

การพัฒนาชุดทดสอบแบบเรียบง่ายและสะดวกด้วย อุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์แบบกระดาษ DEVELOPMENT OF BARIUM AND LEAD TEST-KIT USING MICROFLUIDIC PAPER-BASED ANALYTICAL DEVICES

ทวี หนาวร¹ สุนิสา นิยมนา¹ และ ธนากร เปลื้องกลาง^{1*}
Thawee Tanaworn¹ Sunisa Niyomna¹ and Thanakorn Pluangklang^{1*}
**Corresponding author. E-mail address; thanakorn.p@nrru.ac.th*

บทคัดย่อ

การพัฒนาวิธีการแบบกระดาษสำหรับวิเคราะห์ปริมาณธาตุตะกั่วและแบเรียมในตัวอย่างอาศัยปฏิกิริยาระหว่างธาตุทั้งสองกับสารละลายอิมมูโนโอดีไฮดรอกซีเบนซีนบนกระดาษให้สารผลิตภัณฑ์สีชมพู พบว่าเฉพาะธาตุตะกั่วเท่านั้นที่เกิดปฏิกิริยากับโอดีไฮดรอกซีเบนซีนให้สารผลิตภัณฑ์สีชมพูในสถานะที่เป็นกรด นักวิจัยจึงสามารถวิเคราะห์ปริมาณธาตุตะกั่วและแบเรียม (Pb+Ba) ได้จากการวิเคราะห์ความเข้มสีของสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในสถานะที่เป็นกลาง และสามารถวิเคราะห์ปริมาณธาตุตะกั่ว (Pb) ได้จากความเข้มสีของสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในสถานะที่เป็นกรด จากนั้นจึงหาผลต่างของปริมาณธาตุของทั้งสองสถานะก็จะสามารถวิเคราะห์ปริมาณธาตุแบเรียม (Ba) ได้นั่นเอง

ผลการวิเคราะห์พบว่าวิธีการแบบกระดาษที่พัฒนาขึ้นสามารถวิเคราะห์ธาตุตะกั่วและแบเรียม (Pb+Ba) ได้ในช่วงความเข้มข้นระหว่าง 400 – 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีขีดจำกัดของการตรวจวัดเท่ากับ 358 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถวิเคราะห์ธาตุตะกั่วได้ในช่วงความเข้มข้นระหว่าง 200 – 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีขีดจำกัดของการตรวจวัดเท่ากับ 124 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ การประยุกต์วิธีการแบบกระดาษเพื่อวิเคราะห์ปริมาณธาตุทั้งสองในตัวอย่างสังเคราะห์เปรียบเทียบกับวิธีการแอร์ไฟต์เฟอร์เนชอะตอมมิคแอ็บซอร์บชันสเปกโตรเมตรี พบว่าให้ผลที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% นั้นแสดงว่าวิธีการแบบกระดาษที่พัฒนาขึ้นเป็นวิธีการทางเลือกใหม่ที่มีความเหมาะสมเหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้เป็นชุดทดสอบปริมาณธาตุตะกั่วและแบเรียมได้

คำสำคัญ: แบเรียม ตะกั่ว ชุดทดสอบ และอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์แบบกระดาษ

¹สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000

¹Chemistry Program, Faculty of Science and Technology, Nakhon Ratchasima Rajabhat University, Nakhon Ratchasima, 30000

Abstract

This project is aimed to develop a microfluidic paper-based analytical devices (μ PADs) for determination of Ba and Pb. The product of these elements and saturated sodium rhodizonate (SRZ) solution are formed with a pink color in natural medium. It was found that, Pb can react with SRZ solution in acidic medium to form purple color product. Hence, a mixture of Ba and Pb solution can be determined by analyzing a pink color intensity produced in natural medium. In the other hand, Pb content was determined by analyzing a blue-purple color intensity formed in acidic medium. Subtraction by those two media was computed for determination of Ba content, respectively.

The results were found that, an developed μ PADs can apply for determination of total Ba and Pb content in range of $400\text{--}2,000\text{ mgL}^{-1}$ with 358 mgL^{-1} detection limit. In case of Pb, the proposed method can be applied in range of $200\text{--}1,000\text{ mgL}^{-1}$ with 124 mgL^{-1} detection limit. An application of this method for determination Ba and Pb content in a syntactic samples showed no significantly different by comparison with the standard Graphite furnace atomic absorption spectrophotometry (GFAAS) at 95% confidence limit. From these finding, it can conclude that, the proposed μ PADs method can be the new alternative test-kit for determination of Ba and Pb.

Key words: Barium, Lead, Test-kit and Microfluidic Paper-based Microfluidic Analytical Devices

1. บทนำ

ธาตุแบเรียมและตะกั่วจัดเป็นโลหะที่พบได้ทั่วไปในรูปของสารประกอบต่างๆ ถูกใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรม การทำโคลนผงที่ใช้ในการชุบเจาะปิโตรเลียม การฟอกสี การผลิตสารเคมี การผลิตไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหิน การทำแบตเตอรี่ การใช้ปุ๋ยเคมีและยากำจัดศัตรูพืชทางการเกษตร [1-2] นอกจากนี้ธาตุแบเรียมและตะกั่วยังสามารถพบในคราบเขม่าที่เกิดจากการยิงปืนซึ่งเกิดขึ้นภายหลังการยิงปืนในการตรวจพิสูจน์หาผู้ต้องสงสัยนั้นจะทำการวิเคราะห์ธาตุโลหะทั้งสองนี้เพื่อใช้ในการพิสูจน์และระบุตัวอาชญากรหรือผู้บริสุทธิ์ได้ จึงมีนักวิจัยให้ความสนใจค้นคว้าพัฒนาเทคนิคที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์โลหะทั้งสองนี้เป็นอย่างมาก [3-9]

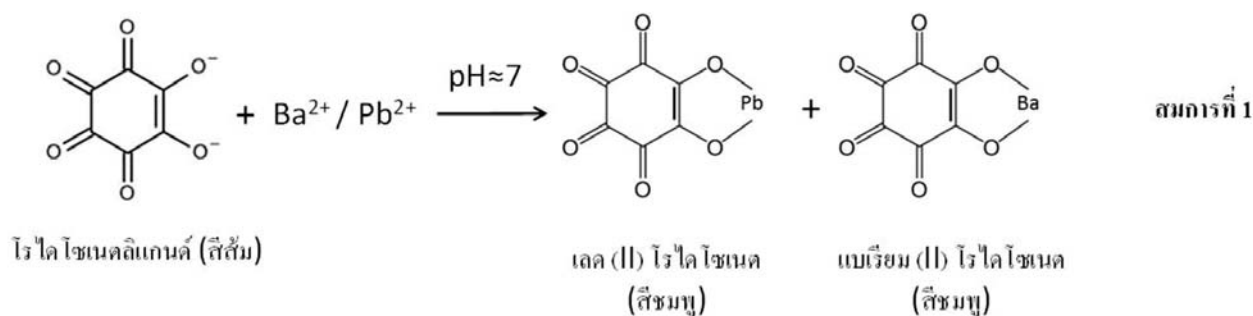
การวิเคราะห์แบเรียมและตะกั่วในปัจจุบันสามารถทำการวิเคราะห์ได้หลายวิธี โดยใช้เทคนิคต่างๆ เช่น Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry (ICP – MS) ที่สามารถควบคุมสิ่งรบกวนที่เกิดจากวิธีการสกัด มีสภาพไวในการวิเคราะห์สูง ช่วงความเข้มข้นของการสร้าง Calibration Curve กว้าง ใช้เวลาในการวิเคราะห์สั้น และมีความเที่ยงตรงและความแม่นยำสูง [3-4] เทคนิค Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) ที่ทำการวัดโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานน้อย [5] เทคนิค Inductively Plasma – Optical Emis-

sion Spectrometry (ICP – OES) ที่สามารถวัดปริมาณของธาตุพลวง แบเรียม และตะกั่วได้ [6-7] เทคนิค Scanning Electron Microscope/Wavelength Dispersive X – Ray (SEM/WDX) ที่มีการวิเคราะห์อย่างละเอียดด้วยการวิเคราะห์ทั้งหมด 3 ขั้นตอน [8] เทคนิค Sector Field Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (SF-ICP-MS) ที่สามารถตรวจพิสูจน์ธาตุโลหะที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า $1\text{ ไมโครกรัมต่อลิตร}$ [9]

เทคนิคการวิเคราะห์ต่างๆดังกล่าวแล้วข้างต้นล้วนเป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่มีคุณภาพสูง สามารถวิเคราะห์ได้ที่มีความเข้มข้นต่ำ มีความไวในการวิเคราะห์ ทว่าเทคนิคเหล่านี้มีข้อจำกัด คือ เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์มีขนาดใหญ่ ยากต่อการเคลื่อนย้ายและมีราคาสูง ผู้วิจัยจึงเห็นว่าการพัฒนาชุดทดสอบแบเรียมและตะกั่วโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์แบบกระดาษจะช่วยให้การวิเคราะห์ธาตุแบเรียมและตะกั่วมีความรวดเร็วมากยิ่งขึ้น อีกทั้งอุปกรณ์ที่ทำจากกระดาษยังมีราคาถูก สามารถหาได้ง่าย ใช้สารเคมีปริมาณน้อย ให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว อุปกรณ์มีขนาดเล็กน้ำหนักเบา สามารถพกพาไปทดสอบในสถานที่ที่ห่างไกลจากห้องปฏิบัติการได้ โดยสะดวก [10-17] หลักการที่ใช้อาศัยปฏิกิริยาระหว่างธาตุทั้งสองซึ่งสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับลิแกนด์ไรโดโซน (Rhodizo-

nate) ได้อย่างจำเพาะเจาะจง [18] ในสภาวะที่เป็นกลาง (สมการที่ 1) แต่เมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรด ($\text{pH} < 7$) โลหะตะกั่วเท่านั้นจะยังสามารถเกิดสารเชิงซ้อนสี่ขั้วกับโรโดโซนได้ ขณะที่แบเรียมจะไม่สามารถเกิดสารเชิงซ้อนสี่ขั้วข้างต้นได้

ด้วยเหตุผลข้างต้นจึงสามารถเกิดสารเชิงซ้อนของตะกั่วและแบเรียมกับโรโดโซนเตลิเจนต์ก่อน ปริมาณสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณโลหะทั้งสองรวมกัน ก่อนปรับสภาวะการทดลองให้เป็นกรดเพื่อกำจัดสารผลิตภัณฑ์เนื่องมาจากโลหะแบเรียม จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ปริมาณโลหะตะกั่วซึ่งจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณสารผลิตภัณฑ์ที่เหลือในสภาวะที่เป็นกรด สุดท้ายปริมาณโลหะแบเรียมก็สามารถคำนวณได้จากผลต่างของการวิเคราะห์ปริมาณระหว่างสองสภาวะข้างต้น



วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic absorption spectrophotometer, AAS) รุ่น SpectrAA 220Z บริษัท Varian

กระดาษกรองเบอร์ 1 (Filter paper No.1) ยี่ห้อ Whatman, Sigma – Aldrich

ไมโครปิเปต (Micro pipette)

Block screen

เครื่องเป่าผม (Electric hair dryer) รุ่น CKL – 950 บริษัท Vogue hair dryer

สมาร์ทโฟน ยี่ห้อ Apple รุ่น iPhone 5s ความละเอียดกล้อง 8 Megapixel

เครื่องชั่งไฟฟ้า (Analysis balance) รุ่น PG2002 – S, METTLER TOLEDO

2.2 สารเคมี

กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl) บริษัท RCL Labscan

กรดไนตริก (Nitric acid, HNO_3) ชนิด AR grade บริษัท Carlo Erba Reagents-SDS

เทียนไขขี้ผึ้ง ร้านคุณธรรมสังฆภัณฑ์ จังหวัดนครราชสีมา

สารละลายมาตรฐานตะกั่ว (Lead Standard for AAS) เกรด TraceCERT® ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร (Pb in nitric acid) บริษัท Loba Chemie

สารละลายมาตรฐานแบเรียม (Barium Standard for AAS) เกรด TraceCERT® ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร (Ba in nitric acid) บริษัท Loba Chemie

เลด (II) ไนเตรต (Lead (II) nitrate, $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) ชนิด AR grade บริษัท Ajax Finechem

แบเรียมไนเตรต (Barium nitrate, $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$) ชนิด AR grade บริษัท Ajax Finechem

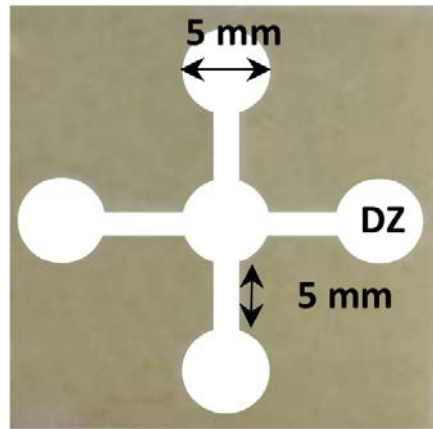
โซเดียมโรโดโซนเตลิเจนต์ (Sodium rhodizonate dibasic, $\text{C}_6\text{Na}_2\text{O}_2$) บริษัท Sigma-aldrich Chemie

น้ำปราศจากไอออนที่มีค่าความต้านทานไม่ต่ำกว่า $10^8 \Omega$ (Deionized water, DI)

วิธีการทดลอง

2.3.1 การประดิษฐ์อุปกรณ์กระดาษด้วยวิธีการพิมพ์สกรีนด้วยเทียนไขขี้ผึ้ง (Wax screen printing)

ออกแบบ Block screen โดยโปรแกรมไมโครซอฟท์เพาเวอร์พอยต์ (Microsoft power point) เพื่อให้มีรูที่สามารถสกรีนเทียนไขผ่านลงบนพื้นผิวของกระดาษตามรูปแบบที่ต้องการ แล้วจึงขัดเทียนไขขี้ผึ้งผ่าน Block screen ซึ่งเป็นแม่พิมพ์ที่วางอยู่บนกระดาษกรองด้านล่างรองด้วยแผ่นแก้ว เพื่อสร้างบริเวณที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic area) จากนั้นชุบเทียนไขส่วนเกินออกด้วยแผ่นพลาสติก และให้ความร้อนด้วยเครื่องเป่าผมเล็กน้อยเพื่อให้เทียนไขขี้ผึ้งละลายแทรกซึมลงในรูพรุนกระดาษกรอง แสดงลักษณะของกระดาษที่ประดิษฐ์ได้ ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แสดงอุปกรณ์แบบกระดาศที่ประดิษฐ์ขึ้น พื้นที่สีเหลืองแสดงบริเวณที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic area) ซึ่งรูปทรงของกระดาศถูกครอบครองด้วยเทียนไข พื้นที่สีขาวเป็นพื้นที่ของกระดาศ (Hydrophilic area) ปลายแขนถูกออกแบบเป็นลักษณะวงกลม 4 วง เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตรเท่ากัน เป็นบริเวณสำหรับเกิดปฏิกิริยาและตรวจวัดความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น (Detection zone, DZ) สามารถทดลองได้รวม 4 ครั้ง (n=4) ต่อขึ้น

2.3.2 การพัฒนาวิธีการวิเคราะห์แบบเรียบง่ายและสะดวกด้วยวิธีการวัดความเข้มข้นอุปกรณ์แบบกระดาศ

2.3.2.1 การศึกษาปริมาตรที่เหมาะสมของสารละลายอิมัลชันโซเดียมโรโดไซเนตสำหรับหยดลงบน Detection zone

เตรียมสารละลายอิมัลชันโซเดียมโรโดไซเนตโดยใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นตัวทำละลาย จากนั้นทำการหยดสารละลายอิมัลชันโซเดียมโรโดไซเนตลงบนกระดาศบริเวณ DZ (ภาพที่ 1) ที่ปริมาตรต่างๆ ได้แก่ 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7 และ 1.8 ไมโครลิตร ตามลำดับ สังเกตการซึมแพร่ของสารละลายภายในพื้นที่วงกลมและทำการเลือกปริมาตรที่เหมาะสมของสารละลายอิมัลชันโซเดียมโรโดไซเนตซึ่งซึมแพร่เต็มบริเวณวงกลมพอดี สำหรับหยดลงบนกระดาศ เพื่อใช้ในการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ต่อไป

2.3.2.2 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการใช้สารละลายอิมัลชันโซเดียมโรโดไซเนตเพื่อทำปฏิกิริยา

หยดสารละลายอิมัลชันโซเดียมโรโดไซเนต ปริมาตร 1 ไมโครลิตร ลงบนกระดาศบริเวณ DZ บันทึกภาพเมื่อเวลาผ่านไป 0, 15, 30 และ 45 วินาที 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90 และ 120 นาที ตามลำดับ วัดค่าความเข้มข้นจากภาพถ่ายบริเวณ DZ ด้วยโปรแกรมอิมเมจ เจ (Image J) เพื่อสังเกตความคงตัวของ

สารละลายโซเดียมโรโดไซเนต และเลือกช่วงเวลาที่เหมาะสมที่สามารถใช้งานสารละลายอิมัลชันโซเดียมโรโดไซเนตในการทำปฏิกิริยาบนกระดาศ เพื่อใช้ในการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์

2.3.2.3 การศึกษาลำดับการเข้าทำปฏิกิริยาของสารละลายอิมัลชันโซเดียมโรโดไซเนต ก่อน - หลัง การหยดสารละลายมาตรฐาน

หยดสารละลายอิมัลชันโซเดียมโรโดไซเนต ปริมาตร 1 ไมโครลิตร ลงบนกระดาศบริเวณ DZ เมื่อเวลาผ่านไป 15 วินาที หยดสารละลายมาตรฐานตะกั่วความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1 ไมโครลิตร ลงบนบริเวณเดิม ทำการทดลองอีกครั้งโดยเปลี่ยนเป็นหยดสารละลายมาตรฐานตะกั่วความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรก่อน แล้วหยดสารละลายอิมัลชันโซเดียมโรโดไซเนตลงบนกระดาศบริเวณ DZ โดยใช้เงื่อนไขของเวลาในการทดลองเช่นเดียวกัน ก่อนทำการเลือกลำดับการหยดสารละลายที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาของสาร

2.3.2.4 การศึกษาปริมาตรสารละลายอิมัลชันโซเดียมโรโดไซเนตที่เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกิริยา

หยดสารละลายมาตรฐานตะกั่วเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1 ไมโครลิตร ลงบนกระดาศบริเวณ DZ แล้วทิ้งไว้ให้แห้ง จากนั้นหยดสารละลายอิมัลชันโซเดียมโรโดไซเนต ปริมาตร 1 ไมโครลิตร ลงบนกระดาศ

บริเวณเดิม ทำการทดลองซ้ำเหมือนเดิมทุกประการแต่เปลี่ยนปริมาตรของสารละลายอิมัลชันตัวโซเดียมโรโดไซด์เป็น 1.5 และ 2 ไมโครลิตร ตามลำดับ บันทึกภาพและวัดค่าความเข้มสีจากภาพถ่ายบริเวณ DZ ด้วยโปรแกรมอิมเมจเจ ก่อนเลือกปริมาตรของสารละลายอิมัลชันตัวโซเดียมโรโดไซด์ที่เหมาะสมที่ใช้หยดลงบนกระดาษที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาดีที่สุด

2.3.2.5 การศึกษาจำนวนซ้ำการหยดสารละลายมาตรฐานสำหรับการเกิดปฏิกิริยา

หยดสารละลายมาตรฐานตะกั่ว เข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษบริเวณ DZ จำนวน 1 ซ้ำ แล้วทิ้งไว้ให้แห้ง จากนั้นหยดสารละลายอิมัลชันตัวโซเดียมโรโดไซด์ ปริมาตร 1 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษบริเวณเดิม ทำการทดลองซ้ำเหมือนเดิมทุกประการแต่เปลี่ยนจำนวนซ้ำของสารละลายมาตรฐานตะกั่วเป็น 2 3 4 และ 5 ซ้ำ ตามลำดับ บันทึกภาพและวัดค่าความเข้มสีจากภาพถ่ายบริเวณ DZ ด้วยโปรแกรมอิมเมจเจ ก่อนทำการเลือกจำนวนครั้งที่เหมาะสมสำหรับสารละลายมาตรฐานตะกั่วที่ใช้หยดลงบนกระดาษเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาดีที่สุด

2.3.2.6 การศึกษาช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับสร้างกราฟมาตรฐาน

เตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่ว เข้มข้น 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 800 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากนั้นหยดสารละลายมาตรฐานตะกั่ว เข้มข้น 0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษบริเวณ DZ ทิ้งไว้ให้แห้ง แล้วจึงหยดสารละลายอิมัลชันตัวโซเดียมโรโดไซด์ ปริมาตร 1 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษบริเวณเดิม บันทึกภาพเมื่อเวลาผ่านไป 15 วินาที แล้วจึงหยดสารละลาย 0.5 โมลต่อลิตร กรดไฮโดรคลอริก ปริมาตร 1 ไมโครลิตร บันทึกภาพเมื่อเวลาผ่านไปอีก 30 วินาที และวัดค่าความเข้มสีจากภาพถ่ายด้วยโปรแกรมอิมเมจเจ ทำการทดลองซ้ำเหมือนเดิมทุกประการแต่เปลี่ยนความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานตะกั่ว เป็น 100, 200, 300, 400, 500, 600, 800 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เลือกช่วงความเข้มข้นที่ให้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับค่าความเข้มสีที่จำเพาะกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานตะกั่ว เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ธาตุตะกั่วด้วยอุปกรณ์แบบกระดาษต่อไป

2.3.3 การสร้างกราฟมาตรฐานของตะกั่วและแบเรียมด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบกระดาษ

2.3.3.1 การทดลองสร้างกราฟมาตรฐานตะกั่วและแบเรียมด้วยวิธีการแบบกระดาษ

เตรียมสารละลายมาตรฐานแบเรียมไนเตรต ($\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$) และสารละลายเลด(II)ไนเตรต ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) แต่ละชนิดความเข้มข้นของโลหะเท่ากับ 0, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากนั้นหยดสารละลายตัวอย่างตะกั่วที่ความเข้มข้น 0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษบริเวณ DZ ทิ้งไว้ให้แห้ง แล้วจึงหยดสารละลายอิมัลชันตัวโซเดียมโรโดไซด์ ปริมาตร 1 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษบริเวณเดิม บันทึกภาพและวัดค่าความเข้มสีบริเวณ DZ ด้วยโปรแกรมอิมเมจเจ จากนั้นจึงทำการสร้างกราฟมาตรฐานของธาตุตะกั่ว ทำการทดลองเช่นเดียวกันทุกประการแต่เปลี่ยนจากสารละลายมาตรฐานตะกั่วเป็นสารละลายมาตรฐานแบเรียมและสร้างกราฟมาตรฐานของโลหะทั้งสองโดยใช้ค่าความเข้มสีเขียวต่อไป

2.3.3.2 การทดลองสร้างกราฟมาตรฐานผสมระหว่างตะกั่วและแบเรียมด้วยวิธีการแบบกระดาษ

เตรียมสารละลายมาตรฐานผสมความเข้มข้นอย่างละเท่าๆกันระหว่างตะกั่วและแบเรียม ที่ความเข้มข้น (0/0) (100/100) (200/200) (300/300) (500/500) (800/800) และ (1,000/1,000) มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากนั้นหยดสารละลายผสม ความเข้มข้น (0,0) มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษบริเวณ DZ ทิ้งไว้ให้แห้ง แล้วหยดสารละลายอิมัลชันตัวโซเดียมโรโดไซด์ ปริมาตร 1 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษบริเวณเดิม บันทึกภาพเมื่อเวลาผ่านไป 15 วินาที แล้วจึงหยดสารละลาย 0.5 โมลต่อลิตร กรดไฮโดรคลอริก ปริมาตร 1 ไมโครลิตร บันทึกภาพเมื่อเวลาผ่านไปอีก 30 วินาที ทำการทดลองซ้ำเหมือนเดิมทุกประการแต่เปลี่ยนความเข้มข้นสารละลายผสมเป็น (100/100) (200/200) (300/300) (500/500) (800/800) และ (1,000/1,000) มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ วัดค่าความเข้มสีจากภาพถ่ายก่อนและหลังการหยดสารละลายกรดไฮโดรคลอริกด้วยโปรแกรมอิมเมจเจ สำหรับการสร้างกราฟมาตรฐานของตะกั่วกับแบเรียม ($\text{Pb}+\text{Ba}$) และตะกั่ว (Pb) ตามลำดับ จากกราฟมาตรฐานที่ได้สามารถนำไปประยุกต์เพื่อหาความเข้มข้นของตะกั่วและแบเรียมในสารละลายตัวอย่างต่อไป

2.3.4 การวิเคราะห์ปริมาณแบเรียมและตะกั่วด้วยเทคนิค Graphite furnace atomic absorption spectrophotometry (GFAAS)

เตรียมสารละลายมาตรฐานแบเรียมและตะกั่ว ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 และ 50 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เพื่อนำวัดค่าการดูดกลืนแสงสำหรับการสร้างกราฟมาตรฐานด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrophotometer, GFAAS) โดยใช้เงื่อนไขต่างๆ สำหรับวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายแบเรียมและตะกั่วด้วยตามข้อเสนอแนะของบริษัทผู้ผลิต แสดงดังตารางที่ 1 จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงของโลหะตะกั่วและแบเรียมที่ได้ไปสร้างกราฟมาตรฐาน ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานตะกั่วและแบเรียมกับค่าการดูดกลืนแสงที่สามารถนำไปประยุกต์เพื่อวิเคราะห์ปริมาณโลหะทั้งสองต่อไป

มาตรฐาน GFAAS ซึ่งเป็นวิธีที่ประยุกต์อย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์ปริมาณโลหะ

ผลการทดลองและอภิปราย

3.1 ผลการประดิษฐ์อุปกรณ์กระดาศด้วยวิธีการพิมพ์สกรีนด้วยเทียนไขขี้ผึ้ง

การประดิษฐ์อุปกรณ์วิเคราะห์แบบกระดาศด้วยวิธีการสกรีนเทียนไขขี้ผึ้งผ่าน Block screen ลงบนพื้นผิวของกระดาศกรองและให้ความร้อนแก่เทียนไขเพื่อให้เนื้อเทียนไขหลอมละลายแทรกซึมเข้าแทรกเต็มพื้นที่ภายในรูพรุนของกระดาศกรอง แสดงภาพอุปกรณ์กระดาศที่ได้ดังภาพที่ 1 พบว่าอุปกรณ์กระดาศที่ประดิษฐ์ขึ้นมีคุณภาพที่ดีในแง่ของการสร้างพื้นที่ที่ไม่ชอบน้ำ โดยการทดสอบ

ตารางที่ 1 แสดงเงื่อนไขที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณธาตุตะกั่วและแบเรียมด้วยเทคนิค GFAAS

เงื่อนไข	ธาตุ	
	ตะกั่ว	แบเรียม
ความยาวคลื่นที่วัดการดูดกลืน (นาโนเมตร)	283.3	553.6
อุณหภูมิที่เผาให้เป็นขี้เถ้า (องศาเซลเซียส)	400	1,000
อุณหภูมิที่เผาให้เกิดอะตอมเสรี (องศาเซลเซียส)	2,100	2,600
เวลาที่ใช้เพื่อทำให้เกิดอะตอมเสรี (วินาที)	68	69.3
ความเข้มข้นเริ่มต้นสำหรับสร้างกราฟมาตรฐาน (ไมโครกรัมต่อลิตร)	50.00	100.00
ช่วงความเข้มข้นที่ใช้สร้างกราฟมาตรฐาน (ไมโครกรัมต่อลิตร)	5.00 – 40.00	10.00 – 80.00

2.3.5 การวิเคราะห์ปริมาณแบเรียมและตะกั่วในสารละลายตัวอย่างด้วยอุปกรณ์แบบกระดาศที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐาน GFAAS

การวิเคราะห์ ปริมาณโลหะทั้งสองในสารละลายตัวอย่างชนิดเดียวกัน โดยใช้วิธีการทั้งสองดังกล่าวแสดงไว้ในหัวข้อ 2.3.3 และ 2.3.4 ในงานวิจัยนี้สารละลายตัวอย่างเป็นสารละลายตัวอย่างสังเคราะห์เตรียมจากสารละลายมาตรฐานผสมระหว่างแบเรียมและตะกั่ว ซึ่งเป็นการเตรียมขึ้นมาในห้องปฏิบัติการโดยเฉพาะสำหรับใช้เพื่อการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ μ PADs ที่พัฒนาขึ้นโดยการเปรียบเทียบกับวิธี

การไหลของสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายในบริเวณที่ชอบน้ำ (พื้นที่สีขาวในภาพที่ 1) พบว่าการเคลื่อนที่ของสารละลายจะถูกจำกัดอยู่เฉพาะในบริเวณที่ชอบน้ำเท่านั้น สารละลายไม่สามารถเคลื่อนที่ออกสู่ภายนอกบริเวณข้างต้นได้ นั้นแสดงว่ากระบวนการประดิษฐ์อุปกรณ์ที่ใช้มีความเหมาะสมเพราะสามารถสร้างรอยต่อระหว่างพื้นที่ที่ชอบและไม่ชอบน้ำบนกระดาศได้อย่างสมบูรณ์ กระบวนการดังกล่าวนี้ใช้วัสดุเทียนไขที่อยู่ในสถานะของแข็งสกรีนลงบนพื้นผิวของกระดาศโดยตรง ด้วยเหตุที่ใช้วัสดุและอุปกรณ์ต่างๆที่จัดหาได้ในท้องถิ่นและผลิตได้เองในห้องปฏิบัติการส่งผลให้อุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นมีราคาต่ำเพียง 0.5 บาทต่อ

ขึ้น ทั้งยังมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ในงานวิเคราะห์ต่อไป

3.2 การพัฒนาวิธีการวิเคราะห์แบบเตรียมและตะกั่วด้วยวิธีการวัดความเข้มข้นอุปกรณ์แบบกระดาษ

ปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องสำหรับการพัฒนาชุดทดสอบโลหะตะกั่วและแบเรียมบนอุปกรณ์ μ PADs ได้ถูกศึกษา (หัวข้อ 2.3.2) จากผลการศึกษาอิทธิพลต่างๆทำให้สามารถคัดเลือกสภาวะที่มีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์โลหะตะกั่วและแบเรียมบนอุปกรณ์ μ PADs ที่พัฒนาขึ้น ทั้งนี้โดยพิจารณาคัดเลือกสภาวะที่เหมาะสมจากขีดจำกัดของอุปกรณ์หรือสารเคมีที่ใช้และประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นในแง่ต่างๆของอุปกรณ์ เช่น การส่งเสริมปฏิกิริยาเคมี (promotion of chemical reaction) ความไว (sensitivity) ความเที่ยงตรง (precision) และความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (linearity) เป็นต้น แสดงผลการศึกษาปัจจัยต่างๆ ดังตารางที่ 2

จากตารางที่ 2 เริ่มพิจารณาที่อิทธิพลจากปัจจัยที่ 1 การหดยปริมาณต่างๆของสารละลายอิมมัวโรโดไซด์ในเขตตรงบริเวณ DZ ของอุปกรณ์ μ PADs พบว่าปริมาตร

ระหว่าง 0.8 – 1.2 ไมโครลิตร สารละลายเคลื่อนที่เต็มพื้นที่วงกลมอย่างสมบูรณ์ นักวิจัยจึงเลือกใช้ปริมาตรที่ 1 ไมโครลิตรสำหรับการทดลองต่อไป ต่อมาที่ปัจจัยที่ 2 เวลาที่ผ่านไปภายหลังหยดสารละลายอิมมัวโรโดไซด์ในเขตตรงบริเวณ DZ พบว่าสีส้มของสารจะคงตัวอยู่ในช่วงเวลา 1 นาทีแรกเท่านั้น จากนั้นพบว่าสีส้มจะเริ่มจางลงมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป สอดคล้องกับรายงานผลการวิจัยของ K. A. Savage ในปี 2002 [19] ที่เสนอว่าการทดสอบด้วยสารละลายอิมมัวโรโดไซด์จะใช้เวลาในการทดลองไม่เกิน 30 วินาทีซึ่งเป็นเวลานานเพียงพอสำหรับปฏิบัติการวิเคราะห์ ปัจจัยที่ 3 เกี่ยวกับลำดับในการหยดสารละลายพบว่าการหยดสารละลายอิมมัวโรโดไซด์ก่อนสารละลายมาตรฐานตะกั่วไม่เกิดสารผลิตภัณฑ์ขึ้น ด้วยเหตุผลที่ตะกั่วสามารถเกิดสารเชิงซ้อนกับอิมมัวโรโดไซด์ที่ pH ระหว่าง 2.8 – 8.5 ดังนั้นการหยดสารละลายมาตรฐานตะกั่วที่ละลายในตัวกลางของกรดไนตริก (pH < 2.8) ส่งผลให้ไม่เกิดสารผลิตภัณฑ์สีชมพูตามต้องการ ทว่าลำดับการเติมสารมาตรฐานตะกั่วแล้วทิ้งไว้จนแห้งสนิทแล้วจึงหยด

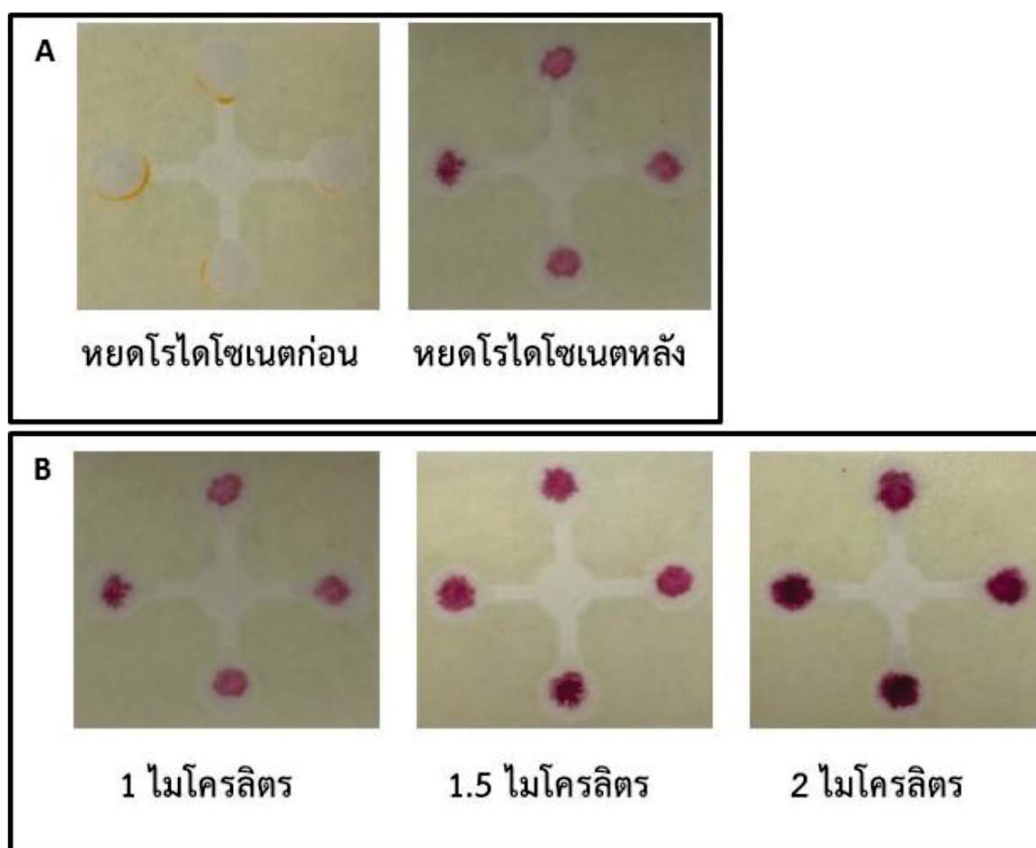
ตารางที่ 2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์แบบเตรียมและตะกั่วด้วยอุปกรณ์ μ PADs

ที่	ปัจจัยที่ทำการศึกษา	ช่วงที่ทำการศึกษา	เงื่อนไขที่เหมาะสม
1	ปริมาตรของสารละลายอิมมัวโรโดไซด์สำหรับหยดลงบน DZ (ไมโครลิตร)	0.5 – 1.8	0.8 – 1.2
2	เวลาที่เหมาะสมสำหรับการใช้สารละลายอิมมัวโรโดไซด์เพื่อทำปฏิกิริยา	0 – 45 วินาที และ 1 – 120 นาที	≤ 30 วินาที
3	ลำดับการเข้าทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายอิมมัวโรโดไซด์และสารละลายมาตรฐาน	หยดโรโดไซด์ก่อน – หลัง สารมาตรฐาน	หยดโรโดไซด์หลัง สารมาตรฐาน
4	ปริมาตรสารละลายอิมมัวโรโดไซด์ที่เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกิริยา (ไมโครลิตร)	1 - 2	2
5	จำนวนซ้ำการหยดสารละลายมาตรฐานสำหรับการเกิดปฏิกิริยา (ครั้ง)	1 - 5	3
6	ช่วงความเข้มข้นสำหรับสร้างกราฟมาตรฐาน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0 – 1,000	200 – 1,000
7	ค่าความเข้มข้นที่วัดจากโปรแกรมอิมเมจสำหรับสร้างกราฟมาตรฐาน	แดง เขียว และน้ำเงิน	เขียว

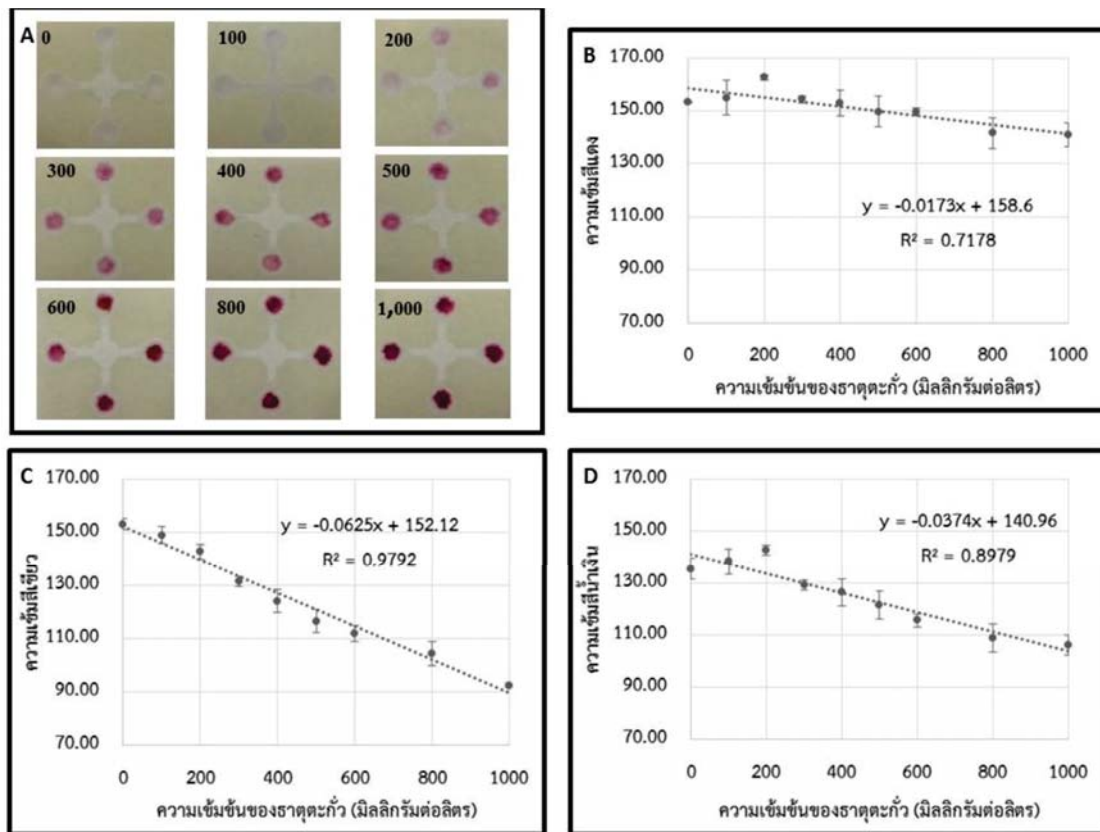
โซเดียมไธโอไซเนตพบที่สามารถเกิดสารผลิตภัณฑ์ผสมเพิ่มขึ้นตามต้องการ พิจารณาได้จากภาพที่ 2A

ปัจจัยที่ 4 5 และ 6 ถูกศึกษาพร้อมกัน ผลการศึกษาปัจจัยที่ 6 แสดงผลดังภาพที่ 3 กราฟมาตรฐานที่พลอตระหว่างความเข้มข้นโลหะตะกั่วกับความเข้มข้นสีเขียวให้ความชันและความเป็นเส้นตรงที่ดีที่สุด ทว่าความเข้มข้นแปรผันแบบผกผันกับความเข้มข้นสีเขียว จึงสามารถนำค่าความเข้มข้นสีเขียวไปใช้ตัดสินเลือกสภาวะที่เหมาะสมอื่นๆได้ เช่น ปัจจัยที่ 4 ศึกษาปริมาตรของสารละลายอิมัลชันโซเดียมไธโอไซเนตที่ใช้หยดลงบนสารละลายมาตรฐานตะกั่ว พบ

ว่าค่าความเข้มข้นสีเขียวยังมีแนวโน้มลดลงจาก 166.75 ± 5.07 , 156.75 ± 7.46 และ 155.25 ± 3.27 เมื่อใช้ปริมาตร 1.0 1.5 และ 2.0 ไมโครลิตร ตามลำดับ (ภาพที่ 2B) ทำนองเดียวกัน ผลการศึกษาปัจจัยที่ 5 พบว่าค่าความเข้มข้นสีเขียวยังมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มจำนวนซ้ำในการหยดสารมาตรฐานมากขึ้น เนื่องเพราะเป็นการเพิ่มปริมาณของโลหะตั้งต้นมากขึ้น นับเป็นการปรับปรุงความไวของวิธีการให้เพิ่มมากขึ้นได้ ทว่าเมื่อพิจารณาร่วมกันระหว่างความไวและเวลาที่เพิ่มขึ้น นักวิจัยเลือกจำนวน 3 ซ้ำเป็นสภาวะที่เหมาะสม



ภาพที่ 2 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ μ PADs (A) อิทธิพลของลำดับการเข้าทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายอิมัลชันโซเดียมไธโอไซเนตและสารละลายมาตรฐานตะกั่ว (B) อิทธิพลของปริมาตรของสารละลายอิมัลชันโซเดียมไธโอไซเนต



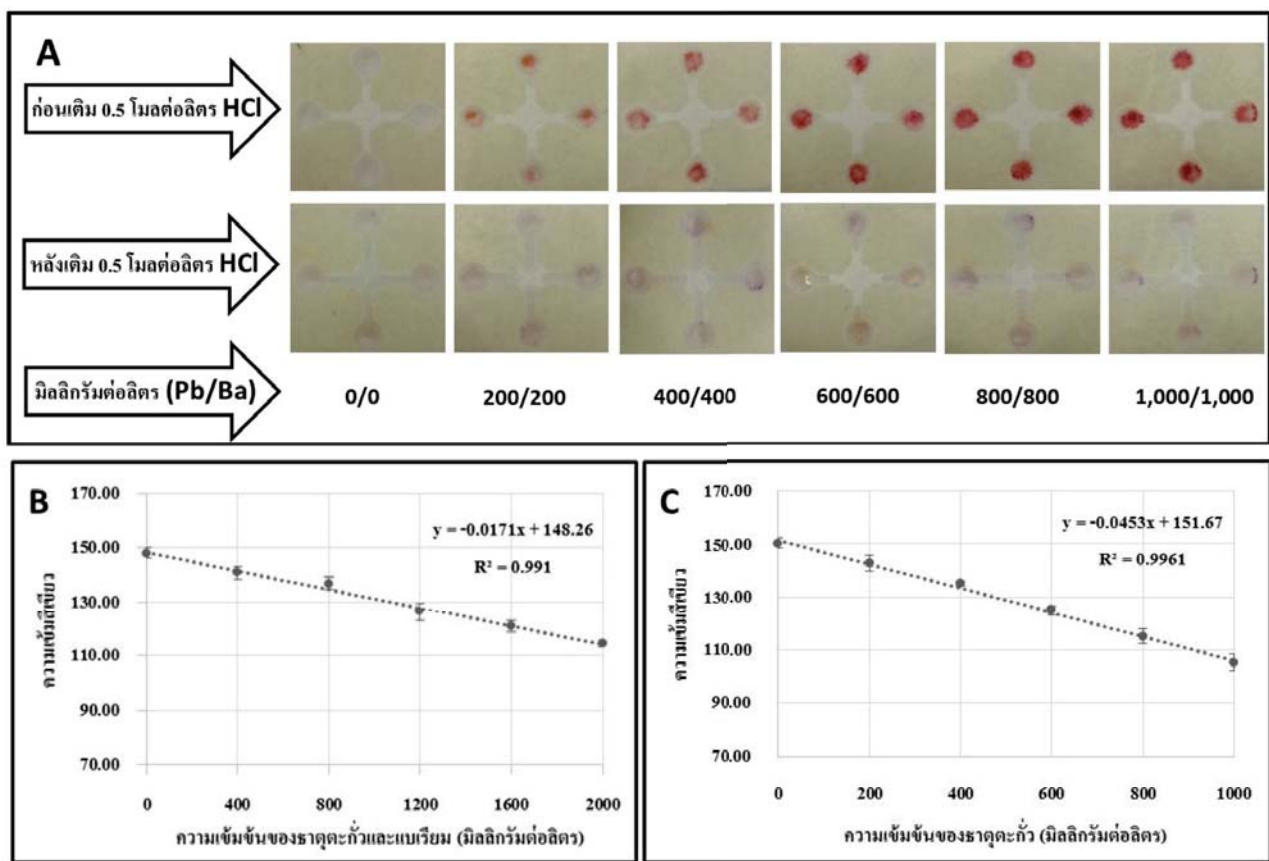
ภาพที่ 3 ผลการวิเคราะห์ธาตุตะกั่วด้วยอุปกรณ์ μ PADs (A) ภาพถ่ายสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากโลหะตะกั่วความเข้มข้นระหว่าง 0 – 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรกับสารละลายอิมมูโนโอดีมโรโดโซเนตบนอุปกรณ์ μ PADs (B) กราฟมาตรฐานตะกั่วพลอตกับความเข้มสีแดง (C) กราฟมาตรฐานตะกั่วพลอตกับความเข้มสีเขียว และ (D) กราฟมาตรฐานตะกั่วพลอตกับความเข้มสีน้ำเงิน ตามลำดับ ค่าความเข้มสีวัดด้วยโปรแกรมอิมเมจ (n=20)

3.3 ผลการสร้างกราฟมาตรฐานของตะกั่วและแบเรียมด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบกระดาษ

จากผลการศึกษาที่ได้จากหัวข้อ 2.3.3 พบว่าสมการเส้นตรงที่ได้จากกราฟมาตรฐานที่พลอตกับความเข้มข้นสีเขียวที่วัดจากโปรแกรมอิมเมจ สำหรับโลหะแบเรียมในช่วงความเข้มข้นระหว่าง 0 – 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้แก่ $y = -0.03x + 149.24$ ($r^2 = 0.9969$) ส่วนกราฟมาตรฐานของตะกั่วที่ศึกษาจากช่วงความเข้มข้นเดียวกันพบว่าได้สมการเส้นตรง คือ $y = -0.0602x + 152.9$ ($r^2 = 0.9905$) จะเห็นว่าทั้งธาตุตะกั่วและแบเรียมสามารถเกิดสารเชิงซ้อนสีชมพูกับสารละลายอิมมูโนโอดีมโรโดโซเนตได้ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความจำเพาะเจาะจงของปฏิกิริยาเคมีมากขึ้นจึงได้ทำการประยุกต์ใช้สภาวะที่เป็นกรดเข้าช่วย (หัวข้อ 2.3.3.2) เพราะโลหะแบเรียมจะไม่เกิดสารเชิงซ้อนกับโซเดียมโรโดโซเนตที่สภาวะกรด แต่ธาตุตะกั่วยังสามารถเกิดสารเชิงซ้อนสีชมพูกับโซเดียมโรโดโซเนตได้ แสดงผลการศึกษาดังภาพที่ 4 ซึ่งพบว่าสามารถสร้างกราฟ

มาตรฐานของโลหะผสม (Pb+Ba) และโลหะตะกั่ว (Pb) ได้จากความเข้มสีเขียวของสารผลิตภัณฑ์ก่อนและหลังการหยด 0.5 มิลลิตร HCl ตามลำดับ พบว่ากราฟมาตรฐานของโลหะผสมตะกั่วและแบเรียม (ภาพที่ 4 B) ได้สมการเส้นตรง $y = -0.0171x + 148.26$ ($r^2 = 0.991$) และกราฟมาตรฐานของโลหะตะกั่ว (ภาพที่ 4 C) ได้สมการเส้นตรง $y = -0.0453x + 151.67$ ($r^2 = 0.9961$) ตามลำดับ และพบว่าค่าขีดจำกัดของการตรวจวัด (Detection limit, LOD) ของการวิเคราะห์โลหะผสมแบเรียมกับตะกั่ว (Ba+Pb) มีค่าเท่ากับ 358 มิลลิกรัมต่อลิตร และขีดจำกัดการตรวจวัดสำหรับโลหะตะกั่วเท่ากับ 124 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยคำนวณจาก 3 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, S.D.) ของค่าความเข้มสีเขียวของแบลนค์ (Blank solution) ต่อความชันของกราฟมาตรฐาน (Slope) แสดงดังสมการที่ 2

$$\text{LOD} = \left(\frac{3 \times \text{S.D. of Blank}}{\text{Slope}} \right) \quad \text{สมการที่ 2}$$



ภาพที่ 4 ผลการสร้างกราฟมาตรฐานตะกั่วผสมแบเรียม (n=20) (A) ภาพถ่ายสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากโลหะผสมตะกั่วและแบเรียมความเข้มข้นระหว่าง (0/0) – (1,000/1,000) มิลลิกรัมต่อลิตรกับสารละลายอิมมูโนโพรตีนบนอุปกรณ์ μ PADs (B) กราฟมาตรฐานตะกั่วและแบเรียม (Pb+Ba) พล็อตด้วยความเข้มข้นสีเขียว (ก่อนหยด 0.5 โมลต่อลิตร HCl) และ (C) กราฟมาตรฐานตะกั่ว (Pb) พล็อตด้วยความเข้มข้นสีเขียว (หลังการหยด 0.5 โมลต่อลิตร HCl)

3.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะแบเรียมและตะกั่วด้วยอุปกรณ์ μ PADs

ผลการประยุกต์อุปกรณ์ μ PADs ที่พัฒนาได้สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณธาตุแบเรียมและตะกั่วในตัวอย่างสังเคราะห์จำนวนทั้งสิ้น 4 ตัวอย่าง โดยเริ่มจากการคำนวณปริมาณ Ba+Pb ก่อน (สมมติให้เป็น A มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยใช้สมการเส้นตรง $y = -0.0171x + 148.26$ (ภาพที่ 4B) และคำนวณหาปริมาณธาตุ Pb (สมมติให้เป็น B มิลลิกรัมต่อลิตร) จากสมการเส้นตรง $y = -0.0453x +$

151.67 (ภาพที่ 4C) จากนั้นจึงคำนวณปริมาณธาตุแบเรียมได้จากผลต่างของปริมาณทั้งสองข้างต้น (ปริมาณ Ba = A-B มิลลิกรัมต่อลิตร) แสดงผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3 สังเกตได้ว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากวิธีที่เสนอมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ไม่เกิน 5.7% และ 14.8% สำหรับผลการวิเคราะห์ธาตุตะกั่วและแบเรียม ตามลำดับซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับวิธีการวิเคราะห์แบบกระดาษที่มีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง อันเนื่องจากการอ่านความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

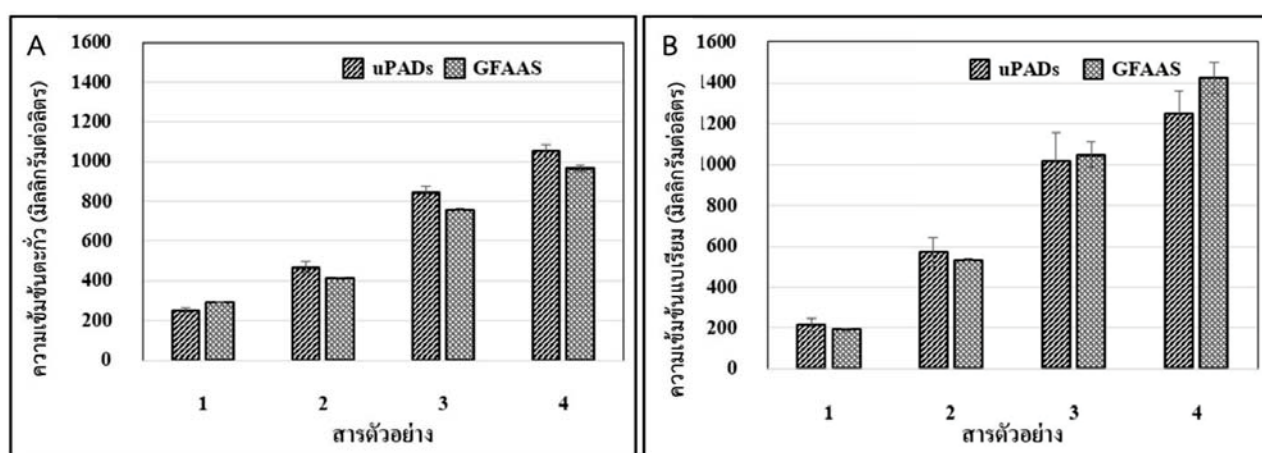
ตารางที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะแบเรียมและตะกั่วด้วยอุปกรณ์ μ PADs

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นที่สัมพันธ์กับปริมาณ Ba+Pb (n=4)	ปริมาณ Ba+Pb (มิลลิกรัมต่อลิตร) ($y = -0.0171x + 148.26$)	ความเข้มข้นที่สัมพันธ์กับปริมาณ Pb (n=4)	ปริมาณ Pb (มิลลิกรัมต่อลิตร) ($y = -0.0453x + 151.67$)	ปริมาณ Ba (มิลลิกรัมต่อลิตร)
1	140.25 $\pm$ 0.53	468 $\pm$ 31	140.25 $\pm$ 0.54	252 $\pm$ 12	216 $\pm$ 32
2	130.46 $\pm$ 1.29	1,041 $\pm$ 75	130.46 $\pm$ 1.24	468 $\pm$ 27	573 $\pm$ 69
3	116.47 $\pm$ 2.09	1,859 $\pm$ 122	113.47 $\pm$ 1.38	843 $\pm$ 31	1,016 $\pm$ 139
4	108.93 $\pm$ 2.38	2,300 $\pm$ 139	103.93 $\pm$ 1.43	1,054 $\pm$ 31	1,246 $\pm$ 114

3.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะแบเรียมและตะกั่วด้วยเทคนิค GFAAS เปรียบเทียบกับอุปกรณ์ μ PADs

ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุแบเรียมและตะกั่วในตัวอย่างด้วยอุปกรณ์ μ PADs ดังแสดงแล้วในตารางที่ 3 และผลการวิเคราะห์โลหะทั้งสองในตัวอย่างชุดเดียวกันด้วยเทคนิค GFAAS ด้วยเงื่อนไขตามข้อเสนอแนะของบริษัทผู้ผลิตแสดงดังตารางที่ 1 นั้น ได้ผลการสร้างกราฟมาตรฐานของธาตุตะกั่วและแบเรียมเป็นสมการเส้นตรง $y = 0.0022x + 0.007$ ($r^2 = 0.9998$) และ $y = 0.001x + 0.038$ ($r^2 = 0.9994$) ตามลำดับ จากสมการความสัมพันธ์ที่ได้

สามารถคำนวณปริมาณโลหะทั้งสองและเปรียบเทียบกับปริมาณที่วิเคราะห์ได้จากอุปกรณ์ μ PADs แสดงดังภาพที่ 5 ทั้งยังพบอีกว่าผลการวิเคราะห์โลหะทั้งสองในตัวอย่างชุดเดียวกันที่ได้จากทั้งสองวิธี ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากมีค่าที่ทางสถิติ (t-stat) น้อยกว่าค่าที่วิกฤต (t-critical) โดยธาตุตะกั่ว t-stat = 1.5754 และธาตุแบเรียม t-stat = -0.7623 ตามลำดับโดยทั้งสองมีค่า t-critical เท่ากัน = 2.3534 [20] กล่าวได้ว่าอุปกรณ์ μ PADs ที่พัฒนาได้ให้ผลการวิเคราะห์ที่น่าเชื่อถือ ถูกต้อง และแม่นยำ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐาน GFAAS



ภาพที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุแบเรียมและตะกั่วในตัวอย่างสี่เคราะห์เปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์ μ PADs และ เทคนิค GFAAS (A) ผลการวิเคราะห์ธาตุตะกั่ว และ (B) ผลการวิเคราะห์ธาตุแบเรียม

4. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

อุปกรณ์ μ PADs ที่พัฒนาขึ้นมีกระบวนการผลิตที่ง่ายใช้วัสดุที่หาได้ในท้องที่ น้ำหนักเบา เคลื่อนย้ายได้สะดวก และมีต้นทุนต่ำเพียง 0.5 บาทต่อชิ้น สามารถใช้แล้วทิ้งได้ ทั้งยังมีสมรรถนะเชิงวิเคราะห์โลหะตะกั่วและแบเรียมที่มีความไวสูงใช้เวลาในการวิเคราะห์เพียง 1 นาที สามารถตรวจวัดผลรวมของธาตุ Ba กับ Pb และธาตุ Pb ได้ที่ปริมาณต่ำสุด เท่ากับ 358 และ 124 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ธาตุทั้งสองในตัวอย่างได้ผลที่มีความน่าเชื่อถือโดยการเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐาน GFAAS ให้ผลที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นั่นแสดงว่าวิธีการแบบกระดาษที่พัฒนาขึ้นเป็นวิธีการทางเลือกใหม่ที่มีความน่าเชื่อถือสำหรับประยุกต์ใช้เป็นชุดทดสอบปริมาณธาตุตะกั่วและแบเรียมได้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา และขอขอบคุณศูนย์วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานวิจัย จนส่งผลให้งานวิจัยสำเร็จได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] จุฑามาศ สัตยวิวัฒน์, (2532). ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสิ่งที่เป็นพิษ. กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์, กระทรวงสาธารณสุข, ออนไลน์, สืบค้นเมื่อ 5 มิถุนายน 2559, http://webdb.dmsc.moph.go.th/ifc_toxic/
- [2] กฤษณา ปาसानา, (2557). การศึกษาปริมาณ ตะกั่ว แคดเมียม ดีบุกและปรอท ที่ปนเปื้อนในหอยแครง และหอยแมลงภู่บริเวณอ่าวไทยตอนใน ปี 2557. ศูนย์วิทยาศาสตร์การแพทย์ที่ 5
- [3] R. D. Koons, (1998). Analysis of gunshot primer residue collection swabs by Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry. *Journal of Forensic Science*, 43, 748-754.
- [4] Elzbieta (Ela) Bakowska, Peter B. Harrsch, and Thomas J. Gluodenis, (2006). Analysis of gunshot residue by ICP – MS. *Agilent Technologies*, No. 3, 1 – 4.
- [5] อรอนงค์ แก้วบุตร, (2557). การกระจายตัวของอนุภาคเขม่าปืนในรถยนต์ที่ใช้ก่อเหตุยิงด้วยอาวุธปืนด้วยเทคนิคอะตอมมิก แอ็บซอร์พชัน สเปกโตรโฟโตเมตริก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขานิติวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [6] ศิริลักษณ์ ชไมบุปผา, (2551). การศึกษาการกระจายของอนุภาคเขม่าปืนจากปืนที่ยิงในห้องปิดด้วยเทคนิค ICP – OES. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขานิติวิทยาศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [7] อัจฉราภรณ์ ประสงค์, (2552). ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเขม่าปืนบนเสื้อผ้าของผู้ยิงปืนและระยะเวลาภายหลังการยิง ปืนที่วิเคราะห์โดยเทคนิค Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP – MS). วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขานิติวิทยาศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [8] S. Kage, K. Kudo, A. Kaizoji, J. Ryumoto, H. Ikeda and N. Ikeda, (2001). A simple method for detection of gunshot residue particles from hands, hair, face, and clothing using scanning electron microscope/wavelength dispersive X – ray (SEM/WDX). *Journal of Forensic Science*, 46, No. 4, 830-834.
- [9] JE. Sarkis, ON. Neto, S. Viebig and SF. Durrant, (1991). Measurement of gunshot residues by sector field inductively coupled plasma mass spectrometry – Further studies with pistols. *Journal of Forensic Science International*, No. 172, 63 – 66.
- [10] D. M. Cate., W. Dungchai., J. C. Cunningham, J. Volckens, and C. S. Henry, (2013). Simple distance-based measurement for paper analytical devices. *Lab on Chip*, 13(12), 2397-2404.

- [11] กนกวรรณ พิสันเทียะ และยุภาพร สมน้อย, (2557). อุปกรณ์แบบกระดาษสำหรับวิเคราะห์แอลกอฮอล์ โดยอาศัยการตรวจวัดทางเอนไซม์ งานวิจัยคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.
- [12] ธาวิต สุวรรณไตร, (2558). อุปกรณ์แบบกระดาษสำหรับการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยอาศัยการวัดระยะทาง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาเคมีศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.
- [13] ฉัตรทริกา ปุยละเทิม, ณัฐนันท์ แก้วสันเทียะ และเรวดี พลอยไป, (2558). การพัฒนากระบวนการผลิตกระดาษยูนิเวอร์แซลอินดิเคเตอร์จากวัสดุธรรมชาติ. รายงานวิจัยสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา.
- [14] วณิดา หลายวัฒนไพศาล, (2555). การแยกเลือดบนอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ของไหลจุลภาคฐานกระดาษ. งานวิจัยภาควิชาเคมีคลินิก คณะสหเวชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [15] Y. Sameenoi, P. Na Nongkai, S. Nouanthavong, C. S. Henry and D. Nacapricha, (2014). One – step polymer screen-printing for microfluidic paper-based analytical (μ PADs) fabrication. *Analyst*. 139, 6580-6588.
- [16], A. W. Martinez, S. T. Phillips, G. M. Whitesides and E. Carrilho, (2009). Diagnostics for the Developing World: Microfluidic Paper-Based Analytical Devices. *Analytical Chemistry*, 82(1), 3-10.
- [17] P. Lisowski and P. K. Zarzycki, (2013). Microfluidic Paper-based Analytical Devices (μ PADs) and Micro Total Analytical Systems (μ TAS): Development, Applications and Future Trends. *Chromatographia*, 76, 1201-1214.
- [18] Northwestern., (1940). Police Science Legal Abstracts and Notes, 31, *Journal of Criminal Law and Criminology*, 365.
- [19] K. A. Savage, (2002). Firearm Examiner Training. ออนไลน์, สืบค้นเมื่อ 16 ตุลาคม 2560, <http://projects.nfstc.org/firearms/>
- [20] J. N. Miller and J. C. Miller, (1993). Statistics for Analytical Chemistry, 3rd ed., Ellis Horwood Limited, West Essex.