



การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษกับวิธีห้องปฏิบัติการสำหรับตรวจหา
ปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าป่นที่มือ

โดย

ร้อยตำรวจโทหญิงนลพรรณ วิเชียรโชติ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์ แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษกับวิธีห้องปฏิบัติการ
สำหรับตรวจหาปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าป็นที่มี



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

A COMPARISON OF EFFICIENCY BETWEEN THE MICROFLUIDIC PAPER-BASED
DEVICE AND LABORATORY METHOD FOR QUANTIFICATION OF LEAD FROM
GUNSHOT RESIDUE



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Science (FORENSIC SCIENCE)
Graduate School, Silpakorn University
Academic Year 2022
Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ
กับวิธีห้องปฏิบัติการสำหรับตรวจหาปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าป็น
ที่มี

โดย ร้อยตำรวจโทหญิงนลพรรณ วิเชียรโชติ

สาขาวิชา นิติวิทยาศาสตร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รองศาสตราจารย์ พลตำรวจตรี ดร. นพรุจ ศักดิ์ศิริ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

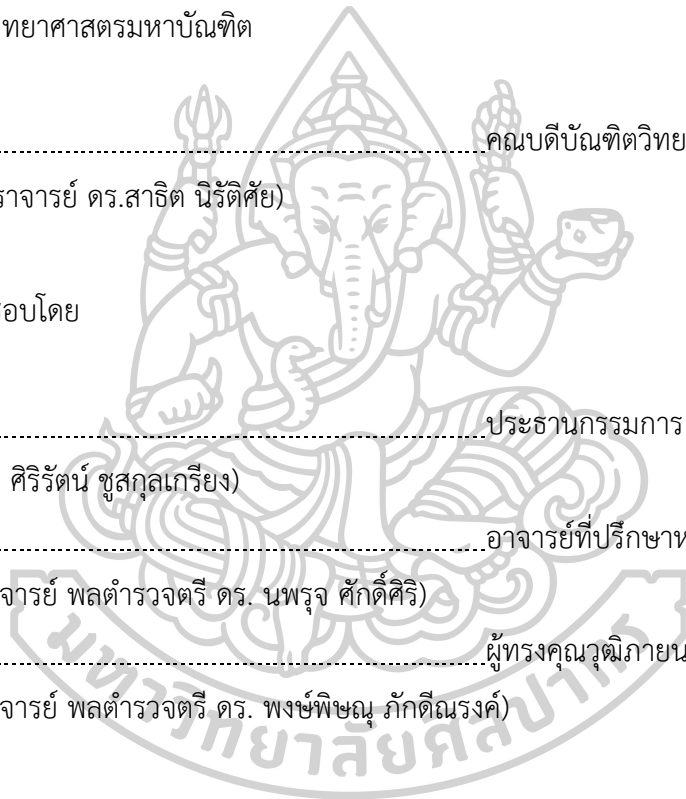
..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย (ผู้รักษาการแทน)
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาธิต นีรัตย์)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร. ศิริรัตน์ ชูสกุลเกรียง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(รองศาสตราจารย์ พลตำรวจตรี ดร. นพรุจ ศักดิ์ศิริ)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(รองศาสตราจารย์ พลตำรวจตรี ดร. พงษ์พิชญ ภัคดีณรงค์)



630720038 : นิติวิทยาศาสตร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

ร้อยตำรวจโทหญิง นลพรรณ วิเชียรโชติ: การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษกับวิธีห้องปฏิบัติการสำหรับตรวจหาปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าป็นที่มีอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ พลตำรวจตรี ดร. นพรุจ ศักดิ์ศิริ

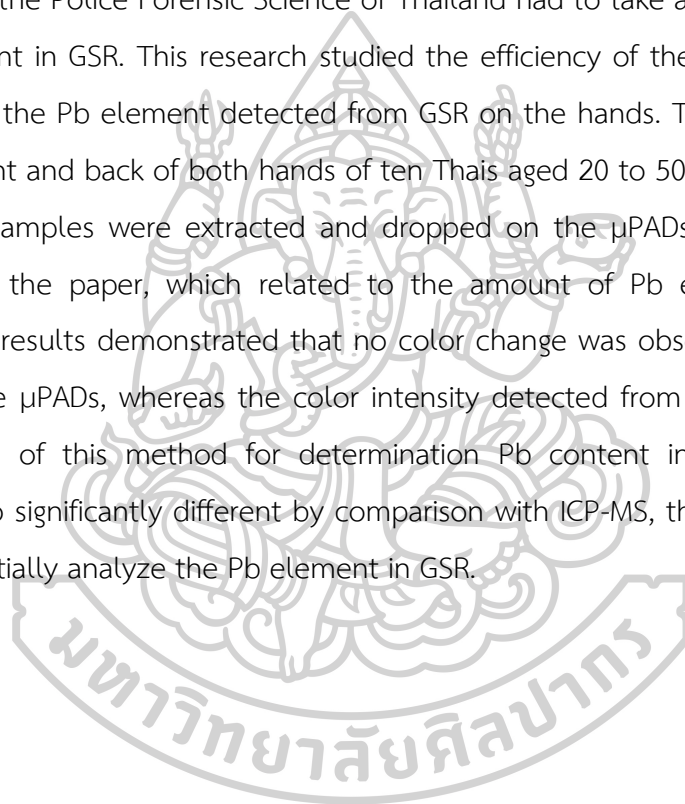
การตรวจวิเคราะห์ธาตุโลหะจากเขม่าป็นที่มีอยู่ในปัจจุบันนั้น ต้องวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการที่มีเครื่องมือขั้นสูง มีราคาแพง และตรวจวิเคราะห์โดยผู้ที่มีความชำนาญ ในหน่วยงานตรวจพิสูจน์หลักฐานยังขาดแคลนเครื่องมือและบุคลากรดังกล่าว ทำให้ขั้นตอนวิเคราะห์ต้องใช้เวลาาน งานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบการวิจัยเชิงทดลองเพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษและวิธี ICP-MS สำหรับตรวจหาปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าป็นที่มี โดยเก็บตัวอย่างเขม่าป็นที่มีบริเวณหลังมือขวา ฝ่ามือขวา หลังมือซ้าย และฝ่ามือซ้าย จากอาสาสมัคร ประชากรไทยในเขตจังหวัดกาญจนบุรี จำนวน 10 คน มีอายุระหว่าง 20-50 ปี นำสารละลายที่ได้จากการสกัดตัวอย่างหยดลงบนอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ สังเกตสีที่ปรากฏขึ้น ผลการทดลองไม่พบการปรากฏสีที่อุปกรณ์ แต่เมื่อบันทึกภาพและวัดค่าความเข้มสีโดยใช้โปรแกรม ImageJ วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของปริมาณตะกั่วจากเขม่าป็นที่มีเปรียบเทียบระหว่างวิธีอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษและวิธี ICP-MS พบว่าปริมาณตะกั่วที่วิเคราะห์ได้จากทั้งสองวิธีให้ผลไม่แตกต่างกัน แสดงว่าอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษที่ประดิษฐ์ขึ้นสามารถนำมาใช้ตรวจวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วจากเขม่าป็นที่มีได้ในเบื้องต้น



630720038 : Major (FORENSIC SCIENCE)

POLICE LIEUTENANT NONLAPHAN VICHENCHOT : A COMPARISON OF EFFICIENCY BETWEEN THE MICROFLUIDIC PAPER-BASED DEVICE AND LABORATORY METHOD FOR QUANTIFICATION OF LEAD FROM GUNSHOT RESIDUE THESIS ADVISOR : ASSOCIATE PROFESSOR POLICE MAJOR GENERAL DR. NOPARUJ SAKSIRI

Nowadays, the elemental analysis for gunshot residue (GSR) is based on many advanced instruments, a high cost, and the specialists. Due to the lack of these resources, the Police Forensic Science of Thailand had to take a long time to analyze the element in GSR. This research studied the efficiency of the μ PADs compared to ICP-MS for the Pb element detected from GSR on the hands. The GSR was swabbed on the front and back of both hands of ten Thais aged 20 to 50 in Kanchanaburi. The swabbed samples were extracted and dropped on the μ PADs to detect the color change of the paper, which related to the amount of Pb element in GSR. The presented results demonstrated that no color change was observed with the naked eye on the μ PADs, whereas the color intensity detected from image J changed. An application of this method for determination Pb content in a GSR from μ PADs showed no significantly different by comparison with ICP-MS, thus the μ PADs can be used to initially analyze the Pb element in GSR.



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ดีเนื่องด้วยความอนุเคราะห์จากผู้มีพระคุณทั้งหลายที่กรุณา
สละเวลาให้คำแนะนำและความช่วยเหลือ อุทิศทั้งร่างกายแรงใจให้เสมอมา

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ พลตำรวจตรี ดร.นพรุจ ศักดิ์ศิริ ที่พิจารณาให้เกียรติ
เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ให้แก่ศิษย์ โดยได้สละเวลาอันมีค่าของท่าน ให้คำปรึกษา คำแนะนำ
ตรวจสอบงานและแก้ไขข้อบกพร่อง ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้ง
และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. ศิริรัตน์ ชูสกุลเกรียง ประธานกรรมการ และรอง
ศาสตราจารย์ พลตำรวจตรี ดร. พงษ์พิชญ์ ภักดีณรงค์ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิที่ท่านได้เสียสละเวลามี
ส่วนช่วยสนับสนุน แนะนำ และเติมเต็มให้วิทยานิพนธ์นี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ พันตำรวจเอก ณรงค์ธรรม มาศศิริวงศ์ นักวิทยาศาสตร์ (สบ4) พิสูจน์
หลักฐานจังหวัดกาญจนบุรี ที่กรุณาอนุญาตให้ผู้วิจัยได้ใช้ห้องปฏิบัติการและเครื่องมือของหน่วยงาน
สำหรับการศึกษาวิจัย

ขอขอบคุณ พันตำรวจตรีหญิง พัชรินทร์ คำกอง นักวิทยาศาสตร์ (สบ2) กลุ่มงานตรวจอาวุธ
ปืนและเครื่องกระสุน กองพิสูจน์หลักฐานกลาง ที่สละเวลาช่วยเหลือวิเคราะห์ข้อมูล

ขอขอบคุณ พันตำรวจตรีหญิง อธิภา ศตภิษัช นักวิทยาศาสตร์ (สบ2) กลุ่มงานตรวจอาวุธ
ปืนและเครื่องกระสุน ศูนย์พิสูจน์หลักฐาน 7 ที่ให้ข้อมูลและให้คำปรึกษาเกี่ยวกับงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ พันตำรวจตรีหญิง นารีรัตน์ พลสุจริต นักวิทยาศาสตร์ (สบ 2) พิสูจน์หลักฐาน
จังหวัดกาญจนบุรี ที่ได้เป็นผู้ติดต่อประสานผู้ชำนาญด้านอาวุธปืน ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

ขอขอบคุณอาสาสมัครทุกท่าน ที่ได้เสียสละเวลา อุทิศทั้งร่างกายและแรงใจของท่านมา
ช่วยเหลือผู้วิจัย ให้การเก็บข้อมูลผ่านไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณครอบครัว และเพื่อนๆ ที่คอยส่งกำลังใจ คอยช่วยเหลือสนับสนุนใน
ทุกด้าน และขอกราบขอบพระคุณผู้ที่มีได้เอ่ยนามซึ่งมีส่วนช่วยเหลือในวิทยานิพนธ์จนประสบ
ความสำเร็จไปได้ด้วยดี

ร้อยตำรวจโทหญิง นลพรรณ วิเชียรโชติ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐานการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ.....	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 ความรู้เกี่ยวกับอาวุธปืนและเครื่องกระสุนปืน.....	7
2.2 ความรู้เกี่ยวกับอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (microfluidic paper based analytical devices, μ PADs).....	9
2.3 ความรู้เกี่ยวกับการทดสอบโซเดียมโรไดโซเนต (Sodium Rodizonate test).....	11
2.4 ความรู้เกี่ยวกับโปรแกรม Image J.....	13
2.5 ความรู้เกี่ยวกับเครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุโดยการตรวจวัดมวลของไอออนของธาตุ Inductively Couple Plasma Mass Spectrometer (ICP-MS).....	15
2.6 แนวคิดเกี่ยวกับประสิทธิภาพ.....	21

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
2.8 กรอบแนวคิดการวิจัย.....	35
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	36
3.1 การศึกษาเพื่อกำหนดกรอบแนวคิดในการวิจัย	36
3.2 การกำหนดอาสาสมัคร.....	36
3.3 การเตรียมอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	37
3.4 การทดลองและการเก็บรวบรวมข้อมูล	41
3.5 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล	46
บทที่ 4 ผลการทดลอง	47
4.1 การวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นของอาสาสมัคร.....	48
4.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุโดยการตรวจวัดมวลของไอออนของ ธาตุ Inductively Couple Plasma Mass Spectrometer (ICP-MS).....	50
4.3 การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (microfluidic paper based analytical devices, μ PADs).....	53
4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของปริมาณของตะกั่วที่ตรวจวัดได้	61
บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	68
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	69
5.2 อภิปรายผลการวิจัย	73
5.3 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย	75
รายการอ้างอิง	77
ประวัติผู้เขียน.....	81

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1	สรุปประเด็นที่ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนา μ PADs.....	33
ตารางที่ 2	สรุปประเด็นที่ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีทดสอบ โซเดียมโรไดโซเนต (Sodium Rhodizonate test)	34
ตารางที่ 3	สภาวะเครื่อง Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS).....	45
ตารางที่ 4	จำนวนและร้อยละของอาสาสมัคร	48
ตารางที่ 5	ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ค่าต่ำสุด (min) ค่าสูงสุด (max) ของอาสาสมัคร	49
ตารางที่ 6	แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของตะกั่ว Pb (ppm) ด้วยวิธี ICP-MS	50
ตารางที่ 7	ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ค่าต่ำสุด (Min) และค่าสูงสุด (Max) ของปริมาณธาตุตะกั่วจากเขม่าป็นที่มีมือ Pb (ppm) จากอาสาสมัคร จำนวน 10 ราย ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี ICP-MS ..	52
ตารางที่ 8	ค่าความเข้มสี RGB ที่บริเวณตรวจวัด วัดโดยใช้โปรแกรม ImageJ	56
ตารางที่ 9	ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ค่าต่ำสุด (Min) และค่าสูงสุด (Max) ของปริมาณธาตุตะกั่วจากเขม่าป็นที่มีมือ Pb (ppb) จากอาสาสมัคร จำนวน 10 ราย ที่วิเคราะห์โดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ.....	58
ตารางที่ 10	ผลการวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วด้วยวิธีอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ.....	60
ตารางที่ 11	ผลการวิเคราะห์ปริมาณตะกั่ว (ppm) เปรียบเทียบระหว่างวิธี ICP-MS และวิธีอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (μ PADs).....	62
ตารางที่ 12	การวิเคราะห์การแจกแจงของข้อมูล โดยคิดค่านวนค่าสถิติแบบ Kolmogorov – Smirnov Test.....	63
ตารางที่ 13	การวิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูล โดยใช้ Wilcoxon Test.....	64
ตารางที่ 14	ผลการวิเคราะห์ปริมาณตะกั่ว (ppm) เปรียบเทียบระหว่างวิธี ICP-MS และวิธีแบบกระดาษ (พิจารณาเฉพาะค่าบวก).....	64
ตารางที่ 15	การวิเคราะห์การแจกแจงของข้อมูล โดยคิดค่านวนค่าสถิติแบบ Kolmogorov – Smirnov Test.....	66

ตารางที่ 16 การวิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูล โดยใช้ Wilcoxon Test..... 67



สารบัญภาพ

ภาพที่ 1 อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษสำหรับการตรวจวัดกัลลูโคส	9
ภาพที่ 2 โซเดียม โรโดโซเนต (Sodium Rhodizonate).....	11
ภาพที่ 3 ปฏิกิริยาการทดสอบด้วยโซเดียม โรโดโซเนต (Sodium Rhodizonate) กับตะกั่ว (Pb ²⁺)	12
ภาพที่ 4 ตำแหน่งร่องรอยลูกกระสุนปืนที่สงสัยบริเวณประตูรถยนต์.....	13
ภาพที่ 5 แลปเครื่องมือของโปรแกรม ImageJ.....	14
ภาพที่ 6 คำอธิบายของเครื่องมือของโปรแกรม ImageJ ที่มีอยู่ในแลปเครื่องมือเพื่อแก้ไขภาพ	15
ภาพที่ 7 เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุโดยการตรวจวัดมวลของไอออนของธาตุ.....	16
ภาพที่ 8 กระบวนการของการวิเคราะห์ด้วย ICP-MS.....	17
ภาพที่ 9 แมสสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ด้วย ICP-MS ของยูเรเนียม (U) และ ทอเรียม (Th).....	19
ภาพที่ 10 กรอบแนวคิดการวิจัย	35
ภาพที่ 11 อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษรูปแบบที่ 1	39
ภาพที่ 12 อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษรูปแบบที่ 2	39
ภาพที่ 13 อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษรูปแบบที่ 3	40
ภาพที่ 14 รูปแบบอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ ที่ออกแบบด้วยโปรแกรมไมโครซอฟท์.....	40
ภาพที่ 15 วิธีประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ.....	41
ภาพที่ 16 ภาพแสดงท่าทางการยิงปืนของอาสาสมัคร.....	42
ภาพที่ 17 อุปกรณ์เก็บเขม่าปืนที่มีมือ.....	42
ภาพที่ 18 แสดงการเก็บตัวอย่างเขม่าปืนที่มีมือ 4 ตำแหน่ง	43
ภาพที่ 19 ห้องถ่ายภาพวัตถุพยาน (Evidence Photography room).....	44
ภาพที่ 20 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยปริมาณธาตุตะกั่วจากเขม่าปืนที่มีมือ Pb (ppm) ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี ICP-MS	53

ภาพที่ 21 ภาพถ่ายแสดงการศึกษาการเคลื่อนที่ของสารละลายบนอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษที่
 ประดิษฐ์ขึ้น..... 54

ภาพที่ 22 ภาพถ่ายแสดงการปรากฏขึ้นของสีชมพูบนอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษที่ประดิษฐ์ขึ้น
 เมื่อหยดสารละลายมาตรฐานที่มีความเข้มข้นต่างกันคือ 0.5 – 10 ppm บันทึกภาพที่เวลา 50 นาทีผ่าน
 ไป..... 55

ภาพที่ 23 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกั่ว (ppm) กับค่าความเข้มสี..... 57

ภาพที่ 24 ภาพถ่ายอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ เมื่อหยดสารละลายตัวอย่าง 58

ภาพที่ 25 กราฟเปรียบเทียบปริมาณตะกั่วที่ตรวจวัดได้ ระหว่างวิธี ICP-MS และ วิธี μ PADs 65



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องด้วยตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาในเหตุการณ์คดีอาชญากรรมที่มีความเกี่ยวข้องกับอาวุธปืนในประเทศไทยนั้นมีจำนวนที่สูงมาก ซึ่งจากสถิติคดีอาญา คดีความผิดที่รัฐเป็นผู้เสียหาย จำแนกตาม ประเภทความผิด พ.ศ.2560-2562 พบว่าทั่วราชอาณาจักรมีคดีประเภทความผิดที่มีความเกี่ยวข้องกับอาวุธปืน 20,000-30,000 คดี/ปี (มนตรี ดอนฟุ้งไพร, 2564) โดยสถิติผลการปฏิบัติงานของงานตรวจอาวุธปืนและเครื่องกระสุน หน่วยงานในสังกัด สำนักงานพิสูจน์หลักฐาน ตำรวจ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2563 (เดือน ตุลาคม 2562- กันยายน 2563) พบว่า มีงานตรวจอาวุธปืนและเครื่องกระสุน จำนวน 39,194 เรื่อง แยกเป็นประเด็นการตรวจเขม่าปืนที่มีมือ มีจำนวน 964 คดี (สำนักงานตำรวจแห่งชาติ, 2563)

ชนิดเขม่าปืนที่ได้รับการยอมรับและสามารถใช้เป็นหลักฐานประกอบในการดำเนินคดีทั้งในประเทศและระดับสากล คือเขม่าปืนที่เกิดจากการเผาไหม้ในส่วนของชนวนท้ายกระสุนปืน (primer mixture) โดยการตรวจวิเคราะห์ธาตุโลหะที่เป็นส่วนประกอบของชนวนท้ายกระสุนปืนจะพบธาตุตะกั่ว (Pb) แอนติโมนี (Sb) และ แบเรียม (Ba) เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดทุกครั้งที่มีการยิงปืน ซึ่งหากตรวจพบธาตุเหล่านี้จะสามารถยืนยันได้ว่าเป็นเขม่าปืน จึงได้รับการยอมรับและใช้เป็นหลักฐานที่สำคัญในการสืบสวน เกี่ยวกับ คดีอาวุธปืน (Meng & Lee, 2007) ในการตรวจพิสูจน์หาผู้ต้องสงสัยนั้นจะทำการวิเคราะห์ธาตุโลหะดังกล่าวนี้เพื่อใช้ในการพิสูจน์และระบุตัวอาชญากรหรือผู้บริสุทธิ์ได้

ธนงศักดิ์ บุญมาก (2564) กล่าวถึงการตรวจวิเคราะห์ธาตุโลหะจากเขม่าปืนที่มีมือของสำนักงานพิสูจน์หลักฐานตำรวจ ในปัจจุบันใช้เทคนิค Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry (ICP - MS) ที่สามารถควบคุมสิ่งรบกวนที่เกิดจากวิธีการสกัด มีสภาพไวในการวิเคราะห์สูง ช่วงความเข้มข้นของการสร้าง Calibration Curve กว้าง ใช้เวลาในการวิเคราะห์สั้นและมีความเที่ยงตรงและความแม่นยำสูง (Koons, 1998) หรือ เทคนิค Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) ที่ทำการวัดโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานน้อย (อรอนงค์ แก้วบุตร, 2557)

เทคนิคการตรวจวิเคราะห์ดังกล่าวข้างต้น ต้องใช้เครื่องมือวิเคราะห์ที่มีราคาแพง เมื่อติดตั้งแล้วเคลื่อนย้ายได้ยาก บุคลากรต้องมีความชำนาญและทักษะเฉพาะในการใช้เครื่องมือ จึงได้มีแนวคิดในการพัฒนาการตรวจวิเคราะห์บนกระดาษเพื่อคัดกรองเบื้องต้น ช่วยลดต้นทุนและระยะเวลาในการตรวจวัด อีกทั้งอุปกรณ์ที่ทำจากกระดาษยังมีราคาถูก ใช้สารเคมีปริมาณน้อย ให้ผลวิเคราะห์ที่รวดเร็ว อุปกรณ์มีขนาดเล็กน้ำหนักเบา สามารถพกพาไปทดสอบในภาคสนามได้ โดยสะดวก (Nishat et al., 2021)

Andres W. Martinez et al. (2007) ได้พัฒนาอุปกรณ์วิเคราะห์ของไหลจุลภาคฐานกระดาษ (microfluidic paper based analytical devices, μ PADs) หรือห้องปฏิบัติการบนกระดาษ (lab-on-paper) ซึ่งจุดเด่นของ μ PADs คือสร้างจากกระดาษซึ่งเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ราคาถูก เคลื่อนย้ายสะดวก และง่ายต่อการจัดเก็บและทำลายทิ้ง และมีงานวิจัยมากมายที่ศึกษาเกี่ยวกับเรื่องดังกล่าว จากงานวิจัยที่มีการศึกษาเรื่องการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ของไหลจุลภาคฐานกระดาษ (microfluidic paper based analytical devices, μ PADs) สำหรับตรวจวิเคราะห์ไนโตรเจนในเนื้อสัตว์ การวิเคราะห์โดยรวมสามารถทำได้ภายใน 15 นาที วิธีการที่ใช้ μ PADs นี้มีศักยภาพในการใช้งานเพื่อคัดกรองความเข้มข้นของไนโตรเจนของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์และรับรองความปลอดภัยของอาหารและสุขภาพของผู้บริโภค (Trofimchuk et al., 2020) จากงานวิจัยการแยกของโปรตีนและการตรวจหาสารตะกั่วในปัสสาวะโดยตรง โดยพัฒนา μ PADs สำหรับการแยกแบบออนไลน์ของโปรตีนและการตรวจวิเคราะห์ไฟฟ้าเคมีของตะกั่วไอออน ($Pb(II)$) ในตัวอย่างปัสสาวะ รูปแบบของกระดาษกรองถูกจัดทำโดยการพิมพ์รูปแบบไมโครแชนเนลโดยตรงบนกระดาษกรองโดยใช้เครื่องพิมพ์เลเซอร์ ประสิทธิภาพของอุปกรณ์นี้แสดงให้เห็นผ่านการหาปริมาณของตะกั่ว $Pb(II)$ ในตัวอย่างปัสสาวะและสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วย atomic absorption spectrometry (AAS) (Wang et al., 2021) และจากงานวิจัยที่มีการพัฒนา μ PADs รูปแบบใหม่สำหรับแยกเลือดครบส่วนและตรวจวัดด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า โดยอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นออกแบบเป็นรูปดัมเบล ให้มีส่วนสำหรับแยกเลือด 2 ส่วนและส่วนสำหรับการตรวจวัด 1 ส่วน โดยส่วนสำหรับการตรวจวัดเชื่อมต่อกับขั้วไฟฟ้าพิมพ์ลายที่มี Prussian blue เป็นสารตัวกลางในการถ่ายถอดอิเล็กตรอน เมื่อเปรียบเทียบผลการตรวจวิเคราะห์กลูโคสจากเลือดครบส่วนด้วยวิธีของไหลจุลภาคฐานกระดาษที่ใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้าในงานวิจัยนี้กับวิธีทั่วไปในห้องปฏิบัติการทางการแพทย์ พบว่าทั้งสองวิธีไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (จุฬาลักษณ์ น้อยพวง, 2555) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่พัฒนาอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดสำหรับตรวจวัดไนเตรท และไนโตรเจนในเขม่าดินปืน โดยประดิษฐ์ μ PADs เพื่อใช้ตรวจหาปริมาณไนเตรทและไนเตรทในตัวอย่างเขม่าปืน โดยการพิมพ์สกรีนบนกระดาษด้วยขี้ผึ้ง และตรวจวิเคราะห์ไนเตรทด้วยปฏิกิริยาการเกิดสีกับรีเอเจนท์ Griess ในการวัดปริมาณไนเตรทและไนเตรท

ด้วยอุปกรณ์นี้ ผู้วิจัยวัดค่าความเข้มของสีที่ปรากฏขึ้นบนอุปกรณ์โดยใช้โปรแกรม imageJ อ่านค่าสี RGB ของภาพอุปกรณ์ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณไนโตรเจนและไนเตรทในเขม่าป็นที่วัดได้ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษกับที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคไอออนโครมาโตกราฟี พบว่าข้อมูลมีความสัมพันธ์กันเป็นอย่างดี อุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษที่พัฒนาในงานวิจัยนี้เป็นวิธีวิเคราะห์เขม่าป็นที่สะดวก มีค่าใช้จ่ายต่ำ และอาจนำไปใช้ในงานตรวจวัดเขม่าป็นในภาคสนาม (รุ่ง คำปู้, 2562) อย่างไรก็ตาม μ PADs ที่สามารถตรวจวิเคราะห์ตะกั่วจากเขม่าป็นที่มีอยู่ไม่เคยมีรายงานมาก่อน

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์แบบกระดาษ สำหรับนำมาใช้ในการตรวจหาปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าป็นที่มีอยู่ โดยอาศัยหลักการทางเคมี ติดตามความเปลี่ยนแปลงของความเข้มสีที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างโซเดียมโรไดโซเนตกับตะกั่ว และนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับวิธี ICP-MS เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการตรวจวิเคราะห์เบื้องต้นทั้งในห้องปฏิบัติการและงานภาคสนาม โดยให้ผลการทดสอบที่รวดเร็วถูกต้องและประหยัดค่าใช้จ่าย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษและวิธี ICP-MS สำหรับตรวจหาปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าป็นที่มีอยู่

1.3 สมมติฐานการวิจัย

ปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าป็นที่มีอยู่ที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษและวิธี ICP-MS มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ขอบเขตด้านวิธีวิจัย

การศึกษาครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experiment Study) มีแบบแผนการทดลองแบบ One – Group Pretest – Posttest Design โดยไม่มีการสุ่มตัวอย่างเข้ากลุ่มทดลอง ทำการวัดผลการทดลองก่อนและหลังการทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่า

1.4.2 ขอบเขตด้านอาสาสมัคร

อาสาสมัคร คือ ประชากรไทยในเขตจังหวัดกาญจนบุรี จำนวน 10 คน ที่มีอายุระหว่าง 20-50 ปี มีสภาพร่างกายและจิตใจพร้อมสำหรับการยิงปืน ทั้งที่มีพื้นฐานการยิงปืน และไม่มีพื้นฐาน ไม่ใช่บุคคลที่เคยสูญเสียอวัยวะ ได้แก่ แขน หรือ มือทั้งสองข้าง เนื่องจากอาจส่งผลต่อการเก็บตัวอย่างเขม่าปืนที่มีมือได้

1.4.3 ขอบเขตด้านตัวแปร

ตัวแปรอิสระ ได้แก่ วิธีการตรวจวิเคราะห์ ตำแหน่งที่เก็บเขม่าปืนที่มีมือ

ตัวแปรตาม ได้แก่ ปริมาณตะกั่วที่ตรวจวัดได้ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร วิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างวิธีตรวจวัดแบบกระดาษกับวิธี ICP-MS

ตัวแปรควบคุม ได้แก่

- 1) ประเภทอาวุธปืน กำหนดให้ใช้อาวุธปืนชนิดกึ่งอัตโนมัติ ยี่ห้อ BARETTA ขนาด 9 มม.
- 2) กระสุนปืน ยี่ห้อ BULLET ขนาด 9 มม.
- 3) สถานที่ที่ใช้เก็บเขม่าปืน ทำการเก็บเขม่า ณ สนามยิงปืนรัตนวรุศ ค่ายสุรสีห์ จังหวัดกาญจนบุรี

1.4.4 ขอบเขตด้านระยะเวลา

ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างเขม่าปืนที่มีมือ ตั้งแต่เดือน ธันวาคม 2564 – กุมภาพันธ์ 2565 เป็นระยะเวลา 3 เดือน

1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ

อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (microfluidic paper based analytical devices, μ PADs) หมายถึง อุปกรณ์การตรวจวัดที่สร้างขึ้นด้วยกระดาษ ประกอบด้วย 2 ส่วน คือส่วนกั้นที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) และบริเวณกระดาษมีคุณสมบัติชอบน้ำ เป็นบริเวณที่ทำปฏิกิริยาและบริเวณตรวจวัด

วิธีห้องปฏิบัติการ ในงานวิจัยนี้หมายถึงวิธี Inductively Couple Plasma Mass Spectrometer (ICP-MS) เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์หาปริมาณธาตุจากเขม่าปืนที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ

เขม่าปืน (Gunshot residues, GSRs) หมายถึง อนุภาคขนาดเล็กที่ปลดปล่อยออกมาจากการยิงปืน ซึ่งเขม่าปืนเกิดจากการเผาไหม้ของสสารมาจาก 3 ส่วน คือ 1) การระเบิดของแก๊ปปืน (Primer) 2) การเผาไหม้ของดินขับกระสุนปืน (Propellant) และ 3) มาจากส่วนอื่น ๆ เช่น ส่วนของดินปืนที่ยังไม่เผาไหม้หรือเผาไหม้ไม่หมด (Unburned particles) เมื่อเกิดการยิงปืนแก๊ปปืนจะระเบิดซึ่งจะเป็นตัวจุดชนวนให้ดินขับกระสุนปืนเกิดการเผาไหม้ ซึ่งในขั้นตอนการจุดชนวน (การระเบิดของแก๊ปปืน) จะทำให้ธาตุสำคัญที่มีในแก๊ปปืน คือ แอนติโมนี (Sb) แบเรียม (Ba) และตะกั่ว (Pb) ระเหิดกลายเป็นไอหรือควัน

Sodium rhodizonate test หมายถึง เทคนิคการตรวจสอบตะกั่วโดยใช้ Sodium rhodizonate ทำปฏิกิริยาเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของ Lead Sodium rhodizonate ที่มีสีชมพูอมม่วง

ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษกับวิธี ICP-MS หมายถึง ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าปืนที่มีอยู่ โดยวิเคราะห์จากองค์ประกอบต่างๆ ดังนี้ 1) ปริมาณของตะกั่วที่ตรวจวัดได้ และ 2) ความประหยัด (Economy)

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้ จะก่อให้เกิดประโยชน์ทั้งในเชิงวิชาการและการประยุกต์ใช้ในทางนิติวิทยาศาสตร์ดังนี้

1.6.1 ประโยชน์ในด้านวิชาการ

1) ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับวิธีการตรวจหาตะกั่วในเขม่าป่น ทบทวนวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง บทความและวารสารทางวิชาการต่าง ๆ ซึ่งพบว่าอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์แบบกระดาษ นำไปใช้วิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ และมีหลายเทคนิคด้วยกัน โดยวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือ การวัดสี (Color detection)

2) นำองค์ความรู้ที่ได้จากการวิจัยไปอ้างอิงต่อยอดวิจัยครั้งต่อไปเพื่อเป็นแนวทางให้เจ้าหน้าที่ตรวจพิสูจน์หลักฐานทั้งในห้องปฏิบัติการและงานตรวจสถานที่เกิดเหตุใช้ในการตรวจหาสารตะกั่วจากเขม่าป่น

1.6.2 ประโยชน์ด้านการประยุกต์ใช้

1) สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางให้แก่เจ้าหน้าที่ผู้ตรวจพิสูจน์กรณีที่ต้องการวินิจฉัยเบื้องต้นเพื่อหาปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าป่นที่มีอยู่

2) สามารถใช้เป็นแนวคิดเพื่อจัดทำชุดสอบเพื่อใช้ในห้องปฏิบัติการให้แก่เจ้าหน้าที่ตรวจพิสูจน์อาวุธปืนและเครื่องกระสุน เพื่อนำไปพัฒนาหรือนำไปใช้ให้เหมาะสมกับหน่วยงานนั้น



บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การดำเนินงานในบทนี้ เป็นการประมวลและสังเคราะห์ แนวคิด ทฤษฎีที่สำคัญของนักวิชาการ รวมทั้งงานวิจัยต่างๆ เพื่อเป็นพื้นฐานในการสร้างความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการวิจัยและเป็นประโยชน์ ในการกำหนดกรอบแนวคิดเบื้องต้นของการวิจัย ซึ่งแบ่งการนำเสนอเป็น 4 หัวข้อ โดยผู้วิจัยได้สรุปสาระครอบคลุมประเด็นการศึกษา ดังนี้

2.1 ความรู้เกี่ยวกับอาวุธปืนและเครื่องกระสุนปืน

2.2 ความรู้เกี่ยวกับอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (microfluidic paper based analytical devices, μ PADs)

2.3 ความรู้เกี่ยวกับการทดสอบโซเดียม โรดโซเนต (Sodium Rodizonate test)

2.4 ความรู้เกี่ยวกับโปรแกรม Image J

2.5 ความรู้เกี่ยวกับเครื่องวิเคราะห์หาปริมาณไอออน (Ion Chromatography; IC)

2.6 แนวคิดเกี่ยวกับประสิทธิภาพ

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8 กรอบแนวคิดในการวิจัย

2.1 ความรู้เกี่ยวกับอาวุธปืนและเครื่องกระสุนปืน

2.1.1 ความหมายของเขม่าดินปืน (Gunshot residue; GSR)

Gunshot Residue (GSR) คือเขม่าดินปืน หรือ สิ่งที่หลงเหลือจากการยิงปืน ซึ่งก็หมายถึงสิ่งใดๆ รูปแบบหรือส่วนประกอบทั้งหมด ที่พุ่งกระจาย ระเบิดออกมาจากการยิงของอาวุธปืนซึ่งเมื่อเกิดการยิงปืน GSR จะอยู่ในรูปต่างๆ ดังนี้

-อนุภาคของดินปืนที่ถูกเผาไหม้ (Burned Particles)

-อนุภาคของดินปืนที่ถูกเผาไหม้บางส่วน (Partial or semi-burned Particles)

-อนุภาคของดินปืนที่ไม่ถูกเผาไหม้ (Unburned Particles)

-ไอของตะกั่ว และโลหะอื่น (Vapor of Lead and other metal)

GSR Particle มาจากสารประกอบ (Priming Mixture) ในชนวนท้ายกระสุนปืน (Primer Cap) หรือ แก๊ปปืน (Primer) และดินปืน

2.1.2 ประเภทของเขม่าเมื่อแบ่งจากคุณสมบัติทางเคมี มีอยู่ด้วยกัน 2 ลักษณะ

2.1.2.1 ส่วนที่เป็นสารประกอบประเภทอนินทรีย์มาจากการเผาไหม้หรือการระเบิดของ Primer Cap หรือ Priming Mixing เรียกว่า “เขม่าปืน” โดยทำการตรวจหาปริมาณของธาตุแอนติโมนี (Sb) แบเรียม (Ba) และตะกั่ว (Pb) ด้วยเทคนิค Atomic Absorption Spectrometry (AAS) และ/หรือ Inductively Coupled Plasma Mass Spectroscopy (ICP-MS) หรือ Scanning Electron Microscope Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM-EDX)

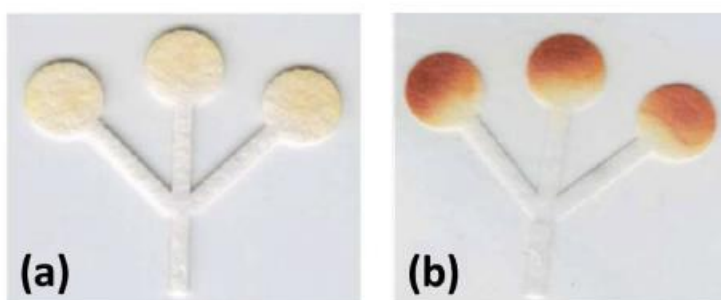
2.1.2.2 ส่วนที่เป็นสารประกอบอินทรีย์มาจากการเผาไหม้ของดินส่กระสุนปืน (Gun Powder) เรียกว่า เขม่าดินปืน โดยจะทำการตรวจหาไอออนของไนโตรทและไนเตรท โดยเทคนิค Modified Griess Test หรือ ด้วยเทคนิค Ion Chromatography (IC)

2.1.3 การเกิดเขม่า ดินส่กระสุนปืนเมื่อถูกเผาไหม้ในพื้นที่ที่จำกัดจะทำให้เกิดแรงดันและความร้อน มหาศาลโดยเมื่อเกิดการยิงปืน เข้มแทงชนวนจะตีไปยังชนวนท้ายกระสุนปืน (Primer cap) ทำให้ชนวนท้ายกระสุนปืนเกิดการระเบิด เป็นผลให้อุณหภูมิจากสิ่งแวดล้อมกลายเป็น 1,500 – 2,000 °C และความดัน จะเปลี่ยนจาก 14 psi เป็น 1,400 psi จากนั้นเกิดประกายไฟผ่านช่อง Flash-hole ไปจุด ติดกับดินส่กระสุนปืนทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างรวดเร็วภายในปลอกกระสุนปืน ทำให้เกิดแรงดันมหาศาลผลักดันให้ลูกกระสุนปืนหลุดออกไปจากปลอกกระสุนปืน โดยในการระเบิดของแก๊ปปืน นี้จะทำให้อุณหภูมิจากสิ่งแวดล้อมเพิ่มสูงขึ้นเป็น 3,600 °C และความดันสูงถึง 40,000 psi จากการ เปลี่ยนแปลงของอุณหภูมินี้เองเป็นผลให้โลหะที่เป็นสารประกอบของแก๊ปปืนหลอมละลาย กลายเป็นไอ และเมื่ออุณหภูมิลดลง ไอของแต่ละธาตุจะแข็งตัวเป็นอนุภาคอีกครั้ง (dosem24hr, 2560)

2.1.4 ลูกกระสุนปืน (Bullet) ที่ใช้บรรจุกระสุนปืนในปัจจุบันมีหลายชนิดหลายขนาดขึ้นกับชนิดของอาวุธปืน และวัตถุประสงค์ของการใช้งานโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือลูกกระสุนปืนชนิดตะกั่ว (Lead Bullet) และลูกกระสุนปืนชนิดหุ้มเปลือกแข็ง (Jacketed Bullet) ลูกกระสุนปืนชนิดตะกั่ว (Lead Bullet) เป็นลูกกระสุนที่ส่วนใหญ่ทำจากตะกั่ว ซึ่งมีราคาถูก และทนความร้อน ลูกกระสุนปืนชนิดหุ้มเปลือกแข็ง (Jacketed Bullet) ปัจจุบันทำด้วยทองแดง 90 % ดีบุก 5 % และสังกะสี 5 % บางชนิดทำด้วยเหล็กชุบนิเกิล หรือชุบทองแดง

2.2 ความรู้เกี่ยวกับอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (microfluidic paper based analytical devices, μ PADs)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดรูปแบบใหม่ที่กำลังได้รับความนิยม ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ทางการแพทย์หรือวิทยาศาสตร์สุขภาพ ตัวอย่างดังภาพที่ 1 ใช้เพื่อประกอบการวินิจฉัยโรคในตัวอย่าง เซรัม เลือด ปัสสาวะ เป็นต้น รวมถึงการควบคุมคุณภาพอาหารและการตรวจวัดทางสิ่งแวดล้อมเช่น โลหะหนักในน้ำ สำหรับข้อดีของอุปกรณ์นี้คือ สามารถผลิตได้ง่าย ต้นทุนในการผลิตต่ำเนื่องจากวัสดุที่ใช้เป็นกระดาษ ซึ่งเป็นวัสดุที่ซื้อได้ง่าย พบได้ในชีวิตประจำวัน นอกจากนี้ยังพกพาสะดวกและสามารถทิ้งได้ทันทีหลังจากทำการตรวจวัด โดยคุณสมบัติของกระดาษประกอบด้วยเส้นใยเซลลูโลสที่สามารถดูดซับน้ำ (Hydrophilic) ได้ดี อีกทั้งยังสามารถปรับเปลี่ยนพื้นผิวของกระดาษให้ได้ตามที่ต้องการใช้งานอีกด้วย ซึ่งกระดาษที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดก็มีความหลากหลาย



ภาพที่ 1 อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษสำหรับการตรวจวัดกลูโคส

(a) ความเข้มข้นต่ำสุด (b) ความเข้มข้นสูงสุด

หมายเหตุ. จาก : “Technical aspects and challenges of colorimetric detection with microfluidic paper-based analytical devices (μ PADs) - A review,” by Morbioli et al., 2017, *Analytica Chimica Acta*, (970).

โดยเทคนิคที่ใช้ในการเตรียมอุปกรณ์การวิเคราะห์บนกระดาษด้วยระบบของไหลจุลภาค มีด้วยกัน 10 เทคนิค ได้แก่

- 1) การพิมพ์ด้วยแสง
- 2) การพิมพ์ด้วยเครื่องพล็อตเตอร์
- 3) การสลักด้วยการฉีดยาหมึก
- 4) การปรับสภาพด้วยพลาสมา
- 5) การตัดกระดาษ
- 6) การพิมพ์ด้วยซีพิ้ง
- 7) การพิมพ์ด้วยน้ำหมึกฉีด
- 8) การพิมพ์แบบยืดหยุ่น
- 9) การพิมพ์สกรีน
- 10) การปรับสภาพด้วยเลเซอร์

ซึ่งหลักการพื้นฐานของการสร้างช่องไหลจุลภาคบนกระดาษประกอบด้วยสองส่วน คือ ส่วนที่ชอบน้ำ และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ โดยจะสร้างขนาดช่องในระดับไมครอนบนกระดาษ (ปวีณา เตือนฉาย & วิจิตรา เตือนฉาย, 2557) ความแตกต่างของเทคนิคต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างช่องไหลจุลภาค ยกเว้นเทคนิคการตัดกระดาษ เพราะไม่สามารถเชื่อมถือได้ในการแบ่งส่วนชอบน้ำ

โดยการเลือกใช้เทคนิคในการสร้างอุปกรณ์การวิเคราะห์แบบกระดาษต้องพิจารณาจากหลายๆปัจจัย เช่นความพร้อมของอุปกรณ์ ราคาของวัสดุ กระบวนการผลิต และการประยุกต์ของอุปกรณ์การวิเคราะห์บนกระดาษในระบบของไหลจุลภาค ซึ่งพบว่าการสร้างอุปกรณ์กระดาษด้วยวิธีการพิมพ์ด้วยน้ำ หมึกฉีด และการพิมพ์ด้วยซีพิ้ง เป็นเทคนิคที่มีราคาถูก ง่าย และใช้เวลาในการผลิตน้อย จึงเป็นวิธีที่ค่อนข้างได้รับความนิยมสูงในปัจจุบัน

อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษก็ยังมีข้อจำกัดอยู่หลายด้าน ไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติของกระดาษ วิธีที่ใช้การสร้างอุปกรณ์ตรวจวัด หรือ วิธีตรวจวัดที่ใช้ร่วมกับอุปกรณ์แบบกระดาษ รวมทั้งข้อจำกัดต่อไปนี้

1. การรักษาสภาพตัวอย่างภายในช่องไหล เนื่องจากกระดาษที่สารกำลังไหลภายในช่องไหล สารตัวอย่างมีโอกาสที่จะระเหยได้ ทำให้ปริมาณของสารตัวอย่างที่ไหลถึงบริเวณตรวจวัด มีค่าน้อยกว่าปริมาณตอนที่หยดตอนเริ่มต้นซึ่งอาจจะมีค่าน้อยกว่า 50% ของปริมาณเริ่มต้น จึงทำให้อุปกรณ์กระดาษไม่เหมาะสำหรับการวิเคราะห์สารที่มีปริมาณน้อยหรือสารที่มีราคาแพง

2. สารที่นำมาใช้เป็นกำแพงไฮโดรฟอบิก เนื่องจากกำแพงของช่องไหลที่นิยมใช้บนอุปกรณ์กระดาษที่ทำหน้าที่เป็นไฮโดรฟิลิก คือซีฟี่ง และ Alkylketene Dimer โดยปกติกำแพงเหล่านี้จะไม่ยอมให้สารซึมผ่านหรือรั่วออกจากช่องไหลได้ แต่กรณีที่สารตัวอย่างมีความตึงผิวที่ต่ำจะทำให้กำแพงที่สร้างจากซีฟี่ง และ Alkylketene Dimer ไม่สามารถต้านได้จึงทำให้สารเกิดการรั่วออกจากช่องไหลไม่ไหลไปตามช่องไหลที่ออกแบบไว้

3. ขีดจำกัดในการตรวจวัด (LOD) ค่อนข้างสูง สำหรับการเทียบสีด้วยตาเปล่า จึงทำให้ไม่สามารถทำการวิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีความเข้มข้นต่ำๆได้ จึงยากที่จะวิเคราะห์โดยอาศัยการดูดสีหรือการเปลี่ยนแปลงสีด้วยอุปกรณ์บนกระดาษ

2.3 ความรู้เกี่ยวกับการทดสอบโซเดียมโรไดโซเนต (Sodium Rodizonate test)

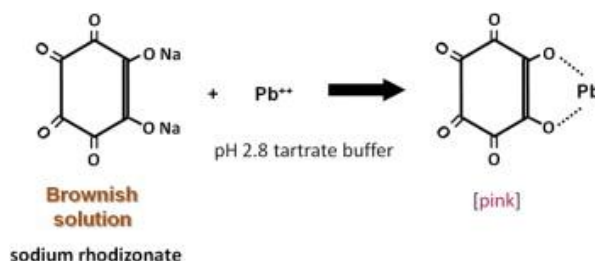
2.3.1 โซเดียม โรไดโซเนต (Sodium Rhodizonate) มีลักษณะทางกายภาพเป็นของแข็งสีดำ-เขียว ดังภาพที่ 2 เมื่อละลายน้ำให้สีส้มเหลือง ขึ้นอยู่กับความเข้มข้น และมีความเสถียรเป็นเวลา 2-3 วันเท่านั้น แม้เก็บรักษาในตู้เย็น ปฏิกริยาระหว่าง Rhodizonic acid และ Pb^{++} ถูกใช้ทดสอบเฉพาะจุด Rhodizonic acid เกิดสีต่างๆกับโลหะหนักหลายชนิด ได้แก่ สตรอนเทียม ตะกั่ว และแบเรียม แต่ที่สภาวะกรด โลหะเชิงซ้อนส่วนมาก และโซเดียมโรไดโซเนตจะกลายเป็นไม่มีสีทันที ดังนั้นปฏิกริยานี้จึงมีความจำเพาะสำหรับตะกั่วที่ค่า pH ต่ำกว่า 2.8 (Fritz Feigl, 1942)



ภาพที่ 2 โซเดียม โรไดโซเนต (Sodium Rhodizonate)

หมายเหตุ. จาก https://www.chemicalbook.com/ProductDetail_EN_1454479.htm

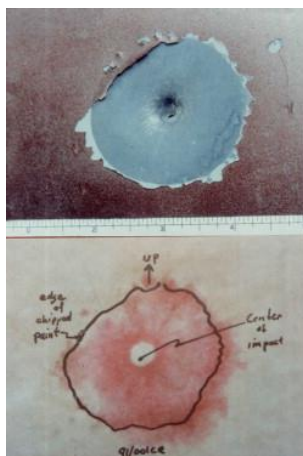
2.3.2 สารเคมีทั่วไปที่ใช้ทดสอบตะกั่วคือ โซเดียม โรไดโซเนต (Sodium Rhodizonate) โดยการทดสอบนี้เป็นที่รู้จักดีและคิดค้นมานานแล้ว โครงสร้างของตัวทำปฏิกิริยาและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับตะกั่วแสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ปฏิกิริยาการทดสอบด้วยโซเดียม โรไดโซเนต (Sodium Rhodizonate) กับตะกั่ว (Pb^{2+}) หมายถึง เหตุ. จาก Shooting Incident Reconstruction (Third Edition) (p. 68) by M. G. Haag and L. C. Haag, 2021

2.3.3 การทดสอบสี (Colorimetric tests) ได้รับการยอมรับว่าเป็นหลักฐานยืนยันใน ศาลฎีกา เพนซิลเวเนียซูพรีม (Pennsylvania Supreme Court) ที่จำเลยเพิ่งยิงปืน การทดสอบสีของสารเคมี ถูกนำมาใช้เนื่องจากมีราคาถูกมาก ใช้สารเคมีเพียงเล็กน้อย และมีประสิทธิภาพมาก บุคลากรสามารถบริหารจัดการได้มากการฝึกอบรมที่มีขั้นตอนไม่ซับซ้อน และสามารถนำไปใช้งานภาคสนามได้ การทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อยืนยันว่าการทดสอบสีเหล่านี้ใช้ได้กับ GSR ในปริมาณที่ทราบ เมื่อการแสดงเสร็จสิ้นการทดสอบคุณลักษณะของ colorimetric และทำการทดสอบเพิ่มเติมที่สนามยิงปืนเพื่อรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับ GSR จริงจากปืนประเภทต่างๆ และผู้ยิงปืน (Pamela K. Walker, 2002)

2.3.4 การทดสอบสารตะกั่วที่ตกค้างด้วย โซเดียม โรไดโซเนต (The Sodium Rhodizonate test for lead residues) ใช้ทดสอบตะกั่วที่ตกค้างอยู่ที่บริเวณร่องรอยลูกกระสุนปืน และ/หรือ ตำแหน่งที่ลูกกระสุนปืนตกกระทบ เกิดปฏิกิริยาของสารประกอบเชิงซ้อน และมองเห็นเป็นสีเกิดขึ้น ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ตำแหน่งร่องรอยลูกกระสุนปืนที่สังสัยบริเวณประตูรถยนต์

หมายเหตุ. จาก Shooting Incident Reconstruction (Third Edition) (p.75) by M. G. Haag and L. C. Haag, 2021

โดยการทดสอบขึ้นอยู่กับลักษณะของวัตถุที่ทดสอบ ร่องรอยที่ประกอบด้วยตะกั่วอาจมองเห็นได้ หรือติดอยู่กับกระดาดากรอง เกณฑ์ที่ใช้ในการเลือกใช้ตัวทำปฏิกิริยาหยดลงบนวัตถุโดยตรงหรือใช้เทคนิค lifting

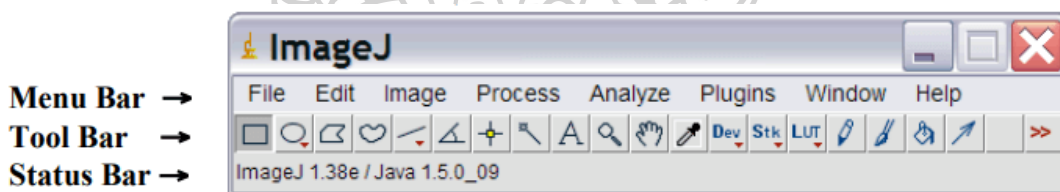
2.4 ความรู้เกี่ยวกับโปรแกรม Image J

ImageJ คือ โปรแกรมในการวิเคราะห์ภาพถ่าย ได้รับการพัฒนาจากสำนักวิจัยของสถาบัน National Institute of Health (NIH) ประเทศสหรัฐอเมริกา ความสามารถของโปรแกรมสามารถ Analyze, Process และคำสั่งอื่น และสามารถบันทึกไฟล์ในรูปแบบ 8-bit, 16-bit โดยโปรแกรมสามารถบันทึกด้วยนามสกุล TIFF, GIF, JPEG, BMP และสามารถวิเคราะห์พร้อมๆกันหลายภาพได้เวลาเดียวกัน

โปรแกรมนี้ถูกเขียนมาเพื่ออำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์ข้อมูลจากรูปภาพ โดยสามารถคำนวณพื้นที่ วัดระยะทาง และมุม รวมไปถึงใช้ตรวจวัดความเข้มสีโดยโปรแกรม ImageJ และยังเป็นโปรแกรมวิเคราะห์ขนาดของวัตถุบนภาพถ่าย โดยอาศัยหลักการวัดความเข้มสีที่เกิดจากการดูดกลืนแสงของสี และสามารถตรวจวัดหาความเข้มสีแยกได้เป็น สีแดง (R) สีเขียว (G) สีฟ้า (B) หรือ RGB

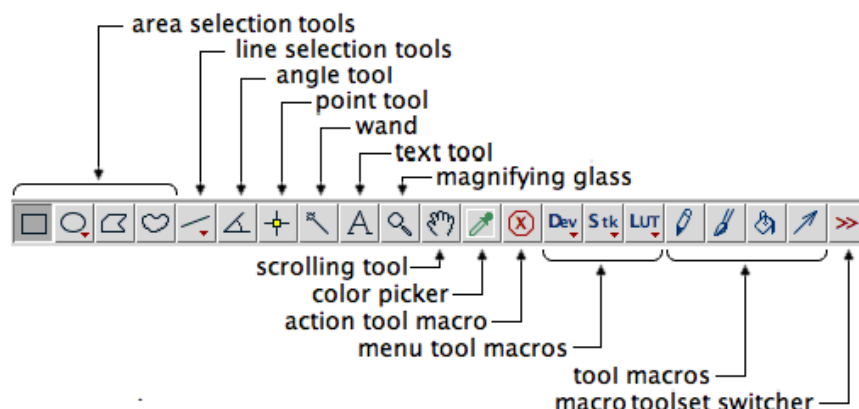
ImageJ เป็นซอฟต์แวร์สาธารณะ ซึ่งสามารถใช้ได้โดยไม่มีข้อจำกัดด้านลิขสิทธิ์ ผู้ใช้ได้รับอนุญาตให้เรียกใช้โปรแกรม แบ่งปันสำเนาและทำการเปลี่ยนแปลงในเชิงบวกกับโปรแกรมซอฟต์แวร์ ช่วยสร้างกราฟจากข้อมูลและปรับปรุงภาพ มักใช้ในการวิเคราะห์ภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์เรืองแสง การวิเคราะห์จุด การวัดพื้นที่ การนับอนุภาค การแบ่งส่วนและการวัดลักษณะเชิงพื้นที่หรือชั่วคราวขององค์ประกอบทางชีววิทยา และอื่นๆ คุณสมบัติหลักบางประการของโปรแกรมมีดังนี้ คุณลักษณะเหล่านี้มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับนักวิจัยในการวิเคราะห์ภาพถ่ายภาคสนามและภาพ

ImageJ มีแถบเครื่องมือ แถบสถานะ และแถบความคืบหน้า ตัวอย่างเช่น เครื่องมือสำหรับการเลือก ชุม และเลื่อนรูปภาพ แถบสถานะและความคืบหน้าจะแสดงคุณสมบัติหลายอย่างระหว่างโปรแกรม เช่น เวลาที่ล่วงไปสำหรับการทำงานปัจจุบัน หน่วยความจำที่ใช้ และหน่วยความจำที่เหลืออยู่ อนุญาตให้แสดงภาพหลายภาพพร้อมกัน นอกจากนี้ยังสามารถแสดงรูปภาพในหน้าต่างเดียวที่มีความคล้ายคลึงกันในเชิงพื้นที่หรือชั่วคราว ซึ่งเรียกว่า stacks



ภาพที่ 5 แถบเครื่องมือของโปรแกรม ImageJ

หมายเหตุ. จาก <https://www.enago.com/academy/analyze-and-process-your-images-in-seconds-with-imagej/>



ภาพที่ 6 คำอธิบายของเครื่องมือของโปรแกรม ImageJ ที่มีอยู่ในแถบเครื่องมือเพื่อแก้ไขภาพ
หมายเหตุ. จาก <https://www.enago.com/academy/analyze-and-process-your-images-in-seconds-with-imagej/>

2.5 ความรู้เกี่ยวกับเครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุโดยการตรวจวัดมวลของไอออนของธาตุ

Inductively Couple Plasma Mass Spectrometer (ICP-MS)

ปัจจุบัน เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุจากเขม่าป็นที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ คือ Inductively Couple Plasma Mass Spectrometer (ICP-MS) สำหรับตรวจวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ แอนติโมนี (Sb), แบเรียม (Ba) และ ตะกั่ว (Pb) (ชนงศักดิ์ บุญมาก, 2564)

2.5.1 หลักการ (ลาวัลย์ ศรีพงษ์, 2552)

Inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS) เป็นหนึ่งในวิธีการวิเคราะห์ธาตุ (elemental analysis) โดยหลักการของอะตอมมิกสเปกโทรสโกปี (atomic spectroscopy) ซึ่งวิธีเป็นการวิเคราะห์โดยอาศัยกระบวนการคายพลังงานของอะตอม (atomic emission) ใช้พลังงานจากพลาสมาในการยิงอิเล็กตรอนให้หลุดจากวงแหวนชั้นนอกของอะตอม ทำให้เกิดไอออนประจุบวกของสารตัวอย่าง ไอออนนี้จะถูกแยกและวัดด้วยเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นของตัวอย่าง

ICP เป็นแหล่งกำเนิดการกระตุ้นอุณหภูมิสูง ที่เกิดกระบวนการกำจัดตัวทำละลาย (desolvation) ออกจากสารละลายตัวอย่าง และระเหยสารตัวอย่างให้อยู่ในรูปไอ (vaporization) ซึ่งไอของโมเลกุลเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนให้เป็นอะตอม (atomization) แล้วต่อมาเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) ซึ่งไอออนของตัวอย่างที่เกิดขึ้นสามารถตรวจวัดด้วยวิธีทางสเปกโทรเมตรีสองชนิด คือ Inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry (ICP-AES) หรือที่เรียกว่า Inductively coupled plasma-optical emission spectrometry (ICP-OES) ซึ่งทำการตรวจวัดความยาวคลื่นที่อะตอมคายพลังงานออกมาในรูปแสง และ วิธี ICP-MS ซึ่งทำการตรวจวัดไอโซโทป (isotopes) ของธาตุตามอัตราส่วนของมวลต่อประจุ (mass-to-charge ratio, m/e) ด้วยเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์

2.5.2 เครื่องมือ ICP-MS

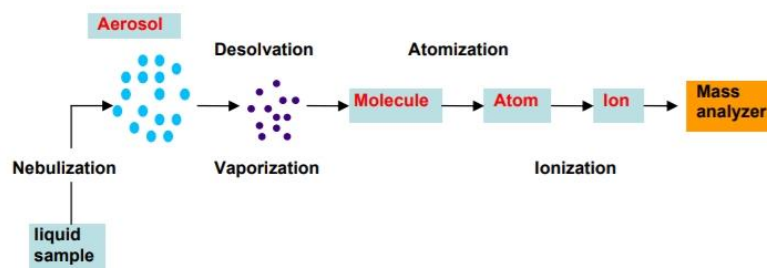
เครื่องมือ ICP-MS ประกอบด้วยระบบนำส่งตัวอย่าง (sample introduction system) แหล่งกำเนิดพลาสมา (plasma sources) รอยต่อ (interface) เครื่องวิเคราะห์มวล (mass analyzer) เครื่องตรวจวัดและบันทึกผล (detector and recorder) ภาพที่ 7 เป็นตัวอย่างของเครื่องมือ ICP-MS (นงภัส โฆษวิทิตกุล, 2555) และ ภาพที่ 8 เป็นแผนภาพแสดงถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นในส่วนต่างๆ ของการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ ICP-MS



ภาพที่ 7 เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุโดยการตรวจวัดมวลของไอออนของธาตุ

Inductively Couple Plasma Mass Spectrometer (ICP-MS)

หมายเหตุ. จาก คู่มือข้อมูลเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง (หน้า 19) โดย นงภัส โฆษวิทิตกุล, 2555



ภาพที่ 8 กระบวนการของการวิเคราะห์ด้วย ICP-MS

หมายเหตุ. จาก “เทคนิค ICP-MS ในงานเภสัชวิเคราะห์ ICP-MS technique in pharmaceutical analysis,” โดย ลาวัลย์ ศรีพงษ์, 2552, วารสารไทยโภชนาการ, 4(3), หน้า 3.

2.5.2.1 ระบบนำส่งตัวอย่าง

ระบบนำส่งตัวอย่างมีทั้งชนิดที่ใช้กับตัวอย่างที่เป็นของเหลว ของแข็ง และ แก๊ส ตัวอย่าง สวนใหญ่เตรียมในรูปสารละลาย ซึ่งมีการดูดพ่นให้เป็นละอองฝอย (pneumatic nebulization) เป็นระบบมาตรฐานทั่วไปในการนำส่งตัวอย่างของเหลว ส่วนตัวอย่างในรูปของแข็งใช้ระบบยิงด้วยเลเซอร์ (laser ablation) ให้เป็นไอของอนุภาคในการนำส่งตัวอย่าง ICP-MS สามารถเชื่อมต่อกับเทคนิคการแยกชนิดต่าง ๆ โดยทำหน้าที่เป็นเครื่องตรวจวัดอะตอมเฉพาะ (specific atomic detector) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัด ทำให้มีความไวในการวิเคราะห์เพิ่มขึ้น มีการเชื่อมต่อ ICP-MS กับเครื่องมือต่างๆ ได้แก่ high-performance liquid chromatography (HPLC) ultra performance pressure chromatography (UPLC) ion chromatography gas chromatography flow injection หรือ sequential injection และ capillary electrophoresis

2.5.2.2 แหล่งกำเนิดพลาสมา

เป็นสวนที่ผ่านกระแสของแก๊สอาร์กอน เขาไประหว่างหลอดที่ทำจากควอทซ์สามหลอดที่มีจุดศูนย์กลางร่วม หรือเรียกว่า คบพลาสมา (plasma torch) ขณะที่ผ่านขดลวดเหนี่ยวนำคลื่นวิทยุพลังงานของสนามคลื่นวิทยุทำให้เกิดการชนกันและแตกตัวเป็นไอออนเกิดเป็นพลาสมาที่มีพลังงานสูง มีอุณหภูมิในช่วง 6,000 ถึง 10,000 องศาสมบูรณ์โดยบริเวณตรงกลางพลาสมามีอุณหภูมิสูงสุด การใช้พลาสมาอาร์กอนที่มีอุณหภูมิสูง ทำให้สามารถวิเคราะห์ธาตุหนักไฟหลายตัวที่ไม่สามารถทำให้เป็นอะตอมได้โดยการไซเปลวไฟ นอกจากนี้อาร์กอนเป็นแก๊สเฉื่อย จึงไม่เกิดปฏิกิริยากับบรรยากาศ ตัวอย่างเขาไปในพลาสมาโดยการพ่นเป็นฝอยละเอียด เขาไปในละอองฝอยของแก๊สอาร์กอน แล้วถูกนำผ่านหลอดควอทซ์อันในสุดซึ่งตัวอย่างจะระเหยเป็นไอ เปลี่ยนเป็นอะตอมและแตกตัวเป็นไอออนไปพร้อมๆ กัน

2.5.2.3 รอยต่อ

เป็นส่วนที่ไอออนของอะตอมที่ถูกแยกออกจากพลาสมา บริเวณนี้มีแรงดูดสูญญากาศที่สูงโดยการใช้ปั๊ม ไอออนของอะตอมจึงถูกดึงเขาไปยัง sampler หรือ extraction cones ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร เกิดเป็นลำของไอออน วิ่งเข้าไปยัง skimmer cones ที่อยู่ต่อมาแล้วถูกโฟกัสโดยไอออนเลนส์เขาไปยังเครื่องวิเคราะห์มวลต่อไป

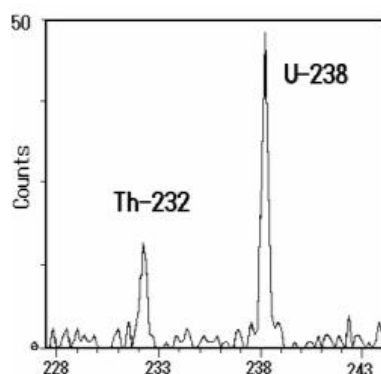
2.5.2.4 เครื่องวิเคราะห์มวล

เครื่องวิเคราะห์มวลเป็นแมสสเปกโตรมิเตอร์ ที่ทำหน้าที่เป็นตัวกรองมวลโดยการแยกไอออนที่มีอัตราส่วนของมวลต่อประจุเฉพาะออกจากลำของไอออนที่มีหลายมวลต่อประจุ หลังการแยก ลำของไอออนแต่ละตัวที่มีลักษณะของประจุไอโซโทปเฉพาะจะวิ่งตรงยังเครื่องตรวจวัดต่อไป

2.5.2.5 เครื่องวิเคราะห์มวลที่นิยมใช้คือ quadrupole นอกจากนี้ยังมีแมสสเปกโตรมิเตอร์ชนิดอื่นที่ใช้กับ ICP-MS ได้แก่ time of flight (TOF) magnetic sector hexapole octapole ion trap และ ion cyclotron resonance

2.5.2.6 เครื่องตรวจวัดและบันทึกผล

เครื่องตรวจวัดทำหน้าที่วัดกระแสไอออน ที่ถูกแยกออกจากเครื่องวิเคราะห์มวล ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของไอโซโทป หรือ ธาตุในตัวอย่าง เครื่องตรวจวัดที่มีใช้ได้แก่ 1) continuous dynode electron multiplier 2) continuous dynode electron multiplier และ 3) Faraday cup เครื่องบันทึกผลทำการบันทึกผลเป็นแมสสเปกตรัม (mass spectrum) ซึ่งแกนตั้งเป็นความเข้มของพีค เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของไอโซโทปหรือธาตุในตัวอย่าง และแกนนอนเป็นมวลของไอโซโทป หรือธาตุในตัวอย่าง ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 แมสสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ด้วย ICP-MS ของยูเรเนียม (U) และ ทอเรียม (Th)

จากตัวอย่างน้ำฝน

หมายเหตุ. จาก “เทคนิค ICP-MS ในงานเภสัชวิเคราะห์ ICP-MS technique in pharmaceutical analysis,” โดย ลาวัลย์ ศรีพงษ์, 2552, วารสารไทยโภชนาการ, 4(3), หน้า 5.

2.5.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยวิธี ICP-MS

2.5.3.1 การเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธี ICP-MS นี้สำคัญต่อการนำส่งตัวอย่างเข้าไปในพลาสมา ซึ่งส่วนใหญ่มีระบบนำส่งด้วยการพ่นฝอยสารละลาย ตัวอย่างที่เตรียมจึงควรละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสม ซึ่งนิยมใช้สารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย หรือสารละลายกรดไนตริกเจือจางเนื่องจากตัวทำละลายเหล่านี้มีสิ่งรบกวนน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับตัวทำละลายตัวอื่น อาจใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริก กรดเปอร์คลอริก กรดผสม หรือใช้ความเข้มข้นหลายๆ ความเข้มข้นของกรดได้ อาจใช้กรดไฮโดรฟลูออริกเจือจางได้ แต่ต้องระวังว่ามีความปลอดภัยต่อผู้วิเคราะห์และมีการป้องกันเครื่องมือที่มีการใช้กรดตัวนี้กรณีที่ต้องละลายตัวอย่าง อาจใช้สารละลายต่างเจือจาง ตัวทำละลายอินทรีย์เจือจาง สารละลายผสมของกรดหรือต่างหรือสารละลายผสมของตัวทำละลายอินทรีย์ได้

เพื่อป้องกันสิ่งรบกวนจากตัวทำละลาย ให้เติมสารมาตรฐานภายใน (internal standard) ที่เหมาะสม กรณีที่ความหนืดของตัวอย่างแตกต่างจากความหนืดของสารมาตรฐาน ให้ทำ matrix matching หรือเติมสารมาตรฐานภายในที่เหมาะสม โดยพิจารณาจาก สารตัวอย่างที่วิเคราะห์ พลังงานการแตกตัว ความยาวคลื่นหรือมวลสาร และ ธรรมชาติของเมทริกซ์ของตัวอย่าง

เมื่อตัวอย่างไม่ละลายในตัวทำละลายใด ๆ ให้ใช้เทคนิคการย่อยชนิดต่าง ๆ เช่น การย่อยบนเตาเพลทร้อน (hot-plate digestion) หรือ การย่อยโดยใช้ไมโครเวฟช่วย (microwave assisted digestion) การย่อยมีทั้งการย่อยในภาชนะเปิดและการย่อยในภาชนะปิด การเลือกใช้วิธีใด ขึ้นกับธรรมชาติของตัวอย่าง และความสนใจของผู้วิเคราะห์ การย่อยบนเตาเพลทร้อน หรือการย่อยในภาชนะเปิด ไม่สามารถใช้กับโลหะบางชนิดเนื่องจากระเหยได้เช่น พรอท และซีลีเนียม ตัวทำละลาย ที่ใช้สำหรับ วิธี ICP-MS ต้องเป็นชนิดมีความบริสุทธิ์สูง (ultra-high purity) และน้ำปราศจากไอออนที่ใช้ต้องมีความต้านทานอย่างน้อย 18 megohm

2.5.3.2 การเตรียมสารมาตรฐาน

สารละลายมาตรฐานของธาตุเดี่ยวหรือหลายธาตุ อาจซื้อมาเพื่อเตรียมสารละลายมาตรฐานทำงาน (working standard solution) โดยต้องมีความเข้มข้นที่สอบกลับไปยังสารมาตรฐาน ปฐมภูมิได้เช่น สารมาตรฐานปฐมภูมิของ National Institute of Standards and Technology (NIST) นอกจากนี้สารละลายมาตรฐานของธาตุอาจเตรียมอย่างถูกต้องจากสารมาตรฐานและมีการหาความเข้มข้นตามความเหมาะสม ควรทำ matrix matching ของสารตัวอย่าง สารมาตรฐาน และแบลงค์ ในกรณีที่ทำไม่ได้ ให้เติมสารมาตรฐานภายในที่เหมาะสม หรือใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีเติมสารมาตรฐาน (standard addition)

2.5.3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์

ข้อมูลจากการฉีดแบบเป็นลำดับสองถึงสามซ้ำของสารละลายมาตรฐาน และสารละลายตัวอย่างให้เฉลี่ยเป็นผลเดี่ยว ความเข้มข้นของตัวอย่างคำนวณจากเส้นกราฟมาตรฐานที่สร้างโดยการพล็อตระหว่างการตอบสนองของเครื่องตรวจวัดกับความเข้มข้นของสารมาตรฐาน การวิเคราะห์ด้วยวิธีเติมสารมาตรฐาน จะทำในกรณีที่การรบกวนจากเมทริกซ์มีผลทำให้การวิเคราะห์ตัวอย่างไม่ถูกต้อง ซึ่งทำโดยการเติมสารมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นที่หลายระดับความเข้มข้นเข้าไปในสารละลายตัวอย่าง ทำการพล็อตระหว่างสัญญาณการตอบสนองของเครื่องมือกับความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติม ลากเส้นของเส้นตรงสมการถดถอยผ่านจุดของข้อมูลค่าสัมบูรณ์ (absolute value) ของจุดตัดแกนนอน (x-intercept) คูณด้วยค่าแฟคเตอร์การเจือจาง (dilution factor) คือ ความเข้มข้นของสารตัวอย่าง

โดยสรุป ICP-MS เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่มีความไวสูง มีคุณสมบัติและความสามารถหลายองค์ประกอบ แม้ว่าแมสสเปกโตรเมทรีจะมีความเฉพาะเจาะจงสูง นักวิทยาศาสตร์และแพทย์ควรตระหนักถึงศักยภาพของการรบกวน และปัจจัยการวิเคราะห์ที่อาจส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของผลลัพธ์ที่รายงาน ได้แก่ ค่าใช้จ่ายทุนเริ่มต้น (ค่าเครื่องมือและการตั้งค่าห้องปฏิบัติการ) และต้นทุนการดำเนินงานต่อเนื่อง ห้องปฏิบัติการต้องประเมินปัจจัยทั้งหมดเหล่านี้ (Scott C Wilschefski, 2019)

2.6 แนวคิดเกี่ยวกับประสิทธิภาพ

จากการทบทวนแนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมดทำให้มองเห็นภาพได้ว่าผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยเรื่องการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์แบบกระดาษสำหรับตรวจหาสารตะกั่วที่เกิดจากการยิงปืน ครึ่งนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประสิทธิภาพทั้งในด้านนิติวิทยาศาสตร์ และด้านเศรษฐกิจ ดังนั้นผู้วิจัยจึงขออธิบายเพิ่มเติมในคำจำกัดความของประสิทธิภาพเพิ่มเติม ดังต่อไปนี้

นิยามของประสิทธิภาพ (Efficiency) ได้มีนักวิชาการและผู้ทรงคุณวุฒิ หลายท่านได้ให้ความหมายของคำว่า “ประสิทธิภาพ” ไว้หลากหลาย เช่น (Millet, 1954) ได้ให้ความหมายคำว่า ประสิทธิภาพ หมายถึง ผลการปฏิบัติงานที่ก่อให้เกิดความพึงพอใจแก่มนุษย์ และได้รับผลกำไรจากการปฏิบัติงานนั้น (human satisfaction and benefit produced) ซึ่งความพึงพอใจนั้น หมายถึง ความพึงพอใจในการบริการ โดยพิจารณาได้จาก

- 1) การให้บริการอย่างเท่าเทียม (equitable service)
- 2) การให้บริการอย่างรวดเร็วและทันเวลา (timely service)
- 3) การให้บริการอย่างเพียงพอ (ample service)
- 4) การให้บริการอย่างก้าวหน้า (progression service)

Simon (1960) ได้ให้ความหมายคำว่าประสิทธิภาพไว้คล้ายคลึงกับ Millet คือ ในเชิงธุรกิจเกี่ยวกับการทำงานของเครื่องจักร โดยพิจารณาว่างานใดจะมีประสิทธิภาพสูงสุดนั้นให้ดูความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้า (input) กับผลผลิต (output) ที่ได้รับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพเท่ากับผลผลิตลบด้วยปัจจัยนำเข้า ถ้าหากเป็นระบบการทำงานของภาครัฐ ต้องนำความพึงพอใจของผู้รับบริการ (satisfaction) เข้าไปด้วย ซึ่งอาจเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$E = (I - O) + S$$

E คือ ประสิทธิภาพของงาน (Efficiency)

O คือ ผลผลิตหรืองานที่ได้รับออกมา (Output)

I คือ ปัจจัยนำเข้าหรือทรัพยากร (Input)

S คือ ความพึงพอใจของผู้รับบริการ (Satisfaction)

ส่วน Peterson and Plowman (1989) ได้ให้ความหมายของคำว่าประสิทธิภาพในการบริหารงานด้านทางธุรกิจ ในความหมายอย่างแคบว่าหมายถึง การลดต้นทุนในการผลิต และในความหมายอย่างกว้างว่า หมายถึง คุณภาพของการมีประสิทธิผล (quality of effectiveness) และความสามารถในการผลิต (competence and capability) และในการดำเนินงานทางด้านธุรกิจที่ถือว่ามีประสิทธิภาพสูงสุด คือสามารถผลิตสินค้า หรือการให้บริการในปริมาณและคุณภาพที่ต้องการที่เหมาะสมและต้นทุนน้อยที่สุด เพื่อคำนึงถึงสถานการณ์และข้อผูกพันด้านการเงินที่มีอยู่ ดังนั้นคำว่าประสิทธิภาพในด้านธุรกิจจึงประกอบไปด้วย 4 ประการ คือ ต้นทุน (cost) คุณภาพ (quality) ปริมาณ (quantity) และวิธีการ (method) ในการผลิต

สำหรับนักวิชาการไทย ได้ให้นิยามของประสิทธิภาพไว้หลากหลายเช่นกัน คือ พจนานุกรมราชบัณฑิตยสถาน (2546) ได้ให้ความหมายคำว่าประสิทธิภาพ หมายถึง ความสามารถที่ทำให้เกิดผลในการทำงาน ทั้งนี้สำนักงาน ก.พ. ก็ได้ให้ความหมายของคำว่าประสิทธิภาพ ไว้ในเอกสารประกอบเสนอคณะรัฐมนตรีของสำนักงาน ก.พ. (2538: 2 อ้างถึงใน ศิริวิทย์ คลีสุวรรณ์, 2539) ว่า ประสิทธิภาพโดยทั่วไปจะ หมายถึง การทำงานที่ประหยัด ได้ผลงานที่รวดเร็ว มีคุณภาพ คุ่มค่ากับการใช้ทรัพยากรด้านการเงิน คน อุปกรณ์และเวลา ดังนั้นประสิทธิภาพ (efficiency) จึงหมายถึง อัตราความแตกต่างระหว่างปัจจัยนำเข้า (input) และผลผลิตที่ออกมา (output) และสามารถมองได้ในแง่มุมต่าง ๆ ดังนี้คือ

- 1) แง่มุมของค่าใช้จ่าย หรือต้นทุนการผลิต (input) เช่น การใช้ทรัพยากรทั้งเงิน คน วัสดุ เทคโนโลยีที่มีอยู่อย่างประหยัดคุ่มค่าและเกิดการสูญเสียน้อยที่สุด หรือ
- 2) แง่มุมของกระบวนการบริหาร (process) เช่น การทำงานที่ถูกต้องได้มาตรฐาน รวดเร็ว และใช้เทคโนโลยีที่สะดวกสบายกว่าเดิม หรือ
- 3) แง่มุมของผลลัพธ์ เช่น การทำงานที่มีคุณภาพ เกิดประโยชน์ต่อสังคม เกิดผลกำไรทันเวลาผู้ปฏิบัติงานมีจิตสำนึกที่ดีต่อการทำงาน และบริการเป็นที่พอใจของลูกค้า

ทิพาวดี เมฆสุวรรณ (2538) ได้ให้ความหมายของคำว่าประสิทธิภาพ หมายถึง ในระบบราชการมีความหมายรวมถึงผลิตภาพ และประสิทธิภาพ โดยประสิทธิภาพเป็นสิ่งที่วัดได้หลายมิติ ตามแต่วัตถุประสงค์ที่ต้องการพิจารณา คือ

- 1) ประสิทธิภาพในมิติของค่าใช้จ่ายหรือต้นทุนของการผลิต (input) ได้แก่ การใช้ทรัพยากรการบริหารคือ คน เงิน วัสดุ เทคโนโลยี ที่มีอย่างประหยัด คุ่มค่า และเกิดการสูญเสียที่น้อยที่สุด
- 2) ประสิทธิภาพในมิติของกระบวนการบริหาร (process) ได้แก่ การทำงานที่ถูกต้องได้มาตรฐาน รวดเร็ว และใช้เทคโนโลยีที่สะดวกกว่าเดิม

3) ประสิทธิภาพในมิติของผลผลิตและผลลัพธ์ ได้แก่ การทำงานที่มีคุณภาพเกิดประโยชน์ต่อสังคม เกิดผลกำไร ทันทเวลา ผู้ปฏิบัติงานมีจิตสำนึกที่ดีต่อการทำงานและบริการเป็นที่พอใจของลูกค้าหรือผู้มารับบริการ

นฤมล สุนทรวาสดี (2549) ได้ให้ความหมายของคำว่าประสิทธิภาพ ไว้คล้ายคลึงกับทิพาวดี เมฆสุวรรณร์ คือหมายถึง การประหยัดทรัพยากรหรือค่าใช้จ่าย โดยมีข้อเสนอวิธีลดต้นทุนหรือใช้จ่าย 2 แนวคิด ดังนี้

1) การลดต้นทุนคุณภาพ ไม่ว่าจะองค์กรจะทำอะไรก็ล้วนต้องจ่ายเงิน เช่น การผลิตสินค้า การเขียนใบกำกับสินค้า การซ่อมแซมเครื่องมือ การบริหารงานทุกอย่างต้องใช้เงินให้เป็น

2) การลดความสูญเปล่า การทำงานที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่ม ล้วนเป็นงานที่ทำแล้วสูญเปล่า เพิ่มต้นทุนให้แก่ผลิตผลสุดท้าย แยกความสูญเปล่าเป็น 7 ประเภท ดังนี้

- 2.1) ผลิตมากเกินไป
- 2.2) ผลิตบกพร่อง หรือแก้ไขงาน
- 2.3) เวลารอคอย หรือเวลาล่าช้า
- 2.4) สินค้าคงคลังมาก หรืองานอยู่ระหว่างผลิต
- 2.5) การขนของ
- 2.6) กระบวนการที่ขาดประสิทธิผล
- 2.7) การเคลื่อนไหว หรือการกระทำที่ไม่จำเป็น

อนันท์ งามสะอาด (2551 อ้างถึงใน (ทริศม์ชญา พิพัฒน์เพ็ญ และคณะ, 2557)) ให้ความหมายของคำว่า ประสิทธิภาพ หมายถึง กระบวนการดำเนินงานที่มีองค์ประกอบดังนี้

1) ประหยัด (Economy) ได้แก่ ประหยัดต้นทุน (Cost) ประหยัดทรัพยากร (Resources) และประหยัดเวลา (Time)

2) เสร็จทันตามกำหนดเวลา (Speed)

3) คุณภาพ (Quality) ได้แก่ กระบวนการตั้งแต่ปัจจัยนำเข้า (Input) หรือวัตถุดิบ มีการคัดสรรอย่างดี กระบวนการผลิต (Process) มีการดำเนินงานอย่างดีและผลผลิต (Output) ที่ดี ดังนั้น การมีประสิทธิภาพจึงต้องพิจารณากระบวนการดำเนินงานว่า ประหยัด รวดเร็ว มีคุณภาพของงานซึ่งเป็นกระบวนการดำเนินงานทั้งหมด

จากความหมายของคำว่าประสิทธิภาพดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยขอสรุปความหมายตามงานวิจัย ดังนี้ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษกับวิธี ICP-MS สำหรับตรวจหาปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าป็นที่มีอยู่ วิเคราะห์ตามองค์ประกอบ ดังนี้

1) ปริมาณของตะกั่วที่ตรวจวัดได้ มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)

2) ความประหยัด (Economy) ได้แก่

ประหยัดต้นทุน (Cost) คือ การใช้เครื่องมือวิทยาศาสตร์เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ μ PADs ซึ่งมีต้นทุนต่ำกว่า (ทีวี ทนาวาร์, สุนิสา นิยมนา และ ธนากร เปลื้องกลาง, 2560)

ประหยัดเวลา (Time) μ PADs ให้ผลการตรวจพิสูจน์เบื้องต้นได้อย่างรวดเร็ว และมีผลลัพธ์ใกล้เคียงกับวิธี ICP-MS

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนนี้ผู้วิจัยขอนำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทั้งที่ตีพิมพ์ในประเทศไทยและงานวิจัยต่างประเทศ แบ่งออกเป็น 2 หัวข้อ ดังนี้

1) μ PADs

2) โซเดียมโรโดไซด์ (Sodium Rhodizonate)

2.7.1 μ PADs

งานวิจัยในประเทศ

อรอุษา เตียวตระกูล (2559) ได้ทำการวิจัยเรื่องการวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรต์และไนเตรทในเขม่าดินปืนบนอุปกรณ์แบบกระดาษ งานวิจัยนี้ได้สร้างอุปกรณ์แบบกระดาษและอาศัยปฏิกิริยา Griess reaction ในการตรวจวัดปริมาณไนโตรต์และไนเตรทในตัวอย่างเขม่าดินปืน ใช้โปรแกรม ImageJ ในการอ่านค่าสีของจุดที่ปรากฏบนอุปกรณ์ นำข้อมูลค่าสีและปริมาณของสารมาตรฐานไนโตรต์และของไนเตรทมาสร้างกราฟมาตรฐาน ในช่วงปริมาณของไนโตรต์เท่ากับ 0.15 - 1.80 nmol และของไนเตรทเท่ากับ 2.0 - 10.0 nmol เมื่อนำอุปกรณ์แบบกระดาษมาใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรต์และไนเตรทในตัวอย่างเขม่าดินปืนที่เก็บตัวอย่างจากมือผู้ยิงและจากด้านในของปลอกกระสุนปืนที่ยิงแล้ว พบว่าปริมาณของไอออนไนโตรต์ที่วัดได้จากอุปกรณ์แบบกระดาษมีความสัมพันธ์กับปริมาณของไอออนไนโตรต์ที่วิเคราะห์ได้โดยใช้เทคนิคไอออนโครมาโทกราฟี โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.9264 ในขณะที่ปริมาณของไอออนไนเตรทที่วิเคราะห์ได้จากทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องกัน ด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.9490 วิธีการที่ใช้อุปกรณ์แบบ

กระดาษที่พัฒนาในงานวิจัยนี้ อาจนำไปใช้หาปริมาณไนไตรท์และไนเตรทในเขม่าดินปืน เพื่อวัตถุประสงค์ทางนิติวิทยาศาสตร์

เบญจวรรณ นิลวงศ์ et al. (2559) ได้ทำการวิจัยเรื่องการพัฒนาวิธีวิเคราะห์โลหะหนักในน้ำดื่มของโรงเรียนในเขตจังหวัดนครศรีธรรมราชด้วยอุปกรณ์ของไหลจุลภาคบนกระดาษ โดยวิเคราะห์นิกเกิล(II) อะลูมิเนียม(III) และเหล็ก(II) ในน้ำดื่ม อุปกรณ์ที่สร้างโดยการสกรีนด้วยเทียนและออกแบบให้สามารถวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็วและมีความจำเพาะเจาะจงต่อการวิเคราะห์โลหะทั้งสามชนิด บริเวณตรวจวัดจะเกิดเป็นสารเชิงซ้อนระหว่างนิกเกิล(II) กับ Dimethylglyoxime (DMG) เกิดเป็นสีชมพู ส่วนอะลูมิเนียม(III) จะเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับสารสกัดกะหล่ำปลีสีม่วงเกิดเป็นสีน้ำเงิน และเหล็ก(II) จะเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับ 1,10-phenanthroline ให้สีส้มแดง หาคความเข้มข้นด้วยโปรแกรม Image J ในโหมดสีเทาภายใต้สภาวะการทดลองที่เหมาะสมกราฟมาตรฐานของนิกเกิล(II) อะลูมิเนียม(III) และเหล็ก(II) อยู่ในช่วงความเข้มข้น 1–15 มิลลิกรัมต่อลิตร($R^2=0.9985$) 0.05–15 มิลลิกรัมต่อลิตร($R^2=0.9952$) และ 0.005–1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ($R^2=0.9975$) ตามลำดับขีดจำกัดของการตรวจวัด (LOD) ของนิกเกิล(II)อะลูมิเนียม(III)และเหล็ก(II) เท่ากับ 1, 0.05 และ 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าเบี่ยงเบน-มาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) เท่ากับ 1.0, 1.1 and 0.6% ($n = 10$) ตามลำดับสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์นิกเกิล(II) อะลูมิเนียม(III) และเหล็ก(II) ในน้ำดื่มของโรงเรียนในจังหวัดนครศรีธรรมราชได้ซึ่งจากการตรวจวัดปริมาณโลหะนิกเกิล(II) อะลูมิเนียม(III) และเหล็ก(II)พบว่าตรวจไม่พบการปนเปื้อนของโลหะทั้งสามชนิดในตัวอย่างน้ำดื่มของโรงเรียนทั้ง 21 แห่ง ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การคืนกลับ (%Recovery) อยู่ในช่วง 84–120% เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีที่พัฒนาขึ้นกับวิธีมาตรฐาน(Inductively coupled plasma optical emission spectrometry, ICP-OES) ทั้งสองวิธีให้ผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (t-test) ดังนั้นวิธีนี้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการวิเคราะห์นิกเกิล(II) อะลูมิเนียม(III)และเหล็ก(II) ที่สามารถทำได้รวดเร็วย่อยสลายได้ดีเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม รวมทั้งเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

ทวี ทนาวร et al. (2560) ได้ทำการวิจัยเรื่องการพัฒนาชุดทดสอบแบบเร็วและ ตะกั่วด้วยอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์แบบกระดาษ โดยพัฒนาวิธีการ แบบกระดาษสำหรับวิเคราะห์ ปริมาณธาตุตะกั่วและแบเรียมในตัวอย่างอาศัยปฏิกิริยาระหว่างธาตุทั้งสองกับสารละลายอิมตัว โซเดียมไรโดโซเนตบนกระดาษให้สารผลิตภัณฑ์เชิงซ้อนสีชมพู พบว่าเฉพาะธาตุตะกั่วเท่านั้นที่ เกิดปฏิกิริยากับโซเดียมไรโดโซเนตให้สารผลิตภัณฑ์สีชมพูในสถานะที่เป็นกรด นักวิจัยจึงสามารถ วิเคราะห์ปริมาณธาตุตะกั่วและแบเรียม (Pb+Ba) ได้จากการวิเคราะห์ความเข้มสีของสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในสถานะที่เป็นกลางและสามารถวิเคราะห์ปริมาณธาตุตะกั่ว (Pb) ได้จากความเข้มสีของสาร ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในสถานะที่เป็นกรด จากนั้นจึงหาผลต่างของปริมาณธาตุทั้งสองสถานะก็จะ สามารถวิเคราะห์ปริมาณธาตุแบเรียม (Ba) ได้นั่นเอง

ผลการวิเคราะห์พบว่าวิธีการแบบกระดาษที่พัฒนาขึ้นสามารถวิเคราะห์ธาตุตะกั่ว และแบเรียม (Pb+Ba) ได้ในช่วงความเข้มข้นระหว่าง 400 ถึง 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีขีดจำกัด ของการตรวจวัดเท่ากับ 358 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถวิเคราะห์ธาตุตะกั่วได้ในช่วงความเข้มข้นระหว่าง 200 ถึง 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีขีดจำกัดของการตรวจวัดเท่ากับ 124 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ การประยุกต์วิธีการแบบกระดาษเพื่อวิเคราะห์ปริมาณธาตุทั้งสองในตัวอย่างสังเคราะห์ เปรียบเทียบกับวิธีการแอร์ไฟเฟอร์เนตอะตอมมิคแอสซอบซันสเปกโตรเมตรี พบว่าให้ผลที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% นั้นแสดงว่าวิธีการแบบกระดาษที่พัฒนาขึ้นเป็นวิธีการ ทางเลือกใหม่ที่มีความสมรรถนะเหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้เป็นชุดทดสอบปริมาณธาตุตะกั่วและ แบเรียมได้

รุ่ง คำปู้ (2562) ได้ทำการศึกษา เรื่องการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ สำหรับตรวจวัดไนเตรท และไนไตรท์ในเขม่าดินปืน โดยวิจัยประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ (μ PADs) เพื่อใช้ตรวจหาปริมาณไนไตรท์และไนเตรทในตัวอย่างเขม่าดินปืน โดยการพิมพ์สกรีนบน กระดาษด้วยซีฟิง และตรวจวิเคราะห์ไนไตรท์ด้วยปฏิกิริยาการเกิดสีกับรีเอเจนท์ Griess การตรวจวัด ไนเตรทใช้โลหะ Zn เป็นตัวรีดิวส์ เปลี่ยนไอออนไนเตรทไปเป็นไอออนไนไตรท์ ในการวัดปริมาณไน ไตรท์และไนเตรทด้วยอุปกรณ์นี้ ผู้วิจัยวัดค่าความเข้มของสีที่ปรากฏขึ้นบนอุปกรณ์โดยใช้โปรแกรม imageJ อ่านค่าสี RGB ของภาพอุปกรณ์ ในการตรวจวัดพบว่ามีค่าขีดจำกัดในการหาปริมาณเท่ากับ 0.02 nmol สำหรับการตรวจวัดทั้งไนไตรท์และไนเตรทเมื่อเก็บรักษาอุปกรณ์ตรวจวัดนี้ในที่มืด ณ อุณหภูมิห้อง และแช่แข็งเป็นเวลา 7 วัน อุปกรณ์นี้ยังคงมีความเสถียรในการวัดปริมาณไนไตรท์ ในขณะที่การวัดปริมาณไนเตรทยังคงความเสถียรเมื่อเก็บรักษาอุปกรณ์นี้ในสถานะข้างต้นเป็นเวลา 2 วัน ตัวอย่างเขม่าดินปืนนำมาวิเคราะห์เป็นตัวอย่างไม่เก็บมาจากปลอกกระสุนและจากมือผู้ยิงปืน เมื่อ เปรียบเทียบปริมาณไนไตรท์และไนเตรทในเขม่าดินปืนที่วัดได้ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ กับที่

วิเคราะห์ด้วยเทคนิคไอออนโครมาโตกราฟี พบว่าข้อมูลมีความสัมพันธ์กันเป็นอย่างดีเมื่อพิจารณาจากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่มีค่าเท่ากับ 0.983 และ 0.968 สำหรับไอออนไนไตรท์และไนเตรทตามลำดับ อย่างไรก็ตามปริมาณไนไตรท์และไนเตรทในเขม่าป็นที่วิเคราะห์ได้ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษมีค่ามากกว่าที่ตรวจวัดด้วยวิธีไอออนโครมาโตกราฟีเล็กน้อย ดังจะเห็นได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ที่มีค่าเท่ากับ 1.295 และ 1.445 สำหรับไอออนทั้งสองตามลำดับ อุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษที่พัฒนาในงานวิจัยนี้เป็นวิธีวิเคราะห์เขม่าป็นที่สะดวก มีค่าใช้จ่ายต่ำ และอาจนำไปใช้ในงานตรวจวัดเขม่าป็นในภาคสนาม

งานวิจัยต่างประเทศ

Sun et al. (2018) ได้ทำการวิจัยเรื่อง แพลตฟอร์มไมโครฟลูอิดิกที่ใช้กระดาษในโหมตรระดับหยดสำหรับการตรวจจับไอออนตะกั่ว (II) ในของเหลวที่มีต้นทุนต่ำ รวดเร็ว และสะดวกผ่านกระบวนการ 2 ขั้นตอน คือการบ่มด้วยความร้อนและการผสมในภายหลัง อุปกรณ์นี้ถูกสร้างขึ้นโดยการสร้างรูปแบบที่ไม่ชอบน้ำ ซึ่งกำหนดสิ่งกีดขวางช่องทางและอ่างเก็บน้ำ บนซับสเตรตกระดาษที่กันน้ำไม่ได้ ตามด้วยการบรรจุและทำให้รีเอเจนต์แห้งในแหล่งกักเก็บที่กำหนดไว้ แตกต่างจากอุปกรณ์ที่ใช้กระดาษทั่วไปซึ่งทำจากกระดาษที่ซึมผ่านของน้ำ อุปกรณ์ที่เตรียมไว้จะเก็บหยดน้ำในอ่างเก็บน้ำแบบแยกส่วน และหยดน้ำจะไม่เคลื่อนที่เว้นแต่อุปกรณ์จะตั้งชื่อตามทิศทางของช่องทางที่กำหนดไว้ล่วงหน้า ด้วยวิธีนี้ ตัวอย่างของเหลวที่ใช้กับอุปกรณ์จะได้รับการจัดการแบบหยดเดียว และสามารถจัดเก็บ ขนส่ง และผสมได้ตามต้องการ แตกต่างจากอุปกรณ์กระดาษทั่วไปที่ใช้แรงฝอยในการขับเคลื่อนของเหลว อุปกรณ์ใหม่นี้ใช้การทำให้เปียกและแรงโน้มถ่วงเป็นแรงผลักดัน ตั้งชื่อหลักการงานนี้ว่าอุปกรณ์กระดาษที่ใช้โหมตรระดับหยด (SD- μ PAD) การใช้ตราประทับการพิมพ์แบบสัมผัสเทพลอนทำให้การผลิตอุปกรณ์ดังกล่าวรวดเร็ว ประหยัดต้นทุน และให้ผลผลิตจำนวนมาก การใช้การทดสอบการเปิดเครื่องเรียงแสงแบบ G-quadruplex เราสาธิตการตรวจจับไอออนตะกั่ว (II) ที่รวดเร็ว สะดวก มีความไวสูงและต้นทุนต่ำในตัวอย่างน้ำ โดยใช้อุปกรณ์พกพาที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ที่ผลิตขึ้นเอง และสมาร์ตโฟน เป็นเครื่องตรวจจับ

Buking et al. (2018) ได้ทำการวิจัยเรื่องอุปกรณ์ตรวจวัดของไหลจุลภาคแบบกระดาษสำหรับตรวจวิเคราะห์ปริมาณของตะกั่วโดยใช้ความยาวแถบปฏิกิริยาเพื่อระบุกระดูกสันป็นและศักยภาพในการประมาณระยะยิง โดยอุปกรณ์มีราคาประหยัดและเป็นมิตรกับผู้ใช้ได้รับการพัฒนาเพื่อระบุกระดูกสันจากเขม่าป็น (GSR) บนเป้าผ้าฝ้าย อุปกรณ์ (25 × 82 มิลลิเมตร) ทำจากกระดาษกรองพร้อมพิมพ์รูปแบบประกอบด้วยบริเวณทรงกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร และ 4 มิลลิเมตร และท่อตรงช่องทางการไหล (กว้าง 3 มิลลิเมตร และยาว 60 มิลลิเมตร) ติดสติ๊กเกอร์ที่มี

สเกลไม้บรรทัดเป็นมิลลิเมตรข้างช่อง ช่องตรงถูกชุบด้วยโรดิโซเนตและทำให้แห้งที่อุณหภูมิแวดล้อม สารสกัดทาร์เทรตของผ้าเป้าหมายถูกโหลดลงในบริเวณโหลดตัวอย่าง หากมีไอออน Pb(II) อยู่ในสารสกัด ริวส์สีชมพูของ Pb(II)-rhodizonate จะเกิดขึ้นเมื่อสารละลายตัวอย่างไหลจากบริเวณโหลดตัวอย่างไปตามช่องทาง ความยาวของแถบสีชมพูใช้เพื่อประเมินระยะการยิง

Wang et al. (2021) ได้ทำการศึกษาวิจัยเรื่องอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกแบบกระดาษที่ใช้ไฟฟ้าเคมีสำหรับการแยกโปรตีนแบบออนไลน์และการตรวจหาตะกั่วในปัสสาวะโดยตรง โดยได้พัฒนาอุปกรณ์วิเคราะห์แบบไมโครฟลูอิดิกที่ใช้กระดาษ (μ PAD) สำหรับการแยกโปรตีนแบบออนไลน์และการตรวจหาตะกั่วไอออน (Pb(II)) ทางไฟฟ้าเคมีในตัวอย่างปัสสาวะ กระดาษกรองที่มีลวดลายจัดทำขึ้นโดยการพิมพ์ลวดลายไมโครแซนเนลโดยตรงบนกระดาษกรองโดยใช้เครื่องพิมพ์เลเซอร์ในสำนักงาน กระดาษถูกตัดแปลงด้วย protein precipitant และต่อจากนั้นควบคู่กับระบบสามขั้วแบบถอดได้ พารามิเตอร์ทดลอง กล่าวคือ รีเอเจนต์ตัดแปลง ความยาวและความกว้างของไมโครแซนเนล ศักยภาพในการสะสม และเวลาสะสม ได้รับการปรับให้เหมาะสมที่สุด จากนั้น ความเข้มข้นของโปรตีนสูงสุดที่อุปกรณ์สามารถทำงานได้คือ 300 มก./ลิตร ช่วงเชิงเส้นคือ 10–500 ไมโครกรัม/ลิตร โดยจำกัดการตรวจจับที่ 9 ไมโครกรัม/ลิตร

ประสิทธิภาพของอุปกรณ์นี้ถูกแสดงผ่านการหาปริมาณของตะกั่ว Pb(II) ในตัวอย่างปัสสาวะ และผลที่ได้สัมพันธ์กับ atomic absorption spectrometry (AAS)

Wisang et al. (2019) ได้ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง อุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์แบบกระดาษ (μ PADs) สำหรับวิเคราะห์ตะกั่วโดยใช้ตาเปล่าและการตรวจวัดสี งานนี้อธิบายการเปรียบเทียบการออกแบบ μ PADs 2 รูปแบบ คือ μ PADs โดยใช้การพิมพ์สีสำหรับการประดิษฐ์โซนที่ไม่ชอบน้ำบนกระดาษโครมาโตกราฟีและการประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดสารตะกั่วในตัวอย่างของเสีย และการออกแบบที่แตกต่างกันที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ วิธีอิงระยะทางและวิธีวิเคราะห์ภาพโซเดียมโรดิโซเนตในสารละลายบัฟเฟอร์ทาร์เทรต (pH 2.8) ใช้เป็นรีเอเจนต์สำหรับการตรวจวัดตะกั่วด้วยตาเปล่าโดยตรง (II) บน μ PAD การตรวจวัดความเข้มข้นของสารตะกั่ว(II) โดยการวัดระยะทางของผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาที่มีสีซึ่งแพร่กระจายในโซนการตรวจวัด (รูปแบบ 1) และการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสีบน μ PADs คือยังใช้สำหรับการตรวจวัดตะกั่วโดยใช้ซอฟต์แวร์ ImageJ เพื่อกำหนดค่า RGB (รูปแบบ 2) ทั้งสองวิธีสามารถใช้หาความเข้มข้นของตะกั่ว (II) ด้วยสัมประสิทธิ์ของการกำหนดที่เทียบเคียงได้ แต่ขึ้นอยู่กับวิธีวิเคราะห์ การออกแบบนี้ ง่าย สะดวก รวดเร็ว ราคาไม่แพง และใช้เพียงตาเปล่าในการตรวจวัด

2.7.2 โซเดียมโรโดโซเนต (Sodium Rhodizonate)

งานวิจัยในประเทศ

จินดา บำเพ็ญอยู่ (2535) การวิจัยเรื่อง โครงการการศึกษาการตรวจหาสารตะกั่วในตัวอย่างอากาศในสิ่งแวดล้อมการทำงานโดยวิธีการทางภาคสนามที่ง่ายและราคาถูก โดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย คือ การพัฒนาชุดทดสอบสำเร็จรูป (test kit) ในการตรวจหาปริมาณตะกั่วในตัวอย่างอากาศในสิ่งแวดล้อมการทำงาน การพัฒนาชุดทดสอบสำเร็จรูป ในการหาตะกั่วอากาศ อาศัยหลักการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารตะกั่ว กับ Dithizone ซึ่งละลายใน chloroform ที่ pH 6-11 ได้สารประกอบเชิงซ้อน Lead dithizonate

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของชุดทดสอบ พบว่า ผลการวิเคราะห์ที่ผิดพลาดจากวิธีวิเคราะห์มาตรฐานทางห้องปฏิบัติการ ไม่เกิน $\pm 25\%$ และพบว่า ผลการวิเคราะห์จากชุดทดสอบสำเร็จรูป กับผลการวิเคราะห์จากวิธีมาตรฐานทางห้องปฏิบัติการ มีความสัมพันธ์กัน 0.966

ตะวัน ไวยรัตน์ (2553) ได้ทำการวิจัยพัฒนาชุดตรวจสอบสารตะกั่วบนร่องรอยที่เกิดจากลูกกระสุนปืนออกแบบโดยอาศัยปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนสีชมพูอมม่วงของสารตะกั่วและ Rhodizanite ชุดตรวจสอบสารตะกั่วให้ประกอบด้วย 2 ส่วนที่แยกบรรจุในหลอดพลาสติกคือ หลอดพลาสติกที่ 1 “Lead Solvent” ได้แก่ HCL-KCL buffer pH 1 บรรจุในหลอดแก้วขนาดเล็กใช้สำหรับละลายตะกั่วตัวอย่างให้เป็นสารละลาย โดยที่ปลายด้านหนึ่งของหลอดพลาสติกมีเส้นใย Cellulose acetate บรรจุไว้เพื่อเป็นตัวเชื่อมสารละลายตะกั่ว หลอดพลาสติกที่ 2 “Lead Reagent” ได้แก่ หลอดแก้วขนาดเล็กบรรจุ Sodium Rhodizanite และหลอดบรรจุน้ำกลั่น ซึ่งเมื่อต้องการใช้งานให้ผสม Sodium Rhodizanite และน้ำกลั่น โดยการบีบหลอดแก้วให้แตกแล้วใช้หยดลงบนเส้นใย Cellulose acetate ที่เชื่อมสารละลายตะกั่วหรือตัวอย่างแล้ว

ผลการทดลองที่เป็นบวก Rhodizanite ทำปฏิกิริยากับตะกั่วได้สีชมพูอมม่วงของ Lead Rhodizanite ในการวิจัยนี้ได้ทดสอบอายุการใช้งานของชุดตรวจสอบโดยวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงเวลาต่างๆ เป็นเวลา 5 สัปดาห์ อายุการใช้งานของชุดทดสอบคำนวณโดยใช้สมการเส้นตรง พบว่าชุดตรวจสอบสามารถใช้งานนาน 3 ปี

งานวิจัยต่างประเทศ

Andreola et al. (2011) ได้ทำการศึกษาวิจัยเรื่องการประยุกต์ใช้ทางนิติวิทยาศาสตร์ของโซเดียมโรไดโซเนตและกรดไฮโดรคลอริก: เทคนิคจุลกายวิภาคศาสตร์ใหม่ สำหรับการตรวจคราบเขม่าดินปืน โดยยืนยันการมีอยู่ของตะกั่วจากคราบเขม่าดินปืน ด้วยเทคนิคการย้อมสีขึ้นเนื้อมนุษย์ เสนอโดย Owens and George ในปี 1991 สำหรับการตรวจสอบด้วยตาเปล่า ของตะกั่วบนเสื้อผ้าของเหยื่อที่ถูกยิง โดยปฏิกิริยาของ โซเดียม โรไดโซเนต (Sodium Rhodizonate) และการยืนยันภายหลังโดยการเปลี่ยนสีเมื่อใช้ HCl

ผลการทดลองเห็นถึงความเป็นไปได้ทางเทคนิคของการใช้เทคนิคการตรวจสอบด้วยตาเปล่านี้แม้ในตัวอย่างเนื้อเยื่อ และสนับสนุนความจำเป็นในการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับ คดีที่มีความสัมพันธ์กับประเภทของกระสุนและระยะยิง

Muneeba Butt (2016) ได้ทำการศึกษาวิจัย เรื่องการวิเคราะห์ร่องรอยของเขม่าดินปืนบนผ้าที่แตกต่างกันโดยใช้กระสุนที่ผลิตในท้องถิ่นในปากีสถาน วัตถุประสงค์ของการศึกษาคือตรวจหาลักษณะประกอบทางเคมีที่ปรากฏในเขม่าดินปืน ชาติ และการวิเคราะห์เชิงจุลภาคของเขม่าดินปืน โดยใช้ SEM/EDX องค์ประกอบของเขม่าดินปืนถูกวิเคราะห์ โดยใช้การทดสอบด้วยสารเคมี 3 ชนิด คือ การทดสอบด้วย Modified Griess การทดสอบด้วย Sodium Rhodizonate และการทดสอบด้วยDiphenylamine โดยการปรากฏของเขม่าดินปืนจะเกิดความเข้มสีที่แตกต่างกันซึ่งได้จากการบวกรวมการทางเคมีที่แตกต่างกัน โดยการทดสอบด้วย Sodium Rhodizonate ให้สีชมพูสำหรับการทดสอบสารตะกั่ว SEM แสดงภาพความแตกต่างของอนุภาคเขม่าดินปืนด้วยกำลังขยายสูงและพีคองค์ประกอบของ GSR ยังสามารถถูกพล็อตด้วย EDX

สรุปผลการทดลองได้ว่าอนุภาคเขม่าดินปืนบนผ้าที่แตกต่างกันไม่ขึ้นกับระยะยิงแต่ขึ้นอยู่กับเนื้อผ้า ในขณะที่ระยะยิงเพิ่มขึ้นความเข้มของ GSR ก็จะลดลงซึ่งถูกสังเกตจากการทดลองนี้ด้วย การศึกษานี้จะช่วยย้อนรอยเหตุการณ์การยิงเพื่อที่จะประมาณระยะจากปากกระบอกปืนถึงเป้าหมายได้มากถึง 7 ฟุต

Boracchi et al. (2017) ได้ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง มลพิษซากศพจากสิ่งแวดล้อมสามารถนำไปสู่ผลบวกที่ไม่ถูกต้องในการวิเคราะห์การย่อยสลายของเขม่าดินปืนได้หรือไม่? ศึกษาตัวอย่างผิวหนังซากศพ โดยประเมินความเฉพาะเจาะจงของการทดสอบโซเดียม โรไดโซเนต (Sodium Rhodizonate) เพื่อค้นคว้าเกี่ยวกับอนุพันธ์ของตะกั่วจากมลพิษในสิ่งแวดล้อม ใช้การทดสอบโซเดียม โรไดโซเนต (Sodium Rhodizonate) และ 5% HCL โดยแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม ซึ่งมีสาเหตุการตาย ไม่เกี่ยวข้องกับบาดแผลถูกยิง : กลุ่ม A ประกอบด้วยศพ จำนวน 25 ศพ ที่พบในพื้นที่เปิดแล้วเป็นเวลานาน กลุ่ม B ประกอบด้วยศพ จำนวน 16 ศพ ซึ่งถูกขุดหลังจากระยะเวลา 11 ปี โดยใช้การทดสอบย้อมสีดังกล่าวกับผิวหนังตัวอย่าง พบว่าทั้ง 2 กลุ่ม ไม่ปรากฏ การติดสีของโลหะที่มีความใกล้เคียงกับตะกั่วใน GSR

ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่า การทดสอบนี้มีความเฉพาะเจาะจงกับ GSR ที่มาจากการยิงปืน โดยไม่มีผลกระทบจากการปนเปื้อนจากสิ่งแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้นของสารมลพิษโลหะหนักที่มาจากอากาศหรือดิน

Boracchi et al. (2018) ได้ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง มลพิษซากศพจากสิ่งแวดล้อมสามารถนำไปสู่ผลบวกที่ไม่ถูกต้องในการวิเคราะห์การย่อยสลายของเขม่าดินปืนได้หรือไม่? ศึกษาเชิงลึกโดยวิเคราะห์ด้วย ICP-MS ในตัวอย่างผิวหนังซากศพ โดยแบ่งตัวอย่างผิวหนังออกเป็น 2 กลุ่ม ซึ่งมีสาเหตุการตาย ไม่เกี่ยวข้องกับบาดแผลถูกยิง: กลุ่ม A ประกอบด้วยศพ จำนวน 25 ศพ ที่พบในพื้นที่เปิดแล้วเป็นเวลานาน กลุ่ม B ประกอบด้วยศพ จำนวน 16 ศพ ซึ่งถูกขุดหลังจากระยะเวลา 11 ปี โดยกลุ่มควบคุมที่มีผลบวก ใช้ตัวอย่างผิวหนังจำนวน 2 ตัวอย่างซึ่งเสียชีวิตจากการถูกยิง และ กลุ่มควบคุมที่มีผลลบ ใช้ตัวอย่างจำนวน 3 ประเภทที่แตกต่างกัน ของพาราฟินสไลด์ที่ไม่รวมวัสดุชีวภาพ

ผลการวิเคราะห์ด้วย ICP-MS การประเมินตัวอย่างกลุ่ม A, B และกลุ่มควบคุมที่มีผลลบ ให้ผลเป็นลบสำหรับร่องรอยของ ตะกั่ว (Pb), แบเรียม (Ba) และ แอนติโมนี (Sb) ในทางกลับกัน ความเข้มข้นของ GSR ถูกพบมากขึ้นในกลุ่มควบคุมที่มีผลบวกซึ่งได้จากเหยื่อที่เสียชีวิตด้วยการถูกยิง

สรุปการทดลองได้ว่าสารตะกั่วจากสิ่งแวดล้อมไม่ปนเปื้อนซากศพที่ถูกพบกลางแจ้งหรือศพที่ถูกฝัง ซึ่งยืนยันจากการใช้เทคนิค ICP-MS การยืนยันด้วยการทดสอบโซเดียม โรไดโซเนต (Sodium Rhodizonate) และ 5% HCL โซเดียม โรไดโซเนต (Sodium Rhodizonate) มีความไวมากสำหรับแก้ปัญหาสาเหตุการตายจากการถูกยิง

Gentile et al. (2020) ได้ทำการศึกษาเรื่อง มีความเป็นไปได้หรือไม่ที่จะพบอนุพันธ์ของตะกั่วจากเขม่าปืนในกระดุกมนุษย์ที่เสื่อมสลาย โดยการย้อมสีด้วยโซเดียม โรโดโซเนต (Sodium Rhodizonate) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการทดสอบอนุพันธ์ของตะกั่วจากเขม่าดินปืน (Gunshot Residues (GSR)) ในกระดุกมนุษย์โดยใช้เทคนิคการวัดสีตลอดจนความเป็นไปได้ในการรบกวนการเสื่อมสลายของกระดุกบนความคงตัวของอนุภาคเหล่านี้ โดยทำการทดลองจากซากศพซึ่งถูกเก็บรักษาเป็นอย่างดีจำนวน 22 ตัวอย่าง โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม: กลุ่ม A คือผู้เคราะห์ร้าย 11 ราย ที่เสียชีวิตเนื่องจากอาการบาดเจ็บจากกระสุนปืน (สุมตัวอย่างกระดุกและเนื้อเยื่ออ่อนจากความสอดคล้องของบาดแผลจากกระสุนปืน) และ กลุ่ม B คือผู้เสียชีวิต 11 ราย ด้วยสาเหตุจากธรรมชาติ (สุมตัวอย่างจากบริเวณผิวหนังที่ไม่บุบสลาย) ตัวอย่างทั้งหมด หลังจากกระบวนการ decalcification สำหรับตัวอย่างกระดุกด้วยสารละลาย HCl 14% ได้ผ่านขั้นตอนทางจุลกายวิภาคมาตรฐานและย้อมด้วย hematoxylin และ eosin (H&E), โซเดียม โรโดโซเนต (Na-R) และโซเดียมโรโดโซเนตที่เป็นกรด (Na-R-HCl 5 %) เนื้อเยื่ออ่อนเพิ่มเติมสองสไลด์ของแต่ละกลุ่มถูกนำไปเตรียมด้วย HCl 14% ก่อนที่จะถูกย้อมด้วยการย้อมสีในทำนองเดียวกัน ในกลุ่ม A ตัวอย่าง 10 ตัวอย่างจาก 11 ตัวอย่างให้ผลเป็นลบต่อเทคนิค Na-R และ Na-R-HCl 5% ในขณะที่เนื้อเยื่ออ่อนที่เกี่ยวข้องทั้งหมดทำให้ผลเป็นบวกสำหรับการย้อมสีเดียวกัน สไลด์เนื้อเยื่ออ่อนเพิ่มเติมที่ทดสอบด้วยสารละลาย HCl 14% ให้ผลเป็นลบ ใน 10 ตัวอย่าง จากทั้งหมด 11 ตัวอย่าง ไม่พบตัวอย่างในกลุ่ม B ที่แสดงผลในเชิงบวกต่อขั้นตอนการย้อมสีทั้งที่มีหรือไม่มี การบำบัดล่วงหน้าด้วย HCl 14%

การศึกษาค้นคว้าคราบเขม่าดินปืนบนกระดุกของมนุษย์จึงไม่สามารถดำเนินการได้ด้วยเทคนิค Na-R และ Na-R-HCl 5% เนื่องจากขั้นตอน decalcifying จำเป็นจะปรับเปลี่ยนความคงตัวของสารตกค้าง ดังนั้นจึงทำให้ผลการทดลองเกิดการเจือปน

Werner et al. (2020) ได้ทำการศึกษาวิจัยเรื่องการเปรียบเทียบวิธีการเก็บรวบรวมตัวอย่าง 3 วิธี สำหรับตรวจหาเขม่าปืนที่มีมือ โดยใช้โซเดียม โรโดโซเนต (Sodium Rhodizonate) โดยเก็บตัวอย่างที่แตกต่างกันจากตำรวจภูมิภาคในสวิส ดังนี้ ตัวอย่างถูกเก็บจากมือของผู้ยิงปืนด้วยกระดากกรอง (Filter Method) กระดากภาพถ่าย (AF Photo Method) และกระดากที่เคลือบด้วย โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (AF PVAL Method) ทำการทดลองที่ 2 สภาวะ คือ มือที่แห้ง และมือที่ชื้น ดำเนินการจากมือข้างที่ถนัด (ขวา) เท่านั้น เนื่องจากปฏิกิริยาเชิงบวกส่วนใหญ่สังเกตได้บนมือนี้ สารตกค้างถูกทำให้ปรากฏขึ้นโดยใช้การทดสอบด้วยโซเดียม โรโดโซเนต (Sodium Rhodizonate) การทดสอบเบื้องต้นประเมินความเป็นไปได้โดยยืนยันด้วยการสแกนกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนควบคู่ไปกับรังสีเอกซ์กระจายพลังงาน สเปกโทรสโกปี (SEM/EDX) ทำการวิเคราะห์หลังจากทำการทดสอบทางเคมีกับตัวอย่างจำนวนหนึ่งโดยตัดบริเวณที่ให้ผลบวกและติดตั้ง

บน stubs เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้รับในแง่ของประสิทธิภาพ คือจำนวนของบริเวณที่เกิดผลบวก ความต้องการด้านเวลา คุณภาพของการวิเคราะห์ SEM-EDX ความง่ายต่อการใช้งานและต้นทุน

ผลการศึกษาพบว่า Filter Method ให้ผลการทดสอบที่มีคุณภาพสูง โดยการทดสอบทั้งมือที่แห้งและมือที่ชื้น อีกทั้งเป็นวิธีที่ง่าย รวดเร็ว และมีการยืนยันประสิทธิภาพด้วย SEM-EDX AF Photo Method ให้ผลการทดลองได้ดีกับมือที่แห้ง แต่ไม่เกิดผลกับมือที่ชื้น AF PVAL Method การวิเคราะห์ด้วย SEM-EDX แสดงว่า Filter Method และ AF Photo Method ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

สรุปว่า Filter Method ให้ผลโดยรวมดีที่สุด แต่การทดสอบต้องใช้เวลามากขึ้นเล็กน้อยและใช้ความชำนาญมากกว่าวิธีอื่นๆ

จากการศึกษาเอกสารและการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมาทั้งหมดนั้นจะเห็นได้ว่าการศึกษาเกี่ยวกับการตรวจเบื้องต้น เพื่อหาสารตะกั่วที่เกิดจากการยิงปืนนิยมทำโดยใช้วิธีทดสอบโซเดียม โรไดโซเนต (Sodium Rhodizonate test) สังเกตการปรากฏขึ้นของการเปลี่ยนสีของสารเคมี เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ผลทดสอบเบื้องต้นอย่างรวดเร็ว มีขั้นตอนไม่ยุ่งยาก ซึ่งผู้วิจัยได้นำมาวิเคราะห์สรุปเป็นประเด็นได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 1 สรุปประเด็นที่ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนา μ PADs

ประเด็นที่ศึกษา	รังสี	ทีวี	ออร์ลูชา	เบญจวรรณ	Wang, W., et al.	Sun, H., et al.	Buking, S., et al.	Wisang et al.
1. พัฒนา μ PADs สำหรับตรวจวัดไนเตรท และไนไตรท์ในเขม่าดินปืน	✓		✓					
2. พัฒนา μ PADs สำหรับวิเคราะห์ปริมาณธาตุตะกั่ว		✓			✓	✓	✓	✓
3. พัฒนา μ PADs สำหรับตรวจวิเคราะห์โลหะหนัก				✓				

ตารางที่ 2 สรุปประเด็นที่ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีทดสอบ โซเดียมโรโดโซเนต (Sodium Rhodizonate test)

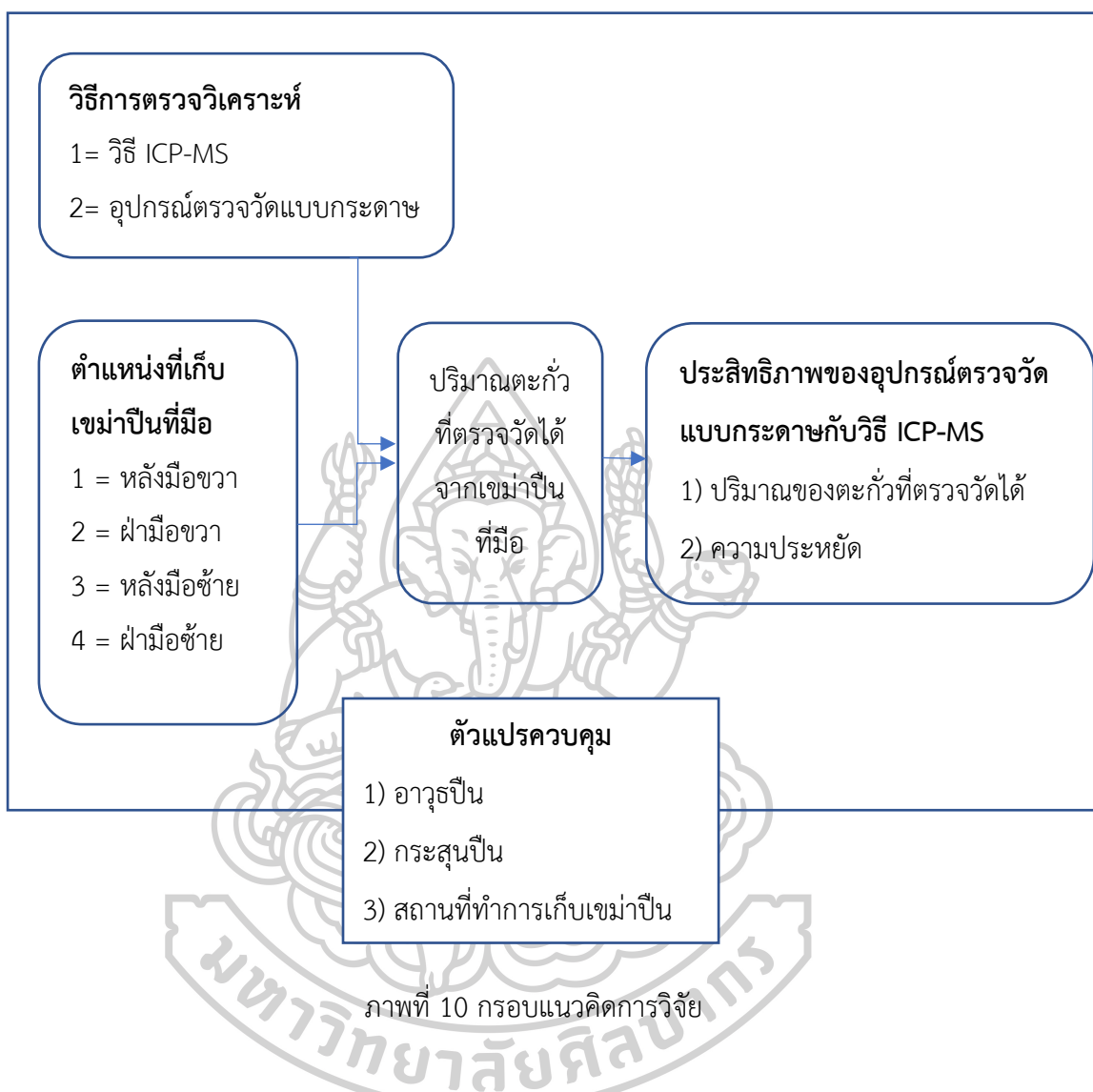
ประเด็นที่ศึกษา	จินดา	ตะวัน	Andreola	Muneeba	Boracchi	Gentile	Werner
1. ศึกษาการตรวจหาสารตะกั่วในตัวอย่างอากาศ	√						
2. พัฒนาระดาศทดสอบตะกั่ว		√					
3. ศึกษาการใช้เทคนิค Na-R			√				
4. ศึกษาเขม่าดินปืนบนผ้า				√			
5. ศึกษาการมีอยู่ของตะกั่วในศพ					√	√	
6. ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการเก็บรวบรวมตัวอย่างสำหรับตรวจหาเขม่าดินปืนที่มี							√

จากการทบทวนและวิเคราะห์งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมดเพื่อนำไปสู่การกำหนดกรอบแนวคิดในการวิจัยและสร้างข้อค้นพบใหม่ จะพบว่า

1) **ในด้านประเด็นที่ศึกษา** โดยรวมเป็นการศึกษาการตรวจวัดธาตุหรือสารต่างๆ ในตัวอย่างที่สนใจ ด้วยอุปกรณ์ μ PADs เพื่อลดค่าใช้จ่าย ขั้นตอน และ ระยะเวลาในการตรวจวัด โดยหาปริมาณของธาตุหรือสารนั้นๆ โดยอาศัยเทคนิคการเกิดปฏิกิริยาเคมีของตะกั่วและโรโดโซเนตโดยให้สีเกิดขึ้นติดตามค่าความเข้มของสีโดยใช้โปรแกรม ImageJ แต่ในส่วนของแนวทางการศึกษาปริมาณของธาตุจากเขม่าดินปืนที่มี ยังไม่มีการศึกษาวิจัย เป็นเพียงการศึกษาการหาปริมาณของธาตุที่สนใจโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษเท่านั้น ยกตัวอย่าง เช่น ทวี หนาวร et al. (2560) ได้ศึกษาวิจัยเรื่อง “การพัฒนาชุดทดสอบแบบเรียบและตะกั่วด้วยอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์แบบกระดาษ” และ Buking et al. (2018) ได้ศึกษาวิจัยเรื่อง “อุปกรณ์ตรวจวัดของไหลจุลภาคแบบกระดาษสำหรับตรวจวิเคราะห์ปริมาณของตะกั่วโดยใช้ความยาวแถบปฏิกิริยาเพื่อระบุกระดูกสันป็นและศักยภาพในการประมาณระยะยิง”

2) **ในด้านกลุ่มตัวอย่าง** จะพบว่าส่วนใหญ่เป็นการศึกษาโดยใช้ตัวอย่างตะกั่วจากแหล่งตัวอย่างทางชีววิทยา เช่น เลือด ปัสสาวะ ซึ่งยังไม่พบที่ศึกษาปริมาณตะกั่วในด้านนิติวิทยาศาสตร์ โดยเฉพาะ การเก็บตัวอย่างจากเขม่าดินปืนที่มี ดังนั้น วัตถุประสงค์ของการศึกษาจึงมุ่งเน้นในการศึกษาการหาปริมาณตะกั่ว โดยเก็บตัวอย่างจากเขม่าดินปืนที่มี ของอาสาสมัคร จำนวน 10 คน และนำผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มาตอบคำถามการวิจัย

2.8 กรอบแนวคิดการวิจัย



ภาพที่ 10 กรอบแนวคิดการวิจัย

จากภาพที่ 10 แสดงกรอบแนวคิดการวิจัย โดยมีตัวแปรต้นเป็นวิธีการตรวจวิเคราะห์ และตำแหน่งที่เก็บขี้เถ้าป่นที่มี ตัวแปรตามเป็นปริมาณตะกั่วที่ตรวจวัดได้จากขี้เถ้าป่นที่มี ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษกับวิธี ICP-MS ประเมินจากค่า 1) ปริมาณของตะกั่วที่ตรวจวัดได้ และ 2) ความประหยัด และมีตัวแปรควบคุมเป็น อารูธปิ่น กระสุนปิ่น และสถานที่ทำการเก็บขี้เถ้าป่น

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยเรื่อง “การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษกับวิธี ICP-MS สำหรับตรวจหาปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าป็นที่มีมือ” เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Design) ผู้วิจัยได้กำหนดวิธีดำเนินการวิจัยออกเป็น เป็น 5 ขั้นตอน ได้แก่

- 3.1 การศึกษาเพื่อกำหนดกรอบแนวคิดในการวิจัย
- 3.2 การกำหนดอาสาสมัคร
- 3.3 การเตรียมอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย
- 3.4 การทดลองและการเก็บรวบรวมข้อมูล
- 3.5 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 การศึกษาเพื่อกำหนดกรอบแนวคิดในการวิจัย

ในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้เตรียมตัวเข้าสู่การดำเนินการศึกษาค้นคว้าและวิเคราะห์ข้อมูลจากเอกสารหรือการวิจัยเชิงเอกสาร (Documentary research) ด้วยการทบทวนแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จากหนังสือ วารสาร เอกสารวิชาการ บทความจากสื่อและสิ่งพิมพ์ต่าง ๆ ฯลฯ เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์แบบกระดาษสำหรับตรวจหาสารตะกั่วที่เกิดจากการยิงปืน โดยประเมินประสิทธิภาพจากการปรากฏขึ้นของสี ตามแนวคิด ทฤษฎี ผลงานวิจัย รวมทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนำมาวิเคราะห์เพื่อให้ได้ข้อสรุปเป็นกรอบแนวคิดในการวิจัย เพื่อสังเคราะห์ข้อมูลและนำไปกำหนดแนวทางในการเก็บรวบรวมข้อมูล และออกแบบวิธีการทดลองเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการเก็บรวบรวมข้อมูลในการศึกษาขั้นต่อไป

3.2 การกำหนดอาสาสมัคร

ได้จากการกำหนดขนาดของตัวอย่างเพื่อการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย 2 กลุ่มที่สัมพันธ์กัน โดยโปรแกรม G* Power ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 อำนาจการทดสอบ 0.80 ขนาดอิทธิพล 0.90 เสนอว่าขนาดตัวอย่างต้องมีอย่างน้อย 10 คน ผู้วิจัยจึงกำหนดอาสาสมัครจำนวน 10 คน

จริยธรรมในการวิจัย

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยให้ความสำคัญและตระหนักถึงสิทธิส่วนบุคคลของอาสาสมัครที่เข้าร่วมวิจัยและเพื่อป้องกันมิให้เกิดผลเชิงลบต่ออาสาสมัครโดยมิได้เจตนา จึงกำหนดแนวทางการศึกษาด้านจริยธรรมในการวิจัยไว้ดังนี้

1. ผู้วิจัยได้จัดทำเอกสารเพื่อยินยอมเข้าร่วมการวิจัย และมอบให้แก่อาสาสมัครเพื่อพิจารณาเข้าร่วมงานวิจัยด้วยความสมัครใจ พร้อมกับชี้แจงวัตถุประสงค์การวิจัยให้ทราบและอธิบาย ให้เข้าใจ เปิดโอกาสให้ซักถามและให้เวลาสำหรับการตัดสินใจ เพื่อให้การตัดสินใจเข้าร่วมโครงการเป็นไปด้วยความเข้าใจ เต็มใจและสมัครใจ

2. ในการเก็บรวบรวมข้อมูล ผู้วิจัยได้คำนึงถึงสถานะของผู้วิจัยและอาสาสมัคร โดยจะมีการสร้างบรรยากาศในการเก็บรวบรวมข้อมูลให้มีความผ่อนคลาย และจะไม่แสดงท่าทางข่มขู่หรือวางตัวให้เห็นว่าอาสาสมัคร

3. ข้อมูลที่ได้รับจากอาสาสมัคร ผู้วิจัยจะนำมาใช้ในการวิเคราะห์และประมวลผลเพื่อนำเสนอในภาพรวมเท่านั้น จะไม่มีการเปิดเผยข้อมูลของอาสาสมัครรายใดรายหนึ่งต่อสาธารณะแต่อย่างใด

3.3 การเตรียมอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ ได้แก่

- 1) เครื่อง Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry (ICP - MS)
- 2) เครื่องกวนสารละลายพร้อมให้ความร้อน
- 3) เครื่องชั่งไฟฟ้า 2 ตำแหน่ง
- 4) Ultrasonic water bath
- 5) กล้องถ่ายภาพ DSLR ยี่ห้อ Nikon D7200
- 6) อารูสปืนพกชนิดอัตโนมัติ
- 7) Block screen
- 8) Micropipette
- 9) กระดาษกรองเบอร์ 1 เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.25 เซนติเมตร
- 10) Beaker
- 11) หลอดทดลอง
- 12) กระบอกตวง
- 13) Dropper

- 14) ถุงมี้อยาง
- 15) เทียนไขขี้ผึ้ง

3.3.2 สารเคมี ได้แก่

- 1) สารละลายมาตรฐานตะกั่ว (Lead Standard for AAS) ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร (Pb in nitric acid)
- 2) Tartaric acid
- 3) Sodium hydrogen tartrate
- 4) กรดไนตริก (Nitric acid, HNO_3)
- 5) เลด(II) ไนเตรต (Lead (II) nitrate, $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$)
- 6) โซเดียมโรไดโซเนต (Sodium rhodizonate dibasic, $\text{C}_6\text{Na}_2\text{O}_2$)
- 7) Distilled water

3.3.3 การเตรียมสารเคมี

- 1) กรดไนตริก 5% ; เจือจาง Nitric acid 70% ในน้ำกลั่น
- 2) สารละลายมาตรฐานตะกั่ว ในช่วงความเข้มข้น 1-10 ppm
- 3) สารละลาย Tartrate Buffer ; 7.5 กรัม tartaric acid และ 9.5 กรัม sodium hydrogen tartrate ละลายในน้ำกลั่น 100 ml (2018, Supatana)
- 4) รีเอเจนท์ ละลาย Sodium Rhodizonate 0.0100 กรัม ในน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร

3.3.4 ขั้นตอนการประดิษฐ์อุปกรณ์กระดาษด้วยวิธีการพิมพ์สกรีนด้วยเทียนไขขี้ผึ้ง (Wax screen printing)

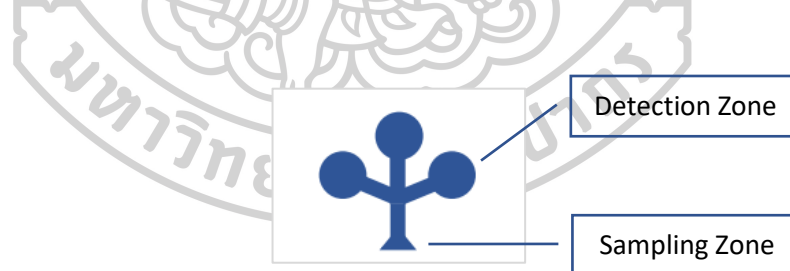
ออกแบบ Block screen โดยโปรแกรมไมโครซอฟท์ เพาเวอร์พอยต์ (Microsoft power point) จำนวนทั้งหมด 3 รูปแบบ มีรายละเอียดดังนี้

1. รูปแบบที่ 1 มีลักษณะคล้ายรูปดัมเบลที่ด้านปลายเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร เชื่อมกันด้วยช่องทางไหลที่มีความยาว 15 มิลลิเมตร และมีความกว้าง 2 มิลลิเมตร ที่ปลายด้านหนึ่งทำหน้าที่เป็นพื้นที่ตรวจวัด (Detection zone) ที่บรรจุสารรีเอเจนต์ และอีกด้านเป็นพื้นที่หยดตัวอย่าง (Sampling zone) แสดงดังภาพที่ 11



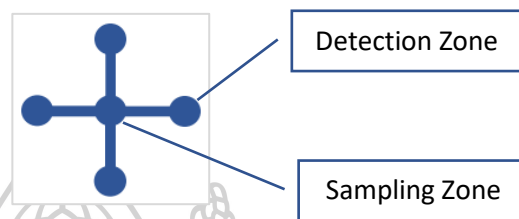
ภาพที่ 11 อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาศรูปแบบที่ 1

2. รูปแบบที่ 2 (Ortiz-Gomez et al., 2016) ที่ด้านล่างเป็นสามเหลี่ยมฐานยาว 5 mm สูง 3 มิลลิเมตร เป็นพื้นที่หยดสารตัวอย่าง (sampling zone) และเชื่อมกับช่องทางไหลหลักที่ยาว 5 มิลลิเมตร กว้าง 2 มิลลิเมตร และแตกออกเป็น 3 แขนเชื่อมกับวงกลมที่ด้านปลายที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร เป็นพื้นที่ตรวจวัด (detection zone) โดยเชื่อมด้วยช่องทางไหลย่อยยาว 5 มิลลิเมตร กว้าง 2 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 12



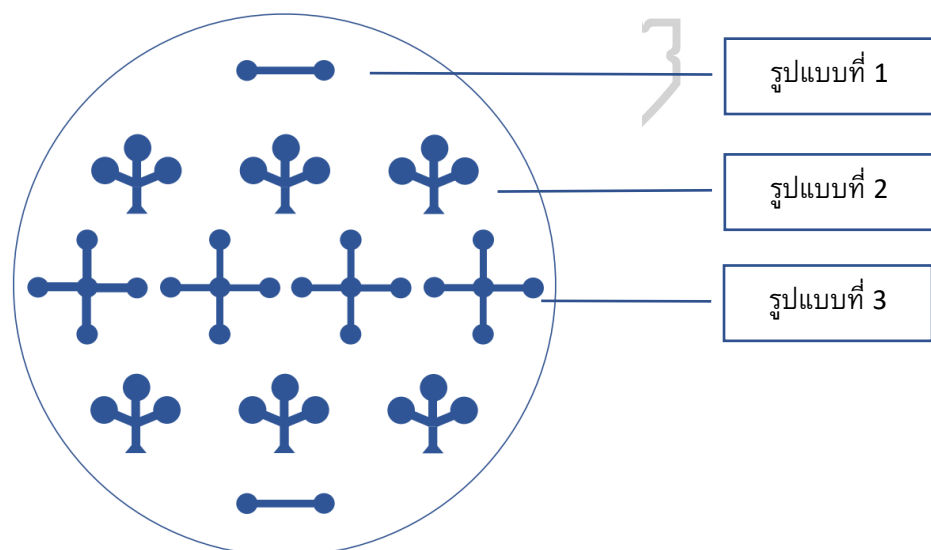
ภาพที่ 12 อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาศรูปแบบที่ 2

3. รูปแบบที่ 3 มีวงกลมตรงกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ทำหน้าที่เป็นพื้นที่หยุดสารตัวอย่าง (sampling zone) และแตกออกเป็น 4 แขน ซึ่งเป็นช่องทางไหลสำหรับบรรจุตัวรีดิทซ์ในเตรท และไปเชื่อมกับวงกลมที่ด้านปลายที่เป็นพื้นที่ตรวจวัด (detection zone) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร เช่นเดียวกันช่องทางไหลมีความยาว 7 มิลลิเมตร และมีความกว้าง 2 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 13



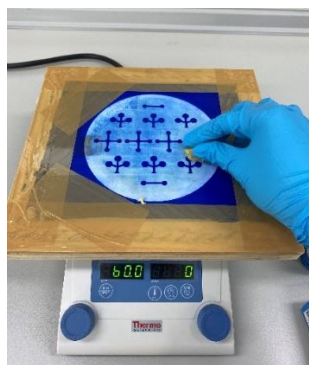
ภาพที่ 13 อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษรูปแบบที่ 3

จัดวางรูปแบบอุปกรณ์ตรวจวัดทั้ง 3 รูปแบบ ให้พอดีกับกระดาษกรองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 125 มิลลิเมตร และนำไปพิมพ์บล็อกสกรีน พื้นที่สีน้ำเงินเป็นพื้นที่ของกระดาษซึ่งกำหนดให้เป็นช่องทางไหลของสาร พื้นที่สีขาวเป็นบริเวณที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic area) โดยจะถูกสกรีนทับด้วยไขผึ้ง ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 รูปแบบอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ ที่ออกแบบด้วยโปรแกรมไมโครซอฟท์ เพาเวอร์พอยต์ (Microsoft power point) สำหรับนำไปประดิษฐ์ Block screen

นำ Blockscreen ที่ได้วางบนกระดาษกรอง สกรีนบน Hot plate ที่อุณหภูมิ ประมาณ 60°C เป็นเวลา 10-15 วินาที (ภาพที่ 15 (a)) หรือจนกว่าสีฝุ่นจะละลายและซึมลงใน กระดาษกรอง (ภาพที่ 15 (b))



(a)



(b)

ภาพที่ 15 วิธีประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ

3.4 การทดลองและการเก็บรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนในการทดลองและการเก็บรวบรวมข้อมูลออกเป็น 5 ขั้นตอน ได้แก่

3.4.1 ขั้นตอนการเก็บเขม่าป็นที่มีมือ

3.4.2 ขั้นตอนการถ่ายภาพ

3.4.3 การหาสภาวะที่เหมาะสม (Optimization)

3.4.4 การวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS)

3.4.5 การวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วในสารละลายตัวอย่างด้วยอุปกรณ์แบบกระดาษที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบกับวิธี ICP-MS

3.4.1 ขั้นตอนการเก็บเขม่าป็นที่มีมือ

ทำการเก็บตัวอย่างเขม่าป็นบนฝ่ามือและหลังมือทั้งสองข้าง ณ สนามยิงปืนรัตนรุศ ค่ายสุรสีห์ จังหวัดกาญจนบุรี จากอาสาสมัครให้ความร่วมมือเก็บตัวอย่างเขม่าป็น จำนวน 10 คน กำหนดให้อาสาสมัคร ล้างมือให้สะอาดก่อนยิงปืน ยิงปืนด้วยท่ายืน จับปืนด้วยมือทั้งสองข้าง ยิงจำนวน 3 นัด ติดกัน และทำการเก็บตัวอย่างทันที (Vanini et al., 2015) โดยใช้อาวุธปืนชนิดออโตเมติก ยี่ห้อ BARETTA ขนาด 9 มม. ตลอดการทดลอง



ภาพที่ 16 ภาพแสดงท่าทางการยิงปืนของอาสาสมัคร

เตรียมอุปกรณ์

1. เตรียมถุงซิปลจำนวน 5 ถุง แต่ละถุงให้เขียนข้อความดังนี้
 - ถุงที่ 1 เขียนว่า กรดตัวอย่าง
 - ถุงที่ 2 เขียนว่า หลังมือขวา
 - ถุงที่ 3 เขียนว่า ฝ่ามือขวา
 - ถุงที่ 4 เขียนว่า หลังมือซ้าย
 - ถุงที่ 5 เขียนว่า ฝ่ามือซ้าย
2. เตรียมก้านสำลีพันปลายพลาสติก โดยตัดปลายข้างหนึ่งออก จำนวน 5 ก้าน
3. กรดไนตริกความเข้มข้น 5% จำนวน 1 ขวด



ภาพที่ 17 อุปกรณ์เก็บเขม่าปืนที่มีือ

วิธีการเก็บเขม่าป็นที่มีมือ

1. หยดกรดไนตริกความเข้มข้น 5% ประมาณ 3-4 หยด บนสำลีก้อนที่ 1 แล้วบรรจุใส่ถุงที่ 1 เพื่อเป็นกรดตัวอย่าง
2. หยดกรดไนตริกความเข้มข้น 5% ลงบนสำลีก้อนที่ 2 ประมาณ 3-4 หยด (พอมดๆ ไม่เปียกชุ่ม) เริ่มขีดตั้งแต่บริเวณข้อมือไปจนถึงปลายนิ้ว จากนั้นหัวแม่มือไปจนถึงนิ้วก้อย โดยการหมุนหรือกลิ้งสำลีไปทางเดียวกันตลอดจนทั่วบริเวณ ห้ามขีดกลับไปกลับมาจากนั้นบรรจุใส่ถุงที่ 2 (หลังมือขวา)
3. สำหรับสำลีที่ 3, 4 และ 5 ให้ขีดที่ฝ่ามือขวา, หลังมือซ้าย และฝ่ามือซ้าย โดยปฏิบัติเช่นเดียวกับข้อ 3 แล้วบรรจุใส่ถุงที่ 3, 4 และ 5 ตามลำดับ



(a)



(b)



(c)



(d)

ภาพที่ 18 แสดงการเก็บตัวอย่างเขม่าป็นที่มีมือ 4 ตำแหน่ง

- (a) บริเวณหลังมือขวา
- (b) บริเวณฝ่ามือขวา
- (c) บริเวณหลังมือซ้าย
- (d) บริเวณฝ่ามือซ้าย

3.4.2 ขั้นตอนการถ่ายภาพ

เนื่องจากระบบสี RGB มีขอบเขตสีกว้างขวางไม่แน่นอน (Non Absolute Color Space) การวัดค่าสีในระบบจะขึ้นอยู่กับผลกระทบจากปัจจัยภายนอก เช่น เซนเซอร์ของกล้องและแหล่งกำเนิดแสงภายนอก ดังนั้น เพื่อควบคุมสภาวะแวดล้อมในการบันทึกภาพให้เหมาะสม ป้องกันการรบกวนจากปัจจัยภายนอก ลดผลกระทบจากแหล่งกำเนิดแสงอื่นๆ (León et al., 2006) งานวิจัยนี้จึงจัดเตรียมอุปกรณ์และการบันทึกภาพ ณ ห้องถ่ายภาพวัตถุพยาน (Evidence Photography room) พิสูจน์หลักฐานจังหวัดกาญจนบุรี โดยใช้กล้องถ่ายรูป DSLR Nikon D7200 60 mm ถ่ายภาพ โดยใช้โหมด A ค่าความไวแสง (ISO) 6400 รูรับแสง (F) 20 Speed Shutter 1/250 วินาที



ภาพที่ 19 ห้องถ่ายภาพวัตถุพยาน (Evidence Photography room)

3.4.3 การหาสภาวะที่เหมาะสม (Optimization)

3.4.3.1 การศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของสารละลายอิมตัวโซเดียมโรโดไซด์ สำหรับหยดลงบนบริเวณตรวจวัด (Detection zone)

เตรียมสารละลายอิมตัวโซเดียมโรโดไซด์โดยใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นตัวทำละลาย จากนั้นทำการหยดลงบนกระดาษบริเวณตรวจวัด ที่ปริมาณต่างๆ ได้แก่ 0.1, 0.2 และ 0.3 ไมโครลิตร ตามลำดับ สังเกตการซึมแพร่ของสารละลายภายในพื้นที่วงกลมและทำการเลือกปริมาณที่เหมาะสมของสารละลายอิมตัวโซเดียมโรโดไซด์ซึ่งซึมแพร่เต็มบริเวณวงกลมพอดี สำหรับหยดลงบนกระดาษเพื่อใช้ในการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ต่อไป

3.4.3.2 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการใช้สารละลายอิมตัวโซเดียมโรโดไซเนตเพื่อทำปฏิกิริยา

หยดสารละลายอิมตัวโซเดียมโรโดไซเนตปริมาตร 1 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษบริเวณตรวจวัด บันทึกภาพเมื่อเวลาผ่านไป 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ วัดค่าความเข้มสีจากภาพถ่ายบริเวณ DZ ด้วยโปรแกรมอิมเมจ (Image J) เพื่อสังเกตความคงตัวของสารละลายโซเดียมโรโดไซเนต และเลือกช่วงเวลาที่เหมาะสมที่สามารถใช้งานสารละลายอิมตัวโซเดียมโรโดไซเนตในการทำปฏิกิริยาบนกระดาษ เพื่อใช้ในการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์

3.4.4.3 การศึกษาช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับสร้างกราฟมาตรฐาน

เตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่ว เข้มข้น 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 ppm ตามลำดับ จากนั้นหยดสารละลายมาตรฐานตะกั่ว ลงบนกระดาษบริเวณ Sample zone ทิ้งไว้ให้แห้ง แล้วจึงหยดสารละลายอิมตัวโซเดียมโรโดไซเนต ปริมาตร 2 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษบริเวณเดิม บันทึกภาพที่เวลาต่างกัน คือ 30, 40 และ 50 นาที และวัดค่าความเข้มสีจากภาพถ่ายด้วยโปรแกรมอิมเมจ เลือกช่วงความเข้มข้นที่ทำให้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับค่าความเข้มสีที่จำเพาะกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานตะกั่ว เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ธาตุตะกั่วด้วยอุปกรณ์แบบกระดาษต่อไป

3.4.4 การวิเคราะห์ปริมาณตะกั่ว ด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) (ธนงศักดิ์ บุญมาก., 2564: 96)

เตรียมตัวอย่างโดยนำก้านสำลีที่เก็บตัวอย่างจากเขม่าป็นที่มีมือ แซ้ในสารละลายกรดไนตริก 5% ปริมาตร 10 ml. ในหลอดทดลอง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายวิเคราะห์หาปริมาณธาตุตะกั่วด้วยเครื่อง ICP-MS ควบคุมสถานะของเครื่องให้อยู่ในสถานะที่เหมาะสม ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สถานะเครื่อง Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS)

Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS)	
Detector Type	SQ
Nebulizer	Mira Mist (G3161)
Spray Chamber	Quartz
Torch	Quartz
Carrier Gas	1 L/min
Makeup Gas	0.1 L/min

3.4.5 การวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วในสารละลายตัวอย่างด้วยอุปกรณ์แบบ กระดาษที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐาน ICP-MS

เตรียมตัวอย่างโดยนำก้านสำลีที่เช็ดเขม่าป็นที่มือ แขนในหลอดทดลอง ที่มีสารละลาย Tartrate buffer 10 ml นำไปสกัดด้วยวิธี Ultrasonic ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (Vanini et al., 2015) จากนั้นนำสารละลายที่ได้ หยดลงบนอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ สังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงของสี และบันทึกภาพ

3.5 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลตามความมุ่งหมายและสมมติฐานของการวิจัย โดยทำการประมวลผลข้อมูลในการทดลองด้วยโปรแกรม SPSS ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.5.1 การกำหนดค่าตัวแปร การกำหนดตัวแปรต่างๆ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง มีดังนี้

1) วิธีการตรวจวิเคราะห์ปริมาณตะกั่ว เป็นข้อมูลระดับนามบัญญัติ (Nominal Scale) โดยกำหนดให้

1 = อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ

2 = วิธี ICP-MS

2) ตำแหน่งที่เก็บเขม่าป็นที่มือ เป็นข้อมูลระดับนามบัญญัติ (Nominal Scale) โดยกำหนดให้

1 = หลังมือขวา

2 = ฝ่ามือขวา

3 = หลังมือซ้าย

4 = ฝ่ามือซ้าย

3) ปริมาณของตะกั่วที่ตรวจวิเคราะห์ได้ เป็นข้อมูลระดับมาตราวัดอัตราส่วน (Ratio Scale) หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

3.5.2 วิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นของกลุ่มตัวอย่าง ด้วยสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ความถี่ ร้อยละ ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.5.3 วิเคราะห์การแจกแจงของข้อมูล โดยใช้ค่าสถิติแบบ Kolmogorov – Smirnov Test หากการแจกแจงของข้อมูลเป็นปกติ ใช้วิเคราะห์เปรียบเทียบปริมาณตะกั่วระหว่างวิธีตรวจวัดแบบกระดาษกับวิธี ICP-MS โดยใช้สถิติ Paired Sample t-test และหากการแจกแจงของข้อมูลไม่ปกติ ใช้สถิติ Wilcoxon Test

บทที่ 4

ผลการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ของการวิจัย เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษและวิธี ICP-MS สำหรับตรวจหาปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าป็นที่มีมือเป็นการวิจัยเชิงทดลอง วิเคราะห์เปรียบเทียบปริมาณตะกั่วที่ตรวจวัดได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษและวิธี ICP-MS กลุ่มตัวอย่างเป็นอาสาสมัคร จำนวน 10 ราย วิธีดำเนินการวิจัย โดยเก็บตัวอย่างเขม่าป็นที่มีมือของอาสาสมัครที่ยังป็น จำนวน 3 นัดติดกัน นำไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่ว

การวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับการวิจัยครั้งนี้ แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 4 หัวข้อ ดังนี้

- 4.1 การวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นของอาสาสมัคร
- 4.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุโดยการตรวจวัดมวลของไอออนของธาตุ Inductively Couple Plasma Mass Spectrometer (ICP-MS)
- 4.3 การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (Microfluidic paper based analytical devices, μ PADs)
- 4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของปริมาณของตะกั่วที่ตรวจวัดได้

สัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

สำหรับการวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยได้ใช้สัญลักษณ์ในการวิเคราะห์ข้อมูล ดังต่อไปนี้

\bar{X}	หมายถึง ค่าเฉลี่ย
S.D.	หมายถึง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)
n	หมายถึง จำนวนครั้งในการทดลอง
R	หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ
R^2	หมายถึง ประสิทธิภาพการพยากรณ์ที่ปรับแล้ว
Df	หมายถึง องศาแห่งความเป็นอิสระ (Degree of Freedom)
P	หมายถึง ความน่าจะเป็นสำหรับบอกนัยสำคัญทางสถิติ
**	หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 การวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นของอาสาสมัคร

ข้อมูลเบื้องต้นของอาสาสมัคร จำนวน 10 คน ประกอบด้วยเพศ อายุ น้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 จำนวนและร้อยละของอาสาสมัคร

ข้อมูลทั่วไป		จำนวน (คน)	ร้อยละ
เพศ	หญิง	7	70
	ชาย	3	30
อายุ	18-30 ปี	2	20
	31-40 ปี	4	40
	41-60 ปี	4	40
น้ำหนัก	41-50 กิโลกรัม	1	10
	51-60 กิโลกรัม	5	50
	61-70 กิโลกรัม	1	10
	71-80 กิโลกรัม	2	20
	80 กิโลกรัมขึ้นไป	1	10

จากตารางที่ 4 พบว่าข้อมูลของอาสาสมัคร จำนวน 10 คน ประกอบด้วยเพศหญิงจำนวน 7 คน คิดเป็นร้อยละ 70 และเพศชายจำนวน 3 คน คิดเป็นร้อยละ 30 เมื่อจำแนกกลุ่มตัวอย่างตามช่วงอายุ พบว่า ส่วนใหญ่มีอายุอยู่ในช่วง 31-40 ปี คิดเป็นร้อยละ 40 และ 41-60 ปี คิดเป็นร้อยละ 40 น้ำหนักของอาสาสมัครส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 51-60 กิโลกรัม จำนวน 5 คน คิดเป็นร้อยละ 50

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ค่าต่ำสุด (min) ค่าสูงสุด (max) ของอาสาสมัคร

		ค่าเฉลี่ย	S.D.	Min	Max
อายุ (ปี)	เพศหญิง (N = 7)	32.86	8.95	19	49
	เพศชาย (N = 3)	52.67	4.51	48	57
น้ำหนัก (กิโลกรัม)	เพศหญิง (N = 7)	59.00	7.77	49	74
	เพศชาย (N = 3)	81.00	14.93	70	98

จากตารางที่ 5 พบว่า ในอาสาสมัครเพศหญิง จำนวน 7 คน มีค่าเฉลี่ยอายุเท่ากับ 32.86 ปี ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 8.95 โดยมีอายุน้อยที่สุดเท่ากับ 19 ปี และอายุมากที่สุดเท่ากับ 49 ปี มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักเท่ากับ 59 กิโลกรัม ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 7.77 โดยมีน้ำหนักน้อยที่สุดเท่ากับ 49 กิโลกรัม และน้ำหนักมากที่สุดเท่ากับ 74 กิโลกรัม

ในอาสาสมัครเพศชาย จำนวน 3 คน มีค่าเฉลี่ยอายุเท่ากับ 52.67 ปี ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 4.51 โดยมีอายุน้อยที่สุดเท่ากับ 48 ปี และอายุมากที่สุดเท่ากับ 57 ปี มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักเท่ากับ 81 กิโลกรัม ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 14.93 โดยมีน้ำหนักน้อยที่สุดเท่ากับ 70 กิโลกรัม และน้ำหนักมากที่สุดเท่ากับ 98 กิโลกรัม

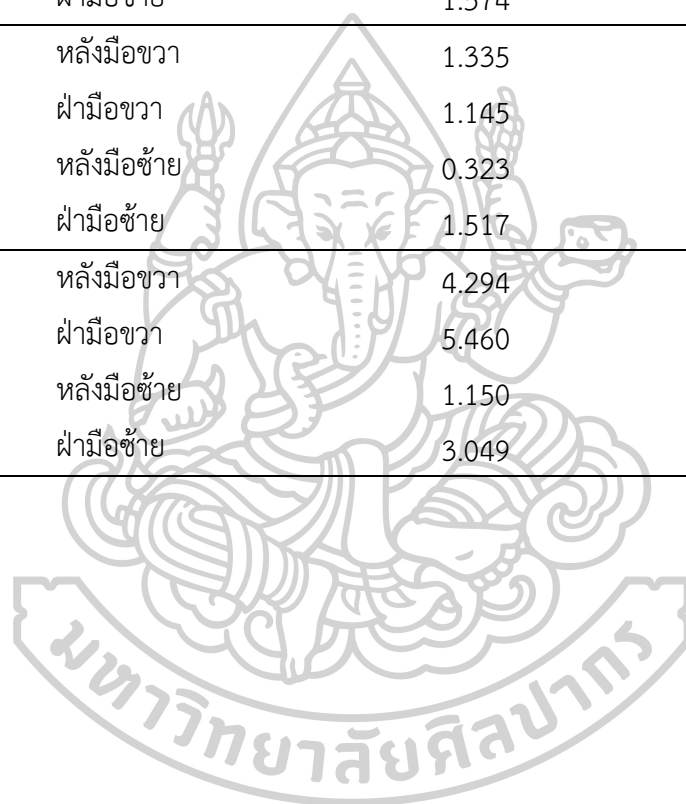


4.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุโดยการตรวจวัดมวลของไอออนของธาตุ Inductively Couple Plasma Mass Spectrometer (ICP-MS)

ตารางที่ 6 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของตะกั่ว Pb (ppm) ด้วยวิธี ICP-MS

ตัวอย่างที่	บริเวณที่วิเคราะห์	ค่าความเข้มข้นของตะกั่ว Pb (ppm)	มือที่ถนัด
1	หลังมือขวา	1.756	ข้างขวา
	ฝ่ามือขวา	1.681	
	หลังมือซ้าย	0.391	
	ฝ่ามือซ้าย	0.540	
2	หลังมือขวา	0.184	ข้างขวา
	ฝ่ามือขวา	1.628	
	หลังมือซ้าย	0.316	
	ฝ่ามือซ้าย	0.568	
3	หลังมือขวา	6.575	ข้างขวา
	ฝ่ามือขวา	2.232	
	หลังมือซ้าย	1.525	
	ฝ่ามือซ้าย	0.601	
4	หลังมือขวา	2.227	ข้างขวา
	ฝ่ามือขวา	4.073	
	หลังมือซ้าย	0.577	
	ฝ่ามือซ้าย	1.476	
5	หลังมือขวา	0.945	ข้างขวา
	ฝ่ามือขวา	1.740	
	หลังมือซ้าย	0.299	
	ฝ่ามือซ้าย	1.761	
6	หลังมือขวา	2.174	ข้างขวา
	ฝ่ามือขวา	1.905	
	หลังมือซ้าย	0.712	
	ฝ่ามือซ้าย	1.523	

7	หลังมือขวา	0.532	ข้างซ้าย
	ฝ่ามือขวา	1.257	
	หลังมือซ้าย	0.143	
	ฝ่ามือซ้าย	1.256	
8	หลังมือขวา	0.490	ข้างซ้าย
	ฝ่ามือขวา	0.676	
	หลังมือซ้าย	0.763	
	ฝ่ามือซ้าย	1.574	
9	หลังมือขวา	1.335	ข้างขวา
	ฝ่ามือขวา	1.145	
	หลังมือซ้าย	0.323	
	ฝ่ามือซ้าย	1.517	
10	หลังมือขวา	4.294	ข้างขวา
	ฝ่ามือขวา	5.460	
	หลังมือซ้าย	1.150	
	ฝ่ามือซ้าย	3.049	

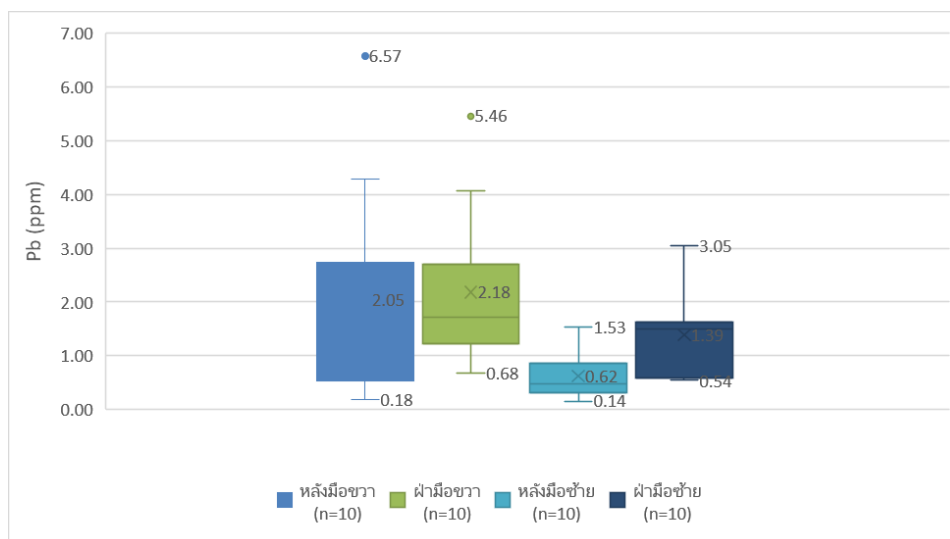


ตารางที่ 7 แสดงค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ค่าต่ำสุด (Min) และค่าสูงสุด (Max) ของ ปริมาณธาตุตะกั่วจากเขม่าป็นที่มีมือ Pb (ppm) จากอาสาสมัคร จำนวน 10 ราย ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี ICP-MS

Sample (n=10)	Pb (ppm)			
	หลังมือขวา	ฝ่ามือขวา	หลังมือซ้าย	ฝ่ามือซ้าย
\bar{X}	2.051	2.180	0.620	1.387
S.D.	1.989	1.467	0.434	0.746
Min	0.184	0.676	0.143	0.540
Max	6.575	5.460	1.525	3.049

จากตารางที่ 7 พบว่าปริมาณธาตุตะกั่วที่ตรวจพบบริเวณหลังมือขวา มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.051 ppm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.989 พบปริมาณตะกั่วที่น้อยที่สุดเท่ากับ 0.184 ppm และพบปริมาณตะกั่วมากที่สุดเท่ากับ 6.575 ppm ปริมาณธาตุตะกั่วที่ตรวจพบบริเวณฝ่ามือขวา มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.180 ppm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.467 พบปริมาณตะกั่วที่น้อยที่สุดเท่ากับ 0.676 ppm ปริมาณตะกั่วมากที่สุดเท่ากับ 5.460 ppm

ส่วนปริมาณธาตุตะกั่วที่ตรวจพบบริเวณหลังมือซ้าย มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.620 ppm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.434 พบปริมาณตะกั่วที่น้อยที่สุดเท่ากับ 0.143 ppm ปริมาณตะกั่วมากที่สุดเท่ากับ 1.525 ppm ปริมาณธาตุตะกั่วที่ตรวจพบบริเวณฝ่ามือซ้าย มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.387 ppm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.746 ppm พบปริมาณตะกั่วที่น้อยที่สุดเท่ากับ 0.540 ppm ปริมาณตะกั่วมากที่สุดเท่ากับ 3.049 ppm แสดงดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยปริมาณธาตุตะกั่วจากเขมือป็นที่มือ Pb (ppm) ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี ICP-MS

4.3 การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (microfluidic paper based analytical devices, μ PADs)

ในส่วนนี้ผู้วิจัยจะนำเสนอการวิเคราะห์ข้อมูลออกเป็น 4 หัวข้อ ดังนี้

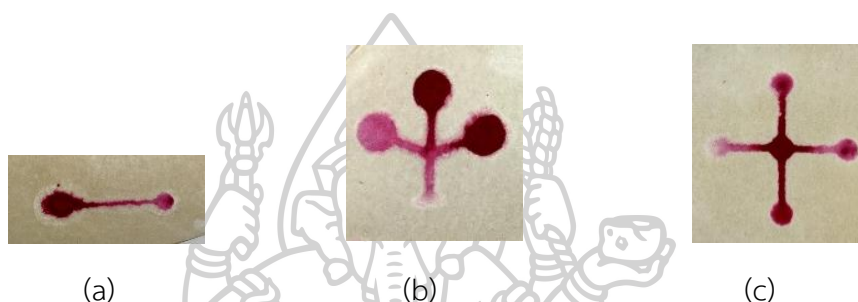
- 1) การศึกษารูปแบบของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษที่เหมาะสม
- 2) การศึกษาปริมาตรสารละลายสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษที่เหมาะสม
- 3) การสร้างกราฟมาตรฐาน
- 4) การวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ

1) การศึกษารูปแบบของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษที่เหมาะสม

จากการทดลองโดยใช้สีผสมอาหารสีแดงเป็นตัวแทนสารละลาย เพื่อจำลองการไหลของสารละลายในอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษรูปแบบต่างๆ พบว่าในอุปกรณ์ตรวจวัดรูปแบบที่ 1 รูปแบบการไหลของของเหลวจาก Sample Zone แพร่ไปยังบริเวณ บริเวณตรวจวัด ได้ไม่สม่ำเสมอ และสารละลายล้นออก

ส่วนในอุปกรณ์ตรวจวัดรูปแบบที่ 2 สารละลายกระจายตัวไหลจาก Sample Zone ผ่านช่องทางการไหล 3 ทาง แพร่ไปยังบริเวณ บริเวณตรวจวัด ($n=3$) ได้ดี แต่เคลื่อนที่ไปยัง บริเวณตรวจวัด ได้ในปริมาณที่ต่างกัน ทำให้การปรากฏของสีไม่สม่ำเสมอ

และในอุปกรณ์ตรวจวัดแบบที่ 3 พบว่าสารละลายเคลื่อนที่จาก Sample Zone ผ่านช่องทางการไหล 4 ทิศทางได้ดี สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีที่เกิดขึ้นที่บริเวณ บริเวณตรวจวัด ($n=4$) และเปรียบเทียบได้มากถึง 4 บริเวณ



ภาพที่ 21 ภาพถ่ายแสดงการศึกษาการเคลื่อนที่ของสารละลายบนอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาศที่ประดิษฐ์ขึ้น

- (a) อุปกรณ์ตรวจวัดรูปแบบที่ 1
- (b) อุปกรณ์ตรวจวัดรูปแบบที่ 2
- (c) อุปกรณ์ตรวจวัดรูปแบบที่ 3

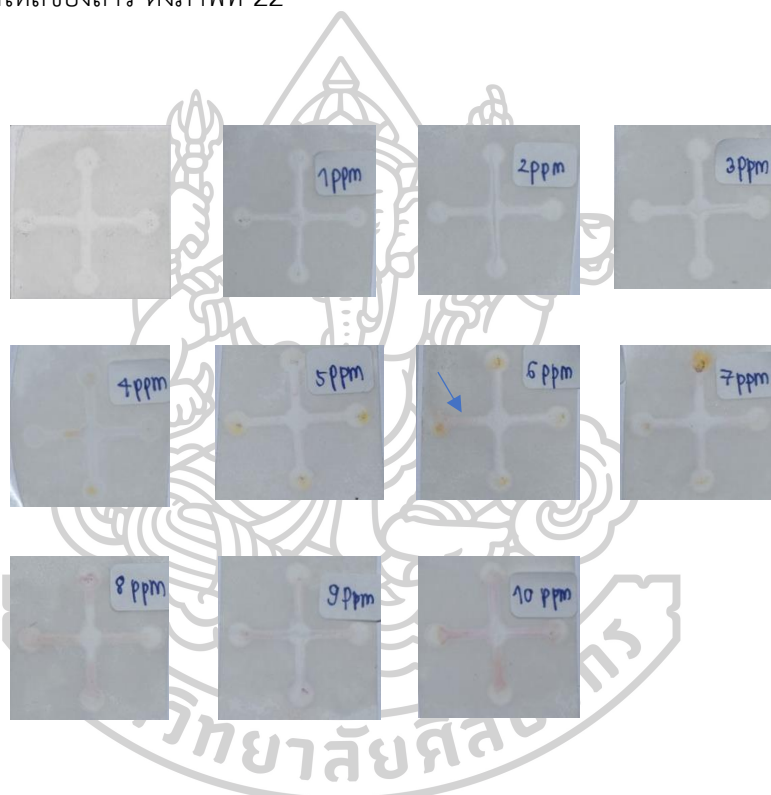
2) การศึกษาปริมาณสารละลายสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาศที่เหมาะสม

เมื่อทำการทดลองโดยใช้สารละลายหยดลงบน Sample zone ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 5, 10, 15 และ 20 μL พบว่าปริมาณสารละลาย 5, 10, 15 μL เมื่อหยดลงบริเวณหยดสารตัวอย่างมีปริมาตรน้อย เคลื่อนที่ไปไม่ถึงบริเวณตรวจวัด และปริมาณ 20 μL สารละลายสามารถเคลื่อนที่ไปถึงบริเวณตรวจวัดได้พอดี และแพร่ได้ดีทั่วบริเวณ

ที่บริเวณตรวจวัด ทดลองโดยใช้สารละลายหยดลงบน ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 0.1, 0.2 และ 0.3 μL พบว่าปริมาณสารละลาย 0.1 μL เมื่อหยดลงบริเวณหยดสารตัวอย่างมีปริมาตรน้อย แพร่ไม่เต็มบริเวณ และปริมาณ 0.2 μL สารละลายแพร่ได้เต็มบริเวณ ส่วนที่ปริมาณ 0.3 μL สารละลายมีปริมาณมากเกินไปทำให้ล้นออกจากบริเวณตรวจวัด

3) การสร้างกราฟมาตรฐาน

เมื่อเตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่วที่มีความเข้มข้นต่างกัน คือ 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 ppm ตามลำดับ จากนั้นหยดละลายมาตรฐาน ปริมาตร 20 μL ลงบริเวณ Sampling Zone รอให้สารละลายเคลื่อนที่ไปถึงบริเวณตรวจวัด จากนั้นหยดรีเอเจนท์ที่บริเวณตรวจวัด สังเกตสีชมพูที่ปรากฏขึ้น ในขณะเดียวกันสีส้มของรีเอเจนท์เริ่มจางลง จนหายไปใช้เวลาประมาณ 30 นาที ผ่านไป จึงทำการบันทึกผล โดยถ่ายภาพที่เวลาต่างๆ กัน คือ 30, 40 และ 50 นาที บันทึกภาพเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที พบว่าปรากฏสีชมพูที่สังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าที่ความเข้มข้น 6 ppm ขึ้นไป บริเวณช่องทางไหลของสาร ดังภาพที่ 22



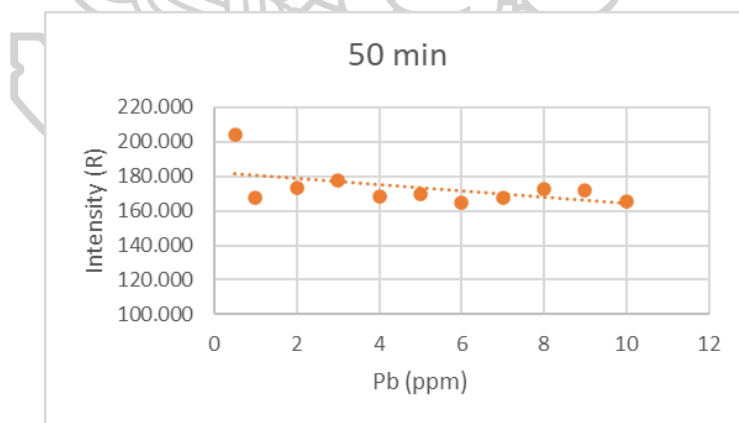
ภาพที่ 22 ภาพถ่ายแสดงการปรากฏขึ้นของสีชมพูบนอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษที่ประดิษฐ์ขึ้น เมื่อหยดสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างกันคือ 0.5 – 10 ppm บันทึกภาพที่เวลา 50 นาทีผ่านไป

เมื่อนำภาพถ่ายไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมอิมเมจเจ (ImageJ) วิเคราะห์ค่าความเข้มสีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน โดยวัดความเข้มของสีที่ปรากฏขึ้นที่บริเวณตรวจวัด จำนวน 4 ครั้ง ($n=4$) แสดงผลดังตารางที่ 8

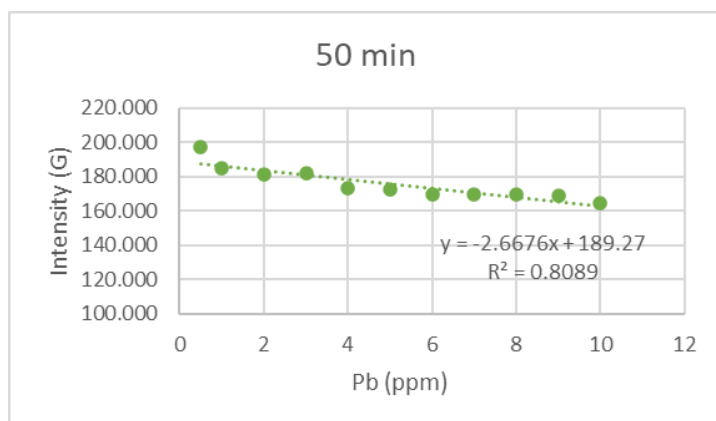
ตารางที่ 8 ค่าความเข้มสี RGB ที่บริเวณตรวจวัด วัดโดยใช้โปรแกรม ImageJ

ความเข้มข้นของ สารละลายมาตรฐาน ตะกั่ว (ppm)	ค่าความเข้มสีเฉลี่ย (n=4)								
	R			G			B		
	30 min	40 min	50 min	30 min	40 min	50 min	30 min	40 min	50 min
0.5	200.936	199.629	204.377	175.035	182.598	197.631	157.658	167.065	203.570
1	169.668	172.135	167.914	165.821	169.259	184.673	148.600	155.472	179.125
2	172.238	174.633	173.552	177.334	181.375	181.206	179.959	184.795	185.697
3	178.592	179.999	177.771	183.860	186.688	181.849	185.895	189.473	189.057
4	174.574	174.838	168.514	170.316	171.346	173.729	185.179	178.732	176.471
5	172.867	172.288	169.521	175.969	176.480	172.539	174.666	177.395	168.739
6	168.947	167.778	164.840	168.111	167.169	169.452	157.184	160.055	159.277
7	174.784	172.206	167.372	170.043	169.692	169.577	159.200	155.005	160.856
8	178.204	175.582	172.424	178.378	177.222	169.738	182.034	181.584	178.019
9	177.264	174.542	171.819	181.292	178.539	168.935	184.645	181.825	181.203
10	168.757	164.783	165.758	165.893	161.956	164.543	166.356	162.269	169.269

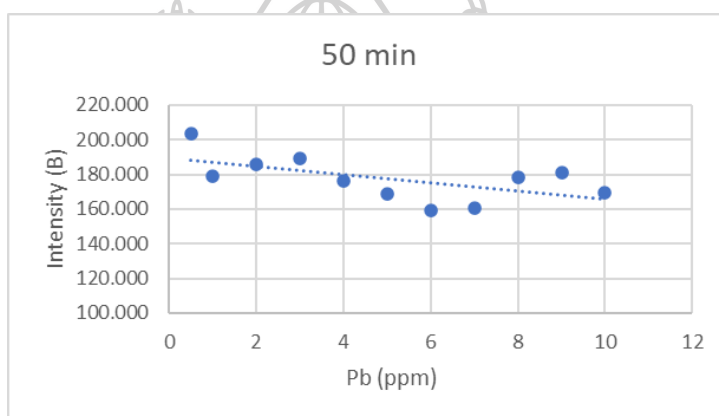
จากตารางที่ 8 นำข้อมูลค่าความเข้มสีเฉลี่ย RGB ที่วิเคราะห์เมื่อเวลา 50 นาที ไปสร้างกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานตะกั่ว (ppm) และค่าความเข้มสีเฉลี่ย ดังภาพที่ 23



(a)



(b)



(c)

ภาพที่ 23 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกั่ว (ppm) กับค่าความเข้มสี

(a) กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกั่ว (ppm) กับค่าความเข้มสีแดง

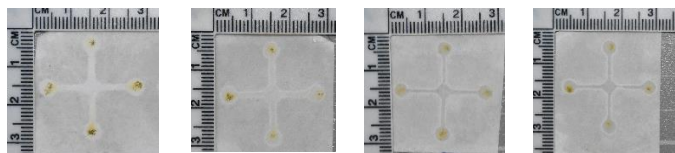
(b) กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกั่ว (ppm) กับค่าความเข้มสีเขียว

(c) กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกั่ว (ppm) กับค่าความเข้มสีน้ำเงิน

จากภาพที่ 23 (b) เมื่อวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกั่ว (ppm) กับค่าความเข้มสีเขียวจากภาพที่ถ่ายเมื่อเวลา 50 นาที ผ่านไป แสดงผลเป็นสมการเส้นตรง พบว่า ได้สมการเส้นตรงเท่ากับ $y = -2.6676x + 189.27$ $R^2 = 0.8089$

ในการทดลองนี้ เริ่มจากเตรียมสารมาตรฐานตะกั่วที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 0.5 ppm ซึ่งมีความเข้มข้นน้อยมาก ดังนั้นในสมการเส้นตรง จึงทำให้ค่า R^2 ต่ำกว่า 1

4) ผลการวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ



ภาพที่ 24 ภาพถ่ายอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ เมื่อหยดสารละลายตัวอย่าง

จากภาพที่ 24 เมื่อนำสารละลายที่ได้จากการสกัดจากตัวอย่างเขม่าป็นที่มีมือ ปริมาตร 20 μL หยดลงบริเวณ Sample Zone ของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ และหยดรีเอเจนท์ สังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย ไม่พบการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายบนอุปกรณ์ตรวจวัดที่ระดับการมองเห็นด้วยตาเปล่า

เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 50 นาที ทำการถ่ายภาพ และนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม อิมเมจเจ (ImageJ) เลือกวัดค่าความเข้มสีเขียว โดยวัดความเข้มของสีที่ปรากฏขึ้นที่บริเวณตรวจวัด จำนวน 4 ครั้ง ได้ค่าความเข้มสีเฉลี่ยของสีเขียว ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ค่าต่ำสุด (Min) และค่าสูงสุด (Max) ของปริมาณธาตุตะกั่วจากเขม่าป็นที่มีมือ Pb (ppb) จากอาสาสมัคร จำนวน 10 ราย ที่วิเคราะห์โดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ

Sample (n=10)	ค่าความเข้มสีเขียว			
	หลังมือขวา	ฝ่ามือขวา	หลังมือซ้าย	ฝ่ามือซ้าย
\bar{X}	189.09	190.37	200.31	196.78
S.D.	11.57	11.71	1.23	7.86
Min	169.34	170.54	198.18	174.82
Max	200.40	201.95	201.60	201.44

จากตารางที่ 9 พบว่าค่าความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้จากตัวอย่างเขม่าป็นที่มือที่เก็บจากบริเวณหลังมือขวา มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 188.09 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 11.57 มีค่าความเข้มข้นน้อยที่สุดเท่ากับ 169.34 และค่าความเข้มข้นมากที่สุดเท่ากับ 200.40 ส่วนที่ฝ่ามือขวา มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 190.37 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 11.71 มีค่าความเข้มข้นน้อยที่สุดเท่ากับ 170.54 และค่าความเข้มข้นมากที่สุดเท่ากับ 201.95

ส่วนที่หลังมือซ้ายมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 200.31 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.23 มีค่าความเข้มข้นน้อยที่สุดเท่ากับ 198.18 และค่าความเข้มข้นมากที่สุดเท่ากับ 201.60 และที่ฝ่ามือซ้าย มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 196.78 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 7.86 มีค่าความเข้มข้นน้อยที่สุดเท่ากับ 174.82 และค่าความเข้มข้นมากที่สุดเท่ากับ 201.44

นำค่าความเข้มข้นเฉลี่ยที่วัดได้ แทนค่าลงในสมการ $y = -2.6676x + 189.27$
 $R^2 = 0.8089$ ได้ค่าปริมาณตะกั่ว (ppm) ดังตารางที่ 10



ตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วด้วยวิธีอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ

ตัวอย่างที่	บริเวณที่วิเคราะห์	ค่าความเข้มข้นเฉลี่ย	ปริมาณตะกั่ว (ppm)
1	หลังมือขวา	185.34	1.47
	ฝ่ามือขวา	186.81	0.92
	หลังมือซ้าย	201.61	-4.62
	ฝ่ามือซ้าย	199.93	-3.99
2	หลังมือขวา	196.63	-2.76
	ฝ่ามือขวา	186.56	1.02
	หลังมือซ้าย	201.57	-4.61
	ฝ่ามือซ้าย	201.44	-4.56
3	หลังมือขวา	169.34	7.47
	ฝ่ามือขวา	183.41	2.20
	หลังมือซ้าย	198.78	-3.57
	ฝ่ามือซ้าย	196.42	-2.68
4	หลังมือขวา	183.07	2.32
	ฝ่ามือขวา	173.52	5.90
	หลังมือซ้าย	201.04	-4.41
	ฝ่ามือซ้าย	198.39	-3.42
5	หลังมือขวา	200.10	-4.06
	ฝ่ามือขวา	199.58	-3.87
	หลังมือซ้าย	200.27	-4.12
	ฝ่ามือซ้าย	200.13	-4.07
6	หลังมือขวา	183.57	2.14
	ฝ่ามือขวา	184.79	1.68
	หลังมือซ้าย	198.18	-3.34
	ฝ่ามือซ้าย	200.26	-4.12
7	หลังมือขวา	200.40	-4.17
	ฝ่ามือขวา	201.14	-4.45
	หลังมือซ้าย	199.03	-3.66
	ฝ่ามือซ้าย	199.75	-3.93
8	หลังมือขวา	199.98	-4.02
	ฝ่ามือขวา	199.98	-4.02
	หลังมือซ้าย	201.08	-4.43
	ฝ่ามือซ้าย	197.34	-3.02
9	หลังมือขวา	198.34	-3.40
	ฝ่ามือขวา	201.95	-4.75
	หลังมือซ้าย	200.35	-4.15
	ฝ่ามือซ้าย	199.32	-3.77
10	หลังมือขวา	174.11	5.68
	ฝ่ามือขวา	170.54	7.02
	หลังมือซ้าย	201.21	-4.48
	ฝ่ามือซ้าย	174.82	5.42

จากตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วจากเขม่าป็นที่มีมือด้วยวิธีอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ ที่บริเวณ หลังมือขวา ฝ่ามือขวา หลังมือซ้าย และฝ่ามือซ้าย ในตัวอย่างอาสาสมัคร ทั้ง 10 ราย พบว่าปริมาณตะกั่วมากที่สุดที่คำนวณได้ เท่ากับ 7.471 ppm จากค่าความเข้มข้น 169.340 ที่วัดได้จากบริเวณหลังมือขวา ของตัวอย่างที่ 3 ส่วนปริมาณตะกั่วที่น้อยที่สุดที่คำนวณได้ เท่ากับ 0.923 ppm จากค่าความเข้มข้น 186.809 ที่วัดได้จากบริเวณฝ่ามือขวา ของตัวอย่างที่ 1

สังเกตได้ว่าเมื่อพิจารณาความเข้มข้นเฉลี่ยที่มีค่ามากกว่า 186.809 แทนค่าลงในสมการเส้นตรง $y = -2.6676x + 189.27$ $R^2 = 0.8089$ พบว่าปริมาณตะกั่วที่คำนวณได้ปรากฏเป็นค่าติดลบ เนื่องจากเป็นค่าความเข้มข้นดังกล่าว นั้น อยู่ในค่าที่สูงกว่าขอบเขตของค่าความเข้มข้นของสมการเส้นตรง

4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของปริมาณของตะกั่วที่ตรวจวัดได้

เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของปริมาณตะกั่วจากเขม่าป็นที่มีมือที่ตรวจวัดได้โดยวิธีอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (μ PADs) และ วิธี ICP-MS ตามสมมติฐาน

สมมติฐาน ปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าป็นที่มีมือที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ และ วิธี ICP-MS มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ค่าปริมาณตะกั่วจากเขม่าป็นที่มีมือที่ตรวจวัดได้โดยวิธีอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (μ PADs) และ วิธี ICP-MS แสดงเปรียบเทียบดังตารางที่ 11



ตารางที่ 11 ผลการวิเคราะห์ปริมาณตะกั่ว (ppm) เปรียบเทียบระหว่างวิธี ICP-MS และวิธีอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (μ PADs)

ตัวอย่างที่	บริเวณที่วิเคราะห์	ปริมาณตะกั่ว (ppm)	
		ICP-MS	μ PAD
1	หลังมือขวา	1.756	1.472
	ฝ่ามือขวา	1.681	0.923
	หลังมือซ้าย	0.391	-4.624
	ฝ่ามือซ้าย	0.540	-3.994
2	หลังมือขวา	0.184	-2.757
	ฝ่ามือขวา	1.628	1.016
	หลังมือซ้าย	0.316	-4.611
	ฝ่ามือซ้าย	0.568	-4.560
3	หลังมือขวา	6.575	7.471
	ฝ่ามือขวา	2.232	2.198
	หลังมือซ้าย	1.525	-3.567
	ฝ่ามือซ้าย	0.601	-2.681
4	หลังมือขวา	2.227	2.323
	ฝ่ามือขวา	4.073	5.904
	หลังมือซ้าย	0.577	-4.411
	ฝ่ามือซ้าย	1.476	-3.420
5	หลังมือขวา	0.945	-4.058
	ฝ่ามือขวา	1.740	-3.866
	หลังมือซ้าย	0.299	-4.124
	ฝ่ามือซ้าย	1.761	-4.070
6	หลังมือขวา	2.174	2.138
	ฝ่ามือขวา	1.905	1.679
	หลังมือซ้าย	0.712	-3.339
	ฝ่ามือซ้าย	1.523	-4.121
7	หลังมือขวา	0.532	-4.172
	ฝ่ามือขวา	1.257	-4.451
	หลังมือซ้าย	0.143	-3.660
	ฝ่ามือซ้าย	1.256	-3.927
8	หลังมือขวา	0.490	-4.016
	ฝ่ามือขวา	0.676	-4.016
	หลังมือซ้าย	0.763	-4.427
	ฝ่ามือซ้าย	1.574	-3.024
9	หลังมือขวา	1.335	-3.400
	ฝ่ามือขวา	1.145	-4.752
	หลังมือซ้าย	0.323	-4.152
	ฝ่ามือซ้าย	1.517	-3.766
10	หลังมือขวา	4.294	5.685
	ฝ่ามือขวา	5.460	7.021
	หลังมือซ้าย	1.150	-4.477
	ฝ่ามือซ้าย	3.049	5.418

จากตารางที่ 11 ผู้วิจัยจึงนำเสนอการวิเคราะห์ข้อมูลออกเป็น 2 หัวข้อ ดังนี้

- 1) การวิเคราะห์การแจกแจงของข้อมูล โดยคิดค่านวนค่าสถิติแบบ Kolmogorov –Smirnov Test
- 2) การวิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูล โดยใช้ Wilcoxon Test

1) การวิเคราะห์การแจกแจงของข้อมูล โดยคิดค่านวนค่าสถิติแบบ Kolmogorov –Smirnov Test เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าป็นที่มีือ ว่ามีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่

สมมติฐานทางสถิติ

H_0 : ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ

H_1 : ข้อมูลไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

ตารางที่ 12 การวิเคราะห์การแจกแจงของข้อมูล โดยคิดค่านวนค่าสถิติแบบ Kolmogorov – Smirnov Test

วิธีที่วิเคราะห์	Statistic	df	p
ICP-MS	0.216	40	0.000**
μ PAD	0.305	40	

** มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

จากตารางที่ 12 ค่า p เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 แสดงว่ายอมรับ H_1 นั่นคือ ข้อมูลไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

2) การวิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูล โดยใช้ Wilcoxon Test

เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณตะกั่วจากเขม่าป็นที่มีือ ตามสมมติฐาน ดังต่อไปนี้

สมมติฐานทางวิจัย

ปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าป็นที่มีือที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษและวิธี ICP-MS มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

สมมติฐานทางสถิติ

H_0 : $\mu_{ICP} = \mu_{\mu PADs}$ ปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าป็นที่มีือที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษและวิธี ICP-MS มีค่าไม่แตกต่างกัน

H_1 : $\mu_{ICP} \neq \mu_{\mu PADs}$ ปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าป็นที่มีือที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษและวิธี ICP-MS มีค่าแตกต่างกัน

ตารางที่ 13 การวิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูล โดยใช้ Wilcoxon Test

	N	Mean Rank	Sum of Ranks	p
μ PAD - ICP-MS	40	22.56	767	0.000**
	40	8.83	53	

** มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

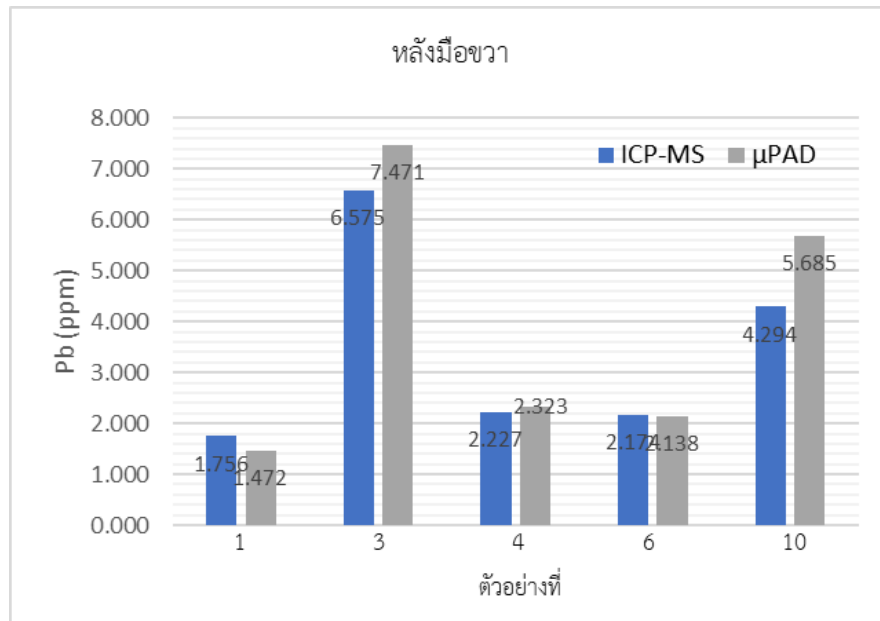
จากตารางที่ 13 ค่า p เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 แสดงว่ายอมรับ H_1 นั่นคือ ปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าป็นที่มีที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษและวิธี ICP-MS มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ พบว่าเมื่อค่าความเข้มข้นตั้งแต่ 186.809 ปริมาณตะกั่วที่คำนวณได้จากวิธีอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษจะมีค่าเป็นบวก โดยคำนวณได้ เท่ากับ 0.923 ppm ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณตะกั่วที่ตรวจวัดได้จากวิธี ICP-MS คือ 1.681 ppm ขึ้นไป จึงสามารถเปรียบเทียบปริมาณตะกั่วได้ ผู้วิจัยจึงเลือกพิจารณาเฉพาะค่าที่เป็นบวก เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี ICP-MS พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน จึงนำไปวิเคราะห์ทางสถิติ แสดงดังตารางที่ 14

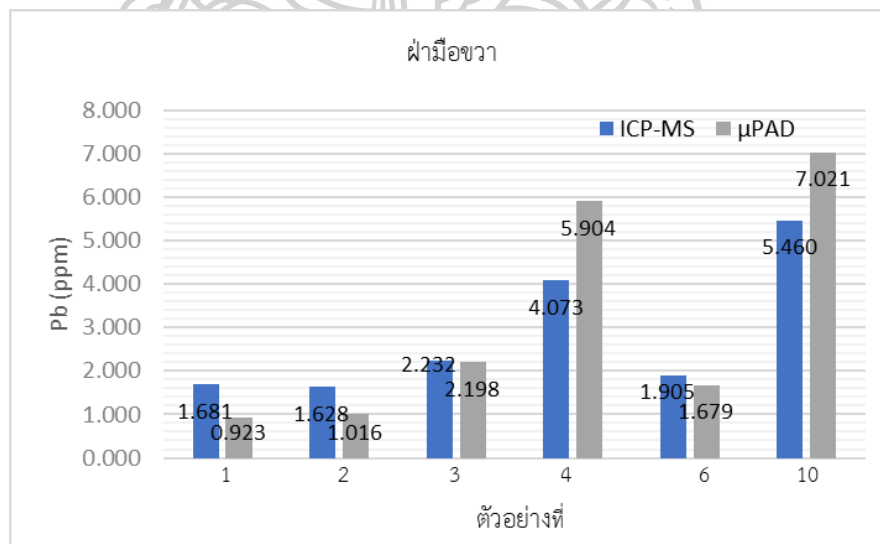
ตารางที่ 14 ผลการวิเคราะห์ปริมาณตะกั่ว (ppm) เปรียบเทียบระหว่างวิธี ICP-MS และวิธีแบบกระดาษ (พิจารณาเฉพาะค่าบวก)

ตัวอย่างที่	บริเวณที่วิเคราะห์	ปริมาณตะกั่ว (ppm)	
		ICP-MS	μ PAD
1	หลังมือขวา	1.756	1.472
	ฝ่ามือขวา	1.681	0.923
2	ฝ่ามือขวา	1.628	1.016
	หลังมือขวา	6.575	7.471
3	ฝ่ามือขวา	2.232	2.198
	หลังมือขวา	2.227	2.323
4	ฝ่ามือขวา	4.073	5.904
	หลังมือขวา	2.174	2.138
6	ฝ่ามือขวา	1.905	1.679
	หลังมือขวา	4.294	5.685
10	ฝ่ามือขวา	5.460	7.021
	ฝ่ามือซ้าย	3.049	5.418
	หลังมือขวา		

จากตารางที่ 14 พบว่าปริมาณตะกั่วที่คำนวณได้โดยวิธีอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (μ PADs) โดยพิจารณาเฉพาะค่าที่เป็นบวก บริเวณหลังมือขวา และฝ่ามือขวาของ ตัวอย่างที่ 1, 2, 3, 4, 6 และ 10 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับปริมาณตะกั่วจากวิธี ICP-MS แสดงดังภาพที่ 25



(a)



(b)

ภาพที่ 25 กราฟเปรียบเทียบปริมาณตะกั่วที่ตรวจวัดได้ ระหว่างวิธี ICP-MS และ วิธี μ PADs

(a) ที่หลังมือขวา และ (b) ที่ฝ่ามือขวา

จากตารางที่ 14 ผู้วิจัยขอเสนอการวิเคราะห์ข้อมูล สำหรับพิจารณาเฉพาะค่าปริมาณ ตะกั่วที่เป็นบวก แบ่งออกเป็น 2 หัวข้อ ดังนี้

1) การวิเคราะห์การแจกแจงของข้อมูล โดยคิดค่านวนค่าสถิติแบบ Kolmogorov – Smirnov Test

2) การวิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูล โดยใช้ Wilcoxon Test

1) การวิเคราะห์การแจกแจงของข้อมูล โดยคิดค่านวนค่าสถิติแบบ Kolmogorov – Smirnov Test เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าป็นที่มีือ วามีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่

สมมติฐานทางสถิติ

H_0 : ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ

H_1 : ข้อมูลไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

ตารางที่ 15 การวิเคราะห์การแจกแจงของข้อมูล โดยคิดค่านวนค่าสถิติแบบ Kolmogorov – Smirnov Test

วิธีที่วิเคราะห์	Statistic	df	p
ICP-MS	0.282	12	0.009**
μ PAD	0.281	12	0.010**

** มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

จากตารางที่ 15 ค่า p เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 แสดงว่ายอมรับ H_1 นั่นคือ ข้อมูล ไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

2) การวิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูล โดยใช้ Wilcoxon Test

เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณตะกั่วจากเขม่าป็นที่มีือ ตามสมมติฐาน ดังต่อไปนี้

สมมติฐานทางวิจัย

ปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าป็นที่มีือที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษและวิธี ICP-MS มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

สมมติฐานทางสถิติ

$H_0: \mu_{ICP} = \mu_{\mu PADs}$ ปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าป็นที่มือที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษและวิธี ICP-MS มีค่าไม่แตกต่างกัน

$H_1: \mu_{ICP} \neq \mu_{\mu PADs}$ ปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าป็นที่มือที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษและวิธี ICP-MS มีค่าแตกต่างกัน

ตารางที่ 16 การวิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูล โดยใช้ Wilcoxon Test

	N	Mean Rank	Sum of Ranks	p
$\mu PAD - ICP-MS$	12	4.17	25	0.272
	12	8.83	53	

** มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

จากตารางที่ 16 ค่า p เท่ากับ 0.272 ซึ่งมากกว่า 0.05 แสดงว่ายอมรับ H_0 นั่นคือ ปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าป็นที่มือที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษและวิธี ICP-MS มีค่าไม่แตกต่างกัน

3) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านความประหยัด

เมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่ว ในวิธี Inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS) หรือเครื่องตรวจวิเคราะห์ธาตุแบบรียมและแอนติโมนี ในเขม่าป็นที่มือ พร้อมอุปกรณ์ จำนวน 1 เครื่อง มีราคา 10,580,000 บาท มีค่าซ่อมและบำรุงรักษา ประมาณ 400,000 บาท ต่อปี ใช้งานตรวจวิเคราะห์ภายในห้องปฏิบัติการ และผู้ใช้งานต้องมีทักษะในการใช้งานเครื่องมือได้อย่างดี ส่วนอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ ($\mu PADs$) ที่ประดิษฐ์ขึ้นจากกระดาษกรองมีราคาแผ่นละ 3.6 บาท โดยกระดาษกรอง 1 แผ่น สามารถประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดได้ จำนวน 7 ชิ้น ขั้นตอนการประดิษฐ์และการใช้งานไม่ซับซ้อน อุปกรณ์มีน้ำหนักเบา สามารถเคลื่อนย้ายได้ อีกประเด็นหนึ่ง เครื่องมือ ICP-MS ในประเทศไทย ยังมีจำนวนน้อย ทำให้บางหน่วยงาน ขาดแคลนเครื่องมือ จึงต้องใช้เวลาส่งหลักฐานไปตรวจพิสูจน์ ซึ่งใช้ระยะเวลาานาน แต่วิธีอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ สามารถตรวจได้ทันที เหมาะกับเป็นการตรวจเบื้องต้น

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ของการวิจัย เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษและวิธี ICP-MS สำหรับตรวจหาปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าป็นที่มีมือ เป็นการวิจัยเชิงทดลอง โดยแบ่งการดำเนินการวิจัยออกเป็น 5 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การศึกษาเพื่อกำหนดกรอบแนวคิดในการวิจัย 2) การกำหนดอาสาสมัคร 3) การเตรียมอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย 4) การทดลองและการเก็บรวบรวมข้อมูล 5) วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล โดยเก็บตัวอย่างเขม่าป็นที่มีมือ บริเวณหลังมือขวา ฝ่ามือขวา หลังมือซ้าย และฝ่ามือซ้าย จากอาสาสมัคร จำนวน 10 ราย นำสารละลายที่ได้จากการสกัดตัวอย่าง หยดลงบนอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ สังเกตสีที่ปรากฏขึ้น นำไปวัดค่าความเข้มสีโดยใช้โปรแกรม ImageJ จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วจากเขม่าป็นที่มีมือ เปรียบเทียบกับวิธี ICP-MS ดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลโดยทำการประมวลผลในการทดลองด้วยโปรแกรม SPSS การวิเคราะห์ข้อมูลแบ่งออกเป็น 1) การวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นของอาสาสมัคร 2) การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุโดยการตรวจวัดมวลของไอออนของธาตุ Inductively Couple Plasma Mass Spectrometer (ICP-MS) 3) การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (microfluidic paper based analytical devices, μ PADs) และ 4) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของปริมาณของตะกั่วที่ตรวจวัดได้ ข้อมูลด้านประสิทธิภาพแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ 1) การวิเคราะห์การแจกแจงของข้อมูล โดยคิดคำนวณค่าสถิติแบบ Kolmogorov-Smirnov Test 2) วิเคราะห์เปรียบเทียบปริมาณตะกั่วระหว่างวิธีตรวจวัดแบบกระดาษกับวิธี ICP-MS โดยใช้ Wilcoxon Test และ 3) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านความประหยัด ผู้วิจัยมีการสรุปผลการวิจัย อภิปรายผลการวิจัย และข้อเสนอแนะดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผู้วิจัยขอเสนอข้อสรุปเพื่อตอบวัตถุประสงค์ของการวิจัย โดยแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

5.1.1 การวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นของอาสาสมัคร

5.1.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุโดยการตรวจวัดมวลของไอออนของธาตุ Inductively Couple Plasma Mass Spectrometer (ICP-MS)

5.1.3 การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (microfluidic paper based analytical devices, μ PADs)

5.1.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของปริมาณของตะกั่วที่ตรวจวัดได้

5.1.1 การวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นของอาสาสมัคร

จากการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นของอาสาสมัคร สรุปได้ดังนี้ อาสาสมัคร จำนวน 10 คน ประกอบด้วยเพศหญิง จำนวน 7 คน คิดเป็นร้อยละ 70 และเพศชายจำนวน 3 คน คิดเป็นร้อยละ 30 เมื่อจำแนกกลุ่มตัวอย่างตามช่วงอายุ พบว่า ส่วนใหญ่มีอายุอยู่ในช่วง 31-40 ปี คิดเป็นร้อยละ 40 และ 41-60 ปี คิดเป็นร้อยละ 40 น้ำหนักของอาสาสมัครส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 51-60 กิโลกรัม จำนวน 5 คน คิดเป็นร้อยละ 50 ในอาสาสมัครเพศหญิง จำนวน 7 คน มีค่าเฉลี่ยอายุเท่ากับ 32.86 ปี ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 8.95 โดยมีอายุน้อยที่สุดเท่ากับ 19 ปี และอายุมากที่สุดเท่ากับ 49 ปี มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักเท่ากับ 59 กิโลกรัม ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 7.77 โดยมีน้ำหนักน้อยที่สุดเท่ากับ 49 กิโลกรัม และน้ำหนักมากที่สุดเท่ากับ 74 กิโลกรัม ในอาสาสมัครเพศชาย จำนวน 3 คน มีค่าเฉลี่ยอายุเท่ากับ 52.67 ปี ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 4.51 โดยมีอายุน้อยที่สุดเท่ากับ 48 ปี และอายุมากที่สุดเท่ากับ 57 ปี มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักเท่ากับ 81 กิโลกรัม ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 14.93 โดยมีน้ำหนักน้อยที่สุดเท่ากับ 70 กิโลกรัม และน้ำหนักมากที่สุดเท่ากับ 98 กิโลกรัม

5.1.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุโดยการตรวจวัดมวลของไอออนของธาตุ Inductively Couple Plasma Mass Spectrometer (ICP-MS)

จากการวิเคราะห์ค่าสถิติพื้นฐานของปริมาณตะกั่วที่ตรวจวัดโดยวิธี ICP-MS พบว่าปริมาณธาตุตะกั่วที่ตรวจพบบริเวณหลังมือขวา มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.051 ppm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.989 พบปริมาณตะกั่วที่น้อยที่สุดเท่ากับ 0.184 ppm และพบปริมาณตะกั่วมากที่สุดเท่ากับ 6.575 ppm ปริมาณธาตุตะกั่วที่ตรวจพบบริเวณฝ่ามือขวา มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.180 ppm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.467 พบปริมาณตะกั่วที่น้อยที่สุดเท่ากับ 0.676 ppm ปริมาณตะกั่วมากที่สุดเท่ากับ 5.460 ppm

ส่วนปริมาณธาตุตะกั่วที่ตรวจพบบริเวณหลังมือซ้าย มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.673 ppm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.425 พบปริมาณตะกั่วที่น้อยที่สุดเท่ากับ 0.299 ppm ปริมาณตะกั่วมากที่สุดเท่ากับ 1.525 ppm ปริมาณธาตุตะกั่วที่ตรวจพบบริเวณฝ่ามือซ้าย มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.387 ppm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.746 ppm พบปริมาณตะกั่วที่น้อยที่สุดเท่ากับ 0.540 ppm ปริมาณตะกั่วมากที่สุดเท่ากับ 3.049 ppm

5.1.3 การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (microfluidic paper based analytical devices, μ PADs)

จากการประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัด จำนวน 3 รูปแบบ เพื่อศึกษารูปแบบที่เหมาะสม โดยในอุปกรณ์ตรวจวัดแบบที่ 3 พบว่าสารละลายเคลื่อนที่จาก Sample Zone ผ่านช่องทางไหล 4 ทิศทางได้ดี สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีที่เกิดขึ้นที่บริเวณตรวจวัด ($n=4$) และวิเคราะห์หาความเข้มข้นได้มากถึง 4 ตำแหน่ง จึงเลือกใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแบบที่ 3 และพบว่าปริมาตร 20 μ L สารละลายสามารถเคลื่อนที่ไปถึงบริเวณตรวจวัดได้ และแพร่ได้พอดีทั่วบริเวณ จึงเป็นปริมาตรที่เหมาะสมสำหรับบริเวณตัวอย่าง ส่วนบริเวณตรวจวัด พบว่าปริมาตร 0.2 μ L สารละลายแพร่ได้เต็มบริเวณ ส่วนที่ปริมาตร 0.3 μ L สารละลายมีปริมาตรมากเกินไปทำให้ล้นออกจากบริเวณตรวจวัด

จากการทดสอบหาค่าสารละลายมาตรฐานตะกั่วที่ความเข้มข้นต่างกันคือ 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 ppm ลงบนอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ สังกะสีชมพูที่ปรากฏขึ้นขณะเดียวกันสีส้มของรีเอเจนต์เริ่มจางลง จนหายไปเป็นเวลาประมาณ 30 นาทีผ่านไป และเมื่อเวลา 50 นาทีผ่านไป สีส้มของรีเอเจนต์เริ่มจางหายไปจนหมด ประกอบกับเมื่อบันทึกภาพถ่ายและนำไปวิเคราะห์ความเข้มสีโดยใช้โปรแกรม ImageJ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มของสีระบบ RGB กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานตะกั่ว พบว่าที่ค่าความเข้มสีเขียว เมื่อบันทึกภาพถ่ายที่เวลา 50 นาทีผ่านไป ได้สมการเส้นตรงเท่ากับ $y = -2.6676x + 189.27$ $R^2 = 0.8089$

5.1.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของปริมาณของตะกั่วที่ตรวจวัดได้

สมมติฐานทางวิจัย

ปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าป็นที่มือที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษและวิธี ICP-MS มีค่าแตกต่างกัน

ในส่วนนี้ผู้วิจัยจะนำเสนอสรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลออกเป็น 2 หัวข้อ ได้แก่ 1) การวิเคราะห์การแจกแจงของข้อมูล โดยคิดค่านวนค่าสถิติแบบ Kolmogorov –Smirnov Test 2) การวิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูล โดยใช้ Wilcoxon Test และ 3) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านความประหยัด แสดงรายละเอียดได้ดังนี้

1) ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพของปริมาณของตะกั่วที่ตรวจวัดได้

การวิเคราะห์การแจกแจงของข้อมูล โดยคิดค่านวนค่าสถิติแบบ Kolmogorov –Smirnov Test

H_0 : ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ

H_1 : ข้อมูลไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่า p เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 แสดงว่ายอมรับ H_1 นั่นคือ ข้อมูลไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

การวิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูล โดยใช้ Wilcoxon Test

H_0 : $\mu_{ICP} = \mu_{PADs}$ ปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าป็นที่มือที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษและวิธี ICP-MS มีค่าไม่แตกต่างกัน

H_1 : $\mu_{ICP} \neq \mu_{PADs}$ ปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าป็นที่มือที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษและวิธี ICP-MS มีค่าแตกต่างกัน

ผลการวิเคราะห์พบว่า p เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 แสดงว่ายอมรับ H_1 นั่นคือ ปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าป็นที่มือที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาศและวิธี ICP-MS มีค่าแตกต่างกัน

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ พบว่าเมื่อค่าความเข้มข้นตั้งแต่ 186.809 ปริมาณตะกั่วที่คำนวณได้จากวิธีอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาศจะมีค่าเป็นบวก โดยคำนวณได้ เท่ากับ 0.923 ppm ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณตะกั่วที่ตรวจวัดได้จากวิธี ICP-MS คือ 1.681 ppm ขึ้นไป จึงสามารถเปรียบเทียบปริมาณตะกั่วได้ ผู้วิจัยจึงเลือกพิจารณาเฉพาะค่าที่เป็นบวก นำไปวิเคราะห์ทางสถิติ ดังนี้

การวิเคราะห์การแจกแจงของข้อมูล โดยคิดคำนวณค่าสถิติแบบ Kolmogorov-Smirnov Test

H_0 : ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ

H_1 : ข้อมูลไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่า p เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 แสดงว่ายอมรับ H_1 นั่นคือ ข้อมูลไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

การวิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูล โดยใช้ Wilcoxon Test

H_0 : $\mu_{ICP} = \mu_{PADs}$ ปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าป็นที่มือที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาศและวิธี ICP-MS มีค่าไม่แตกต่างกัน

H_1 : $\mu_{ICP} \neq \mu_{PADs}$ ปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าป็นที่มือที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาศและวิธี ICP-MS มีค่าแตกต่างกัน

ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่า p เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 แสดงว่ายอมรับ H_1 นั่นคือ ข้อมูลไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

โดยสรุป พบว่าเมื่อความเข้มข้นมีค่าตั้งแต่ 186.809 ขึ้นไป ปริมาณตะกั่วที่คำนวณได้จากวิธีอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาศจะมีค่าเป็นบวก โดยคำนวณได้ เท่ากับ 0.923 ppm ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้กับปริมาณตะกั่วที่ตรวจวัดได้จากวิธี ICP-MS ซึ่งเท่ากับ 1.681 ppm ขึ้นไป ดังนั้น ปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าป็นที่มือที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาศและวิธี ICP-MS มีค่าใกล้เคียงกัน สามารถเปรียบเทียบกันได้

3) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านความประหยัด

วิธี ICP-MS พร้อมอุปกรณ์ จำนวน 1 เครื่อง มีราคา 10,580,000 บาท มีค่าซ่อมและบำรุงรักษาประมาณ 400,000 บาท ต่อปี ใช้งานตรวจวิเคราะห์ภายในห้องปฏิบัติการ และผู้ใช้งานต้องมีทักษะในการใช้งานเครื่องมือได้อย่างดี ส่วนอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (μ PADs) ที่ประดิษฐ์ขึ้นจากกระดาษกรองมีราคาแผ่นละ 3.6 บาท ขั้นตอนการประดิษฐ์และการใช้งานไม่ซับซ้อน อุปกรณ์มีน้ำหนักเบา ดังนั้นวิธีอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ จึงสามารถนำมาใช้กับงานวิเคราะห์เบื้องต้นได้

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

ผู้วิจัยขอนำเสนอสรุปผลการวิจัยโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) ผลการเปรียบเทียบปริมาณตะกั่วที่ตรวจวัด 2) เปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านการประหยัด โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ผลการเปรียบเทียบปริมาณตะกั่วที่ตรวจวัด

จากการวิเคราะห์ข้อมูลผลการเปรียบเทียบปริมาณตะกั่วที่ตรวจวัดได้จากวิธี ICP-MS และวิธีอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ โดยพิจารณาเฉพาะค่าบวก พบว่าที่บริเวณหลังมือขวา และฝ่ามือขวา ในตัวอย่างที่ 1, 2, 3, 4, 6 และ 10 ปริมาณตะกั่วมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับที่ Werner et al. (2020) ได้ทำการศึกษาวิจัยเรื่องการเปรียบเทียบวิธีการเก็บรวบรวมตัวอย่าง 3 วิธี สำหรับตรวจหาเขม่าป็นที่มือ โดยใช้โซเดียม โรไดโซเนต (Sodium Rhodizonate) กล่าวว่าปฏิกิริยาเชิงบวกส่วนใหญ่ สังเกตได้จากมือข้างที่ถนัด (ขวา) เมื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบตามสมมติฐาน ปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าป็นที่มือที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษและวิธี ICP-MS มีค่าไม่แตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ทวี และคณะ (2560) ที่ศึกษาวิจัยเรื่อง การพัฒนาชุดทดสอบแบบเรียบและตะกั่วด้วยอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์แบบกระดาษ เปรียบเทียบกับวิธีการแกร์ไฟเฟอร์เนตอะตอมมิกแอฟสอปชั่นสเปกโตรเมตรี พบว่าให้ผลที่ไม่แตกต่างกัน นั้นแสดงว่าวิธีการแบบกระดาษที่พัฒนาขึ้นเป็นวิธีการทางเลือกใหม่ที่มีความสมรรถนะเหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้เป็นชุดทดสอบปริมาณธาตุตะกั่วและแบเรียมได้ เช่นเดียวกันกับการศึกษาของ รุ่ง คำปู้ (2562) ที่วิเคราะห์เปรียบเทียบปริมาณไนโตรเจนและไนเตรทในเขม่าป็นที่วัดได้ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษกับที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคไอออนโครมาโตกราฟี พบว่าข้อมูลมีความสัมพันธ์กันเป็นอย่างดี

2) เปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านการประหยัด

จากการรวบรวมข้อมูลค่าใช้จ่าย อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (μ PADs) ที่ประดิษฐ์ขึ้นจากกระดาษกรองมีราคาแผ่นละ 3.6 บาท โดยกระดาษกรอง 1 แผ่น สามารถประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดได้ จำนวน 7 ชิ้น ขั้นตอนการประดิษฐ์และการใช้งานไม่ซับซ้อน อุปกรณ์มีน้ำหนักเบา เคลื่อนย้ายได้ สอดคล้องกับแนวคิดในการพัฒนาการตรวจวิเคราะห์บนกระดาษเพื่อคัดกรองเบื้องต้นของ Nishat และคณะ (2021) ที่กล่าวว่าช่วยลดต้นทุนและระยะเวลาในการตรวจวัด อีกทั้งอุปกรณ์ที่ทำจากกระดาษยังมีราคาถูก ใช้สารเคมีปริมาณน้อย ให้ผลวิเคราะห์ที่รวดเร็ว อุปกรณ์มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา สามารถพกพาไปทดสอบในภาคสนามได้โดยสะดวก ส่วนในวิธี Inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS) หรือเครื่องตรวจวิเคราะห์ธาตุแบบรีเอมและแอนติโมนีในเขม่าป็นที่มีมือ พร้อมอุปกรณ์ จำนวน 1 เครื่อง มีราคา 10,580,000 บาท มีค่าซ่อมและบำรุงรักษา ประมาณ 400,000 บาท ต่อปี ใช้งานตรวจวิเคราะห์ภายในห้องปฏิบัติการ และผู้ใช้งานต้องมีทักษะในการใช้งานเครื่องมือได้อย่างดี สอดคล้องกับที่ Scott C Wilschefski, M. R. B., (2019) กล่าวว่าแมสสเปกโตรเมทรีจะมีความเฉพาะเจาะจงสูง นักวิทยาศาสตร์และแพทย์ควรตระหนักถึงศักยภาพของการรบกวน และปัจจัยการวิเคราะห์ที่อาจส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของผลลัพธ์ที่รายงานได้แก่ ค่าใช้จ่ายทุนเริ่มต้น (ค่าเครื่องมือและการตั้งค่าห้องปฏิบัติการ) และต้นทุนการดำเนินงานต่อเนื่อง ห้องปฏิบัติการต้องประเมินปัจจัยทั้งหมดเหล่านี้

อีกประเด็นหนึ่ง เครื่องมือ ICP-MS ในประเทศไทย ยังมีจำนวนน้อย ทำให้บางหน่วยงานขาดแคลนเครื่องมือ จึงต้องใช้เวลาส่งหลักฐานไปตรวจพิสูจน์ ซึ่งใช้ระยะเวลานาน แต่วิธีอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ สามารถตรวจได้ทันที เหมาะกับเป็นการตรวจเบื้องต้น ดังนั้นเมื่อปริมาณตะกั่วไม่แตกต่างกัน และประหยัดกว่า สามารถนำวิธีอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษมาใช้ได้ แต่มีข้อจำกัดในเรื่องการตรวจสอบปริมาณตะกั่วที่มีค่าน้อย จึงสรุปได้ว่าอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษที่ประดิษฐ์ขึ้นสามารถนำมาใช้ได้ถ้าตัวอย่างมีปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วมากเพียงพอ

5.3 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย

- ผู้วิจัยขอเสนอแนะออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้ และ 2) ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป โดยมีรายละเอียดดังนี้

5.3.1 ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

1) ด้านการตรวจพิสูจน์หลักฐาน ผู้ตรวจพิสูจน์หลักฐานที่ปฏิบัติงานเกี่ยวกับด้านอาวุธปืนและเครื่องกระสุนปืนสามารถนำผลการวิจัยนี้ไปใช้เป็นแนวทางการตรวจหาปริมาณธาตุตะกั่วจากเขม่าปืนที่มีเบืองตัน ส่วนในด้านของผู้ตรวจสถานที่เกิดเหตุ สามารถนำอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษไปทดสอบหาปริมาณตะกั่วเบืองตันได้ในสถานที่เกิดเหตุหรือนำไปใช้ในห้องปฏิบัติการเพื่อเป็นการคัดกรองงานเบืองตัน โดยผลการวิจัยพบว่า ปริมาณสารตะกั่วจากเขม่าปืนที่มีที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษและวิธี ICP-MS มีค่าไม่แตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามปริมาณตะกั่วจากเขม่าปืนที่มีเบืองตันจำเป็นต้องยืนยันด้วยค่าที่แน่นอนเพราะผลการพิสูจน์นั้น เป็นการระบุยืนยันความเกี่ยวข้องกับการยิงปืน

2) สำนักงานพิสูจน์หลักฐานตำรวจ ควรมีการเผยแพร่ความรู้ในเรื่องอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ สำหรับใช้ตรวจหาปริมาณธาตุโลหะเบืองตัน โดยอาจให้สถาบันฝึกอบรมและวิจัยการพิสูจน์หลักฐานตำรวจ ดำเนินการจัดฝึกอบรมและจัดทำคู่มือการใช้งานเพื่อเผยแพร่ให้แก่ผู้ตรวจพิสูจน์หลักฐานในหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง



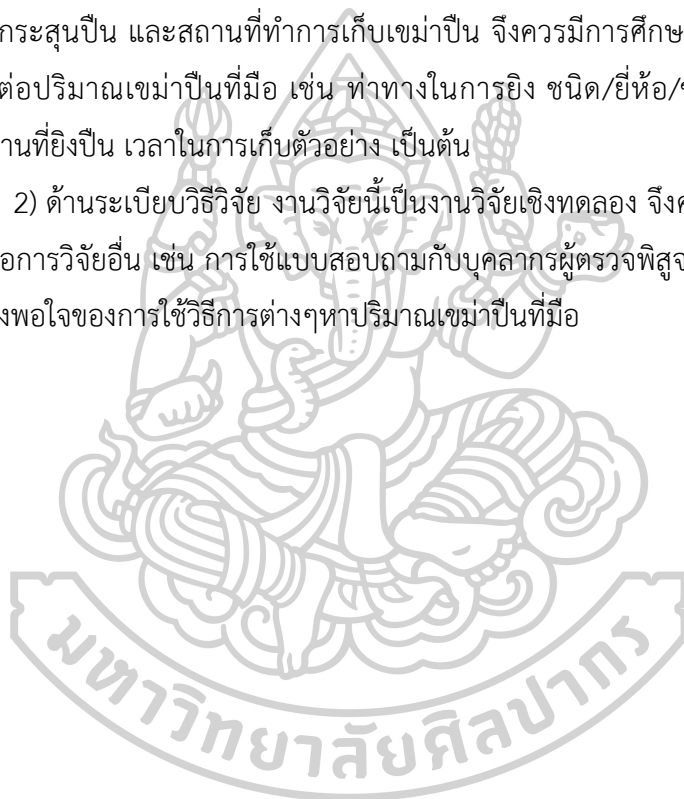
5.3.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

1) ด้านประเด็นที่ศึกษา

1.1 งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษกับวิธี ICP-MS โดยมีตัวแปรอิสระ เป็นวิธีการตรวจวิเคราะห์ คือวิธี ICP-MS และอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ จึงควรมีการดำเนินการวิจัยโดยศึกษาเปรียบเทียบตัวแปรอื่นๆ เช่น ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่าง วิธี SEM กับวิธี ICP-MS

1.2 งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปริมาณเขม่าป็นที่มีมือ โดยมีตัวแปรควบคุมเป็นอาวุธปืน กระสุนปืน และสถานที่ทำการเก็บเขม่าป็น จึงควรมีการศึกษาในเรื่องของปัจจัยอื่นที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณเขม่าป็นที่มีมือ เช่น ท่าทางในการยิง ชนิด/ยี่ห้อ/ขนาดของอาวุธปืนและกระสุนปืน สถานที่ยิงปืน เวลาในการเก็บตัวอย่าง เป็นต้น

2) ด้านระเบียบวิธีวิจัย งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลอง จึงควรมีการดำเนินการวิจัยโดยใช้เครื่องมือการวิจัยอื่น เช่น การใช้แบบสอบถามกับบุคลากรผู้ตรวจพิสูจน์หลักฐานด้านอาวุธปืน เพื่อวัดความพึงพอใจของการใช้วิธีการต่างๆหาปริมาณเขม่าป็นที่มีมือ



รายการอ้างอิง

- Andreola, S., Gentile, G., Battistini, A., Cattaneo, C., & Zoja, R. (2011). Forensic applications of sodium rhodizonate and hydrochloric acid: a new histological technique for detection of gunshot residues. *J Forensic Sci*, 56(3), 771-774.
- Andres W. Martinez, Scott T. Phillips, Manish J. Butte, & George M. Whitesides. (2007). Patterned Paper as a Platform for Inexpensive, Low-Volume, Portable Bioassays. *Angewandte Chemie International Edition*, 2007(46), 1318-1320.
- Boracchi, M., Andreola, S., Collini, F., Gentile, G., Lucchini, G., Maciocco, F., Sacchi, G. A., & Zoja, R. (2018). Can cadaverous pollution from environmental lead misguide to false positive results in the histochemical determination of Gunshot Residues? In-depth study using ultra-sensitive ICP-MS analysis on cadaveric skin samples. *Forensic Sci Int*, 292, 23-26.
- Boracchi, M., Andreola, S., Collini, F., Gentile, G., Maciocco, F., Maghin, F., & Zoja, R. (2017). Can cadaverous pollution from environmental lead misguide to false positive results in the histochemical determination of gunshot residues? Study on cadaveric skin samples. *Forensic Science International*, 277, 16-20.
- Buking, S., Saetear, P., Tiyaongpattana, W., Uraisin, K., Wilairat, P., Nacapricha, D., & Ratanawimarnwong, N. (2018). Microfluidic Paper-based Analytical Device for Quantification of Lead Using Reaction Band-length for Identification of Bullet Hole and Its Potential for Estimating Firing Distance. *Analytical Sciences*, 34(1), 83-89.
- Fritz Feigl, H. A. S. (1942). Analytical Use of Sodium Rhodizonate. *Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition*, 14(10), 840-842.
- Gentile, G., Tambuzzi, S., Andreola, S., Boracchi, M., Gibelli, L., Migliorini, A. S., & Zoja, R. (2020). Is it possible to detect lead derived from gunshot residues on decalcified human bone by means of a histochemical staining with sodium rhodizonate? *Forensic Science International*, 316, 110474.
- Koons, R. D. (1998). Analysis of gunshot primer residue collection swabs by Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry. *Journal of Forensic Science*, 1998(43),

748-754.

- León, K., Mery, D., Pedreschi, F., & León, J. (2006). Color measurement in L*a*b* units from RGB digital images. *Food Research International*, 39(10), 1084-1091.
- Meng, H.-H., & Lee, H.-C. (2007). Elemental analysis of primer mixtures and gunshot residues from handgun cartridges commonly encountered in Taiwan. *Forensic Science Journal*, 2007(6 (1)), 39-54.
- Millet, J. D. (1954). *Management in the Public Service*. New York: McGraw-Hill Book.
- Muneeba Butt, M. S. G. (2016). Trace analysis of Gunshot residue on different fabrics using locally manufactured ammunition in Pakistan. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 7(12), 1620-1623.
- Nishat, S., Jafry, A. T., Martinez, A. W., & Awan, F. R. (2021). Paper-based microfluidics: Simplified fabrication and assay methods. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 336, 129681.
- Ortiz-Gomez, I., Ortega-Muñoz, M., Salinas-Castillo, A., Álvarez-Bermejo, J. A., Ariza-Avidad, M., de Orbe-Payá, I., Santoyo-Gonzalez, F., & Capitan-Vallvey, L. F. (2016). Tetrazine-based chemistry for nitrite determination in a paper microfluidic device. *Talanta*, 160, 721-728.
- Pamela K. Walker, P. J. R. (2002). *Field Test Kit for Gunshot Residue Detection*.
- Peterson, E., & Plowman, E. G. (1989). *Business Organization and Management*. Homewood, Illinois: Richard, D. Irwin.
- Scott C Wilschefski, M. R. B. (2019). *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry: Introduction to Analytical Aspects*. *The clinical biochemist reviews*, 115-133.
- Simon, H. A. (1960). *The New Science of Management Decision*. New York: Harper & Row, 180-181.
- Sun, H., Li, W., Dong, Z.-Z., Hu, C., Leung, C.-H., Ma, D.-L., & Ren, K. (2018). A suspending-droplet mode paper-based microfluidic platform for low-cost, rapid, and convenient detection of lead(II) ions in liquid solution. *Biosensors and Bioelectronics*, 99, 361-367.
- Trofimchuk, E., Hu, Y., Nilghaz, A., Hua, M. Z., Sun, S., & Lu, X. (2020). Development of

- paper-based microfluidic device for the determination of nitrite in meat. *Food Chemistry*, 316, 126396.
- Vanini, G., Souza, M. O., Carneiro, M. T. W. D., Filgueiras, P. R., Bruns, R. E., & Romão, W. (2015). Multivariate optimisation of ICP OES instrumental parameters for Pb/Ba/Sb measurement in gunshot residues. *Microchemical Journal*, 120, 58-63.
- Wang, W., Ding, S., Wang, Z., Lv, Q., & Zhang, Q. (2021). Electrochemical paper-based microfluidic device for on-line isolation of proteins and direct detection of lead in urine. *Biosensors and Bioelectronics*, 187, 113310.
- Werner, D., Gassner, A.-L., Marti, J., Christen, S., Wyss, P., & Weyermann, C. (2020). Comparison of three collection methods for the sodium rhodizonate detection of gunshot residues on hands. *Science & Justice*, 60(1), 63-71.
- Wisang, Y. F., H. S., U. A., A., & Sabarudin. (2019). *Microfluidic Paper-based Analytical Devices (μ PADs) For Analysis Lead Using Naked Eye and Colorimetric Detections* IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,
- จินดา บำเพ็ญอยู่, พ. โ. (2535). โครงการการศึกษาการตรวจหาสารตะกั่วใน ตัวอย่างอากาศในสิ่งแวดล้อมการทำงานโดยวิธีการทางภาคสนามที่ง่ายและราคาถูก. วารสารการส่งเสริมสุขภาพและอนามัยสิ่งแวดล้อม, 15(2).
- จุฬาลักษณ์ น้อยพวง. (2555). การพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ของไหลจุลภาคฐานกระดาษสำหรับตรวจวัดระดับกลูโคสจากเลือดครบถ้วน ด้วยหลักการเคมีไฟฟ้า วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาชีวเคมีคลินิกและอณูทางการแพทย์ คณะสหเวชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย].
- ตะวัน ไวยรัตน์. (2553). การพัฒนาชุดตรวจสอบสารตะกั่วบนร่องรอยที่เกิดจากลูกกระสุนปืน วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี].
- ทวี ทนาวร, สุนิสา นิยมนา, & ธนากร เปลื้องกลาง. (2560). การพัฒนาชุดทดสอบแบบเรียบและตะกั่วด้วยอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์แบบกระดาษ. วารสารวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา 2(2), 1.
- ทิพาวดี เมฆสุวรรณค์. (2538). การส่งเสริมประสิทธิภาพในส่วนราชการ. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานคณะกรรมการ.
- ทริศม์ชญา พิพัฒน์เพ็ญ และคณะ. (2557). การประเมินประสิทธิภาพและประสิทธิผลการปฏิบัติราชการของเทศบาลนครสงขลา มหาวิทยาลัยหาดใหญ่].

- ธนกศักดิ์ บุญมาก. (2564). การตรวจพิสูจน์หลักฐานด้านอาวุธปืน. เอกสารประกอบการสอนรายวิชา 510694 หลักสูตรระดับมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- นงภัศ โฆษวิทิตกุล. (2555). คู่มือข้อมูลเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- นฤมล สุ่นสวัสดิ์. (2549). การพัฒนาประสิทธิภาพในการทำงาน. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานวันทิพย์.
- เบญจวรรณ นิลวงศ์, สุนิศา เม้าะสนิ, & อาชีวะห์ ดอเลาะ. (2559). การพัฒนาวิธีวิเคราะห์โลหะหนักในน้ำดื่มของโรงเรียนในเขตจังหวัดนครศรีธรรมราชด้วยอุปกรณ์ของไหลจุลภาคบนกระดาษ. วารสารวิชา, 35(1).
- ปวีณา เตือนฉาย, & วิจิตรา เตือนฉาย. (2557). อุปกรณ์การวิเคราะห์บนกระดาษ. วารสารวิชาการปฐมวัน, 4(10), 37-47.
- มนตรี ดอนฟุ้งไพร. (2564). นิยามความหมายของอาวุธปืนทางนิติวิทยาศาสตร์. Retrieved 9 พฤษภาคม from
- รุ่ง คำปู้. (2562). การพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษสำหรับตรวจวัดไนเตรท และไนไตรท์ในเขม่าดินปืน วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขานิติวิทยาศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร].
- ลาวัลย์ ศรีพงษ์. (2552). บทความพื้นฐานฟูริซากร สำหรับการศึกษาดูเรื่องทางเภสัชศาสตร์ (on-line). ไทยเิกษณ์ชนิพนธ์, 1-19.
- สำนักงานตำรวจแห่งชาติ. (2563). สถิติผลการปฏิบัติงานของหน่วยงานในสังกัด สำนักงานพิสูจน์หลักฐานตำรวจ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2563 (ต.ค.62 - ก.ย.63).
- อรอนงค์ แก้วบุตร. (2557). การกระจายตัวของอนุภาคเขม่าปืนในรถยนต์ที่ใช้อยู่เหตุยิงด้วยอาวุธปืนด้วยเทคนิคอะตอมมิค แอบซอร์ฟชัน สเปกโตรโฟโตเมตริ วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร].
- อรอุษา เตียวตระกูล. (2559). การวิเคราะห์หาปริมาณไนไตรท์และไนเตรทในเขม่าดินปืนบนอุปกรณ์แบบกระดาษ วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร].

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ร้อยตำรวจโทหญิง นลพรรณ วิเชียรโชติ
วัน เดือน ปี เกิด	2 ตุลาคม 2532
สถานที่เกิด	ราชบุรี
วุฒิการศึกษา	วท.บ.เคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ที่อยู่ปัจจุบัน	40/8 ม.5 ต.วัดเพลง อ.วัดเพลง จ.ราชบุรี 70170
ผลงานตีพิมพ์	-
รางวัลที่ได้รับ	-

