	1.762	0.008	Strong (red)	inert

หมายเหตุ : SG = ค่าความถ่วงจำเพาะ

N_o = ค่าดัชนีหักเหของลำแสงปกติ

N_e = ค่าดัชนีหักเหของลำแสงพิเศษ

Bi = ค่าความแตกต่างระหว่างค่าดัชนีหักเหของลำแสงปกติกับค่าดัชนีหักเหของ
ลำแสงพิเศษ

LW = การเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ช่วงคลื่นยาว

SW = การเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ช่วงคลื่นสั้น

ตารางที่ จ-2 ลักษณะทางอัญมณีของพลอยทับทิมหลังทดสอบด้วยวิธี BCR three stage

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g)	SG	RI		Bi	Fluorescence	
			N _o	N _e		LW	SW
Pb 1-1	2.9763	3.96	1.770	1.761	0.009	Strong (red)	inert
Pb 1-2	0.9313	4.00	1.771	1.761	0.010	Strong (red)	inert
Pb 1-3	1.3826	3.98	1.770	1.761	0.009	Strong (red)	inert
Pb 2-1	0.1683	3.98	1.770	1.761	0.009	Strong (red)	inert
Pb 2-2	0.2355	3.99	1.770	1.762	0.008	Strong (red)	inert
Pb 2-3	0.1576	3.96	1.770	1.762	0.008	Strong (red)	inert

หมายเหตุ : SG = ค่าความถ่วงจำเพาะ

N_o = ค่าดัชนีหักเหของลำแสงปกติ

N_e = ค่าดัชนีหักเหของลำแสงพิเศษ

Bi = ค่าความแตกต่างระหว่างค่าดัชนีหักเหของลำแสงปกติกับค่าดัชนีหักเหของ
ลำแสงพิเศษ

LW = การเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ช่วงคลื่นยาว

SW = การเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ช่วงคลื่นสั้น

ตารางที่ จ-3 คุณลักษณะทางอัญมณีของพลอยบุษราคัมหลังทดสอบด้วยวิธี BCR Three stage

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g)	SG	RI		Bi	Fluorescence	
			N_o	N_e		LW	SW
Be 1-1	0.6244	3.98	1.771	1.761	0.01	inert	inert
Be 1-2	0.4833	3.99	1.772	1.762	0.01	inert	inert
Be 1-3	0.4821	4.10	1.771	1.762	0.009	inert	inert
Be 2-1	0.0245	3.98	1.770	1.761	0.009	inert	inert
	0.0172	3.94	1.771	1.762	0.009	inert	inert
	0.0210	4.01	1.770	1.762	0.008	inert	inert
	0.0294	4.05	1.771	1.761	0.010	inert	inert
	0.0178	3.97	1.771	1.762	0.009	inert	inert
Be 2-2	0.0194	4.10	1.769	1.761	0.008	inert	inert
	0.0229	3.98	1.770	1.761	0.009	inert	inert
	0.0211	4.06	1.770	1.761	0.009	inert	inert
	0.0179	4.03	1.771	1.761	0.010	inert	inert
	0.0173	3.99	1.771	1.762	0.009	inert	inert
Be 2-3	0.0239	3.95	1.770	1.760	0.010	inert	inert
	0.0257	3.98	1.771	1.762	0.009	inert	inert
	0.0251	3.99	1.771	1.762	0.009	inert	inert
	0.0307	3.97	1.771	1.761	0.010	inert	inert
	0.0259	4.03	1.770	1.761	0.009	inert	inert

หมายเหตุ : SG = ค่าความถ่วงจำเพาะ

N_o = ค่าดัชนีหักเหของลำแสงปกติ

N_e = ค่าดัชนีหักเหของลำแสงพิเศษ

Bi = ค่าความแตกต่างระหว่างค่าดัชนีหักเหของลำแสงปกติกับค่าดัชนีหักเหของ
ลำแสงพิเศษ

LW = การเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ช่วงคลื่นยาว

SW = การเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ช่วงคลื่นสั้น

ตารางที่ จ-4 คุณลักษณะทางอัญมณีของพลอยบุษราคัมหลังทดสอบด้วยวิธี BCR Three stage

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g)	SG	RI		Bi	Fluorescence	
			N _o	N _e		LW	SW
Be 1-1	0.6244	3.98	1.771	1.761	0.01	inert	inert
Be 1-2	0.4833	3.99	1.772	1.762	0.01	inert	inert
Be 1-3	0.4821	4.10	1.771	1.762	0.009	inert	inert
Be 2-1	0.0245	3.98	1.770	1.761	0.009	inert	inert
	0.0172	3.94	1.771	1.762	0.009	inert	inert
	0.0210	4.01	1.770	1.762	0.008	inert	inert
	0.0294	4.05	1.771	1.761	0.010	inert	inert
	0.0178	3.97	1.771	1.762	0.009	inert	inert
Be 2-2	0.0194	4.10	1.769	1.761	0.008	inert	inert
	0.0229	3.98	1.770	1.761	0.009	inert	inert
	0.0211	4.06	1.770	1.761	0.009	inert	inert
	0.0179	4.03	1.771	1.761	0.010	inert	inert
	0.0173	3.99	1.771	1.762	0.009	inert	inert
Be 2-3	0.0239	3.95	1.770	1.760	0.010	inert	inert
	0.0257	3.98	1.771	1.762	0.009	inert	inert
	0.0251	3.99	1.771	1.762	0.009	inert	inert
	0.0307	3.97	1.771	1.761	0.010	inert	inert
	0.0259	4.03	1.770	1.761	0.009	inert	inert

หมายเหตุ : SG = ค่าความถ่วงจำเพาะ

N_o = ค่าดัชนีหักเหของลำแสงปกติ

N_e = ค่าดัชนีหักเหของลำแสงพิเศษ

Bi = ค่าความแตกต่างระหว่างค่าดัชนีหักเหของลำแสงปกติกับค่าดัชนีหักเหของ
ลำแสงพิเศษ

LW = การเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ช่วงคลื่นยาว

SW = การเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ช่วงคลื่นสั้น

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกนิษฐา กาญจนบัตร เกิดเมื่อวันที่ 2 พฤศจิกายน 2528 ที่จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์(อัญมณีและเครื่องประดับ) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เมื่อปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 ในระหว่างการศึกษานี้ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานดังต่อไปนี้

Kanitta Kanjanabut, Arubol Chotipong and Chakkaphan Sutthirat. "Working towards a Procedural Standard in the Testing for both Stability and Assessment of the Impact on Health of Lead Glass-Treated Rubies and Beryllium-Treated Sapphires." The Journal of the Gemmological Association of Hong Kong 2010 Volume XXXI. 48-54 p.