

บทที่ 1

บทนำ

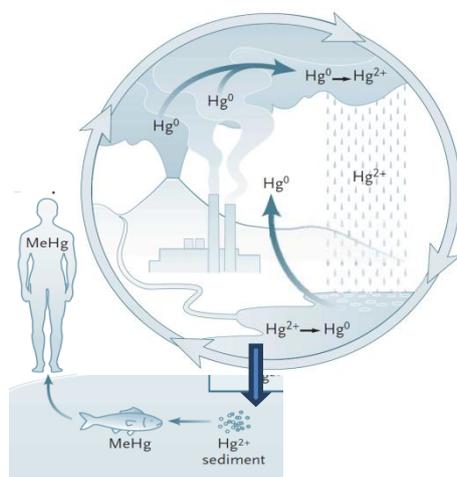
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปรอท (Mercury, Hg) เป็นธาตุโลหะสีขาวยาวเงินวาวที่มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ สามารถระเหยเป็นไอได้ง่าย มีเลขอะตอมที่ 80 มีมวลอะตอมที่ 200.59 มีจุดหลอมเหลวที่ $-38.87\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีจุดเดือดที่ $356.72\text{ }^{\circ}\text{C}$ และมีความหนาแน่นที่ 13.53 g/cm^3 ที่ $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ปรอทสามารถเปลี่ยนรูปได้ง่าย ตั้งแต่สูตรโมเลกุลอย่างง่าย เช่น ปรอทซัลไฟด์ (HgS) จนถึงสารอินทรีย์ประกอบเชิงซ้อน [1] ปรอทเกิดขึ้นและถูกพบตามธรรมชาติ ในธรรมชาติจะพบปรอทในชั้นหินได้เปลือกโลก ประมาณ 0.1-2.0 ส่วนในล้านส่วน (ppm) [2] ปรอทที่ปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อมตามวัฏจักรธรรมชาติ จะมีปริมาณน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับ การปนเปื้อน เนื่องจากกิจกรรมมนุษย์ ปรอทถูกแบ่งออกเป็นหลายรูปลักษณะ แต่สามารถจำแนกออกเป็นรูปลักษณะหลักได้ 3 แบบ โดยอาศัยสถานะทางออกซิเดชัน หรือ เลขออกซิเดชัน (oxidation state or oxidation number) ดังนี้ Hg° (elemental or metallic mercury) เป็นรูปลักษณะที่ระเหยง่ายที่สุด Hg_2^{2+} (mercurous mercury) และ Hg^{2+} (mercuric mercury) โดยที่สมบัติและพฤติกรรมของปรอทขึ้นอยู่กับเลขออกซิเดชัน (oxidation state) และรูปลักษณะทางเคมีของปรอท โดยที่ Hg_2^{2+} (mercurous mercury) และ Hg^{2+} (mercuric mercury) สามารถถูกสร้างรูปลักษณะร่วมกับทั้งสารประกอบอินทรีย์เคมีและอนินทรีย์เคมี การรวมรูปลักษณะของปรอทกับสารประกอบเคมีอินทรีย์โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมทิลปรอท (methyl mercury, MeHg) $\text{CH}_3\text{Hg(II)X}$ โดยที่ X คือลิแกนด์จำพวก คลอไรด์ (Cl) และ ไฮดรอกไซด์ (OH) จะเป็นรูปลักษณะที่มีความเป็นพิษมากที่สุด [3] โดยที่การละลายน้ำของปรอททั้งสามรูปลักษณะสามารถเรียงลำดับจากมากไป น้อยดังนี้ HgCl_2 (mercuric chloride) > CH_3HgCl (methylmercurychloride) > Hg° (elemental or metallic mercury) [4]

ปรอททุกรูปลักษณะถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง เช่น Hg_2^{2+} และ Hg^{2+} (mercurous and mercuric mercury) ที่ถูกสร้างรูปลักษณะกับสารประกอบอนินทรีย์เคมี ถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องมือวิทยาศาสตร์ ได้แก่ เทอร์โมมิเตอร์ เป็นต้น อีกทั้งยังถูกใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆมากมาย ยกตัวอย่างเช่น อุตสาหกรรมทำหลอดไฟ วัสดุทางทันตกรรม อุตสาหกรรมสีย้อมผ้าและสีทาอาคารบ้านเรือน อุตสาหกรรมผลิตคลอรีนกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ การผลิตพลาสติกจากโพลีเอทิลีน และ สารเคมีกำจัดศัตรูพืช เป็นต้น [5-7] โรคที่เกิดจากพิษของสารปรอทพบครั้งแรกในประเทศญี่ปุ่นในปีพ.ศ. 2492 โรงงานอุตสาหกรรมผลิตสารเคมีและปุ๋ยที่มีปรอทปนเปื้อนอยู่ด้วย ซึ่งตั้งอยู่ใกล้อ่าวมินามาตะ ได้ถ่ายเทของเสียลงในอ่าว อีก 3 ปีต่อมามีรายงานว่าชาวประมงในบริเวณอ่าวนี้เป็นโรคประหลาด มีอาการผิดปกติของร่างกาย เช่น ริมฝีปากและลิ้นสั่น มือหยาบกร้าน ในที่สุดก็มีอาการทางประสาท ถ้ายังไม่ได้รับการรักษาจะเสียชีวิตในที่สุด [8] ปรอทเข้าสู่ร่างกายได้โดยตรงจากการหายใจ การสัมผัสทางผิวหนังการกินอาหารและ น้ำที่ปนเปื้อนสารปรอท โดยอาการพิษจากสารปรอท มี 2 ลักษณะ คือ

1. พิษเฉียบพลัน เกิดจากการได้รับสารปรอทคราวเดียวปริมาณมาก ทำให้มีอาการไข้ หายใจลำบากปวดอวัยวะเคลื่อนไหว อ้าเจียน ท้องเสีย มีแผลในปาก น้ำลายออกมาก มีภาวะไตวาย ถ่ายเป็นเลือดชก กระตุกการเคลื่อนไหวกล้ามเนื้อผิดปกติ [9]

2. พิษเรื้อรังเกิดจากการได้รับสารปรอทสะสมทีละน้อยเป็นระยะเวลานาน จนเกิดพิษทางสมอง ไตตับ ผิวหนัง ทำให้มีอาการสั่น ชัก ปวดปลายมือปลายเท้า ปวดศีรษะ หงุดหงิดขี้ลืม ประสาทหลอน พันโยก เหนื่อยอภวมมีเส้นที่บสีน้ำเงิน เลือดออกง่ายภาวะซีด เลือดจาง มีอาการทางตับและไต [9]



รูปที่ 1.1 วัฏจักรของปรอท(ดัดแปลงจาก[10])

วัฏจักรของปรอทดังรูปที่ 1 เป็นการอธิบายถึงการปนเปื้อนของปรอทที่มาจากกิจกรรมของมนุษย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งตามโรงงานอุตสาหกรรมอุตสาหกรรมในประเทศไทยที่มีการใช้ปรอทเป็นส่วนเกี่ยวข้องมีมากมายหลายประเภทและถูกปล่อยออกมาในรูปของเสียที่มีปรอทปนเปื้อนและมักถูกสะสมในแหล่งน้ำเป็นแหล่งสุดท้ายซึ่งส่งผลกระทบต่ออันตรายต่อมนุษย์ที่ใช้อุปโภคและบริโภค ดังนั้นหน่วยงานที่เกี่ยวข้องโดยเฉพาะกระทรวงอุตสาหกรรม จึงจำเป็นต้องหาวิธีการควบคุมอย่างจริงจังเพื่อให้โรงงานอุตสาหกรรมได้บำบัดน้ำทิ้งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน [8]

ปรอท (Mercury) เป็นหนึ่งในปัจจัยที่กำหนดคุณภาพของแหล่งน้ำทางธรรมชาติ เช่น แม่น้ำ คลอง ชายฝั่งทะเล ของประเทศไทยแหล่งน้ำธรรมชาติในประเทศไทยจะมีปริมาณปรอทโดยเฉลี่ยประมาณ 0.47 ไมโครกรัมต่อลิตร ($\mu\text{g/L}$) หรือ ส่วนในพันล้านส่วน (ppb) แต่จะมีปริมาณเพิ่มสูงมากขึ้นบริเวณปากน้ำ โดยเฉพาะบริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา แม่น้ำแม่กลอง แม่น้ำบางปะกง แม่น้ำท่าจีน และแม่น้ำเพชรบุรี ซึ่งบริเวณสองฝั่งของแม่น้ำเหล่านี้จะมีโรงงานอุตสาหกรรมตั้งอยู่เป็นจำนวนมาก ตามค่ามาตรฐานจากคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 พ.ศ. 2537 ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่องกำหนดคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินโดยคุณภาพน้ำผิวดินอนุโลมให้มีการปนเปื้อนของปรอทสูงสุดไม่เกิน 2 ไมโครกรัมต่อลิตร ($\mu\text{g/L}$) หรือ ส่วนในพันล้านส่วน (ppb) [11] นอกจากนี้แหล่งน้ำจากธรรมชาติที่มาจาก 2 ส่วน คือแหล่งน้ำผิวดิน และแหล่งน้ำใต้ดินซึ่งเป็นแหล่งน้ำดิบที่นำมาผลิตน้ำประปา และนำมาใช้เป็นน้ำดื่มในท้ายที่สุด โดยที่การตรวจคุณภาพน้ำที่ใช้ในการบริโภค นอกจากต้องตรวจลักษณะทางกายภาพ เคมี สารพิษและแบคทีเรียแล้ว ปรอทได้ถูกกำหนดเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ต้องมีการตรวจวัดเพื่อมาตรฐานของคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภค โดยตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 135 พ.ศ. 2534 เรื่องน้ำบริโภคในน้ำปิดสนิทได้กำหนดค่ามาตรฐานของปรอทในน้ำประปาและน้ำดื่มที่ 1 ไมโครกรัมต่อลิตร ($\mu\text{g/L}$) หรือ ส่วนในพันล้านส่วน (ppb) [12]

การวิเคราะห์ปรอทที่ตกค้างในแหล่งน้ำต่างๆดังที่กล่าวมาจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง การวิเคราะห์ปริมาณปรอทด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรเมทรี (Atomic Absorption Spectrometry; AAS) โดยวิธีวัดการดูดกลืนแสงของไอจากปฏิกิริยาเวเพอร์เจเนชัน (cold vapor atomic absorption spectrometry) ในแหล่งน้ำซึ่งถูกกำหนดเป็นวิธีมาตรฐานที่ถูกกำหนดโดย EPA (environmental protection agency) [13] และเป็นวิธีที่นิยมมากที่สุดในการวิเคราะห์หาปริมาณปรอทในน้ำสามารถวิเคราะห์อยู่ในช่วง 0.2-10 ไมโครกรัมต่อลิตร ($\mu\text{g/L}$) หรือ ส่วนในพันล้านส่วน (ppb) [13] ซึ่งเป็นเทคนิคที่ให้ความไว (sensitivity) สูง อีกทั้งยังให้ความถูกต้องแม่นยำที่สูง สามารถบอกปรอทเชิงปริมาณที่แน่นอนได้ แต่ต้องอาศัยความเชี่ยวชาญและทักษะในการวิเคราะห์ อีกทั้งค่าใช้จ่ายที่สูงตามไปด้วย เนื่องจากต้องใช้เครื่องมือชั้นสูงในการทำการวิเคราะห์ มีการเตรียมตัวอย่างที่ยุ่งยากซับซ้อน ใช้เวลาในการวิเคราะห์นานและยังใช้สารตัวอย่างปริมาณมาก ต้องเก็บตัวอย่างและยังต้องอาศัยห้องปฏิบัติการในการทำการทดลอง ดังนั้นการพัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์ปรอทในตัวอย่างแหล่งน้ำต่างๆ อาทิเช่น แหล่งน้ำที่อยู่ใกล้กับโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้ปรอทในขบวนการผลิต แหล่งน้ำที่ถูกนำมาผลิตเป็นน้ำประปาเพื่อใช้อุปโภคและบริโภค เป็นต้น ให้มีการเตรียมตัวอย่างให้มีความยุ่งยากซับซ้อนที่น้อยลงใช้เวลาในการวิเคราะห์น้อยลง ลดค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคมีปริมาณมาก ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือชั้นสูงในการวิเคราะห์ ไม่จำเป็นต้องอาศัยความเชี่ยวชาญและทักษะของผู้วิเคราะห์ ขั้นตอนในการวิเคราะห์ที่ไม่ซับซ้อนมีความรวดเร็ว สามารถวิเคราะห์ภาคสนามและรู้ผลโดยใช้เวลาเร็วผลไม่นาน ดังนั้นการพัฒนาเทคนิควิเคราะห์ดังกล่าวจึงถูกให้ความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน

ในปัจจุบันการตรวจวัดทางสี (colorimetric method) เป็นวิธีการหนึ่งที่ได้รับความสะดวกเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย สะดวก และรวดเร็ว โดยไม่ต้องใช้เครื่องมือที่ซับซ้อน จึงเป็นวิธีการที่ใช้เป็นทางเลือกและอาจเข้ามาแทนที่วิธีการวิเคราะห์ปรอทโดยใช้เครื่องมือชั้นสูงได้

การใช้อนุภาคโลหะนาโน (Metal nanoparticles) ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย หนึ่งในนั้นคือการนำไปใช้เป็นตัวตรวจวัดทางสี เช่นอนุภาคทองคำนาโน (AuNPs) และอนุภาคเงินนาโน (AgNPs) เนื่องจากสามารถสังเคราะห์ได้ง่ายและราคาไม่สูง อีกทั้งยังมีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียโดยมวล (molar extinction coefficient) ซึ่งเป็นสมบัติของเซอร์เฟสพลาสมอนเรโซแนนซ์ (Surface Plasmon Resonance; SPR) ที่มีค่าสูงคือ $10^8 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$ [14] และ $10^{10} \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$ [15] ตามลำดับ แต่ AgNPs มีราคาที่ถูกกว่า AuNPs [16,17] และยังมีค่า molar extinction coefficient ซึ่งมากกว่า AuNPs เป็น 100 เท่า มีผลทำให้เพิ่มความชัดเจนในการสังเกตสีและการเพิ่มความไว [18] มากกว่า AuNPs ดังนั้นในการพัฒนาตัวตรวจวัดทางสี AgNPs จึงถูกให้ความสนใจมากกว่า ดังนั้นในงานวิจัยในส่วนแรกสนใจศึกษาและพัฒนาวิธีการตรวจวัดทางสี (colorimetry) ที่มีความจำเพาะ (selectivity) ต่อปรอท (II) ไอออนในแหล่งน้ำแบบง่าย รวดเร็ว และแม่นยำบนระบบสารละลายโดยใช้เทคนิคอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-visible spectroscopy) ที่อาศัยการติดตามการลดลงของอนุภาคเงินนาโน (silver Nanoparticles, AgNPs) ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิว AgNPs นี้สามารถสังเคราะห์ได้เองแบบง่ายและมีเสถียรภาพที่ดี นอกจากนี้ได้ศึกษาผลของคอปเปอร์ (II) ไอออนในการเพิ่มความไว (sensitivity) ของการตรวจวัดในระบบสารละลายที่พัฒนาขึ้นนี้

เนื่องจากงานวิจัยในส่วนแรกต้องใช้สารเคมีและตัวอย่างในปริมาณมาก (mL) ซึ่งทำให้มีของเสียที่เกิดจากการตรวจวัดทำให้ไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และยังต้องมีเครื่องมือที่ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการวิเคราะห์ ผู้วิจัยจึงคิดที่จะพัฒนาการตรวจวัดให้ใช้ปริมาณสารเคมีและตัวอย่างที่ลดลง (μL) ง่าย สะดวก รวดเร็ว โดยใช้กลไกของปฏิกิริยาเติมให้เป็นอนุกรมตรวจวัดที่อยู่บนกระดาษ ดังนั้นในส่วนที่สองจึงสนใจจะพัฒนาอุปกรณ์

ตรวจวัดปรอท (II) ที่ประดิษฐ์มาจากกระดาษขนาดเล็กโดยที่ AgNPs จะถูกเคลือบและเกาะอยู่บนกระดาษ ซึ่งกระดาษจะมีสีที่เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับสีกระดาษเริ่มต้น และเมื่อมีปรอท (II) ที่ความเข้มข้นต่างๆ สีของกระดาษที่มี AgNPs เคลือบอยู่ก็จะเปลี่ยนไป โดยใช้การถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลในกล่องควบคุมแสง แล้วนำไฟล์ภาพมาประมวลผลโดยใช้โปรแกรม ImageJ ในการอ่านค่าสี ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาปรอท (II) ในเชิงคุณภาพ (qualitative) โดยการสร้างกราฟมาตรฐานจากค่าความเข้มของสีของกระดาษที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีปรอท (II) ที่ความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สารปริมาณน้อยมาก (ระดับไมโครลิตร, μL) ไม่มีการเตรียมตัวอย่าง ใช้เวลาวิเคราะห์ที่มีความรวดเร็วและไม่ซับซ้อน อีกทั้งไม่ต้องการทักษะและความชำนาญของผู้ทำการวิเคราะห์ และสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ภาคสนามและรู้ผลการวิเคราะห์ได้ทันที โดยคาดหวังว่าสามารถตอบสนองกับความต้องการในการวิเคราะห์ปรอท (II) ในตัวอย่างต่างๆ ตามปริมาณมาตรฐานที่ถูกกำหนดขึ้นได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและพัฒนาวิธีการตรวจวัดทางสี (colorimetry) ที่มีความจำเพาะ (selectivity) ต่อปรอท (II) ไอออนในแหล่งน้ำแบบง่าย รวดเร็ว และแม่นยำบนระบบสารละลาย โดยใช้เทคนิคอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-visible spectroscopy) โดยอาศัยการติดตามการลดลงของอนุภาคเงินนาโน (Silver Nanoparticles, AgNPs) ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิว

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของคอปเปอร์ (II) ไอออนในการเพิ่มความไว (sensitivity) ของการตรวจวัดในระบบสารละลายที่พัฒนาขึ้น

1.2.3 เพื่อประยุกต์ใช้วิธีการตรวจวัดทางสี (colorimetry) ที่มีความจำเพาะ (selectivity) ต่อปรอท (II) ไอออนในแหล่งน้ำโดยอาศัยการติดตามการลดลงของอนุภาคเงินนาโนที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวบนระบบของไหลจุลภาคที่ประดิษฐ์มาจากกระดาษ (microfluidic paper-based analytical device, μPAD) ด้วยเทคนิคการพิมพ์ (printing ร่วมกับการวิเคราะห์ทางสี (chromatic analysis) เพื่อการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (quantitative analysis)

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้เทคนิคการตรวจวัดทางสีที่จำเพาะต่อปรอท (II) แบบง่าย รวดเร็ว และมีความแม่นยำ โดยอาศัยการติดตามการลดลงของอนุภาคเงินนาโนที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้เทคนิคอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีบนระบบสารละลาย และบนระบบของไหลจุลภาคที่ประดิษฐ์มาจากกระดาษ (μPAD) ด้วยเทคนิคการพิมพ์ (printing) ในตัวอย่างน้ำ

1.4. ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดทางสีของปรอท (II) ไอออนแบบง่ายและรวดเร็ว โดยอาศัยการติดตามการลดลงของอนุภาคเงินนาโน (AgNPs) ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้เทคนิคอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-Vis spectroscopy)

1. การพิสูจน์เอกลักษณ์การสังเคราะห์ AgNPs ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิว
2. การศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของ AgNPs ที่มีผลต่อการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดของ AgNPs เพื่อการตรวจวัดทางสีของปรอท (II)
3. การศึกษาผลของ pH ที่มีผลต่อการดูดกลืนพลาสมอนสูงสุดของ AgNPs เพื่อการตรวจวัดทางสีของปรอท (II)
4. การศึกษาช่วงการตอบสนองแบบเป็นเส้นตรง (linear range) ในการตรวจวัดทางสีของปรอท (II) และความเที่ยงตรง (precision)
5. การศึกษาผลของคอปเปอร์ (II) เพื่อเพิ่มความไวในการตรวจวัดทางสีของปรอท (II)
6. การศึกษาผลของตัวรบกวน (interferences)
7. การศึกษาร้อยละของการได้กลับคืนมา (recovery) ในตัวอย่างน้ำและการสอบเทียบ (Method validation) กับเทคนิคมาตรฐาน

1.4.2 การตรวจวัดทางสีของปรอท (II) ไอออนแบบง่ายและรวดเร็วโดยอาศัยการติดตามการลดลงของอนุภาคเงินนาโน (AgNPs) ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้ระบบของไหลจุลภาคที่ประดิษฐ์มาจากกระดาษแบบสองชั้น (double layer microfluidic paper-based analytical device, double layer μ PAD) โดยใช้เทคนิคการพิมพ์ (printing technique)

1. การศึกษาชนิดของกระดาษที่ใช้สร้างอุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้ระบบของไหลจุลภาคที่ประดิษฐ์มาจากกระดาษแบบสองชั้น (double layer microfluidic paper-based analytical device, double layer μ PAD)
2. การศึกษาหาปริมาณตัวอย่างที่เหมาะสมและความจุสูงสุดที่ใช้บนอุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้ระบบของไหลจุลภาคที่ประดิษฐ์มาจากกระดาษแบบสองชั้น (double layer microfluidic paper-based analytical device, double layer μ PAD)
3. การศึกษาการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้ระบบของไหลจุลภาคที่ประดิษฐ์มาจากกระดาษแบบสองชั้น (double layer microfluidic paper-based analytical device, double layer μ PAD) ด้วยเทคนิค AKD-inkjet printing
4. การศึกษาเทคนิคในการอ่านผลในข้อมูลเชิงปริมาณบนอุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้ระบบของไหลจุลภาคที่ประดิษฐ์มาจากกระดาษแบบสองชั้น (double layer microfluidic paper-based analytical device, double layer μ PAD) ด้วยการวิเคราะห์ทางสี (chromatic analysis) ด้วยโปรแกรม ImageJ และกลไกของปฏิกิริยาบนกระดาษ
5. การศึกษาผลของขนาดและจำนวนของอนุภาคเงินนาโน (AgNPs) ที่ไม่ถูกปรับปรุงพื้นผิวที่จำเพาะต่อการวิเคราะห์หาปริมาณปรอท (II)

6. การศึกษาความสามารถในการวิเคราะห์และใช้ได้ของวิธีที่พัฒนาขึ้น
- 7 การวิเคราะห์หาปริมาณปรอท (II) ในตัวอย่างจริง