

ปัญหาสิ่งแวดล้อมเป็นวิกฤตที่คนทั้งโลกกำลังเผชิญอยู่ในขณะนี้ ทุกภาคส่วนต่างตื่นตัวกับการแก้ปัญหา รวมทั้งการคิดค้นและพัฒนานวัตกรรมที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมหรือนวัตกรรมรักโลก ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อลดการใช้สารเคมีและกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตของคนและสัตว์ ตัวอย่างเช่น ปะปนที่ไม่ใช่ปะปนที่วัดใช้หรือเทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิทั่วไป แต่เป็นโลหะหนัก (Heavy metal) ที่มีความเป็นพิษสูงมากไม่ว่าจะอยู่ในสถานะใด ปะปนที่มีลักษณะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง และระเหยเป็นไอได้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังรูปที่ 1 (A) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูป ดังนี้ (1) รูปโลหะปะปน (Metallic Mercury) เป็นรูปปะปนที่บริสุทธิ์สามารถระเหยได้ โดยอัตราการระเหยเพิ่มตามสภาวะอุณหภูมิที่สูงขึ้น (2) รูปสารประกอบปะปนอนินทรีย์ (Inorganic Mercury Compound) สารประกอบประเภทนี้สามารถพบได้ในธรรมชาติ เป็นรูปแบบที่ปะปนจับตัวกับ Chlorine, Sulfur หรือ Oxygen เช่น  $H_2S$ ,  $HgO$ ,  $HgCl_2$ ,  $Hg_2Br_2$  เป็นต้น และ (3) ปะปนที่อยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์ (Organic Mercury Compound) เกิดจากการรวมตัวของปะปนกับธาตุคาร์บอนและธาตุอื่น ๆ เช่น Methylmercury และ Ethylmercury เป็นต้น ปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศได้ขยายจำนวนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งในกระบวนการผลิตต่าง ๆ นั้น มักมีสารเคมีรวมถึงโลหะหนักที่เหลือจากกระบวนการผลิตของเสียเหล่านี้สามารถปนเปื้อนในอาหารและน้ำดื่ม จากการแพร่กระจายจากแหล่งผลิตเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร ดังรูปที่ 1 (B) the United States Environmental Protection Agency (US EPA) ได้กำหนดมาตรฐานสินค้าและผลิตภัณฑ์ทั้งในประเทศและต่างประเทศให้มีความเข้มข้นของปะปนที่ปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์ อาทิ ปะปนที่ปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำ แซ่แซ่ได้ไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และในน้ำดื่มได้ไม่เกิน 2 ไมโครกรัมต่อลิตร เนื่องจากปะปน เมื่อเข้าสู่

ร่างกายจะทำลายหน่วยพันธุกรรม ระบบประสาทและสมองอย่างถาวร รวมถึงโรคมินามาตะ (Minamata diseases) ดังนั้นการตรวจวัดปริมาณปะปนจึงมีความสำคัญ และได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในระดับนานาชาติ



รูปที่ 1 (A) สัญลักษณ์ของธาตุและลักษณะของปะปน และ (B) ห่วงโซ่อาหาร (Food chain) ของปะปน

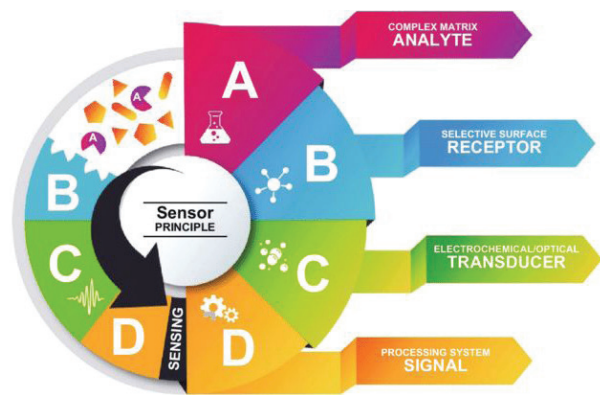
เทคนิคสำหรับการตรวจวัดหาปริมาณ  $Hg^{2+}$  ได้มีการพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ได้ในระดับความเข้มข้นน้อย ๆ (trace) แต่เทคนิคที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางเป็นเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี เช่น Cold-vapor atomic absorption spectrometry (CV-AAS),

Atomic fluorescence spectrometry (AFS) และ Inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS) เนื่องจากเทคนิคดังกล่าวสามารถตรวจวิเคราะห์  $Hg^{2+}$  ในระดับน้อยมากได้อย่างรวดเร็ว ถูกต้องและมีความแม่นยำสูง แต่อย่างไรก็ตามเทคนิคเหล่านี้ยังมีข้อจำกัด เช่น เครื่องมือมีราคาแพง การเตรียมตัวอย่างยุ่งยาก ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการตรวจวัด และที่สำคัญไม่สามารถนำไปวิเคราะห์ในภาคสนามได้ (on-site analysis) ดังนั้นจึงนำแนวคิดของนวัตกรรมที่สามารถตรวจวัด  $Hg^{2+}$  โดยอาศัยเซนเซอร์ทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical sensor) ซึ่งได้รับความสนใจและนิยมนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัด  $Hg^{2+}$  เนื่องจากให้สภาพไวในการตรวจวัดสูง มีความรวดเร็วในการวิเคราะห์ การเตรียมตัวอย่างไม่ยุ่งยาก และใช้สารเคมีปริมาณน้อยเพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดที่มีส่วนร่วมในการรักษาโลก

**หลักการของเซนเซอร์ทางเคมี (Chemosensor)**

ปัจจุบันได้มีการพัฒนานวัตกรรมการตรวจวัด  $Hg^{2+}$  โดยอาศัยเซนเซอร์ทางเคมี ซึ่งสามารถจำแนกตามชนิดของสัญญาณที่แสดงออกมาได้ 2 ชนิด คือ เซนเซอร์ทางไฟฟ้า (electronic sensor) และเซนเซอร์ทางแสง (optical sensor) โดยเซนเซอร์ทางไฟฟ้าจะเป็นการแสดงสัญญาณการเปลี่ยนแปลงในรูปของสมบัติทางเคมีไฟฟ้า ในขณะที่เซนเซอร์ทางแสงจะเป็นการแสดงผลโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางแสง เซนเซอร์ทางไฟฟ้าเคมีที่พัฒนาขึ้นมีส่วนประกอบหลักสองส่วนคือ ตัวจดจำสัญญาณ (receptor) และทรานสดิวเซอร์ (transducer) ส่วนประกอบที่หนึ่งคือ ตัวจดจำสัญญาณเป็นวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้นซึ่งจะเกิดอันตรกิริยากับสารที่ต้องการตรวจวัดโดยอาศัยสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของสารนั้น โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันในลักษณะที่แตกต่างกันออกไป และส่วนประกอบที่สองคือ ทรานสดิวเซอร์ทำหน้าที่แปลงข้อมูลทางเคมีที่เกิดขึ้น จากการเกิดปฏิกิริยาไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าที่อ่านค่าได้ ข้อมูลนี้จะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผล เพื่อเป็นดัชนีที่ระบุถึงปริมาณของสารที่ต้องการตรวจวัดแผนภาพทั่วไปของเซนเซอร์ทางเคมี แสดงดังรูปที่ 2 เซนเซอร์ทางไฟฟ้าเคมีประกอบด้วย

ขั้วไฟฟ้า 3 ขั้ว ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode, WE) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode, RE) และขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter electrode, CE) จุ่มในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยอาศัยการวัดอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันของสารอะนาไลต์บนผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าใช้งาน ซึ่งแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารที่ต้องการตรวจวัด



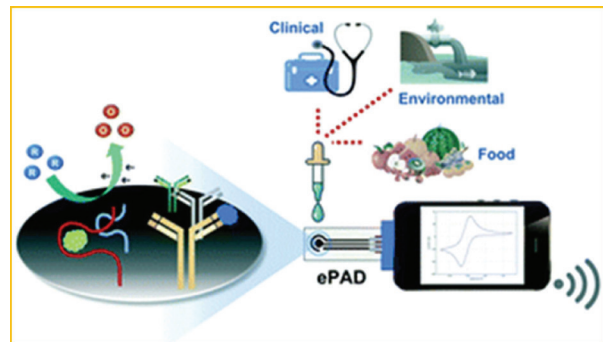
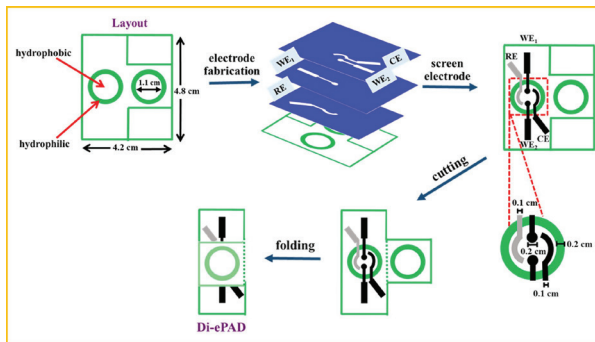
รูปที่ 2 แผนภาพทั่วไปของเซนเซอร์ทางเคมี [4]

ในปี ค.ศ. 2022 กลุ่มวิจัยของ H. Bakhsh และคณะ ได้พัฒนาเซนเซอร์ทางไฟฟ้าเคมีโดยอาศัยการดัดแปรขั้วไฟฟ้าใช้งานชนิดกลาสซีคาร์บอนด้วยวัสดุซิงค์ออกไซด์ขนาดนาโน (ZnO) สำหรับตรวจวัดไอออนปรอท ( $Hg^{2+}$ ) เซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นนำมาใช้ในการตรวจวัด  $Hg^{2+}$  ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์พีเอช 9.0 โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของปรอทบนผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ( $Hg^0 \rightarrow Hg^{2+} + 2e^-$ ) ที่ศักย์ไฟฟ้า +0.18 โวลต์ พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของปรอทมากขึ้น เซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นให้ช่วงความเป็นเส้นตรงในการตรวจวัดเท่ากับ 1 ถึง 80 ไมโครโมลาร์ และขีดจำกัดในการตรวจวัดต่ำสุดเท่ากับ 1 นาโนโมลาร์ นอกจากนี้เซนเซอร์ที่ดัดแปรด้วยวัสดุขนาดนาโน ZnO มีความเสถียรและมีความสามารถในการทำซ้ำที่ดี นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในการตรวจวัดปรอทในน้ำผิวดินได้ มีร้อยละการได้กลับคืน (%recovery) เท่ากับ 92.5 ถึง 100.2 แต่อย่างไรก็ตามเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นยังใช้สารตัวอย่าง



ในปริมาณมาก และเครื่องมือวัด ไม่สามารถนำไปใช้ในภาคสนามได้ ปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ของไหลจุลภาคบนฐานกระดาษ ด้วยหลักการทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical paper-based analytical devices: ePADs) โดยอาศัยการสร้างขอบเขต และส่วนตรวจวัด ด้วยวัสดุที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic material) บนกระดาษ และส่วนตรวจวัดรูปวงกลมใช้สำหรับหยดสารละลายตัวอย่าง ควบคู่กับการสกรีนขั้วไฟฟ้าด้วยวัสดุที่นำไฟฟ้า เช่น หมึกกราฟีน หรือหมึกคาร์บอน เพื่อเพิ่มสภาพไวในการตรวจวัด ขั้นตอนการสร้างขั้วไฟฟ้าแบบพิมพ์สกรีนบนฐานกระดาษ แสดงดังรูปที่ 3A และกลไกการตรวจวัดทางไฟฟ้าเคมี แสดงดังรูปที่ 3B เซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นใช้สารละลายมาตรฐานหรือสารตัวอย่างในปริมาณน้อยมาก

ในระดับไมโครลิตร ช่วยลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นจากการวัด สามารถผลิตขั้วไฟฟ้าได้ที่หลายชิ้นต่อหนึ่งครั้ง การผลิตอุปกรณ์ตรวจวัดมีขนาดเล็กสามารถพกพาได้ และขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น มีความสามารถในการทำซ้ำที่ดี ด้วยคุณสมบัติและข้อดีของเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้น สามารถนำไปใช้ เป็นต้นแบบในการสร้างนวัตกรรมใหม่ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เพื่อรองรับการแข่งขันในอนาคต ที่มีความสอดคล้องกับยุทธศาสตร์การพัฒนาประเทศ ตามแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี วิจัยและนวัตกรรม เพื่อนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการตรวจวัดปริมาณสารปรอท หรือสารชนิดต่าง ๆ ในสิ่งแวดล้อม อาหาร และตัวอย่างทางการแพทย์ (point-of-care) ต่อไป



รูปที่ 3 (A) ขั้นตอนการสร้างขั้วไฟฟ้าแบบพิมพ์สกรีนบนฐานกระดาษ และ (B) กลไกการตรวจวัดทางไฟฟ้าเคมี [6-7]

กองบริหารจัดการทดสอบความชำนาญห้องปฏิบัติการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ ในฐานะเป็นผู้จัดกิจกรรมทดสอบความชำนาญห้องปฏิบัติการ ซึ่งได้รับการรับรองตามมาตรฐาน ISO/IEC 17043 จาก Taiwan Accreditation Foundation (TAF) ได้เล็งเห็นถึงความสำคัญและส่งเสริมให้ห้องปฏิบัติการทั้งภายในและต่างประเทศ ตระหนักถึงปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม จึงได้จัดกิจกรรมทดสอบความชำนาญห้องปฏิบัติการ สาขาสิ่งแวดล้อม รายการ Mercury (Hg) in water ขึ้น ซึ่งการเข้าร่วมกิจกรรมทดสอบความชำนาญห้องปฏิบัติการถือเป็นส่วนหนึ่งในการทวนสอบ

ความใช้ได้ของวิธีการวัด และประกันคุณภาพผลการทดสอบของห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบในการยื่นขอรับการรับรองตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025 และเป็นการติดตามความสามารถห้องปฏิบัติการที่จะก่อให้เกิดการพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพอย่างต่อเนื่องสืบไป หากหน่วยงานของท่านสนใจเข้าร่วมกิจกรรมทดสอบความชำนาญห้องปฏิบัติการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ สามารถศึกษารายละเอียดได้ที่ <https://www.dss.go.th> หรือติดต่อสอบถามได้ที่ 02-201-7331-3 หรือทางอีเมล [clpt@dss.go.th](mailto:clpt@dss.go.th)



## เอกสารอ้างอิง

ปรอท (Mercury:Hg) ประโยชน์ และพิษปรอท. [ออนไลน์] [อ้างถึงวันที่ 3 มีนาคม 2566] เข้าถึงจาก: <https://www.siamchemi.com/%E0%B8%9B%E0%B8%A3%E0%B8%AD%E0%B8%97/>

Liu, C., et al. 219. Recent advances in sensitive and rapid mercury determination with graphene-based sensors. Journal of Materials Chemistry A, 7: 6616-6630.

WildAid Thailand ช่วยสัตว์ป่า. [ออนไลน์] [อ้างถึงวันที่ 1 มีนาคม 2566] เข้าถึงจาก: [https://web.facebook.com/WildAidThailand/photos/a.421950501324909/857224924464129/?locale=th\\_TH](https://web.facebook.com/WildAidThailand/photos/a.421950501324909/857224924464129/?locale=th_TH)

Boroujerdi, R., Abdelkader, A. and Paul, R. 2020. State of the art in alcohol sensing with 2D materials. Nano-Micro Letters, 12: 33.

Bakhsh, H., et al. 2022. Electrochemical monitoring of trace-level mercury in water sample using ZnO/GCE modified electrode. Research Square, 1-13.

Nontawong, N., et al. 2022. Smart sensor for assessment of oxidative/nitrative stress biomarkers using a dual-imprinted electrochemical paper-based analytical device. Analytica Chimica Acta, 1191: 339363.

Noviana, E., et al. 2020. Electrochemical paper-based devices: sensing approaches and progress toward practical applications. Lab on a Chip, 20: 9-34.