



ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเขม่าป็นบนเสื้อผ้าของผู้ยิงปืนและระยะเวลาภายหลังการยิงปืนที่
วิเคราะห์โดยเทคนิค Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry (ICP – MS)

โดย

ร้อยตำรวจโทหญิงอัจฉราภรณ์ ประสงค์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเขม่าป็นบนเสื้อผ้าของผู้ยิงปืน และระยะเวลาภายหลังการยิงปืนที่
วิเคราะห์โดยเทคนิค Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry (ICP – MS)

โดย

ร้อยตำรวจโทหญิงอัจฉราภรณ์ ประสงค์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**THE RELATIONSHIP BETWEEN THE AMOUNTS OF GUNSHOT RESIDUES ON THE
CLOTHES OF THE SHOOTER AND THE TIME PERIODS AFTER SHOOTINGS BY
INDUCTIVELY COUPLED PLASMA – MASS SPECTROMETRY (ICP – MS)
TECHNIQUES**

By

Police Lieutenant Atcharaporn Prasong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree

MASTER OF SCIENCE

Program of Forensic Science

Graduate School

SILPAKORN UNIVERSITY

2009

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเขม่าป็นบนเสื้อผ้าของผู้ยิงปืนและระยะเวลาภายหลังการยิงปืน ที่วิเคราะห์โดยเทคนิค Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry (ICP - MS) ” เสนอโดย ร้อยตำรวจโทหญิง อัจฉราภรณ์ ประสงค์ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ชินะตั้งกูร)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

1. อาจารย์ ดร.ศิริรัตน์ ชูสกุลเกรียง
2. อาจารย์ ดร.ศุภชัย ศุภลักษณ์นารี
3. ว่าที่พันตำรวจตรีหญิงพิมพ์อร บัวจรัส

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรงค์ นิมพาลี)

...../...../.....

..... กรรมการ

(พลตำรวจตรี โกสินทร์ หินขาว)

...../...../.....

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ศิริรัตน์ ชูสกุลเกรียง)

...../...../.....

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ศุภชัย ศุภลักษณ์นารี)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ว่าที่พันตำรวจตรีหญิงพิมพ์อร บัวจรัส)

...../...../.....

50312340 : สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์

คำสำคัญ : เม่่าปืน / เทคนิค ICP - MS

อรรถาธิบาย ประสงค์ : ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเม่่าปืนบนเนื้อผ้าของผู้ยิงปืนและระยะเวลาภายหลังการยิงปืนที่วิเคราะห์โดยเทคนิค Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry (ICP - MS). อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อ.ดร.ศิริรัตน์ ชูสกุลเกรียง, อ.ดร.ศุภชัย ศุภลักษณ์นารี และ ว่าที่พ.ต.ต.หญิงพิมพ์อร บัวจำรัส. 116 หน้า.

ในงานวิจัยนี้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเม่่าปืน (Gunshot Residues, GSR) บนเนื้อผ้าของผู้ยิงปืนกับระยะเวลาภายหลังยิงปืน โดยเลือกศึกษาผ้า 3 ชนิด ได้แก่ ผ้าฝ้ายที่ใช้ในการผลิตเสื้อยืด ผ้าโพลีเอสเตอร์ที่ใช้ในการผลิตเสื้อเชิ้ต และผ้าซาตินที่ใช้ในการผลิตเสื้อแจ๊คเก็ต อาวุธปืนที่ใช้ ได้แก่ ปืนพกอโตเมติก ขนาด 9 มม. LUGER และปืนพกรีวอลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL โดยวิเคราะห์หาปริมาณแอนติโมนี (Sb), แบเรียม (Ba) และตะกั่ว (Pb) ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในเม่่าปืน (Gunshot Residue) ผู้วิจัยใช้เทคนิค Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry และใช้ปริมาณของธาตุทั้งสามธาตุเป็นการวัดปริมาณของเม่่าปืน ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่าง ได้แก่ เก็บทันทีภายหลังยิงปืน, เก็บตัวอย่าง 1 วัน, 7 วัน และ 30 วัน ภายหลังยิงปืน

จากผลการทดลอง พบว่า เมื่อใช้ปืนพกอโตเมติก ปริมาณของธาตุทั้งสามธาตุที่วัดได้มีมากที่สุดในตัวอย่งจากแขนเสื้อด้านขวาของผ้าซาตินที่ใช้ในการผลิตเสื้อแจ๊คเก็ต ตั้งแต่บริเวณข้อมือถึงข้อศอกของแขนเสื้อ และพบว่าปริมาณของเม่่าปืนลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะเวลา ก่อนเก็บตัวอย่าง

สำหรับ การศึกษาโดยใช้ปืนพกรีวอลเวอร์ ผลการทดลองคล้ายคลึงกัน คือ พบเม่่าปืนมากที่สุดบนผ้าซาตินที่ใช้ในการผลิตเสื้อแจ๊คเก็ต แต่เป็นจากแขนเสื้อด้านซ้ายของผ้าซาตินที่ใช้ในการผลิตเสื้อแจ๊คเก็ต ตั้งแต่บริเวณข้อมือถึงข้อศอกของแขนเสื้อ และพบการลดลงของการคงอยู่ของเม่่าปืนตามระยะเวลา เช่นเดียวกัน

สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ 1. 2. 3.

50312340 : MAJOR : FORENSIC SCIENCE

KEY WORDS : GUNSHOT RESIDUES / ICP - MS TECHNIQUES

ATCHARAPORN PRASONG : THE RELATIONSHIP BETWEEN THE AMOUNTS OF GUNSHOT RESIDUES ON THE CLOTHES OF THE SHOOTER AND THE TIME PERIODS AFTER SHOOTINGS BY INDUCTIVELY COUPLED PLASMA - MASS SPECTROMETRY (ICP - MS) TECHNIQUES. THESIS ADVISORS : SIRIRAT CHOOSAKOONKRIANG, Ph.D, SUPACHAI SUPALAKNARI, Ph.D, POL.MAJ. PIMORN BUACHAMRAS. 116 pp.

In this work, the relationship between the amounts of Gunshot Residues (GSR) on the clothes of the shooter and the time periods after shootings was investigated. Three types of clothes were chosen in this study namely, a cotton T – shirt, a polyester shirt and a satin jacket. A 9 mm. LUGER automatic pistol and a .38 SPECIAL revolver were used. The contents of antimony (Sb), barium (Ba) and lead (Pb) in the samples were determined by the Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry and used as measures of the amounts of GSR. The samples were collected immediately and at 1 day, 7 days and 30 days after shootings.

It was found that, with the 9 mm. LUGER automatic pistol the largest amounts of the three elements were measured from the samples taken along the right sleeve of the satin jacket, from the wrist to the elbow parts of the sleeve.

The amount of the GSR on the clothes decreased with the increase of time lag before collecting the sample. For the study with the revolver, similar results can be observed, that is the largest amount of the GSR was found on the satin jacket but on various parts of the left sleeve. A similar decrease in the GSR persistence with time was observed.

Program of Forensic Science Graduate School, Silpakorn University Academic Year 2009
Student's signature
Thesis Advisors' signature 1. 2. 3.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก อาจารย์ ดร.ศิริรัตน์ ชุสกุลเกรียง, อาจารย์ ดร.ศุภชัย สุกลักษณ์นารี, ว่าที่พันตำรวจตรีหญิงพิมพ์อร บัวจำรัส ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและคำปรึกษาในทุกขั้นตอนของการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ อีกทั้งให้ความช่วยเหลือแก้ไขปรับปรุงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์และสำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณกลุ่มงานตรวจอาวุธปืนและเครื่องกระสุน กองพิสูจน์หลักฐานกลาง สำนักงานพิสูจน์หลักฐานตำรวจ สำนักงานตำรวจแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ทำการทดลอง, เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณพันตำรวจตรีเชิดพงษ์ ชุกกลิน, พันตำรวจตรีชนงศักดิ์ บุญมาก ที่คอยให้ความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์อาวุธปืนที่ใช้ในการทดลอง, สิบบตำรวจโทธงชัย จวนเจริญ ที่ให้ความช่วยเหลือในขั้นตอนของการเก็บตัวอย่าง รวมทั้งผู้ที่ไม่ได้กล่าวนามทุกท่าน ซึ่งมีส่วนช่วยเหลือจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบผลสำเร็จได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ คุณค่าและประโยชน์จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นเครื่องบูชาพระคุณแต่บิดา มารดา และพี่ชาย ของผู้วิจัยที่ได้คอยให้กำลังใจจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญภาพ	ด
บทที่	
1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
สมมติฐานของการวิจัย	2
ขอบเขตของการวิจัย	2
ตัวแปรที่ศึกษา	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
ความหมายของเขม่าป็น	4
ประเภทของเขม่าป็น	5
ที่มาของเขม่าป็น	5
การเกิดเขม่าป็น	7
การคงอยู่ของเขม่าป็น	9
อาวุธป็นและเครื่องกระสุนป็น	9
ผ้า	28
ประเภทของเส้นใย	32
ผ้าฝ้ายที่ใช้ในการผลิตเสื้อยืด	39
ผ้าโพลีเอสเตอร์ที่ใช้ในการผลิตเสื้อยืด	42
ผ้าซาตินที่ใช้ในการผลิตเสื้อยืด	42
หลักการพื้นฐานของเครื่อง Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry (ICP - MS)	43
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	57

บทที่	หน้า
3	วิธีดำเนินการวิจัย 61
	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย 61
	สารเคมีที่ใช้ในการทำวิจัย 62
	การเตรียมสารละลายมาตรฐาน 62
	วิธีการวิเคราะห์หาเขม่าป็น (GSR) บนเสื้อผ้าด้วยเทคนิค ICP – MS 63
4	ผลการวิจัยและอภิปรายผล 71
	ผลการวิเคราะห์จำนวนนัดของการยิง 71
	ผลการวิเคราะห์หาความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability) 71
	ผลการวิเคราะห์บริเวณที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง 71
	ผลการวิเคราะห์ปริมาณเขม่าป็นบนผ้าแต่ละชนิด 74
	ผลการวิเคราะห์ปริมาณเขม่าป็นในบริเวณต่างๆ ที่ทำการเก็บตัวอย่าง 76
	ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเขม่าป็นบนผ้าแต่ละชนิด กับระยะเวลา 78
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 81
	ข้อเสนอแนะ 82
บรรณานุกรม 83
ภาคผนวก 85
	ภาคผนวก ก กราฟมาตรฐานของการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุแอนติโมนี แบบเรียบ และตะกั่ว บนเสื้อผ้าแต่ละชนิด โดยเทคนิค ICP – MS 86
	ภาคผนวก ข ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุแอนติโมนี แบบเรียบ และตะกั่ว บนเสื้อผ้าแต่ละชนิด 92
	ภาคผนวก ค การหาประสิทธิภาพของการวิเคราะห์ 94
	ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแอนติโมนี แบบเรียบ และตะกั่ว บนเสื้อผ้าแต่ละชนิด โดยเทคนิค ICP – MS 96
ประวัติผู้วิจัย 116

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ธาตุโลหะสำคัญที่มีใน Primer Cap	8
2	ขนาดของเส้นใยธรรมชาติ	35
3	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	61
4	สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	62
5	การเตรียมสารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบเรียม ตะกั่ว	63
6	สถานะของเครื่อง Inductively Couple Plasma – Mass Spectrometer	69
7	ผลการวิเคราะห์หาความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability)	72
8	ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบเรียม และตะกั่ว ความเข้มข้นที่ 1	87
9	ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบเรียม และตะกั่ว ความเข้มข้นที่ 2	88
10	ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบเรียม และตะกั่ว ความเข้มข้นที่ 3	89
11	ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบเรียม และตะกั่ว ความเข้มข้นที่ 4	90
12	ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบเรียม และตะกั่ว ความเข้มข้นที่ 5	91
13	ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแอนติโมนี แบเรียม และตะกั่ว ในผ้าฝ้ายที่ใช้ในการผลิตเสื้อยืด โดยใช้ปืนพกอัตโนมัติ ขนาด 9 mm.LUGER	97
14	ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb) ในผ้าฝ้ายที่ใช้ในการผลิต เสื้อยืดโดยใช้ปืนพกอัตโนมัติ ขนาด 9 mm.LUGER	98
15	ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแบเรียม (Ba) ในผ้าฝ้ายที่ใช้ในการผลิต เสื้อยืดโดยใช้ปืนพกอัตโนมัติ ขนาด 9 mm.LUGER	99
16	ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุตะกั่ว (Pb) ในผ้าฝ้ายที่ใช้ในการผลิต เสื้อยืดโดยใช้ปืนพกอัตโนมัติ ขนาด 9 mm.LUGER	100

ตารางที่		หน้า
17	ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb) ในผ้าโพลีเอสเตอร์ที่ใช้ในการผลิตเสื้อเชิ้ตโดยใช้ปืนพกออตโตเมติก ขนาด 9 mm.LUGER	101
18	ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแบเรียม (Ba) ในผ้าโพลีเอสเตอร์ที่ใช้ในการผลิตเสื้อเชิ้ตโดยใช้ปืนพกออตโตเมติก ขนาด 9 mm.LUGER	102
19	ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุตะกั่ว (Pb) ในผ้าโพลีเอสเตอร์ที่ใช้ในการผลิตเสื้อเชิ้ตโดยใช้ปืนพกออตโตเมติก ขนาด 9 mm.LUGER	103
20	ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb) ในผ้าซาตินที่ใช้ในการผลิตเสื้อแจ็กเก็ตโดยใช้ปืนพกรีวอลเวอร์ ขนาด 9 mm.LUGER	104
21	ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแบเรียม (Ba) ในผ้าซาตินที่ใช้ในการผลิตเสื้อแจ็กเก็ตโดยใช้ปืนพกรีวอลเวอร์ ขนาด 9 mm.LUGER	105
22	ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุตะกั่ว (Pb) ในผ้าซาตินที่ใช้ในการผลิตเสื้อแจ็กเก็ตโดยใช้ปืนพกรีวอลเวอร์ ขนาด 9 mm.LUGER	106
23	ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb) ในผ้าฝ้ายที่ใช้ในการผลิตเสื้อยืดโดยใช้ปืนพกรีวอลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL	107
24	ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแบเรียม (Ba) ในผ้าฝ้ายที่ใช้ในการผลิตเสื้อยืดโดยใช้ปืนพกรีวอลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL	108
25	ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุตะกั่ว (Pb) ในผ้าฝ้ายที่ใช้ในการผลิตเสื้อยืดโดยใช้ปืนพกรีวอลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL	109
26	ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb) ในผ้าโพลีเอสเตอร์ที่ใช้ในการผลิตเสื้อเชิ้ตโดยใช้ปืนพกรีวอลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL	110
27	ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแบเรียม (Ba) ในผ้าโพลีเอสเตอร์ที่ใช้ในการผลิตเสื้อเชิ้ตโดยใช้ปืนพกรีวอลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL	111
28	ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุตะกั่ว (Pb) ในผ้าโพลีเอสเตอร์ที่ใช้ในการผลิตเสื้อเชิ้ตโดยใช้ปืนพกรีวอลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL	112
29	ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb) ในผ้าซาตินที่ใช้ในการผลิตเสื้อแจ็กเก็ต โดยใช้ปืนพกรีวอลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL	113
30	ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแบเรียม (Ba) ในผ้าซาตินที่ใช้ในการผลิตเสื้อแจ็กเก็ต โดยใช้ปืนพกรีวอลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL	114

ตารางที่		หน้า
31	ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแบเรียม (Pb) ในผ้าซาตินที่ใช้ในการผลิต เสื้อแจ็กเก็ต โดยใช้ปืนพกวีวอลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL	115

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	เขม่าปืน หรือ Gunshot Residues ; GSR	4
2	ส่วนประกอบของกระสุนปืนและแก๊ปปืน	5
3	โครงสร้างทางเคมีของ Lead styphnate [$PbC_6H(NO_2)_3O_2$]	6
4	กราฟ แสดงความดัน และ อุณหภูมิ ณ ช่วงเวลาต่างๆที่เกิดจากการเผาไหม้ ของ Primer Cap และ ดินสักระสุนปืน	7
5	บริเวณที่เขม่าปืนสามารถออกมาได้ ในปืนพกหรือลเวอ์	8
6	บริเวณที่เขม่าปืนสามารถออกมาได้ ในปืนพกอัตโนมัติ	9
7	ส่วนของอาวุธปืนที่มีความสำคัญให้ถือเป็นอาวุธปืน ตามความในมาตรา ๔(๑)	10
8	ปืนสั้นที่ทำจากต่างประเทศ	12
9	ปืนสั้นที่ทำเองภายในประเทศ	13
10	ปืนยาวที่ทำจากต่างประเทศ	14
11	ปืนยาวที่ทำขึ้นเองภายในประเทศ	15
12	ปืนที่มีเกลียวภายในลำกล้อง	16
13	ปืนที่ไม่มีเกลียวภายในลำกล้อง	17
14	ส่วนประกอบกระสุนปืนลูกโคด	19
15	ลูกกระสุนปืนแบบต่างๆ	19
16	ปลอกกระสุนปืนแบบต่างๆ	23
17	ดินดำ (Black Powder)	24
18	ดินดำแบบใหม่ (Pyrodex)	24
19	ดินควันน้อยรูปร่างต่างๆ	25
20	ชนวนจันท้ายกระสุนปืน หรือ แก๊ปปืน	25
21	ส่วนประกอบของกระสุนปืนลูกซอง	26
22	กระสุนปืนลูกซองขนาดต่างๆ	27
23	ปากปลอกกระสุนปืนแบบต่างๆ	27
24	ส่วนประกอบของผ้า	28
25	รูปร่างหน้าตัดขวางของเส้นใย	36
26	องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่อง ICP – MS	44

ภาพที่		หน้า
27	กระบวนการเกิดปฏิกิริยาของเครื่อง ICP-MS	45
28	กระบวนการต่างๆ ที่เกิดในพลาสมา	49
29	การทำงานของ quadrupole mass analyzer	51
30	ห้องทดสอบยิงปืน	64
31	ห้องเก็บตัวอย่าง	65
32	อาวุธปืนพกอัตโนมัติ ขนาด 9 มม. LUGER	65
33	กระสุนปืนอัตโนมัติ ขนาด 9 มม. LUGER	65
34	อาวุธปืนพกไรฟอลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL	66
35	กระสุนปืนไรฟอลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL	66
36	เสื้อผ้าตัวอย่างที่ใช้ในการเก็บเขม่าปืน	66
37	ลักษณะท่าทางที่ทำการยิงด้วยอาวุธปืน	67
38	อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บเขม่าปืน	68
39	ปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb), แบเรียม (Ba) และตะกั่ว (Pb) ในการยิงปืนพกอัตโนมัติ ขนาด 9 มม. LUGER จำนวน 1 นัด	72
40	ปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb), แบเรียม (Ba) และตะกั่ว (Pb) ในการยิงปืนพกอัตโนมัติ ขนาด 9 มม. LUGER จำนวน 3 นัด	74
41	ปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb), แบเรียม (Ba) และตะกั่ว (Pb) ในแต่ละบริเวณที่ทำการเก็บตัวอย่าง	73
42	ปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb) , แบเรียม (Ba) และตะกั่ว (Pb) บนเสื้อผ้าแต่ละชนิด ในปืนปืนพกอัตโนมัติ ขนาด 9 มม. LUGER	74
43	ปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb) , แบเรียม (Ba) และตะกั่ว (Pb) บนเสื้อผ้าแต่ละชนิด ในปืนปืนพกไรฟอลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL	75
44	ปริมาณเขม่าปืนในปืนพกอัตโนมัติ ขนาด 9 มม. LUGER ในบริเวณต่างๆที่ทำการเก็บตัวอย่าง	76
45	ปริมาณเขม่าปืนในปืนพกไรฟอลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL ในบริเวณต่างๆ ที่ทำการเก็บตัวอย่าง	77
46	บริเวณที่เขม่าปืนพุ่งออกมาของปืนพกไรฟอลเวอร์	78
47	บริเวณที่เขม่าปืนพุ่งออกมาของปืนพกอัตโนมัติ	78

ภาพที่		หน้า
48	การเปลี่ยนแปลงปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb) บนผ้าแต่ละชนิดกับระยะเวลา	79
49	การเปลี่ยนแปลงปริมาณของธาตุแบเรียม (Ba) บนผ้าแต่ละชนิดกับระยะเวลา	79
50	การเปลี่ยนแปลงปริมาณของธาตุตะกั่ว (Pb) บนผ้าแต่ละชนิดกับระยะเวลา	80
51	กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบเรียม และตะกั่ว ความเข้มข้น 10 – 20 – 40 ppb	87
52	กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบเรียม และตะกั่ว ความเข้มข้น 20 – 40 – 80 ppb	88
53	กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบเรียม และตะกั่ว ความเข้มข้น 40 – 80 – 160 ppb	89
54	กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบเรียม และตะกั่ว ความเข้มข้น 80 – 160 – 320 ppb	90
55	กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบเรียม และตะกั่ว ความเข้มข้น 160 – 320 – 640 ppb	91

บทที่ 1

บทนำ

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันพยานหลักฐานทางวิทยาศาสตร์เป็นที่ยอมรับในกระบวนการยุติธรรม ซึ่งถือเป็นสิ่งที่สามารถพิสูจน์ได้ว่า บุคคลผู้นั้นได้กระทำความผิดในคดีนั้นๆ มาหรือไม่ อย่างไร หรือมีส่วนเกี่ยวข้องกับกระทำความผิดหรือไม่ โดยจะเห็นได้ว่าปัญหาการประกอบอาชญากรรมมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ และสิ่งที่ถูกนำมาใช้ประกอบการกระทำผิดที่พบได้บ่อย ก็คือ อาวุธปืนนั่นเอง เนื่องจากระบบของการอนุญาตให้มีและให้ใช้อาวุธปืนในครอบครองของประเทศไทยนั้นสามารถกระทำได้โดยง่าย อีกทั้งอาวุธปืนก็สามารถหาได้ง่ายเช่นเดียวกัน เป็นผลให้เกิดปัญหาการก่ออาชญากรรม การฆาตกรรมตามมา ปัญหาเหล่านี้ล้วนแต่ส่งผลกระทบต่อสังคมเป็นอย่างมาก เป็นเหตุให้เกิดปัญหาในด้านของการตรวจพิสูจน์ตามมาด้วย ในแง่ที่ว่า บุคคลนั้นได้ผ่านการยิงปืนมาแล้ว หรือเกี่ยวข้องกับการใช้ปืนมาแล้วหรือไม่ รวมถึงว่าอาวุธปืนนั้นได้ผ่านการยิงมาแล้วหรือไม่ นานเท่าใด วิธีที่ถูกนำมาใช้ในการตรวจพิสูจน์ประเด็นปัญหาดังกล่าวในปัจจุบันนั้นประกอบไปด้วยวิธีการหาทราบเขม่าจากการยิงปืนที่มีอยู่ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายเทคนิค ได้แก่ เทคนิค Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM/EDX), เทคนิค Neutron Activation Analysis (NAA), เทคนิค Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) และ เทคนิค Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry (ICP – MS) (A.J. Schwoeble, David L. Exline, 2000)

ปัจจุบันทางกองพิสูจน์หลักฐานกลาง สำนักงานตำรวจแห่งชาติ ได้ใช้เทคนิค AAS และเทคนิค ICP – MS ในการตรวจพิสูจน์เขม่าปืนที่มีอยู่ เพราะสามารถเตรียมตัวอย่างและการหาปริมาณเขม่าปืนได้ง่าย นอกจากการตรวจหาเขม่าปืนบนมือของผู้ยิงปืนแล้ว ก็ยังมีวัตถุพยานอีกอย่างหนึ่งที่สามารถใช้ประกอบเป็นหลักฐานในคดีได้ ก็คือการตรวจหาเขม่าปืนบนเสื้อผ้าของผู้ยิงปืน ซึ่งในขณะนี้ทางกองพิสูจน์หลักฐานกลางได้ใช้วิธีการตรวจพิสูจน์ด้วยปฏิกิริยาการเกิดสีทางเคมี (Color test) ซึ่งยังไม่มีการนำเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพสูงมาใช้ในการยืนยันผลของการตรวจหาเขม่าปืนบนเสื้อผ้า

ในงานวิจัยนี้ ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเขม่าปืนบนเสื้อผ้าของผู้ยิงปืนกับระยะเวลา ภายหลังจากการยิงปืน โดยเทคนิค ICP – MS ซึ่งเป็นเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์

ธาตุในระดับต่ำมาก (Ultra trace Analysis) ได้อย่างรวดเร็ว และสามารถวิเคราะห์ธาตุในตัวอย่างได้มากกว่า 1 ธาตุในการวิเคราะห์แต่ละครั้ง (Multi-Element Analysis) สามารถควบคุมสิ่งรบกวนที่เกิดขึ้นได้ โดยทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเขม่าป็นซึ่งเป็นตัวชี้วัดตัวหนึ่งที่บ่งบอกให้ทราบว่าบุคคลผู้นั้นเกี่ยวข้องกับกำรยิงปืนหรือไม่

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเขม่าป็นบนเสื้อผ้าของผู้ยิงปืนกับระยะเวลาโดยศึกษาในรูปของการเปลี่ยนแปลงปริมาณของธาตุแอนติโมนี แบริยม และตะกั่ว

3. สมมติฐานของการวิจัย

ปริมาณของเขม่าป็นบนเสื้อผ้าของผู้ยิงปืนภายหลังจากการยิงปืนมีความสัมพันธ์กับระยะเวลา ภายหลังจากการยิงปืน

4. ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาในผ้าแต่ละชนิดที่ถูกนำมาทำเป็นเสื้อผ้าของผู้ยิงปืนและอาวุธปืนที่พบได้บ่อยในคดีต่างๆ

1. ชนิดของผ้าที่ใช้ในการทดลอง
 - 1.1 ผ้าฝ้ายที่ใช้ในการผลิตเสื้อยืด
 - 1.2 ผ้าโพลีเอสเตอร์ที่ใช้ในการผลิตเสื้อเชิ้ต
 - 1.3 ผ้าซาตินที่ใช้ในการผลิตเสื้อแจ็กเก็ต
2. อาวุธปืนและเครื่องกระสุนปืนที่ใช้ในการทดลอง
 - 2.1 ปืนพกรีวอลเวอร์และเครื่องกระสุนปืนรีวอลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL
 - 2.2 ปืนพกอโตเมติกและเครื่องกระสุนปืนอโตเมติก ขนาด 9 มม. LUGER
3. ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง ทำการเก็บเขม่าป็นที่ผ้าแต่ละชนิด โดยแบ่งออกเป็น
 - 3.1 เก็บทันที ภายหลังจากการยิงปืน
 - 3.2 เก็บภายหลังจากยิงปืนไปแล้ว 1 วัน
 - 3.3 เก็บภายหลังจากยิงปืนไปแล้ว 7 วัน
 - 3.4 เก็บภายหลังจากยิงปืนไปแล้ว 30 วัน

4. บริเวณต่างๆ ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง

- 4.1 ด้านหน้าเสื้อ
- 4.2 ด้านในเสื้อ
- 4.3 แขนเสื้อด้านซ้าย บริเวณหัวไหล่ – ข้อศอก
- 4.4 แขนเสื้อด้านซ้ายบริเวณ ข้อศอก – ข้อมือ
- 4.5 แขนเสื้อด้านขวา บริเวณหัวไหล่ – ข้อศอก
- 4.6 แขนเสื้อด้านขวา บริเวณ ข้อศอก – ข้อมือ
- 4.7 ด้านหลัง

5. ตัวแปรที่ศึกษา

ตัวแปรต้น คือ ปริมาณเขม่าป็นบนเสื้อผ้าแต่ละชนิด

ตัวแปรตาม คือ ระยะเวลาการคงอยู่ของเขม่าป็นบนเสื้อผ้าแต่ละชนิด

6. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. เพื่อทราบถึงระยะเวลาการคงอยู่ของเขม่าป็นบนเสื้อผ้า ภายหลังจากการยิงปืน
2. เพื่อทราบถึงบริเวณต่างๆ บนเสื้อผ้า ที่สามารถตรวจพบอนุภาคเขม่าป็น
3. เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลประกอบการสืบสวนสอบสวนคดีของเจ้าหน้าที่ตำรวจ
4. เพื่อเริ่มต้นทำให้เป็นมาตรฐานในการตรวจพิสูจน์ต่อไปในอนาคต
5. เพื่อวิเคราะห์ผลออกมาเป็นค่าความเข้มข้นได้

บทที่ 2

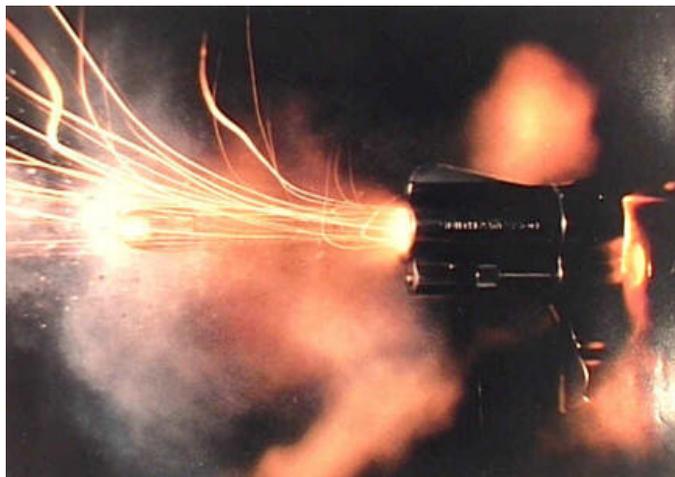
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. เอกสารที่เกี่ยวข้อง

1.1 ความหมายของเขม่าปืน (Gunshot Residue ; GSR) (อัมพร จารุจินดา 2542)

Gunshot Residue (GSR) คือ เขม่าปืน หรือ สิ่งที่หลงเหลือจากการยิงปืน ซึ่งก็หมายถึง สิ่งใดๆ รูปแบบหรือส่วนประกอบทั้งหมด ที่พุ่ง กระจาย ระเหยออกมาจากการยิงของอาวุธปืนซึ่ง เมื่อเกิดการยิงปืน GSR จะอยู่ในรูปต่างๆ ดังนี้

- 1.1.1 อนุภาคของดินปืนที่ถูกเผาไหม้
- 1.1.2 อนุภาคของดินปืนที่ถูกเผาไหม้บางส่วน
- 1.1.3 อนุภาคของดินปืนที่ไม่ถูกเผาไหม้
- 1.1.4 ไอของตะกั่ว
- 1.1.5 ส่วนประกอบต่างๆ ของโลหะ
- 1.1.6 รูปแบบของร่องรอยที่ถูกลูกกระสุนปืนยิง



ภาพที่ 1 เขม่าปืน หรือ Gunshot Residue ; GSR

ที่มา : เขม่าปืน [ออนไลน์], เข้าถึงเมื่อ 16 มกราคม 2553. เข้าถึงได้จาก http://www.firearmsid.com/A_distanceGSR.htm

1.2 ประเภทของเขม่าปืน

อนุภาคที่เกิดจากการยิงปืน สามารถจำแนกได้ 3 ประเภท คือ

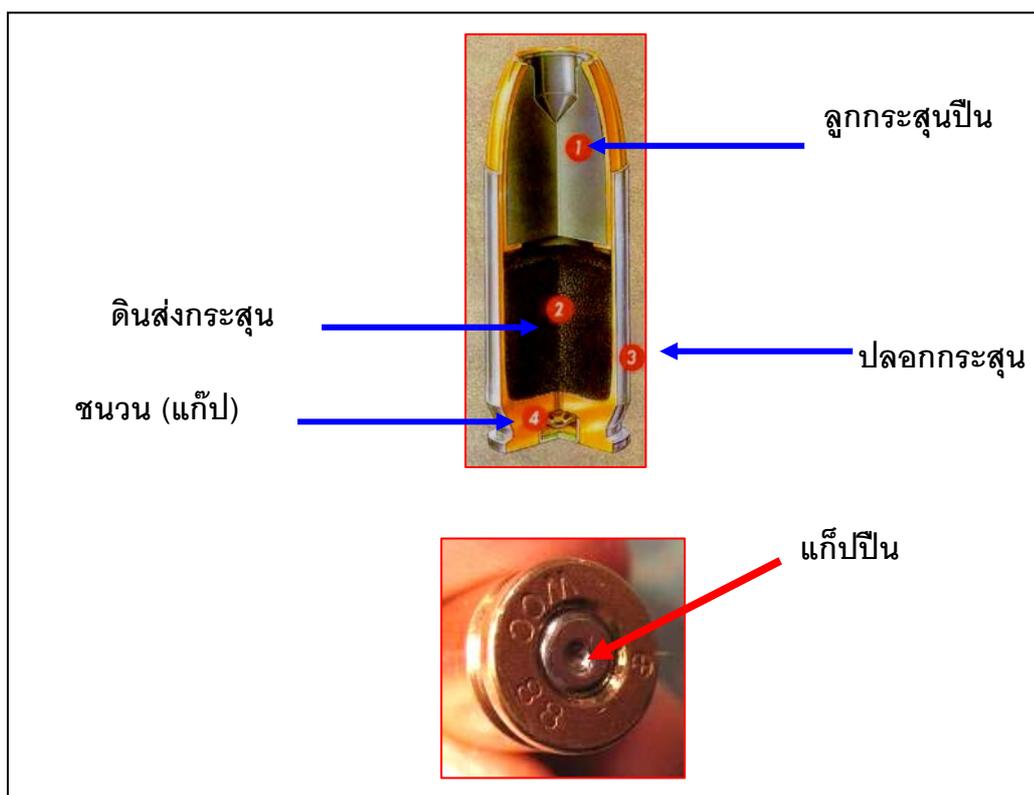
1.2.1 ประเภทที่แน่นอน (Exclusive / Unique GSR) : ถ้าตรวจพบธาตุเหล่านี้พร้อมกัน บอกได้แน่นอนว่ามีเขม่าปืน ได้แก่ Sb – Ba – Pb

1.2.2 ประเภทบ่งชี้ (Characteristic / Indicative GSR) : ถ้าตรวจพบธาตุเหล่านี้ น่าเชื่อได้ว่ามีเขม่าปืน ได้แก่ Si – Ba – Ca , Pb – Sb , Pb – Ba , Sb – S , Sb , Pb

1.2.3 ประเภทอื่นๆ (Other GSR) : ถ้าหากตรวจพบธาตุเหล่านี้ไม่อาจยืนยันได้ว่ามีเขม่าปืน ได้แก่ Ca , Cu , Fe , Ni , P , Si , S , Zn

1.3 ที่มาของเขม่าปืน

GSR Particles มาจากสารประกอบ (Priming Mixture) ในชนวนท้ายกระสุนปืน (Primer cap) หรือแก๊ปปืน (Primer) และดินปืน

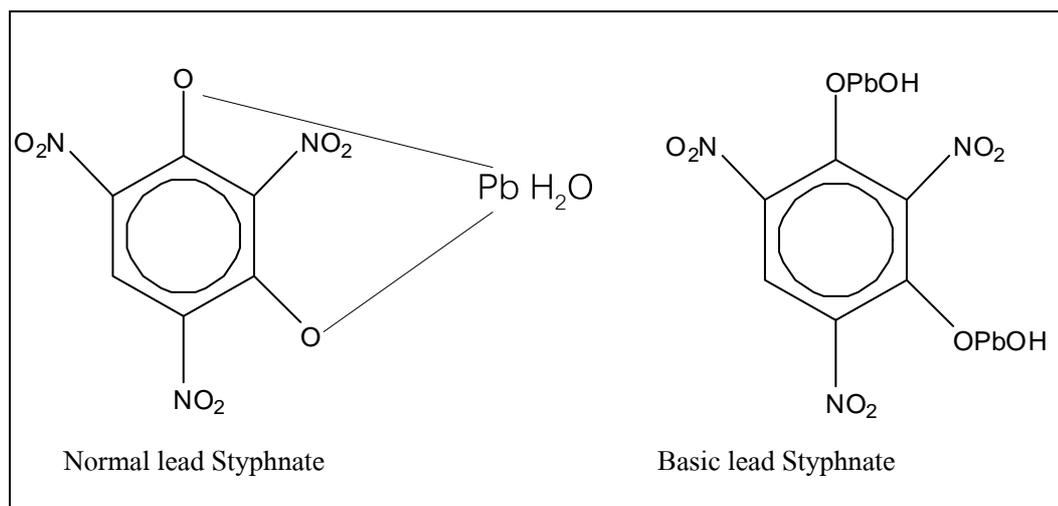


ภาพที่ 2 ส่วนประกอบของกระสุนปืน และแก๊ปปืน

ที่มา : อัมพร จารุจินดา, “การตรวจพิสูจน์อาวุธปืน เครื่องกระสุนปืน และเขม่าดินปืน,” เอกสารเผยแพร่ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับอาวุธปืนและกระสุนปืนสำหรับผู้เข้าอบรม กองพิสูจน์หลักฐาน สำนักงานวิทยาการตำรวจ, 2542. (อัครสำเนา)

1.3.1 Priming Mixture เป็นวัตถุระเบิดประเภทกระทบแตก ทำหน้าที่ให้ประกายไฟไปจุดกับดินส่่งกระสุนปืน โดยมีองค์ประกอบดังนี้ คือ

1.3.1.1 Initiator : ทำหน้าที่เป็นตัวเริ่มขบวนการของการจุดตัวเองจากการกระทบของเข็มแทงชนวน ซึ่งสารเคมีที่นิยมใช้ในปัจุบัน คือ Lead styphnate [$\text{PbC}_6\text{H}(\text{NO}_2)_3\text{O}_2$] ที่นิยมนำมาใช้เป็น Primary explosive มีอยู่ 2 ชนิดคือ Normal lead Styphnate และ Basic lead Styphnate ทั้ง Normal lead Styphnate และ Basic lead Styphnate ใช้เป็นส่วนประกอบสำคัญใน primary composition เพื่อทำหน้าที่เริ่มต้นขบวนการจุดระเบิดเป็นตัวประทุ โดย Normal lead Styphnate จะมีคุณสมบัติการเป็นดินเริ่มที่ดีกว่า Basic lead Styphnate เนื่องจาก Basic lead Styphnate เกิดพันธะแบบ Intermolecular Hydrogen Bonding ในการเป็น Initiator ของ Lead Styphnate นั้น เมื่อถูกกระตุ้นจนกระทั่งพลังงานขึ้นไปอยู่ในสภาวะ Transition State แล้วจะมีอีกตัวหนึ่งที่มาช่วยในการจุดระเบิด คือ Sensitizer ทำให้พลังงานสูงขึ้นจนเกิดการจุดระเบิดเกิดขึ้น คือ Ground Glass เนื่องจาก เมื่อเข็มแทงชนวนกระทบกับแก้วปืนแล้วบริเวณขอบแหลมของแก้วจะทำให้เกิดการเสียดสี เกิดปฏิกิริยาต่อไป



ภาพที่ 3 โครงสร้างทางเคมีของ Lead styphnate [$\text{PbC}_6\text{H}(\text{NO}_2)_3\text{O}_2$]

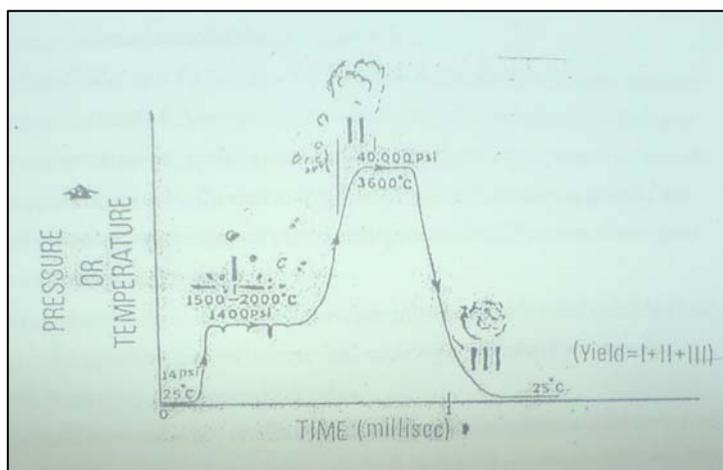
ที่มา : จิรวัชร ธนุรัตน์, “คู่มือการตรวจหาดินปืน เขม่าดินปืน ตะกั่ว และทองแดง ของลูกกระสุนปืน,” เอกสารเผยแพร่กองพิสูจน์หลักฐาน สำนักงานนิติวิทยาศาสตร์ตำรวจ, 2551.

1.3.1.2 Fuel : เป็นเชื้อเพลิงที่ทำให้การเผาไหม้ดำเนินต่อไปที่นำสนใจมากที่สุด คือ Antimony Sulfide (Sb_2S_3)

1.3.1.3. Oxidizing Agent : เป็นแหล่งให้ออกซิเจน เพื่อใช้สำหรับการสันดาปของ Fuel และ Initiator โดย Oxidizing Agent ที่นิยมคือ Barium nitrate ($\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$)

1.4 การเกิดเขม่าปืน

หลักการ ดินส่กระสุนปืนถ้าถูกเผาไหม้ในพื้นที่จำกัดจะทำให้เกิดแรงดันมหาศาลโดยเมื่อเกิดการยิงปืน เข็มแทงชนวนจะตีไปยังชนวนท้ายกระสุนปืน(Primer cap) ทำให้ชนวนท้ายกระสุนปืนเกิดการระเบิด เป็นผลให้อุณหภูมิจากสิ่งแวดล้อมกลายเป็น $1,500 - 2,000$ °C และความดันจะเปลี่ยนจาก 14 psi เป็น 1,400 psi จากนั้นเกิดประกายไฟผ่านช่อง Flash-hole ไปจุดติดกับดินส่กระสุนปืนทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างรวดเร็วในปลอกกระสุนปืนทำให้เกิดแรงดันมหาศาล ผลักส่งให้ลูกกระสุนปืนหลุดออกไปจากปลอกกระสุนปืน โดยในการระเบิดของแก๊ปปืนนี้จะทำให้อุณหภูมิจากสิ่งแวดล้อมเพิ่มสูงขึ้นเป็น $3,600$ °C และความดันสูงถึง 40,000 psi จากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมินี้เองเป็นผลให้โลหะที่เป็นส่วนประกอบของแก๊ปปืนหลอมละลายกลายเป็นไอ และเมื่ออุณหภูมิลดลง ไอของแต่ละธาตุจะแข็งตัวเป็นอนุภาค



ภาพที่ 4 กราฟแสดงความดัน และ อุณหภูมิ ณ ช่วงเวลาต่างๆที่เกิดจากการเผาไหม้ของ Primer Cap และ ดินส่กระสุนปืน

ที่มา : จิรวีชร ธนุรัตน์, “คู่มือการตรวจหาดินปืน เขม่าดินปืน ตะกั่ว และทองแดง ของลูกกระสุนปืน” เอกสารเผยแพร่กองพิสูจน์หลักฐาน สำนักงานนิติวิทยาศาสตร์ตำรวจ, 2551.

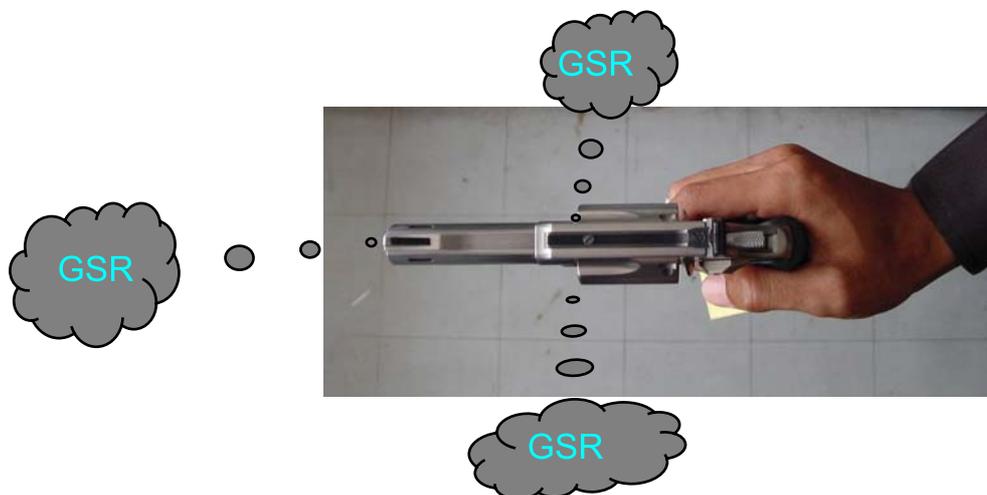
ตารางที่ 1 ธาตุโลหะสำคัญที่มีใน Primer Cap

ธาตุโลหะ	จุดหลอมเหลว (Mp) , °C	จุดเดือด (Bp) , °C
ตะกั่ว (Pb)	327	1620
แบเรียม (Ba)	725	1130
แอนติโมนี (Sb)	630	1380

ที่มา : จิรวรรณ ฐนุรัตน์, “คู่มือการตรวจหาดินปืน เขม่าดินปืน ตะกั่ว และทองแดงของลูกกระสุนปืน” กองพิสูจน์หลักฐาน สำนักงานนิติวิทยาศาสตร์ตำรวจ, 2551.

ซึ่งเมื่อเกิดการยิงปืน GSR ส่วนใหญ่จะออกมาจากปากลำกล้องปืน แต่มีส่วนอื่นที่ GSR จะออกมาได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของปืนนั้นๆ

ในกรณีของปืนรีโวลเวอร์ GSR จะออกมาได้จากบริเวณช่องว่างระหว่างผิวหน้าของรังเพลิงกับส่วนท้ายของลำกล้อง



ภาพที่ 5 บริเวณที่เขม่าปืนสามารถออกมาได้ ในปืนพกรีโวลเวอร์

ที่มา : นพสิทธิ์ อัครนพหงส์, “หลักการตรวจพิสูจน์เขม่าที่เกิดจากการยิงปืน,” กองพิสูจน์หลักฐาน สำนักงานนิติวิทยาศาสตร์ตำรวจ, 2550. (อัดสำเนา)

ในกรณีของปืนอัตโนมัติ GSR จะออกมาจากบริเวณช่องกักปดล็อก ปืนประเภทอื่นๆ ขึ้นอยู่กับการออกแบบว่ามีส่วนของก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้จากการยิงปืนสามารถรั่วไหลออกมาได้ที่บริเวณใดและจากการที่เกิดความดันสูงขึ้นนี้เอง



ภาพที่ 6 บริเวณที่เขม่าปืนสามารถออกมาได้ ในปืนพกอัตโนมัติ

ที่มา : นพสิทธิ์ อัครนพหงส์, “ หลักการตรวจพิสูจน์เขม่าที่เกิดจากการยิงปืน,” กองพิสูจน์หลักฐาน สำนักงานนิติวิทยาศาสตร์ตำรวจ, 2550. (อัครสำเนา)

1.5 การคงอยู่ของเขม่าปืน

เขม่าปืนจะยังคงอยู่บนมือเพียงระยะสั้นๆ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการประกอบกิจในชีวิตประจำวัน และไม่สามารถระบุระยะเวลาที่นานที่สุดที่เขม่าติดที่มือได้ ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณของเขม่าปืนที่ติดที่มือ คือ ชนิดของอาวุธปืน , การจับปืน , จำนวนนัดที่ยิง , สภาพแวดล้อม

2. อาวุธปืนและเครื่องกระสุนปืน (Firearms and Their Projectiles) (อัมพร จารุจินดา 2542)

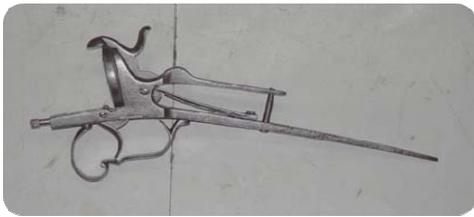
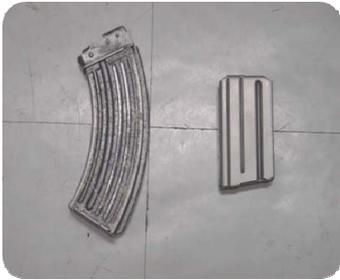
2.1 ความหมายของอาวุธปืนและเครื่องกระสุนปืน

ตามความในมาตรา ๔ (๑),(๒) แห่งพระราชบัญญัติอาวุธปืน เครื่องกระสุนปืน วัตถุระเบิด ดอกไม้เพลิง และสิ่งเทียมอาวุธปืน พ.ศ. ๒๔๕๐ แก้ไขเพิ่มเติมโดยมาตรา 3 แห่งพระราชบัญญัติอาวุธปืนฯ (ฉบับที่ ๓) พ.ศ. ๒๕๐๑ ได้บัญญัติอาวุธปืนไว้ดังนี้

“อาวุธปืน” หมายความว่ารวมตลอดถึงอาวุธทุกชนิดซึ่งใช้เครื่องส่งกระสุนโดยวิธีระเบิดหรือกำลังแรงดันของแก๊สหรืออัดลม หรือเครื่องกลไกอย่างใดซึ่งต้องอาศัยอำนาจของพลังงานและส่วนหนึ่งส่วนใดของอาวุธนั้นๆ ซึ่งรัฐมนตรีเห็นว่าสำคัญและได้ระบุไว้ในกฎกระทรวง

“เครื่องกระสุนปืน” หมายความว่ารวมตลอดถึงกระสุนโคด กระสุนปราย กระสุนแตก ลูกกระเบิด ตอร์ปิโด ทู่นระเบิด และจรวด ทั้งชนิดที่มีและไม่มีกรดแก๊ส เชื้อเพลิง เชื้อโรค ไอพิษ หมอกหรือควัน หรือกระสุน ลูกกระเบิด ตอร์ปิโด ทู่นระเบิด และจรวด ที่มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกัน หรือเครื่อง หรือสิ่งสำหรับอัดหรือทำ หรือใช้ประกอบเครื่องกระสุนปืน

ตามกฎหมายกระทรวงฉบับที่ ๓ (พ.ศ.๒๔๕๑) ออกตามความในพระราชบัญญัติอาวุธปืนฯ พ.ศ.๒๔๕๐ ได้กำหนดในกฎข้อ 1 ไว้ว่า ส่วนของอาวุธปืนที่มีความสำคัญให้ถือเป็นอาวุธปืน ตามความในมาตรา ๔ (๑) คือ

	(๑) ด้ามลั่น
	(๒) เครื่องลูกเลื่อน หรือส่วนประกอบสำคัญของเครื่องลูกเลื่อน
	(๓) เครื่องลั่นไก หรือส่วนประกอบสำคัญของเครื่องลั่นไก
	(๔) เครื่องส่งกระสุนปืน ซองกระสุนปืน หรือส่วนประกอบสำคัญของสิ่งเหล่านี้

ภาพที่ 7 ส่วนของอาวุธปืนที่มีความสำคัญให้ถือเป็นอาวุธปืน ตามความในมาตรา ๔ (๑)

ตามกฎกระทรวงฉบับที่ ๑๑ (พ.ศ.๒๕๒๒) ออกตามความในพระราชบัญญัติอาวุธปืนฯ พ.ศ. ๒๔๕๐ ได้กำหนดไว้ในข้อ ๒ ไว้ว่า อาวุธปืนที่นายทะเบียนจะออกใบอนุญาตให้ได้ ต้องเป็น อาวุธปืน ชนิด และขนาด ดังต่อไปนี้

- (๑) อาวุธปืนชนิดล้ากล้องมีเกลียวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปากล้ากล้องไม่เกิน ๑๑.๔๔ มม.
- (๒) อาวุธปืนชนิดล้ากล้องไม่มีเกลียว ดังต่อไปนี้
 - (ก) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปากล้ากล้องไม่ถึง ๒๐ มม.
 - (ข) ปืนประจูปาก ปืนลูกซอง และปืนพลุสัญญาณ
- (๓) อาวุธปืนที่เครื่องกลไกสำหรับบรรจุกระสุนเองให้สามารถยิงซ้ำได้ ดังต่อไปนี้
 - (ก) ขนาดความยาวล้ากล้องไม่ถึง ๑๖๐ มม.
 - (ข) ปืนลูกซอง
 - (ค) ปืนลูกกรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปากล้ากล้องไม่เกิน ๕.๖ มม.
- (๔) อาวุธปืนชนิดไม่มีเครื่องบังคับเสียงให้เบาผิดปกติ
- (๕) อาวุธปืนชนิดที่ไม่ใช้กระสุนเป็นที่บรรจุวัตถุเคมีที่ทำให้เกิดอันตรายหรือเป็นพิษ หรือไม่ใช่เครื่องกระสุนปืนที่บรรจุเชื้อโรค เชื้อเพลิง หรือวัตถุกำมันตภาพรังสี

2.2 ประเภทของอาวุธปืน เมื่อแบ่งตามความยาวล้ากล้องปืน แบ่งได้ 3 ประเภท

2.2.1 ปืนสั้น หรือ ปืนพก (Pistol)

คือปืนที่มีล้ากล้องสั้น มีด้ามซึ่งสามารถใช้จับถือ และยิงได้ด้วยมือเพียงข้างเดียว อย่างสบาย มีความยาวล้ากล้องตั้งแต่ 2 นิ้ว 3 นิ้ว 4 นิ้ว 5 นิ้ว 6 นิ้ว ฯลฯ ตามความต้องการ สามารถพกพาได้ ไม่กะกะ และเป็นอาวุธปืนที่ใช้ประกอบอาชญากรรมมากที่สุดในเวลานี้

ปืนสั้นที่ทำจากต่างประเทศ ได้แก่ ปืนพกรีวอลเวอร์ (แบบลูกโม้), ปืนพกอัตโนมัติ, ปืนพกแบบเดอริงเจอร์ ล้ากล้องมีมากกว่า 1 ล้ากล้อง, ปืนพกประจูปาก และปืนพกอัดลม



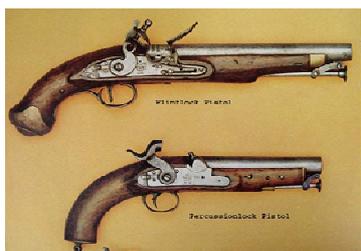
ปืนพกรีวอลเวอร์ (แบบลูกโม)



ปืนพกอัตโนมัติ



ปืนพกแบบเดอริงเยอร์ ลำกล้องมีมากกว่า 1 ลำกล้อง



ปืนพกประจูปาก



ปืนพกอัลดม

ภาพที่ 8 ปืนสั้นที่ทำจากต่างประเทศ

ปืนสั้นที่ทำเองภายในประเทศ ได้แก่ ปืนพกรูปร่างคล้ายไฟแช็ค ชนิด 2 หรือ 3 ลำกล้อง, ปืนพกรีวอลเวอร์, ปืนพกอัตโนมัติ และปืนพกลูกซอง

	<p>ปืนพรูปร่างคล้ายไฟแช็ค ชนิด 2 หรือ 3 ลำกล้อง</p>
	<p>ปืนพรูวอลเวอร์</p>
	<p>ปืนพกออโตเมติก</p>
<div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p style="text-align: center;">ปืนพกลูกซอง</p>	

ภาพที่ 9 ปืนสั้นที่ทำเองภายในประเทศ

2.2.2 ปืนยาว (Rifle)

คือ ปืนที่มีลำกล้องยาว มีพานท้าย (ด้าม) เวลายิงต้องจับ 2 มือ มีทั้งที่ผลิตในประเทศและต่างประเทศ

ปืนยาวที่ทำจากต่างประเทศ ได้แก่ ปืนยาวลูกซอง, ปืนยาวลูกกรด และปืนยาวไรเฟิลใช้ในการกีฬาและล่าสัตว์



ปืนยาวลูกซอง



ปืนยาวลูกกรด



ปืนยาวไรเฟิลใช้ในการกีฬาและล่าสัตว์

ภาพที่ 10 ปืนยาวที่ทำจากต่างประเทศ

ปืนยาวที่ทำขึ้นเองภายในประเทศ ได้แก่ ปืนยาวลูกซอง, ปืนยาวประจูปาก และปืนยาวอัดลม



ปืนยาวประจูปาก

ปืนยาวอัดลม

ภาพที่ 11 ปืนยาวที่ทำขึ้นเองภายในประเทศ

2.2.3 ปืนที่ใช้ในกิจการทหารหรือสงคราม

คือ ปืนที่นายทะเบียนออกใบอนุญาตให้ประชาชนมีไว้ในครอบครองไม่ได้ โดยกฎกระทรวงฉบับที่ 11 (พ.ศ. 2522) ออกตามความในพระราชบัญญัติอาวุธปืนฯ พ.ศ.๒๕๕๐

ดังนั้น อาวุธปืนที่นายทะเบียนออกใบอนุญาตให้ไม่ได้

1. มีเกลียวในลำกล้องขนาดเกินกว่า 11.44 มม.
2. ไม่มีเกลียวในลำกล้อง มีขนาดเกินกว่า 20 มม. (ยกเว้นปืนแก๊ป ปืนลูกซองและปืนยิงพลุสัญญาณ)
3. ปืนที่ยิงซ้ำได้และมีความยาวลำกล้องเกิน 160 มม.

4. ปืนที่มีเครื่องบังคับเสียงให้เบาผิดปกติ

5. ปืนที่ใช้กระสุนบรรจุวัตถุเคมี เชื้อโรค เชื้อเพลิง หรือวัตถุกำมันตภาพรังสีทำให้เกิดอันตราย หรือเป็นพิษ

2.3 ประเภทของอาวุธปืน เมื่อแบ่งตามกลไกภายในลำกล้อง สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ดังนี้

2.3.1 ประเภทที่มีกลไกภายในลำกล้อง ใช้กับกระสุนปืนลูกโตด เมื่อยิงปืนแรงอัดของแก๊สจะขับเคลื่อนให้ลูกกระสุนปืนครูดไปกับกลไกภายในลำกล้องแล้วหมุนตัวออกไปจากปากลำกล้องทำให้สามารถวิ่งผ่านอากาศออกไปตรงตามทิศทางที่เล็ง เช่น ปืนพกรีวอลเวอร์ ปืนพกออโตเมติก ปืนยาวไรเฟิล และปืนกลต่างๆ

	<p>ปืนพกรีวอลเวอร์</p>
	<p>ปืนพกออโตเมติก</p>
	<p>ปืนยาวไรเฟิล</p>
	<p>ปืนกล</p>

ภาพที่ 12 ปืนที่มีกลไกภายในลำกล้อง

2.3.2 ประเภทไม่มีเกลียวภายในลำกล้อง ประเภทนี้ใช้กับกระสุนปืนลูกปราชได้แก่ ปืนลูกซองซึ่งลำกล้องภายในเรียบ ไม่มีร่องเกลียวภายในลำกล้อง โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลายขนาด นอกจากปืนลูกซองแล้ว กระสุนปืนลูกซองยังถูกนำมาใช้ยิงในปืนไทยประติษฐ์ ซึ่งปืนเหล่านี้ไม่ได้ขึ้นทะเบียนตามกฎหมายและไม่มีมาตรฐานเกี่ยวกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในลำกล้องและความยาวลำกล้องแต่อย่างใด

	ปืนลูกซองผลิตจากต่างประเทศ
	ปืนลูกซองไทยประติษฐ์ (ประกอบขึ้นเอง)
	ปืนปากกาไทยประติษฐ์ (ประกอบขึ้นเอง)
	ปืนพรูปร่างคล้ายไฟแช็ค
	ปืนยาวประจุปาก (ปืนแก๊ป)

ภาพที่ 13 ปืนที่ไม่มีเกลียวภายในลำกล้อง

2.4 กระสุนปืน (Cartridge)

ตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าตามความในมาตรา ๔ (๒) แห่งพระราชบัญญัติอาวุธปืน เครื่องกระสุนปืน วัตถุระเบิด ดอกไม้เพลิง และสิ่งเทียมอาวุธปืน พ.ศ. ๒๔๕๐ แก้ไขเพิ่มเติมโดย มาตรา 3 แห่งพระราชบัญญัติอาวุธปืนฯ (ฉบับที่ ๓) พ.ศ. ๒๕๐๑ ได้บัญญัติเครื่องกระสุนปืนไว้ ดังนี้

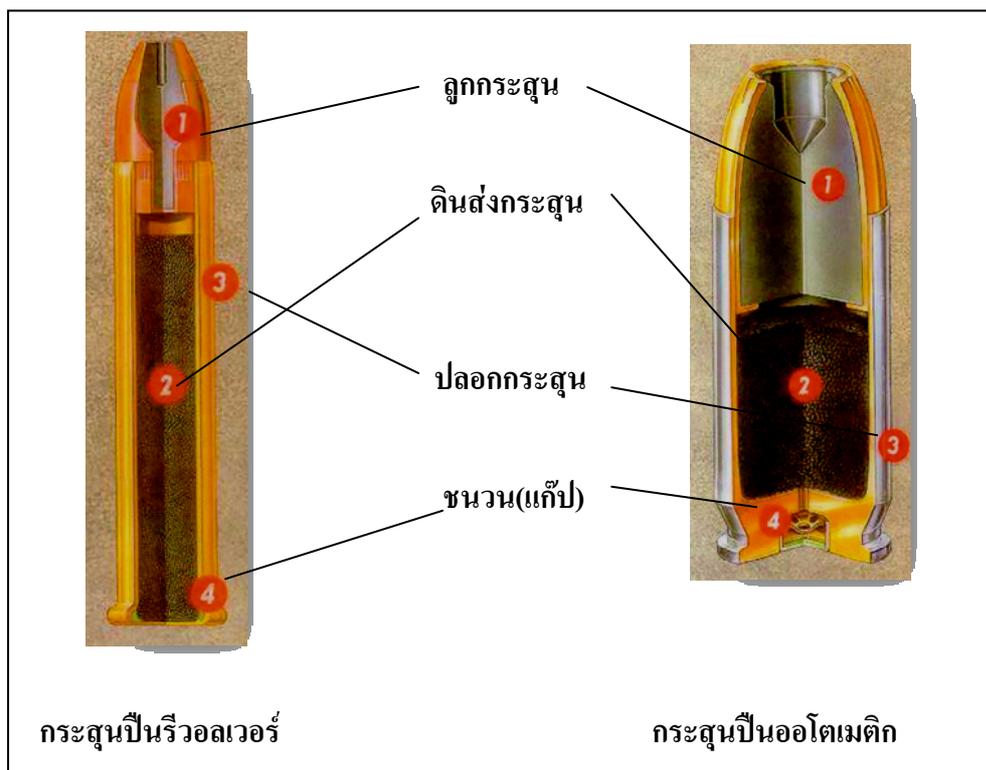
“เครื่องกระสุนปืน” หมายความว่ารวมตลอดถึงกระสุนโคด กระสุนปราย กระสุนแตก ลูกกระเบิด ตอร์ปิโด ทุ่นระเบิด และจรวด ทั้งชนิดที่มีและไม่มีกรดแก๊ส เชื้อเพลิง เชื้อโรค ไอพิช หมอกหรือควัน หรือกระสุน ลูกกระเบิด ตอร์ปิโด ทุ่นระเบิด และจรวด ที่มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกัน หรือเครื่อง หรือสิ่งสำหรับอัดหรือทำ หรือใช้ประกอบเครื่องกระสุนปืน

2.4.1 กระสุนปืนลูกโคด

กระสุนโคด หรือที่เรียกกันทั่วไปว่ากระสุนลูกโคดนั้น มีลักษณะที่ประกอบด้วย ส่วนสำคัญ 4 ส่วนคือ

2.4.1.1 ลูกกระสุนปืน (Bullet)

คือส่วนโลหะรูปทรงกระบอกที่อยู่ปลายสุดของกระสุนปืนซึ่งเมื่อเวลายิงแล้วเป็นส่วนที่วิ่งไปปะทะกับเป้าหมาย ส่วนใหญ่ของปลายหัวกระสุนจะมีลักษณะกลม (Ball) แต่ถ้าเป็นกระสุนที่ใช้ในราชการทหารปลายลูกกระสุนจะมีลักษณะปลายแหลม ซึ่งเป็นไปตาม ข้อตกลงระหว่างประเทศ สำหรับกระสุนปืนที่ใช้ยิงแข่งขันในการกีฬา จะนิยมใช้ลูกกระสุนปลาย ตัด (Clean cutting) เพื่อเวลากระสุนทะลุเป้าจะเกิดรูชัดเจน เป็นการสะดวกในการนับรูกระสุนที่ถูก เป้าเวลาให้คะแนน



ภาพที่ 14 ส่วนประกอบของกระสุนปืนลูกโดด

ที่มา : อัมพร จารุจินดา, “การตรวจพิสูจน์อาวุธปืนและเครื่องกระสุนปืน,” เอกสารเผยแพร่ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับอาวุธปืนและกระสุนปืนสำหรับผู้เข้าอบรม กองพิสูจน์หลักฐาน สำนักงานวิทยาการตำรวจ, 2542. (อัคราเนนา)



ภาพที่ 15 ลูกกระสุนปืนแบบต่างๆ

ที่มา : ฉัตรชัย วิเศษสุวรรณภูมิ, “ผ่าปืน,” เดลินิวส์, 16 มิถุนายน 2544 – 14 กันยายน 2545.

โลหะที่ใช้ทำหัวกระสุนนี้อาจเป็นตะกั่วล้วนหรือตะกั่วผสมโลหะอื่นเคลือบบางๆ หรืออาจเป็นตะกั่วอยู่ภายในเป็นแกน แล้วมีเปลือกทำด้วยโลหะผสม เช่น ทองแดง หรือนิกเกิลหุ้มไว้อีกชั้นหนึ่งก็ได้ ลูกกระสุนที่มีเปลือกหุ้มนี้ (Jacket bullets) เรียกว่า ลูกกระสุนเปลือกแข็งและถ้าเปลือกที่หุ้ม หุ้มมิดถึงปลายลูกกระสุนเรียกว่ากระสุนหัวแข็ง (Metal cased bullets) ถ้าหุ้มไม่มิด ส่วนปลายลูกกระสุนเป็นแกนตะกั่วโผล่ออกมา เรียกว่ากระสุนหัวอ่อน (Soft point bullets) ลูกกระสุนประเภทนี้ เมื่อไปกระทบกับเป้าแล้ว ตะกั่วที่อ่อนจะเย็นตัว แล้วยุบทำให้ปลายหัวกระสุนบานออก เกิดบาดแผลขนาดใหญ่ได้

2.4.1.2 ชนิดหัวกระสุน

Lead Bullet ลูกกระสุนปืนในปัจจุบันที่มีความเร็วต้นต่ำกว่า 2,000 ฟุตต่อวินาที มักจะทำด้วยตะกั่วเพราะราคาถูก และความร้อนเนื่องจากแรงระเบิดของดินปืนไม่ทำให้ตะกั่วละลาย แต่ลูกกระสุนปืนนั้นไม่ได้ทำด้วยตะกั่วล้วนๆ เพราะจะอ่อนเกินไป เขาต้องใช้โลหะอื่นผสมด้วยเพื่อให้แข็งขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่ตัวที่ใช้ผสมจะเป็น โลหะพลวง (Antimony) หรือ ดีบุก (Tin)

ลูกกระสุนปืนขนาดเล็ก เช่น ปืนพกต่างๆ ไป ที่โรงงานผลิตออกขาย ใช้ตะกั่วผสมกับพลวง

ลูกกระสุนปืนที่อัดใช้เอง จะใช้ตะกั่วผสมกับดีบุก เพราะง่ายในการหลอมและหล่อลูกกระสุน

สำหรับลูกกระสุนปืนที่อัดใช้เอง โดยใช้ดินปืนแบบ Black Powder เป็นตัวขับเคลื่อน ใช้อัตราส่วนของดีบุก : ตะกั่ว = 1 : 15 ก็ใช้ได้แล้ว แต่มาตรฐานใช้ ดีบุก : ตะกั่ว = 1 : 20

ถ้าใช้ดินปืนแบบ Smokeless Powder เป็นตัวขับเคลื่อน สำหรับกระสุนปืนเล็กต่างๆ ไปก็คงใช้อัตราส่วนมาตรฐานเช่นเดียวกับ Black Powder คือ 1 : 20 แต่ถ้าเป็นกระสุนความเร็วสูง (High Velocity) ใช้อัตราส่วนของ ดีบุก : ตะกั่ว = 1 : 10 สำหรับลูกกระสุนปืนไรเฟิลที่ใช้ Smokeless Powder เป็นตัวขับเคลื่อนในกระสุนปืนธรรมดา ใช้อัตราส่วนของ ดีบุก : ตะกั่ว = 1 : 10 หรือ 1 : 12 แต่ถ้าเป็นกระสุนปืนแบบ Top velocity Load ใช้อัตราส่วนของ ดีบุก : พลวง : ตะกั่ว = 5 : 5 : 90 ลูกกระสุนปืนที่มีส่วนผสมดังกล่าวนี้มีชื่อเฉพาะเรียกว่า “Type Metal Bullet”

ในปัจจุบันนี้ ลูกกระสุนปืนที่ทำด้วยตะกั่วมีลักษณะตอนท้ายลูกกระสุนปืนอยู่ 5 แบบ คือ

1. Plain Base แบบนี้ก้นลูกกระสุนปืนจะเรียบเสมอกัน
2. Hollow Base แบบนี้ก้นกระสุนปืนจะเว้าเข้าหรือกลวงลึก

3. Gas Check Base แบบนี้จะมีถ้วยทองแดงหรือทองเหลืองบางๆหุ้มกันลูกกระสุนปืนไว้ เพื่อป้องกันตะกั่วส่วนกันละลายเนื่องจากความร้อน ในกระสุนปืนแบบ High Temperature and Pressure

4. Zinc Washer Base แบบนี้ส่วนกันลูกกระสุนปืนจะหุบด้วยสังกะสี (Zinc) เพื่อเป็นตัวป้องกันไม่ให้ตะกั่วบริเวณกันและข้างลูกกระสุนปืนละลายเนื่องจากความร้อนและยังทำหน้าที่เป็นตัวล้างเอาเศษตะกั่วที่ติดอยู่ภายในลำกล้องปืนเดิมออกไปอีกด้วย

5. Short or Half Jacketed แบบนี้มี jacket หุ้มกันลูกกระสุนปืนสูงขึ้นมาประมาณ 1/4 หรือ 3/4 ของความสูงของลูกกระสุนปืน ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ตะกั่วที่กันและข้างลูกกระสุนปืนละลายติดลำกล้องปืนเช่นเดียวกัน

ลูกกระสุนปืนในแบบที่ 4 และ 5 ส่วนที่เป็นตะกั่วจะเป็นตะกั่วล้วน ไม่มีพลวงหรือดีบุกผสมเลยและทั้ง 2 แบบไม่ต้องมีตัวหล่อลื่น แต่ 3 แบบแรกต้องมีตัวหล่อลื่น

มีลูกกระสุนปืนที่ทำด้วยตะกั่วแบบหนึ่ง ซึ่งถ้าดูเพียงผิวเผินแล้วดูเหมือนว่าเป็นลูกกระสุนปืนแบบที่มี Jacket ทองแดงหุ้ม แต่แท้ที่จริงแล้วไม่ใช่ Jacket เป็นเพียงตะกั่วหุบด้วยโลหะทองแดงเพียงบางๆ เท่านั้น สามารถใช้เล็บหรือของแข็งขูดเอาออกได้ ในปัจจุบันจะพบได้ในกระสุนปืนบางยี่ห้อบางขนาด เช่น ขนาด .22 Short, .22 Long Rifle, .38 Special, .357 Magnum และ .44 Magnum เป็นต้น วัตถุประสงค์ก็เพื่อป้องกันไม่ให้ตะกั่วละลายติดลำกล้องปืน และยังทำให้แลดูสวยงามน่าใช้กว่าลูกกระสุนปืนที่ทำด้วยตะกั่วธรรมดาอีกด้วย เรียก Lubaloid

Jacketed Bullet เป็นลูกกระสุนปืนที่มีโลหะหุ้มแกนตะกั่วหรือแกนเหล็กไว้อีกชั้นหนึ่ง ทำให้ดูเหมือนว่าลูกกระสุนปืนนั้นทำด้วยโลหะที่เห็นล้วนๆ โลหะที่หุ้มอยู่ภายนอกเรียกว่า Jacket ส่วนแกนตะกั่วหรือแกนเหล็กภายในเรียกว่า Core ในสมัยเริ่มแรกที่มี Jacket Bullet นั้นตัว Jacket ทำด้วยทองแดงผสมนิกเกิลในอัตราส่วนต่างๆ กัน แต่ในปัจจุบัน Jacket ส่วนใหญ่ทำด้วย ทองแดง 90% , ดีบุก 5% , และสังกะสี 5% บางชนิดทำด้วยเหล็กชุบนิกเกิล หรือชุบทองแดง, แบบใหม่ล่าสุดทำด้วยอลูมิเนียม สำหรับ Core นั้นทำด้วยตะกั่วล้วน หรือบางทีอาจทำด้วยเหล็กก็ได้

ลูกกระสุนปืนมีชื่อเรียกแตกต่างกันมากมาย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปร่างลักษณะของลูกกระสุนปืนนั้นๆ ตัวอย่างเช่น

Lead Bullet ลูกกระสุนปืนแบบนี้มีเพียงไม่กี่แบบเช่น

1. Round Nose (RN) เป็นลูกกระสุนธรรมดาทั่วไปปลายมน
2. Semi-Wad Cutter (SWC) เป็นลูกกระสุนปืนที่มีส่วนปลายที่ฟันปลอกกระสุนออกมามีขนาดเล็กกว่าส่วนใหญ่ที่อยู่ในปลอกกระสุน และส่วนปลายตัดตรงไม่มน

3. Wad Cutter (WC) เป็นลูกกระสุนปืนที่ส่วนปลายสั้นเสมอปากปลอกกระสุนปืนและปลายตัดตรง

4. Hollow Point (HP) เป็นลูกกระสุนปืนมีลักษณะคล้ายกับแบบ Round Nose แต่ที่ส่วนปลายสุดจะมีรูเจาะลึกลงไป พบได้ง่ายในกระสุนปืนลูกกรด ขนาด .22 Short, .22 Long Rifle

Jacketed Bullet ลูกกระสุนปืนแบบนี้มีลักษณะการหุ้มของ Jacket บน Core หลายแบบแต่ละแบบถูกผลิตขึ้นเพื่อความมุ่งหมายในการทำลายเป้าหมายให้ได้ผลดีที่สุด ในที่นี้จะขอยกตัวอย่างเป็นบางแบบ

1. Full Metal Jacket (FMJ) เป็นลูกกระสุนปืนที่มี Jacket หุ้มทั้งหมดปลายมนบางที่เรียกว่า Metal Case Bullet

2. Jacketed Hollow Point (JHP) เป็นลูกกระสุนปืนที่มี Jacket หุ้ม แต่ส่วนปลายมีรูเจาะเข้าไปในเนื้อของ Core ลึกพอควร

3. Jacketed Soft Point (JSP) เป็นลูกกระสุนปืนที่มี Jacket หุ้มเกือบหมดทั้งลูกเว้นตอนปลายสุดเป็นตะกั่วไม่มีรู

4. Pointed เป็นลูกกระสุนปืนที่มี Jacket หุ้มหมด และปลายแหลม

5. Metal Piercing (MP) หรือ Armour Piercing (AP) เป็นลูกกระสุนปืนที่ใช้ยิงเจาะเกราะ แบบ MP เป็นกระสุนปืนเล็กเช่นปืนพกต่างๆไป ส่วนปลายของลูกกระสุนปืนจะแหลม Jacket ที่หุ้มส่วนปลายนี้จะมีขนาดหนากว่าส่วนอื่นๆประโยชน์ใช้ยิงทะลุเกราะอ่อนหรือที่เรียกว่าเสื้อเกราะและแผ่นวัสดุหรือโลหะที่มีความหนาไม่มากนัก

สำหรับแบบ AP เป็นกระสุนปืนที่ใช้กับปืนทางการทหาร ส่วนปลายของลูกกระสุนปืนจะแหลม Jacket เป็นทองแดงหรือเหล็กชุบทองแดง ส่วน Core จะทำด้วย Tungsten Carbide ซึ่งมีความแข็งมากสามารถเจาะทะลุเกราะเหล็กได้วัสดุประสงค์เพื่อใช้ยิงทะลุยานยนต์หุ้มเกราะของทหาร หรือยิงทะลุแผ่นวัสดุหรือโลหะที่มีความหนามากๆได้

ส่วนก้นของลูกกระสุนปืนแบบ Jacketed Bullet มี 2 แบบ คือ

1. Flat Base แบบนี้ก้นกระสุนปืนจะเรียบเสมอกัน และด้านข้างลูกกระสุนปืนก็ตรงตลอดเสมอกัน

2. Boat Tail แบบนี้ก้นลูกกระสุนปืนจะเรียบเสมอกันเช่นกัน แต่ด้านข้างลูกกระสุนปืนตอนใกล้ก้นจะสอบเข้าหากันเล็กน้อย คือส่วนก้นลูกกระสุนปืนจะเล็กกว่าตอนกลางของลูกกระสุนปืน

ส่วนกันที่เล็กของลูกกระสุนปืนแบบ Boat Tail มีประโยชน์ในการลด Air drag คือลดการเสียดสีของอากาศกับลูกกระสุนปืนเมื่อใช้ยิงออกไป ทำให้ลูกกระสุนปืนแบบ Boat tail สามารถยิงไปได้ไกลกว่า และมีวิถีกระสุนแบนราบดีกว่าลูกกระสุนปืนแบบ Flat Base ในเมื่อมีความเร็วต้นเท่ากัน

ลูกกระสุนปืนที่มีความเร็วต้นตั้งแต่ 2,000 ฟุตต่อวินาที ขึ้นไป จะต้องเป็นแบบ Jacketed Bullet เพราะถ้าเป็นแบบ Lead Bullet จะทำให้ส่วนกัน และผิวด้านข้างของลูกกระสุนปืนละลายได้ทำให้มีตะกั่วติดค้างอยู่ภายในลำกล้องปืน อันทำให้เกิดผลเสียต่อความแม่นยำของปืนนั้น

ที่ลูกกระสุนปืนด้านข้างส่วนใหญ่จะมีร่องอยู่โดยรอบ ในลูกกระสุนปืนแบบ Lead Bullet บางแบบอาจมีหลายร่องในลูกเดียว แต่ใน Jacketed Bullet แล้วถ้ามีก็มีเพียงร่องเดียวเท่านั้น ร่องดังกล่าวนี้ใน Lead Bullet ใช้สำหรับใส่สารหล่อลื่นลูกกระสุนปืน ซึ่งเป็นพวกขี้ผึ้งหรือไขมัน ทำหน้าที่หล่อลื่นลูกกระสุนปืนให้วิ่งผ่านลำกล้องปืนไปได้สะดวกขึ้น แต่สำหรับ Jacketed Bullet แล้วร่องดังกล่าวทำหน้าที่สำหรับยึดปากปลอกกระสุนปืนให้ติดกับลูกกระสุนปืน โดยการบีบปากปลอกกระสุนปืนเข้าไปในร่องโดยรอบ ร่องดังกล่าวมีชื่อเรียกว่า Cannalure นอกจากนี้ยังทำหน้าที่ป้องกันความชื้นไม่ให้เข้าไปในกระสุนปืนอีกด้วย

2.4.1.3 ปลอกกระสุนปืน (Cartridge Case)

เป็นส่วนที่หุ้มหัวกระสุน ภายในบรรจุดินปืนและแก๊ปกักขนวนไว้ ปลอกกระสุนโคด โลหะที่ใช้ทำปลอกกระสุนมีหลายชนิด คือ ทองเหลือง อลูมิเนียม เหล็ก ทองแดง แต่ที่นิยมมากที่สุดคือทองเหลือง กล่าวกันว่า ปลอกกระสุนปืนที่ทำด้วยทองเหลืองคุณภาพดี สามารถนำกลับไปอัดกระสุนปืนยิงใหม่ได้อีกประมาณ 3-4 ครั้ง



ภาพที่ 16 ปลอกกระสุนปืนแบบต่างๆ

2.4.1.4 ดินส่งกระสุนปืน (Gun Powders)

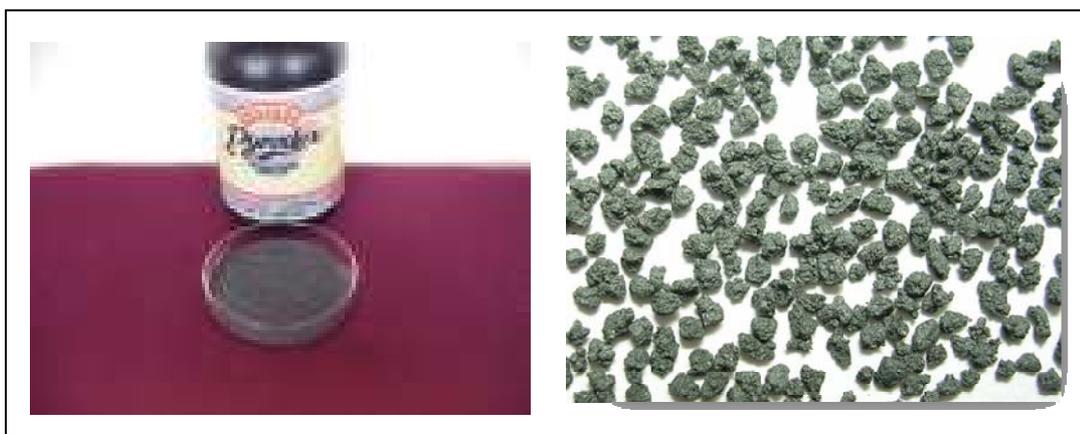
เป็นของแข็งซึ่งเมื่อเกิดการลุกไหม้จะให้แก๊สปริมาณมากในเวลาอันสั้น ความเร็วในการเผาไหม้ของดินปืนเป็นสิ่งสำคัญ ดินปืนในปัจจุบันมี 3 แบบคือ

ดินดำ (Black Powder) เป็นตัวขับเคลื่อนกระสุนปืนชนิดแรก ประกอบด้วย ดินประสิ่ว 75% ถ่านไม้ 15% กำมะถัน 10%



ภาพที่ 17 ดินดำ (Black Powder)

ดินดำแบบใหม่ (Pyrodex) มีส่วนผสมอื่นเพิ่มเติมเข้ามาอีกคือ Potassium Perchlorate, Sodium Benzoate, Dicyandiamide (1-Cyanoguanidine) และยังมี Dextrine, Wax และ Graphine จำนวนเล็กน้อยผสมอยู่ด้วย



ภาพที่ 18 ดินดำแบบใหม่ (Pyrodex)

ดินควันน้อย (Smokeless Powder) เป็นตัวที่มีคุณภาพสูงกว่าดินดำมาก ที่ทำจากสารประกอบ Nitrocellulose เพียงอย่างเดียว เรียกว่า แบบ Single Base แต่ถ้าต้องการแบบที่มีแรงระเบิดสูงขึ้นก็ใช้ Nitroglycerine ผสมเข้ากับ Nitrocellulose ในอัตราส่วนต่างๆ กัน แล้วแต่ความต้องการความเร็วในการเผาไหม้เล็กน้อยเพียงใด แบบนี้เรียกว่า Double Base

ดินควันน้อยมีรูปร่างต่างๆ ดังนี้

1. Flake
2. Disc
3. Tabular
4. Ball



ภาพที่ 19 ดินควันน้อยรูปร่างต่างๆ

2.4.1.5 แก๊ปปิ่น (Primers)

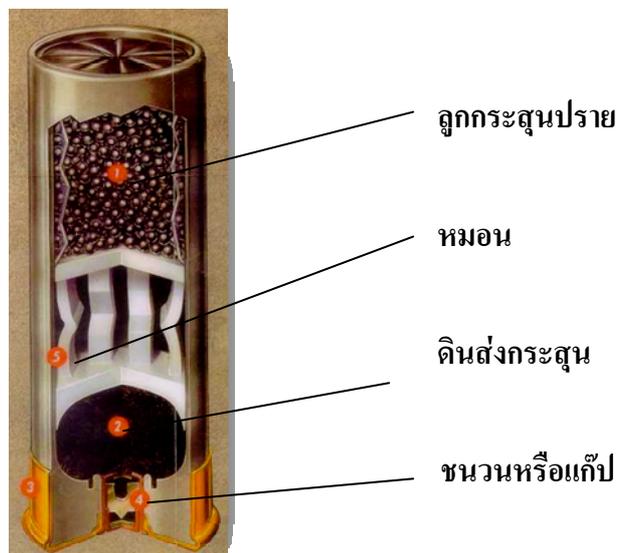
อยู่ตรงงานท้ายของปลอกกระสุน เมื่อเวลายิงปืนหรือลั่นไกปืน เข็มแทงชนวนจะกระแทกตรงงานท้ายของปลอกกระสุน ทำให้แก๊ปเกิดระเบิด และจุดระเบิดไปยังดินปืนที่อยู่ภายในปลอกกระสุน เมื่อดินปืนระเบิด ก็จะขับเคลื่อนหัวกระสุนให้วิ่งออกจากลำกล้อง



ภาพที่ 20 ชนวนงานท้ายกระสุนปืน หรือ แก๊ปปิ่น

2.4.2 กระสุนปืนลูกซอง (Shotshell)

กระสุนปืนลูกซองหรือเรียกว่ากระสุนปราย จะมีส่วนสำคัญดังต่อไปนี้



ภาพที่ 21 ส่วนประกอบของกระสุนปืนลูกซอง

ที่มา : ฉัตรชัย วิเศษสุวรรณภูมิ, “ผ่าปืน,” เดลินิวส์, 16 มิถุนายน 2544 – 14 กันยายน 2545.

กระสุนปืนลูกซองมีส่วนประกอบภายในผลิตไปจากกระสุนปืนทั่วไป ตรงที่ปลอกกระสุนปืนมีขนาดใหญ่ แต่ลูกกระสุนปืนที่บรรจุมีขนาดเล็กและมีจำนวนมาก จึงจำเป็นต้องมีส่วนที่มากขึ้นมิให้ดินปืนกับลูกกระสุนปืนที่บรรจุปนกัน และต้องมีตัวปิดปากปลอกกระสุน จึงจะทำให้เกิดแรงอัดของแก๊สเพื่อขับเคลื่อนลูกกระสุนไปสู่เป้าหมายได้

ในสมัยเริ่มแรกปลอกกระสุนปืนลูกซองทำด้วยโลหะทองเหลือง แต่เนื่องจากปลอกกระสุนปืนขนาดใหญ่ และทองเหลืองราคาแพง ต่อมาจึงได้นำกระดาษมาใช้แทน โดยการนำแผ่นกระดาษหลายๆ แผ่นทากาวติดกัน อัดให้แน่น นำไปอบด้วยไซหรือพาราฟินป้องกันความชื้น และนำไปตัดตามความยาวที่ต้องการ ปลอกกระสุนปืนลูกซองมีด้วยกัน 2 แบบ คือ Low-Base ใช้กับดินปืนที่มีความแรงต่ำ ทำให้ต้องการมีที่ว่างสำหรับใส่ดินปืนมาก, High-Base ใช้กับดินปืนที่มีความแรงสูงกว่า ทำให้ต้องการที่ใส่ดินปืนน้อยลง



ภาพที่ 22 กระสุนปืนลูกซองขนาดต่างๆ

ที่มา : ฉัตรชัย วิเศษสุวรรณภูมิ, “ผ่าปืน,” เคลนิวิสต์, 16 มิถุนายน 2544 – 14 กันยายน 2545.

ปากปลอกกระสุนปืนทำอยู่ด้วยกัน 2 แบบคือ Rolled Crimp จะมีแผ่นกระดาษหรือแผ่นพลาสติกปิดปากปลอกกระสุนไว้, Folded crimp or Star crimp ไม่ต้องมีอะไรมาปิดปากปลอกกระสุนอีก เพราะตัวปลอกกระสุนเองถูกม้วนพับลงมายาวพอที่จะปิดปากปลอกกระสุนทั้งหมด



ภาพที่ 23 ปากปลอกกระสุนปืนแบบต่างๆ

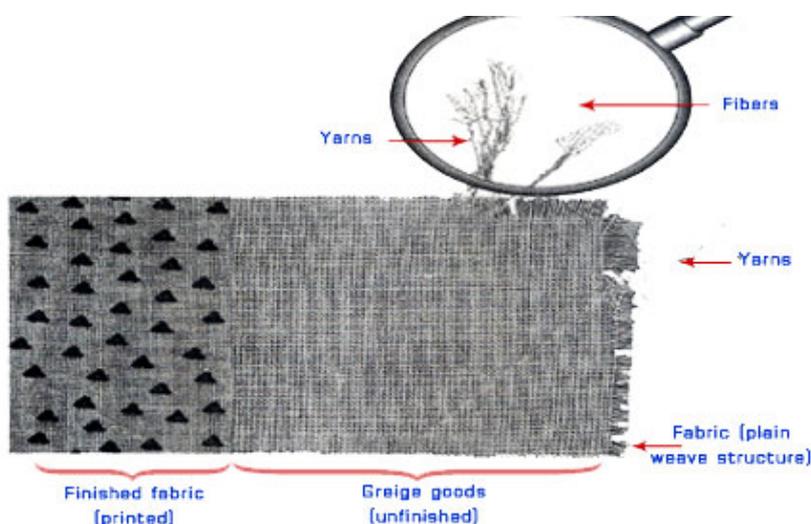
ที่มา : ฉัตรชัย วิเศษสุวรรณภูมิ, “ผ่าปืน,” เคลนิวิสต์, 16 มิถุนายน 2544 – 14 กันยายน 2545.

จากบริเวณลูกปรายเข้ามา ภายในกระสุนปืนจะมีแผ่นสักหลาด หรือกระดาษแข็งเป็นแผ่นกลมเรียงซ้อนกันเป็นตัวกั้นระหว่างลูกปรายกับดินปืน เรียกว่า หมอนส่งกระสุน (Wad) หมอนส่งกระสุนนี้จะทำหน้าที่เมื่อดินปืนระเบิด เพื่อขับเคลื่อนลูกปรายทั้งหมดให้วิ่งออกไปสู่อากาศ

ถัดจากหมอนส่งกระสุนเข้ามาก็เป็นดินปืน ระหว่างดินปืนกับฝาทองเหลืองมีแผ่นสั๊กหลาดหรือกระดากันอีกชั้นหนึ่งเรียกว่า หมอนรองดิน ตรงฝาทองเหลืองท้ายกระสุนมีแก๊ปและฝากรอบแก๊ปติดอยู่โดยต่อชนวนไปถึงดินปืน เพื่อจุดระเบิด เวลาเข็มแทงชนวนกระแทกที่แก๊ป

3. ผ้า (Fabrics) (อัจฉราพร ไสละสูต 2529)

โดยนิยามแล้วผ้าคือวัสดุที่มีลักษณะเป็นแผ่นแบน สามารถผลิตจากสารละลาย เส้นใย เส้นด้าย หรือวัสดุพื้นฐานเหล่านี้รวมกัน เมื่อแบ่งแยกตามลักษณะการผลิต สามารถแบ่งประเภทของผ้าออกเป็น 3 แบบ คือ ผ้าทอ (woven fabrics) ผ้าถัก (knitted fabrics) และผ้าอัด



ภาพที่ 24 ส่วนประกอบของผ้า

ที่มา : ส่วนประกอบของผ้า [ออนไลน์], เข้าถึงเมื่อ 12 ธันวาคม 2552, เข้าถึงได้จาก <http://macadamia.igetweb.com/index.php?mo=3&art=284997>

3.1 ผ้าทอ (woven fabrics)

ผ้าทอเป็นการผลิตจากการใช้เส้นด้ายสองกลุ่มหรือมากกว่า มาสอดขัดกันเป็นมุมฉาก ซึ่งกันและกัน เรียกว่าเส้นด้ายยืนและเส้นด้ายพุ่ง ผ้าทอจะสามารถเลาะเส้นด้ายออกจากผืนผ้าได้ทะลุเส้น มีแนวของเส้นด้าย (grain) ที่บอกตำแหน่งเส้นด้ายยืนและเส้นด้ายพุ่ง ส่วนแนวเฉียงที่แท้จริง (true bias) คือเส้นทแยงมุม ในผืนผ้าสี่เหลี่ยม การทอพื้นฐานจะแบ่งออกเป็น 3 แบบ ได้แก่

การทอลายขัด เป็นการทอเส้นด้ายยืนสอดขัดสลับกับเส้นด้ายพุ่งเป็นมุมฉาก เส้นด้ายยืนทุกเส้นจะสอดกับเส้นด้ายพุ่งทุกเส้นทำให้เกิดการสอดขัดสลับกันตลอดความยาวของผืนผ้า ลักษณะเฉพาะของการทอแบบนี้ก็คือผ้าที่ได้จะไม่มีด้านถูกและด้านผิด จึงสามารถใช้งานได้ทั้ง 2

ด้าน ยกเว้นจะมีการตกแต่งบนผิวผ้าด้านใดด้านหนึ่ง การสอดขัดของเส้นด้าย 2 หมู่เช่นนี้ทำให้ได้ผ้าค่อนข้างแน่น ทนทาน ไม่ลู่ง่าย ผิวผ้าเรียบ เหมาะสำหรับใช้เป็นผ้าสำหรับพิมพ์ลายหรือขัดลาย นูนเป็นลวดลายต่างๆ ซึ่งทำให้เกิดเป็นเนื้อผ้าชนิดต่างๆ ดังนี้

1. ผ้าทอลายขัดเนื้อบาง
2. ผ้าทอลายขัดเนื้อปานกลาง
3. ผ้าทอลายขัดเนื้อหนา
4. ผ้าทอลายขัดคัดแปลง

การทอลายสอง เป็นการทอชนิดหนึ่งที่เส้นด้ายยืนหรือเส้นด้ายพุ่งแต่ละเส้นจะสอดข้ามอีกเส้นหนึ่ง ไปสองเส้นหรือมากกว่า แล้วอาจสอดข้ามไปทางด้านหน้าหรือหลังครั้งละ 1 เส้น การทอเช่นนี้ทำให้เกิดลายผ้าเป็นแนวเส้นทแยงที่เห็นชัดเจนไปทางด้านซ้ายหรือขวา การทอลายสองมักระบุเป็นตัวเลข เช่น 2/1 อ่านว่า “ขึ้นสอง ลงหนึ่ง” ลักษณะเฉพาะของการทอแบบนี้ก็คือ มีด้านถูกและด้านผิด แต่ไม่มีด้านขึ้นและด้านลง เนื่องจากการสอดขัดกันน้อยครั้งทำให้เส้นด้ายสามารถเคลื่อนไหวอิสระมากขึ้นจึงทำให้ผ้ามีความอ่อนนุ่มขึ้น สามารถโค้งงอ (ทิ้งตัว) ได้ง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับผ้าทอลายขัด อีกทั้งยังคืนรอยยับได้ดีกว่า นอกจากนี้ผ้าลายสองยังสามารถแบ่งเป็นชนิดต่างๆตามลักษณะของเนื้อผ้าได้ดังนี้

1. ผ้าทอลายสองธรรมดา
2. ผ้าทอลายสองสมดุค

การทอตัวน เป็นการทอที่เส้นด้ายยืนแต่ละเส้นสอดข้ามเส้นพุ่ง 4 เส้น (4/1) และไปขัดกับด้ายเส้นที่ 5 สอดข้ามไปด้านขวาหรือด้านซ้าย ทำให้เห็นเส้นยืนลอยอยู่บนหน้าผ้าเป็นส่วนใหญ่ เรียกว่าตัวนด้ายยืน ถ้าหากใช้ด้ายพุ่งข้ามเส้นด้ายยืน 4 เส้น แล้วสอดขัดกับด้ายยืนเส้นที่ 5 (1/4) ตามลำดับไปทางด้านขวาหรือซ้าย เรียกว่าตัวนด้ายพุ่ง มีลักษณะเฉพาะของการทอแบบนี้คือ จะมีด้านถูกและด้านผิด ด้านถูกจะมีความมันเงา ส่วนด้านผิดจะไม่เงาหรือมีความขรุขระ ถ้าเส้นด้ายลอยข้ามยาวไม่มากจะทำให้ผ้าจะมีความแข็งแรง เนื้อแน่น แต่ถ้าด้ายข้ามยาวก็จะทำให้เนื้อผ้า มีความเงามันมาก ทิ้งตัวดี ลมผ่านยาก ทำให้ผ้าเนบเนื้อเวลาเดินด้านลม แต่เส้นด้ายที่ยาวข้ามจะทำให้ถูกเกี่ยวขาดได้ง่าย ไม่ทนต่อการขัดถู จึงไม่ค่อยทนทาน ผ้าตัวนยังแบ่งได้เป็นหลายชนิดดังนี้

1. ผ้าซาติน (satin) เป็นผ้าตัวนด้ายยืน ทำจากด้ายใยยาว เนื้อผ้าเรียบและมีความเงามันมาก
2. ผ้าซาทีน (sateen) เป็นผ้าตัวนด้ายพุ่ง มักทำจากด้ายฝ้ายซึ่งเป็นใยสั้น จึงมีความเงามันน้อยกว่าผ้าซาติน

3. ผ้าเครปตัวน (crepe back satin) เป็นผ้าตัวนด้ายยืนที่ใช้เส้นด้ายใยยาวเป็นเส้นด้ายยืน และใช้เส้นด้ายที่มีเกลียวสูงเป็นเส้นด้ายพุ่ง จึงทำให้ผ้าชนิดนี้มีความมันมากและด้านที่ขรุขระ

นอกจากนี้ยังมีเทคนิคการทอแบบอื่นๆ ได้แก่การทอขน (pile weave) เช่น การทอขนด้วยเส้นลวด การทอผ้าขนหนู การทอขนแบบผ้าสองผืน แบ่งเป็นการทอขนด้ายยืน และการทอขนด้ายพุ่งการทอยกดอก (figure weave) เช่น การทอยกดอกแบบแจ็กการ์ด การทอแบบtapestry การทอยกดอกขนาดเล็ก การทอเลโน หรือการทอกอซ การทอลายจุด การทอดอกแบบซิกแซค การทอปักดอก ผ้าทอแบ่งเป็นหลายชนิดขึ้นกับลักษณะการทอ เช่น Plain, Basket, Twill, Satin, Crepe, Dobby, Jacquard, Doublecloth, Pile, Slack-tension, Leno, และ Swivel

3.2 ผ้าถัก (knitted fabrics)

ผ้าถักผลิตจากการใช้ด้ายเส้นเดียวหรือมากกว่า มาทำให้เกิดเป็นห่วงสอดคล้องกันต่อเนื่อง ผ้าถักจึงสามารถเลาะออกได้เฉพาะตรงปลายสุดเท่านั้น ห่วงที่เรียงไปตามแนวนอนเรียกว่า คอर्स (Course) เปรียบได้กับแนวเส้นด้ายพุ่งของผ้าทอ ส่วนห่วงที่เรียงขึ้นไปตามแนวตั้งเรียกว่า เวล (wale) เปรียบได้กับแนวเส้นด้ายยืนของผ้าทอ เข็มเป็นอุปกรณ์หลักที่ทำให้เกิดห่วงและการคล้องเกี่ยวอย่างต่อเนื่อง ผ้าถักนี้มีคุณสมบัติที่สำคัญคือความยืดหยุ่น สามารถยืดขยายไปตามสรีระและการเคลื่อนไหวของร่างกาย ผ้าถักจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

ผ้าถักด้ายพุ่ง (weft knit) เกิดจากห่วงคล้องกันต่อเนื่องตามแนวนอน ทุกๆห่วงเกิดจากเส้นด้ายเส้นเดียวกัน ลักษณะของห่วงมีความแตกต่างกันคือ ห่วงถักที่ให้ห่วงใหม่สอดขึ้นจากด้านหลังห่วงเดิม (plain knit) มองเห็นลูกโซ่ตามแนวตั้ง ด้านหลังเห็นลูกคลื่นตามขวาง การถักลักษณะนี้ได้แก่ ผ้าเจอร์ซี่ (single jersey) ผ้าถักเฟิล และผ้าถักริบ

ผ้าถักด้ายยืน (warp knit) ผ้าเกิดจากห่วงคล้องต่อเนื่องกันตามแนวตั้ง แต่ละแถวของห่วงถักตามแนวตั้ง เกิดจากการใช้เส้นด้ายแต่ละเส้นคล้องคล้องกันกับห่วงถักในแนวแถวต่อไปได้แก่ ผ้าเจอร์ซี่ทริโก (jersey tricot) และผ้าทริโกตัวน (tricot satin) ผ้าถักแบ่งเป็นหลายชนิดขึ้นกับลักษณะการถัก อาทิ Filling-Knit fabrics เช่น Jersey, Rib structure, Interlock structure, Purl knits , Warp knit fabrics เช่น tricot warp knit, Raschel warp knit, Simplex, Milanese

3.3 ผ้าอัด

ผ้าอัดผลิตจากการใช้เส้นด้ายใยสั้นหรือใยยาว นำมาโรยให้เป็นแผ่น แล้วใช้ความร้อน สารเคมี และแรงอัด ช่วยให้เส้นด้ายเกาะเกี่ยวติดกันเป็นแผ่นได้ สามารถกำหนดความหนาของผ้าและความหนาแน่นของผ้าได้ตามต้องการ

3.4 ฝ้ายอื่นๆ

ฝ้ายไม่ถักไม่ทอ (nonwovens) เป็นฝ้ายที่เกิดจากกระบวนการผลิตอื่นที่นอกเหนือไปจากการถักและทอ เช่นการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มทั้งจากสารละลายและจากการฉีดพลาสติกหลอม การขึ้นรูปเป็นโฟม และการขึ้นรูปเป็นฝ้ายจากเส้นใยโดยตรง ลักษณะโครงสร้างเป็นแผ่นฝ้ายที่เกิดจากการสานไปมาของเส้นใย (fibrous web) มีการยึดกันด้วยการที่เส้นใยพันกันไปมา (mechanical entanglement) หรือโดยการใช้ความร้อน เรซิน หรือสารเคมีในการทำให้เกิดการยึดกันระหว่างเส้นใย ฝ้ายไม่ถักไม่ทอสามารถผลิตได้โดยหลายกระบวนการผลิตคือ

Dry-laid โดยการใช้ลมพ่นเส้นใยลงบนสายพานที่กำลังเคลื่อนตัวไป โดยการเรียงตัวของเส้นใยจะไม่มีทิศทาง (random oriented) ทำให้มีความแข็งแรงเท่ากันในทุกทิศทาง ตัวอย่างฝ้ายที่ได้จากการผลิตโดยกระบวนการนี้คือ ฝ้ายเช็ดเอนกประสงค์ กระดาษแยกช่องแบตเตอรี่ (battery separators) ใส้กรอง (filters) เป็นต้น

Wet-laid โดยการกระจายเส้นใยสั้นในน้ำ แล้วทำการกรองผ่านเพื่อแยกน้ำออกจากเส้นใย ที่มีการเรียงตัวในทุกทิศทาง ตัวอย่างฝ้ายที่ได้จากการผลิตโดยกระบวนการนี้คือ ใส้กรอง ใส้ฉนวน ฝ้ายเช็ดเอนกประสงค์ และกระดาษแยกช่องแบตเตอรี่

Spun-bonded เป็นการเตรียมฝ้ายโดยตรงจากเส้นใยที่ถูกฉีดออกมาจากหัวฉีดเส้นใย (spinnerets) เส้นใยต่อเนื่อง (continuous filament) ที่กำลังร้อนก็จะถูกฉีดสานไปมาบนสายพานที่กำลังหมุนอยู่ เส้นใย ที่เย็นตัวลงจะมีการเชื่อมติดตรงจุดที่มีการพาดผ่านระหว่างเส้นใยด้วยกัน การเชื่อมติดอาจทำเพิ่มเติม โดยการใช้ความร้อนและแรงกด นอนวูฟเวนที่ได้จากการผลิตโดยวิธีนี้จะมีค่าการทนต่อแรงดึงและแรงฉีก และบาง (low bulk) ตัวอย่างการใช้งานได้แก่ พื้นพรม (carpet backing) ฝ้ายที่ใช้ในงานธรณี (geotextiles) เสื้อผ้าป้องกัน (protective apparel) ใส้กรอง เป็นต้น

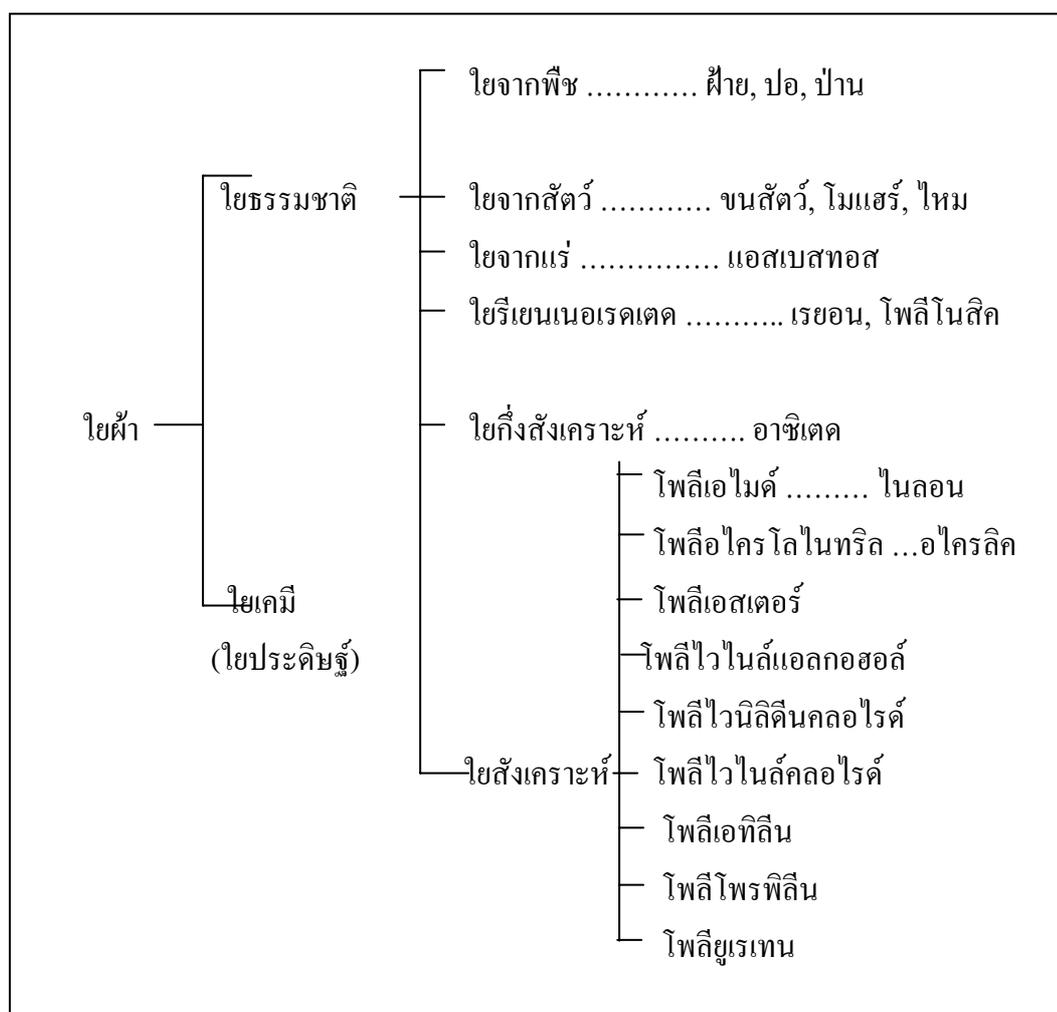
Hydroentangled หรือ spunlace กระบวนการผลิตคล้ายกับการผลิตนอนวูฟเวนแบบ spun-bond ยกเว้นใช้น้ำแรงดันสูงฉีดผ่าน โครงสร้างที่สานไปมาของเส้นใย ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายฝ้ายทอ ฝ้ายที่ได้จะมีความยืดหยุ่น (elasticity) และโค้งงอ (flexibility) มากกว่า spun bond

Melt-blown เป็นการฉีดเส้นใยผ่านหัวฉีดไปยังอากาศร้อนที่มีความเร็วสูง ทำให้เส้นใยเกิดการขาด เป็นเส้นใยสั้นๆ ซึ่งจะถูเก็บลงบนสายพานที่เคลื่อนที่ การยึดติดเกิดจากการสานไปมาของเส้นใย และการใช้ความร้อน เนื่องจากเส้นใยไม่ได้ผ่านการดึงยึดก่อน ฝ้ายที่ได้จะมีความแข็งแรงน้อยกว่าชนิดอื่น เส้นใยที่ใช้เทคนิคการผลิตนี้มากคือเส้นใยโอเลฟินและ โพลีเอสเตอร์ (Olefin and polyester fibers) ตัวอย่างการใช้งานได้แก่ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ทางการแพทย์ และกระดาษแยกช่องแบตเตอรี่

Needle punching เป็นการเตรียมแผ่นนอนวูฟเวนโดยเทคนิค dry-laid แล้วนำมาผ่าน เครื่องปักเข็ม (needle loom) เพื่อช่วยเพิ่มการยึดเกาะและความแข็งแรงของแผ่นนอนวูฟเวนให้มากขึ้น

4. ประเภทของเส้นใย

เส้นใยสามารถแบ่งได้หลายแบบขึ้นอยู่กับลักษณะการแบ่ง แต่ถ้าแบ่งตามแหล่งกำเนิดของเส้นใยซึ่งจะแบ่งได้เป็นสองประเภทใหญ่ๆ คือ เส้นใยธรรมชาติและเส้นใยประดิษฐ์ ในกลุ่มของเส้นใยธรรมชาติก็ยังสามารถแบ่งย่อยได้อีกเป็นเส้นใยที่มาจากพืช จากสัตว์ และจากแร่ ส่วนเส้นใยประดิษฐ์สามารถแยกเป็นเส้นใยที่ประดิษฐ์จากธรรมชาติ เส้นใยสังเคราะห์ และเส้นใยที่ประดิษฐ์จากวัสดุอื่นๆ



แผนภาพที่ 1 ประเภทของเส้นใย

เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers) เส้นใยพืช เช่น ฝ้าย ลินิน ปอ งามิ ป่าน หนุ่น เส้นใยสัตว์ เช่น ขนสัตว์ (wool) ไหม (silk) ผม (hair)แร่ เช่น แร่ใยหิน (asbestos)

เส้นใยประดิษฐ์ (Man-made fibers) ประดิษฐ์จากธรรมชาติ เช่น เรยอน อะซิเตด ไตรอะซิเตด เส้นใยสังเคราะห์ เช่น โอลีฟินส์ โพลีเอสเตอร์ โพลีอามิด ไนลอน แร่และเหล็ก เช่น โลหะ แก้ว เซรามิก กราไฟต์

4.1 สมบัติของเส้นใย

สมบัติของเส้นใยมีผลโดยตรงต่อสมบัติของผ้าที่ทำขึ้นจากเส้นใยนั้นๆ ผ้าที่ทำจากเส้นใยที่แข็งแรงก็จะมีความแข็งแรงทนทานด้วย หรือเส้นใยที่สามารถดูดซับน้ำได้ดีจะส่งผลให้ผ้าสามารถดูดซับน้ำและความชื้นได้ดี เหมาะสำหรับการนำไปใช้ในส่วนที่มีการสัมผัสกับผิวและดูดซับน้ำ เช่น ผ้าเช็ดตัว ผ้าอ้อม เป็นต้น ดังนั้นการที่เราเข้าใจสมบัติของเส้นใย จะช่วยทำให้สามารถทำนายสมบัติของผ้าที่มีเส้นใยนั้นๆ เป็นองค์ประกอบ รวมไปถึงผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้ ซึ่งจะช่วยให้สามารถเลือกชนิดของผลิตภัณฑ์ในเบื้องต้น ได้ถูกต้องตามความต้องการ ของการนำไปใช้งาน โดยการคาดเดาจากองค์ประกอบที่แจ้งไว้ในป้ายสินค้า

ความแตกต่างของเส้นใยขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และการเรียงตัวของโมเลกุล ซึ่งส่วนผสมและความแตกต่างในปัจจัยทั้งสามนี้ ทำให้เส้นใยมีสมบัติที่หลากหลายและแตกต่างกัน ซึ่งสมบัติของเส้นใยก็จะมีผลต่อสมบัติของผ้าหรือผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากเส้นใยนั้น ทั้งในส่วนที่เป็นที่ต้องการและไม่ต้องการต่อการนำไปใช้งาน ยกตัวอย่างเช่น ในเส้นใยที่สามารถดูดซับน้ำได้น้อย จะส่งผลให้ผ้าที่ทำจากเส้นใยชนิดนี้มีสมบัติดังนี้ • เกิดไฟฟ้าสถิตย์ (Static build-up) บนเนื้อผ้าได้ง่าย ทำให้ผ้าลื่นติดตัว • ผ้าแห้งเร็ว เนื่องจากมีปริมาณน้ำที่ดูดซับน้อย และไม่มีพันธะ (bond) ระหว่างเส้นใยและ โมเลกุลของน้ำ • ย้อมติดสียาก เนื่องจากการย้อมสีส่วนใหญ่อาศัยน้ำเป็นตัวกลางพาโมเลกุลของสีเข้าไปในเนื้อผ้า ผ้าที่ไม่ดูดซับน้ำจึงติดสีย้อมได้ยากกว่า สวมใส่สบายน้อยกว่า เนื่องจากการเหงื่อที่อยู่บนผิวถูกดูดซับน้อยทำให้รู้สึกเปียกชื้นได้ คงรูปได้ขณะเปียก (หรือขณะซัก) และผ้ายับน้อย ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับมีน้อย และไม่เกิดพันธะระหว่างเส้นใย และโมเลกุลของน้ำ ที่จะทำให้โครงสร้างเปลี่ยนแปลงไป

4.2 โครงสร้างทางกายภาพ

โครงสร้างทางกายภาพหรือโครงสร้างทางสัณฐาน (morphology) ของเส้นใย สามารถสังเกตได้จากกล้องจุลทรรศน์ (microscope) ที่มีกำลังขยาย 250-1000 เท่า โครงสร้างทางกายภาพนั้นครอบคลุมถึง ความยาว ขนาดหรือเส้นผ่าศูนย์กลาง รูปร่างภาคตัดขวาง (cross-sectional shape) รูปร่างของผิวเส้นใย และความหยักของเส้นใย

4.3 ความยาวเส้นใย (Fiber length)

เส้นใยมีทั้งชนิดสั้นและยาว ซึ่งความยาวของเส้นใยจะมีผลต่อสมบัติและการนำไปใช้งานของผลิตภัณฑ์สิ่งทอ แบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

เส้นใยสั้น (Staple fiber) เป็นเส้นใยที่มีความยาวอยู่ในช่วง 2 ถึง 46 เซนติเมตร เส้นใยธรรมชาติทั้งหมดยกเว้นไหมเป็นเส้นใยสั้น ยกตัวอย่างเช่น เส้นใยฝ้าย นุ่น ขนสัตว์ เส้นใยสั้นที่มาจากเส้นใยประดิษฐ์มักทำเป็นเส้นยาวก่อนแล้วตัด (chop) เป็นเส้นใยสั้นตามความยาวที่กำหนด

เส้นใยยาว (Filament fiber) เป็นเส้นใยที่มีความยาวต่อเนื่องไม่สิ้นสุด มีหน่วยวัดเป็นเมตรหรือหลา เส้นใยยาวส่วนใหญ่เป็นเส้นใยประดิษฐ์ ยกเว้นไหมซึ่งเป็นเส้นใยยาวที่มาจากธรรมชาติ เส้นใยยาวอาจเป็นชนิดเส้นยาวเดี่ยว (monofilament) ที่มีเส้นใยเพียงเส้นเดียว หรือเส้นใยยาวกลุ่ม (multifilament) ซึ่งจะมีเส้นใยมากกว่า 1 เส้นรวมอยู่ด้วยกันตลอดความยาว เส้นยาวที่ออกมาจากหัวฉีด (spinnerets) จะมีลักษณะเรียบซึ่งมีลักษณะเรียบคล้ายเส้นใยไหม หากต้องการลักษณะเส้นใยที่หยักก็จะต้องนำไปผ่านกระบวนการทำหยัก (crimp) ซึ่งเส้นใยที่ได้จะมีลักษณะคล้ายเส้นใยฝ้าย หรือขนสัตว์ ซึ่งส่วนมากเส้นใยที่ทำหยักมักจะนำไปตัดเพื่อทำเป็นเส้นใยสั้น

4.4 ขนาดเส้นใย

ขนาดของเส้นใยมีผลต่อสมรรถนะการใช้งานและสมบัติทางผิวสัมผัส(hand properties) เส้นใยที่มีขนาดใหญ่จะให้ความรู้สึกที่หยาบและแข็งของเนื้อผ้า แต่ในขณะที่เดียวกันก็ให้ความแข็งแรงมากกว่าเมื่อเทียบกับเส้นใยชนิดเดียวกันที่มีขนาดเล็กกว่า ผ้าที่ทำจากเส้นใยที่มีขนาดเล็กหรือมีความละเอียดก็จะให้ความนุ่มต่อสัมผัส และจัดเข้ารูป (drape) ได้ดีกว่า

เส้นใยธรรมชาตินั้นมักมีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ คุณภาพของเส้นใยธรรมชาติมักจะวัดจากความละเอียดของเส้นใย เส้นใยที่มีความละเอียดมาก (ขนาดเล็ก) จะมีคุณภาพที่ดีกว่า การวัดความละเอียดมักวัดจากเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใย (ภายใต้กล้องจุลทรรศน์) ในหน่วยของไมโครเมตร (1 ไมโครเมตรเท่ากับ 1/1000 มิลลิเมตร) ซึ่งโดยทั่วไปขนาดของเส้นใยธรรมชาติแต่ละชนิดมีดังแสดงตามตารางที่ 2

สำหรับเส้นใยประดิษฐ์ที่ผลิตในอุตสาหกรรม ขนาดของเส้นใยจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่น ขนาดของรูในหัวฉีด (spinneret holes) การดึงยืดขณะที่ปั่นเส้นใยและหลังการปั่นเส้นใย รวมไปถึงปริมาณและความเร็วของการอัดน้ำพลาสติกผ่านหัวฉีดในกระบวนการปั่นเส้นใย เส้นใยประดิษฐ์ที่ได้สามารถควบคุมความสม่ำเสมอได้ดีกว่าเส้นใยธรรมชาติ แต่ก็ยังมีส่วนที่ไม่สม่ำเสมอบ้างเนื่องจากความไม่คงที่ (irregularity) ของกระบวนการผลิต หน่วยที่มักใช้วัดความละเอียดของเส้นใยประดิษฐ์คือดีเนียร์ และ เท็กซ์ ดีเนียร์ (Denier) เป็นหน่วยการวัดขนาดของเส้นใย โดยเป็นน้ำหนักในหน่วยกรัมของเส้นใยที่มีความยาว 9,000 เมตร เส้นใย

ตารางที่ 2 ขนาดของเส้นใยธรรมชาติ

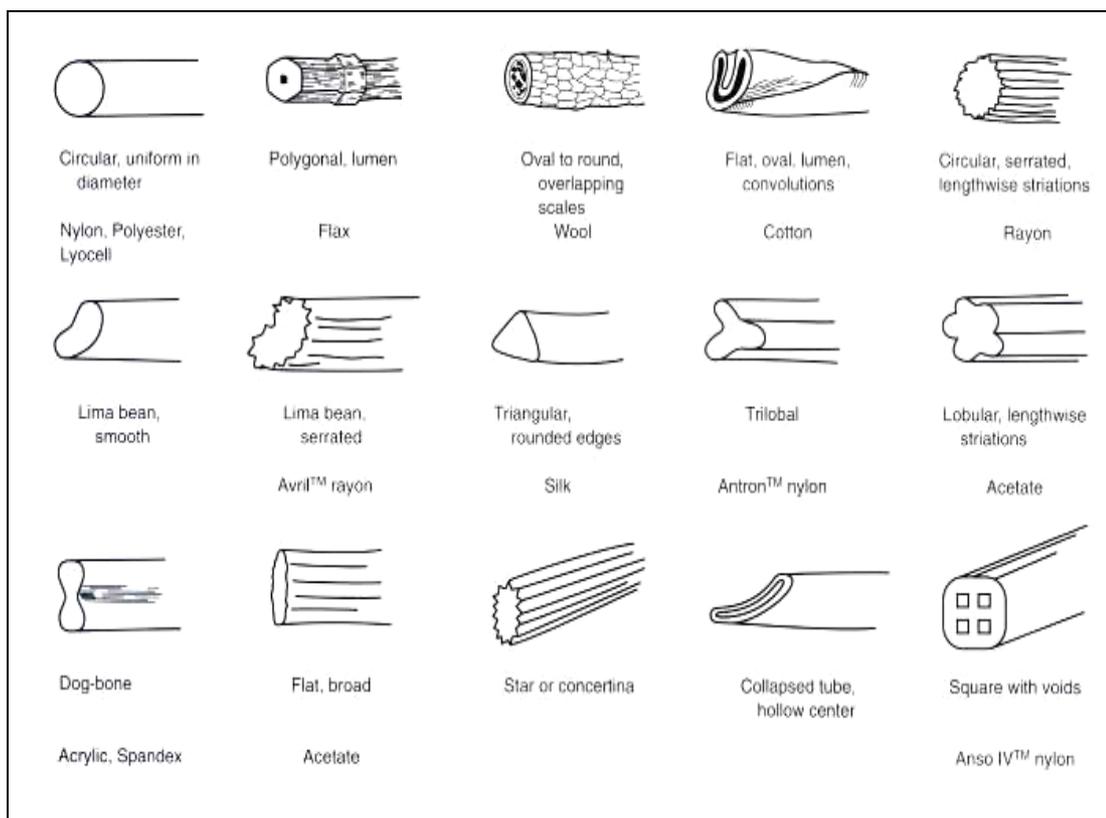
ชนิดของเส้นใย	ขนาดของเส้นใย
เส้นใยฝ้าย	16-20 ไมโครเมตร
ไหม	11-12 ไมโครเมตร
ขนสัตว์ (แกะ)	10-50 ไมโครเมตร
เส้นใยลินิน	12-16 ไมโครเมตร

ที่มา : ขนาดของเส้นใย [ออนไลน์], เข้าถึงเมื่อ 27 ธันวาคม 2552, เข้าถึงได้จาก http://www2.mtec.or.th/th/research/textile/textile_sci.html

ที่มีค่าดีเนียร์ต่ำจึงมีความละเอียดมากกว่า เส้นใยที่มีค่าดีเนียร์สูงเนื่องจากมีน้ำหนักน้อยกว่าในความยาวที่เท่ากัน เท็กซ์ (Tex) เป็นหน่วยการวัดขนาดของเส้นใยคล้ายกับดีเนียร์ แต่เป็นน้ำหนักในหน่วยกรัมของเส้นใยที่มีความยาว 1,000 เมตร ดีเนียร์ต่อฟิลาเมนต์ (Denier per filament, DPF) เป็นค่าที่วัดความละเอียดของเส้นใยที่อยู่ในเส้นด้ายซึ่งมีจำนวนเส้นใยตั้งแต่ 2 ขึ้นไป ดังนั้นค่าดีเนียร์ต่อฟิลาเมนต์จึงเท่ากับดีเนียร์ของฟิลาเมนต์นั้นหารด้วยจำนวนฟิลาเมนต์ (หรือจำนวนเส้นใย) ทั้งหมด โดยทั่วไปเส้นใยที่ใช้สำหรับเสื้อผ้ามีขนาดอยู่ในช่วง 1 ถึง 7 ดีเนียร์ เส้นใยสำหรับทำพรมมีขนาดใหญ่อยู่ในช่วง 15 ถึง 24 ดีเนียร์ เส้นใยขนาดเท่ากันไม่ได้หมายความว่ามีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานชนิดเดียวกันได้ เส้นใยที่ใช้สำหรับเสื้อผ้ามักจะนิ่มและละเอียดเกินกว่าที่จะทนต่อแรงกดได้ดีเหมือนเส้นใยที่ใช้ทำพรม ในทางกลับกันเส้นใยที่ใช้ทำพรมก็ให้ความรู้สึกต่อผิวหนังสัมผัสที่ละเอียดน้อยกว่าเส้นใยที่ใช้ทำเสื้อผ้า

4.5 รูปร่างหน้าตัดขวางของเส้นใย

รูปร่างหน้าตัดขวางของเส้นใยมีผลต่อความเป็นมันวาว ลักษณะเนื้อผ้า และสมบัติต่อผิวหนังสัมผัส เส้นใยมีรูปร่างหน้าตัดที่หลากหลายกัน เช่นวงกลม สามเหลี่ยม ทรงคล้ายกระดูก (dog bone) ทรงรูปถั่ว (bean-shaped) เป็นต้น ความแตกต่างของรูปร่างหน้าตัดขวางของเส้นใยธรรมชาติเกิดจากลักษณะการสร้างเซลล์โลสในขณะที่พืชเติบโต เช่นในเส้นใยฝ้าย หรือการกระบวนการสร้างโปรตีนในสัตว์ เช่น ขนสัตว์ หรือรูปร่างของช่อง (orifice) ในตัวไหมที่ทำหน้าที่ฉีดเส้นใยไหมออกมา สำหรับเส้นใยประดิษฐ์รูปร่างของหน้าตัดของเส้นใยขึ้นอยู่กับรูปร่างของรูในหัวฉีด



ภาพที่ 25 รูปร่างหน้าตัดขวางของเส้นใย

ที่มา : ขนาดของเส้นใย [ออนไลน์], เข้าถึงเมื่อ 27 ธันวาคม 2552, เข้าถึงได้จาก

http://www2.mtec.or.th/th/research/textile/textile_sci.html

4.6 ลักษณะผิวภายนอกของเส้นใย

ลักษณะผิวของเส้นใยมีทั้งแบบเรียบ เป็นแฉก หรือขรุขระ ซึ่งลักษณะผิวนี้มีผลต่อความเป็นมันวาว สมบัติต่อผิวสัมผัส เนื้อผ้า และการเปื้อนง่ายหรือยาก

4.7 ความหยัก (crimp)

ความหยักในเส้นใยช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะ (cohesiveness) ระหว่างเส้นใย ทำให้สามารถคืนตัวจากแรงอัด (resilience) ได้ดี ทนต่อแรงเสียดสี (resistance to abrasion) มีความยืดหยุ่น มีเนื้อเต็ม (bulk) และให้ความอบอุ่น (warmth)

4.8 องค์ประกอบทางเคมีและการเรียงตัวของโมเลกุล

เส้นใยประกอบด้วยโมเลกุลจำนวนมาก โมเลกุลเหล่านี้มีลักษณะเป็นเส้นยาวเรียกว่าโพลิเมอร์ (polymer) ที่เกิดจากการเรียงตัวของหน่วยโมเลกุลเล็กๆคือ มอนอเมอร์ (monomer) และเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเคมีด้วยกระบวนการสังเคราะห์ที่เรียกว่า โพลิเมอไรเซชัน (polymerization)

ขนาดของโพลิเมอร์ขึ้นอยู่กับความยาวของโมเลกุลซึ่งบอกได้จากจำนวนของมอนอเมอร์ที่อยู่ในโพลิเมอร์นั้น (degree of polymerization) โพลิเมอร์ที่มีเส้นโมเลกุลยาวจะมีน้ำหนักโมเลกุล มากกว่าโพลิเมอร์ที่มีเส้นโมเลกุลสั้นเนื่องจากจำนวนมอนอเมอร์ที่มากกว่านั่นเอง ซึ่งจะมีผลต่อความแข็งแรงของเส้นใยที่โพลิเมอร์นั้นเป็นองค์ประกอบอยู่ โมเลกุลหรือโพลิเมอร์ที่อยู่ในเส้นใยจะมีการเรียงตัวแตกต่างกัน เมื่อแต่ละโมเลกุลมีการเรียงตัวอย่างไรทิศทาง (random) ก็จะทำให้เส้นใยบริเวณนั้นมีความเป็นอสัณฐาน (amorphous) ส่วนในบริเวณที่โมเลกุลมีการเรียงซ้อนขนานอย่างเป็นระเบียบก็จะเป็นผลึก (crystalline) เกิดขึ้น เส้นใยที่มีความเป็นผลึกมากก็จะมี ความแข็งแรงมากกว่าเส้นใยที่มีความเป็นผลึกน้อย อย่างไรก็ตามปริมาณความเป็นผลึกไม่ใช่ปัจจัยที่ กำหนดความแข็งแรงของเส้นใย หากรวมไปถึงทิศทางการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่เป็นระเบียบ เหล่านี้ด้วย ถ้าโมเลกุลมีการจัดเรียงตัวอยู่ในทิศทางที่ขนานกับแกนตามความยาวของเส้นใย ก็จะช่วยให้เส้นใยมีความแข็งแรงมาก เนื่องจากโมเลกุลเรียงตัวในทิศทางเดียวกับแรงที่กระทำต่อเส้นใย (ตามความยาว) ทำให้สามารถมีส่วนช่วยในการรับแรงเต็มที่ เรียกว่าเส้นใยนั้นมีการจัดเรียงตัวของ โมเลกุลที่ดี (oriented fiber) ในอีกกรณีหนึ่งแม้เส้นใยจะมีบริเวณที่เป็นผลึกมาก แต่มีทิศทางการ จัดเรียงตัวที่ไม่ขนานกับแกนตามยาวของเส้นใย โมเลกุลก็ไม่สามารถรับแรงในทิศทางการดึงเส้น ใยได้เต็มที่ทำให้มีความแข็งแรงน้อยกว่าในกรณีแรก ดังนั้นในกระบวนการผลิตเส้นใยประดิษฐ์ จึง ต้องมีการดึงยืดเส้นใยที่ออกมาจากหัวฉีด เพื่อเพิ่มความเป็นผลึกโดยการจัดเรียงโมเลกุลให้เป็น ระเบียบ และทำการจัดเรียงโมเลกุลที่เป็นระเบียบเหล่านี้ให้อยู่ในทิศทางเดียวกับแกนตามยาวของ เส้นใย กระบวนการนี้เรียกว่าการดึงยืด (stretching หรือ drawing)

4.9 สมบัติของเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติผ้า

สมบัติรูปลักษณะ (Aesthetic properties) รูปลักษณะภายนอกของผ้ามักเป็นปัจจัยหนึ่ง ที่ ผู้บริโภคใช้ในการตัดสินใจเลือกซื้อผลิตภัณฑ์สิ่งทอ ว่ามีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้หรือไม่ สมบัติเหล่านี้ได้แก่ความเป็นมันวาว การทึงตัวของผ้า เนื้อผ้า และสัมผัส

สมบัติความเป็นมันวาว (Luster) สมบัตินี้เกี่ยวข้องกับปริมาณแสงที่ถูกสะท้อนกลับโดย ผิวหน้าของผ้า ซึ่งผ้าที่สะท้อนแสงกลับออกมามากก็จะเป็นมันวาวมาก สมบัตินี้ขึ้นอยู่กับ ลักษณะผิวหน้าของเส้นใย ค้าย สารเติมแต่ง และโครงสร้างผ้า ผ้าไหมเป็นตัวอย่างหนึ่งที่มีความมัน วาวสูงเนื่องจากเส้นใยไหมมีผิวหน้าที่เรียบและเป็นเส้นยาวต่อเนื่อง (filament) การเลือกกระดัดของ ความมันวาวของผ้ามักขึ้นอยู่กับนำไปใช้งาน

การทึงตัวของผ้า (Drape) สมบัติการทึงตัวของผ้าเกี่ยวข้องกับลักษณะที่ผ้าตกลงบน รูปร่างที่เป็น 3 มิติ เช่นบนร่างกาย หรือบนโต๊ะ ว่าสามารถโค้งงอตามรูปทรงที่ผ้าวางอยู่ได้มากน้อย เพียงใด ผ้าที่สามารถทึงตัวได้ดีก็จะดูอ่อนนุ่ม สามารถจัดเข้ากับรูปทรงได้ง่าย ส่วนผ้าที่ทึงตัวได้

น้อยมักจะมีความแข็ง สมบัติเหล่านี้ขึ้นอยู่กับความละเอียดของเส้นใย รวมทั้งลักษณะของเส้นด้าย และโครงสร้าง (การถักทอ) ของผ้าด้วย

เนื้อผ้า (Texture) เป็นสมบัติที่เกี่ยวข้องทั้งด้านที่มองเห็นด้วยตาและที่สัมผัสด้วยมือ ผ้าอาจจะมีผิวที่ดูเรียบ หรือขรุขระ ผ้าที่ทำจากเส้นใยธรรมชาติมักจะมีผิวที่ดูไม่สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับผ้าที่ทำจากเส้นใยประดิษฐ์ที่มีผิวเรียบ สมบัติของเนื้อผ้าขึ้นอยู่กับความเรียบของผิวหน้าของเส้นใย และเส้นด้าย ลักษณะการถักทอผ้าและการตกแต่งสำเร็จก็มีผลต่อสมบัติเนื้อผ้าเช่นกัน

สมบัติต่อผิวสัมผัส (Hand) สมบัติต่อผิวสัมผัสเกี่ยวข้องกับความรู้สึกต่อผิวเมื่อสัมผัสกับเนื้อผ้า ผ้าแต่ละชนิดอาจให้ความรู้สึกเย็น อุ่น หนา บาง ลื่น หรือนุ่ม แตกต่างกันไป สมบัตินี้ขึ้นอยู่กับสมบัติผิวหน้าของเส้นใย และเส้นด้าย รวมทั้งโครงสร้าง (การถักทอ) ของผ้าด้วย

สมบัติความทนทาน สมบัติความทนทานของผ้ามีผลต่ออายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์สิ่งทอที่ทำจากผ้านั้นๆ สมบัติความทนทานของผ้าครอบคลุมทั้งสมบัติการทนต่อแรงเสียดสี (abrasion resistance) ทนต่อแรงดึง (tenacity)

สมบัติการทนต่อแรงเสียดสี เป็นสมบัติที่บอกถึงความสามารถของผ้าที่ทนต่อแรงขัดถู หรือเสียดสี ที่มักเกิดขึ้นตลอดเวลาการใช้งานของสิ่งทอ โดยเฉพาะเสื้อผ้า นอกจากนี้ความสามารถในการพับงอไปมาโดยไม่ขาด (flexibility) ก็เป็นสมบัติสำคัญที่เกี่ยวข้องกับสมบัติความทนของผ้า

สมบัติความทนต่อแรงดึง เป็นความสามารถของผ้าในการทนต่อแรงดึง ซึ่งความแข็งแรงนั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเส้นใยแล้ว ยังขึ้นอยู่กับลักษณะของเส้นด้ายและการขึ้นรูปเป็นผ้าอีกด้วย

สมบัติความใส่สบาย (Comfort properties) สมบัติความใส่สบายเกี่ยวข้องกับการที่ผู้สวมใส่รู้สึกเมื่อสวมใส่สิ่งทอภายใต้สภาวะสิ่งแวดล้อมและกิจกรรมต่างๆ สมบัตินี้มีความซับซ้อน เพราะนอกจากจะขึ้นอยู่กับสมบัติของผ้าที่เกี่ยวข้องจริงต่อความรู้สึกสบายในการสวมใส่แล้ว ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยหนึ่งซึ่งสำคัญมากคือความรู้สึกพึงพอใจของผู้สวมใส่ที่มีต่อผลิตภัณฑ์สิ่งทอนั้นๆ ซึ่งอาจก่อให้เกิดความแตกต่างหลากหลายขึ้นอยู่กับรสนิยมส่วนตัว และทัศนคติที่ผู้สวมใส่มีต่อผลิตภัณฑ์

สมบัติการดูดซับน้ำ (Absorbency) เป็นสมบัติที่เกี่ยวข้องกับความสามารถของเส้นใยที่จะดูดซับโมเลกุลของน้ำจากร่างกาย (ผิวหนัง) หรือจากอากาศรอบๆ จะเห็นได้ว่าสมบัติของผ้าไม่ได้ขึ้นอยู่กับสมบัติของเส้นใยเพียงอย่างเดียว หากแต่ขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นอีกหลายอย่าง เช่น ชนิด และโครงสร้างของเส้นด้าย กระบวนการผลิตผ้า เป็นต้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อรูปลักษณะ เนื้อผ้า ราคา สมรรถนะการใช้งาน รวมไปถึงการดูแลรักษา สารเติมแต่งก็มีผลต่อสมบัติด้านสัมผัส (hand properties) รูปลักษณะ และสมรรถนะการใช้งานของผ้าด้วยเช่นกัน

5. ผ้าฝ้ายที่ใช้ในการผลิตเสื้อยืด

ผ้าฝ้าย หรือ cotton 100% ที่นำมาผลิตเสื้อยืดสามารถแบ่งตามเบอร์เส้นด้าย โดยทั่วไปได้ 3 เบอร์ คือ 20,32,40 ตามลำดับ สำหรับเบอร์เส้นด้ายที่สูงเกิน 40 ขึ้นไปจะพบเห็นได้ไม่มากนัก ในท้องตลาด ส่วนใหญ่จะเป็นผ้าที่ต้องสั่งทอขึ้น โดยเฉพาะตามเบอร์ที่ต้องการ เนื่องจากกระบวนการในการผลิต(ปั่นเส้นด้าย)ให้เส้นด้ายมีขนาดเล็กต้องอาศัยเครื่องจักรและการผลิตที่ยุ่งยากซับซ้อน จึงมีต้นทุนที่สูงในการผลิต เมื่อนำมาผลิตเสื้อยืดก็จะมีต้นทุนสูงตามไปด้วย ถ้าเบอร์น้อยจะใช้ด้ายเส้นใหญ่ เบอร์ มากใช้ด้ายเส้นเล็ก เช่นผ้า Cotton 100 % เบอร์ 20 เนื้อผ้าจะมีความหนาแน่นมากกว่าเบอร์ 32 เนื่องจากขนาดเส้นด้ายที่ใหญ่กว่า โดยทั่วไปผ้า Cotton ที่นิยมนำมาใช้ทำเสื้อยืดและเสื้อโปโล ในราคาระดับปานกลางถึงสูงคือผ้า Cotton 100% เบอร์ 20 (เสื้อยืดสำหรับผู้ชาย) และ 32(เสื้อยืดสำหรับผู้หญิง) ส่วนเบอร์ 40 มักจะนำมาทำเสื้อสำหรับเด็กอ่อน หรือเสื้อที่เน้นความบางเป็นพิเศษ และเสื้อยืดแบรนด์เนมส์บางรุ่นเบอร์ที่สูงกว่า 40 จะเป็นเสื้อยืดที่ต้องสั่งทอผ้าขึ้นเป็นพิเศษ

5.1 กระบวนการผลิตเส้นด้าย

เป็นตัวบ่งบอกถึงคุณภาพของเนื้อผ้า เพื่อให้ได้เส้นใยที่มีคุณภาพทั้งในด้านการเรียงตัวของด้ายที่มีความหนาแน่นสม่ำเสมอและกำจัดสิ่งสกปรกแปลกปลอมออกจากเส้นใยเพื่อให้ได้เส้นด้ายที่มีคุณสมบัติที่ดีเมื่อไปทอเป็นผ้าผืน ทำให้สามารถแบ่งเกรดผ้าฝ้ายที่ผ่านกระบวนการผลิตได้ 3 เกรด คือ Cotton OE ไม่ผ่านกระบวนการคัดคุณภาพของเส้นใยฝ้าย เสื้อยืดที่ผลิตจาก cotton ชนิดนี้จะมีความกระด้างกว่าอีกสองประเภทรวมถึงความเหนียวทนต่ำขาดง่าย เป็นผ้า Cotton เกรดต่ำสุด และมีราคาถูกสุด เนื่องจากต้นทุนในการใช้เครื่องจักรและกระบวนการในการผลิตจากเส้นใยฝ้ายเป็นเส้นด้ายมีต้นทุนต่ำที่สุด Cotton Semi ผ่านกระบวนการผลิตเส้นด้ายโดยวิธีการสาวเส้นใยฝ้าย โดยเครื่องจักรทำให้ได้ผลผลิตเป็น เส้นด้ายใยสั้น ที่มีขนาดใหญ่ (เบอร์ 20 - 32) และมีความเนียนนุ่มและกระด้างในระดับปานกลาง Cotton Comp ผ่านกระบวนการผลิตเส้นด้ายโดยวิธีการหวีเส้นใยด้วยเครื่องจักร ซึ่งมีกระบวนการที่ซับซ้อนและละเอียดอ่อนกว่าแบบการสาว ทำให้ได้ผลผลิตเป็นเส้นด้ายที่มีขนาดเล็ก (เบอร์ 32 ขึ้นไป) และสามารถกำจัดสิ่งสกปรกออกจากเส้นใยได้ในเปอร์เซ็นต์มากกว่า รวมถึงได้เส้นด้ายที่มีเส้นใยที่ยาวกว่า เมื่อนำมาทอเป็นผ้าผืนจึงเป็นผ้า cotton ที่เนื้อดีมีความนุ่ม และกระด้างในระดับต่ำ เหนียวทน ขาดยาก มีความมันและเนื้อผ้าที่นำมาทำเสื้อยืดนั้นแบ่งได้เป็น 3 ประเภท

ประเภทที่ 1 เนื้อผ้าที่ทำมาจากเส้นใยธรรมชาติ หรือ ผ้าฝ้าย โดยการนำปุยฝ้ายเส้นเล็ก ๆ มาปั่นให้เป็นเส้นด้ายแล้วนำมาทอเป็นผ้าผืน ซึ่งเนื้อผ้าประเภทนี้จะให้ความรู้สึกในการสวมใส่สบาย เนื้อผ้านุ่มเนียน ระบายอากาศดี(เนื่องจากเส้นใยมีรูพรุน) ไม่อมเหงื่อแม้อยู่กลางแจ้งในวันที่

แคดเปรี๊ยง ๆ โดยเฉพาะถ้าเป็นผ้า Cotton 100 % ซึ่งนี่ถือเป็นข้อดีของเนื้อผ้าชนิดนี้ โดยราคาจะแปรตามเกรดของเนื้อผ้า ส่วนข้อเสีย เวลาไรดต้องออกแรงปล้ำกับรอยยับมากกว่าผ้าชนิดอื่นรวมถึงเมื่อซักไปนาน ๆ ผ้าจะเริ่มยืดและยืดง่ายกว่าผ้าชนิดอื่น

ประเภทที่ 2 เป็นเนื้อผ้าผสมระหว่างเส้นใยธรรมชาติ และเส้นใยสังเคราะห์ (ตัวย่อว่า TC ,CVC, CTC ขึ้นกับเปอร์เซ็นต์การผสมของเส้นด้าย) เนื่องจากกระบวนการผลิตผ้าใยสังเคราะห์นั้นเป็นผลพลอยได้มาจากการกลั่นน้ำมันในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ซึ่งสามารถควบคุมขั้นตอนการผลิตในเชิงปริมาณได้ ต่างกับผ้าเส้นใยธรรมชาติที่ต้องพึ่งผลผลิตจากการปลูกฝ้าย และดินน้ำลมฟ้าอากาศ รวมถึงแมลงที่เป็นศัตรูตัวฉกาจในการทำลายผลผลิต รวมถึงในเรื่องการขนส่ง และกระบวนการในการผลิตเส้นด้ายจากฝ้ายที่มีความละเอียดอ่อนและซับซ้อน จึงทำให้ต้นทุนของผ้า cotton 100 % (เกรดดี ทอด้วยด้ายเส้นเล็ก) สูงกว่า และจุดเด่นของผ้าเนื้อผสมคือเรื่องการควบคุมการยืด(หด)ย้วยจะทำให้ดีกว่า cotton 100 % แต่ข้อเสียที่ติดมาจากใยสังเคราะห์คือจะระบายอากาศได้ไม่ดีเท่า cotton 100 % (ถึงแม้จะทอให้เส้นใยมีรูเล็ก ๆ เพื่อช่วยในการระบายอากาศแล้วก็ตาม) แต่ยังคงถือว่าอยู่ในเกณฑ์ระดับปานกลาง เส้นด้ายที่นิยมนำมาทอผ้า TC คือเบอร์ 20 และ 32 และ 40 เส้นใยที่ผลิตจากผ้าประเภทนี้ ราคาอยู่ในระดับปานกลาง โดยขึ้นกับเบอร์ผ้า และ % การผสมกันระหว่างเส้นใย Cotton 100% และเส้นใยสังเคราะห์ เบอร์เส้นด้ายการผสมของผ้า TC ระหว่าง Polyester และ Cotton จะอยู่ที่อัตราส่วน 65% ต่อ 35% และสำหรับเนื้อผ้าผสม CVC จะอยู่ที่ Cotton 70-85% ต่อ Polyester 15-30% ส่วน CTC จะใช้ cotton 70% และเส้นใยสังเคราะห์ 30%

ประเภทที่ 3 เนื้อผ้าใยสังเคราะห์หรือโพลีเอสเตอร์ (ใช้ตัวย่อว่า TK) วัตถุประสงค์ที่นำมาทำผ้าเส้นใยสังเคราะห์ได้มาจากปิโตรเคมี เส้นใยที่ทำจากเนื้อผ้าประเภทนี้จะมีราคาถูกที่สุด ข้อดีคือมีความคงสภาพอยู่ทรง ไม่หดไม่ย้วย เนื้อผ้าจะมีความมัน แต่ข้อเสียคือเนื้อผ้าจะระบายอากาศได้น้อยมาก ถ้าใส่อยู่ในที่แคบร้อน ๆ หรืออากาศอบอ้าว จะรู้สึกไม่สบายตัว โดยเฉพาะคนที่เหงื่อออกง่ายจะยิ่งชุ่มไปด้วยเหงื่อ เนื่องจากเนื้อผ้าดูดซับเหงื่อได้น้อย และเมื่อใส่ไปนาน ๆ (ซักบ่อย ๆ) เส้นใยจะขึ้นฟู

5.2 คุณสมบัติของผ้าฝ้าย

สมบัติทางกายภาพ เส้นใยฝ้ายจะมีขนาดความกว้างเท่าๆ กันหรือใกล้เคียงกัน ก็จะมี ความกว้างประมาณ 12-20 ไมครอน ตรงส่วนกลางของเส้นใยจะกว้างกว่าส่วนหัวและปลาย ส่วนความยาวใยฝ้ายขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ เช่น ขึ้นอยู่กับพันธุ์ฝ้าย สภาพดินฟ้าอากาศ และการเจริญเติบโต เส้นใยฝ้ายส่วนใหญ่จะยาวประมาณ 7/8 นิ้ว และขนาดที่นิยมนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมสิ่งทอคือใยฝ้ายที่ยาวประมาณ 1/2 นิ้ว

ความมันเงา : โยฝ้ายโดยทั่วไปจะมีความมันน้อย ต้องเพิ่มความมันด้วยการตกแต่ง เช่น ฝ้ายเมอร์เซอร์ไรซ์ ความเหนียว ฝ้ายจะมีความเหนียวปานกลาง ก็จะเหนียวประมาณ 3.0-5.0 กรัมต่อเดนเยอร์ ความเหนียวจะเพิ่มขึ้นเมื่อเปียก ความเหนียวเมื่อเส้นใยเปียกจะมากกว่าความเหนียวเมื่อแห้งประมาณ 25-40 เปอร์เซ็นต์ ความยืดหยุ่นและการยืดได้ ในฝ้ายจะยืดหยุ่นได้ค่อนข้างต่ำ ก็จะยืดได้ประมาณ 3-7 เปอร์เซ็นต์ บางครั้งอาจถึง 10 เปอร์เซ็นต์ก่อนถึงจุดขาด การหดตัวกลับที่เดิม หากจับยืดออกเพียง 2 เปอร์เซ็นต์จะหดตัวกลับเข้าที่เดิมได้ 74 เปอร์เซ็นต์ และถ้าจับยืดออก 5 เปอร์เซ็นต์จะหดกลับที่เดิมได้เพียง 50 เปอร์เซ็นต์

ความคืนตัว : โยฝ้ายและฝ้ายคืนตัวได้ดี และง่ายมาก ความถ่วงจำเพาะ โยฝ้ายมีความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ 1.54 กรัมลูกบาศก์เซนติเมตร

การดูดความชื้น : ฝ้ายดูดความชื้นในบรรยากาศได้ 8.5 เปอร์เซ็นต์ ถ้าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ 95 เปอร์เซ็นต์ และ 100 เปอร์เซ็นต์ ฝ้ายจะดูดความชื้นไว้ได้ 15 เปอร์เซ็นต์ และ 25-27 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ฝ้าย สามารถดูดซับความชื้นจากเหงื่อและน้ำได้ดีและสามารถระบายความชื้นได้เร็ว

ความคงรูป : โดยปกติฝ้ายจะคงรูป ไม่ยืด และหดตัวมากนัก ความยืดและหดจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต เป็นฝ้ายด้วย ถ้าต้องการไม่ให้หด จะต้องทำการตกแต่งให้ทนหด เช่น ฝ้ายชันฟอไรซ์

การตีไฟและการทนต่อความร้อน : ฝ้ายตีไฟง่ายและเร็ว เมื่อเผาจะมีกลิ่นเหมือนเผากรดาศ มีขี้เถ้าเหลือน้อย และมีสีเทานุ่ม ฝ้ายถ้าถูกความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 149 องศาเซลเซียส นานๆ จะทำให้ใยเสื่อมคุณภาพ แต่จะไหม้เกรียมถ้ารีดด้วยความร้อนสูงมากและการตกแต่ง เช่นการลงแป้ง ซึ่งจะช่วยให้ไหม้เกรียมง่ายขึ้น

สมบัติทางเคมีผลต่อต่าง : โยฝ้ายจะทนต่อต่างได้ดี ซึ่งในกระบวนการผลิตฝ้ายต้องใช้ต่างมาก เช่น การฟอกขาวและการชุบมัน สารซักฟอกและการฟอกขาวทุกชนิดล้วนมีส่วนประกอบของด่างทั้งสิ้น จึงสามารถใช้สารเหล่านี้กับฝ้ายได้อย่างปลอดภัย

ผลต่อกรด : ฝ้ายจะไม่ทนต่อกรด โดยเฉพาะกรดเข้มข้นบางชนิดประเภทกรดของโลหะ เพราะกรดจะทำลายเส้นใยฝ้าย

ผลต่อสารละลายอินทรีย์ : ฝ้ายจะทนต่อสารละลายอินทรีย์ที่ใช้ในการซักกรีดีในประจำวันและการลบรอยเปื้อนได้อย่างดีแต่จะละลายใน สารประกอบบางชนิด เช่น คิวปราโมเนียมไฮดรอกไซด์ และคิวปริเอทิลีนไดอะมีน (cupriethylenediamine) เราจึงใช้สารเคมี 2 ชนิดนี้ในการวิเคราะห์เส้นใยฝ้ายได้

ผลต่อแสงแดดและปัจจัยอื่นๆ : ผ้าฝ้ายถ้าตากแดดจัดไว้นานเกินไป จะทำให้กลายเป็นสีเหลืองและเสื่อมคุณภาพได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความชื้น และการย้อมสี (vat) และสีซัลเฟอร์บางชนิด

การเก็บรักษา : ควรเก็บผ้าฝ้ายไว้ในที่แห้งและมีแสงสว่างน้อย ซึ่งจะทำให้ผ้าอยู่ในสภาพเดิมได้นาน อย่าเก็บผ้าไว้ในที่อับชื้นและอู่น เพราะผ้าฝ้ายจะขึ้นราง่าย ซึ่งจะทำให้ผ้าเสื่อมคุณภาพและขาดเร็วกว่าปกติ

ประโยชน์ใช้สอยของผ้าฝ้าย : ผ้าฝ้ายใช้ประโยชน์ได้กว้างขวางมากและมีราคาไม่แพง ซึ่งสามารถใช้เป็นเสื้อผ้านุ่มๆ ได้ทุกชนิด นอกจากนี้ยังเป็นผ้าที่ใช้ในบ้าน ผ้ามัดเต่งบ้าน และผ้าที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมได้เป็นอย่างดีอีกด้วย ทั้งนี้เนื่องจากผ้าฝ้าย มีคุณสมบัติหลายประการ เช่น สวมใส่สบาย ไม่ร้อน ซักได้ง่าย คุณซึมน้ำและความชื้นได้ดี นอกจากนั้นผ้าฝ้าย ยังย้อมสีง่าย สีไม่ตกและทน ถ้าย้อมสีได้ถูกวิธี ผ้าฝ้ายจะทนต่อความร้อนและระบายความร้อนได้ดีอีกด้วย การตกแต่งผ้าฝ้ายที่นิยมทำกัน ได้แก่ การทำการหด ทำให้ทนยับ ซักและไม่ต้องรีด เป็นต้น ความน่าใช้และสวมใส่สบายเป็นคุณสมบัติเด่นของผ้าฝ้าย

6. ผ้าโพลีเอสเตอร์ที่ใช้ในการผลิตเสื้อเชิ้ต

ผ้าโพลีเอสเตอร์ เป็นผ้าจากใยสังเคราะห์ มีความเหนียวคงตัว ซักง่ายแห้งเร็ว ย้อมติดสียาก ผ้าโพลีเอสเตอร์ [EP Fabric] ประกอบด้วยเส้นใยทางด้านแนวตั้งและแนวนอน ซึ่งทั้ง 2 แนวนี้ใช้วัสดุที่ต่างกัน โดยนำข้อดีของเส้นใยไนลอน และเส้นใยโพลีเอสเตอร์ มาทำการผลิตให้ได้ผ้าโพลีเอสเตอร์ที่มีคุณภาพ

ส่วนประกอบผ้าโพลีเอสเตอร์ผ้าโพลีเอสเตอร์ ประกอบด้วยเส้นใย 2 แนว ดังนี้

1. เส้นใยแนวนอน เป็นเส้นใยโพลีเอสเตอร์ที่มีคุณสมบัติทนแรงดึงได้ดี การยืดตัวน้อย
2. เส้นใยแนวตั้ง เป็นเส้นใยไนลอนที่มีลักษณะการยืดหยุ่นที่ดี ใ้รับแรงกระแทก และเป็นตัวรักษาเสถียรภาพโดยทั่วไปของเนื้อผ้า

7. ผ้าซาตินที่ใช้ในการผลิตเสื้อแจ็กเก็ต

ผ้าซาติน (satin) เป็นผ้าตัวนอ้ยทำจากด้ายใยยาว เนื้อผ้าเรียบและมีความเงามันมาก โดยมีลักษณะการทอคือนำเส้นด้ายยืนแต่ละเส้นสอดข้ามเส้นพุ่ง 4 เส้น (4/1) และไปขัดกับด้ายเส้นที่ 5 สอดข้ามไปด้านขวาหรือด้านซ้าย ทำให้เห็นเส้นยืนลอยอยู่บนหน้าผ้าเป็นส่วนใหญ่ เรียกว่าตัวนอ้ยยืน ถ้าหากใช้ด้ายพุ่งข้ามเส้นด้ายยืน 4 เส้น แล้วสอดขัดกับด้ายยืนเส้นที่ 5 (1/4) ตามลำดับไปทางด้านขวาหรือซ้าย เรียกว่าตัวนอ้ยพุ่ง มีลักษณะเฉพาะของการทอแบบนี้คือ จะมีด้านถูกและด้านผิด ด้านถูกจะมีความมันเงา ส่วนด้านผิดจะไม่เงาหรือมีความขรุขระ ถ้าเส้นด้ายลอยข้ามยาวไม่

มากจะทำให้ผ้าจะมีความแข็งแรง เนื้อแน่น แต่ถ้าด้ายขี้มยาวก็จะทำให้เนื้อผ้า มีความเงามันมาก ทั้งตัวดี ลมผ่านยาก ทำให้ผ้าเนบเนื้อเวลาเดินด้านลม แต่เส้นด้ายที่ยาวขี้มจะทำให้ถูกเกี่ยวขาดได้ง่าย ไม่ทนต่อการขัดถู จึงไม่ค่อยทนทาน

8. หลักการพื้นฐานของเครื่อง Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry (ICP-MS) (แม้น อมรสิทธิ์และคณะ 2552 : 468-481)

ICP-MS เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่ได้รับความนิยมมาก สามารถวิเคราะห์ได้เกือบทุกธาตุในตารางธาตุ ให้ความไวในการตรวจวัดสูงทำให้วิเคราะห์ธาตุในระดับต่ำๆ ได้ หลังจากมีเครื่อง ICP-MS ออกวางจำหน่ายในปี ค.ศ. 1983 โดยบริษัท VG ของสหราชอาณาจักร และ Sciex ของประเทศแคนาดา เครื่อง ICP-MS ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น มีการประยุกต์ใช้กับตัวอย่างที่หลากหลาย อาจเรียกได้ว่า ICP-MS เป็นทางเลือกใหม่ของการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ

8.1 องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่อง ICP – MS

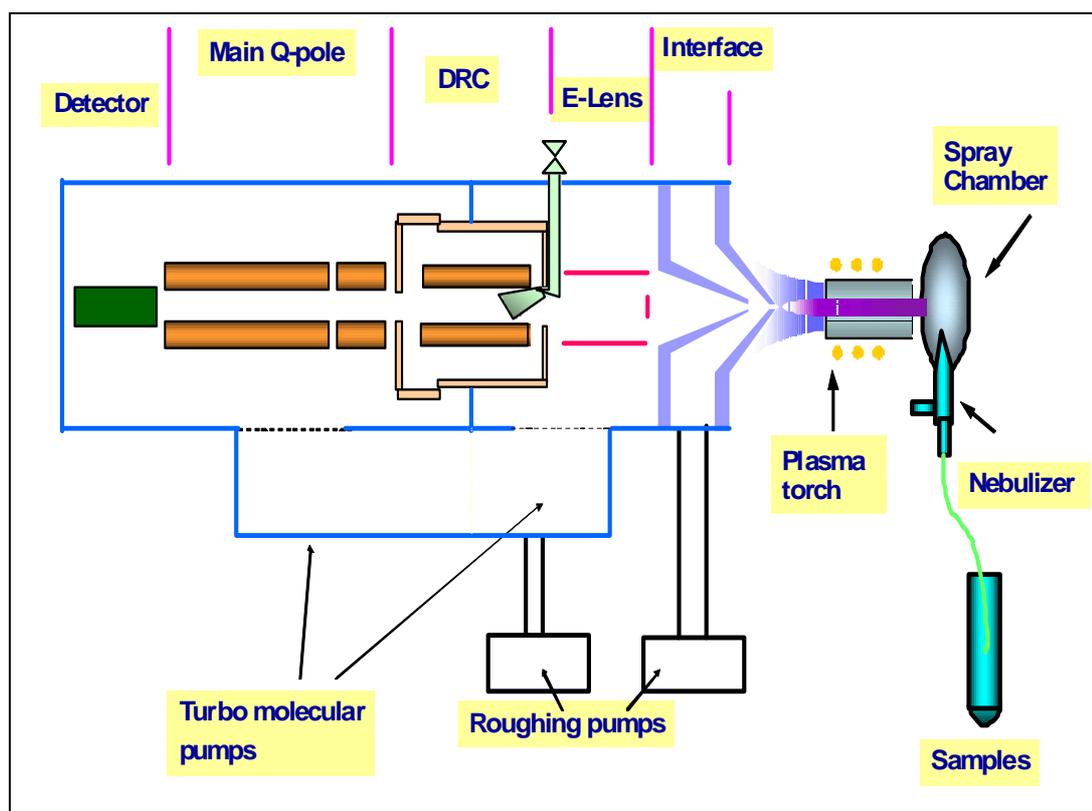
หลังจากงานวิจัยของ Houk ในปี ค.ศ. 1980 ได้ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีที่มีอยู่เดิม 2 ชนิด คือ argon ICP ใน ICP-OES เพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดไอออน และ quadrupole mass spectrometer ในการตรวจวัดมวลไอออน ทำให้ได้เทคนิคการวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่มีประสิทธิภาพสูง จนกระทั่งได้มีเครื่องมือ ICP – MS ถูกวางจำหน่ายในปี ค.ศ. 1983 ต่อมาได้มีการพัฒนาเครื่อง ICP – MS อย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามก็ดีเครื่องมือ ICP – MS ในปัจจุบันมีองค์ประกอบหลักๆ ของเครื่องมือ ICP – MS คล้ายกับเครื่องมือในยุคแรกๆ ซึ่งองค์ประกอบที่สำคัญของเครื่อง ICP – MS มีดังแสดงในภาพที่ 26 และแต่ละส่วนทำหน้าที่ ดังนี้

1. Nebulizers ทำหน้าที่ดูดตัวอย่างและทำให้ตัวอย่างเป็นละอองเล็กๆ เพื่อจะเข้าสู่ส่วนของ spray chamber ต่อไป
2. Spray chamber ทำหน้าที่คัดเลือกละอองขนาดเล็กๆ ของตัวอย่าง และ drain ละอองที่มีขนาดใหญ่ทิ้งไป
3. Plasma torch ทำหน้าที่เปลี่ยนอะตอมของธาตุให้กลายเป็นไอออนอิสระ ซึ่งใช้อุณหภูมิประมาณ 6,000 – 10,000 K เมื่ออะตอมของธาตุกลายเป็นไอออนอิสระจะผ่าน interface เข้าสู่ส่วนของ detector และจะถูก control ด้วยส่วนต่างๆ ของเครื่อง ดังนี้
 - 3.1 E – Lens ทำหน้าที่คัดไอออนที่มีคุณสมบัติที่เราต้องการและมวลของสารตัวอย่างที่เรากำหนดโดยใช้กระแสไฟฟ้า
 - 3.2 DRC ทำหน้าที่กำจัด interference

3.3 Main Q – pole ทำหน้าที่คัดกรองไอออนตัวที่เราต้องการให้ละเอียดขึ้น

3.4 Quandapole ทำหน้าที่ปรับไอออนตัวที่เราต้องการเพื่อผ่านเข้าสู่ส่วนของ detector ต่อไป

4. Detector ทำหน้าที่ตรวจวัดสัญญาณ

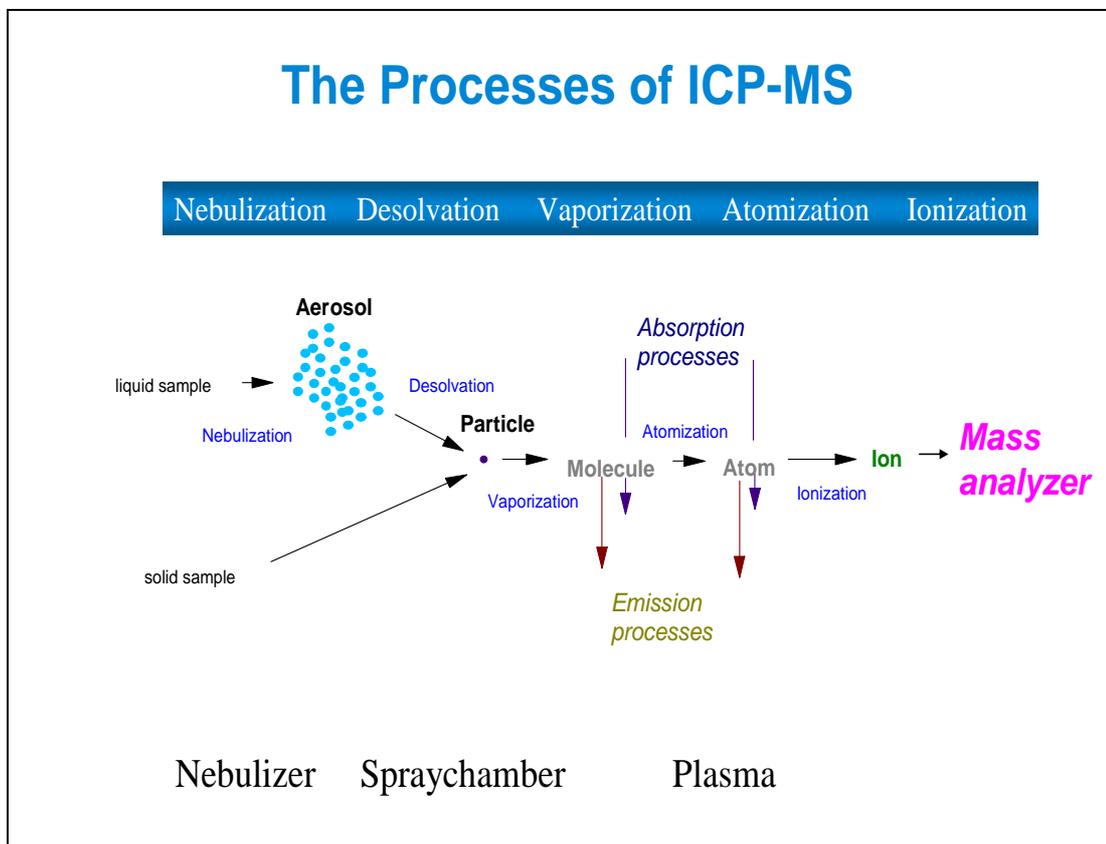


ภาพที่ 26 องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่อง ICP – MS

ที่มา:แม่้น อมรสิทธิ์ และคณะ, หลักการและเทคนิควิเคราะห์เชิงเครื่องมือ

(กรุงเทพฯ : บริษัท ชวนการพิมพ์ 50 จำกัด, 2552) , 469.

8.2 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาของเครื่อง ICP-MS



ภาพที่ 27 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาของเครื่อง ICP-MS

ที่มา: แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ, หลักการและเทคนิควิเคราะห์เชิงเครื่องมือ
(กรุงเทพฯ : บริษัท ชวนการพิมพ์ 50 จำกัด, 2552) , 470.

การวิเคราะห์โดย ICP-MS อาศัยการใช้พลาสมาที่มีอุณหภูมิสูงในการทำให้สารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ ซึ่งโดยทั่วไปอยู่ในสภาพสารละลายเปลี่ยนเป็นไอออน โดยสารละลายตัวอย่างจะถูกฉีดด้วยอุปกรณ์ nebulizer เพื่อให้สารละลายกลายเป็นละอองฝอย และละอองฝอยจะเข้าไปใน spray chamber เพื่อให้ละอองที่เล็กผ่านไปยัง ICP torch ได้ เมื่อละอองฝอยเล็กๆ เข้าไปสู่พลาสมาที่มีพลังงานสูงอุณหภูมิประมาณ 8000 องศาเซลเซียส ทำให้ละอองฝอยเล็กๆ นี้ เกิดการเปลี่ยนสภาพเป็นไอออนที่เกิดขึ้นจะถูกสกัดผ่าน interface เข้าไปยังระบบสุญญากาศผ่านไปยังส่วนของหน่วยวิเคราะห์มวลไอออน (mass analyzer) และหน่วยตรวจวัดไอออน (ion detector) โดยสัญญาณที่ตรวจวัดได้จะถูกแปลงเป็นค่าความเข้มข้นหรืออัตราส่วนไอโซโทปของธาตุ

8.3 การทำงานขององค์ประกอบต่างๆ ของเครื่อง ICP-MS

8.3.1 ระบบการนำสารตัวอย่างส่งเข้าสู่พลาสมา (sample introduction system)

ระบบการนำสารตัวอย่างส่งเข้าสู่พลาสมา ประกอบด้วย nebulizer และ spray chamber โดยอาจมี peristaltic pump ในการพาสารละลายตัวอย่างเข้าสู่ nebulizer หรือ ไม่มีก็ได้ กระบวนการสำคัญที่เกิดในระบบการนำสารตัวอย่างส่งเข้าสู่พลาสมา ได้แก่ การทำให้สารละลายเป็นละอองฝอย และการคัดเลือกละอองเพื่อให้ผ่านไปยังพลาสมา

8.3.1.1 การทำให้สารละลายเป็นละอองฝอย สารตัวอย่างที่ถูกนำเข้าเพื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ ICP-MS เป็นได้ทั้ง ของเหลว ของแข็ง และแก๊ส แต่ที่เป็นที่นิยมใช้คือในรูปของของเหลวและสารละลาย หากตัวอย่างเป็นของแข็งโดยทั่วไปต้องทำให้อยู่ในสภาพสารละลายก่อน และอาศัย peristaltic pump ในการขับเคลื่อนสารละลายโดยใช้อัตราเร็วประมาณ 1 มิลลิลิตรต่อนาที หลังจากที่สารละลายตัวอย่างถูกพาไปยังอุปกรณ์ที่เรียกว่า nebulizer สารละลายจะแตกออกเป็นละอองฝอยเนื่องจากเกิดการปะทะกับแก๊สอาร์กอนที่ถูกพาเข้ามาใน nebulizer ด้วยอัตราการไหลสูงประมาณ 1 ลิตรต่อนาที

8.3.1.2 การคัดเลือกละอองเพื่อให้ผ่านไปยังพลาสมา เนื่องจากพลาสมาไม่มีประสิทธิภาพมากพอในการทำให้ละอองหยดใดๆ เกิดกระบวนการ desolvation vaporization atomization ionization ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงจำเป็นต้องมีการคัดแยกขนาดละอองของตัวอย่างให้ผ่านเข้าไปยังพลาสมา โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า spray chamber ซึ่งมีหน้าที่คัดให้ละอองฝอยขนาดเล็กผ่านเข้าไปยังพลาสมา ส่วนละอองขนาดใหญ่ และหยดของสารละลายจะถูกพาไปยังห้อง spray chamber ยังช่วยทำให้การส่งผ่านละอองสารตัวอย่างไปยังพลาสมามีความต่อเนื่องมากขึ้นเรื่อยๆ ที่การนำเข้าของสารละลายตัวอย่างจาก peristaltic pump เป็นแบบห้วงๆ

8.3.2 ระบบการนำสารตัวอย่างส่งเข้าสู่พลาสมาถือว่าเป็นจุดด้อยที่สุดของเครื่องมือ ICP-MS เนื่องจากมีสารตัวอย่างเพียง 1-2% เท่านั้น ที่สามารถผ่านไปยังพลาสมาได้ ถึงแม้จะมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ระบบนำส่งสารตัวอย่างที่ใช้ในปัจจุบันก็ไม่ได้แตกต่างจากที่ใช้ในปี ค.ศ. 1983 มากนัก รายละเอียดของ nebulizer และ spray chamber ประเภทต่างๆ มีดังนี้

8.3.2.1 nebulizer ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือประเภท pneumatic ซึ่งอาศัยการไหลของแก๊ส ความเร็วสูงที่ความดันประมาณ 20-30 psi ในการทำให้สารละลายกลายเป็นละอองฝอย หากพิจารณา nebulizer ที่ใช้ใน ICP-MS คู่คล้ายกับ nebulizer ของ ICP-OES แต่ในทางปฏิบัติไม่ควรนำ nebulizer ที่ทำไว้สำหรับ ICP-OES มาใช้กับเครื่องมือ ICP-MS เนื่องจาก ICP-MS มีข้อจำกัดในด้านของความทนทานต่อปริมาณเกลือและของแข็งที่ละลายอยู่ (dissolved solids) ได้น้อยกว่า ICP-OES โดยทั่วไปการวิเคราะห์โดย ICP-MS ควรมีความเข้มข้นของ dissolved

solids ในสารตัวอย่างไม่เกิน 0.2% ในขณะที่ nebulizer สำหรับ ICP –OES ถูกสร้างเพื่อให้ทนต่อ dissolved solids ได้ถึง 1-2 %

nebulizer สำหรับ ICP-MS มีหลายแบบ เช่น crossflow concentric microconcentric และ microflow ซึ่งโดยทั่วไปทำจากแก้ว แต่สำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ผ่านการย่อยสลายด้วยกรดกัดแก้ว อาจใช้ nebulizer ที่ทำจากวัสดุพอลิเมอร์ nebulizer

crossflow nebulizer แก๊สอาร์กอนวิ่งเข้าสู่ท่ออะปิลลารีในทิศทางตั้งฉากกับท่อของสารละลาย

crossflow nebulizer แก๊สอาร์กอนวิ่งเข้าสู่ท่อด้านนอกในขณะที่สารละลายตัวอย่างถูกพาผ่านเข้าท่ออะปิลลารีด้านในปลายเปิดของท่อ สารละลายที่ออกมาจะปะทะกับแก๊สอาร์กอนความเร็วสูง ทำให้สารละลายแตกเป็นละอองฝอยเล็กๆ โดยที่ท่ออะปิลลารีของ concentric nebulizer มีขนาดเล็กกว่ากรณีของ crossflow nebulizer ทำให้สามารถรองรับ dissolved solids ได้น้อยกว่า แต่ประสิทธิภาพในการทำให้สารละลายเกิดเป็นละอองฝอยเล็กๆ จะดีกว่า

microflow nebulizer ในกรณีที่มีสารตัวอย่างในปริมาณที่จำกัด หรือในกรณีที่ต้องการหลีกเลี่ยงปัญหาจาก memory effects ควรจำกัดปริมาณสารละลายตัวอย่างที่นำเข้าสู่พลาสมา ซึ่งทำได้โดยการใช้ microflow nebulizer เพื่อให้สามารถผ่านสารละลายตัวอย่างในอัตราเร็วที่ต่ำกว่า 0.1 มิลลิลิตร ต่อนาที การทำงานของ microflow nebulizer อาศัยหลักการเดียวกับของ concentric nebulizer แต่โดยทั่วไปต้องใช้แก๊สที่มีแรงดันสูงกว่า โดยทั่วไป nebulizer ประเภทนี้ ทำจากวัสดุพอลิเมอร์ เช่น polytetrafluoroethylene (PTFE) perfluoroalkoxy (PFA) หรือ polyvinylidene fluoride (PVDF)

8.3.2.2 spray chamber มีหลายแบบ เช่น ชนิด double pass และชนิด cyclonic ทำงานโดยอาศัยหลักการที่แตกต่างกัน

double pass spray chamber ทำจากแก้วหรือวัสดุพอลิเมอร์โดยสร้างเป็นท่อสองชั้นโดยที่ละอองที่ออกมาจาก nebulizer จะถูกพาเข้ายังท่อตรงกลาง ซึ่งละอองนี้จะเดินทางตลอดแนวท่อเพื่อผ่านไปยังท่อชั้นนอก ที่เชื่อมกับทางออกที่จะไปยังพลาสมา ในระหว่างการเดินทาง ละอองขนาดใหญ่ (ใหญ่กว่า 10 ไมโครเมตร) ตกลงจากแนวทางเดินด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก และหลุดออกไปยังท่อทิ้ง ส่วนละอองฝอยขนาดเล็ก (เล็กกว่า 5-10 ไมโครเมตร) สามารถผ่านไปยังท่อชั้นนอกที่เชื่อมกับทางออกที่จะไปยังพลาสมาโดยผ่าน injector ด้านในของ ICP torch โดยทั่วไป spray chamber ประเภทนี้จะใช้ร่วมกับ crossflow nebulizer

cyclonic spray chamber แยกละอองฝอยโดยอาศัยหลักการของแรงหนีศูนย์กลาง ซึ่งละอองที่มีขนาดแตกต่างกันถูกแยกออกจากกันด้วยลักษณะการปั่นเป็นวง (vortex) ที่

เกิดจากการไหลของสารละลายและแก๊สอาร์กอนในแนวเส้นสัมผัส (tangential flow) ละอองฝอยขนาดเล็กถูกพาผ่านขึ้นไปยังพลาสมาโดยผ่าน injector ด้านในของ ICP torch ในขณะที่ละอองขนาดใหญ่ถูกเหวี่ยงไปโดนผนังของ chamber และ หล่นลงสู่ท่อทิ้ง โดยทั่วไป spray chamber ประเภทนี้จะใช้ร่วมกับ concentric nebulizer และให้ประสิทธิภาพในการพาสารไปยังพลาสมาสู่กรณีของ double pass spray chamber

8.3.3. ระบบการทำให้เกิดพลาสมา (plasma generation system)

พลาสมาคือแก๊สที่เกิดการเปลี่ยนสภาพเป็นไอออนและมีอุณหภูมิสูง ในเทคนิค ICP-MS พลาสมาที่ใช้เป็นแก๊สอาร์กอนที่ถูกสร้างขึ้นในคัปพลาสมา (ICP torch) ภายใต้อุณหภูมิ 1 บรรยากาศ

ICP torch ที่ใช้ทั่วไปเป็นคัปชนิด Fassel เช่นเดียวกับในกรณีของ ICP-OES ประกอบด้วยท่อ 3 ชั้น โดยทั่วไปทำจากควอทซ์ ซึ่ง ICP torch อาจเป็นแบบคัปชั้นเดียว หรือเป็นชนิดที่ถอดแยกท่อข้างในสุดออกได้ โดยท่อข้างในสุด เรียกว่า injector อาจทำจากควอทซ์หรืออะลูมินา ส่วนท่อชั้นอื่นๆ ล้วนทำจากควอทซ์ การที่ ICP torch มีท่อถึง 3 ชั้น เพื่อให้สามารถผ่านแก๊สอาร์กอนในอัตราไหลในระดับที่ต่างกัน ได้ และมีการผ่านแก๊สอาร์กอนถึง 3 บริเวณด้วยกัน ดังนี้

บริเวณแรก ไหลผ่านระหว่างท่อด้านนอกสุดและท่อตรงกลางด้วยอัตราการไหลสูงถึง 12-17 ลิตรต่อนาที เรียกแก๊สอาร์กอนในบริเวณนี้ว่า plasma gas หรือ cooling gas

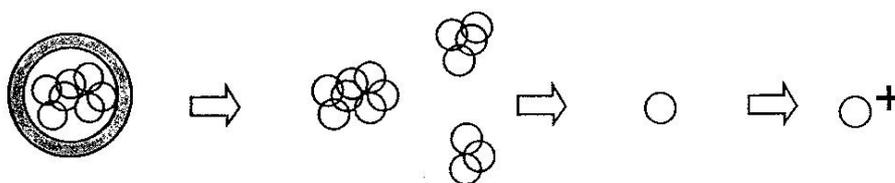
บริเวณที่สอง ไหลผ่านระหว่างท่อตรงกลางกับรอบนอกของท่อ injector อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที ซึ่งอัตราการไหลนี้มีผลต่อตำแหน่งของฐานของพลาสมา หากใช้อัตราการไหลสูงฐานของพลาสมาจะห่างจากบริเวณ injector มากขึ้น เรียกแก๊สอาร์กอนในบริเวณนี้ว่า auxiliary gas

บริเวณที่สาม ไหลผ่านด้านในของท่อ injector ด้วยอัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที เพื่อพาละอองฝอยเล็กของสารละลายตัวอย่างผ่านจากระบบการนำสารละลายตัวอย่างเข้าสู่พลาสมา เรียกแก๊สอาร์กอนในบริเวณนี้ว่า nebulizer gas หรือ carrier gas หรือ injector gas

ICP torch จะสอดอยู่ตรงกลางของวงขดลวด (load coil หรือ induction coil) ที่ต่อกับเครื่องกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ และปลายของ ICP torch อยู่ห่างจาก interface ประมาณ 10-20 มิลลิเมตร เช่นเดียวกับกรณีของ ICP-OES การทำให้เกิดพลาสมาอาศัยการส่งผ่านพลังงานจากเครื่องกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ กำลัง 750-1500 วัตต์ เข้ามายัง induction coil ทำให้เกิดกระแสสลับสั้นไปมาในอัตราเร็วที่ขึ้นกับความถี่ของเครื่องกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ คือ 27.12 หรือ 40.68 เมกะเฮิร์ตซ์ และเกิดสนามแม่เหล็กที่มีพลังงานสูงใน ICP torch เมื่อมีการปล่อยประจุไฟฟ้าพลังงาน

สูงจากเตสลาผ่านมายังแก๊สอาร์กอนที่ไหลผ่านบริเวณระหว่างท่อด้านนอกสุด และท่อตรงกลางทำให้อิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงที่จะวิ่งชนกับอะตอมของอาร์กอนทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากอะตอมของแก๊สอาร์กอนมากขึ้น โดยกระบวนการนี้เกิดขึ้นอย่างเป็นลูกโซ่ ทำให้ได้เป็นพลาสมาของอาร์กอนที่มีอุณหภูมิสูง (หมายเหตุ ที่ความถี่ 27.12 หรือ 40.68 เมกะเฮิร์ตซ์ เป็นความถี่ที่ไม่รบกวนการกับความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารโดยทั่วไป และการเลือกใช้เครื่องกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุที่ความถี่ 40.68 เมกะเฮิร์ตซ์ เป็นที่นิยมมากกว่าเพราะสามารถทำงานโดยใช้กำลังต่ำ ๆ ได้ ทำให้มี background ต่ำ และพลาสมามีความเสถียรดีขึ้น)

ในบริเวณพลาสมา มีกระบวนการต่างๆ ที่เกิดกับละอองฝอยของสารละลาย ตัวอย่างที่ถูกพาผ่านเข้าไปยัง injector ดังภาพที่ 28



ภาพที่ 28 กระบวนการต่างๆ ที่เกิดในพลาสมา

ที่มา: แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ, หลักการและเทคนิควิเคราะห์เชิงเครื่องมือ (กรุงเทพฯ : บริษัท ชวนการพิมพ์ 50 จำกัด, 2552) , 474.

8.3.4. interface และระบบสุญญากาศ

ระบบ interface ระหว่าง plasma และช่องสุญญากาศ ประกอบด้วยช่องลดความดันแบบ step-down vacuum stage และ โคนโลหะหล่อเย็น 2 ชั้น คือ sampler cone (มีขนาดรู 1.0-1.1 มิลลิเมตร) และ skimmer cone (มีขนาดรู 0.4-0.9 มิลลิเมตร) ซึ่งทำจากนิกเกิลหรือแพลทินัม

interface ทำหน้าที่ในการสกัดไอออนจากพลาสมา เพื่อให้ผ่านเข้าไปยังช่องสุญญากาศอย่างมีประสิทธิภาพ โดยทั่วไปมีการใช้ปั๊มถึง 3 ตัว โดยในขั้นแรกทำหน้าที่ลดความดันจากความดันบรรยากาศเป็นความดันประมาณ 1 บาร์ และ 2 มิลลิบาร์ตามลำดับ ซึ่งการลดความดันในลักษณะนี้ทำให้เกิด supersonic expansion ของลำไอออน ทำให้ลำไอออนกางออกและไอออนส่วนหนึ่งเท่านั้นที่ยังคงอยู่บริเวณแนวกลางของลำไอออนเดินทางผ่าน skimmer cone เข้าสู่ช่องสุญญากาศได้ ถ้า skimmer cone มีขนาดรูใหญ่ขึ้นจะทำให้ไอออนเคลื่อนผ่านไปได้มากขึ้นและ

เป็นการเพิ่มความไวในการตรวจวัดให้มากขึ้น แต่ในทางปฏิบัติจะจำกัดรูของ skimmer cone ไว้เพื่อลดการผ่านไปได้ของ matrix

8.3.5 ชุด ion optics

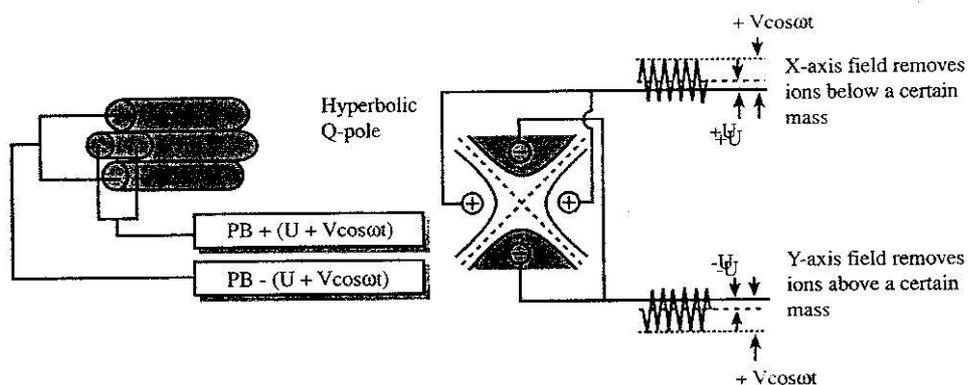
หลังจากไอออนเดินทางจากพลาสมาผ่านระบบ interface แล้ว จะเดินทางต่อไปยังส่วนของ ion optics เพื่อถูกบังคับกำหนดทิศทางการเดินทางไปยังหน่วยวิเคราะห์มวลไอออน โดยทั่วไปไอออนที่มีมวลมากกว่าจะสามารถเคลื่อนผ่าน ion focusing system ได้ดีกว่าทำให้มีความไวในการวิเคราะห์มากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อไอออนเดินทางจากพลาสมาผ่านเข้าไปในระบบสุญญากาศ จะเกิดปรากฏการณ์ charge separation หมายถึงการที่ไอออนบวกแยกออกจากไอออนลบ เนื่องจากไอออนบวกมีมวลและพลังงานจลน์มากกว่าอิเล็กตรอนทำให้อิเล็กตรอนแพร่ออกไปในบริเวณแนวกลางของลำไอออนจึงมีแต่ไอออนบวก ทำให้เกิดการผลักกันเอง ซึ่งไอออนมวลสูงจะผลักไอออนมวลต่ำออกจากแนวกลางของลำไอออน (defocusing) เพื่อป้องกันไม่ให้ไอออนหลุดออกจากแนวกลางลำ ต้องให้ศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมกับ ion lens เพื่อบังคับการเคลื่อนที่ของไอออน โดยระบบ ion optics ประกอบด้วย ชุดของ ion lens ที่ทำหน้าที่ในการบังคับการเคลื่อนที่ของไอออน รวมถึง lens ที่เป็น photon stop หรือ shadow stop ที่ใช้ป้องกันไม่ให้ photon และ neutral species จากพลาสมาเคลื่อนผ่านไปยังหน่วยวิเคราะห์มวลไอออนด้วย

8.3.6 หน่วยวิเคราะห์มวลไอออน (mass analyzer)

โดยทั่วไป mass analyzer ที่ใช้ในเครื่องมือ ICP-MS เป็นแบบ quadrupole วางอยู่ระหว่างชุด ion lens กับหน่วยตรวจวัดไอออนภายในช่องสุญญากาศ โดยที่ quadrupole mass analyzer ประกอบด้วยแท่งโลหะที่เป็นเหล็กกล้าหรือโมลิบดีนัมจำนวน 4 แท่ง ยาวประมาณ 15-20 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร ปกติทำการแยกไอออนตามอัตราส่วนมวลต่อประจุทำงานโดยให้ไฟฟ้ากระแสตรงกับแท่งโลหะเหล่านี้ โดยคู่ของแท่งโลหะที่อยู่ตรงข้ามกันจะได้รับศักย์ไฟฟ้าบวกหรือลบเหมือนกัน และจะถูกสลับขั้วโดยการควบคุมของสนามในย่านวิทยุความถี่ 2-3 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าค่าหนึ่ง ไอออนที่มีมวลค่าหนึ่งสามารถเคลื่อนผ่านออกไปได้เพื่อไปยังหน่วยตรวจวัดไอออนในขณะที่ไอออนอื่นๆ วิ่งชนกับแท่งโลหะและไม่สามารถเคลื่อนผ่านออกไปได้ นอกเหนือจากการใช้ quadrupole mass analyzer ก็มีการใช้ double focusing magnetic sector ซึ่งมีประสิทธิภาพในการแยกมวลที่ต่างกันเพียงเล็กน้อยได้ หรือเป็นหน่วยแยกมวลแบบ time of flight ซึ่งสามารถวิเคราะห์แยกมวลไอออนได้อย่างรวดเร็ว

8.3.7 หน่วยตรวจวัดไอออน (ion detector)

หน่วยตรวจวัดไอออนต้องมีความไวในการตรวจวัดสูงและสามารถตรวจวัดปริมาณไอออนได้ในช่วงกว้าง (wide dynamic range) โดยทั่วไปใช้เป็น electron multiplier detector ซึ่งอาจเป็นประเภท channel electron multiplier หรือ discrete dynode electron multiplier ดังภาพที่ 23



ภาพที่ 29 การทำงานของ quadrupole mass analyzer

ที่มา: แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ, หลักการและเทคนิควิเคราะห์เชิงเครื่องมือ

(กรุงเทพฯ : บริษัท ชวนการพิมพ์ 50 จำกัด, 2552), 475.

Channel electron multiplier มีลักษณะเป็นท่อกรวยที่ฉาบด้วยวัสดุกึ่งตัวนำ ทำงานโดยการให้ศักย์ไฟฟ้าลบที่บริเวณทางเข้าของกรวยเพื่อดึงให้ไอออนบวกวิ่งเข้ามาได้และให้ศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ (เป็นลบน้อยลง) จนกระทั่งศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ที่ปลายสุดของกรวยเมื่อไอออนบวกวิ่งมาชนพื้นผิวที่เป็นวัสดุกึ่งตัวนำทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา ซึ่งอิเล็กตรอนนี้จะวิ่งไปชนพื้นผิวกึ่งตัวนำบริเวณใหม่ทำให้ได้อิเล็กตรอนหลุดออกมาเพิ่ม เป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ ทำให้เกิดการขยายของจำนวนอิเล็กตรอน

Discrete dynode electron multiplier ประกอบจาก dynode หลายๆ ตัว มีลักษณะการทำงานคล้ายกับ channel multiplier โดยเมื่อไอออนวิ่งไปชน dynode ตัวแรกทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกจาก dynode ซึ่งอิเล็กตรอนนี้ไปชน dynode ตัวถัดมา แล้วเกิดการปล่อยอิเล็กตรอนออกมาอีก เป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ ทำให้เกิดการขยายของจำนวนอิเล็กตรอน

8.4 ปัญหาการรบกวนการวิเคราะห์ (interferences) ในการวิเคราะห์ด้วย ICP-MS

ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP-MS มีปัญหาการรบกวนการวิเคราะห์ที่สามารถจำแนก interferences เป็นประเภทต่างๆ คือ การรบกวนทางสเปกตรัม (spectral interferences) การ

รบกวนจากสารอื่นในตัวอย่าง (matrix interferences) ที่ทำให้เกิดการรบกวนจากปัจจัยทางกายภาพ (physical interferences) การเกิดการรบกวนประเภท space-charge interference และการเกิดการสะสมของเกลือ (salt build-up)

8.5 การรบกวนของสเปกตรัม (spectral interferences)

การซ้อนทับกันของสเปกตรัม อาจเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น การเกิด polyatomic interference โดยการรวมตัวเป็นโมเลกุลในสถานะแก๊สเป็นกลุ่มของ argides oxides hydroxides hydrides และ การเกิดเป็น doubly charged species รวมถึงการซ้อนทับกันของสเปกตรัมจาก isobaric interference

polyatomic หรือ molecular spectral interference เกิดจากการรวมตัวกันของไอออน 2 ตัวขึ้นไป ซึ่งอาจเป็นการรวมตัวของไอออนที่มีมากในพลาสมา เช่น อาร์กอน หรือ ไอออนที่มาจากรกในอากาศ ตัวทำละลาย หรือจากสารตัวอย่าง ตัวอย่างของการซ้อนทับกันของสเปกตรัมที่เกิดจากการรบกวนของอาร์กอน เช่น การเกิดการรวมตัวกันระหว่างอาร์กอนกับออกซิเจน $^{40}\text{Ar}^{16}\text{O}$ จะรบกวนการวิเคราะห์ธาตุเหล็ก ^{56}Fe นอกเหนือจากนั้น อาร์กอนยังสามารถจับรวมตัวกับธาตุต่างๆ ในกรดที่ใช้เป็นตัวย่อยสลายสารตัวอย่าง เช่น $^{40}\text{Ar}^{35}\text{Cl}$ ซึ่งรบกวนการวิเคราะห์ปริมาณสารหนู ^{75}As การเกิดการรวมตัวระหว่างอาร์กอนกับธาตุคาร์บอนจากตัวทำละลายอินทรีย์ต่างๆ $^{40}\text{Ar}^{12}\text{C}$ ก่อให้เกิดปัญหาการรบกวนการวิเคราะห์ปริมาณธาตุโครเมียม ^{52}Cr และในตัวอย่างที่มีธาตุโซเดียมสูง เช่น น้ำทะเล ก็อาจเกิดปัญหาต่อการวิเคราะห์ ^{63}Cu จากการรบกวนของ $^{40}\text{Ar}^{23}\text{Na}$ เป็นต้น นอกเหนือจากนั้นธาตุต่างๆ เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน จากน้ำหรืออากาศ ก่อให้เกิดการรบกวนจากการรวมตัวของ $^1\text{H}^{16}\text{O}^{16}\text{O}^1\text{H}$ กับธาตุอื่นๆ เช่น กับธาตุในกลุ่ม rare earth หรือ refractor-type elements เนื่องจากธาตุกลุ่มนี้นิยมจับตัวในรูปออกไซด์ทำให้สร้างปัญหาเป็นตัวรบกวนสำหรับธาตุอื่นๆ ซึ่งเกิดมากในบริเวณปลายพลาสมาที่มีอุณหภูมิต่ำก่อนถึง interface

doubly charged interference เกิดจากธาตุที่เกิดการไอออไนเซชันในลำดับที่สูงขึ้นทำให้ได้อัตราส่วนมวลต่อประจุที่ครึ่งหนึ่งของมวลอะตอม ซึ่งการรบกวนจาก polyatomic interference และ doubly charged interference แปรเปลี่ยนตามสถานะของพลาสมาที่ใช้ในการทดลอง สามารถปรับและควบคุมได้

isobaric interference เกิดจากอะตอมของธาตุต่างชนิดกันที่มีเลขมวลเท่ากัน ในบางกรณี พบว่า ธาตุต่างชนิดกันที่มีเลขมวลเท่ากันเกิดการซ้อนทับกันของสเปกตรัมได้ เช่น ^{40}Ar ก่อให้เกิดปัญหาในการวิเคราะห์ธาตุแคลเซียม ^{40}Ca

8.6 การรบกวนจากสารอื่นในตัวอย่าง (matrix interferences)

สารอื่นในตัวอย่าง (matrix) อาจทำให้สัญญาณการวิเคราะห์ลดลงหรือเพิ่มขึ้น ซึ่งโดยมากจะเป็นการลดลงของสัญญาณ โดยที่ matrix อาจมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการส่งผ่านของสารตัวอย่างเข้าสู่พลาสมา โดยเกิดจากการที่ matrix มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ส่งผลให้ลักษณะการเกิดเป็นละอองฝอยของสารตัวอย่างผิดไปจากสารละลายมาตรฐาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของสารตัวอย่างที่มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ซึ่งมีความหนืดที่แตกต่างจากน้ำ ปัญหาการรบกวนนี้ อาจเรียกว่าเป็นการรบกวนจากปัจจัยทางกายภาพ (physical interferences) การรบกวนจาก matrix ในอีกลักษณะหนึ่ง คือ การส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของพลาสมา เช่น การใช้กรดที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันสัญญาณการวิเคราะห์ที่ได้จะแตกต่างกัน และอาจมีการรบกวนประเภทอื่นๆ เช่น การเกิดการรบกวนประเภท space – charge interference และการเกิดการสะสมของเกลือ (salt build – up)

การเกิดการรบกวนประเภท space – charge interference ปกติแล้วไอออนที่มีมวลต่ำจะมีประสิทธิภาพในการผ่านในระบบ ion optics ได้ไม่ดี เนื่องจาก matrix – induced space charge effects ซึ่งทำให้เกิดการเหวี่ยงไอออนของธาตุที่กำลังวิเคราะห์ออกจากแนวกลางของลำไอออน ในกรณีการวิเคราะห์ธาตุที่มีมวลน้อย ๆ ในตัวอย่างที่มีธาตุที่มีมวลสูงปนอยู่ในปริมาณมาก ไอออนของธาตุที่มีมวลสูงนี้มีพลังงานจลน์มากกว่า และจะแย่งจอบที่บริเวณแนวกลางของลำไอออนและผลักไอออนของธาตุที่กำลังวิเคราะห์ออกจากแนวกลางของลำไอออน ซึ่งถ้าไอออนที่วิเคราะห์มีมวลยิ่งต่ำก็จะโดนผลักออกจากแนวกลางของลำไอออนมากกว่าไอออนที่มีมวลสูงขึ้นไป ตัวอย่างเช่น ในการวิเคราะห์ ${}^7\text{Li}$ ${}^9\text{Be}$ ${}^{205}\text{Tl}$ และ ${}^{208}\text{Pb}$ ในตัวอย่างที่มีธาตุยูเรเนียมปนอยู่ 1000 ส่วนในล้านส่วน จะเห็นได้ถึง การลดลงของสัญญาณของ ${}^7\text{Li}$ ${}^9\text{Be}$ อย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับการลดลงของสัญญาณของ ${}^{205}\text{Tl}$ และ ${}^{208}\text{Pb}$ ซึ่งสามารถแก้ไขปัญหากจาก space charge matrix suppression ได้ โดยการใช้วิธีการเติมสารมาตรฐานภายใน (internal standardization) อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ช่วยทำให้ปัญหาบางอย่างแต่ไม่ได้เป็นการแก้ไขปัญหากที่ต้นเหตุ อีกวิธีหนึ่ง คือ การปรับให้ศักย์ไฟฟ้าที่เลนส์ของระบบ ion optics มีค่าเหมาะสม เพื่อบังคับการเคลื่อนที่ของไอออนของธาตุที่กำลังวิเคราะห์ให้สามารถเดินทางผ่านไปยังหน่วยตรวจวัดมวลได้ และเลือกที่ไม่ให้ไอออนของธาตुरบกวนผ่านไป ได้ โดยทั่วไปในการวิเคราะห์ควรจะรักษาระดับของธาตुरบกวนให้มีปริมาณต่ำกว่า 100-200 ส่วนในล้านส่วน

การเกิดการสะสมของเกลือ (salt build-up) การเกิดการสะสมของเกลือและออกไซด์จากสารตัวอย่าง เช่น จากน้ำทะเล ทำให้เกิดการกีดขวางบริเวณ sampler cone สามารถแก้ไขโดยการเจือจางสารตัวอย่างให้มีปริมาณ total dissolved solid น้อยกว่า 0.1% หรืออาจใช้เทคนิค flow

injection ในการนำสารละลายตัวอย่างเข้าสู่ระบบการวิเคราะห์เพื่อลดปริมาณการนำเข้าของสารตัวอย่าง หรือการเตรียมตัวอย่างโดยวิธีต่างๆ เพื่อกำจัด matrix ออกไปก่อนการวิเคราะห์

8.7 การแก้ไขปัญหาการรบกวนจากการซ้อนทับกันของสเปกตรัม

วิธีแก้ไขปัญหาการรบกวนจากการซ้อนทับกันของสเปกตรัม อาจทำได้โดยการกำจัดสารที่ก่อการรบกวนการวิเคราะห์ออกไป เช่น การตกตะกอน การแยกสาร โดยวิธีการนี้มักใช้กับตัวอย่างน้ำทะเล ซึ่งต้องการกำจัดปัญหาจากเกลือโซเดียมคลอไรด์และแมกนีเซียมคลอไรด์ หรืออาจใช้สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อหักล้างการรบกวน รวมถึงการใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่ เช่น การใช้เทคโนโลยีพลาสมาเย็น (cool/cold plasma) การใช้เทคโนโลยี collision/reaction cells และการเลือกใช้หน่วยวิเคราะห์มวลไอออนที่มีประสิทธิภาพสูง (high resolution mass analyzer)

8.7.1 การใช้สมการทางคณิตศาสตร์

สามารถใช้ได้กับการแก้ไขปัญหาการรบกวนจาก isobaric interferences และ polyatomic interferences บางกรณี โดยทำการวัดสัญญาณของไอออนของสารรบกวนที่มวลอื่นที่ไม่ตรงกับมวลของไอออนของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ ภายใต้งैนไอที่ปลอดภัยจากการรบกวนใดๆ ต่อการวัดสัญญาณที่มวลนั้นๆ หรือไอโซโทปนั้นๆ และใช้การเทียบบรรทัดไตรยางค์กลับไปประเมินที่มวลหรือไอโซโทปที่เราสนใจนั้นว่า สัญญาณที่วัดได้น่าจะมาจากธาตุหรือสารที่ก่อการรบกวนอยู่เป็นสัดส่วนเท่าไร เพื่อทำการหักลบออกจากสัญญาณที่วัดได้ ส่วนต่างนี้เองคือสัญญาณของไอออนของธาตุที่กำลังวิเคราะห์ ตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์ธาตุแคดเมียมที่มวล 114 (^{114}Cd) ซึ่งมีดีบุก (^{114}Sn) เป็นธาตุรบกวน ในการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในตัวอย่างที่อาจมีดีบุกเจือปนอยู่ด้วยนั้น ต้องทำการวัดสัญญาณของดีบุกที่มวลอื่น เช่น ที่ ^{118}Sn การแก้ไขปัญหาการรบกวนจาก polyatomic interference โดยใช้สมการคณิตศาสตร์ อีกตัวอย่างคือ สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณวาเนเดียมในตัวอย่างน้ำเกลือที่มีโซเดียมคลอไรด์อยู่ 1000 ส่วนในล้านส่วน จะมีปัญหาการรบกวนจาก $^{35}\text{Cl} \ ^{16}\text{O}$ ที่มวล 51 ดังนั้นจึงต้องวัดสัญญาณที่ $^{37}\text{Cl} \ ^{16}\text{O}$ ที่มวล 53 ด้วย เพื่อใช้ในการเทียบกลับว่าสัญญาณที่วัดได้ที่มวล 51 นั้น มาจาก $^{35}\text{Cl} \ ^{16}\text{O}$ เท่าไร และส่วนต่างคือสัญญาณของ ^{51}V

8.7.2 การใช้เทคโนโลยีพลาสมาเย็น (cool/cold plasma)

ในกรณีที่ปัญหาสารรบกวนมีมาก และธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ให้สัญญาณน้อยมาก การใช้สมการในการแก้ไขปัญหาอาจไม่ถูกต้อง ดังนั้นจึงมีการพัฒนาวิธีการที่เป็นทางเลือกในการแก้ไขปัญหาคือการใช้อุณหภูมิพลาสมาเย็น ซึ่งหมายถึงพลาสมาที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าปกติในการลดปัญหาจากการเกิดตัวรบกวนที่เกิดจากการรวมตัวกับอาร์กอน ที่สภาวะปกติของพลาสมา (เครื่องกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุกำลัง 1000-1400 วัตต์ และอัตราการไหลของ nebulizer gas เป็น 0.8-1.0 ลิตรต่อนาที) อาร์กอนสามารถเกิดการเปลี่ยนสภาพเป็นไอออนซึ่ง ^{40}Ar รบกวนการวิเคราะห์

^{40}Ca หรืออาจเกิดการรบกวนโดยรวมตัวกับธาตุอื่นๆ ที่มีในตัวทำละลาย เป็น ^{38}Ar ^1H และ ^{40}Ar ^{16}O ซึ่งรบกวนการวิเคราะห์ ^{39}K และ ^{56}Fe การใช้พลาสมาเย็นที่กำลัง 500-800 วัตต์ และใช้อัตราการไหลของ nebulizer gas เป็น 1.5-1.8 ลิตรต่อนาที) ทำให้การเกิดสเปกตรัมไอออนในเซชันเปลี่ยนไปและการรบกวนดังกล่าวลดลงอย่างมาก ส่งผลต่อการลดลงของ detection limits อย่างไรก็ดี เทคโนโลยีนี้ใช้ได้กับธาตุเพียงบางกลุ่มเท่านั้น และมีข้อจำกัดจากการที่เกิดไอออนในเซชันของธาตุก็มีประสิทธิภาพลดลง การวิเคราะห์สารตัวอย่างที่ซับซ้อนจะเป็นไปโดยยาก เนื่องจากจะเกิดการรบกวนจาก matrix อย่างมาก

8.7.3 การใช้เทคโนโลยี collision / reaction cells

เนื่องจากข้อจำกัดของการใช้เทคโนโลยีพลาสมาเย็นทำให้มีการพัฒนาเทคโนโลยี collision/reaction cells โดยการกำจัด polyatomic interferences ออกจากลำของไอออนก่อนที่จะเดินทางผ่านไปยังหน่วยวิเคราะห์มวล

8.7.4 การใช้หน่วยวิเคราะห์มวลไอออนที่มีประสิทธิภาพสูง (high resolution mass analyzer)

การเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกมวลไอออนโดยการใช้ high resolution mass spectrometer ซึ่งมีกำลังการแยกสูง สามารถจัดปัญหาจากการซ้อนทับกันของสเปกตรัมได้แต่มีข้อเสียตามมาคือ ความไวในการวิเคราะห์จะลดลงด้วย

8.8 การแก้ไขปัญหาการรบกวนจาก matrix interferences อื่นๆ โดยวิธีการเติมสารมาตรฐานภายใน (internal standardization)

วิธีการดั้งเดิมที่ใช้แก้ไขปัญหามาจากการที่สารตัวอย่างมีคุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างจากสารมาตรฐาน คือ การใช้วิธีการเติมสารมาตรฐานภายใน (internal standardization) ทำได้โดยเติมสารมาตรฐาน ซึ่งเป็นธาตุคนละตัวกับธาตุที่กำลังจะวิเคราะห์ในระดับความเข้มข้น ส่วนในพันล้านส่วน (parts-per-billion) ลงไปในปริมาณที่เท่าๆ กันทั้งในสารละลายตัวอย่างและสารละลายมาตรฐานรวมถึงใน reagent blanks ด้วย เพื่อวัดค่าอัตราส่วนของสัญญาณที่ได้เทียบกับสาร internal standard วิธีการนี้ใช้แก้ไขปัญหามาจาก physical interferences จากการที่สารตัวอย่างมีคุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างจากสารมาตรฐาน และช่วยลดปัญหาจากการที่เครื่องมือเกิด long-term signal drift ที่สารอื่นๆ (matrix) ไปขวางทางเดินของไอออนในบริเวณรูเปิดของ sampler cone และ skimmer cone โดยมีข้อแนะนำในการเลือกสารมาตรฐานภายใน (internal standard) ดังนี้

1. เป็นธาตุที่ไม่มีอยู่ในสารตัวอย่าง
2. เป็นธาตุที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหาการซ้อนทับกันของสเปกตรัมและปลอดภัยจากการรบกวนจากการซ้อนทับกันของสเปกตรัม

3. เป็นธาตุที่ไม่เกิดการเจือปนจากสิ่งแวดลอมได้ง่าย
4. เป็นธาตุที่มีมวลใกล้เคียงกับธาตุที่กำลังวิเคราะห์
5. เป็นธาตุที่มีค่าพลังงานไอออไนเซชันใกล้เคียงกับธาตุที่กำลังวิเคราะห์ และมี

พฤติกรรมในพลาสมาคล้ายกัน

จากข้อแนะนำดังกล่าว ธาตุที่นิยมเลือกใช้เป็นสารมาตรฐานภายในมีดังนี้ ${}^9\text{Be}$, ${}^{45}\text{Sc}$, ${}^{59}\text{Co}$, ${}^{74}\text{Ge}$, ${}^{89}\text{Y}$, ${}^{103}\text{Rh}$, ${}^{115}\text{In}$, ${}^{169}\text{Tm}$, ${}^{175}\text{Lu}$, ${}^{187}\text{Re}$ และ ${}^{232}\text{Th}$

8.9 การวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยเทคนิค ICP-MS

วิธีวิเคราะห์ปริมาณธาตุโดยเทคนิค ICP-MS อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณของไอออนที่ตรวจวัดได้กับความเข้มข้น โดยวิธีสอบเทียบกับสารละลายมาตรฐาน ทั้งนี้ทำได้หลายวิธี ดังนี้

วิธีสอบเทียบมาตรฐานแบบภายนอก (external calibration method) ทำโดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ตรวจวัดได้กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ ทั้งนี้จะต้องหักลบค่าสัญญาณที่ตรวจวัดได้จาก reagent blank ออกและอาจมีการทำ drift correction โดยการใส่สารมาตรฐานภายในเข้าร่วมด้วย วิธีการนี้จะใช้ได้เฉพาะเมื่อแน่ใจว่าสารละลายตัวอย่างนั้นไม่มีสิ่งที่จะรบกวนการวัด มักใช้กับกรณีที่สารละลายตัวอย่างไม่มีสารอื่นเจือปนอยู่มาก เช่น น้ำบริสุทธิ์ น้ำดื่ม น้ำฝน เพื่อให้แน่ใจว่าสามารถใช้วิธีสอบเทียบมาตรฐานแบบภายนอกในการวิเคราะห์ได้ ผู้วิเคราะห์ควรมีข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับสารที่กำลังจะทำการวิเคราะห์ เช่น อาจทำ semi-quantitative analysis โดยใช้การตรวจสอบอย่างคร่าวๆ เพื่อสำรวจว่ามีธาตุใดที่อาจเป็นสารรบกวนการวิเคราะห์หรือไม่ และเพื่อใช้ในการเลือกสารมาตรฐานภายใน หรือเลือกมวลหรือไอโซโทป ที่ควรใช้ในการตรวจวัด

วิธีเติมสารมาตรฐานในตัวอย่าง (standard addition method) วิธีการนี้เป็นที่รู้จักและใช้กันทั่วไปในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ทางเชิงแสงของอะตอม ซึ่งทำโดยการเติมสารละลายมาตรฐานของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ลงในสารละลายตัวอย่าง ทั้งนี้ต้องนำสารตัวอย่าง ทั้งนี้ต้องนำสารตัวอย่างมาเท่าๆ กัน เติมลงไปในช่วงปริมาตรทุกขวด แล้วเติมสารละลายมาตรฐานในปริมาณเท่าที่ทราบ ค่าลดหลั่นไปตามลำดับ แล้วเติมน้ำบริสุทธิ์ให้ได้ปริมาตรเท่ากันทั้งหมดเพื่อนำไปตรวจวัดสัญญาณ

วิธีการเจือจางด้วยสารไอโซโทป (isotope dilution) การวิเคราะห์โดยการเจือจางด้วยไอโซโทปจัดเป็นวิธีการวิเคราะห์แบบปฐมภูมิ ทำได้โดยเติม enriched isotope ของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ลงในสารตัวอย่าง แต่มีข้อจำกัดจากการที่ธาตุบางตัวเป็นธาตุที่มีเพียงไอโซโทปเดียว (monoisotopic element) เช่น ${}^9\text{Be}$, ${}^{23}\text{Na}$, ${}^{27}\text{Al}$, ${}^{45}\text{Sc}$, ${}^{55}\text{Mn}$, ${}^{75}\text{As}$, ${}^{189}\text{Y}$, ${}^{103}\text{Rh}$, ${}^{127}\text{I}$, ${}^{133}\text{Cs}$, ${}^{141}\text{Pr}$, ${}^{159}\text{Tb}$

และ ^{165}Ho ^{169}Tm ^{197}Au และ ^{232}Th ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์โดยใช้วิธีการนี้ได้ อีกทั้งสาร enriched isotope เป็นสารที่มีราคาแพง

8.10 ข้อเสนอแนะเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้อง

8.10.1 ควรตรวจสอบว่าระบบการนำสารตัวอย่างเข้าสู่พลาสมาและอุปกรณ์ sampler cone และ skimmer cone สะอาด ทำความสะอาดโดยใช้กรดไนตริกความเข้มข้น 1% และทำให้แห้งก่อนการนำไปใช้

8.10.2 ควรปรับเครื่อง ICP-MS ให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมแก่การใช้งาน โดยทำตามวิธีการที่แนะนำอยู่ในคู่มือการใช้งานของเครื่อง ICP-MS สามารถอธิบายโดยสังเขปได้ คือการใช้สารละลายมาตรฐานที่ประกอบด้วยธาตุต่างๆ เช่น Mg Rh Ce และ U 10 ส่วนในพันล้านส่วน เพื่อปรับความไวในการตรวจวัดของเครื่องมือ ICP-MS โดยจะปรับเพื่อให้ได้สัญญาณที่สูงสุด โดยคำนึงว่าอัตราส่วนระหว่าง $^{140}\text{Ce}^{16}\text{O}/^{140}\text{Ce}$ และ $^{140}\text{Ce}^{2+}/^{140}\text{Ce}^+$ มีค่าน้อยกว่า 0.5% ทั้งนี้เพื่อลดปัญหาจาก polyatomic interference จากการเกิดการรวมตัวกับออกไซด์ และการเกิด doubly charged interference ในขณะเดียวกัน ควรวัดสัญญาณที่มวล 230 เพื่อตรวจสอบระดับของ background ด้วย ซึ่งควรมีสัญญาณต่ำ โดยการปรับค่า ควรเริ่มจากการปรับตำแหน่งของคอปพลาสมา (ICP torch) ตามด้วยการปรับค่าอัตราการไหลของ nebulizer gas ตามด้วยการปรับค่าศักย์ไฟฟ้าของชุด ion optics

8.10.3 ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณ ต้องมั่นใจว่าสารมาตรฐานยังมีคุณภาพดี ควรเตรียมสารละลายมาตรฐานและสารละลายตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ในน้ำบริสุทธิ์ ปราศจากไอออน และควรรักษาเสถียรภาพของสารละลายที่เตรียมขึ้น โดยเติมกรดไนตริกเล็กน้อย

9. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิวัฒน์ ชินวร (2547) ศึกษาการตรวจวิเคราะห์อนุภาคเขม่าป็นบนตัวอย่างเส้น โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ควบคู่ไปกับเทคนิคการวิเคราะห์รังสีเอ็กซ์แบบ EDX โดยไม่ต้องทำการเคลือบผิวตัวอย่างด้วยคาร์บอนหรือทองคำ โดยสามารถศึกษารูปลักษณะกลมที่เป็นลักษณะเฉพาะของอนุภาคเขม่าป็น , ตรวจหาธาตุที่เป็นองค์ประกอบ (Pb , Ba และ Sb) และระยะเวลาการคงอยู่ของเขม่าป็นเมื่อยิงปืน

ณัฐนันท์ ชาตirkวงศ์ (2551) ศึกษาการตรวจพิสูจน์เขม่าป็นที่คงอยู่บนเสื้อผ้าโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope / Energy Dispersive Spectrometer (SEM/EDS) โดยทำการเก็บตัวอย่างอนุภาค GSR บนแขนเสื้อ ด้วยวิธี Tape Lift ผลการทดลองพบว่า อนุภาคส่วนใหญ่ประกอบด้วยธาตุ Pb – Sb อีกทั้งอนุภาคเขม่าป็นยังคงอยู่บนแขนเสื้อนานถึง 24 ชั่วโมงหลังจากยิง

ปิ่น และตัวอย่างที่เก็บจากบริเวณต่างๆ บนแขนเสื้อนั้นยังมีปริมาณอนุภาคเขม่าปิ่นที่แตกต่างกันด้วย

เจริญ ปานคล้าย (2552) ได้ทำการศึกษาการตรวจเขม่าดินปิ่นบนเสื้อผ้าที่ระยะยิงต่างๆ ด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) โดยศึกษาในปิ่นพกมือเวออร์ ขนาด .357 Magnum ความยาวลำกล้อง 4 นิ้ว และ 6 นิ้ว ทดลองยิงเป้าผ้าดิบสีขาวยุคสมัย Polyester ขนาดกว้าง 30 ซม. ยาว 40 ซม. ที่ระยะยิงห่างจากปากลำกล้องปิ่น 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 ฟุต ผลการทดลองพบว่าเขม่าดินปิ่นที่ยิงจากปิ่นความยาวลำกล้องเดียวกันที่ระยะต่างกันมีปริมาณที่แตกต่างกัน โดยจะลดลงเมื่อระยะยิงห่างจากปากลำกล้องปิ่นไกลมากขึ้น และเขม่าดินปิ่นสามารถปลิวไปไกลถึง 5 ฟุต เขม่าดินปิ่นที่ยิงจากปิ่นความยาวลำกล้องยาวกว่าจะมีปริมาณมากกว่าปิ่นความยาวลำกล้องที่สั้นกว่า

Andrasko and Pettersson (1991) ได้ออกแบบอุปกรณ์อย่างง่ายสำหรับการเก็บตัวอย่างอนุภาคเขม่าปิ่นจากเสื้อผ้า ภายในถุงหรือกระเป๋า และอื่นๆ ซึ่งได้ถูกนำมาอธิบายการเก็บโดยใช้ vacuuming ผ่านตัวกรองสองชั้นซึ่งทำจาก Nucleopore Aerosol Holder ต่อกับ Vacuum Cleaner อนุภาคที่ถูกเก็บจะถูกนำมาทดสอบโดยเครื่อง SEM ผลที่ได้เป็นที่พอใจซึ่งสังเกตจากอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบและวิธีการที่นำมาใช้ในห้องปฏิบัติการ อุปกรณ์ที่หลากหลายเป็นไปได้ที่จะมีการปนเปื้อนของอนุภาคเขม่าปิ่นบนเสื้อผ้า ซึ่งข้อดีของวัตถุพยานที่เป็นเสื้อผ้า คือ สามารถใช้ในการค้นหาอนุภาคเขม่าปิ่น

Zeichner and Levin (1995) จากประสบการณ์ในการทำงานเกี่ยวกับการวิเคราะห์อนุภาค GSR จากตัวอย่างที่เป็นมือ, หมวก และเสื้อผ้า ได้นำมารายงานในช่วงเวลา 6 ปี (1989 - 1994) โดยการประเมินพบผลสำเร็จในการวิเคราะห์ตัวอย่างประมาณ 10 % หลักเกณฑ์วิธีการเก็บตัวอย่างคือ จำนวนอนุภาคที่ตรวจพบต่อตัวอย่าง และได้อภิปรายปัญหาที่เป็นไปได้ของการปนเปื้อนในตัวอย่าง

Garofano and others (1999) ทำการศึกษาอนุภาคเขม่าปิ่นในสิ่งแวดล้อมและกลุ่มอาชีพอื่นๆ ได้ดำเนินการทดสอบใน Reparto Carabinieri Investigation Scientifiche, Parma, Italy ข้อมูลที่ได้ 175 ตัวอย่าง จากมือของผู้ที่อยู่ในอาชีพที่มีความสัมพันธ์กันซึ่งได้มาจากรถยนต์, จากมือขวาของผู้ขับขี่รถยนต์ภายหลังการขับขี่รถยนต์, แบตเตอรี่และยางล้อรถ และจากมือของแต่ละคนภายหลังการทำกรผลิตปลอกกระสุนปิ่นในอุตสาหกรรมปิ่นแก่ปีเด็กเล่นและดอกไม้ไฟ แม้ว่าการศึกษานี้ได้ยืนยันว่าเป็นส่วนประกอบหลักของปลอกกระสุนปิ่น ตัวอย่างของกลุ่มอาชีพไม่สามารถยืนยันอนุภาคที่มาจากเขม่าปิ่น แม้ว่าจะพิสูจน์ได้ว่าประชาชนที่มีความเกี่ยวข้องกับอาชีพขุดยานพาหนะ (เช่น เครื่องยนต์, ช่างไฟฟ้า, ช่างซ่อมยาง) ก็สามารถปรากฏอนุภาคที่

ประกอบด้วยธาตุโลหะ Ba และ Sb โดยอาจยากที่จะจำแนกอนุภาคเขม่าเป็นจากรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอ, แบนและเป็นแผ่น ซึ่งเสี่ยงต่อผลบวกเทียม เมื่อค้นลักษณะเฉพาะในระบบ Automatic และใช้ Tape Lift ในการเก็บโดยปราศจากการตรวจสอบรูปสัณฐานของอนุภาค ซึ่งเชื่อว่าการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยก็มีความจำเป็นในการจำแนก จึงได้มีความพยายามที่จะพิสูจน์ในงานปัจจุบันนี้ การค้นคว้าจึงได้ยืนยันการศึกษาก่อนหน้านี้ว่าผู้ทำอุตสาหกรรมพลอกระสุนปืนในอิตาลี พบธาตุโลหะ Ba, Pb และ Sb ปะปรกอยู่ในอนุภาคเขม่าปืน

Koon (1998) ทำการศึกษาปริมาณของธาตุ Sb, Ba และ Pb ที่เป็นองค์ประกอบในอนุภาคเขม่าปืนโดยวิธี Collection Swab วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry (ICP - MS) โดยทำการเก็บตัวอย่างจากมือทั้งสองข้างของผู้ยิงปืน งานวิจัยนี้ได้อธิบายถึงข้อดีของเทคนิค ICP – MS คือ สามารถควบคุมสิ่งรบกวนที่เกิดขึ้นจากวิธีการสกัดได้, มีสภาพไวสูง, ช่วงความเข้มข้นของการสร้าง Calibration Curve กว้าง, ใช้เวลาในการวิเคราะห์สั้น และมีความเที่ยงและความแม่นยำสูง ทำให้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้

Kage and others (2001) ได้ศึกษาวิธีการวิเคราะห์อนุภาคเขม่าปืนจาก มือ, ฝ่ามือ, ใบหน้า และเสื้อผ้า โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope / Wavelength Dispersive X – Ray (SEM / WDX) ซึ่งได้ทำการเก็บตัวอย่างอนุภาค GSR บนมือ, ฝ่ามือ, ใบหน้า และเสื้อผ้า โดยใช้ Double – Sided Adhesive ติดลงบน Aluminum Stub (Tape – Lift Method) ในงานวิจัยนี้มีการดำเนินการ 3 ขั้นตอน ขั้นตอนแรก ทำการสำรวจวิเคราะห์ธาตุ Ba เพื่อที่จะค้นหอนุภาค GSR ที่มาจาก Lead Styphnate ซึ่งเป็นส่วนประกอบในชนวนท้ายกระสุนปืน หรือธาตุ Sn เพื่อที่จะค้นหอนุภาคเขม่าปืนที่มาจาก Mercury Fulminate ซึ่งเป็นส่วนประกอบในชนวนท้ายกระสุนปืน ขั้นตอนที่สอง วิเคราะห์ตำแหน่งของอนุภาค GSR โดย X – Ray Imaging ของธาตุ Ba หรือ Sn ที่กำลังขยาย 1000 – 2000 เท่า ของ SEM โดยใช้ข้อมูลของการสำรวจวิเคราะห์ในขั้นตอนแรก และขั้นตอนที่สาม เป็นการตรวจพิสูจน์ยืนยันอนุภาค GSR โดยใช้ WDX Spectrometers การวิเคราะห์ตัวอย่างของแต่ละ Primer ใน Stub 1 อัน ใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง

Zeichner and others (2003) ได้ทำการทดลองโดยเก็บ Gunpowder Residue จากเสื้อผ้าของผู้ยิงปืนโดยใช้ Vacuum และนำไปวิเคราะห์ด้วย Chromatography / Thermal Energy (GC / TEA), Ion Mobility Spectrometry (IMS) และ Gas Chromatography / Mass Spectrometry (GC / MS) อนุภาคจะถูกเก็บบน Fiber Glass และ Teflon Filter ใช้ระบบ Portable Sampler ทั้งหมดต่อกับ IMS Instrument ตัวทำละลายหลายๆ ตัวนำมาใช้เป็นตัวสกัด องค์ประกอบของ Propellant จาก Filter โดยสารสกัดที่ได้จะถูกนำไปหมุนเหวี่ยงและกรอง ทำให้เข้มข้นขึ้นโดยการนำไประเหยเป็นไอ ผลการทดลองของการศึกษาวิธีการดำเนินการสำหรับการวิเคราะห์ของเขม่าปืน นำมาสู่

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงเทคนิคในปัจจุบัน สำหรับการวิเคราะห์เขม่าปืนบนเสื้อผ้าโดยตำรวจของอิสราเอล ได้มีการปรับปรุงวิธีการเก็บตัวอย่างบนเสื้อผ้าโดยใช้ Double – Sided Adhesive Coated Aluminum Stub (Tape – Lift Method) และสำหรับวิธีการเก็บอนุภาค GSR ด้วย Vacuum Collection Propellant ก็ยังคงเป็นวิธีที่ใช้อยู่

Fojtasek and others (2003) ทำการศึกษาการกระจายของอนุภาค GSR 7 ทิศทาง ในสิ่งแวดล้อมของการยิงปืน (ปืนพกสั้น ยี่ห้อ CZ ขนาด 9 มม. LUGER) ทั้งปัจจัยภายในและภายนอก และชนิดของกระสุนปืนที่แตกต่างกัน 2 ชนิด ที่จะนำมาใช้ในการทดลองยิง ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า จำนวนอนุภาค GSR ที่มากที่สุดอยู่ทางด้านขวาห่างจากตำแหน่งที่ยิง 2 – 4 เมตร และอนุภาค GSR ยังคงพบอีกที่ระยะ 10 เมตร

Sarkis and others (2004) ได้ทำการศึกษาการตรวจพิสูจน์ธาตุโลหะ Sb , Ba และ Pb ด้วยเทคนิค SF – ICP – MS ในปืนพกสั้น ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันมากในประเทศบราซิล โดยในงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้กล่าวถึงการเก็บตัวอย่างเขม่าปืน โดยใช้สารละลาย EDTA ซึ่งเป็น Complexing Agent และในการศึกษารุ่นนี้ผู้วิจัยได้กล่าวถึงความสามารถของวิธีการที่จะตรวจพิสูจน์ธาตุโลหะ Sb , Ba และ Pb บนมือของอาสาสมัครภายหลังการยิงปืน โดยใช้ปืนพกสั้น ขนาด 9 มม. และ ขนาด .40 นิ้ว ใช้กระสุนปืน 2 ชนิดในการทดสอบ คือ 9 mm. Taurus และ Clean Range และใช้เทคนิคที่มีสภาพไวสูง คือ เทคนิค SF – ICP – MS ที่สามารถตรวจพิสูจน์ธาตุโลหะที่มาจาก การยิงปืนที่มีความเข้มข้นต่ำ (น้อยกว่า 1 ug / L) ซึ่งนับเป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูงในงานด้านนิติวิทยาศาสตร์

Bakowska and others (2006) ได้ทำการศึกษาการวิเคราะห์อนุภาคเขม่าปืนโดยใช้เทคนิค ICP – MS ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงความสำเร็จของเทคนิคนี้ในการวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของอนุภาคเขม่าปืน (GSR) โดยปริมาณของ Sb , Ba และ Pb สามารถวิเคราะห์ได้จากสารละลายสกัดของ GSR ที่เก็บโดยวิธี Collection Swabซึ่งประสิทธิภาพของเทคนิคนี้สามารถดูได้จากผลการทดลอง

งานวิจัยดังกล่าวที่ผู้วิจัยได้ศึกษานั้นเพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางประกอบการอภิปรายผลการทดลองในส่วนของวิธีการเก็บตัวอย่างรวมถึงการเก็บตัวอย่างจากบริเวณต่างๆ ของผ้าแต่ละชนิด

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

1. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

ตารางที่ 3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้	แหล่งที่มา
1. เครื่อง Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometer, ICP – MS	PerkinElmer
2. สำลีก้าน (Cotton Bud)	ห้างสรรพสินค้า
3. ซองพลาสติกใสมีซิปล ขนาด 9 x 14 นิ้ว และ ขนาด 9 x 13 ซม.	ห้างสรรพสินค้า
4. หลอดทดลอง ขนาด 16 x 150 mm.	บริษัท อักษร
5. ผ้าฝ้ายที่ใช้สำหรับทำเสื้อยืด	ตลาดโบ๊เบ๊
6. ผ้าโพลีเอสเตอร์ที่ใช้สำหรับทำเสื้อเชิ้ต	ตลาดโบ๊เบ๊
7. ผ้าซาตินที่ใช้สำหรับทำเสื้อแจ็กเก็ต	ตลาดโบ๊เบ๊
8. เสื้อเชิ้ตแขนยาว	ตลาดประตูน้ำ
9. อาวุธปืนพกรีโวลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL ยี่ห้อ SMITH & WESSON MODEL 67 ความยาวลำกล้อง 4 นิ้ว	พ.ต.ต.ชนงศักดิ์ บุญมาก
10. อาวุธปืนพก ออโตแมติก ขนาด 9 มม. LUGER ยี่ห้อ GLOCK MODEL 19 ความยาวลำกล้อง 3.75 นิ้ว	พ.ต.ต.เชิดพงษ์ ชุกกลิ่น
11. กระสุนปืนรีโวลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL ยี่ห้อ Bullet Master	พ.ต.ต.หญิงสุชาดา
12. กระสุนปืนออโตแมติก ขนาด 9 มม. LUGER ยี่ห้อ Bullet Master	เตียงกอสกุล
13. ห้องยิงปืน ขนาด 5.75 x 20.40 เมตร	กลุ่มงานตรวจอาวุธปืนฯ

2. สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

ตารางที่ 4 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

สารเคมี	แหล่งที่มา
1. Nitric Acid 70% (HNO ₃) ; AR Grade	Ajax Finechem
2. Smart Tune Solution (1% HNO ₃)	PerkinElmer Life and Analytical
3. Standard Antimony, Barium, Lead (2% HNO ₃)	Sciences

3. การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

3.1 การเตรียมสารละลายแอนติโมนี แบเรียม ตะกั่ว

3.1.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบเรียม ตะกั่ว เข้มข้น 10, 20, 40 mg / L

ปิเปตสารละลายมาตรฐานความเข้มข้น 1000 mg / L มา 1, 2, 4 mL ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL แล้วปรับปริมาตรด้วย 5 % HNO₃ จนมีปริมาตรครบ 100 mL

3.1.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบเรียม ตะกั่ว เข้มข้น 1000, 2000, 4000 ug / L

ปิเปตสารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบเรียม ตะกั่ว เข้มข้น 10, 20, 40 mg / L มา 5 mL ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 mL แล้วปรับปริมาตรด้วย 5 % HNO₃ จนมีปริมาตรครบ 50 mL

3.1.3 การเตรียมสารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบเรียม ตะกั่ว ที่ใช้ในการวิจัย แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การเตรียมสารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบบเรียง ตะกั่ว

ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบบเรียง ตะกั่ว ที่ใช้ในการวิจัย	ปริมาณของสารละลายมาตรฐานข้อ 3.1.2 (mL)	
1. สารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบบเรียง ตะกั่ว เข้มข้น 10 – 20 – 40 ug/L	1	
2. สารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบบเรียง ตะกั่ว เข้มข้น 20 – 40 – 80 ug/L	2	ใส่ขวดวัดปริมาตร ขนาด 100 mL แล้วปรับปริมาตรด้วย 5% HNO ₃ จนมีปริมาตรครบ 100 mL
3. สารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบบเรียง ตะกั่ว เข้มข้น 40 – 80 – 160 ug/L	4	
4. สารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบบเรียง ตะกั่ว เข้มข้น 80 – 160 – 320 ug/L	8	
5. สารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบบเรียง ตะกั่ว เข้มข้น 160 – 320 – 640 ug/L	16	

4. วิธีการวิเคราะห์หาขม่าปืน (GSR) บนเสื้อผ้าด้วยเทคนิค ICP - MS

ยิงปืน 2 ชนิด คือ ปืนพกออโตเมติก ขนาด 9 มม. LUGER ยี่ห้อ GLOCK MODEL 19 ความยาวลำกล้อง 3.75 นิ้ว (ดังภาพที่ 32) และ ปืนพกรีโวลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL ยี่ห้อ SMITH & WESSON MODEL 67 ความยาวลำกล้อง 4 นิ้ว (ดังภาพที่ 34) โดยใช้กระสุนปืนออโตเมติก ขนาด 9 มม. LUGER ยี่ห้อ Bullet Master (ดังภาพที่ 33) และกระสุนปืนรีโวลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL ยี่ห้อ Bullet Master (ดังภาพที่ 35) ตามลำดับ บนผ้า 3 ชนิดคือ ผ้าฝ้ายที่ใช้ในการผลิตเสื้อยืด ผ้าโพลีเอสเตอร์ที่ใช้ในการผลิตเสื้อเชิ้ต และผ้าซาตินที่ใช้ในการผลิตเสื้อแจ็กเก็ต โดยนำผ้าแต่ละชนิดมาตัด ขนาด กว้าง x ยาว ประมาณ 50 x 60 cm. (บริเวณด้านหน้า) และขนาด กว้าง x ยาว ประมาณ 50 x 58 cm. (บริเวณแขน) โดยทุกขั้นตอนของการทดลองจะทำภายในห้องยิง

ปืนที่ปิดมิดชิด และไม่มีลมพัดผ่านของกลุ่มงานตรวจอาวุธปืนและเครื่องกระสุน กองพิสูจน์หลักฐานกลาง (ดังภาพที่ 30) และนำตัวอย่างเสื้อผ้าไปแขวนไว้ในที่ที่อากาศถ่ายเทได้สะดวกและมีลมพัดผ่าน (ดังภาพที่ 31)

4.1 การทดลองจำนวนนัดของการยิง

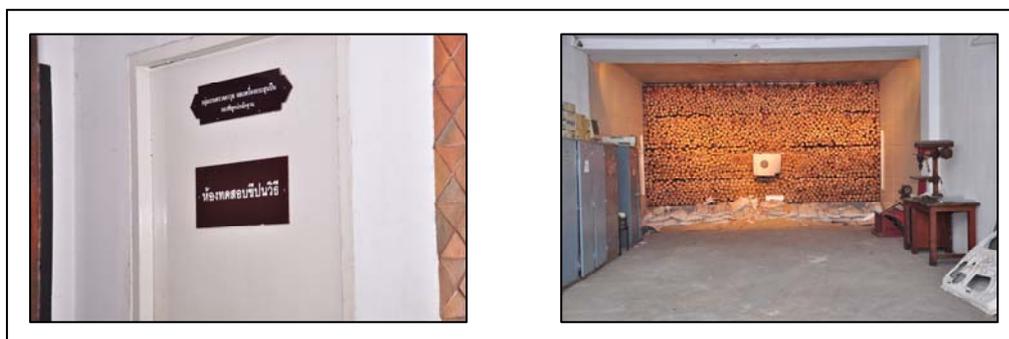
ทำการยิงปืนพกกอลโตเมติก ขนาด 9 มม. LUGER ครั้งละ 1 นัด และ 3 นัด ในผ้าฝ้ายที่ใช้ในการผลิตเสื้อยืด เพื่อหาจำนวนนัดที่เหมาะสมที่จะใช้ในงานวิจัยนี้ต่อไป

4.2 การทดลองหาความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability)

ทำการยิงปืนพกรีวอลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL ครั้งละ 3 นัด จำนวน 8 ครั้ง ในผ้าโพลีเอสเตอร์ที่ใช้ในการผลิตเสื้อยืด เก็บตัวอย่างภายหลังการยิงปืนแล้วทันที ที่บริเวณแขนเสื้อด้านซ้าย บริเวณ ข้อศอก – ข้อมือ เพื่อหาค่าความแม่นยำในการวิเคราะห์ของงานวิจัยนี้

4.3 การทดลองบริเวณที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง

ทำการเก็บตัวอย่างภายหลังการยิงปืนแล้วทันที จำนวน 7 บริเวณ ได้แก่ ด้านหน้าเสื้อ, ด้านในเสื้อ, แขนเสื้อด้านซ้าย บริเวณหัวไหล่ – ข้อศอก, แขนเสื้อด้านซ้ายบริเวณ ข้อศอก – ข้อมือ, แขนเสื้อด้านขวา บริเวณหัวไหล่ – ข้อศอก, แขนเสื้อด้านขวา บริเวณ ข้อศอก – ข้อมือ และ ด้านหลัง เพื่อหาบริเวณที่เหมาะสมในการเก็บตัวอย่างต่อไปในงานวิจัยนี้



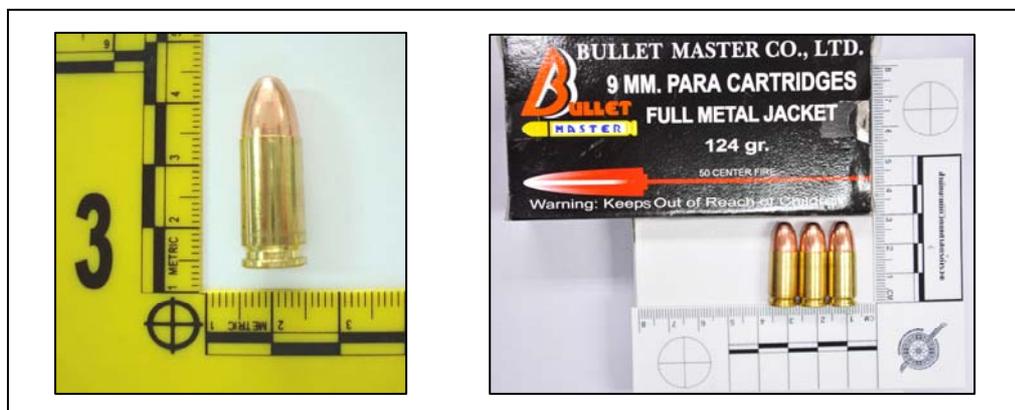
ภาพที่ 30 ห้องทดสอบยิงปืน



ภาพที่ 31 ห้องเก็บตัวอย่าง



ภาพที่ 32 อาวุธปืนพกอัตโนมัติขนาด 9 มม. LUGER



ภาพที่ 33 กระสุนปืนอัตโนมัติขนาด 9 มม. LUGER



ภาพที่ 34 อาวุธปืนพกกริวอลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL



ภาพที่ 35 กระสุนปืนกริวอลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL

4.4. ขั้นตอนการเก็บตัวอย่าง

4.4.1 ผู้ยิงปืนสวมเสื้อเชิ้ตแขนยาวที่มีผ้าแต่ละชนิดปะติดในแต่ละบริเวณที่จะทำการเก็บเขม่าปืน (ดังภาพที่ 36)



ภาพที่ 36 เสื้อผ้าตัวอย่างที่ใช้ในการเก็บเขม่าปืน

4.4.2 ทำการยิงปืนในห้องทดลองที่ปิดมิดชิดและไม่มีลมพัดผ่านโดยใช้ปืนพก
 ออโตเมติก ขนาด 9 มม. LUGER ยี่ห้อ GLOCK MODEL 19 ความยาวลำกล้อง 3.75 นิ้ว และ ปืน
 พกรีวอลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL ยี่ห้อ SMITH & WESSON MODEL 67 ความยาวลำกล้อง 4
 นิ้ว และใช้กระสุนปืนออโตเมติก ขนาด 9 มม. LUGER ยี่ห้อ Bullet Master และกระสุนปืนรีวอล
 เวอร์ ขนาด .38 SPECIAL ยี่ห้อ Bullet Master ทำการยิงโดยการจับอาวุธปืนด้วยมือทั้งสองข้าง ใช้
 มือขวากำอาวุธปืนและมือซ้ายรองรับอาวุธปืนอยู่ด้านล่างมือขวา (ดังภาพที่ 37) ยิงครั้งละ 3 นัด
 ในแต่ละครั้งจะมีการทำซ้ำ จำนวน 2 ครั้ง ที่ระยะห่างจากเป้าหมายประมาณ 15 เมตร



ภาพที่ 37 ลักษณะท่าทางที่ทำกรยิงด้วยอาวุธปืน

4.4.3 หลังจากการยิงปืนแล้ว จึงทำการเก็บเขม่าปืนในแต่ละบริเวณที่กำหนด ได้แก่
 ด้านหน้าเสื้อ, ด้านในเสื้อ, แขนเสื้อด้านซ้าย บริเวณหัวไหล่ – ข้อศอก, แขนเสื้อด้านซ้าย บริเวณ
 ข้อศอก – ข้อมือ, แขนเสื้อด้านขวา บริเวณหัวไหล่ – ข้อศอก และแขนเสื้อด้านขวา บริเวณ ข้อศอก
 – ข้อมือ โดยระยะเวลาในการเก็บตัวอย่าง มีดังนี้

- 1 เก็บตัวอย่างหลังจากผ่านการยิงปืนไปแล้วทันที
- 2 เก็บตัวอย่างหลังจากผ่านการยิงปืนไปแล้ว 1 วัน
- 3 เก็บตัวอย่างหลังจากผ่านการยิงปืนไปแล้ว 7 วัน
- 4 เก็บตัวอย่างหลังจากผ่านการยิงปืนไปแล้ว 30 วัน

โดยผู้ยิงจะทำการเปลี่ยนเสื้อแขนยาวและผ้าที่ใช้เปะติดในแต่ละบริเวณใหม่ในแต่ละครั้งที่จะทำ
 การเก็บตัวอย่างในแต่ละช่วงเวลา และทำการเก็บตัวอย่างที่บริเวณเดียวกันตลอดการทดลอง

4.4.4 ทำการเก็บตัวอย่างโดยหยดกรดไนตริก 5% ลงบนสำลีพันปลายแท่งพลาสติก
 (Cotton Bud) ที่ตัดปลายข้างหนึ่งทิ้ง จำนวน 8 ก้าน แต่ละก้านบรรจุในซองพลาสติกใสมีซิปลและ
 ระบุหน้าซองว่าเป็นกรดตัวอย่าง, ด้านหน้าเสื้อ, ด้านในเสื้อ, แขนเสื้อด้านซ้าย บริเวณหัวไหล่ –
 ข้อศอก, แขนเสื้อด้านซ้ายบริเวณ ข้อศอก – ข้อมือ, แขนเสื้อด้านขวา บริเวณหัวไหล่ – ข้อศอก และ

แขนเสื้อด้านขวา บริเวณ ข้อศอก – ข้อมือ (ดังภาพที่ 38) ประมาณ 3 – 4 หยด แล้วบรรจุใส่ซอง โดยการหยิบต้องพยายามไม่สัมผัสสำลี



ภาพที่ 38 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บเขม่าเป็น

4.4.5 ในการเก็บแต่ละบริเวณตัวอย่างกระทำโดยเช็ดจากด้านบนลงด้านล่าง จากด้านขวาไปด้านซ้าย (ห้ามเช็ดกลับ ไปมา) พร้อมหมุนก้านสำลีเพื่อให้เขม่าเป็นติดโดยรอบแล้วจึงบรรจุลงไปในซอง ประมาณ 35 ครั้ง สำหรับบริเวณด้านหน้า และด้านใน, และ 30 ครั้ง สำหรับบริเวณแขนเสื้อ แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP – MS ต่อไป

4.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP – MS

4.5.1 การเตรียมตัวอย่าง

นำซองพลาสติกโพรพิลีนที่บรรจุก้านสำลีที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างเขม่าเป็น มาทำการตัดเพื่อทำการแช่ก้านสำลีตัวอย่างลงในหลอดทดลอง ขนาด 16 x 150 mm. เติมกรดไนตริก 5% จำนวน 10 ml ลงในหลอดทดลอง ปิดปากหลอดทดลองด้วยแผ่นพาราฟิล์ม แช่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง

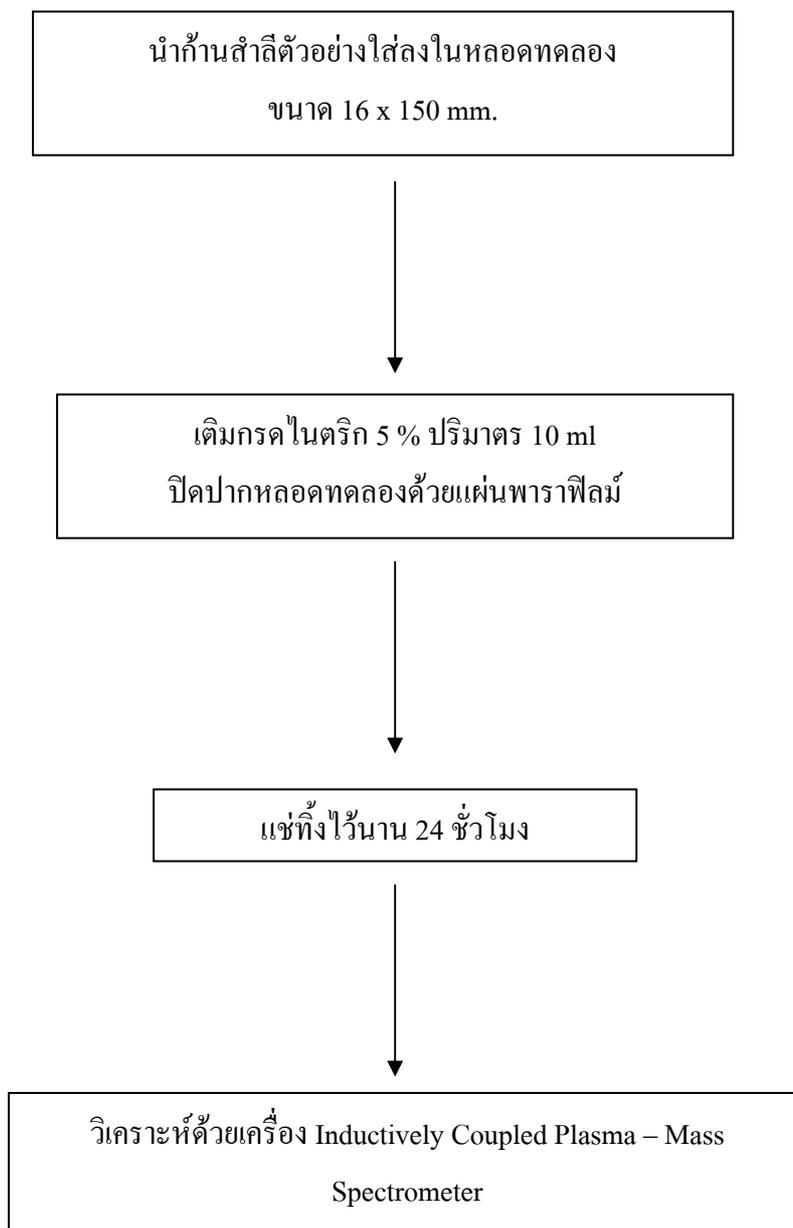
4.5.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP – MS

นำตัวอย่างที่ผ่านการเตรียมเรียบร้อยแล้วมาวิเคราะห์หาแอนติโมนี แบบรีม และตะกั่ว ด้วยเครื่อง ICP – MS โดยใช้สภาวะของเครื่องดังนี้

ตารางที่ 6 สภาวะของเครื่อง Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometer

PerkinElmer SCIEX - ELAN DRC-e	
Operating Conditions	
RF power	1100 W
Nebulizer	Cross – flow
Sampling depth	11 mm.
Sample Uptake Rate	0.8 mL/min
Plasma Gas Flow	15 L/min
Auxiliary Gas Flow	1.2 L/min
Acquisition Parameters	
Sweeps / Reading	50
Readings / Replicate	1
Number of Replicates	3
Detector mode	Dual
Auto lens	On
Monitored ions	m/z 120 , 137 , 207

4.6 แผนผังแสดงการวิเคราะห์



แผนภาพที่ 2 ขั้นตอนการวิเคราะห์

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเขม่าป็นบนเสื้อผ้าของผู้ยิงปืนและระยะเวลาภายหลังการยิงปืน ในผ้า 3 ชนิด ได้แก่ ผ้าฝ้ายที่ใช้ในการผลิตเสื้อยืด ผ้าโพลีเอสเตอร์ที่ใช้ในการผลิตเสื้อเชิ้ต และผ้าซาตินที่ใช้ในการผลิตเสื้อแจ็กเก็ต โดยใช้อาวุธปืน 2 ชนิด ได้แก่ ปืนพกออโตเมติก ขนาด 9 มม. LUGER และปืนพกรีวอลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL โดยได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb), แบเรียม (Ba) และตะกั่ว (Pb) ที่เป็นองค์ประกอบในเขม่าป็นบนเสื้อผ้าของผู้ยิงปืนในระยะเวลาต่างๆกัน คือ หลังจากผ่านการยิงปืนไปแล้วทันที, หลังจากผ่านการยิงปืนไปแล้ว 1 วัน, หลังจากผ่านการยิงปืนไปแล้ว 7 วัน, หลังจากผ่านการยิงปืนไปแล้ว 30 วัน และทำการเก็บตัวอย่างเขม่าป็นจากบริเวณต่างๆ ได้แก่ ด้านหน้าเสื้อ, ด้านในเสื้อ, แขนซ้ายด้านบน (ข้อศอกถึงหัวไหล่), แขนซ้ายด้านล่าง (ข้อมือถึงข้อศอก), แขนขวาด้านบน (ข้อศอกถึงหัวไหล่), แขนขวาด้านล่าง (ข้อมือถึงข้อศอก) และ ด้านหลัง โดยเทคนิค ICP – MS ได้ผลการวิเคราะห์ ดังนี้

1. ผลการวิเคราะห์จำนวนนัดของการยิง

จากผลการทดลอง พบ ปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb), แบเรียม (Ba) และตะกั่ว (Pb) ในการยิงปืน 1 นัด มีค่าน้อย ทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงได้ไม่ชัดเจนเมื่อระยะเวลาผ่านไป ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะทำการทดลองยิงปืนเก็บตัวอย่าง ครั้งละ 3 นัด เพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของเขม่าป็นบนผ้าแต่ละชนิด กับระยะเวลา อย่างชัดเจน แสดงดังภาพที่ 39 และ 40

2. ผลการวิเคราะห์หาความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability)

จากผลการทดลอง พบ ปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb), แบเรียม (Ba) และตะกั่ว (Pb) ในการยิงปืนทั้ง 8 ครั้ง มีปริมาณที่ใกล้เคียงกัน แสดงดังตารางที่ 7

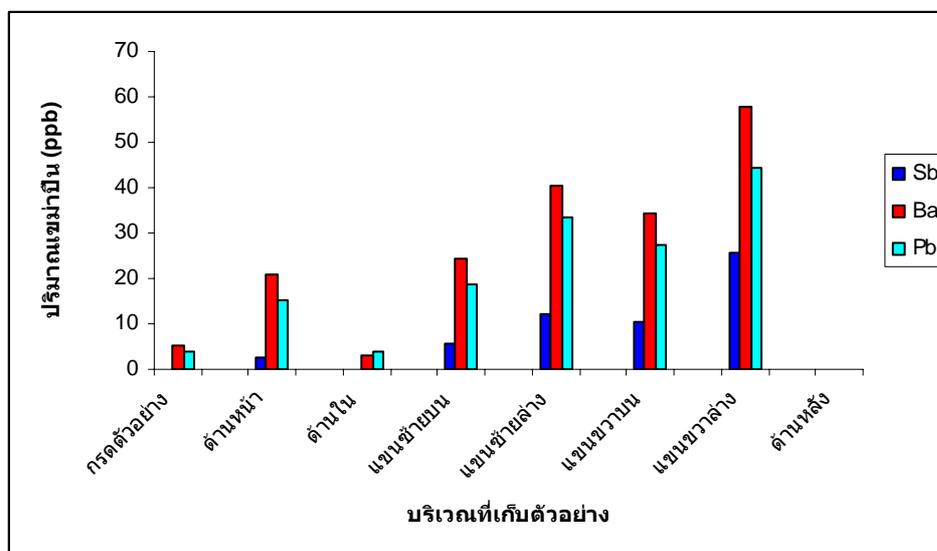
3. ผลการวิเคราะห์บริเวณที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง

จากผลการทดลอง พบ ปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb), แบเรียม (Ba) และตะกั่ว (Pb) ในแต่ละบริเวณที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างมีปริมาณแตกต่างกัน จำนวน 6 บริเวณ และมี 1 บริเวณที่

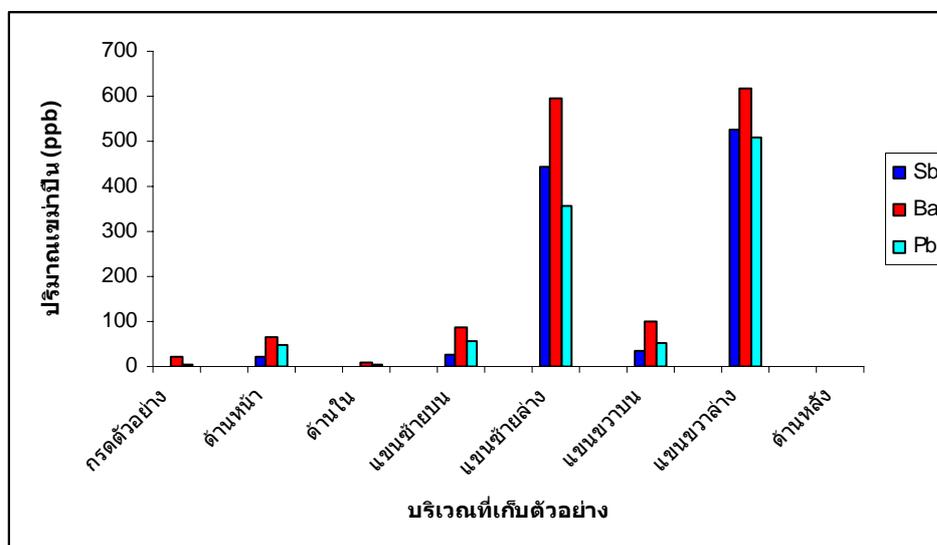
ไม่พบปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb), แบเรียม (Ba) และตะกั่ว (Pb) คือ บริเวณด้านหลัง ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะทำการเก็บตัวอย่างเขม่าป็น จำนวน 6 บริเวณ ได้แก่ ด้านหน้าเสื้อ, ด้านในเสื้อ, แขนเสื้อด้านซ้าย บริเวณหัวไหล่ – ข้อศอก, แขนเสื้อด้านซ้ายบริเวณ ข้อศอก – ข้อมือ, แขนเสื้อด้านขวา บริเวณหัวไหล่ – ข้อศอก และแขนเสื้อด้านขวา บริเวณ ข้อศอก – ข้อมือ แสดงดังภาพที่ 41

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์หาความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability)

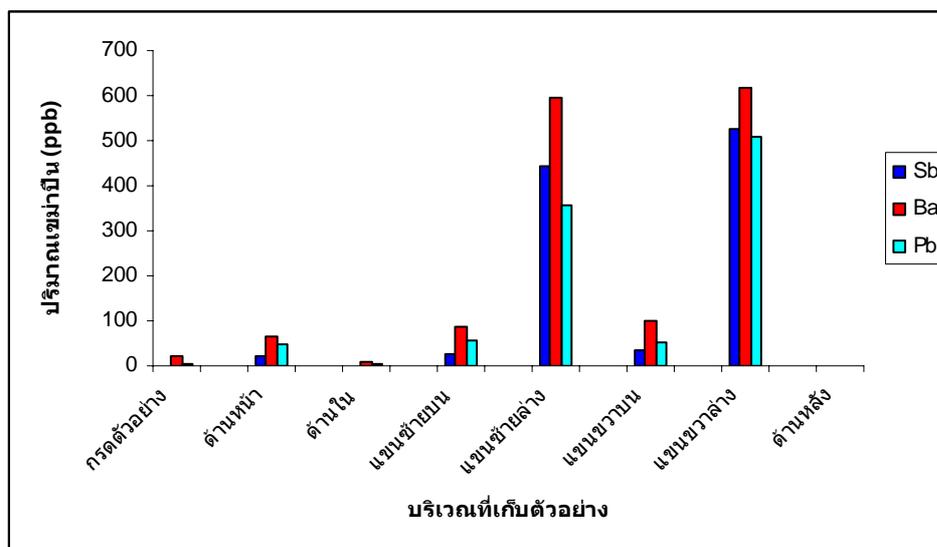
	Sb (ug / L)	Ba (ug / L)	Pb (ug / L)
กรดตัวอย่าง	0.537	14.816	5.612
แขนซ้ายล่าง ครั้งที่ 1	261.773	719.054	1705.242
แขนซ้ายล่าง ครั้งที่ 2	263.923	715.813	1703.234
แขนซ้ายล่าง ครั้งที่ 3	263.941	712.110	1706.500
แขนซ้ายล่าง ครั้งที่ 4	260.064	714.477	1704.119
แขนซ้ายล่าง ครั้งที่ 5	264.636	711.006	1706.841
แขนซ้ายล่าง ครั้งที่ 6	267.003	715.256	1708.846
แขนซ้ายล่าง ครั้งที่ 7	256.417	712.822	1705.731
แขนซ้ายล่าง ครั้งที่ 8	259.433	713.386	1701.485
S.D.	3.397	2.521	2.292
% R.S.D	1.296	0.353	0.134



ภาพที่ 39 ปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb), แบเรียม (Ba) และตะกั่ว (Pb) ในการยิงปืนพก
ออโตเมติก ขนาด 9 มม. LUGER จำนวน 1 นัด



ภาพที่ 40 ปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb), แบเรียม (Ba) และตะกั่ว (Pb) ในการยิงปืนพก
ออโตเมติก ขนาด 9 มม. LUGER จำนวน 3 นัด

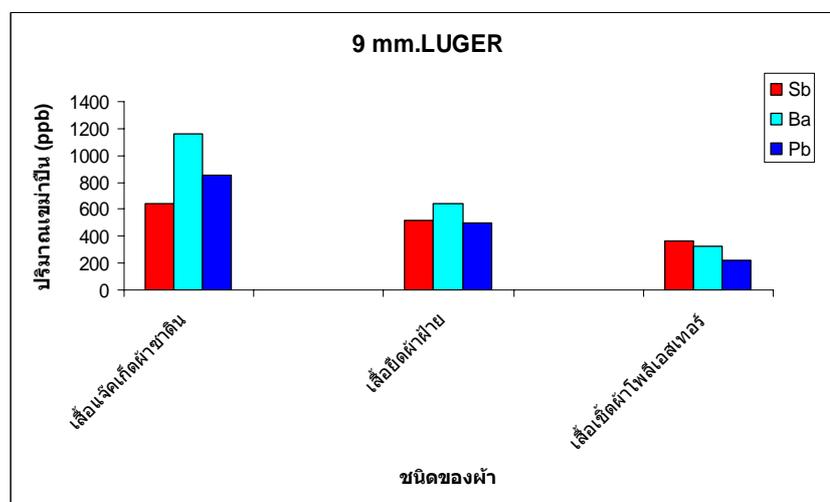


ภาพที่ 41 ปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb), แบเรียม (Ba) และตะกั่ว (Pb) ในแต่ละบริเวณที่ทำการเก็บตัวอย่าง

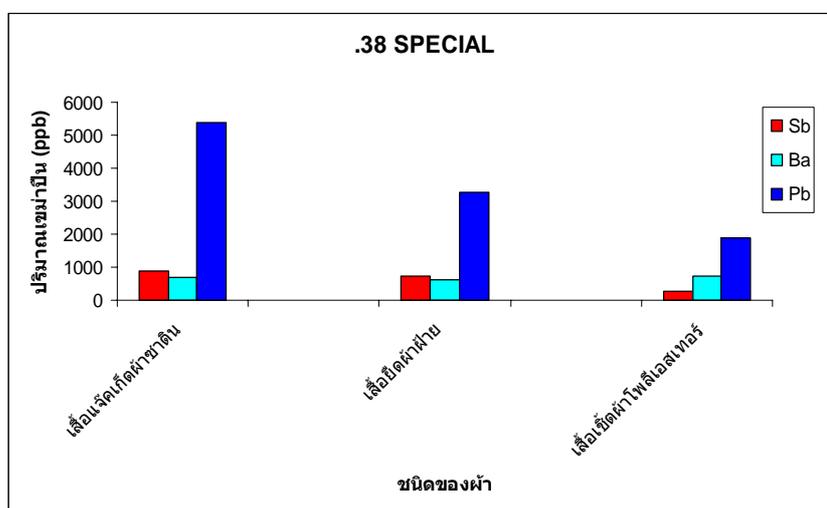
4. ผลการวิเคราะห์ปริมาณเขม่าปืนบนผ้าแต่ละชนิด

จากผลการทดลอง พบ ปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb), แบเรียม (Ba) และตะกั่ว (Pb) จะพบมากที่สุด ในผ้าซาตินที่ใช้ในการผลิตเสื้อแจ็คเก็ต รองลงมาคือ ผ้าฝ้ายที่ใช้ในการผลิตเสื้อยืด และผ้าโพลีเอสเตอร์ที่ใช้ในการผลิตเสื้อเชิ้ต ตามลำดับ ซึ่งมีผลไปในทิศทางเดียวกันทั้งในปืนพกออโตเมติก ขนาด 9 มม. LUGER และ ปืนพกรีวอลเวอร์ขนาด .38 SPECIAL แสดงดังภาพที่ 42 และ 43

จากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่า ปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb), แบเรียม (Ba) และตะกั่ว (Pb) ในผ้าทั้ง 3 ชนิด และอาวุธปืนทั้ง 2 ชนิด จะมีการปริมาณที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังแสดงด้วยภาพที่ 42 และ 43 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การถักหรือการทอ, คุณสมบัติของเส้นใย ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อสมบัติของผ้าที่ทอขึ้นจากเส้นใยนั้นๆ โดยความแตกต่างของเส้นใยก็ขึ้นอยู่กับ โครงสร้างทางกายภาพ, องค์ประกอบทางเคมี และการเรียงตัวของโมเลกุล ซึ่งส่วนผสมและความแตกต่างในปัจจุบันทั้งสามนี้ เป็นผลให้เส้นใยมีคุณสมบัติที่หลากหลายและแตกต่างกัน, คุณสมบัติทางกายภาพในผ้าแต่ละชนิด (อัจฉราพร ไสละสุต 2529), องค์ประกอบของกระสุนปืนที่ใช้กับอาวุธปืนแต่ละชนิด กล่าวคือ ในปืนพกออโตเมติก กระสุนปืนที่ใช้จะมีหัวกระสุนเป็นแบบ Full Metal Jacket แต่ในปืนพกรีวอลเวอร์ กระสุนปืนที่ใช้จะมีหัวกระสุนเป็นแบบ Lead Round Nose



ภาพที่ 42 ปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb) , แบเรียม (Ba) และตะกั่ว (Pb)บนฝ้ายแต่ละชนิด
ในปืนพกอโตเมติก ขนาด 9 มม. LUGER

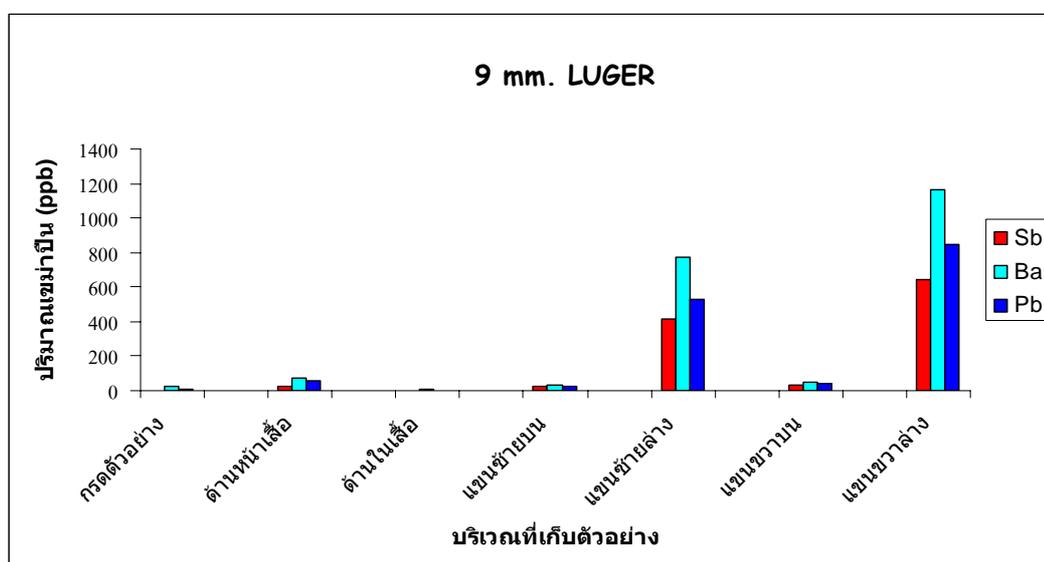


ภาพที่ 43 ปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb) , แบเรียม (Ba) และตะกั่ว (Pb)บนฝ้ายแต่ละชนิด
ในปืนพกรีโวลเวอร์ขนาด .38 SPECIAL

5. ผลการวิเคราะห์ปริมาณเขม่าปืนในบริเวณต่างๆที่ทำการเก็บตัวอย่าง

5.1 การวิเคราะห์ปริมาณเขม่าปืนในบริเวณต่างๆที่ทำการเก็บตัวอย่างในปืนพก ออโตเมติก ขนาด 9 มม. LUGER

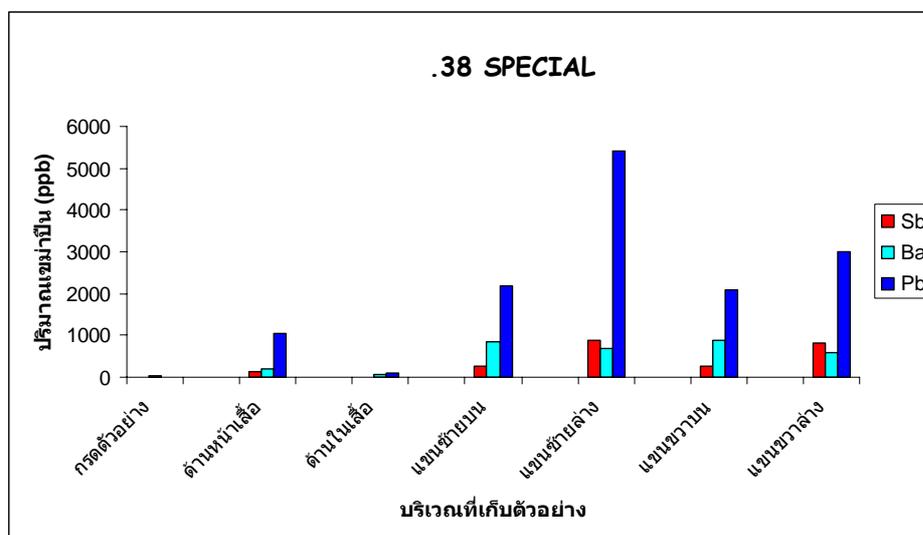
จากการทดลอง พบ ปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb) , แบเรียม (Ba) และตะกั่ว (Pb) ในบริเวณต่างๆ ของฝ้า สามารถเรียงลำดับบริเวณที่พบปริมาณเขม่าปืนจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้ แขนขวาด้านล่าง (ข้อมือถึงข้อศอก) > แขนซ้ายด้านล่าง (ข้อมือถึงข้อศอก) > แขนขวาด้านบน (ข้อศอกถึงหัวไหล่) > แขนซ้ายด้านบน (ข้อศอกถึงหัวไหล่) > ด้านหน้าเสื้อ > ด้านในเสื้อ ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 44



ภาพที่ 44 ปริมาณเขม่าปืนในปืนพกออโตเมติก ขนาด 9 มม. LUGER ในบริเวณต่างๆที่ทำการเก็บตัวอย่าง

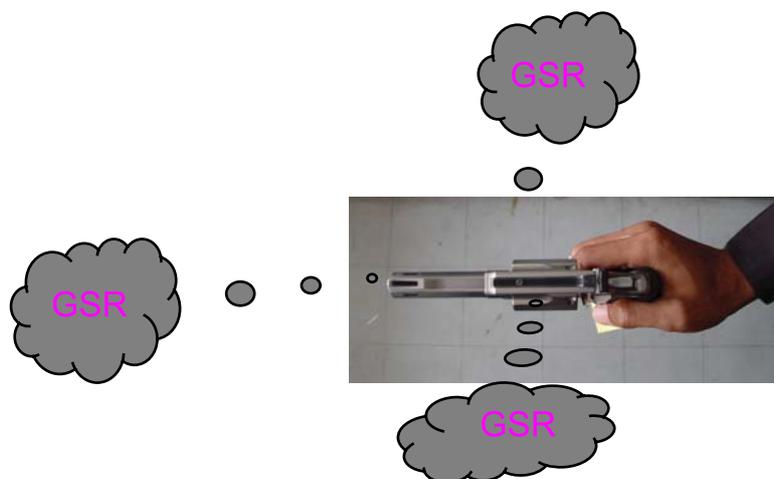
5.2 การวิเคราะห์ปริมาณเขม่าปืนในบริเวณต่างๆที่ทำการเก็บตัวอย่างในปืนพกวีวอล เวอร์ ขนาด .38 SPECIAL

จากการทดลอง พบ ปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb) , แบเรียม (Ba) และตะกั่ว (Pb) ในบริเวณต่างๆ ของฝ้า สามารถเรียงลำดับบริเวณที่พบปริมาณเขม่าปืนจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้ แขนซ้ายด้านล่าง (ข้อมือถึงข้อศอก) > แขนขวาด้านล่าง (ข้อมือถึงข้อศอก) > แขนซ้ายด้านบน (ข้อศอกถึงหัวไหล่) > แขนขวาด้านบน (ข้อศอกถึงหัวไหล่) > ด้านหน้าเสื้อ > ด้านในเสื้อ ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 45



ภาพที่ 45 ปริมาณเขม่าปืนในปืนพกวีลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL ในบริเวณต่างๆ ที่ทำการเก็บตัวอย่าง

สำหรับปริมาณเขม่าปืนที่พบในบริเวณต่างๆ แสดงด้วยภาพที่ 44 และ 45 โดยบริเวณที่ตรวจพบมากที่สุด คือ บริเวณแขนขวาด้านล่าง (ข้อมือถึงข้อศอก) ในปืนพกอัตโนมัติ ขนาด 9 มม. LUGER และที่บริเวณแขนซ้ายด้านล่าง (ข้อมือถึงข้อศอก) ในปืนพกวีลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL ซึ่งจะสอดคล้องกับบริเวณช่องว่างที่เขม่าปืนสามารถที่จะพุ่งออกมาได้จากอาวุธปืนแต่ละชนิด ทำให้ปริมาณเขม่าปืนของอาวุธปืนทั้ง 2 ชนิดแตกต่างกัน โดยในกรณีของปืนพกวีลเวอร์ เขม่าปืนจะออกมาจากบริเวณช่องว่างระหว่างผิวหน้าของรังเพลิงกับส่วนท้ายของลำกล้อง ดังแสดงด้วยภาพที่ 46 ส่วนในกรณีของปืนพกอัตโนมัติ เขม่าปืนจะออกมาจากบริเวณช่องคัปลอก ดังแสดงด้วยภาพที่ 47 (Z. Brozek – Mucha 2009)



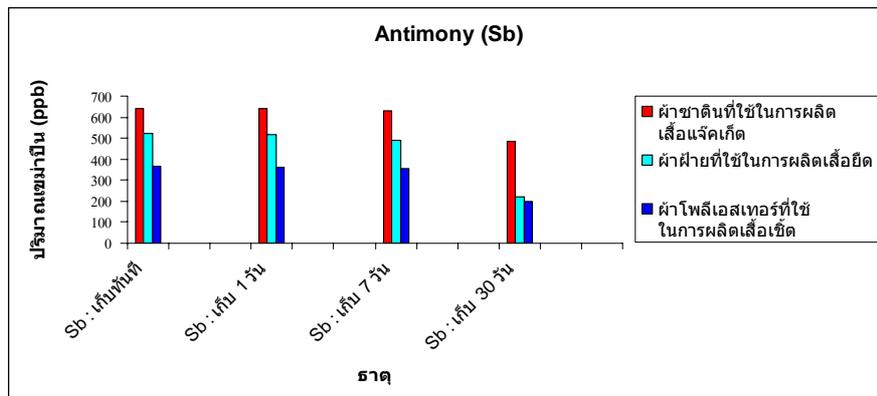
ภาพที่ 46 บริเวณที่เขม่าปืนพุ่งออกมาของปืนพกรีโวลเวอร์



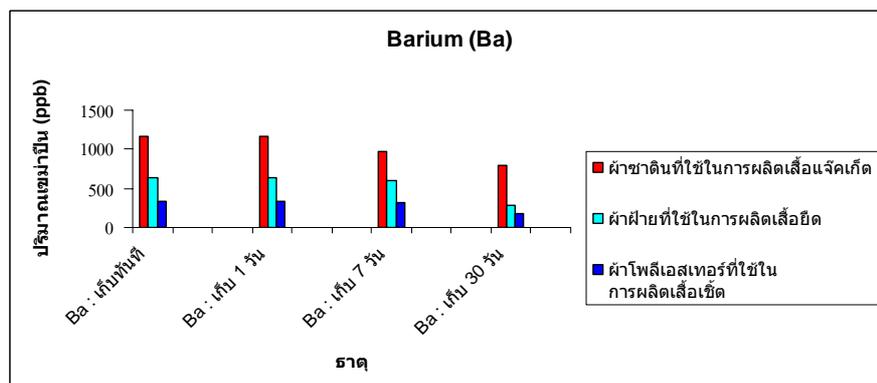
ภาพที่ 47 บริเวณที่เขม่าปืนพุ่งออกมาของปืนพกอัตโนมัติ

6. ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเขม่าปืนบนผ้าแต่ละชนิดกับระยะเวลา

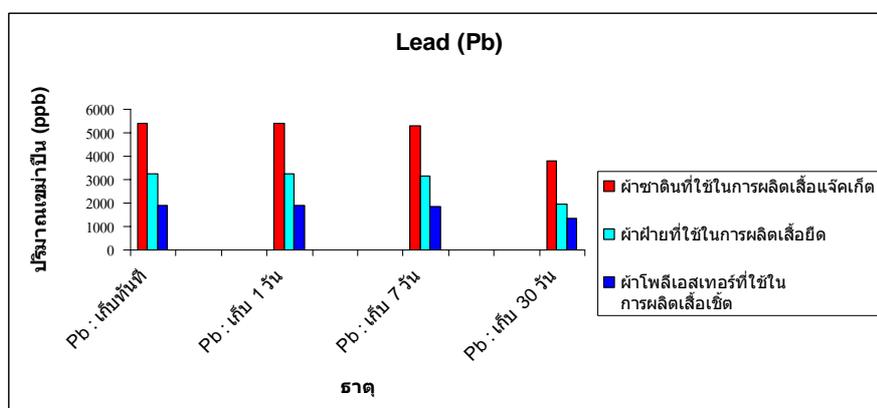
จากผลการทดลอง พบ ปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb) , แบเรียม (Ba) และตะกั่ว (Pb) จะมีปริมาณลดลงเรื่อยๆเมื่อเวลาผ่านไป และจะมีค่ามากที่สุดเมื่อทำการเก็บตัวอย่างภายหลังจากผ่านการยิงปืนไปแล้วทันทีและมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเก็บตัวอย่างภายหลังจากผ่านการยิงปืนไปแล้ว 30 วัน แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณของธาตุทั้งสามธาตุ ยังสามารถตรวจพบได้บนเสื้อผ้าภายหลังจากการยิงปืนผ่านไป 30 วัน แสดงดังภาพที่ 48, 49 และ 50



ภาพที่ 48 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb) บนผ้าแต่ละชนิดกับระยะเวลา



ภาพที่ 49 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของธาตุแบเรียม (Ba) บนผ้าแต่ละชนิดกับระยะเวลา



ภาพที่ 50 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของธาตุตะกั่ว (Pb) บนผ้าแต่ละชนิดกับระยะเวลา

การลดลงของปริมาณธาตุแอนติโมนี (Sb) , แบเรียม (Ba) และตะกั่ว (Pb) เมื่อเวลาผ่านไป แสดงให้เห็นว่า ปริมาณของธาตุทั้ง 3 ธาตุที่ลดลงนั้นเป็นสัดส่วนที่แปรผันโดยตรงกับ ระยะเวลาดังแสดงด้วยภาพที่ 48, 49 และ 50

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

1. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเขม่าปืนบนเสื้อผ้าของผู้ยิงปืนและระยะเวลาภายหลังการยิงปืน โดยเลือกศึกษาในผ้า 3 ชนิด ได้แก่ ผ้าฝ้ายที่ใช้ในการผลิตเสื้อยืด, ผ้าโพลีเอสเตอร์ที่ใช้ในการผลิตเสื้อเชิ้ต และผ้าซาตินที่ใช้ในการผลิตเสื้อแจ็กเก็ต และใช้อาวุธปืน 2 ชนิด ได้แก่ ปืนพกอโตเมติก ขนาด 9 มม. LUGER และปืนพกรีวอลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL ซึ่งทำการศึกษการเปลี่ยนแปลงปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb), แบเรียม (Ba) และตะกั่ว (Pb) ที่ประกอบประกอบในเขม่าปืน บนเสื้อผ้าของผู้ยิงปืนในระยะเวลาต่าง ๆ กัน คือ หลังจากผ่านการยิงปืนไปแล้วทันที, หลังจากผ่านการยิงปืนไปแล้ว 1 วัน, หลังจากผ่านการยิงปืนไปแล้ว 7 วัน, หลังจากผ่านการยิงปืนไปแล้ว 30 วัน และทำการเก็บตัวอย่างเขม่าปืนจากบริเวณต่างๆ ได้แก่ ด้านหน้าเสื้อ, ด้านในเสื้อ, แขนซ้ายด้านบน (ข้อศอกถึงหัวไหล่), แขนซ้ายด้านล่าง (ข้อมือถึงข้อศอก), แขนขวาด้านบน (ข้อศอกถึงหัวไหล่), แขนขวาด้านล่าง (ข้อมือถึงข้อศอก) โดยเทคนิค ICP – MS สามารถสรุปผลได้ดังนี้ คือ

1.1 ปริมาณเขม่าปืน จะพบมากที่สุดในพื้นที่ซาตินที่ใช้ในการผลิตเสื้อแจ็กเก็ต รองลงมาคือ ผ้าฝ้ายที่ใช้ในการผลิตเสื้อยืด และผ้าโพลีเอสเตอร์ที่ใช้ในการผลิตเสื้อเชิ้ต ตามลำดับ

1.2 ปริมาณเขม่าปืนในบริเวณต่างๆ ที่ทำการเก็บตัวอย่าง จะคล้ายคลึงกันในปืนทั้ง 2 ชนิด โดยตรวจพบมากที่สุดที่บริเวณแขนขวาด้านล่าง (ข้อมือถึงข้อศอก) ในปืนพกอโตเมติก ขนาด 9 มม. LUGER และที่บริเวณแขนซ้ายด้านล่าง (ข้อมือถึงข้อศอก) ในปืนพกรีวอลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL

1.3 ปริมาณเขม่าปืนบนเสื้อผ้าของผู้ยิงปืนมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาภายหลังการยิงปืน โดยปริมาณเขม่าปืนบนเสื้อผ้าของผู้ยิงปืนจะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะเวลา ก่อนเก็บตัวอย่าง

1.4 การหาประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ พบ ค่า % R.S.D. ในการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb), แบเรียม (Ba) และตะกั่ว (Pb) มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ (Horwitz 1985) และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, S.D.) ในการ

วิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb), แบเรียม (Ba) และตะกั่ว (Pb) ที่มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้เช่นเดียวกัน

2 ข้อเสนอแนะ

2.1 ควรทำการศึกษาในอาวุธปืนยาว เพื่อจะได้ทราบถึงรูปแบบของการคงอยู่และปริมาณของเขม่าปืน ในอาวุธปืนยาว

2.2 ควรทำการศึกษาในสภาพแวดล้อมอื่นๆ เช่น ในบริเวณที่โล่ง เนื่องจากในความเป็นจริงแล้วการก่อเหตุเกี่ยวกับอาวุธปืนเกิดขึ้นได้ทั้งในระบบปิดและบริเวณอื่นๆ

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

ขนาดของเส้นใย [ออนไลน์]. เข้าถึงเมื่อ 27 ธันวาคม 2552. เข้าถึงได้จาก

http://www2.mtec.or.th/th/research/textile/textile_sci.html

จิรวัช ฐนรัตน์. “คู่มือการตรวจหาดินปืน เขม่าดินปืน ตะกั่ว และทองแดง ของลูกกระสุนปืน.”

เอกสารเผยแพร่กองพิสูจน์หลักฐาน สำนักงานนิติวิทยาศาสตร์ตำรวจ, 2551. (อัดสำเนา)

เจริญ ปานคล้าย. “การตรวจเขม่าดินปืนบนเสื้อผ้าที่ระยะยิงต่างๆ ด้วยเทคนิค ICP - MS.”

เอกสารเผยแพร่งานคุณภาพเพื่อใช้ประกอบการเลื่อนตำแหน่ง กลุ่มงานตรวจอาวุธและเครื่องกระสุนปืน กองพิสูจน์หลักฐาน สำนักงานนิติวิทยาศาสตร์ตำรวจ, 2552. (อัดสำเนา)

ฉัตรชัย วิเศษสุวรรณภูมิ. “ผ้าปืน.” เคลนิวิสต์, 16 มิถุนายน 2544 – 14 กันยายน 2545.

นพสิทธิ์ อัครนพหงส์. “หลักการตรวจพิสูจน์เขม่าที่เกิดจากการยิงปืน.” เอกสารอัดสำเนา

กองพิสูจน์หลักฐาน สำนักงานนิติวิทยาศาสตร์ตำรวจ, 2550. (อัดสำเนา)

ณัฐนันท์ ชาตรีวงศ์. “การตรวจเขม่าปืนบนเสื้อผ้าด้วยเทคนิค SEM / EDS.” วิทยานิพนธ์ปริญญา

มหาบัณฑิต สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2551.

แมน อมรสิทธิ์ และคณะ. “หลักการและเทคนิควิเคราะห์เชิงเครื่องมือ.” กรุงเทพฯ : บริษัท ชวน

การพิมพ์ 50 จำกัด, 2552.

วิวัฒน์ ชินวร. “การวิเคราะห์เขม่าปืนด้วยเทคนิค SEM / EDX.” วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2547.

ส่วนประกอบของผ้า [ออนไลน์], เข้าถึงเมื่อ 12 ธันวาคม 2552, เข้าถึงได้จาก

<http://macadamia.igetweb.com/index.php?mo=3&art=284997>

อัจฉราพร ไสละสูต. “ความรู้เรื่องผ้า.” กรุงเทพฯ : ศูนย์หนังสือกรุงเทพฯ, 2529.

อัมพร จารุจินดา. “การตรวจพิสูจน์อาวุธปืนและเครื่องกระสุนปืน.” เอกสารความรู้ ทั่วไปเกี่ยวกับ

อาวุธปืนและกระสุนปืนสำหรับผู้เข้าอบรม กองพิสูจน์หลักฐาน สำนักงานวิทยาการตำรวจ, 2542. (อัดสำเนา)

ภาษาต่างประเทศ

Schwoeble A. J., and David L. Exline. Current methods in forensic gunshot residue analysis.

Florida : CRC Press LLC, 2000.

- Andrasko, J., and S. Pettersson. "A simple method for collection of gunshot residues from clothing." Journal of Forensic Science Society, no.31 (1991) : 321 – 330.
- Bakowska, Elzbieta (Ela), Peter B. Harrsch, and Thomas J. Gluodenis. "Analysis of gunshot residue by ICP – MS." Agilent Technologies, no.3 (2006) : 1 – 4.
- Sarkis, J., O. Neto, S. Viebig, and S. Durrant. "Measurements of gunshot residues by sector field inductively coupled plasma mass spectrometry - Further studies with pistols." Journal of Forensic Science International, no. 172 (1991) : 63-66.
- Kage, S. and others. "A simple method for detection of gunshot residue particles from hands, hair, face, and clothing using scanning electron microscopy/wavelength dispersive X-ray (SEM/WDX)." Journal of Forensic Science 46, 4 (2001) : 830 - 4.
- Koons, Robert D. "Analysis of gunshot primer residue collection swabs by Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry." Journal of Forensic Science 43, (1998) : 748 – 754.
- Brozek – Mucha, Z. " Distribution and properties of gunshot residue originating from a Luger 9 mm. ammunition in the vicinity of the shooting gun." Journal of Forensic Science International, no. 183 (2009) : 33-44.
- Zeichner, Arie, and Nadav Levin. " Casework Experience of GSR Detection in Israel, on Samples from Hands, Hair, and Clothing Using an Autosearch SEM/EDX System." Journal of Forensic Science, no. 40 (1995) : 1082 – 1085.
- Zeichner, Arie and others. " Vacuum collection of gunpowder residues from clothing worn by shooting suspects, and their analysis by GC/TEA, IMS, and GC/MS." Journal of Forensic Science, no.48 (2003) : 961 – 972.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

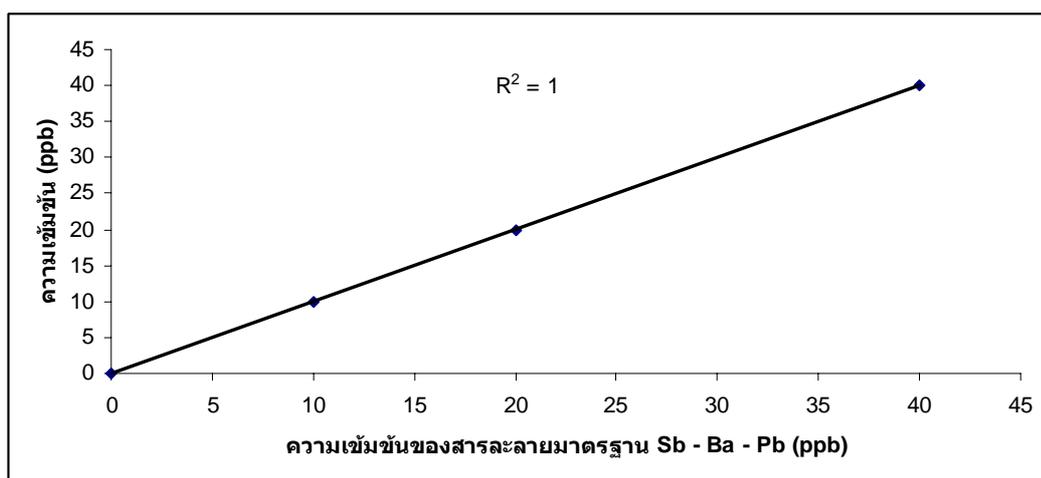
กราฟมาตรฐานของการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแอนติโมนี แบริยม และตะกั่ว
บนผ้าแต่ละชนิด โดยเทคนิค ICP – MS

1. กราฟมาตรฐานของการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแอนติโมนี แบริยม และตะกั่ว บนผ้าแต่ละชนิด ที่วิเคราะห์โดยเทคนิค ICP – MS

1.1 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบริยม และตะกั่ว
ความเข้มข้น 10 – 20 – 40 ppb

ตารางที่ 8 ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบริยม และตะกั่ว ความเข้มข้นที่ 1

สารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบริยม ตะกั่ว ความเข้มข้น 10 - 20 - 40 ppb	ค่าความเข้มข้น (ppb)
0	0
10	10.000
20	20.000
40	40.000

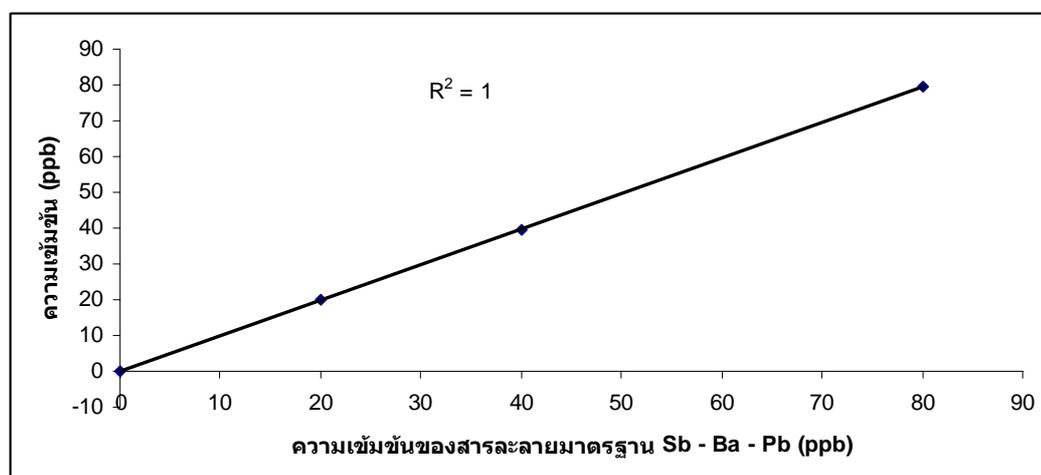


ภาพที่ 51 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบริยม และตะกั่ว ความเข้มข้น
10 – 20 – 40 ppb

1.2 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบริยม และตะกั่ว
ความเข้มข้น 20 – 40 – 80 ppb

ตารางที่ 9 ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบริยม และตะกั่ว ความเข้มข้นที่ 2

สารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบริยม ตะกั่ว ความเข้มข้น 20 - 40 - 80 ppb	ค่าความเข้มข้น (ppb)
0	0
20	19.834
40	39.413
80	79.505

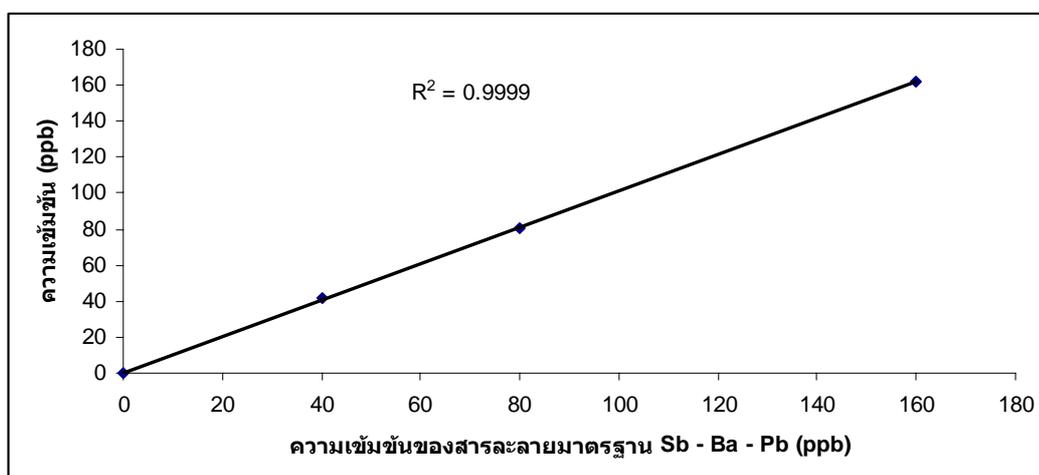


ภาพที่ 52 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบริยม และตะกั่ว ความเข้มข้น
20 – 40 – 80 ppb

1.3 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบริยม และตะกั่ว
ความเข้มข้น 40 – 80 – 160 ppb

ตารางที่ 10 ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบริยม และตะกั่ว ความเข้มข้นที่ 3

สารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบริยม ตะกั่ว ความเข้มข้น 40 - 80 - 160 ppb	ค่าความเข้มข้น (ppb)
0	0
40	41.514
80	80.864
160	161.688

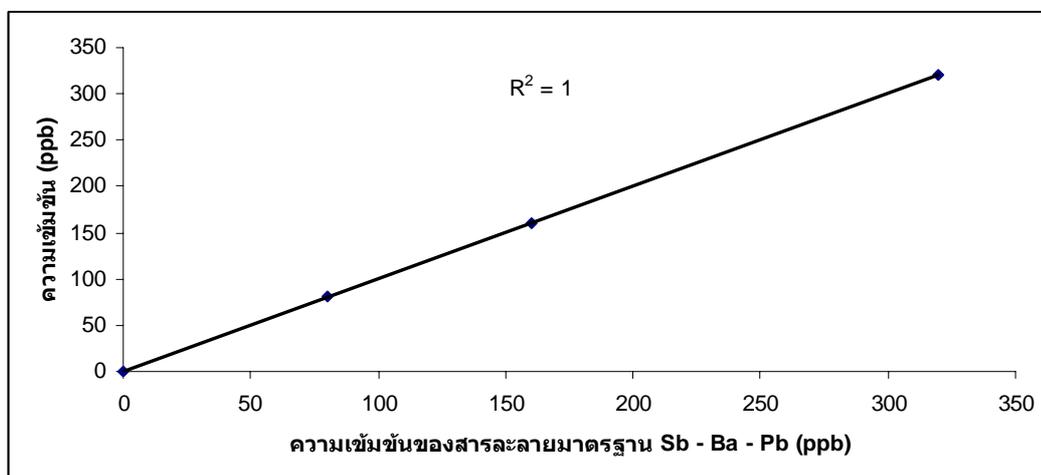


ภาพที่ 53 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบริยม และตะกั่ว ความเข้มข้น
40 – 80 – 160 ppb

1.4 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบริยม และตะกั่ว
ความเข้มข้น 80 – 160 – 320 ppb

ตารางที่ 11 ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบริยม และตะกั่ว ความเข้มข้นที่ 4

สารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบริยม ตะกั่ว ความเข้มข้น 80 - 160 - 320 ppb	ค่าความเข้มข้น (ppb)
0	0
80	80.151
160	159.256
320	321.308

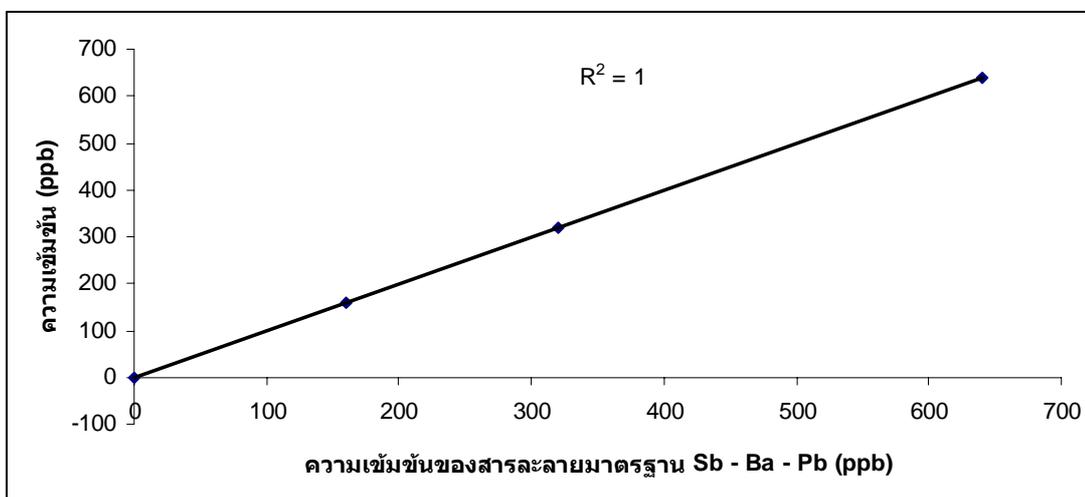


ภาพที่ 54 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบริยม และตะกั่ว ความเข้มข้น
80 – 160 – 320 ppb

1.5 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบเรียม และตะกั่ว
ความเข้มข้น 160 – 320 – 640 ppb

ตารางที่ 12 ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบเรียม และตะกั่ว ความเข้มข้นที่ 5

สารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบเรียม ตะกั่ว ความเข้มข้น 160 - 320 - 640 ppb	ค่าความเข้มข้น (ppb)
0	0
160	160.226
320	318.340
640	640.143



ภาพที่ 55 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานแอนติโมนี แบเรียม และตะกั่ว ความเข้มข้น
160 – 320 – 640 ppb

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแอนติโมนี แบริยม และตะกั่ว
บนผ้าแต่ละชนิด

ตัวอย่างผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแอนติโมนี แบเรียม และตะกั่ว
บนผ้าแต่ละชนิด ที่วิเคราะห์โดยเทคนิค ICP - MS

Quantitative Analysis

Sample ID: std.1

Sample Date/Time: Wednesday, October 21, 2009 08:56:24
Solution Type: Standard
Number of Replicates: 3

Method File: C:\Elandata\Method\thesis gun shot residue 1.mth
Dataset File: C:\Elandata\DataSet\thesis 211009\std.1.002

Replicates

Repeat 1

Analyte	Meas. Intensity	Net Intensity	Concentration	Sample Unit
Sb	50974.11	50919.043	9.898702	ug/L
Ba	40859.16	40672.795	19.568427	ug/L
Pb	56246.26	56131.596	40.381389	ug/L

Repeat 2

Analyte	Meas. Intensity	Net Intensity	Concentration	Sample Unit
Sb	51130.59	51075.518	9.929121	ug/L
Ba	41858.49	41672.125	20.049223	ug/L
Pb	54529.45	54414.784	39.146304	ug/L

Repeat 3

Analyte	Meas. Intensity	Net Intensity	Concentration	Sample Unit
Sb	52380.87	52325.806	10.172178	ug/L
Ba	42550.90	42364.526	20.382350	ug/L
Pb	56372.64	56257.975	40.472307	ug/L

Mean Values

Analyte	Meas. Intens. Mean	Net Intens. Mean	Conc. Mean	Sample Unit
Sb	51495.19	51440.123	10.000000	ug/L
Ba	41756.18	41569.816	20.000000	ug/L
Pb	55716.12	55601.452	40.000000	ug/L

Summary

Analyte	Conc. Mean	Conc. SD	Conc. RSD	Report Unit
Sb	10.000000	0.150	1.499	ug/L
Ba	20.000000	0.409	2.046	ug/L
Pb	40.000000	0.741	1.852	ug/L

Calibration

Analyte	Correlation Coefficient
Sb	1.000000
Ba	1.000000
Pb	1.000000

ภาคผนวก ค
การหาประสิทธิภาพของการวิเคราะห์

การหาประสิทธิภาพของการวิเคราะห์

1. การวิเคราะห์หาค่าความเที่ยง (Precision)

1.1 นำผลที่ได้จากการทดลองมาหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, S.D.)

โดยหาได้จาก

$$S.D. = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

เมื่อ \bar{X} = ค่าเฉลี่ย
 X_i = ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง
 n = จำนวนครั้งที่วัด

1.2 นำผลที่ได้จากการทดลองมาหาค่า % RSD : Relative Standard Diviation ซึ่งเป็นค่าที่นำมาวัดความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability)

$$\% R.S.D = \frac{S.D. \times 100}{\bar{X}}$$

เมื่อ S.D. = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
 \bar{X} = ค่าเฉลี่ย

ภาคผนวก ง
ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแอนติโมนี แบริยม และตะกั่ว บนผ้าแต่ละชนิด
โดยเทคนิค ICP – MS

ตารางที่ 13 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb), แบเรียม (Ba) และตะกั่ว ในผ้าฝ้ายที่ใช้ในการผลิตเสื้อยืด เก็บทันทีภายหลังจากการยิงปืน โดยใช้ปืนพกอัตโนมัติ ขนาด 9 mm.LUGER ยิง ครั้งละ 1 นัด

	Sb	S.D.	Ba	S.D.	Pb	S.D.
กรดตัวอย่าง 1	0.108	0.016	5.693	0.298	3.564	0.047
กรดตัวอย่าง 2	0.095	0.090	4.807	0.093	3.912	0.068
ด้านหน้า 1	2.584	0.148	19.386	1.410	15.163	0.153
ด้านหน้า 2	2.833	0.079	22.054	1.366	14.989	0.023
ด้านใน 1	0.019	0.106	3.088	0.541	1.916	0.020
ด้านใน 2	0.011	0.013	3.367	0.312	1.907	0.085
แขนซ้ายบน 1	5.781	0.882	23.482	2.056	18.676	0.829
แขนซ้ายบน 2	5.568	1.151	25.090	1.719	18.943	0.667
แขนซ้ายล่าง 1	11.429	3.011	41.603	1.081	32.776	1.543
แขนซ้ายล่าง 2	13.022	2.989	39.417	2.136	34.029	1.484
แขนขวาบน 1	9.364	0.975	34.062	1.770	27.043	0.867
แขนขวาบน 2	11.578	1.013	34.833	1.524	28.155	0.771
แขนขวาล่าง 1	24.811	1.092	57.368	3.210	44.161	2.054
แขนขวาล่าง 2	26.135	2.114	58.690	2.974	44.925	2.169
ด้านหลัง 1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
ด้านหลัง 2	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

ตารางที่ 14 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb) ในผ้าฝ้ายที่ใช้ในการผลิตเสื้อยืด โดยใช้ปืนพกอโตเมติก ขนาด 9 mm.LUGER

ผ้าฝ้าย : Sb : 9 mm.	Sb : เก็บทันที (ug/L)	S.D.	Sb : 1 วัน (ug/L)	S.D.	Sb : 7 วัน (ug/L)	S.D.	Sb : 30 วัน (ug/L)	S.D.
กรดตัวอย่าง 1	0.766	0.038	0.716	0.043	0.687	0.023	0.642	0.051
กรดตัวอย่าง 2	0.509	0.056	0.558	0.061	0.799	0.065	0.569	0.078
ด้านหน้า 1	19.912	0.266	17.064	0.046	11.482	0.313	2.219	0.079
ด้านหน้า 2	24.311	0.097	21.565	0.015	14.276	0.265	3.511	0.081
ด้านใน 1	0.034	0.044	0.030	0.002	0.016	0.001	0.003	0.036
ด้านใน 2	0.079	0.198	0.075	0.023	0.029	0.003	0.005	0.015
แขนซ้ายบน 1	22.437	0.098	20.853	1.445	13.218	0.010	3.796	0.219
แขนซ้ายบน 2	26.811	0.131	23.690	1.709	15.604	0.014	7.668	0.058
แขนซ้ายล่าง 1	432.621	2.242	429.224	5.343	414.210	2.014	119.599	1.568
แขนซ้ายล่าง 2	450.799	3.403	443.606	3.978	431.855	3.419	127.013	1.136
แขนขวาบน 1	30.645	0.417	23.644	0.380	12.365	0.447	3.681	0.016
แขนขวาบน 2	39.519	0.119	35.758	0.092	21.184	0.205	5.715	0.124
แขนขวาล่าง 1	521.250	5.345	518.072	3.974	490.283	3.031	218.447	1.367
แขนขวาล่าง 2	533.045	7.676	529.952	2.500	501.442	5.629	276.188	2.196

ตารางที่ 15 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุเบเรียม (Ba) ในผ้าฝ้ายที่ใช้ในการผลิตเสื้อยืด โดยใช้ปืนพกอโตเมติก ขนาด 9 mm.LUGER

ผ้าฝ้าย : Ba : 9 mm.	Ba : เก็บทันที (ug/L)	S.D.	Ba : 1 วัน (ug/L)	S.D.	Ba : 7 วัน (ug/L)	S.D.	Ba : 30 วัน (ug/L)	S.D.
กรดตัวอย่าง 1	22.440	1.113	20.773	1.123	19.110	1.751	21.002	1.032
กรดตัวอย่าง 2	19.067	1.541	21.089	1.176	21.034	1.221	24.895	1.147
ด้านหน้า 1	60.316	1.214	58.125	1.967	44.752	0.866	10.568	1.497
ด้านหน้า 2	68.722	1.149	63.771	0.375	51.824	1.034	16.281	1.765
ด้านใน 1	5.163	0.765	4.917	1.235	3.187	0.069	0.611	0.189
ด้านใน 2	8.352	1.488	8.004	3.311	5.890	0.137	0.973	0.204
แขนซ้ายบน 1	83.221	1.614	81.734	1.987	69.882	1.078	23.686	1.043
แขนซ้ายบน 2	87.344	1.831	84.441	1.653	72.520	1.224	27.152	0.569
แขนซ้ายล่าง 1	590.864	3.186	586.469	2.245	553.792	1.758	264.312	0.986
แขนซ้ายล่าง 2	599.251	3.386	592.152	3.807	567.106	3.145	281.023	0.745
แขนขวาบน 1	93.445	0.643	88.725	0.881	71.468	0.843	24.439	0.541
แขนขวาบน 2	102.513	1.482	97.256	1.784	83.116	0.531	31.676	0.065
แขนขวาล่าง 1	640.563	2.119	636.337	3.911	607.052	3.835	283.225	2.723
แขนขวาล่าง 2	596.788	5.565	592.020	1.226	553.814	2.957	270.916	1.865

ตารางที่ 16 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุตะกั่ว (Pb) ในผ้าฝ้ายที่ใช้ในการผลิตเสื้อยืด โดยใช้ปืนพกอโตเมติก ขนาด 9 mm.LUGER

ผ้าฝ้าย : Pb : 9 mm.	Pb : เก็บทันที (ug/L)	S.D.	Pb : 1 วัน (ug/L)	S.D.	Pb : 7 วัน (ug/L)	S.D.	Pb : 30 วัน (ug/L)	S.D.
กรดตัวอย่าง 1	7.141	0.132	8.052	0.735	5.088	0.256	7.660	0.332
กรดตัวอย่าง 2	5.087	0.578	6.441	0.348	8.032	0.174	5.013	0.099
ด้านหน้า 1	46.012	0.088	44.697	0.200	32.004	0.227	5.223	0.467
ด้านหน้า 2	51.384	1.737	49.208	0.176	36.781	0.468	8.549	0.220
ด้านใน 1	3.166	0.061	2.786	0.165	1.916	0.093	0.011	0.098
ด้านใน 2	5.727	1.626	5.127	0.429	3.589	0.052	0.063	0.056
แขนซ้ายบน 1	55.976	0.153	53.567	0.594	40.165	0.245	11.651	0.541
แขนซ้ายบน 2	59.206	1.510	57.209	0.332	49.035	0.774	15.329	0.328
แขนซ้ายล่าง 1	350.232	2.316	344.667	1.776	297.513	0.668	120.205	1.835
แขนซ้ายล่าง 2	361.407	3.710	357.988	3.531	306.375	1.579	136.412	1.255
แขนขวาบน 1	47.165	1.629	42.721	0.158	31.708	0.475	10.093	0.176
แขนขวาบน 2	55.911	1.018	51.664	0.229	37.551	0.553	13.581	0.882
แขนขวาล่าง 1	501.749	1.023	498.217	1.364	451.267	1.543	132.484	1.453
แขนขวาล่าง 2	511.835	4.887	509.734	2.106	486.520	4.672	156.546	1.732

ตารางที่ 17 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb) ในผ้าโพลีเอสเตอร์ที่ใช้ในการผลิตเสื้อเชิ้ต โดยใช้ปืนพกอัตโนมัติ
ขนาด 9 mm. LUGER

ผ้าโพลีเอสเตอร์ : Sb : 9 mm.	Sb : เก็บทันที (ug/L)	S.D.	Sb : 1 วัน (ug/L)	S.D.	Sb : 7 วัน (ug/L)	S.D.	Sb : 30 วัน (ug/L)	S.D.
กรวดตัวอย่าง 1	0.886	0.177	0.604	0.012	0.790	0.065	0.561	0.022
กรวดตัวอย่าง 2	0.634	0.098	0.887	0.054	0.644	0.087	0.778	0.081
ด้านหน้า 1	13.481	0.191	11.050	0.761	6.710	0.542	1.776	0.167
ด้านหน้า 2	9.677	0.461	8.116	0.248	4.948	0.289	1.142	0.028
ด้านใน 1	0.070	0.007	0.056	0.014	0.029	0.022	0.003	0.056
ด้านใน 2	0.116	0.053	0.095	0.004	0.035	0.048	0.001	0.012
แขนซ้ายบน 1	36.552	1.579	32.884	0.544	24.841	0.606	11.877	0.435
แขนซ้ายบน 2	34.462	0.184	30.167	0.798	21.522	0.387	9.021	0.149
แขนซ้ายล่าง 1	257.088	0.956	253.114	3.385	242.991	0.945	135.058	1.849
แขนซ้ายล่าง 2	249.157	0.128	244.571	2.954	238.767	0.732	128.037	1.678
แขนขวาบน 1	59.924	0.247	57.981	0.478	59.006	0.231	20.050	0.114
แขนขวาบน 2	55.802	0.664	53.402	0.506	47.818	0.169	16.216	0.616
แขนขวาล่าง 1	366.532	3.816	363.008	1.623	356.748	5.832	197.381	0.445
แขนขวาล่าง 2	357.441	1.957	354.461	2.389	348.097	3.114	186.554	0.619

ตารางที่ 18 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแบเรียม (Ba) ในผ้าโพลีเอสเตอร์ที่ใช้ในการผลิตเสื้อเชิ้ต โดยใช้ปืนพกออโตเมติก ขนาด 9 mm LUGER

ผ้าโพลีเอสเตอร์ : Ba : 9 mm.	Ba : เก็บทันที (ug/L)	S.D.	Ba : 1 วัน (ug/L)	S.D.	Ba : 7 วัน (ug/L)	S.D.	Ba : 30 วัน (ug/L)	S.D.
กรดตัวอย่าง 1	20.445	1.287	18.646	1.441	19.021	1.090	19.423	1.987
กรดตัวอย่าง 2	22.099	1.003	21.225	1.043	20.778	1.321	21.301	1.332
ด้านหน้า 1	68.563	2.332	67.239	0.411	53.895	0.047	21.895	0.755
ด้านหน้า 2	59.449	1.033	56.474	0.106	49.126	0.026	19.563	0.382
ด้านใน 1	15.232	0.688	14.912	1.437	9.724	0.498	2.461	0.917
ด้านใน 2	7.446	0.046	6.778	0.661	3.571	0.766	0.607	0.268
แขนซ้ายบน 1	77.406	0.993	74.668	1.476	63.330	0.162	29.601	1.035
แขนซ้ายบน 2	69.401	0.545	65.332	1.087	57.807	0.212	23.997	0.299
แขนซ้ายล่าง 1	183.249	1.601	180.536	1.266	169.456	0.542	80.601	1.006
แขนซ้ายล่าง 2	178.344	3.241	176.995	1.530	163.088	0.747	77.343	1.126
แขนขวาบน 1	47.395	0.344	43.349	1.984	34.616	0.286	13.915	0.033
แขนขวาบน 2	48.550	0.612	45.046	1.576	37.931	0.270	18.122	0.090
แขนขวาล่าง 1	330.199	4.507	327.044	1.971	320.539	4.906	181.714	3.025
แขนขวาล่าง 2	319.330	2.963	313.928	2.646	308.532	3.164	174.907	1.747

ตารางที่ 19 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุตะกั่ว (Pb) ในผ้าโพลีเอสเตอร์ที่ใช้ในการผลิตเสื้อเชิ้ต โดยใช้ปืนพกอัตโนมัติ ขนาด 9 mm.LUGER

ผ้าโพลีเอสเตอร์ : Pb : 9 mm.	Pb : เก็บทันที (ug/L)	S.D.	Pb : 1 วัน (ug/L)	S.D.	Pb : 7 วัน (ug/L)	S.D.	Pb : 30 วัน (ug/L)	S.D.
กรดตัวอย่าง 1	6.354	0.141	5.669	0.089	7.233	0.445	5.886	0.562
กรดตัวอย่าง 2	7.332	0.468	8.312	0.346	5.896	0.086	7.714	0.333
ด้านหน้า 1	47.116	0.367	44.177	0.135	35.641	0.193	16.901	1.446
ด้านหน้า 2	41.995	0.150	39.805	0.227	29.798	0.414	11.714	0.367
ด้านใน 1	9.017	0.083	8.517	0.045	5.161	0.016	2.076	0.097
ด้านใน 2	8.440	0.049	8.003	0.083	4.721	0.085	1.213	0.046
แขนซ้ายบน 1	59.098	0.673	57.161	1.622	50.165	0.217	21.033	0.667
แขนซ้ายบน 2	53.175	1.138	49.234	1.084	41.730	0.204	19.574	0.181
แขนซ้ายล่าง 1	132.465	0.776	129.005	1.099	116.030	1.724	59.068	0.871
แขนซ้ายล่าง 2	126.369	1.343	123.119	1.439	111.389	1.439	47.330	1.354
แขนขวาบน 1	39.645	2.145	36.029	0.256	29.644	0.076	13.127	0.883
แขนขวาบน 2	33.424	1.734	30.774	0.172	22.071	0.083	11.231	0.056
แขนขวาล่าง 1	224.011	1.391	223.347	2.224	214.509	1.867	127.829	1.062
แขนขวาล่าง 2	218.044	1.523	216.584	2.568	207.161	1.512	108.460	1.419

ตารางที่ 20 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb) ในผ้าซาดินที่ใช้ในการผลิตเสื้อแจ็กเก็ต โดยใช้ปืนพกอโตเมติก ขนาด 9 mm LUGER

ผ้าซาดิน: Sb : 9 mm.	Sb : เก็บทันที (ug/L)	S.D.	Sb : 1 วัน (ug/L)	S.D.	Sb : 7 วัน (ug/L)	S.D.	Sb : 30 วัน (ug/L)	S.D.
กรดตัวอย่าง 1	0.896	0.114	0.521	0.018	0.543	0.079	0.786	0.022
กรดตัวอย่าง 2	0.677	0.087	0.770	0.067	0.863	0.038	0.532	0.014
ด้านหน้า 1	24.296	0.626	21.974	0.074	16.155	0.954	5.048	0.324
ด้านหน้า 2	20.448	0.103	17.381	0.088	12.761	0.550	3.988	0.033
ด้านใน 1	0.043	0.148	0.040	0.035	0.029	0.039	0.007	0.038
ด้านใน 2	0.183	0.066	0.179	0.022	0.107	0.007	0.054	0.021
แขนซ้ายบน 1	21.739	0.442	18.650	0.73	11.785	1.592	3.427	0.087
แขนซ้ายบน 2	22.380	0.153	20.421	0.085	13.263	1.014	7.588	0.579
แขนซ้ายล่าง 1	413.894	3.562	411.723	6.916	397.231	2.273	241.464	2.598
แขนซ้ายล่าง 2	386.518	3.845	384.177	1.513	370.845	1.547	233.714	2.195
แขนขวาบน 1	28.732	0.173	25.119	0.314	17.048	0.563	8.741	0.365
แขนขวาบน 2	23.456	0.208	21.586	0.047	14.777	0.441	5.433	0.218
แขนขวาล่าง 1	642.828	5.563	639.962	4.572	628.958	5.088	483.994	5.742
แขนขวาล่าง 2	630.446	7.138	626.187	2.061	617.522	5.563	492.417	5.398

ตารางที่ 21 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแบเรียม (Ba) ในผ้าซาตินที่ใช้ในการผลิตเสื้อแจ็กเก็ต โดยใช้ปืนพกอโตเมติก ขนาด 9 mm.LUGER

ผ้าซาติน : Ba : 9 mm.	Ba : เก็บทันที (ug/L)	S.D.	Ba : 1 วัน (ug/L)	S.D.	Ba : 7 วัน (ug/L)	S.D.	Ba : 30 วัน (ug/L)	S.D.
กรดตัวอย่าง 1	20.433	1.061	21.118	1.756	17.083	1.033	22.011	1.195
กรดตัวอย่าง 2	21.072	1.816	19.305	1.271	20.252	1.228	18.233	1.311
ด้านหน้า 1	73.643	0.778	68.743	1.345	59.457	1.285	21.491	0.694
ด้านหน้า 2	66.545	0.512	63.102	0.995	51.980	0.823	19.152	0.380
ด้านใน 1	6.133	0.214	6.028	0.094	4.481	0.151	0.872	0.086
ด้านใน 2	4.935	0.386	4.831	0.015	3.902	0.466	0.615	0.047
แขนซ้ายบน 1	33.827	1.886	29.644	1.807	22.334	1.133	10.045	1.031
แขนซ้ายบน 2	27.675	2.631	25.025	1.102	18.027	0.946	8.246	1.596
แขนซ้ายล่าง 1	770.333	5.947	767.088	3.563	759.236	5.707	588.095	6.028
แขนซ้ายล่าง 2	672.998	4.875	669.053	1.547	660.114	3.012	432.237	5.433
แขนขวาบน 1	51.945	0.741	48.087	0.298	37.115	1.242	19.203	2.197
แขนขวาบน 2	44.594	1.003	41.139	0.155	30.672	1.048	13.352	2.088
แขนขวาล่าง 1	1160.123	4.775	1157.789	6.528	979.103	7.334	794.521	7.059
แขนขวาล่าง 2	1249.547	5.506	1243.660	10.193	1092.145	7.876	886.418	7.881

ตารางที่ 22 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุตะกั่ว (Pb) ในผ้าซาตินที่ใช้ในการผลิตเสื้อแจ็คเก็ต โดยใช้ปืนพกอัตโนมัติ ขนาด 9 mm.LUGER

ผ้าซาติน: Pb : 9 mm.	Pb : เก็บทันที (ug/L)	S.D.	Pb : 1 วัน (ug/L)	S.D.	Pb : 7 วัน (ug/L)	S.D.	Pb : 30 วัน (ug/L)	S.D.
กรวดตัวอย่าง 1	7.324	1.027	6.235	0.387	8.191	0.641	5.882	0.271
กรวดตัวอย่าง 2	5.557	0.430	8.071	0.667	6.233	0.275	8.341	0.473
ด้านหน้า 1	55.200	0.985	52.167	0.184	47.786	0.104	18.124	0.511
ด้านหน้า 2	51.703	0.179	47.586	0.326	38.303	0.182	13.592	0.247
ด้านใน 1	3.367	0.110	3.147	0.033	2.083	1.057	0.095	0.015
ด้านใน 2	3.697	0.218	3.513	0.091	2.175	0.884	0.083	0.011
แขนซ้ายบน 1	22.114	0.353	20.067	0.966	13.067	0.419	6.752	0.773
แขนซ้ายบน 2	17.808	0.187	14.940	0.827	9.787	0.077	2.839	0.251
แขนซ้ายล่าง 1	525.706	2.065	522.097	1.076	514.776	4.553	365.389	3.677
แขนซ้ายล่าง 2	518.490	1.404	513.481	5.083	502.143	4.735	432.246	2.441
แขนขวาบน 1	39.177	0.811	36.497	0.351	29.572	0.643	14.127	0.875
แขนขวาบน 2	33.820	0.464	31.046	0.743	24.328	0.528	11.634	0.923
แขนขวาล่าง 1	850.117	1.893	839.522	3.405	802.171	3.452	619.862	6.422
แขนขวาล่าง 2	832.994	1.905	825.659	2.151	789.223	5.540	598.473	7.241

ตารางที่ 23 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb) ในผ้าฝ้ายที่ใช้ในการผลิตเสื้อยืด โดยใช้ปืนพกรีวอลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL

ผ้าฝ้าย : Sb : .38	Sb : เก็บทันที (ug/L)	S.D.	Sb : 1 วัน (ug/L)	S.D.	Sb : 7 วัน (ug/L)	S.D.	Sb : 30 วัน (ug/L)	S.D.
กรดตัวอย่าง 1	0.859	0.055	0.631	0.023	0.856	0.013	0.715	0.097
กรดตัวอย่าง 2	0.791	0.014	0.599	0.011	0.532	0.047	0.621	0.074
ด้านหน้า 1	115.306	1.593	110.563	1.118	67.129	0.843	21.432	0.166
ด้านหน้า 2	107.239	1.231	101.778	1.067	59.083	0.598	16.550	0.043
ด้านใน 1	8.066	0.503	7.695	0.089	5.276	0.011	1.438	0.008
ด้านใน 2	7.149	0.084	6.804	0.045	3.264	0.060	0.965	0.035
แขนซ้ายบน 1	222.175	3.375	218.560	1.454	203.124	0.916	124.848	0.976
แขนซ้ายบน 2	218.593	3.021	213.737	1.617	147.361	0.443	71.183	0.163
แขนซ้ายล่าง 1	749.022	2.786	744.865	3.834	695.861	5.042	280.672	1.173
แขนซ้ายล่าง 2	738.185	1.822	735.149	3.406	687.053	7.136	263.517	1.884
แขนขวาบน 1	216.871	0.749	212.048	1.257	174.322	0.681	64.575	0.845
แขนขวาบน 2	208.319	0.865	200.436	1.426	182.467	0.499	58.091	0.337
แขนขวาล่าง 1	719.527	3.199	713.069	2.775	658.354	1.722	237.332	0.955
แขนขวาล่าง 2	711.489	2.362	704.542	1.959	636.412	1.619	223.047	0.684

ตารางที่ 24 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแบเรียม (Ba) ในผ้าฝ้ายที่ใช้ในการผลิตเสื้อยืด โดยใช้ปืนพกวีวอลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL

ผ้าฝ้าย: Ba : .38	Ba : เก็บทันที (ug/L)	S.D.	Ba : 1 วัน (ug/L)	S.D.	Ba : 7 วัน (ug/L)	S.D.	Ba : 30 วัน (ug/L)	S.D.
กรดตัวอย่าง 1	23.481	0.654	19.696	0.925	20.827	0.169	21.033	1.131
กรดตัวอย่าง 2	19.764	0.138	22.536	1.024	24.152	0.527	17.286	1.372
ด้านหน้า 1	176.113	0.742	172.379	0.568	133.589	1.156	48.451	0.487
ด้านหน้า 2	169.018	0.590	163.280	0.624	120.836	1.047	39.038	0.362
ด้านใน 1	43.647	1.528	40.235	0.135	29.467	0.146	7.223	0.042
ด้านใน 2	37.225	1.089	32.310	0.128	20.098	0.120	3.745	0.057
แขนซ้ายบน 1	259.488	2.110	255.629	1.378	229.488	2.924	131.820	0.236
แขนซ้ายบน 2	248.167	2.734	243.833	1.754	215.753	2.585	117.698	0.425
แขนซ้ายล่าง 1	633.487	1.697	629.183	1.286	576.441	1.485	258.692	1.426
แขนซ้ายล่าง 2	625.151	1.950	620.247	1.197	563.824	1.366	236.700	1.370
แขนขวาบน 1	441.220	1.651	438.165	2.065	382.661	2.245	132.060	1.325
แขนขวาบน 2	437.895	1.958	430.558	2.053	341.175	2.197	127.559	1.759
แขนขวาล่าง 1	559.121	1.632	552.832	1.440	466.817	1.403	120.384	2.745
แขนขวาล่าง 2	498.093	2.137	441.287	1.173	408.155	2.376	113.847	2.042

ตารางที่ 25 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุตะกั่ว (Pb) ในผ้าฝ้ายที่ใช้ในการผลิตเสื้อยืด โดยใช้ปืนพกรีวอลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL

ผ้าฝ้าย : Pb : .38	Pb : เก็บทันที (ug/L)	S.D.	Pb : 1 วัน (ug/L)	S.D.	Pb : 7 วัน (ug/L)	S.D.	Pb : 30 วัน (ug/L)	S.D.
กรดตัวอย่าง 1	6.047	0.032	7.553	0.312	5.477	0.275	6.117	0.173
กรดตัวอย่าง 2	6.778	0.018	6.495	0.147	7.484	0.066	6.959	0.162
ด้านหน้า 1	1066.981	8.195	1061.374	3.485	1013.875	5.362	334.125	3.088
ด้านหน้า 2	1042.117	8.054	1037.052	2.807	998.141	3.088	276.199	1.073
ด้านใน 1	82.394	1.911	79.066	0.481	68.073	0.458	22.641	1.076
ด้านใน 2	77.265	1.708	73.952	0.320	61.548	0.389	17.837	1.022
แขนซ้ายบน 1	845.761	2.671	840.577	5.801	823.770	10.534	269.851	3.072
แขนซ้ายบน 2	813.884	3.929	807.642	2.799	766.561	10.429	144.925	3.216
แขนซ้ายล่าง 1	3267.998	11.253	3260.835	11.205	3147.269	7.494	1943.851	4.957
แขนซ้ายล่าง 2	3070.136	9.375	3066.814	9.871	2966.840	7.053	1784.266	7.318
แขนขวาบน 1	2952.788	9.851	2946.044	7.884	2830.676	3.781	1528.342	7.538
แขนขวาบน 2	2764.083	8.325	2760.319	6.752	2625.398	3.298	1390.987	5.426
แขนขวาล่าง 1	3277.912	12.643	3269.092	9.021	3123.924	8.142	1839.764	10.409
แขนขวาล่าง 2	3084.275	10.279	3073.114	8.445	2845.881	11.927	1135.877	8.785

ตารางที่ 26 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb) ในผ้าโพลีเอสเตอร์ที่ใช้ในการผลิตเสื้อเชิ้ต โดยใช้ปืนพกรีวอลเวอร์ ขนาด.38 SPECIAL

ผ้าโพลีเอสเตอร์ : Sb : .38	Sb : เก็บทันที (ug/L)	S.D.	Sb : 1 วัน (ug/L)	S.D.	Sb : 7 วัน (ug/L)	S.D.	Sb : 30 วัน (ug/L)	S.D.
กรดตัวอย่าง 1	0.741	0.072	0.641	0.036	0.522	0.053	0.837	0.034
กรดตัวอย่าง 2	0.578	0.059	0.559	0.011	0.603	0.041	0.633	0.029
ด้านหน้า 1	94.177	1.637	90.674	1.758	77.417	1.945	22.481	0.443
ด้านหน้า 2	89.462	1.082	87.132	1.346	71.623	1.065	16.573	0.175
ด้านใน 1	4.962	0.161	4.735	0.631	3.368	0.041	1.721	0.023
ด้านใน 2	3.795	0.092	3.346	0.473	2.735	0.077	0.636	0.010
แขนซ้ายบน 1	138.460	0.406	133.742	1.362	103.395	0.869	37.836	0.196
แขนซ้ายบน 2	118.626	0.921	115.803	1.734	88.032	0.470	21.282	0.103
แขนซ้ายล่าง 1	280.119	2.077	275.373	0.989	261.189	1.153	134.703	1.109
แขนซ้ายล่าง 2	269.074	1.191	266.681	0.776	248.037	1.049	172.453	1.321
แขนขวาบน 1	107.444	0.281	101.373	1.057	78.496	0.973	19.532	0.098
แขนขวาบน 2	99.032	1.089	93.106	0.730	66.507	0.400	11.649	0.174
แขนขวาล่าง 1	258.027	0.909	251.892	0.743	215.708	1.398	112.075	0.438
แขนขวาล่าง 2	247.712	1.278	242.647	1.116	208.119	1.270	97.213	0.664

ตารางที่ 27 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแบเรียม (Ba) ในผ้าโพลีเอสเตอร์ที่ใช้ในการผลิตเสื้อเชิ้ต โดยใช้ปืนพกรีวอลเวอร์ ขนาด.38SPECIAL

ผ้าโพลีเอสเตอร์ : Ba : .38	Ba : เก็บทันที (ug/L)	S.D.	Ba : 1 วัน (ug/L)	S.D.	Ba : 7 วัน (ug/L)	S.D.	Ba : 30 วัน (ug/L)	S.D.
กรดตัวอย่าง 1	18.119	1.756	20.037	1.077	21.789	0.744	23.445	0.212
กรดตัวอย่าง 2	22.351	1.434	17.154	1.134	22.061	0.326	21.118	0.538
ด้านหน้า 1	203.449	2.235	201.675	1.734	168.041	1.029	55.018	2.278
ด้านหน้า 2	197.504	1.819	193.554	1.568	161.677	0.718	51.347	1.409
ด้านใน 1	54.407	2.143	51.041	1.272	40.022	1.199	12.871	0.337
ด้านใน 2	49.172	0.977	47.018	1.523	33.767	0.169	9.661	0.421
แขนซ้ายบน 1	299.732	1.563	296.646	1.227	278.216	1.212	126.341	0.935
แขนซ้ายบน 2	287.101	1.126	282.451	0.965	269.423	1.339	107.802	0.524
แขนซ้ายล่าง 1	736.298	3.706	731.447	3.467	698.206	3.743	257.639	2.246
แขนซ้ายล่าง 2	710.472	5.241	704.298	3.110	684.533	3.348	238.143	2.448
แขนขวาบน 1	275.292	1.345	269.150	1.278	247.569	1.079	119.013	0.986
แขนขวาบน 2	266.712	1.124	260.735	3.101	239.710	1.008	104.932	0.740
แขนขวาล่าง 1	689.005	2.234	682.348	3.585	658.411	2.504	237.995	2.481
แขนขวาล่าง 2	617.045	0.998	611.647	1.696	573.297	1.873	142.084	1.788

ตารางที่ 28 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุตะกั่ว (Pb) ในผ้าโพลีเอสเตอร์ที่ใช้ในการผลิตเสื้อเชิ้ต โดยใช้ปืนพกรีวอลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL

ผ้าโพลีเอสเตอร์ : Pb : .38	Pb : เก็บทันที (ug/L)	S.D.	Pb : 1 วัน (ug/L)	S.D.	Pb : 7 วัน (ug/L)	S.D.	Pb : 30 วัน (ug/L)	S.D.
กรดตัวอย่าง 1	7.891	0.427	7.190	0.223	5.537	0.127	6.953	0.054
กรดตัวอย่าง 2	5.361	0.159	5.440	0.324	6.545	0.144	5.149	0.012
ด้านหน้า 1	474.355	1.925	471.516	3.455	453.071	2.947	197.116	1.876
ด้านหน้า 2	507.118	2.745	504.780	2.914	479.705	3.096	237.889	1.281
ด้านใน 1	81.995	1.028	77.187	1.887	64.523	0.184	21.538	0.246
ด้านใน 2	75.116	0.803	71.007	1.592	60.064	0.611	13.991	0.330
แขนซ้ายบน 1	532.062	1.797	528.224	2.977	497.580	4.920	190.149	1.487
แขนซ้ายบน 2	497.088	1.181	494.189	4.465	476.319	3.229	178.626	1.165
แขนซ้ายล่าง 1	1903.812	8.303	1895.374	8.014	1834.066	9.505	1355.022	5.162
แขนซ้ายล่าง 2	1547.663	6.228	1540.175	5.984	1495.372	5.009	1169.041	2.473
แขนขวาบน 1	834.872	5.163	828.046	3.862	750.642	1.369	263.151	1.447
แขนขวาบน 2	816.019	4.371	811.417	2.054	733.658	2.658	220.312	3.090
แขนขวาล่าง 1	1689.585	5.204	1683.762	6.486	1621.044	3.202	1232.069	4.410
แขนขวาล่าง 2	1147.332	3.088	1141.224	3.269	1103.812	2.187	750.334	4.766

ตารางที่ 29 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb) ในผ้าชาตินที่ใช้ในการผลิตเสื้อแจ็กเก็ต โดยใช้ปืนพกวีวอลเวอร์ ขนาด.38 SPECIAL

ผ้าชาติ : Sb : .38	Sb : เก็บทันที (ug/L)	S.D.	Sb : 1 วัน (ug/L)	S.D.	Sb : 7 วัน (ug/L)	S.D.	Sb : 30 วัน (ug/L)	S.D.
กรดตัวอย่าง 1	0.611	0.016	0.592	0.017	0.724	0.044	0.647	0.023
กรดตัวอย่าง 2	0.891	0.028	0.714	0.011	0.559	0.037	0.831	0.065
ด้านหน้า 1	136.670	2.915	133.574	1.367	97.023	3.474	29.782	0.649
ด้านหน้า 2	142.097	3.758	140.282	1.350	110.579	0.164	35.960	0.722
ด้านใน 1	3.683	0.060	3.260	0.013	2.431	0.113	0.227	0.013
ด้านใน 2	4.529	0.087	4.088	0.024	3.368	0.042	1.099	0.062
แขนซ้ายบน 1	261.763	5.470	260.963	1.842	208.347	2.506	83.299	0.404
แขนซ้ายบน 2	277.548	2.911	272.116	0.967	213.668	1.923	91.031	0.867
แขนซ้ายล่าง 1	895.748	5.658	891.280	3.418	817.045	1.862	253.280	2.306
แขนซ้ายล่าง 2	920.611	8.724	917.334	4.653	866.549	1.880	272.689	2.513
แขนขวาบน 1	245.713	1.417	242.351	0.871	176.442	1.041	45.819	0.889
แขนขวาบน 2	268.886	1.199	264.549	0.560	208.189	1.392	76.155	0.625
แขนขวาล่าง 1	799.230	2.431	795.332	3.196	698.003	2.336	252.014	2.836
แขนขวาล่าง 2	813.705	4.357	809.281	2.711	742.188	2.297	297.339	3.157

ตารางที่ 30 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแบเรียม (Ba) ในผ้าชาตินที่ใช้ในการผลิตเสื้อแจ็กเก็ต โดยใช้ปืนพกวีวอลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL

ผ้าชาติน : Ba : .38	Ba : เก็บทันที (ug/L)	S.D.	Ba : 1 วัน (ug/L)	S.D.	Ba : 7 วัน (ug/L)	S.D.	Ba : 30 วัน (ug/L)	S.D.
กรดตัวอย่าง 1	24.167	0.578	25.834	0.825	18.316	0.328	24.218	0.448
กรดตัวอย่าง 2	21.989	0.461	20.559	0.347	23.447	3.080	22.092	0.371
ด้านหน้า 1	211.809	2.058	209.178	1.434	174.220	0.678	93.284	0.137
ด้านหน้า 2	202.546	3.598	197.633	1.169	168.452	0.154	62.824	0.019
ด้านใน 1	68.785	0.101	64.985	0.845	30.421	1.725	5.297	0.355
ด้านใน 2	66.459	0.369	65.486	0.623	27.304	1.342	3.669	0.092
แขนซ้ายบน 1	842.300	4.345	839.298	4.722	786.353	5.903	329.491	2.014
แขนซ้ายบน 2	865.214	4.265	860.035	4.891	702.384	3.186	237.665	2.419
แขนซ้ายล่าง 1	684.253	5.230	679.586	1.447	614.500	1.285	138.021	0.843
แขนซ้ายล่าง 2	693.042	5.757	691.454	1.372	622.807	1.019	151.435	0.667
แขนขวาบน 1	882.261	5.349	878.645	6.234	804.587	2.157	285.789	1.083
แขนขวาบน 2	893.504	7.840	887.922	6.073	815.646	1.973	303.558	1.376
แขนขวาล่าง 1	571.141	2.625	566.349	1.797	484.075	1.776	170.743	0.762
แขนขวาล่าง 2	583.772	1.876	575.934	1.438	691.324	1.583	125.693	0.453

ตารางที่ 31 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุตะกั่ว (Pb) ในผ้าซาตินที่ใช้ในการผลิตเสื้อแจ็คเก็ต โดยใช้ปืนพกวีวอลเวอร์ ขนาด .38 SPECIAL

ผ้าซาติน : Pb : .38	Pb : เก็บทันที (ug/L)	S.D.	Pb : 1 วัน (ug/L)	S.D.	Pb : 7 วัน (ug/L)	S.D.	Pb : 30 วัน (ug/L)	S.D.
กรดตัวอย่าง 1	6.157	0.127	7.536	0.052	8.225	0.109	6.311	0.115
กรดตัวอย่าง 2	5.832	0.214	5.376	0.066	9.041	0.425	8.042	0.341
ด้านหน้า 1	1034.652	4.783	1030.215	3.621	966.490	3.432	685.920	2.553
ด้านหน้า 2	1072.833	5.593	1069.082	3.009	992.103	4.452	697.414	2.948
ด้านใน 1	83.562	2.134	82.755	0.130	53.042	0.694	18.693	0.327
ด้านใน 2	78.366	1.459	73.512	0.387	47.334	0.655	11.820	0.502
แขนซ้ายบน 1	2173.526	11.027	2170.443	10.043	2097.731	9.267	1514.450	6.947
แขนซ้ายบน 2	2468.510	11.298	2464.137	11.281	2388.496	9.834	1778.092	8.874
แขนซ้ายล่าง 1	5401.618	15.084	5376.065	8.326	5304.618	12.810	3799.424	4.914
แขนซ้ายล่าง 2	5663.396	15.196	5613.004	10.642	5466.309	12.073	3101.587	4.617
แขนขวาบน 1	2094.387	9.742	2090.786	7.226	1985.344	8.309	1223.981	5.246
แขนขวาบน 2	2116.526	9.327	2112.725	7.704	2030.791	10.056	1460.337	4.293
แขนขวาล่าง 1	3002.756	9.251	2988.076	10.077	2857.603	8.729	2058.495	9.332
แขนขวาล่าง 2	3018.904	6.382	2997.512	12.550	2900.471	8.037	2217.883	9.214

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล	ร้อยตำรวจโทหญิงอัจฉราภรณ์ ประสงค์
ที่อยู่	62/9 หมู่ที่ 10 ตำบลนาซ่าว อำเภอเชียงคาน จังหวัดเลย
ที่ทำงาน	กลุ่มงานตรวจอาวุธปืนและเครื่องกระสุน กองพิสูจน์หลักฐานกลาง สำนักงานตำรวจแห่งชาติ โทรศัพท์ 0 – 2205 – 2640
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2547	ปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมี) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย
พ.ศ. 2550 – ปัจจุบัน	ศึกษาต่อระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
ประวัติการทำงาน	
พ.ศ. 2549	ผู้ช่วยนักวิจัย ฝ่ายเภสัชและผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
พ.ศ. 2549 - 2552	นักวิทยาศาสตร์ (สบ 1) กลุ่มงานตรวจอาวุธปืนและเครื่องกระสุน กองพิสูจน์หลักฐาน สำนักงานนิติวิทยาศาสตร์ตำรวจ
พ.ศ. 2552 - ปัจจุบัน	นักวิทยาศาสตร์ (สบ 1) กลุ่มงานตรวจอาวุธปืนและเครื่องกระสุน กองพิสูจน์หลักฐานกลาง สำนักงานพิสูจน์หลักฐานตำรวจ