

การพัฒนาชุดตรวจแบบกระดาษเพื่อตรวจหาเขม่าปืน
Development of a Paper-Based Test Kit for the Detection
of Gunshot Residues

ศิริรัตน์ ชูสกุลเกรียง, ศุภชัย ศุภลักษณ์นารี,

ปิยาภา จันทร่มล และ อรทัย เขียวพุ่ม

มหาวิทยาลัยศิลปากร

Sirirat Choosakoonkriang, Supachai Supaluknari,

Piyapa Junmon and Orathai Khaewpum

Silpakorn University, Thailand

Corresponding Author, E-mail: Choosakoonkrian_s@silpakorn.edu

บทคัดย่อ

เขม่าปืนเป็นพยานหลักฐานที่สำคัญซึ่งช่วยในการระบุตัวผู้ต้องสงสัยที่เกี่ยวข้องกับอาวุธปืน การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาอุปกรณ์การวิเคราะห์สีบนกระดาษด้วยระบบของไหลจุลภาคแบบรวดเร็ว (μ PAD) ใช้สำหรับการตรวจหาไอออนตะกั่ว, แบเรียม, ไนโตรทรี และไนเตรตในปลอกกระสุนปืน ซึ่งอุปกรณ์ μ PAD ประดิษฐ์ขึ้นจากการพิมพ์สีฝังลงบนกระดาษกรอง การวิเคราะห์ไนโตรทรี และไนเตรตไอออนวิเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาการเกิดสีโดยใช้ Griess reagent และสำหรับการวิเคราะห์ตะกั่วและแบเรียมทดสอบโดยใช้โซเดียมโรโดไซเนต โดยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษใช้สำหรับตรวจวิเคราะห์ไอออนดังกล่าวจากการวัดความเข้มสี RGB ของภาพถ่ายจากอุปกรณ์ μ PADs ผ่านโปรแกรม ImageJ ผลการวิจัยพบว่าขีดจำกัดการตรวจวิเคราะห์ไอออนตะกั่ว, แบเรียม, ไนโตรทรี และไนเตรตอยู่ที่ 0.04, 0.11, 0.16 และ 0.16 nmol ตามลำดับ และอุปกรณ์ μ PAD ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ไอออนตะกั่ว, แบเรียม, ไนโตรทรี และไนเตรตดังกล่าวในเขม่าปืนที่รวบรวมจากมือของอาสาสมัครยิงปืนและปลอกกระสุนปืน จากผลการทดลองถึงแม้ว่าบนมือของอาสาสมัครยิงปืนจะตรวจพบเขม่าปืนค่อนข้างน้อย แต่ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้อุปกรณ์ μ PAD ซึ่งเป็นการทดสอบอุปกรณ์วิเคราะห์ที่ง่ายสามารถนำมาใช้ในการสืบสวนสอบสวนทางนิติวิทยาศาสตร์ในการตรวจเขม่าปืนแบบภาคสนามได้

คำสำคัญ: เขม่าปืน; อุปกรณ์การวิเคราะห์บนกระดาษด้วยระบบของไหลจุลภาค; นิติวิทยาศาสตร์

Abstract

Gunshot residue (GSR) was a piece of important trace evidence which helps to identified the shooter related to firearms. The objective of this study was to develop a rapid color microfluidic paper-based analytical devices (μ PADs) for the detection of lead, barium nitrile and nitrate in gunshot residues. The μ PADs were created by beeswax printing on filter paper. The analysis of nitrite and nitrate ions was based on the color reaction using a Griess reagent while the detection of lead and barium ions was using a sodium rhodizonate test. The devices were employed to detect those ions existence from the color intensity of the μ PADs images read by an ImageJ software in RGB color space. It was found that the limits of detection for lead, barium, nitrile and nitrate ions were 0.04, 0.11, 0.16 and 0.16 nmol. The μ PAD device was then used to analyses the lead, barium, nitrite and nitrate ions in gunshot residues collected from the shooter's hands and from fired cartridge cases. Although the presence of GSR on shooter's hands after a shooting could be relatively low, the results has demonstrated that applying μ PADs, a simple analytical devices test could assist the forensic investigation in detecting in the field-work detection of GSR.

Keywords: Gunshot residue (GSR); A rapid color microfluidic paper-based analytical devices (μ PADs); Forensic science

บทนำ

ปัจจุบันในสังคมไทยมีปัญหาทางอาชญากรรมเพิ่มขึ้น มีการรายงานในสื่อต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นสื่อหลักทางโทรทัศน์ วิทยุ หนังสือพิมพ์ และ ทางสื่อออนไลน์ประเภทต่างๆ ด้วย แม้กระทั่งช่วงการระบาดของไวรัสโควิด แต่คดีอาชญากรรมก็ไม่ได้ลดลงเลย (ปुरुณิมา, 2564) คดีอาชญากรรมที่เกิดขึ้น มักจะมีการใช้อาวุธมาเกี่ยวข้องในคดีอ้างถึงทฤษฎีของ Locard นำเสนอแนวความคิดที่ว่าเมื่อวัตถุ 2 ชิ้น สัมผัสกันจะมีการแลกเปลี่ยนบริเวณพื้นผิวที่สัมผัสกันของวัตถุนั้น ซึ่งทฤษฎีที่ได้มาจากแนวความคิดนี้ มีการนำไปใช้กับพยานหลักฐานที่ตรวจพบในสถานที่เกิดเหตุ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานนิติวิทยาศาสตร์ (กองบรรณาธิการ, ม.ป.ป.) ในคดีอาชญากรรมร้ายแรงมักจะมีอาวุธมาเกี่ยวข้อง อาวุธปืนเป็นอาวุธที่มักถูกนำมาใช้เมื่อมีการยิงปืนเกิดขึ้น เขม่าปืนที่เกิดขึ้นมักจะถูกพบเจอในสถานที่เกิดเหตุ ทำให้การตรวจวิเคราะห์เขม่าปืนในสถานที่เกิดเหตุ ไม่ว่าจะติดมากับมือ ติดอยู่บริเวณผิวหนังหรือเสื้อผ้าของผู้ต้องสงสัย เป็นต้น เพื่อมาช่วยในกระบวนการสืบสวนสอบสวนเพื่อยืนยันหาตัวผู้กระทำความผิด ซึ่งการยืนยันด้วยหลักการทางด้านนิติวิทยาศาสตร์ เป็นสิ่งที่น่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับในกระบวนการยุติธรรมและสามารถนำไปใช้ในการพิจารณาคดีในชั้นศาลได้

เขม่าปืน (Gunshot Residue, GSR) ประกอบด้วยอนุภาค ที่ถูกขับออกจากปากกระบอกปืน หลังจากการปล่อยกระสุนปืนออกมา ประกอบด้วยอนุภาคที่ถูกเผาไหม้และไม่เผาไหม้ จากตัวจุดชนวนท้ายกระสุนปืน (Explosive primer) ดินส่่งกระสุนปืน (Propellant) และตะกั่วที่ ระเหยกกลายเป็นไอ

(Vaporized lead) การยิงกระสุนทำให้เกิดปฏิกิริยาระเบิดที่รุนแรงมากซึ่งอยู่ภายในกระบอกปืน GSR จากกระสุนปืนมีความหมายครอบคลุมและอาจรวมถึงเศษโลหะจากปลอกกระสุนปืน ตลอดจนสิ่งสกปรกหรือสารตกค้างอื่น ๆ ที่อยู่ภายในลำกล้องปืนที่อาจหลุดออกมาได้ (Selin, 2013) โดยปกติการยิงปืนมักจะพบเขม่าปืนที่ฟุ้งกระจายติดอยู่บริเวณที่มีการยิงปืน ผู้ที่อยู่ในสถานที่เกิดเหตุจะตรวจพบเขม่าปืนที่ตัว เสื้อผ้าได้ ซึ่งการตรวจยืนยันว่าเป็นเขม่าปืนนั้นจะประกอบด้วยธาตุหลักที่ใช้ระบุว่าเป็นองค์ประกอบของเขม่าดินปืน คือ ตะกั่ว (Pb), พลวง (Sb) และแบเรียม (Ba) และอาจตรวจจากไอออนสารไนเตรทและไนไตรท์ที่เกิดจากการเผาไหม้ของดินส่กระสุนปืน ซึ่งจะตรวจพบได้เมื่อเกิดจากการยิงปืนเท่านั้น การตรวจหาสารเหล่านี้สามารถนำมาใช้ยืนยันว่าตัวบุคคลได้ว่าผู้นั้นมีความเกี่ยวข้องกับการใช้อาวุธปืนนั้นๆ และอาจจะอยู่ในสถานที่เกิดเหตุการณ์ยิงปืนได้ ในการตรวจยืนยันว่าเป็นเขม่าปืนนั้น มีหลายวิธีการสำหรับการตรวจวัดมีหลากหลายเทคนิค วิธีการตรวจด้วยเครื่องมือเหล่านี้ อาทิเช่น การตรวจธาตุหลักโดยวิธีวิเคราะห์ทางสเปกโตรสโคปี (Spectroscopy) ประเภทต่างๆ (Rosenberg & Dockery, 2008) (Dockery & Goode, 2003; Doty & Lednev, 2018; Vanini et al., 2015) การหาปริมาณไอออนไนเตรท และไนไตรท์ด้วยวิธีทางสเปกโตรสโคปี (Spectroscopy) (García-Robledo, Corzo, & Papaspyrou, 2014; ภิญญาดา อันสนั่น และคณะ 2556) การวิเคราะห์ทางโครมาโทกราฟี (Chromatography) (Michalski & Kurzyca, 2006) และการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemistry) (Tan, Anastasi, & Chandra, 2021) เป็นต้น ซึ่งวิธีและเทคนิคทางเครื่องมือขั้นสูงเหล่านี้ต้องใช้ผู้ปฏิบัติการที่มีทักษะความชำนาญ และใช้รีเอเจนท์ เวลา และปริมาณตัวอย่างในการวิเคราะห์มาก เป็นการตรวจในห้องปฏิบัติการซึ่งต้องมีการเก็บตัวอย่าง การขนส่งตัวอย่างด้วย ดังนั้นการพัฒนาเทคนิคในการตรวจวัดที่ง่ายและราคาถูกเพื่อเอาชนะข้อเสียเหล่านี้จึงมีความสำคัญ

ชุดทดสอบอย่างง่าย (Test Kit) เป็นชุดทดสอบที่ใช้สำหรับคัดกรองตัวอย่างเบื้องต้น ต้องเป็นชุดทดสอบที่ใช้เวลาไม่นานและสามารถทดสอบได้ง่าย ให้ทราบผลอย่างรวดเร็วในเบื้องต้น ก่อนจะนำไปทดสอบอย่างละเอียดด้วยเครื่องมือและขั้นตอนที่มีแม่นยำสูงในห้องปฏิบัติการเพื่อให้ได้ผลถูกต้องมากขึ้น โดยทั่วไปชุดทดสอบอย่างง่ายจะถูกออกแบบมาเพื่อให้ใช้งานได้ง่าย เห็นผลลัพธ์ในเวลาไม่นาน ไม่จำเป็นต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญในการทดสอบ หลักการโดยทั่วไปของชุดทดสอบอย่างง่าย อาศัยการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารเป้าหมายที่ต้องการทดสอบกับสารที่มีความไวและจำเพาะต่อการเกิดปฏิกิริยากับสารนั้นๆ เมื่อสารทดสอบทำปฏิกิริยากับสารเป้าหมายจะแสดงการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้อย่างง่ายและชัดเจน เช่น สีเปลี่ยนไปจากเดิม เป็นต้น ชุดทดสอบอย่างง่ายมีหลายประเภท อาทิชุดทดสอบแบบหยด ชุดทดสอบแบบจุ่ม เป็นต้น

อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (Paper based device) อุปกรณ์ประเภทนี้ประกอบขึ้นเป็นพื้นที่สองส่วนที่แตกต่างกัน คือพื้นที่ที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) ซึ่งก็คือกระดาษมักจะเป็นพื้นที่เกิดปฏิกิริยา เช่นเกิดการเปลี่ยนสี (Colorimetric) หรือการวัดระยะทางการเกิดปฏิกิริยา เป็นต้น และพื้นที่ที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ที่ใช้กำหนดเขตปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ถูกนำมาใช้เป็นแนวทางการปฏิบัติสำหรับการวิเคราะห์ที่มี

ราคาถูกและรวดเร็ว แนวทางการออกแบบอุปกรณ์ที่พบบ่อยที่สุดคือการพิมพ์ขึ้นเนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและค่อนข้างรวดเร็ว อุปกรณ์แบบกระดาษนี้เป็นที่นิยมเนื่องจากมีต้นทุนต่ำในการผลิต สามารถประดิษฐ์ได้ง่าย ทำจากกระดาษที่หาซื้อได้ง่าย ไม่ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการวิเคราะห์ ที่สำคัญพกพาไปใช้ในภาคสนามได้ง่าย และใช้ปริมาณสารตัวอย่างและรีเอเจนต์น้อยในการวิเคราะห์ สามารถนำมาใช้ได้ง่าย (Ravgiala et al., 2014) มีงานทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องคือ

Ramesh Chandra (1962) และคณะ ได้ทำการทดสอบหาปริมาณแคลเซียมในตัวอย่างยาโดยใช้ Rhodizonate test สามารถตรวจหาไอออนประจุบวกบางกลุ่มได้อย่างรวดเร็วด้วยรีเอเจนต์ชนิดเดียวกัน มีประโยชน์ในการตรวจวัดธาตุบางตัว เช่น Ca และ Ba เป็นต้น ในปี 2013 Ali Kemal Yetisen และคณะ (2013) ได้รีวิวกการตรวจวัดแบบกระดาษเพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดเพื่อสุขภาพ โดยมีการศึกษาเกี่ยวกับการทำอุปกรณ์ การใช้งาน การตรวจวัด การวัดเชิงปริมาณ โดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแบบง่ายๆ เช่น กล้องมือถือ เป็น และความเป็นไปได้ที่จะขยายสเกลไปเป็นสเกลที่ใหญ่ขึ้น (Yetisen at al., 2013) ในปี 2014 Samir A. Bhakta และคณะ ได้ใช้อุปกรณ์ตรวจวัดของไหลจุลภาคแบบกระดาษหาปริมาณไนโตรเจนในน้ำลายโดยวิธี Griess assay ตรวจวัดโดยใช้เครื่องสแกนเนอร์และนำไปประมวลผลด้วยโปรแกรม Adobe photoshop CS6 และนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณไนโตรเจนจากการอ่านค่าความเข้มสีจากสีม่วงแดงในโปรแกรม Adobe photoshop CS6 ซึ่งอ่านเป็นค่ารูปแบบ CMYK (Bhakta et al., 2014) ในปี 2560 อรุษา เตียวตระกูล ได้ทำการวิจัยเรื่องการวิเคราะห์หาปริมาณไนเตรท และไนไตรท์ในตัวอย่างเขม่าดินปืนบนอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ เมื่อนำอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษมาใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณไนเตรท และไนไตรท์ในตัวอย่างเขม่าดินปืนที่เก็บตัวอย่างจากมือผู้ยิง และจากด้านในของปลอกกระสุนปืนที่ยิงแล้ว พบว่าปริมาณของไอออนไนเตรทที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษมีความสัมพันธ์กับปริมาณของไอออนไนเตรทที่วิเคราะห์ได้ โดยใช้เทคนิคไอออนโครมาโทกราฟี (อรุษา เตียวตระกูล, 2560) นอกจากนี้ในปี 2018 Supatana Bukiing และคณะ ได้พัฒนา อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษแบบวัดระยะทาง ในการหาเชิงปริมาณตะกั่ว เพื่อใช้ในการยืนยันว่าเป็นเขม่าปืน และอาจนำมาใช้ในการดูตำแหน่งและ ระยะ การยิงปืน ของผู้ยิงปืนในสถานที่เกิดเหตุได้ (Bukiing et al., 2018)

Cromartie และคณะ ได้สร้างอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกแบบกระดาษที่สามารถทำการทดสอบเบื้องต้นได้หลายรูปแบบสำหรับการแสดงออกของของเหลวชีวภาพในสถานที่เกิดเหตุ อุปกรณ์เป็นแบบ มัลติเพล็กซ์ทำให้สามารถตรวจหาได้ ทั้งเลือด น้ำลาย น้ำอสุจิ และปัสสาวะได้พร้อมกัน อุปกรณ์พกพานี้ใช้สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสี (Colorimetric reagents) ที่ตรึงไว้บนกระดาษทำให้สามารถอ่านค่าได้ด้วยตาเปล่าหรือตรวจพบได้จากกล้องโทรศัพท์มือถือ (Cromartie et al., 2019) นอกจากนี้มีการศึกษาพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ (μ PADS) สำหรับตรวจวัดไนเตรท และไนไตรท์ในเขม่าดินปืน เพื่อใช้ตรวจหาปริมาณไน

เตรท และไนไตรท์ในตัวอย่างเขม่าดินปืน โดยการพิมพ์สกรีนบนกระดาษด้วยซีฟิ่ง และตรวจวิเคราะห์ไนไตรท์ด้วยปฏิกิริยาการเกิดสีกับรีเอเจนท์ Griess การตรวจวัดไนเตรทใช้โลหะ Zn เป็นตัวรีดิวซ์ เปลี่ยนไอออนไนเตรทเป็นไอออนไนไตรท์ ในการวัดปริมาณไนเตรท และไนไตรท์ด้วยอุปกรณ์นี้ สำหรับการตรวจวัดทั้งไนเตรทและไนไตรท์ และสามารถตรวจตัวอย่างเขม่าปืนที่เก็บมาจากปลอกกระสุน และจากมือผู้ยิงปืนได้ดี (รุ่ง คำปู้, 2562) นอกจากนี้ได้ศึกษาการตรวจวัดเขม่าปืนบนถุงมือที่ถูกใส่ระหว่างยิงปืนโดยดูจากการเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดขึ้น โดยอาศัยปฏิกิริยา Modified Griess Reagent ในการทำให้เกิดสี ผลการทดลองที่ได้สามารถสังเกตการณ์เปลี่ยนสีของถุงมือได้ และสามารถใช้ตรวจถุงมือที่ผ่านการยิงปืนแม้มีปริมาณที่ตรวจวัดได้จะมีปริมาณน้อยมาก (Rafae et al., 2019)

ในปี 2020 Francisca T.S.M. Ferreira และคณะ ได้พัฒนาอุปกรณ์วิเคราะห์ที่ใช้กระดาษ Microfluidic สองชนิด (μ PAD) สำหรับการหาปริมาณของไนไตรท์และไนเตรทของตัวอย่างน้ำลายของมนุษย์เพื่อช่วยในการวินิจฉัยโรคและสภาวะสุขภาพที่เกี่ยวข้องกับไอออนเหล่านี้ และหลังจากการทดสอบตัวอย่างไนไตรท์และไนเตรท พบว่าวิธีการตรวจวัดด้วย μ PAD ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐาน (Ferreira et al., 2020) .ในปี 2564 มีงานวิจัยเรื่องการวิเคราะห์หาปริมาณไนเตรท และไนไตรท์ในตัวอย่างเขม่าดินปืนบนอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ ในการวัดระยะทางที่ประดิษฐ์ขึ้นเพื่อตรวจหาปริมาณไนเตรท และ ไนไตรท์ในตัวอย่างเขม่าดินปืน (Gunshot residues; GSR) ที่สร้างด้วยวิธีการพิมพ์ผ่านบล็อกสกรีนด้วยซีฟิ่ง และปริมาณไนเตรท และไนไตรท์จะขึ้นอยู่กับระยะทางการเคลื่อนที่ของสีที่เกิดจากปฏิกิริยาโดยใช้ Griess reagent (รักษชนก อินทรสุขศรี, 2564) ในปี 2021 มีการศึกษาการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (μ PAD) แบบง่ายในการวิเคราะห์ เขม่าปืนที่หลงเหลืออยู่ เพื่อศึกษาระยะทางจากผู้ยิงถึงเป้า โดยศึกษาเขม่าปืนบนผ้าทั้ง 4 ชนิด โดยตรวจวัดปริมาณตะกั่วในเขม่าดินปืน และพบว่า ความหนาของผ้ามีผลต่อปริมาณของตะกั่ว สามารถนำไปใช้ในการยิงปืนที่เป้าหมายระยะห่างจากผู้ยิงปืนไม่เกิน 60 cm (Wongpakdee et al., 2021)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะพัฒนาชุดทดสอบอย่างง่ายแบบกระดาษ ในการตรวจหาเขม่าปืนในที่เกิดเหตุ โดยสามารถใช้ในการตรวจยืนยันว่าเป็นเขม่าปืนได้โดยอาศัยปฏิกิริยาในการเกิดสีที่เกิดขึ้น ไม่ว่าจะเป็นธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักในการยืนยันว่าเป็นเขม่าปืนดังกล่าวข้างต้น และไอออนไนเตรต และไนไตรต์ในเขม่าปืนในอุปกรณ์เดียวกัน เป็นอุปกรณ์ที่พกพาสะดวก ตรวจได้อย่างง่าย รวดเร็ว มีความถูกต้องแม่นยำ มีราคาถูก สามารถตรวจยืนยันเขม่าปืนบนมือหรือเสื้อผ้าของผู้ต้องสงสัยได้ทันทีในสถานที่เกิดเหตุ สามารถช่วยในงานสอบสวนสืบสวนทางนิติวิทยาศาสตร์ได้

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ และสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจหาเชมาป็น
2. เพื่อพัฒนาชุดทดสอบแบบกระดาษอย่างง่าย (test kit) เพื่อตรวจหาเชมาป็น ในสถานที่เกิดเหตุ

ระเบียบวิธีวิจัย

1. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

การเก็บตัวอย่างเชมาป็นบนหลังมือ, ฝ่ามือทั้งสองข้าง และในปลอกกระสุนปืน โดยอาสาสมัครที่ให้ความร่วมมือในการเก็บตัวอย่างจำนวน 10 คนยิงปืนโดยผู้ยิงปืนจับปืนด้วยมือทั้งสองข้าง โดยอาวุธปืนขนานกับพื้น ใช้อาวุธปืนพกแบบกึ่งอัตโนมัติ ยี่ห้อ Glock ขนาด 9 มม. Luger รุ่น 19 ตลอดจนการทดลอง โดยทำการยิง 3 นัดติดกัน และทำการเก็บตัวอย่างทันที

1.1 การเก็บตัวอย่างเชมาจากบริเวณมือ

นำก้านสำลีที่หยดด้วยน้ำปราศจากไอออนเช็ดบริเวณหลังมือและฝ่ามือทั้งสองไปในทิศทางเดียว โดยเช็ดตั้งแต่บริเวณข้อมือไปจนถึงปลายนิ้วหรือจากปลายนิ้วถึงข้อมือ และเก็บใส่ถุงพลาสติกซิปล็อค พร้อมเขียนกำกับ แยกตัวอย่างเชมาดินปืนบริเวณหลังมือและฝ่ามือทั้งสอง (1 ถุงพลาสติกซิปล็อค / 1 ตัวอย่าง)

นำตัวอย่างก้านสำลีใส่ขวด vial เติมน้ำปราศจากไอออนลงไป 2.0 mL นำไป Sonicare เป็นเวลา 30 นาที เพื่อทำการสกัดตัวอย่าง

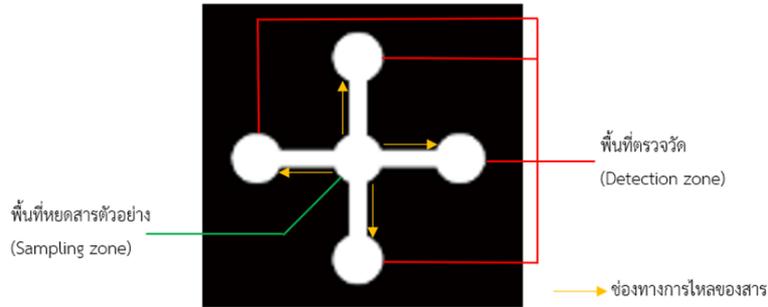
1.2 การเก็บตัวอย่างเชมาจากปลอกกระสุนปืน

นำปลอกกระสุนปืนขนาด 9 มม. ให้วางในแนวตั้งฉากกับปีกเกอร์ และเปิดน้ำปราศจากไอออนลงในปลอกกระสุนปืน 1.0 mL แล้วนำไป Sonicare เป็นเวลา 30 นาที เพื่อทำการสกัดตัวอย่าง โดยวิเคราะห์ตัวอย่างทั้งหมด 10 ปลอกกระสุนปืน

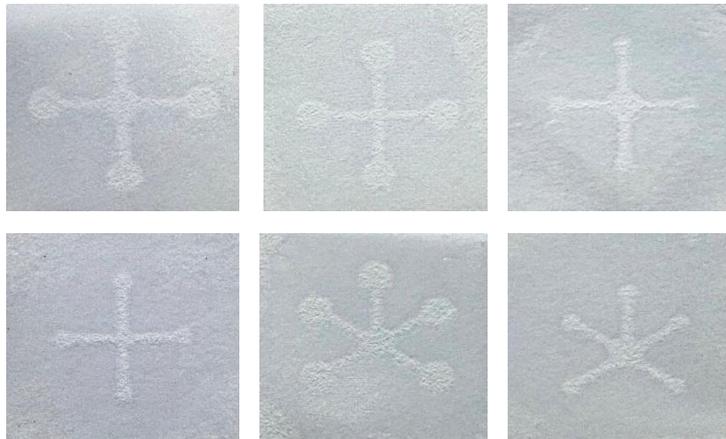
2. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

2.1 อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ

ออกแบบอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ ด้วยโปรแกรม Adobe Illustrator CC 2017 ที่แตกต่างกันในส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมบริเวณที่หยดสารตัวอย่าง (Sampling zone) ความกว้างของช่องทางการไหลของสาร และบริเวณที่เป็นพื้นที่ตรวจวัด (Detection zone) ยกตัวอย่างดังภาพที่ 1 โดยมีการออกแบบให้มีความแตกต่างกันทั้งหมด 6 รูปแบบ และนำไปทำบล็อกสกรีน นำกระดาษกรองไปวางบนแท่นให้ความร้อน แล้ววางบล็อกสกรีนทับลงบนกระดาษกรอง และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50-60 °C จากนั้นใช้ซีฟิ่งสกรีนให้ทั่วบริเวณที่มีการกำหนดช่องทางการไหล จนซีฟิ่งละลายและซึมลงในกระดาษกรอง สังเกตได้จากกระดาษกรองจะโปร่งใสขึ้นดังภาพที่ 2



รูปที่ 1 การออกแบบอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาศ

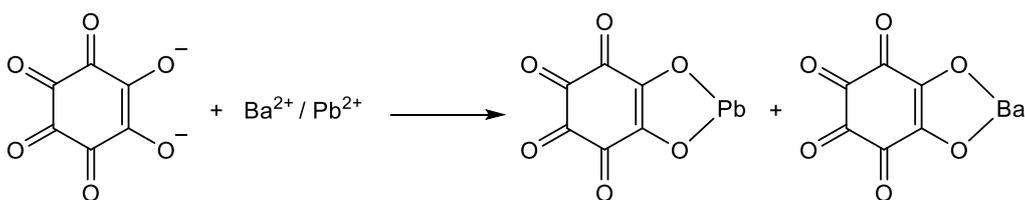


รูปที่ 2 อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาศทั้ง 6 รูปแบบ

2.2 ปฏิกริยาในการเกิดสีบนอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาศ

2.2.1 ปฏิกริยาสำหรับตรวจวิเคราะห์ ตะกั่ว (Pb) และ แบเรียม (Ba)

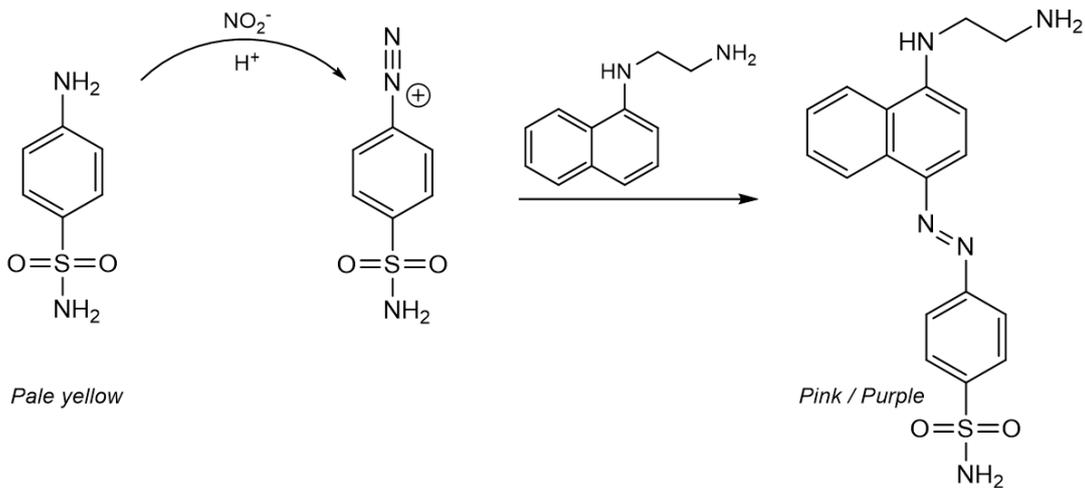
ในการศึกษาปฏิกริยาในครั้งนี้ สารเคมี Rhodizonate มีลักษณะทางกายภาพเป็นของแข็งสีดำ มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดีเมื่อละลายน้ำให้สีส้มเหลือง เมื่อเกิดปฏิกริยากับโลหะหนัก จะสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของสีที่เกิดขึ้นได้ (ทวี และคณะ, 2560) โดยปฏิกริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังภาพที่ 3



รูปที่ 3 ปฏิกริยา Rhodizonate Test

2.2.2 ปฏิกริยาสำหรับตรวจวิเคราะห์ ไนไตรท์ (NO₃⁻) และ ไนเตรท (NO₂⁻)

Griess reaction สำหรับใช้ในการตรวจสอบไอออน ไนไตรท์ (NO₃⁻) โดย Sulfanilamide จะทำปฏิกิริยา Diazotization กับไอออนไนไตรท์ (NO₃⁻) ในสารละลายกรด กลายเป็น Dizonium salt จากนั้นเกิดปฏิกิริยารวมตัวกับ N-(1-Naphyl)-ethylenediamine•2HCl ได้สารประกอบ Azo dye สีแดง ม่วง สามารถดูดกลืนแสงได้ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร ส่วนไอออนไนเตรท (NO₂⁻) ไม่สามารถตรวจวัดได้ด้วยวิธี Griess reaction เนื่องจากไอออนไนเตรท (NO₂⁻) ถูกรีดิวซ์ด้วย Zinc ก่อนให้กลายเป็นไอออนไนไตรท์ (NO₃⁻) จึงจะสามารถตรวจวิเคราะห์ได้ (Váradi et al, 2019) โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังภาพที่ 4



รูปที่ 4 ปฏิกริยา Griess Test

3.3 การเตรียมสารละลายมาตรฐานสำหรับการทดลอง

ในการทดลองมีการเตรียมสารละลายมาตรฐานผสมตะกั่ว แบริียม ไนไตรท์ และไนเตรท ที่ความเข้มข้นช่วง 0 – 5 mM และเตรียมรีเอเจนท์ที่ใช้สำหรับทดสอบวิเคราะห์ตะกั่วเป็นบนอุปกรณ์ตรวจวัด

3.4 การเตรียมอุปกรณ์สำหรับตรวจวัด

นำอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์จากข้อ 2.1 มาหยดรีเอเจนท์ลงไปในช่วงบริเวณที่เป็นพื้นที่ตรวจวัด (Detection zone)

3.5 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางสเปกโตรสโคปี

นำตัวอย่างตะกั่วเป็นจากมือของอาสาสมัคร และปลูกกระสุนปืนที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างเรียบร้อยแล้ว นำมาวิเคราะห์วิเคราะห์ Lead Barium ในตัวอย่างด้วยเทคนิค UV-Vis spectrophotometry

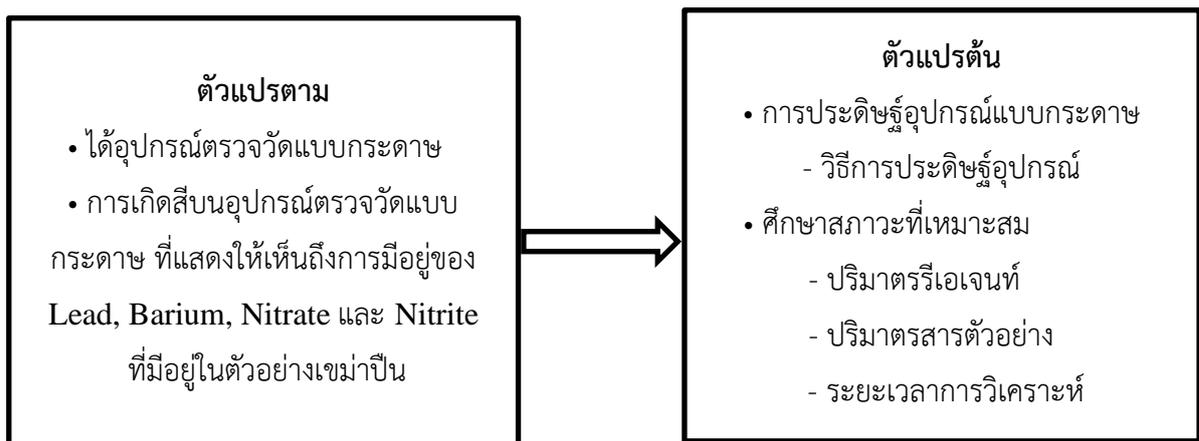
และNitrate Nitrite ในตัวอย่างด้วยเทคนิค Ion Chromatography (IC) เทียบกับอุปกรณ์ตรวจวัดบน
กระดาษ (μPAD)

4. การเก็บรวบรวมข้อมูล

ถ่ายภาพอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษที่ได้จากการทำการทดลองด้วยกล้องโทรศัพท์มือถือรุ่น Vivo
V9 ภายใต้หลอดไฟตำแหน่งเดียวกันทุกครั้ง จากนั้นนำภาพถ่ายไปวัดค่าความเข้มสี RGB ด้วยโปรแกรม
ImageJ และนำค่าความเข้มสีที่ได้มาคำนวณหาปริมาณ Lead, Barium, Nitrate และ Nitrite ที่มีอยู่ใน
ตัวอย่างเขม่าป็น

กรอบแนวคิดในการวิจัย

ผู้วิจัยได้กำหนดกรอบแนวคิดในการวิจัยไว้ดังนี้

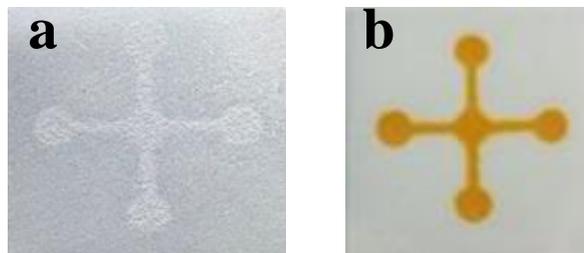


แผนภาพที่ 5 กรอบแนวคิดในการวิจัย

ผลการวิจัย

การประดิษฐ์อุปกรณ์การตรวจวัดแบบกระดาษ (μ PAD) และปริมาณที่เหมาะสมในการตรวจวิเคราะห์

จากการประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษด้วยเทคนิค Screen printing โดยการสกรีนสีฟุ้งลงบนบล็อกที่มีกระดาษกรองอยู่ด้านล่าง และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $50-60^{\circ}\text{C}$ จนสีฟุ้งละลายและซึมลงในกระดาษกรอง สังเกตได้จากกระดาษกรองจะโปร่งใสขึ้น แสดงดังภาพที่ 6a



รูปที่ 6 อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ

a) Screen printing, b) ทดสอบช่องทางการไหลด้วยสารละลายสีผสมอาหารสีเหลือง

ในการทดลองทำการหยดสารละลายสีผสมอาหารแทนรีเอเจนท์, สารตัวอย่างหรือสารมาตรฐาน ที่ช่วยให้สังเกตทิศทางการไหล และปริมาณที่เหมาะสมได้ด้วยตาเปล่า โดยกำหนดปริมาตรรีเอเจนท์ ทดลองจากหยดสารละลายสีผสมอาหารปริมาตร 0.1 ไมโครลิตร ลงบนบริเวณตรวจวัด (Detection zone) หยดสารละลายสีผสมอาหารปริมาตร 2.0 ไมโครลิตร ลงบนบริเวณสำหรับหยดตัวอย่าง (Sampling zone) และสังเกตการไหลบนช่องทางการไหลบนอุปกรณ์ตรวจวัด ให้มีการไหลของสารละลายเต็มช่องทางการไหล และพอดีกับช่องทางการตรวจวิเคราะห์ ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 6b

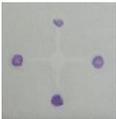
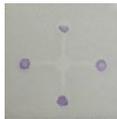
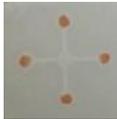
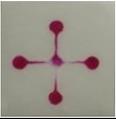
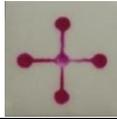
ผลการศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการถ่ายภาพหลังการเกิดปฏิกิริยา

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสม เลือกใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษรูปแบบ ภาพที่ 3b เพื่อใช้ตรวจสอบเวลาที่เหมาะสมในการถ่ายภาพหลังการเกิดปฏิกิริยาของสารทั้ง 4 ชนิด โดยใช้ปริมาตร reagent บริเวณตรวจวัดที่ 0.1 μL และปริมาตรสารมาตรฐาน (sample zone) ที่ 2 μL ทำการหยดสารละลายมาตรฐานความเข้มข้น 3 mM $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, 3.8 mM $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, 5 mM NaNO_3 , และ 5 mM NaNO_2 (โดยแยกสารในแต่ละช่อง) ลงบนอุปกรณ์ตรวจวัดที่ได้ทำการหยด reagent (Griess reaction และ Rhodizonate test) และทิ้งไว้ให้แห้งนาน 5 นาที สังเกตการเกิดสีหลังเกิดปฏิกิริยา โดยทำการบันทึกภาพทุกๆ 1 นาทีจนครบ 5 นาที และบันทึกภาพทุก 5 นาที จนครบ 30 นาที จากนั้นนำภาพถ่ายที่เวลาต่าง ๆ ไปวัด

ค่าความเข้มสีด้วยโปรแกรม **ImageJ** และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาถ่ายภาพกับค่าความเข้มสี เพื่อหาช่วงเวลาที่เหมาะสมในการถ่ายภาพหลังการเกิดปฏิกิริยา

จากการศึกษาพบว่าปฏิกิริยาการเกิดสี **Rhodizonate test** ในการตรวจวิเคราะห์ **lead** พบการเปลี่ยนสีเป็นสีม่วง ในการตรวจพบ **Barium** พบการเปลี่ยนสีเป็นสีส้มน้ำตาล ส่วนการตรวจวัดด้วย **Griess reaction** พบการเปลี่ยนสีเป็นสีชมพู เมื่อนำมาอ่านค่าสีพบว่าค่าความเข้มของสีที่อ่านได้ภายหลังหยุดสารมาตรฐานมีค่าความเข้มสีไม่คงที่ พบว่ามีความเข้มของสีมีค่าใกล้เคียงกันจนถึงเวลา 5 นาที ภายหลังจากหยุดสาร และค่าความเข้มของสีลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเลือกเวลาในการถ่ายภาพอุปกรณ์หลังเกิดปฏิกิริยาที่เวลา 5 นาที แสดงในตารางที่ 1

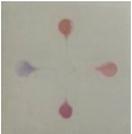
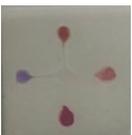
ตารางที่ 1 ภาพถ่ายอุปกรณ์ตรวจวัดสารละลายมาตรฐานหลังเกิดปฏิกิริยา ณ เวลาต่าง ๆ

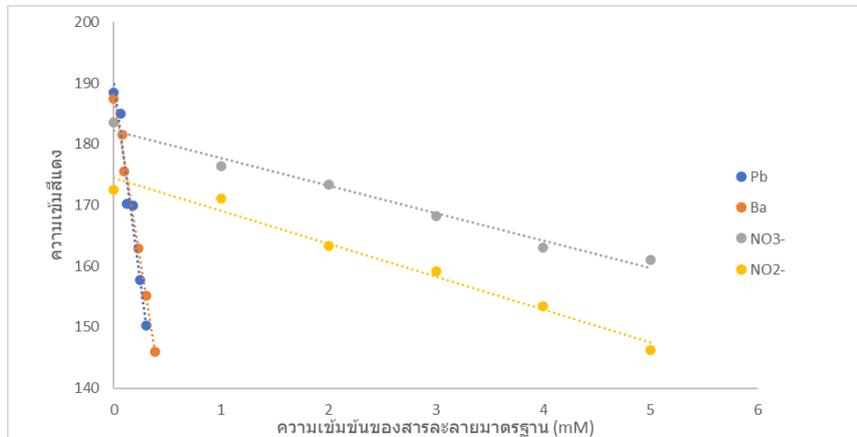
สารละลายมาตรฐาน	เวลาในการถ่ายภาพอุปกรณ์ตรวจวัดสารละลายมาตรฐาน	
	1 นาที	5 นาที
3.0 mM $Pb(NO_3)_2$		
3.8 mM $Ba(NO_3)_2$		
5.0 mM $NaNO_3$		
5.0 mM $NaNO_2$		

จากการศึกษาช่วงความเป็นเส้นตรงของความเข้มสีที่ถ่ายรูปจากอุปกรณ์และความเข้มข้นของสารมาตรฐาน โดยการเตรียม μ PAD โดยการหยุด reagent ที่บริเวณตรวจวัดและทิ้งให้แห้ง จากนั้นหยุดสารละลายมาตรฐานผสม $Pb(NO_3)_2$ $Ba(NO_3)_2$ ที่ความเข้มข้น 0.060-0.3 mM และ 0.076 -0.38 mM และ $NaNO_3$, และ $NaNO_2$ ที่ความเข้มข้น 0-5 mM ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา ทำการถ่ายภาพ หลังจากนั้นนำภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานต่าง ๆ ไปวัดค่าความเข้มสี RGB, สีแดง, สีเขียว และสีน้ำเงิน ด้วยโปรแกรม **ImageJ** โดยได้เลือกค่าความเข้มของสีแดง มาพล็อตกราฟมาตรฐานเพื่อหาความเป็น

เส้นตรงและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพื่อตรวจสอบความใช้ได้ของวิธี ดังตารางที่ 2 จากผลทดลองพบว่ากราฟมาตรฐานมีค่าความเป็นเส้นตรงที่ดี มีค่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ มากกว่า 0.9600

ตารางที่ 2 ความเข้มข้นอุปกรณ์ตรวจวัดสารละลายมาตรฐานผสมในช่วงความเข้มข้น 0-5 mM

ภาพถ่าย อุปกรณ์	ความเข้มข้น (n=3)			
	Pb ²⁺	Ba ²⁺	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻
	0 mM 188.417± 0.0233	0 mM 187.408±0.1200	0 mM 183.559±0.3085	0 mM 172.552±0.0969
	0.06 mM 185.04±0.3098	0.076 mM 181.580±0.7996	1 mM 176.426±0.0774	1 mM 171.144±0.5541
	0.12 mM 170.254±0.3384	0.095 mM 175.539±0.5726	2 mM 173.346±0.1601	2 mM 163.305±0.3855
	0.18 mM 169.953±0.2511	0.23 mM 162.836±0.7944	3 mM 168.267±0.7711	3 mM 159.180±0.8190
	0.24 mM 157.678±0.2296	0.304 mM 155.179±0.7289	4 mM 163.024±0.4053	4 mM 153.468±0.2326
	0.30 mM 150.343±0.5610	0.38 mM 145.940±0.8777	5 mM 160.981±0.9848	5 mM 146.193±0.5421



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกับค่าความเข้มสีแดง

ตารางที่ 3 สมการเส้นตรง และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสารละลายมาตรฐาน จากอุปกรณ์การตรวจวัดแบบกระดาษ

สารละลายมาตรฐาน	สมการเส้นตรง	R ²
Pb(NO ₃) ₂	y = -129.88x + 189.76	0.9634
Ba(NO ₃) ₂	y = -109.01x + 187.79	0.9934
NaNO ₃	y = -4.5193x + 182.23	0.9816
NaNO ₂	y = -5.3985x + 174.47	0.979

ผลตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ (μPAD)

1. การศึกษาค่าขีดจำกัดของการตรวจวัด (Limit of detection, LOD)

ในการศึกษาการศึกษาค่าขีดจำกัดของการตรวจวัด ทำได้โดยการใช้สารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้น 0 mM (Blank) ทำปฏิกิริยากับรีเอเจนต์ที่บริเวณตรวจวัด ทิ้งให้เกิดปฏิกิริยา และถ่ายภาพที่เวลา 5 นาที หลังจากนั้นนำภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ได้ไปวัดค่าความเข้มสีแดง ด้วยโปรแกรม ImageJ ทำทั้งหมด 10 ซ้ำ (n=10) เพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ได้ผลการทดลอง ดังตาราง 4 นำค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ที่ได้มาคำนวณหาค่า LOD จากสูตรดังต่อไปนี้

$$\text{LOD} = 3\text{SD}/\text{Slope}$$

(SD = Standard deviation of blank, Slope = Slope of calibration curve)

ตารางที่ 4 ค่าขีดจำกัดการตรวจวัด (Limit of detection ; LOD)

สารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้น 0 mM (Blank)	ความเข้มสีแดง ± SD	LOD (mM)
Pb(NO₃)₂	176.644 ± 0.2685	0.0062
Ba(NO₃)₂	173.671 ± 0.5677	0.0156
NaNO₃	180.070 ± 0.1196	0.0794
NaNO₂	173.680 ± 0.1450	0.0806

2 ความสามารถในการทำซ้ำ (Reproducibility)

ทำการศึกษาความสามารถในการทำซ้ำ โดยการหดยดสารละลายมาตรฐาน 0.12 - 3.0 mM Pb(NO₃)₂ , 0.095- 0.38 mM Ba(NO₃)₂ , 2-5 mM NaNO₃ และ NaNO₂ ตามลำดับ ลงบนบริเวณตรวจวัด ที่ไว้ให้แห้งเป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นหยดรีเอเจนท์ที่บริเวณตรวจวัด และทิ้งไว้เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นนำภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ไปวัดค่าความเข้มสีแดง ด้วยโปรแกรม ImageJ ทำทั้งหมด 3 ซ้ำ (n=3) จากนั้นนำค่าความเข้มสีที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย เพื่อคำนวณหาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) และร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) เพื่อหาความเที่ยงในการวิเคราะห์

ตารางที่ 5 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) ของอุปกรณ์ตรวจวัด

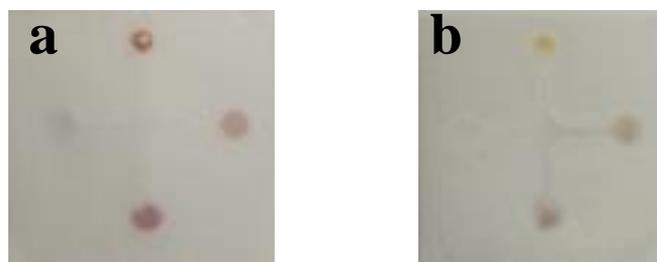
สารละลายมาตรฐาน	ความเข้มข้น (mM)	%RSD
Pb(NO₃)₂	0.12 – 3.0	0.141 – 1.55
Ba(NO₃)₂	0.095 – 0.38	0.202 - 2.167
NaNO₃	2 - 5	0.051 - 0.455
NaNO₂	2 - 5	0.164 - 4.740

ผลการศึกษาความสามารถในการทำซ้ำ จากการวิเคราะห์สารละลายมาตรฐาน พบว่าการวิเคราะห์สารละลายมาตรฐาน แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษมีความเที่ยงในการวิเคราะห์มีค่า %RSD ต่ำกว่า 5%

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างเขม่าดินปืนด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ (µPAD)

จากการศึกษาการตรวจพบเขม่าดินปืนโดยสังเกตจากการสามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงของสีบนอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษได้ด้วยตาเปล่า ในตัวอย่างเขม่าดินปืน ที่เก็บบริเวณหลังมือ, ฝ่ามือทั้งสองข้างของอาสาสมัคร 10 ตัวอย่าง และ เขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนปืน 10 ตัวอย่าง บนอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ

แสดงผลดังภาพที่ 8a) แสดงการทดสอบหาเขม่าป็นด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษจากตัวอย่างปลอกกระสุนปลอกที่และ 8b) แสดงการทดสอบหาเขม่าป็นด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษหลังมือขวาของอาสาสมัครคนที่ 1 และเมื่อนำตัวอย่างไปตรวจวัดด้วยเทคนิค UV-Vis spectrophotometry (สำหรับการตรวจวิเคราะห์ Lead และ Barium) และ Ion Chromatography (สำหรับการตรวจวิเคราะห์ Nitrate และ Nitrite) และอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ (μ PAD) ให้ผลเปรียบเทียบดังตารางที่ 6



รูปที่ 8 การทดสอบหาเขม่าป็นด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ
a) ปลอกกระสุนปลอกที่ 1 b) หลังมือขวาของอาสาสมัครคนที่ 1

ตารางที่ 6 ผลการตรวจวิเคราะห์ Lead Barium ในตัวอย่างด้วยเทคนิค UV-Vis spectrophotometry และ Nitrate Nitrite ในตัวอย่างด้วยเทคนิค Ion Chromatography (IC) เทียบกับอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ (μ PAD)

บริเวณที่เก็บ ตัวอย่าง	ผลการตรวจวิเคราะห์							
	NO_3^-		NO_2^-		Pb^{2+}		Ba^{2+}	
	IC	μ PAD	IC	μ PAD	UV-Vis	μ PAD	UV-Vis	μ PAD
มือของอาสาสมัคร	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ปลอกกระสุน	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

หมายเหตุ; ✓ คือ ตรวจพบได้เนื่องจากความเข้มข้นของตัวอย่างน้อยกว่าค่า LOD

nd คือ ตรวจไม่พบได้เนื่องจากความเข้มข้นของตัวอย่างน้อยกว่าค่า LOD

เมื่อนำผลการวิเคราะห์หาปริมาณ Lead, Barium, Nitrate และ Nitrite ในตัวอย่างเขม่าดินปืนที่เก็บบริเวณหลังมือ, ฝ่ามือทั้งสองข้าง และปลอกกระสุนปืนทั้ง 20 ตัวอย่างจากการวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ มาเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐาน UV-Vis Spectrophotometer และ Ion Chromatography (IC) พบว่าวิธีการตรวจวัดหาปริมาณ Lead, Barium, Nitrate และ Nitrite ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษสามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงของสีบนอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษได้ด้วยตา

เปล่า แต่ไม่สามารถวิเคราะห์เชิงปริมาณได้เนื่องจากตัวอย่างบริเวณหลังมือ และฝ่ามือทั้งสองข้างมีเขม่าดินปืนน้อยไม่เพียงพอต่อการตรวจวัด หรือมีปริมาณน้อยกว่าขีดจำกัดการตรวจวัดเชิงปริมาณ อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษสามารถใช้ในการตรวจวัดได้ในเชิงคุณภาพ

อภิปรายผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการประดิษฐ์ และพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (μ PAD) เพื่อวิเคราะห์ Lead, Barium, Nitrate และ Nitrite ในตัวอย่างเขม่าดินปืน โดยเลือกใช้เทคนิคการสกรีนสีผงในการสร้างพื้นที่ที่ไม่ชอบน้ำ และ ตรวจวัดด้วย Griess reaction และ Rhodizonate test โดยมีการออกแบบอุปกรณ์ตรวจวัดที่มีรูปแบบต่างๆ และทำการทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อให้ได้รูปแบบที่เหมาะสมกับงานวิจัยมากที่สุด อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษมีการใช้วัสดุ อุปกรณ์ที่หาซื้อได้ง่าย มีราคาถูก ใช้เวลาในการตรวจวัดน้อย ใช้ปริมาณสารเคมีที่น้อย ใช้งานได้ง่าย โดยที่ผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องอาศัยความชำนาญหรือทักษะเฉพาะในการใช้งาน อีกทั้งอุปกรณ์ยังมีขนาดเล็ก พกพาสะดวก และสามารถนำไปใช้งานภาคสนามได้

อุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นมาสามารถใช้ตรวจหาเขม่าดินปืนบนหลังมือ, ฝ่ามือทั้งข้างซ้ายและข้างขวาของผู้ยิงปืน และในปลอกกระสุนปืน โดยใช้อาวุธปืนพกแบบกึ่งอัตโนมัติ ยี่ห้อ Glock ขนาด 9 มม. Luger รุ่น 19 ได้ดีสังเกตจากการเปลี่ยนสีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนอุปกรณ์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ อรุณา เตียวตระกูล (2016), Supatana Buking และคณะ (2018), Cromartie และคณะ (2019) และ Wongpakdee และคณะ (2021) ที่สามารถใช้อุปกรณ์แบบกระดาษในการตรวจวัดหาไอออนต่างๆเหล่านี้ในเขม่าปืน ด้วยวิธีการสังเกตการเปลี่ยนสี หรือการวัดระยะทาง แต่อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาวิจัยเลือกใช้ใช้อุปกรณ์ที่ออกแบบให้มีรูปแบบที่สามารถตรวจวัด Lead, Barium, Nitrate และ Nitrite ได้พร้อมๆกัน ซึ่งมีข้อดีอย่างมากเนื่องจาก Lead และ Barium เป็นธาตุที่สามารถใช้บ่งชี้ว่ามาจากการยิงปืนโดยเป็นสารที่ได้จากการเผาไหม้ของ Primer mixture ระหว่างการจุดระเบิดของชนวนท้ายกระสุนดินปืน และ Nitrate และ Nitrite เป็นสารตกค้างจากการเผาไหม้ของดินส่งกระสุนดินปืน จึงเป็นอุปกรณ์ที่สามารถให้ตรวจได้ว่าเป็นเขม่าปืนที่เกิดจากการยิงปืน หรือ อาจจะติดมากับผู้ที่อยู่ในสถานที่เกิดเหตุได้ อุปกรณ์นี้จึงเป็นทางเลือกให้สามารถนำไปใช้ภาคสนามและนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านนิติวิทยาศาสตร์ต่อไป

ข้อเสนอแนะ

1. ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยครั้งถัดไป

ศึกษาหาปฏิกริยาเพิ่มเติม เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ตะกั่วไปพร้อมกับไอออนตัวอื่นได้โดยไม่รบกวนการวิเคราะห์ของไอออนที่สามารถวิเคราะห์ได้อยู่แล้ว

เอกสารอ้างอิง

- กองบรรณาธิการ. (ม.ป.ป.). บุคคลสำคัญ – Edmond Locard. *ออนไลน์*. สืบค้นเมื่อ 1 ธันวาคม 2566.
แหล่งที่มา: <http://www.forensicchula.net/FMJ/journal/topic/locard.pdf>
- ปुरुณิมา. (2564). กะเทาะปัญหาอาชญากรรม ปี 64 พุ่งไม่หยุด ภัยสังคมซ้ำเติมประชาชนหวังโควิด. *ออนไลน์*.
สืบค้นเมื่อ 1 ธันวาคม 2566. แหล่งที่มา: <https://www.thairath.co.th/scoop/theissue/2262011>
- ภิญญดา อันสนั่น, สุธา ภูสิทธิ์ศักดิ์ และ จิรวรรณ รัตนรัตน์. (2556). การหาปริมาณไนเตรทในเสม่าดินปืนภายใน
ลำกล้องปืนโดยเทคนิคสเปคโตรโฟโตเมตรี. *วารสารวิจัย มข. (บศ.)* 13 (4), 46-57.
- รุ่ง คำปู้, (2562). *การพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษสำหรับตรวจวัดไนเตรท และไนไตรท์ในเสม่าดินปืน*.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขานิติวิทยาศาสตร์. บัณฑิตวิทยาลัย: มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- รักษชนก อินทรสุขศรี, (2564). *การพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษในการวัดระยะทางของปริมาณ
ไนเตรทและไนไตรท์ในเสม่าดินปืน*. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขานิติวิทยาศาสตร์. บัณฑิต
วิทยาลัย: มหาวิทยาลัยศิลปากร
- อรอุษา เตียวตระกูล, ศิริรัตน์ ชูสกุลเกรียง และ ศุภชัย ศุภลักษณ์นารี. (2560). การวิเคราะห์หาปริมาณไน
ไตรท์และไนเตรทในเสม่าดินปืนบนอุปกรณ์แบบกระดาษ. *Veridian E-Journal, Science and
Technology Silpakorn University*. 4 (5), 104-116
- Bhakta, S. A., Borba, R., Taba Jr, M., Garcia, C. D., & Carrilho, E. (2014). Determination of
nitrite in saliva using microfluidic paper-based analytical devices. *Analytica chimica
acta*, 809, 117-122.
- Buking, S., Saetear, P., Tiyapongpattana, 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.
- Cromartie, R. L., Wardlow, A., Duncan, G., & McCord, B. R. (2019). Development of a
microfluidic device (μPADs) for forensic serological analysis. *Analytical Methods*. 11
(5), 587-595.
- Chandra, R. (1962). Detection of barium, strontium, and calcium with sodium rhodizonate.
Journal of Chemical Education. 39 (8), 397.

- Dockery, C. R., & Goode, S. R. (2003). Laser-induced breakdown spectroscopy for the detection of gunshot residues on the hands of a shooter. *Applied optics*. 42 (30), 6153-6158.
- Doty, K. C., & Lednev, I. K. (2018). Raman spectroscopy for forensic purposes: recent applications for serology and gunshot residue analysis. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 103, 215-222.
- Ferreira, F. T., Mesquita, R. B., & Rangel, A. O. (2020). Novel microfluidic paper-based analytical devices (μ PADs) for the determination of nitrate and nitrite in human saliva. *Talanta*. 219, 121183.
- Michalski, R., & Kurzyca, I. (2006). Determination of Nitrogen Species (Nitrate, Nitrite and Ammonia Ions) in Environmental Samples by Ion Chromatography. *Polish Journal of Environmental Studies*, 15 (1).
- Rafae, A. A. M., Ali, S. F. M., Abdullah, A. F. L., & Chang, K. H. (2019). Colourimetric based detection of gunshot residue on gloves worn during shooting. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*. 23 (2), 229-236.
- Ravgiala, R. R., Weisburd, S., Sleeper, R., Martinez, A., Rozkiewicz, D., Whitesides, G. M., & Hollar, K. A. (2014). Using paper-based diagnostics with high school students to model forensic investigation and colorimetric analysis. *Journal of Chemical Education*. 91 (1), 107-111.
- Selin, H. (2013). *Encyclopaedia of the history of science, technology, and medicine in non-western cultures*: Springer Science & Business Media.
- Tan, J. F., Anastasi, A., & Chandra, S. (2021). *Electrochemical Detection of Nitrate, Nitrite and Ammonium for on-Site Water Quality Monitoring*. *Current Opinion in Electrochemistry*, 100926.
- Vanini, G., Souza, M. O., Carneiro, M. T., 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.
- Váradi, L., Breedon, M., Chen, F. F., Trinchi, A., Cole, I. S., & Wei, G. (2019). Evaluation of novel Griess-reagent candidates for nitrite sensing in aqueous media identified via molecular fingerprint searching. *RSC advances*. 9 (7), 3994-4000.
- Wongpakdee, T., Buking, S., Ratanawimarnwong, N., Saetear, P., Uraisin, K., Wilairat, P., ... & Nacapricha, D. (2021). Simple gunshot residue analyses for estimating firing distance: Investigation with four types of fabrics. *Forensic Science International*. 329, 111084.
- Yetisen, A. K., Akram, M. S., & Lowe, C. R. (2013). based microfluidic point-of-care diagnostic devices. *Lab on a Chip*. 13 (12), 2210-2251.