

เปรียบเทียบอนุภาคของเขม่าที่ได้รับจากการประกอบอาชีพและเขม่าปืนชนิด Lead-free
Comparison of Particles of Occupation Origins Residues and Lead-free Gunshot Residues

อัยยภูธร พลภาค (Ussada-yooth Polnparkh)¹* ดร.นรงค์ นิยมพาลี (Dr.Narong Chimpalee)**

โกสินทร์ หินเภาว (Kosin Hintoa)***

บทคัดย่อ

การวิจัยมีวัตถุประสงค์วิเคราะห์ถึงความแตกต่างระหว่างอนุภาคที่ได้มาจากแหล่งกำเนิดในการประกอบอาชีพและอนุภาคเขม่าปืนที่ได้จากกระสุนปืน Lead-free สามารถนำผลการวิจัยไปใช้เป็นแนวทางในการตรวจพิสูจน์เขม่าปืน และการกันผู้บริสุทธิ์ออกจากคดีและลงโทษทางอาญา โดยเน้นศึกษาหาธาตุองค์ประกอบสำคัญของอนุภาคที่ได้มาจากการประกอบอาชีพ รูปร่างกลมมน ที่ขนาด 1-15 μm และเปรียบเทียบลักษณะทางสัณฐานกับอนุภาคเขม่าปืนชนิด Lead-free ด้วยเทคนิค SEM/EDX การวิจัยพบว่า อนุภาคส่วนใหญ่มี Si เป็นองค์ประกอบหลัก และมี Al เป็นธาตุองค์ประกอบรอง และพบได้ว่าอนุภาคที่ได้มาจากช่างติดตั้งและซ่อมกระจกรถยนต์ คนงานโรงงานผลิตภาชนะเซรามิก และช่างสีรถยนต์ มีธาตุองค์ประกอบเหมือนกับเขม่าปืนชนิด Lead-free แต่เมื่อวิเคราะห์ธาตุในแต่ละอนุภาคพบว่าอนุภาคที่ได้จากช่างติดตั้งและซ่อมกระจกรถยนต์-6 มีธาตุองค์ประกอบเหมือนกับอนุภาคเขม่าปืน Winchester WinCleanTM และช่างสีรถยนต์-4 มีธาตุองค์ประกอบเหมือนกับอนุภาคเขม่าปืน Remington/UMC LeadLessTM และเมื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐาน พบว่าอนุภาคที่ได้รับจากแหล่งกำเนิดในการประกอบอาชีพมีสัณฐานที่แตกต่างจากอนุภาคเขม่าปืนชนิด Lead-free

ABSTRACT

The objective of this research is to analyze the differences between the particles of occupation origins and gunshot residues (GSR) delivered from Lead-free ammunitions. The results can be used as a guide to identify who is innocent of a crime. The studies focused on the elemental composition of particles of occupation origins in 1-15 μm spherical shape, and compare the morphology of the particles with particles of Lead-free GSR. The determinations were carried out using SEM/EDX. The results show that the most of particles contained Si as the major component and Al as the minor elements. A group of particles is an essential element of Lead-free GSR particles and can be found at installation and repair automotive glass workers, automotive painters, and ceramic workers. The comparison with particles of Lead-free GSR found that only particles from the automotive glass workers -6 contained the elemental composition which is the same as particles from Winchester WinCleanTM, and the automotive painters-4 which have elements of similar particles of Remington/UMC LeadLessTM. By studying and analyzing the morphology of those particles, the results are different from particles of Lead-free GSR.

คำสำคัญ : กระสุนปืนชนิด Lead-free อนุภาคเขม่าปืน อนุภาคเขม่าที่ได้จากแหล่งกำเนิดในการประกอบอาชีพ

Key Words : Lead-free ammunitions, Particles of gunshot residues, Particles of occupation origins

¹ Correspondent author: assahdar_a@yahoo.com

* นักศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

*** อาจารย์ พลตำรวจตรี หลักสูตรนิติวิทยาศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทนำ

การตรวจวิเคราะห์เขม่าปืน ด้วยเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ โดยเฉพาะเทคนิคหรือวิธีซึ่งให้ผลที่มีความจำเพาะเจาะจง น่าเชื่อถือ แม่นยำ ทั้งยังประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย ย่อมเกิดผลดีต่อกระบวนการยุติธรรมอย่างมาก เพราะสามารถพิสูจน์เพื่อยืนยันหรือปฏิเสธ (confirm or negate an alibi) ได้ว่าบุคคลนั้นได้ผ่านการยิงปืนหรือเกี่ยวข้องกับการยิงปืนมาจริงหรือไม่ อีกทั้งผลการตรวจวิเคราะห์ที่ได้ สามารถนำไปสู่ความคลี่คลายในการสืบสวนสอบสวนคดีอาญาที่ใช้อาวุธปืนประกอบการกระทำความผิดได้อย่างรวดเร็ว โดยมีประสิทธิภาพและมีประสิทธิผล กล่าวคือ เมื่อพบว่าเขม่าบนมือหรือเสื้อผ้าเกิดจากการยิงปืนจริง ย่อมสามารถยืนยัน (corroborate) ได้ว่าบุคคลนั้นผ่านการยิงปืนมาจริง ซึ่งนำไปสู่การนำตัวผู้กระทำความผิดนั้นมาฟ้องและลงโทษ ในทางกลับกันยังยืนยันความบริสุทธิ์ของผู้ซึ่งไม่ได้กระทำความผิด อันเป็นการดำรงความยุติธรรม อนึ่ง ธาตุที่เป็นส่วนประกอบหลักของอนุภาคเขม่าปืนที่ได้จากกระสุนปืน ไม่ได้มีอยู่เฉพาะแต่ในเขม่าปืนเท่านั้น ยังมีรายงานการวิจัยพบว่าอาจได้รับอนุภาคเหล่านี้เพราะการปนเปื้อนจากสภาพแวดล้อมหรือการประกอบอาชีพ ซึ่งทำให้เกิดผลบวกлож (false positive) โดยพบว่าการปนเปื้อนบนมือของกลุ่มตัวอย่างที่ไม่เคยผ่านการใช้อาวุธปืนหรือเกี่ยวข้องกับการยิงปืนมาก่อน แต่ปัญหาข้างต้นหมดไปเมื่อได้ทำการตรวจวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ศาสตร์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM) ที่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้ทั้งองค์ประกอบ รูปร่าง และสัณฐานของอนุภาคเขม่าปืน โดยได้มีการศึกษาวิจัยเปรียบเทียบกับอนุภาคที่ได้รับจากสภาพแวดล้อมหรือการประกอบอาชีพไว้แล้ว [1, 2, 3, 4, 5]

การตรวจพิสูจน์อาวุธปืนเพื่อระบุตัวผู้ที่ยิงปืน โดยการตรวจวิเคราะห์เขม่าปืน (Gunshot Residue; GSR) ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่เกิดจากการเผาไหม้ภายหลังจากการยิงปืน (discharge) โดยอาศัยอนุภาคของเขม่าปืน (particles of GSR) ซึ่งได้มาจากการระเบิดและเผาไหม้ของชนวนท้ายกระสุนปืน (primer residue) มีองค์ประกอบจากอนินทรีย์สาร (inorganic) ที่ส่วนใหญ่ประกอบด้วยธาตุโลหะซึ่งใช้ระยะเวลาในการสลายตัวของธาตุ [4] โดยเฉพาะอย่างยิ่งอนุภาคที่เกิดจากส่วนผสมซึ่งบรรจุอยู่ในชนวนท้ายกระสุนปืน (primer mixture) ของกระสุนปืนชนิดธรรมดา (regular ammunition) อันมีลักษณะเฉพาะที่โดดเด่น เพราะประกอบไปด้วยธาตุอันเป็นองค์ประกอบหลัก (unique GSR particle) อยู่ 3 ชนิด ได้แก่ Pb, Ba และ Sb [4, 5, 6, 7, 8] มีรายงานยืนยันว่าสามารถพบอนุภาคของธาตุซึ่งเป็นองค์ประกอบ (elemental composition) ได้อย่างน้อย 2 ชนิด Ba และ Sb ทุกครั้ง จากบริเวณที่พบเขม่าปืน [1, 3, 9] แต่ปัญหาที่สำคัญยิ่งกว่า คือ ในปัจจุบันเริ่มมีการผลิตกระสุนปืนชนิดใหม่ ชนิดที่ไม่มีโลหะตะกั่วเป็นส่วนผสม (Lead-free ammunition) และชนิดที่ไม่มีธาตุโลหะเป็นส่วนผสม (nontoxic ammunition) มีรายงานที่ได้ศึกษาถึงธาตุอันเป็นองค์ประกอบ รูปร่าง และสัณฐานของอนุภาคที่ได้จากกระสุนปืนชนิด Lead-free ซึ่งพบว่ามี Al, Si และ K เป็นธาตุองค์ประกอบที่สามารถพบได้บ่อยครั้งที่สุด โดยมีรูปร่าง สัณฐาน และธาตุประกอบชนิดอื่นๆ แตกต่างกันไป

ตามรายงานการตรวจวิเคราะห์ที่ Martiny [10] ได้ศึกษาอนุภาคเขม่าปืนจากกระสุนปืน Companhia Brasileira de Cartuchos (CBC) CleanRang[®] ซึ่งรุ่นผลิตแตกต่างกัน พบว่าธาตุที่พบเป็นส่วนมาก (major elemental) ในรุ่นการผลิตที่สอง คือ Al, Si, K และ Fe นอกจากนี้ ยังพบว่ามีร่องรอย (traces) ของ Ca และ S แต่ไม่มี Sr เป็นองค์ประกอบอย่างอนุภาคของ CleanRang[®] รุ่นการผลิตแรก ลักษณะสัณฐานอนุภาคของ CleanRang[®] รุ่นการผลิตแรก มีรูปร่างค่อนข้างกลม (globular morphology) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5-10 μm ผิวของอนุภาคมีลักษณะเรียบและคล้ายผิวเปลือกส้ม ส่วนอนุภาคจากกระสุนปืนรุ่นที่สอง มีขนาด

เส้นผ่านศูนย์กลาง 1-25 μm โดยพบจำนวนมากที่สุดในขนาด 10 μm และพบขนาดใหญ่มากถึง 50 μm อนุภาครูปทรงกลมมีจำนวนเพียงเล็กน้อยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 μm

Oommen และ Pierce [11] ได้รายงานพบว่าอนุภาคเขม่าเป็นชนิด Lead-free ที่มีขนาดเล็กกว่า 5 μm มีรูปร่างกลมมน (spherical) ธาตุที่พบได้คือ Cu และ Zn หรือ Cu และ Sn สำหรับอนุภาคที่มีขนาด 6-15 μm แม้ว่าจะมีส่วนผสมที่แตกต่างกัน แต่พบได้ว่าอนุภาคมีรูปร่างกลมเหมือนกัน โดยมี Al และ Si เป็นธาตุองค์ประกอบหลัก (major elemental) โดยพบว่ามี K หรือ Ba เป็นองค์ประกอบหลักเพิ่มเติม และมี Na, Cl, Ca หรือ Mg ในบางอนุภาค และไม่พบว่ามี Fe กล่าวคือ Winchester WinClean™ และ Remington/UMC LeadLess™ พบว่ามี K เป็นองค์ประกอบเพิ่มเติม ซึ่งต่างจาก Federal BallisticClean™ ที่มี Ba เป็นองค์ประกอบเพิ่มเติม โดยที่ผิวของอนุภาคมีลักษณะเป็นหลุมลึก (heavily pocked) อยู่จำนวนมาก และยังพบว่ามีรูปร่างและผิวลักษณะคล้ายก้อนหิน (rockpile) เมื่ออนุภาคมีขนาดมากกว่า 10 μm ซึ่งทำให้สามารถแยกแยะความแตกต่างจากอนุภาคเขม่าที่ได้มาจากกระสุนปืน Winchester WinClean™ ที่อนุภาคมีผิวคล้ายผิวเปลือกส้ม โดยพบว่ามีรูปร่างพื้นฐานเป็นแผ่น (sheet) เมื่อมีขนาด 30-100 μm และ Remington/UMC LeadLess™ ซึ่งปกติมีผิวลักษณะเรียบ โดยพบว่ามีหลุมเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้ พบว่าอนุภาคที่ได้จาก Speer Lawman CleanFire™ มี Sr เป็นธาตุหลัก และมีรูปร่างที่จำเพาะง่ายต่อการวิเคราะห์ เนื่องจากผิวอนุภาคมีรอยแตกร้าว (crackled) และมีรอยแยกขนาดใหญ่ (fissured) เมื่อขนาดอนุภาคมีขนาดมากกว่า 20 μm (ตารางที่ 1) จากรายงานการวิจัยที่กล่าวถึง ยังไม่มีการศึกษาวิจัยเชิงโครงสร้างจุลภาคเพื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคที่ได้รับจากสภาพแวดล้อมหรือการประกอบอาชีพ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาหาธาตุอันเป็นองค์ประกอบสำคัญ (elemental composition) ของอนุภาคที่ได้มาจากแหล่งกำเนิดในการประกอบอาชีพ โดยเน้นศึกษาเฉพาะอนุภาคที่มีขนาด 1-15 μm
2. เปรียบเทียบและวิเคราะห์ถึงความแตกต่างระหว่างอนุภาคที่ได้มาจากแหล่งกำเนิดในการประกอบอาชีพ และอนุภาคเขม่าปืนที่ได้จากกระสุนปืน Lead-free ซึ่งเป็นกระสุนปืนชนิดใหม่

เครื่องมือและวิธีการ

อุปกรณ์เก็บรวบรวมตัวอย่าง

เทปกาวยึดคาร์บอน ชนิด conductive double-sided adhesive carbon disc ยี่ห้อ Agar Scientific ผลิตในประเทศไทย ขนาดหน้า 3 mm. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/2 Inch ถูกนำมาใช้เพื่อทำการเก็บตัวอย่างโดยติดเข้ากับ SEM aluminum pin stab (ยี่ห้อ เดียวกัน) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/2 Inch ยาว 6 cm. เมื่อเก็บตัวอย่างเรียบร้อยแล้ว ทำการบรรจุ SEM aluminum pin stab ใน stab-storage tube และนำไปจัดเก็บตามกลุ่มอาชีพในถุงพลาสติกใสชนิด zip-lock ที่ติดสติ๊กเกอร์ลากสีสำหรับจัดกลุ่มตัวอย่าง การหีบจับ adhesive carbon และ aluminum pin stab ทุกครั้งใช้คีมสำหรับหีบจับ โดยใช้เจลล้างมือสำหรับทำความสะอาดมือและสวมถุงมือยางสำหรับลดการปนเปื้อนทั้งเวลาเก็บตัวอย่างและดำเนินการวิเคราะห์

อุปกรณ์เตรียมตัวอย่าง

ใช้ทองคำแท้ (Au) ความบริสุทธิ์ 99.9% ระเหิดให้เป็นละอองตกเคลือบลงบนตัวอย่างด้วยเครื่อง Sputtering (Coater) รุ่น JFC-1100E Ion Sputter

เครื่องมือวิเคราะห์ตัวอย่าง

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด JEOL JSM 5910 LV (Low Vacuum) ที่สามารถทำงานในภาวะสุญญากาศต่ำ ในช่วง 1-270 Pa ความแยกชัดในภาวะสุญญากาศต่ำมีค่าเท่ากับ 4.5 mm. ค่าศักย์ไฟฟ้าเร่งอิเล็กตรอนปรับเปลี่ยนได้ในช่วง 0-0.330 kV ชิ้นงานขนาดใหญ่ที่สุดที่สามารถบรรจุได้คือ 20 cm. มีระบบคอมพิวเตอร์ควบคุมให้ง่ายต่อการใช้งาน ติดตั้งพร้อม Secondary Electron Detector, Backscattered Electron Detector และ Energy-dispersive X-ray Microanalysis และมี Specimen Cooling Unit ทำให้ลดขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงานที่อยู่ยากไปได้ โดยใช้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสำหรับถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาค และเครื่องรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy-dispersive X-ray Microanalysis) ของ Oxford Instrument ซึ่งติดตั้งคู่กับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JEOL JSM 5910 LV สำหรับศึกษาตัวอย่างประกอบของตัวอย่าง

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากร คือ กลุ่มกิจกรรมหรือการประกอบอาชีพในจังหวัดเชียงใหม่ จังหวัดลำพูนและจังหวัดลำปาง ทั้งหมด 7 กลุ่ม ประกอบด้วย ช่างตัดกระจกและมุ้งลวดอะลูมิเนียม, ช่างติดตั้งและซ่อมกระเบื้องกระเบื้อง, คนงานตีเส้นจราจร,ช่างเชื่อมโลหะและเหล็กดัด และ คนงานร้านรับซื้อของเก่า ผู้วิจัยเลือกศึกษากลุ่มประชากรดังกล่าวเนื่องจากมีรายงานว่าสิ่งแวดล้อมและการประกอบอาชีพอาจทำให้กลุ่มประชากรได้รับธาตุชนิดเดียวกับธาตุซึ่งเป็นส่วนประกอบของอนุภาคเขม่าป็นที่ได้จากกระสุนปืนชนิด Lead-free [3, 10] และเนื่องจากไม่ทราบจำนวนประชากรที่แท้จริง จึงสุ่มตัวอย่างโดยไม่อาศัยความน่าจะเป็น (non-probability sampling) ประกอบกับประเทศไทยยังไม่มีบุคคลหรือหน่วยงานใดที่รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับอนุภาคที่ได้รับจากการประกอบอาชีพที่สามารถใช้อ้างอิงในการคำนวณขนาดของกลุ่มตัวอย่าง ผู้วิจัยจึงกำหนดขนาดของกลุ่มตัวอย่าง จำนวนกลุ่มละ 12 ราย รวม 84 ตัวอย่าง ไม่จำกัดเพศซึ่งเก็บเฉพาะตัวอย่างบนมือของผู้ซึ่งไม่ได้ผ่านการใช้ปืนหรือยิงปืนมาก่อนอย่างน้อย 6 เดือนเพราะระยะเวลาดังกล่าวเป็นช่วงเวลาที่ไม่มีเขม่าป็นติดอยู่บนมือของกลุ่มตัวอย่าง [4, 12, 13,]

วิธีการเก็บตัวอย่าง

เนื่องจากไม่สามารถควบคุมตัวแปรแทรกซ้อน (confounding variable) เช่น อายุการทำงาน อุณหภูมิ ความชื้นและสภาพแวดล้อมอื่น จึงทำการเก็บข้อมูลวิธีแบบบังเอิญ (accidental sampling) การวิจัยนี้พยายามลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้น (minimized error variance) จึงเก็บตัวอย่างหลังจากได้เริ่มทำงานมาแล้วประมาณ 3 ชั่วโมง และไม่ให้อ่างมือ โดยทำการเก็บตัวอย่างเขม่าจากการประกอบอาชีพของกลุ่มตัวอย่างจากมือข้างที่ถนัดบริเวณหลังมือและฝ่ามือตั้งแต่นิ้วหัวแม่มือและนิ้วชี้ ในลักษณะรูปตัววี (V-shaped) ลงไปจนถึงข้อมือ โดยรวมทั้งบริเวณง่ามนิ้วมือที่อยู่ระหว่างนิ้วหัวแม่มือและนิ้วชี้ด้วย [4, 6, 13, 15] กระทั่งกาที่อยู่บนผิว adhesive carbon discs ถูกใช้จดหมดโดยการกดและยก (lifting) ลงบริเวณดังกล่าว ประมาณ 120 -150 ครั้ง

วิธีการเตรียมตัวอย่าง

ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเขม่าป็นชนิด Lead-free ไม่ใช่ธาตุโลหะหนัก จึงต้องทำการเคลือบผิวตัวอย่างที่ศึกษาด้วยโลหะหนัก (metal coating) การศึกษาวิจัยนี้ใช้ทองคำแท้ (Au) ความบริสุทธิ์ 99.9% ระเหิดให้เป็นละอองตกเคลือบลงบนตัวอย่าง เครื่อง Sputtering (Coater) รุ่น JFC-1100E Ion Sputter โดยใช้เวลาเคลือบนาน 5 นาที ทั้งนี้ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติการนำไฟฟ้า และรบกวนการวิเคราะห์น้อยที่สุด [14] อนึ่ง การเคลือบตัวอย่างกระทำขึ้นก่อนที่จะนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในโหมด

ต่างๆ ตามความเหมาะสม เพื่อทำการศึกษาลักษณะ โครงสร้างจุลภาคและหาธาตุอันเป็นองค์ประกอบสำคัญของ อนุภาคต่อไป

วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง

ด้วยเทคนิค SEM/EDX นี้ อาศัยการโฟกัสลำอิเล็กตรอนเพื่อส่องกราดลงบนตัวอย่าง สัญญาณที่เกิดขึ้น จากอัตรากิริยาระหว่างอิเล็กตรอนที่ตกกระทบกับผิวตัวอย่างจะถูกถ่ายทอดผ่านระบบตรวจวัดและระบบ อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งจะปรากฏบนจอภาพคล้ายกับภาพที่เห็นทางจอโทรทัศน์ กล้องจุลทรรศน์ที่ทำงานในลักษณะ นี้ สัญญาณที่ใช้ในการสร้างภาพมีหลายชนิด เช่น อิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ รังสีเอ็กซ์ เป็นต้น ทำให้สามารถศึกษาถึง สัณฐานวิทยาของตัวอย่าง สภาพผิวของตัวอย่าง และหากใช้ตัวตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ด้วย แล้วย่อมสามารถหาส่วนประกอบเคมีในระดับจุลภาควิเคราะห์ได้ เทคนิคนี้จึงสอดคล้องวัตถุประสงค์ใน การศึกษาหาธาตุอันเป็นองค์ประกอบสำคัญ (elemental composition) ของอนุภาคที่ได้มาจากแหล่งกำเนิดใน การประกอบอาชีพ โดยจัดสถานะที่ใช้ในการวิจัยตามตารางที่ 2 และเน้นศึกษาและตรวจสอบเฉพาะอนุภาคทรง กลมที่มีขนาด 1-15 μm กล่าวคือ จะทำการค้นหาโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างที่เตรียมด้วยตา (manual searching) โดยใช้สัญญาณในโหมดอิเล็กตรอนกำลังขยายต่ำ 50-150x ที่เกิดจาก primary electrons ไปชนเอา อิเล็กตรอนที่ผิวตัวอย่างหลุดออกมา ภาพที่ได้เรียกว่า Secondary Electron Image หรือ SEI จากนั้นยังได้ทำการ วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (Energy- dispersive X-ray Microanalysis หรือ EDX) เมื่อได้ผลการศึกษาแล้วจะทำการถ่ายภาพโหมดอิเล็กตรอนกำลังขยายสูง 1500- 5500x ซึ่งเกิดจาก primary electrons กระเจิงกลับออกมาจากผิวตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้เรียกว่า Back Scattered Electron Image หรือ BSE Image หรือ BEI จากนั้นทำการวิเคราะห์และรายงานผลการศึกษาเฉพาะอนุภาคที่มี ธาตุองค์ประกอบที่เหมือนหรือมีความใกล้เคียงมากที่สุดเมื่อเทียบกับธาตุที่เป็นองค์ประกอบของอนุภาคเขม่า ปืนที่ได้จากกระสุนปืนชนิด Lead-free ซึ่งพบได้โดยทั่วไปตามรายงานการศึกษาของ Oommen, Pierce และ Martiny [10, 11] อันประกอบไปด้วย อะลูมิเนียม (Al), ซิลิคอน (Si), โพแทสเซียม (K) หรือแบเรียม (Ba) เป็น ธาตุสำคัญในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ทั้งนี้ ได้นำ conductive double-sided adhesive carbon discs มา วิเคราะห์เพื่อเป็นตัวควบคุม (negative controls sample) และตัวอย่างที่เก็บจากมือเปล่าเพื่อเป็น ตัวอย่างเปรียบเทียบกับ (handblank sample)

ผลและอภิปรายผลการวิจัย

กลุ่มที่ 1 เป็นกลุ่มที่มีอนุภาคซึ่งประกอบไปด้วย Al, Si และ K ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของ อนุภาคเขม่าปืนชนิด Lead-free จากการศึกษาพบว่าได้มาจากช่างติดตั้งและซ่อมกระจก รถยนต์ คนงานโรงงานผลิตภาชนะเซรามิก และช่างสีรถยนต์ (ตารางที่ 3) และเมื่อวิเคราะห์โครงสร้าง ในแต่ละอนุภาคแล้วพบว่า มีเพียงบางอนุภาคที่มีธาตุอันเป็นองค์ประกอบเหมือนอนุภาคเขม่าปืนชนิด Lead-free กล่าวคือ อนุภาคที่ได้จากช่างติดตั้งและซ่อมกระจกรถยนต์-6 มีธาตุองค์ประกอบเหมือนกับอนุภาคเขม่าปืน Winchester WinCleanTM และช่างสีรถยนต์-4 มีธาตุองค์ประกอบเหมือนกับอนุภาคเขม่าปืน Remington/UMC LeadLessTM (ตารางที่ 4)

กลุ่มที่ 2 เป็นกลุ่มอนุภาคที่มีธาตุประกอบธาตุใกล้เคียงกับธาตุที่เป็นองค์ประกอบของอนุภาคเข้ามาเป็นชนิด Lead-free กล่าวคือ นอกจากมี Al, Si, K หรือ Ba และ Fe รวมทั้ง Na, S และ Ca เป็นธาตุองค์ประกอบ แต่มีธาตุอื่นๆ อย่างน้อยหนึ่งธาตุรวมอยู่ด้วยแต่ในปริมาณน้อยมากๆ ธาตุอื่นๆ เช่น Mg, P, Cl และ Ti ผลการวิเคราะห์อนุภาคกลุ่มนี้ทำให้สามารถแยกแยะได้ว่าเขม่าที่ได้รับนั้นมาจากการประกอบอาชีพหรือการยิงปืน กล่าวคือ หากอนุภาคตัวอย่างมีธาตุอื่นรวมอยู่ด้วยในปริมาณน้อยมากๆ เขม่าที่ได้รับย่อมมาจากการประกอบอาชีพ ไม่ใช่จากการยิงปืน จากการศึกษาพบว่าได้มาจากช่างตัดกระจก มุ้งลวดและอะลูมิเนียม ช่างสีรถยนต์ คนงานตีเส้นจราจร และคนงานรับซื้อของเก่า

กลุ่มที่ 3 เป็นกลุ่มอนุภาคที่พบว่าธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักของอนุภาคเข้ามาเป็นชนิด Lead-free ไม่ครบทุกธาตุ กล่าวคือ เป็นอนุภาคที่ขาด K หรือ Ca อย่างน้อยธาตุใดธาตุหนึ่ง ทำให้ทราบว่าเขม่าที่ได้รับมานั้นไม่ใช่ได้รับมาจากการยิงปืน จากการศึกษาพบว่าได้มาจากช่างติดตั้งและซ่อมกระจกรถยนต์ คนงานโรงงานผลิตภาชนะเซรามิก ช่างเชื่อมโลหะและเหล็กคัด คนงานร้านรับซื้อของเก่า และคนงานตีเส้นจราจร

กลุ่มที่ 4 เป็นกลุ่มซึ่งนอกจากมีธาตุที่เป็นองค์ประกอบของอนุภาคเข้ามาเป็นชนิด Lead-free แล้ว ยังมีธาตุอื่นๆ ซึ่งไม่พบว่าเป็นธาตุองค์ประกอบของอนุภาคเข้ามาเป็น ประกอบด้วย เช่น Mn, Ti, Cr, Co, Ni, Se, Zr, Mo หรือ Cd โดยธาตุอื่นๆ ที่พบนี้พบได้ในทุกกลุ่มอาชีพ กลุ่มนี้เป็นกลุ่มที่อยู่นอกเหนือขอบข่ายของการศึกษาวิจัย จึงไม่ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์ เมื่อศึกษาเทียบเปรียบทางโครงสร้างจุลภาค ของอนุภาคที่ได้จากช่างติดตั้งและซ่อมกระจกรถยนต์-6 ซึ่งมีธาตุองค์ประกอบเหมือนกับอนุภาคเข้ามาเป็น Winchester WinClean™ และช่างสีรถยนต์-4 ที่มีธาตุองค์ประกอบเหมือนกับอนุภาคเข้ามาเป็น Remington/UMC LeadLess™ ตามที่สรุปไว้ในตารางที่ 5 พบว่ารูปร่างพื้นฐานของอนุภาคที่ได้จากช่างติดตั้งและซ่อมกระจกรถยนต์-6 มีลักษณะซึ่งแตกต่างกับอนุภาคเข้ามาเป็น Winchester WinClean™ กล่าวคือ อนุภาคที่ได้จากมือช่างติดตั้งและซ่อมกระจกรถยนต์ ขนาด 5 μm ที่ประกอบด้วยธาตุ Na, Al (minor), Si (major), K (trace) ซึ่งมีรูปร่างค่อนข้างกลม (spheroid) และผิวอนุภาคมีลักษณะที่ไม่เรียบ ส่วนอนุภาคเขม่าที่ได้มาจากกระสุนปืน Winchester WinClean™ ขนาด 5-15 μm มีรูปร่างกลมมน (regular spherical) พื้นฐานของอนุภาคมีผิวคล้ายผิวเปลือกส้ม (orange peel) (ภาพที่ 1) ในทำนองเดียวกันรูปร่างพื้นฐานของอนุภาคที่ได้มาจากช่างสีรถยนต์-4 มีขนาด 10 μm ที่ประกอบด้วยธาตุ Na (trace), Al (minor), Si (Major), K (trace), Ca (trace) ซึ่งมีรูปร่างค่อนข้างกลม (irregular spherical / globular) และผิวอนุภาคมีลักษณะไม่เรียบ ซึ่งแตกต่างกับอนุภาคเข้ามาเป็น Remington/UMC LeadLess™ ที่ขนาด 5-15 μm ซึ่งปกติมีผิวลักษณะเรียบ โดยพบว่ามีหลุมเล็กๆ (pocked) บนผิวอนุภาค ภาพที่ (2)

จากการศึกษาพบว่า หากอนุภาคที่พบในการประกอบอาชีพมีธาตุอันเป็นองค์ประกอบเช่นเดียวกับอนุภาคของเขม่าปืน ชนิด Lead-free อนุภาคนั้นมีลักษณะพื้นฐาน (morphology) แตกต่างไปจากอนุภาคเขม่าปืนของกระสุนปืนชนิด Lead-free เนื่องจากการกลไกการกำเนิดของอนุภาคเขม่าปืน (formation of GSR) ซึ่งมีรายงานจำนวนมากกล่าวไว้ว่าอนุภาคเขม่าปืนเกิดขึ้นจากการระเบิดและเผาไหม้ขึ้นอย่างรวดเร็ว ภายในระยะเวลา 1 millisecond (ms) ภายใต้อุณหภูมิและความดันที่เปลี่ยนแปลงในระดับที่สูงขึ้นมากและลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว เป็นเหตุให้อิออนของธาตุเกิดการควบแน่น (Condense) กลายเป็นอนุภาค [2, 16, 17, 18, 19, 20, 21] ส่วนอนุภาคที่เกิดจากการประกอบอาชีพอาจเกิดขึ้นด้วยความร้อนในหลายลักษณะไม่ว่าจะเป็นจากการกระแทก การตอก การเสียดสี การขัด การตัด การเชื่อม หรือการเผาที่ไม่ใช่จากการระเบิดและเผาไหม้อย่างรวดเร็ว

ทั้งนี้ conductive double-sided adhesive carbon discs ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อเป็นตัวควบคุม (negative controls sample) พบว่ามี C และ O ซึ่งทำให้พบว่าธาตุทั้งสองชนิดใน EDX Spectra ของทุกตัวอย่างอีกทั้งยัง

เป็นธาตุที่สามารถพบได้ในการประกอบอาชีพอยู่แล้วด้วย รวมทั้งอาจพบว่ามี Au ปรากฏอยู่ด้วยเนื่องจากถูกนำมาใช้เพื่อเคลือบบนตัวอย่าง สำหรับตัวอย่างที่เก็บจากมือเปล่าเพื่อเป็นตัวอย่างเปรียบเทียบ (handblank sample) คราบที่ได้มาจากคราบเกลือ (chloride salt) พบว่ามี Ca, K และ Na เป็นองค์ประกอบ แต่ไม่มีสัญญาณกลมมน กล่าวคือ Na มีลักษณะเป็นเกิดผลึกแบบคิวบิก ส่วน KCl มีลักษณะเป็นสีเหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งเป็นลักษณะสัญญาณทั่วไปของอนุภาคอยู่แล้ว หากอนุภาคนั้นประกอบด้วย Ca และ KCl อนุภาคมีลักษณะเป็นกลุ่มหรือเป็นกอง (piles) (ภาพที่ 3) โดยพบอนุภาคทั้งหมดเหล่านี้ที่ขนาด 5 -25 μm และไม่พบว่ามี Al และ Si เป็นธาตุ ที่แสดงให้เห็นว่าธาตุและอนุภาคที่ได้จาก negative control และ handblank sample ไม่ทำให้เกิดผลเบี่ยงเบนในการศึกษาวิจัยองค์ประกอบ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Oommen และ Pierce [11]

สรุปผลการวิจัย

การศึกษาและวิเคราะห์เปรียบเทียบในระดับโครงสร้างจุลภาคของอนุภาคทรงกลมที่มีขนาด 1-15 μm พบว่าอนุภาคส่วนใหญ่มี Si เป็นองค์ประกอบหลัก (major) มี Al เป็นธาตุองค์ประกอบรอง (minor) และอนุภาคที่พบในการประกอบอาชีพซึ่งมีธาตุอื่นเป็นองค์ประกอบเช่นเดียวกับอนุภาคของเขม่าปืนตามผลการศึกษาที่ได้พบว่าได้มาจากช่างติดตั้งและซ่อมกระบอกปืน คณงานโรงงานผลิตภาชนะเซรามิกและช่างสีรถยนต์ และเมื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคในแต่ละอนุภาคพบว่าเพียงบางอนุภาคที่มีธาตุอื่นเป็นองค์ประกอบเหมือนอนุภาคเขม่าปืนชนิด Lead-free กล่าวคือ อนุภาคที่ได้จากช่างติดตั้งและซ่อมกระบอกปืน-6 มีธาตุองค์ประกอบเหมือนกับอนุภาคเขม่าปืน Winchester WinClean™ และช่างสีรถยนต์-4 มีธาตุองค์ประกอบเหมือนกับอนุภาคเขม่าปืน Remington/UMC LeadLess™ โดยไม่พบว่ามีอนุภาคจากการประกอบอาชีพใดๆ ที่มีธาตุองค์ประกอบเหมือนกันกับอนุภาคเขม่าปืน Federal BallisticClean™, Speer Lawman CleanFire™ และ (CBC) CleanRang® เมื่อทำการศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณ (morphology) พบว่าอนุภาคที่ได้รับจากแหล่งกำเนิดในการประกอบอาชีพมีสัญญาณที่แตกต่างไปจากอนุภาคเขม่าปืนของชนิด Lead-free เช่นนี้ การศึกษาวิจัยได้ผลการศึกษาเป็นไปตามสมมติฐานที่ว่า หากอนุภาคที่ได้มาจากแหล่งกำเนิดในการประกอบอาชีพมีธาตุอื่นเป็นองค์ประกอบเช่นเดียวกับอนุภาคของเขม่าปืนชนิด Lead-free อนุภาคนั้นย่อมมีลักษณะสัญญาณ (morphology) แตกต่างไปจากอนุภาคเขม่าปืนของกระสุนปืนชนิด Lead-free ทั้งนี้ ไม่พบว่ามีอนุภาคจากการประกอบอาชีพใดๆ ของกลุ่มตัวอย่างที่มีธาตุองค์ประกอบเหมือนกันกับอนุภาคเขม่าปืน Federal BallisticClean™, Speer Lawman CleanFire™ และ (CBC) CleanRang®

อย่างไรก็ตาม ยังมีอนุภาคที่ไม่มีลักษณะทรงกลมที่ขนาด 1-15 μm ปรากฏอยู่เป็นจำนวนมาก ทั้งยังพบว่ามีอนุภาคทรงกลมขนาดใหญ่กว่า 15 μm ซึ่งยังไม่พบ ทั้งในการศึกษานี้ค้นหาโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างที่เตรียมด้วยตา (manual searching) เทคนิคนี้ทำให้การศึกษาวิจัยใช้เวลานาน ควรทำการเปรียบเทียบกับ การตรวจวิเคราะห์แบบ automatic searching เพื่อศึกษาหาวิธีตรวจวิเคราะห์ที่รวดเร็วยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1. Wallace JS, McQuillan J. Discharge residues from cartridge-operated industrial tools. Journal of Forensic Science Society. 1984; 24(3): 495-508.
2. Wolten GM, Calloway AR, Loper GL, Nesbitt RS. Particle analysis for the detection of gunshot residue II: occupational and environmental particles. Journal of Forensic Science. 1979; 24(2): 533-545.

3. Garofano L, Capra M, Ferrari F, Bizzaro GP, Di Tullio D, Dell'Olio M, Ghitti A. Gunshot residue further studies on particles of environmental and occupational origin. *Forensic Science International*. 1999; 103(1): 1-21.
4. Schwoeble AJ, Exline DL. *Current methods in forensic gunshot residue analysis*. Florida: CRC Press; 2000.
5. Romolo FS, Margot P. Identification of gunshot residue: a critical review. *Forensic Science International*. 2001; 119(2): 195-211.
6. Brozek-Mucha Z, Jankowicz A. Evaluation of the possibility of differentiation between various types of ammunition by means of GSR examination with SEM-EDX method. *Forensic Science International*. 2001; 123(1): 39-47.
7. Sarkis JES, Neto ON, Viebig S, and Durrant SF. Measurements of gunshot residues by sector field inductively coupled plasma mass spectrometry-further studies with pistols. *Forensic Science International*. 2007; 172(1): 63-66.
8. Niewoehner L, Andrasko J, Biegstraaten J, Gunaratnam L, Steffen S, Uhlig S, Antoni S. GSR 2005-continuity of ENFSI proficiency test on identification of GSR by SEM/EDX. *Journal of Forensic Science*. 2008; 53(1): 162-167.
9. Cardinetti B, Ciampini C, D'Onofrio C, Orlando G, Gravina L, Ferrari F, Di Tullio D, Torresi L. X-ray mapping technique: a preliminary study in discriminating gunshot residue particles from aggregates of environmental occupational origin. *Forensic Science International*. 2004; 143 (1): 1-19.
10. Martiny A, Campos APC, Sader MS, Pinto MAL. SEM/EDS Analysis and characterization of gunshot residues from Brazilian lead-free ammunition. *Forensic Science International*. 2008; 177(1): e9-e17.
11. Oommen Z, Pierce SM. Lead-free primer residues: a qualitative characterization of Winchester Win CleanTM, Remington/UMC LeadLessTM, Federal BallisticCleanTM, and Speer Lawman CleanFireTM handgun ammunition. *Journal of Forensic Science*. 2006; 51(3): 509-519.
12. Kilty JW. Activity after shooting and its effect on the retention of primer residue. *Journal of Forensic Science*. 1975; 20(2): 219-230.
13. Jalanti T, Henchoz P, Gallusser A, Bonfanti MS. The persistence of gunshot residue on shooter's hand. *Science & Justice*. 1999; 39(1): 48-52.
14. Nesbitt RS, Wessel JE, Jones RF. Detection of gunshot residue by use of the scanning electron microscope. *Journal of Forensic Science*. 1976; 21(3): 595-610.
15. Morales BE, Vazquez RAL. Simultaneous determination of inorganic and organic gunshot residues by capillary electrophoresis. *Journal of Chromatography A*. 2004; 1061(2): 225-233.
16. Basu S. Formation of gunshot residues. *Journal of Forensic Science*. 1982; 27(1): 72-91.
17. Thornton JJ. The chemistry of death by gunshot. *Analytica Chimica Acta*. 1994; 288(1-2): 71-81.

18. Meng HH, Caddy B. High performance liquid chromatographic analysis with fluorescence detection of Ethyl Centralite and 2,4-dinitrotoluene in gunshot residues after derivatization with 9-fluorenylmethylchloroformate. *Journal of Forensic Science*. 1996; 41(2): 213-220.
19. Flynn J, Stoilovica M, Lennarda C, Priora I, Kobus H. Evaluation of X-ray microfluorescence spectrometry for the elemental analysis of firearm discharge residues. *Forensic Science International*. 1998; 97(1): 21-36.
20. Fojtasek L, Vacnova J, Kolar P, Kotrly M. Distribution of GSR particles in the surroundings of shooting pistol. *Forensic Science International*. 2003; 132(2): 99-105.
21. Fojtasek L, Kmjec T. Time periods of GSR particles deposition after discharge-final results. *Forensic Science International*. 2005; 135(2-3): 132-135.

ตารางที่ 1 รูปสัณฐานและธาตุอันเป็นองค์ประกอบหลักของอนุภาคที่ได้มาจากกระสุนปืนชนิด Lead-free ตาม
 รายงานการวิจัยที่ศึกษาไว้โดย Oommen และ Pierce (2006)

	Particle Elements	Shape	Morphology	
			Size (µm)	Texture
Winchester	Cu + Zn	Spherical	0.5-6	Smooth
WinClean™	K + Al + Si + Na	Spherical/ “teardrop”	6-10	Orange peel
	Al + Na, Ca, or Mg	Spherical	6-10	Smooth
Remington/UMC	Cu + Zn	Spherical	1-6	Smooth
LeadLess™	Al, Si, K (trace Na)	Spherical	5-15	Smooth/pocked
	Al, Si, K (Na or Ca)	Varied	20+	Smooth to angular
Federal	Cu + Sn	Spherical	1-6	Smooth
BallisticClean™	Al, Si, Ba, K (Na)	Spherical	4-10	Heavily pocked
	Al, Si, Ba, K (Na)	Irregular (globular)	10-35	“Rockpile”
Speer Lawman	Cu or Cu + Zn	Spherical	2-5	Spherical
CleanFire™	Sr, Al/Si, or Cl	Spherical	3-20	Crackled
	Sr, Al/Si, or Cl	Spherical	20+	Heavily fissured

ตารางที่ 2 สภาวะที่ใช้ในการศึกษาวิจัยของ SEM/EDX

สภาวะที่ใช้ในการศึกษาวิจัย	ค่าที่ตั้ง
1. ค่าศักย์ไฟฟ้าเร่งอิเล็กตรอน (accelerating voltage)	15 kV
2. ความแยกชัดในภาวะสูญญากาศต่ำ (working distance)	4.5 mm
3. กำลังขยายภาพ (magnification)	5000x
4. พลังงาน EDX (EDX acquisition energy)	1-15 keV

ตารางที่ 3 ธาตุองค์ประกอบของตัวอย่างอนุภาคเขม่าที่ได้รับมาจากการประกอบอาชีพ ซึ่งประกอบไปด้วยธาตุที่เป็นองค์ประกอบของอนุภาคเขม่าป็นชนิด Lead-free

Sample - particle	Composition
ช่างติดตั้งและซ่อมกระจกรยนต์ - 2	Al, Si, K, Ca, Fe, (trace Na)
ช่างติดตั้งและซ่อมกระจกรยนต์ - 3	Na, Al, Si, K, Ca, Fe, (trace Mg)
ช่างติดตั้งและซ่อมกระจกรยนต์ - 4	Al, Si, K, Fe
ช่างติดตั้งและซ่อมกระจกรยนต์ - 5	Mg, Al, Si, K, Fe
ช่างติดตั้งและซ่อมกระจกรยนต์ - 6*	Na, Al, Si, (trace K)
ช่างติดตั้งและซ่อมกระจกรยนต์ - 7	Al, Si, K, Fe, (trace Na)
ช่างติดตั้งและซ่อมกระจกรยนต์ - 8	Al, S, K, Ca, (trace Si)
คนงานโรงงานเซรามิก - 2	Al, Si, K
ช่างสีรถยนต์ - 4*	Al, Si, (trace K, Na, Ca)

* แสดงอนุภาคที่ธาตุองค์ประกอบของอนุภาคเขม่าจากตัวอย่างที่ได้จากการประกอบอาชีพซึ่งมีธาตุอันเป็นองค์ประกอบเหมือนอนุภาคเขม่าป็นชนิด Lead-free

ตารางที่ 4 ธาตุองค์ประกอบของตัวอย่างอนุภาคเขม่าที่ได้จากการประกอบอาชีพ ซึ่งมีธาตุอันเป็นองค์ประกอบเหมือนอนุภาคเขม่าป็นชนิด Lead-free

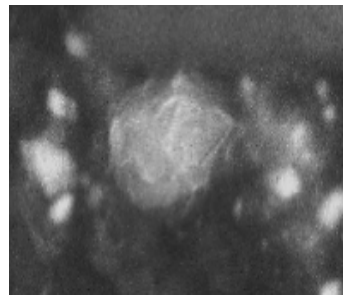
Sample - particle; Composition	Ammunition; Composition
ช่างติดตั้งและซ่อมกระจกรยนต์ - 6; Na, Al, Si, (trace K)	Winchester WinClean TM ; K + Al + Si + Na,
ช่างสีรถยนต์ - 4; Al, Si, (trace K, Na, Ca)	Remington/UMC LeadLess TM ; Al, Si, K, (trace Na or Ca)

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบรูปลักษณะของตัวอย่างอนุภาคเขม่าที่ได้จากการประกอบอาชีพ ซึ่งมีธาตุอันเป็นองค์ประกอบเหมือนอนุภาคเขม่าป็นชนิด Lead-free

Particle	Shape	Morphology	
		Size (µm)	Texture
ช่างติดตั้งและซ่อมกระจกรยนต์ - 6	Spheroid	5	Not smooth
Winchester WinClean TM	Spherical	5-15	Orange peel
ช่างสีรถยนต์ - 4	Globular	10	Not smooth
Remington/UMC LeadLess TM	Spherical	5-15	Smooth / Pocked

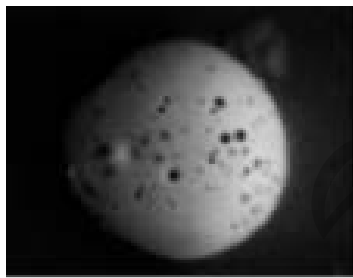


(1)

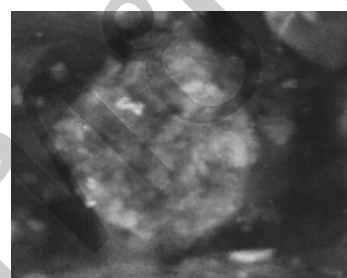


(2)

ภาพที่ 1 BSE Image (1) อนุภาคเขม่าจากกระสุนปืน Winchester WinClean™ รูปร่างกลมมน (regular spherical) พื้นฐานของอนุภาคมีผิวคล้ายผิวเปลือกส้ม (orange peel) (2) อนุภาคที่ได้จากมือช่างติดตั้งและซ่อมกระบอกปืน ซึ่งมีรูปร่างค่อนข้างกลม (spheroid) และผิวอนุภาคมีลักษณะที่ไม่เรียบ คล้ายมีรอยแตกหรือรอยร้าว

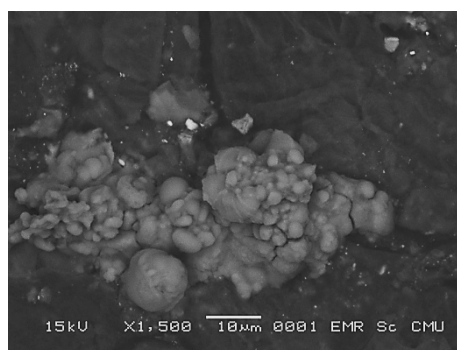


(1)



(2)

ภาพที่ 2 BSE Image (1) อนุภาคเขม่าจากกระสุนปืน Remington/UMC LeadLess™ ซึ่งปกติมีผิวลักษณะเรียบ โดยพบว่ามีหลุมเมื่ออนุภาคมีขนาด 5-15 μm (2) อนุภาคที่ได้จากมือช่างสีรถยนต์ - 4 มีขนาด 10 μm ที่ประกอบด้วยธาตุ Na (trace), Al (minor), Si (major), K (trace), Ca (trace) ซึ่งมีรูปร่างค่อนข้างกลม (irregular spherical/globular) และผิวอนุภาคมีลักษณะไม่เรียบ



ภาพที่ 3 BSE Image ตัวอย่างที่เก็บจากมือเปล่าเพื่อเป็นตัวอย่างเปรียบเทียบ (handblank sample)