

บทความวิจัย

การพัฒนาเครื่องโคลเวเพอร์เจเนเรเตอร์อย่างง่าย เพื่อหาปริมาณปรอทในตัวอย่างโดยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์บชัน สเปกโตรเมตรี

วารุค ฉัตรทอง* และ ยงยุทธ ตัณฑุลเวส

บทคัดย่อ

การสร้างเครื่องโคลเวเพอร์เจเนเรเตอร์อย่างง่ายที่ทำงานด้วยแก๊สตัวพาไปต่อเข้ากับเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณปรอทในตัวอย่างที่เป็นของเหลวที่ไม่ผ่านการเตรียมตัวอย่างปรอทอนินทรีย์ (Hg^{2+}) จะกลายเป็นไอปรอท (Hg^0) โดยสารรีดิวซ์โซเดียมเตตระไฮโดรโบเรต ($NaBH_4$) ไอปรอทจะออกจากสารละลายแล้วถูกส่งไปตรวจวัดที่เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันอย่างรวดเร็ว สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการหาปริมาณปรอท คือ ใช้ของเหลวตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร ในสารละลายร้อยละ 1.5 ของกรดไนตริก 10 มิลลิลิตร ทำปฏิกิริยากับสารละลายร้อยละ 2 ของโซเดียมเตตระไฮโดรโบเรตในสารละลายร้อยละ 1 ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีอัตราการไหล 30 มิลลิลิตรต่อนาทีในขวดที่ใช้ทำปฏิกิริยาแก๊สตัวพาไนโตรเจนมีอัตราการไหล 300 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นน้อยที่สุดที่สามารถตรวจวัดได้คือ 2.4 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร เมื่อสัญญาณการตรวจวิเคราะห์มีขนาดเป็น 3 เท่าของสัญญาณรบกวนเมื่อคำนวณจากความสูงของพีคจากเส้นสมการถดถอยมีช่วงการตอบสนองของสัญญาณการตรวจวิเคราะห์ต่อความเข้มข้นเป็นเส้นตรงในช่วง 25-125 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร และมีค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.998 ($n=7$) ร้อยละของการคืนกลับที่ความเข้มข้น 50 และ 100 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตรของตัวอย่างน้ำประปาอยู่ที่ 103.5 และ 94.2 และน้ำดื่มอยู่ที่ 101.1 และ 99.9 ตามลำดับ เครื่องมือนี้มีประสิทธิภาพและความแม่นยำพอที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณปรอทเพื่อใช้ในการเรียนการสอนได้

คำสำคัญ: เครื่องโคลเวเพอร์เจเนเรเตอร์อย่างง่าย วิเคราะห์หาปริมาณปรอท ปรอท

Development of a Simple Cold Vapor Generator for Determination of Mercury in Samples by Atomic Absorption Spectrometry

Waradoon Chutrtong* and Yongyuth Tundulawessa

ABSTRACT

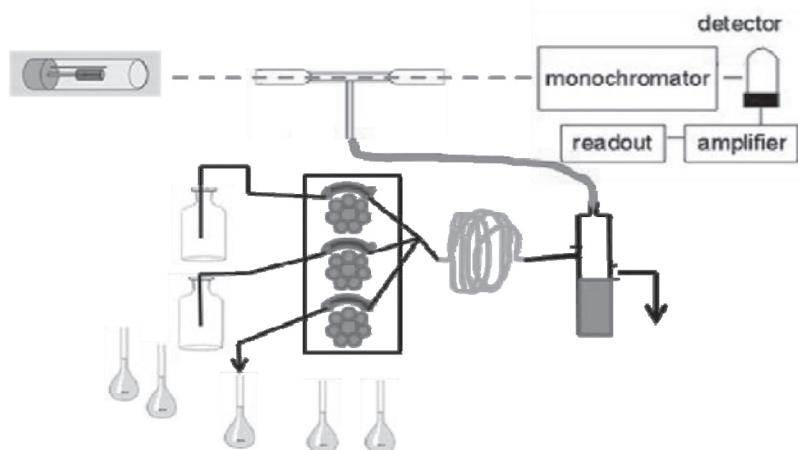
A simple pneumatic cold vapor generator coupled with atomic absorption spectrometer was developed for analysis of mercury in liquid sample of non-sample preparation. Inorganic mercury (Hg^{2+}) can be converted to mercury cold vapor (Hg^0) by a reducing agent (NaBH_4). The cold vapor was released from the aqueous phase and rapidly transported to an atomic absorption spectrometer. Optimum condition for mercury measurement was operated by loading 2% NaBH_4 in 1% NaOH with a flow rate of 30 mL/min to a mixture of sample solution and 1.5% HCl(aq) at a ratio of 1:10 in the reaction flask. Optimum flow rate of nitrogen carrier gas was 300 mL/min. The lower limit of detection obtained was 2.4 ng/mL ($S/N=3$), calculated with peak heights. The calibration curve was linear in the range of 25-125 ng/mL with $r^2 = 0.998$ ($n=7$). The recovery for the determination of 50 ng/mL and 100 ng/mL in the tap water and drinking water were 103.5% and 94.2%, 101.1% and 99.9% respectively. This instrument showed performance and had satisfactory efficiency to be applied for determining mercury. Moreover, the developed instrument can also be used as a tool in laboratory activity or lecture demonstration helping students for their learning.

Keywords: simple cold vapor generator, determination of mercury, mercury

บทนำ

ปัญหาที่สำคัญของการเรียนการสอนและวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์ระดับสูงไม่ว่าจะเป็นเคมี ฟิสิกส์ ชีววิทยา คือ งบประมาณในการจัดหาครุภัณฑ์วิทยาศาสตร์เพื่อใช้ในการเรียนการสอนและการวิจัย ตลอดจนการบำรุงรักษาครุภัณฑ์ที่มีอยู่แล้วให้สามารถใช้งานต่อไปได้มีจำนวนจำกัด ประกอบกับราคาครุภัณฑ์มีราคาค่อนข้างสูงมาก รวมทั้งมีอายุการใช้งานในช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น งบประมาณบางส่วนจึงถูกใช้ไปเพื่อการซ่อมบำรุง การจัดซื้อครุภัณฑ์เพิ่มเติมเพื่อใช้ในการเรียนการสอนจึงเป็นไปได้ยาก ซึ่งในปัจจุบันภาควิชาเคมีขาดเครื่องโคลเวเพอร์เพื่อใช้ในการเรียนการสอน การจัดซื้อมาเพื่อใช้ในการเรียนการสอนโดยไม่มีงานประจำรองรับจึงไม่คุ้มค่า ทำให้ผลิตขาดทักษะในส่วนนี้ ดังนั้นจึงเกิดแนวความคิดในการจัดสร้างเครื่องโคลเวเพอร์เจเนเรเตอร์อย่างง่ายเพื่อใช้ประกอบในการเรียนการสอนให้นิสิตเข้าใจหลักการในการวิเคราะห์สารด้วยเทคนิคโคลเวเพอร์ พร้อมทั้งเทคนิคไฮโดรด์เจเนเรชันเพื่อใช้เป็นแนวทางในการปฏิบัติงานหลังจากจบการศึกษาไปแล้ว

เครื่องชนิดนี้เป็นอุปกรณ์เสริมของเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชันสเปคโตรมิเตอร์ เมื่อทำงานร่วมกันจะทำให้สามารถตรวจวิเคราะห์หาปริมาณปรอทและโลหะไฮโดรด์ได้ในระดับส่วนในพันล้านส่วน (ppb) ซึ่งเป็นงานที่ทำกันเป็นประจำในองค์กรทั้งภาครัฐและเอกชน เช่น งานทางด้านส่งออกและนำเข้าสินค้าต่างๆ โดยเฉพาะอาหาร งานทางด้านสิ่งแวดล้อมซึ่งมีการเฝ้าระวังปริมาณโลหะเป็นพิษ งานทางด้านพลังงานโดยเฉพาะการผลิตน้ำมันและแก๊สธรรมชาติ งานทางด้านคุ้มครองผู้บริโภคทั้งอาหารและยา เป็นต้น เนื่องจากปรอทและโลหะที่สามารถเป็นโลหะไฮโดรด์ มักเป็นโลหะที่เป็นพิษทั้งชนิดเฉียบพลันและเรื้อรัง [1] หลักการจะใช้สารรีดิวซ์อาจจะเป็น NaBH_4 หรือ SnCl_2 ทำการรีดิวซ์ปรอทหรือโลหะที่สามารถเกิดเป็นโลหะไฮโดรด์ เช่น สารหนู พลวง บิสมัท ซีเรเนียม เทลลูเรียม เจอมาเนียม เป็นต้น [2] เกิดเป็นไอปรอทและโลหะไฮโดรด์แยกตัวออกจากสารละลาย ตัวอย่างถูกแก๊สตัวพา ซึ่งเป็นแก๊สเฉื่อยพาเข้าสู่แอบซอร์บชัน เซลล์ (absorption cell) ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นจำเพาะกับสารแต่ละชนิด ปริมาณที่วิเคราะห์อยู่ในระดับส่วนในพันล้านส่วน ซึ่งเป็นระดับที่มีผลกับมนุษย์ ตัวอย่างเหตุการณ์พิษจากปรอท เช่น โรคมินามาตะ ในปี ค.ศ. 1959 [1]



รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างทั่วไปของเครื่องไฮโดรด์เจเนเรเตอร์ที่ผลิตจำหน่าย

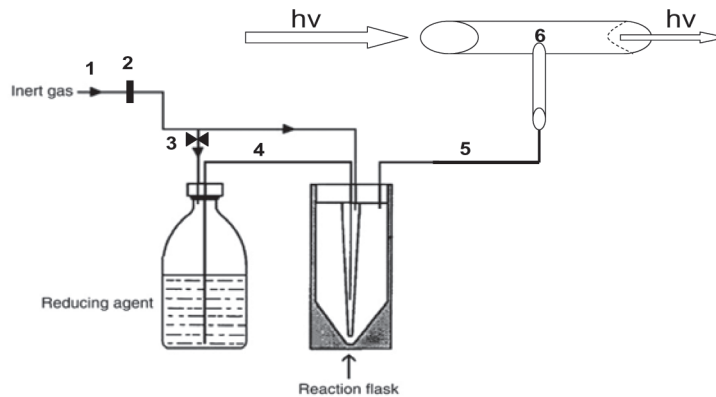
รูปที่ 1 แสดงเครื่องไฮโดรด์เจเนเรเตอร์ที่นิยมผลิตจำหน่ายมักขายคู่ควบกับเครื่องป้อนตัวอย่างอัตโนมัติ (auto-sampler) และโปรแกรมควบคุมการทำงานและประมวลผลมีราคาสูงมาก จำเป็นต้องรับบริการด้านการตรวจเช็คปรับเปลี่ยนชิ้นส่วนทดแทนตามเวลาที่กำหนดกับบริษัทที่เป็นตัวแทนจำหน่าย การทำงานจะเป็นแบบไหลต่อเนื่อง (continuous flow system) [3] ทำให้สิ้นเปลืองสารเคมี การหาสภาวะในการวิเคราะห์ เช่น อัตราการไหล ความเข้มข้นของกรดและสารเคมีต้องทำด้วยความระมัดระวังโดยผู้ชำนาญ ถ้าใช้อัตราการไหลและความเข้มข้นของกรดและสารเคมีน้อยเกินไปปฏิกิริยาจะเกิดไม่สมบูรณ์ประสิทธิภาพในการวิเคราะห์จะลดลงอย่างมาก ผลที่ได้ไม่น่าเชื่อถือ แต่ถ้าใช้มากเกินไปเล็กน้อยอาจเกิดปฏิกิริยาอย่างรุนแรง มีฟองแก๊สเกิดขึ้นอย่างมากตามด้วยการไหลล้น (over flow) ของสารละลายในหลอดที่ทำปฏิกิริยา (reactor) ไปตามท่อ นำไอสารเข้าสู่แอบซอร์บชันเซลล์ สร้างความเสียหายให้กับแอบซอร์บชันเซลล์ ในกรณีทีวิเคราะห์โลหะไฮโดรด์ เช่น สารหนูจำเป็นต้องทำให้แอบซอร์บชันเซลล์ร้อนอย่างน้อย 900°C ถ้ามีการไหลล้นของสารละลายเข้าไปในท่อแอบซอร์บชันเซลล์จะทำให้แอบซอร์บชันเซลล์ที่ทำด้วยควอร์ทแตกร้าวทันที นอกจากนั้นปัญหาที่พบในระบบไหลล้น คือ การปนเปื้อนของสารละลายตัวอย่าง และ/หรือ สารละลายมาตรฐานในท่อนำสาร มักแก้ไขโดยการสลับล้างด้วยน้ำระหว่างการวิเคราะห์สารละลาย ทั้งสารละลายตัวอย่างและสารละลายมาตรฐาน เป็นการสิ้นเปลืองเวลาและสารเคมี

มีงานวิจัยจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์หาปริมาณปรอท แต่มักเน้นวิธีการเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีที่แตกต่างกัน หรือถ้าตัวอย่างมีปริมาณปรอทต่ำจะทำการแก้ไขโดยใช้ตัวตรวจวัดที่มีความไวสูงแต่ที่เหมือนกัน คือ ยังคงใช้เครื่องโคลเวเพอร์เจเนเรเตอร์แบบไหลต่อเนื่อง เช่น หาปริมาณปรอทในดิน ตะกอนของแม่น้ำและในเนื้อปลาหุ่น่ากระป๋องวิธีย่อยสลายตัวอย่างด้วยเครื่องไมโครเวฟระบบปิด [4] แล้วนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ ส่วนการวิเคราะห์ปรอทในตัวอย่างสิ่งแวดล้อมและชีววัตถุ เช่น น้ำเสีย ปัสสาวะ น้ำเกลือ เป็นต้น โดยใช้ระบบไหลต่อเนื่องแบบ flow-injection cold vapor atomic absorption spectrometry (FI-CVAAS) เนื่องจากตัวอย่างเป็นสารละลายอยู่แล้ว จึงสามารถทำการเตรียมตัวอย่างในท่อนำทางไหลของระบบวิเคราะห์ทันทีด้วยการใช้ SnCl_2 รีดิวซ์ปรอทให้เป็นไอปรอทและใช้แก๊สไนโตรเจน

เป็นตัวพา ข้อจำกัดของงานวิจัยนี้เนื่องจากการเตรียมตัวอย่างในระบบวิเคราะห์เลย ตัวอย่างจึงต้องเป็นของเหลว [5] ในบางกรณีที่ปรอทมีปริมาณน้อยมากสามารถเพิ่มความเข้มข้นก่อนนำไปวิเคราะห์ โดยทำให้ปรอทเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนก่อนนำไปสกัดโดยใช้สารลดแรงตึงผิวช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดสามารถเพิ่มความเข้มข้นของปรอทได้มากถึง 200 เท่า จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FI-CV แต่ต่อเชื่อมกับเครื่อง inductively coupled plasma optical emission spectrometer (ICP-CES) ทำให้มีค่า LOD ที่ 4 ng/L [6] ปรอทในเม็ดเลือดแดงสามารถทำการวิเคราะห์ด้วยการย่อยสลายตัวอย่างด้วยกรด วิธีย่อยสลายด้วยกรดจัดว่าง่าย แต่ตัวอย่างเลือดจัดว่าเป็นตัวอย่างค่อนข้างยากที่จะวิเคราะห์ได้ถูกต้องและที่สำคัญมีปริมาณปรอทน้อยมาก วิธีนี้เกิดการสูญเสียปรอทในตัวอย่างจึงได้ค่าร้อยละของการคืนกลับ (% recovery) เพียงร้อยละ 89.27 [7] นอกจากนี้ยังมีการนำเทคนิค solid phase extraction (SPE) ชนิดที่มี -CN เป็น active site (CN type) มาใช้ในการเตรียมตัวอย่างที่เป็นน้ำ เช่น น้ำดื่ม น้ำจากแหล่งน้ำตามธรรมชาติ เป็นต้น น้ำตัวอย่างจะถูกป้อนเข้าสู่ระบบโดยตรงซึ่งเป็นระบบไหลแบบต่อเนื่อง (on line continuous flow) จากนั้นจึงทำการชะด้วยกรดไนตริก สารละลายซึ่งมีปรอทที่ถูกชะออกมาจะถูกพาไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค CVAAS ต่อไป ข้อดีของระบบนี้ คือ สามารถนำน้ำตัวอย่างเข้าสู่ระบบทำการวิเคราะห์ได้เลย ข้อจำกัด คือ ไม่สามารถวิเคราะห์ปรอทในตัวอย่างที่มีความซับซ้อน เช่น พวกของเหลวที่มีองค์ประกอบอื่นๆ ปะปน เช่น โปรตีน ไขมัน วิธีนี้สามารถวิเคราะห์ได้เฉพาะไอออนปรอทอิสระในตัวอย่างเท่านั้น [8] การเปลี่ยนตัวตรวจวัดเป็นเครื่องอะตอมมิคฟลูออโรมิเตอร์ [9, 10] ทำให้มีความไวในการวิเคราะห์สูงขึ้น บางวิธีมีค่า LOD ที่ 2 ng/L [11] ในกรณีที่มีปรอทมีน้อยมากมีผู้ใช้คอลัมน์ขนาดเล็กที่บรรจุ activated carbon [3] อาการ์ (agar) ที่ผสมกับ 2-mercaptobenzimidazole [12] และ Dowex Optipore V-493 [13] ทำการจับปรอทจากตัวอย่างที่เป็นน้ำและเนื้อปลาที่ผ่านการย่อยสลายด้วยกรดและความร้อน ในตัวอย่างอาหารอื่นๆ เช่น เนื้อไก่ [14] และข้าว [9] ทำการเตรียมตัวอย่างด้วยการใช้กรดและความร้อนในการเตรียมตัวอย่างเหมือนกัน จะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์หาปริมาณปรอททั้งหมดในตัวอย่างที่เป็นชีววัตถุมักใช้กรดและความร้อนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ เปลี่ยนปรอทให้มาอยู่ในรูปไอออนปรอทอิสระแล้วจึงทำการวิเคราะห์ ดังนั้น จึงมีผู้ศึกษาหาชนิดและสัดส่วนของกรดที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการย่อยสลายตัวอย่าง พบว่าส่วนผสมระหว่างกรดเกลือ 2 มิลลิลิตร กรดไนตริก 2 มิลลิลิตร กรดเปอร์คลอริก 4 มิลลิลิตร กับกรดกำมะถัน 5 มิลลิลิตร (2 mL HCl + 2 mL HNO₃: HClO₄ (1:1) + 5 mL H₂SO₄) ให้ผลดีที่สุด และพบว่าถ้าย่อยสลายที่อุณหภูมิสูงกว่า 230°C เป็นมากกว่าเวลา 30 นาที จะสูญเสียปรอทในตัวอย่าง [15] ส่วนที่เหมือนกันในงานวิจัยเหล่านี้ คือ การใช้เครื่องโคลเวเพอร์เจเนเรเตอร์ที่มีการทำงานแบบไหลต่อเนื่องเป็นเครื่องมือสำเร็จรูปจากบริษัทที่ทำการผลิต มีข้อดีที่สามารถใช้โปรแกรมประมวลผลการวิเคราะห์สามารถเลือกรูปแบบสัญญาณว่าจะใช้ความสูงของพีคหรือพื้นที่ของพีคก็ได้ มีข้อเสียที่ต้องใช้เครื่องโคลเวเพอร์เจเนเรเตอร์ที่เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชันสเปคโตรมิเตอร์ยอมนับเท่านั้น มีราคาแพงสิ้นเปลืองสารเคมี และอาจเกิดการปนเปื้อน

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น การจัดสร้างเครื่องมือผลิตไอสารอย่างง่ายที่เป็นโคลเวเพอร์เจเนเรเตอร์และเป็นไฮโดรด์เจเนเรเตอร์ นอกจากใช้ในการเรียนการสอนยังสามารถนำไปใช้โครงการวิจัยของนิสิต ทำให้นิสิตเข้าใจในเทคนิคโคลเวเพอร์เจเนเรเตอร์มากขึ้น ในอนาคตยังสามารถใช้เป็นเครื่องไฮโดรด์เจเนเรเตอร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์โลหะไฮโดรด์ชนิดอื่นต่อไป อีกทั้งเครื่องมือที่ผลิตขึ้นเองมีต้นทุนต่ำ สามารถถอดประกอบ

ได้ง่าย ทำให้หนีตเข้าใจหลักการทำงาน รู้จักองค์ประกอบและหน้าที่ส่วนประกอบของเครื่องมือแต่ละชิ้น เมื่อเกิดปัญหาหนีตจะสามารถวิเคราะห์และแก้ไขได้ ต่างจากเครื่องมือที่จัดจำหน่ายทางการค้าที่มีราคาแพง ค่าซ่อมบำรุงสูง การประกอบเครื่องมือชนิดนี้ไม่สามารถเห็นส่วนประกอบของเครื่องมือ ผู้วิเคราะห์จึงเป็นเพียงผู้ใช้เท่านั้น เมื่อเกิดปัญหาขึ้นต้องใช้บริการของตัวแทนจำหน่าย



รูปที่ 2 แสดงแผนภาพเบื้องต้นของเครื่องโคลเวเพอร์เจเนเรเตอร์ที่จะจัดสร้างขึ้น

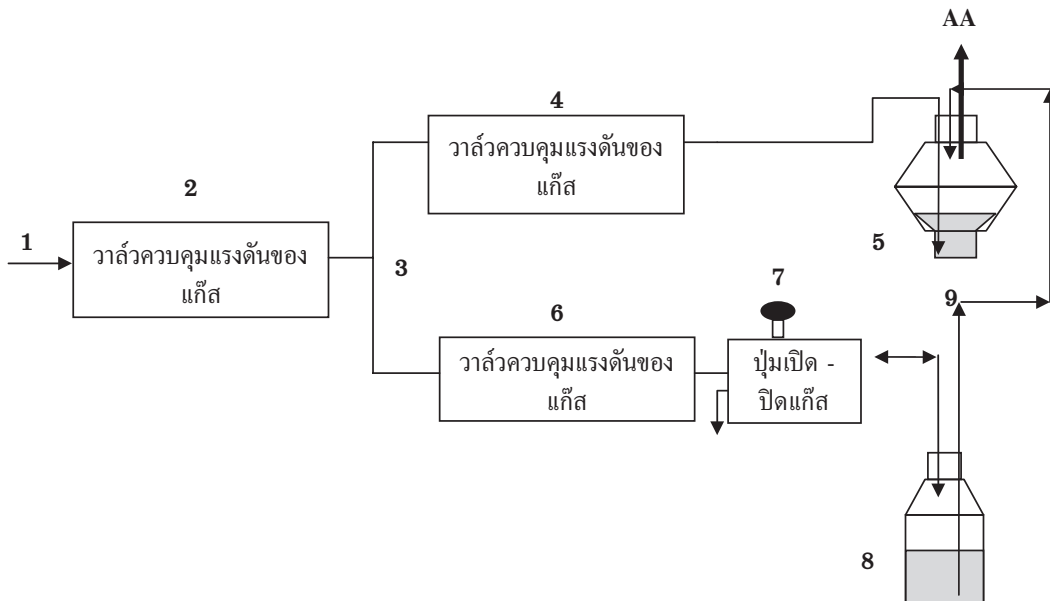
รูปที่ 2 แสดงแผนภาพของเครื่องโคลเวเพอร์เจเนเรเตอร์ต้นแบบ 1 ท่อนำแก๊สเฉื่อย 2 วาล์วควบคุมแรงดันของแก๊สอาร์กอนเพื่อปรับอัตราการไหล 3 ปุ่มเปิดปิดแก๊สให้เข้าสู่ขวดบรรจุสารละลายรีดิวซ์ 4 ท่อนำสารละลายรีดิวซ์เมื่อได้รับแรงดันจากแก๊ส 5 ท่อนำไอสารปรอทเข้าสู่แอมบอร์บั้นเซลล์ 6 แอมบอร์บั้นเซลล์ การทำงานของเครื่องจะใช้แรงดันของแก๊ส เริ่มต้นโดยนำกระบอกที่บรรจุสารละลายตัวอย่างหรือสารละลายมาตรฐาน (reaction flask) ติดตั้งเข้ากับตัวเครื่อง ในขณะนั้นจะมีแก๊สเฉื่อยจากท่อหมายเลข 2 ผุดเป็นฟองในสารละลายตัวอย่างทำหน้าที่เป็นแท่งแก้วคนและแก๊สตัวพาด้วยการปรับแรงดันของแก๊สเฉื่อยให้เหมาะสม เมื่อเปิดวาล์วแก๊สหมายเลข 3 ให้แก๊สเข้าสู่ขวดบรรจุสารละลาย รีดิวซ์ให้แรงดันของแก๊สทำให้สารละลายรีดิวซ์ในขวดไหลตามท่อหมายเลข 4 ปล่อยให้สารละลายไหลประมาณ 5-10 วินาทีเข้าไปในกระบอกที่บรรจุสารละลายตัวอย่าง สารละลายผสมจะเกิดปฏิกิริยาไอออนของปรอทจะถูกรีดิวซ์เป็นปรอท ไอปรอทที่เกิดขึ้นจะถูกแก๊สอาร์กอนพาเข้าสู่แอมบอร์บั้นเซลล์ ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสง ค่าที่ได้จะเป็นความสูงของพีคหรือพื้นที่ของพีค นำไปเทียบกับกราฟของสารมาตรฐานแทนที่กระบอกสารละลายเดิมด้วยกระบอกที่บรรจุสารละลายใหม่แล้วทำการวิเคราะห์เหมือนเดิม

เทคนิคโคลเวเพอร์จะทำให้ปรอทเป็นไอแยกออกมาจากสารตัวอย่างแล้ววัดค่าการดูดกลืนแสง ทำให้มีความจำเพาะสูง สารอื่นๆ รบกวนได้ยาก เนื่องจากใช้ความยาวคลื่นแสงที่มีความจำเพาะ ในส่วนของเครื่องต้นแบบที่ถูกจัดสร้างขึ้นมาสามารถจัดสร้างได้ง่าย สะดวกต่อการซ่อมบำรุง และที่สำคัญใช้วัสดุที่มีในประเทศจัดสร้างขึ้นมามีราคาถูกไม่ต้องสิ้นเปลืองงบประมาณในการจัดหาจากต่างประเทศ เนื่องจากเป็นเครื่องที่ควบคุมด้วยมือ หนีตสามารถใช้เครื่องในการฝึกทักษะการใช้งานทั้งในด้านการเรียนการสอนและการวิจัยได้โดยไม่ต้องกังวลว่าจะทำให้เครื่องเสียหาย และสามารถนำหลักการของเครื่องมือไปปรับใช้กับเครื่องมือที่มึการทำงานแบบไหลต่อเนื่องเมื่อต้องไปทำงาน

อุปกรณ์และวิธีทดลอง

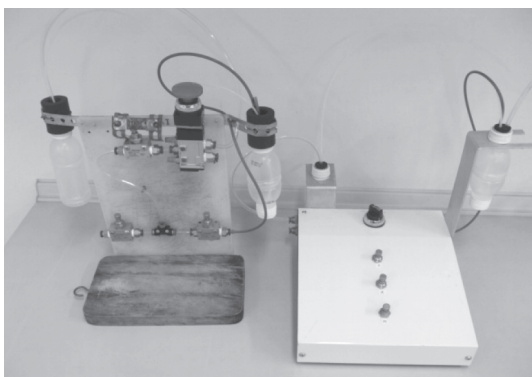
เครื่องโคลเวเพอร์เจเนเรเตอร์อย่างง่าย เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชัน (Perkin Elmer Analyst 300) ควอทซ์แอบซอร์บชันเซลล์ ขวดบรรจุสารละลายรีดิวิซ์ ขวดทำปฏิกิริยา (reaction flask) เครื่องแก้วและอุปกรณ์อื่นๆ ที่จำเป็น 1,000 mg/L Hg^{2+} for AA (Ajax), NaBH_4 (Sigma, Ajax), SnCl_2 (Fisher), NaOH (Fisher), Silicone antifoam (Ajax), H_2SO_4 (QRec), HCl (QRec), HNO_3 (Macron), KMnO_4 (Merck) สารเคมีทั้งหมดเป็น AR grade หรือเทียบเท่าสารละลายมาตรฐาน ปรอท 25, 50, 75, 100 และ 125 ng/mL ในสารละลาย 3% HNO_3 สารละลาย 2% NaBH_4 ในสารละลาย 1% NaOH สารละลาย 5% KMnO_4 แก๊สอาร์กอนและไนโตรเจน

ทำการประกอบเครื่องโคลเวเพอร์เจเนเรเตอร์อย่างง่ายตามแผนภาพ ซึ่งทำงานโดยใช้แรงดันของแก๊ส



รูปที่ 3 แสดงแผนภาพของเครื่องโคลเวเพอร์เจเนเรเตอร์ที่จัดสร้างขึ้นใช้งานจริง

ตามรูปที่ 3 มีการเพิ่มส่วนที่แตกต่างจากแผนภาพตามรูปที่ 2 ดังนี้ เพิ่มวาล์วควบคุมแรงดันจากถังแก๊ส 2 ตัว หมายเลข 2 และ 4 ทำให้สามารถปรับอัตราการไหลของแก๊สของวาล์วหมายเลข 4 และ 6 ได้ง่ายขึ้น ปุ่มเปิด-ปิดแก๊ส (7) เป็นวาล์วหลายทาง เมื่อเปิดแก๊สไหลผ่านไปยังขวดบรรจุสารละลายรีดิวิซ์ (8) สารละลายจะไหลไปตามท่อ (9) ลงสู่ขวดทำปฏิกิริยา (5) ที่มีสารมาตรฐานหรือสารละลายตัวอย่างไอปรอทที่เกิดขึ้นจะถูกพาไปวัดค่าการดูดกลืนแสง จากนั้นปิดปุ่มเปิด-ปิดแก๊ส ความดันที่ตกค้างภายในขวดบรรจุสารละลายรีดิวิซ์จะถูกระบายออกทางปุ่มเปิด-ปิดแก๊สซึ่งเป็นวาล์วหลายช่องทาง ป้องกันความดันตกค้าง ซึ่งจะทำให้สารละลายรีดิวิซ์ไหลไม่หยุด



A

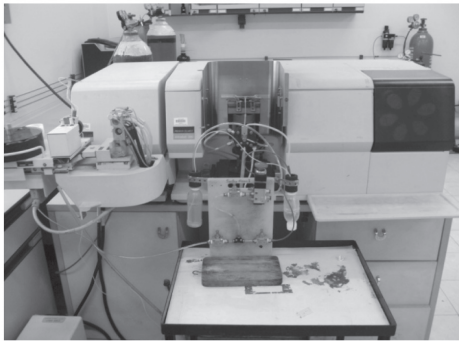


B

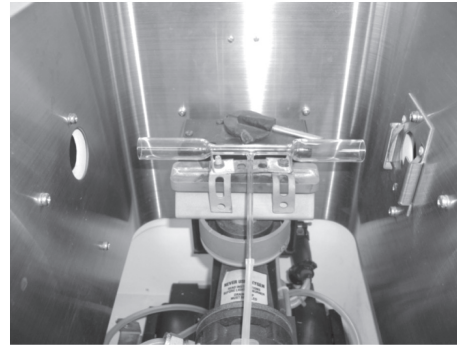
รูปที่ 4 A แสดงโคลเวเพอร์เจเนเรเตอร์อย่างง่าย 2 เครื่อง เป็นเครื่องต้นแบบและเครื่องที่จัดส่วนประกอบลงกล่องควบคุม

B ขวดบรรจุสารละลายรีดิวิซ์ และขวดทำปฏิกิริยา

นำเครื่องโคลเวเพอร์ไปประกอบเข้ากับเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชันใช้หลอดกำเนิดแสงของธาตุปรอท (mercury HCl) ตรวจวัดที่ความยาวคลื่น 253.7 นาโนเมตร เนื่องจากไม่สามารถใช้โปรแกรมของเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชันได้ จำเป็นต้องวัดโดยการสังเกตสัญญาณค่าการดูดกลืนแสงที่แสดงออกมาในรูปของพีค (peak) ทางจอภาพ (monitor) แบบ real time แล้วบันทึกค่าสูงที่สุดของพีค (peak height) ที่เครื่องแสดงออกมาพร้อมกันในรูปของตัวเลข



A



B

- รูปที่ 5** A แสดงเครื่องโคลเวเพอร์ไปประกอบเข้ากับเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชัน
B แสดงแอบซอร์บชันเซลล์ที่วางในตำแหน่งที่ไอปรอทจะถูกวิเคราะห์ค่าดูกลืนแสง

นำสารละลาย 2% NaBH_4 ในสารละลาย 1% NaOH ใส่ลงในขวดบรรจุสารละลายรีดิวิซ์ นำขวดที่บรรจุสารละลายแล้วไปประกอบกับเครื่องโคลเวเพอร์ ส่วนขวดทำปฏิกิริยาแต่ละขวดใส่สารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ หรือของเหลวตัวอย่าง 1 mL เติม 1.5% HNO_3 ลงไปอีก 10 mL หยดสารละลาย 5% KMnO_4 ลงไป 3 หยด เติมซิลิโคนสำหรับต้านการเกิดฟองลงไป 1 หยด นำไปประกอบกับเครื่องโคลเวเพอร์ เปิดปั๊มเปิด-ปิดแก๊สให้สารละลาย NaBH_4 ไหลไปลงขวดทำปฏิกิริยา ไอปรอทจะถูกพาไปวัดที่แอบซอร์บชันเซลล์บันทึกสัญญาณที่มากที่สุด ปิดปั๊มเปิด-ปิดแก๊ส นำสารละลายขวดใหม่มาแทนที่แล้วทำการวิเคราะห์ต่อไป

ผลการทดลอง

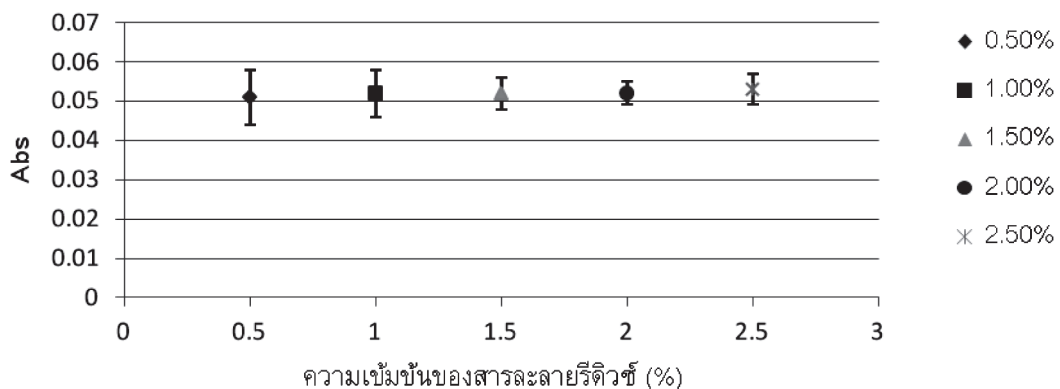
ทำการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกับการทดลองโดยใช้สภาวะดังนี้ ปริมาณของปรอทที่ 50 ng สารละลายรีดิวิซ์ 2% NaBH_4 สารละลายกรดใช้ 1.5% HNO_3 อัตราการไหลของแก๊สตัวพา 600 mL/min จากนั้นทำการเปรียบเทียบสัญญาณการตรวจวิเคราะห์แต่ละตัวแปรทำการวิเคราะห์ 5 ซ้ำ

ผลของรูปร่างขวดทำปฏิกิริยา

จากการศึกษาเบื้องต้นในการเลือกใช้ผลของรูปร่างของขวดทำปฏิกิริยาโดยการสังเกตจากค่าการดูดกลืนแสงพบว่าขวดที่มีก้นทรงกรวยจะให้สัญญาณค่าการดูดกลืนแสงสูงกว่าขวดทรงกระบอกก้นแบน ร้อยละ 30-40 เพราะสารละลายรีดิวิซ์ที่ออกจากท่อนำสารที่ก้นขวดทรงกรวยจะผสมกับสารละลายตัวอย่างได้ดี พร้อมกันนั้นฟองอากาศจากท่อนำแก๊สทำหน้าที่กวนสารละลาย ปฏิกิริยาจึงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ไอของปรอทจึงถูกผลิตขึ้นมาพร้อมกัน ส่งผลทำให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงมากกว่าขวดก้นแบน อีกทั้งยังมีความแม่นยำมากกว่า เนื่องจากขวดก้นแบนมีพื้นที่ก้นขวดมากกว่า ตอนเริ่มแรกสารละลายในขวดจึงเกิดปฏิกิริยาเฉพาะตำแหน่งที่ปลายท่อนำสารละลายรีดิวิซ์แล้วค่อยแพร่ออกไปรอบข้าง ประกอบกับเมื่อพื้นที่มากขึ้น ความสูงของสารละลายลดลง ฟองอากาศจึงทำหน้าที่ในการกวนสารละลายได้อย่างจำกัด ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ช้ากว่าและไม่สม่ำเสมอ สัญญาณการตรวจวิเคราะห์จึงมีค่าต่ำกว่าและมีความแปรปรวนมาก

ผลของสารละลายรีดิวซ์

จากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เมื่อใช้สารละลายรีดิวซ์ต่างกันระหว่าง NaBH_4 และ SnCl_2 เมื่อมีปริมาณเท่ากันพบว่า NaBH_4 ให้สัญญาณการตรวจวิเคราะห์สูงกว่า เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่าง NaBH_4 กับกรดเกิดฟองแก๊สไฮโดรเจน ฟองแก๊สนี้จะนำพาไอปรอทออกมาจากสารละลายได้เร็วขึ้น และก่อนที่จะทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaBH_4 ได้ทำการวิเคราะห์เพื่อหาช่วงที่เหมาะสมในการศึกษาพบว่าในช่วงที่สารละลาย NaBH_4 มีความเข้มข้นน้อยกว่า 0.5% สัญญาณการตรวจวิเคราะห์ที่แสดงเป็นรูปพีคทางจอกภาพมีคุณภาพต่ำ คือ มีฐานพีคกว้างและมีความสูงน้อยไม่สมควรนำมาศึกษา ส่วนสารละลาย NaBH_4 ที่มีความเข้มข้นมากกว่า 2.5% จะเกิดปฏิกิริยาอย่างรุนแรงในขวดทำปฏิกิริยาทำให้เกิดฟองแก๊สในสารละลายเป็นจำนวนมาก เมื่อฟองแก๊สแตกออกสารละลายหยดเล็กๆ จะกระจายออกมาแล้วถูกแก๊สตัวพาไปสู่ท่อนำแก๊ส จากนั้นจะเข้าสู่แอมบอร์รับชั้นเซลล์ต่อไป สารละลายนี้จะสร้างความเสียหายให้กับแอมบอร์รับชั้นเซลล์ ดังนั้น จึงทำการศึกษาผลของสารละลาย NaBH_4 ในช่วงความเข้มข้น 0.5%- 2.5% พบว่าเมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของ NaBH_4 ค่าสัญญาณการตรวจวิเคราะห์ไม่ต่างกันตามรูปที่ 6 เนื่องจากขณะทำการวิเคราะห์ต้องปล่อยให้สารละลายรีดิวซ์ไหลเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารละลายปรอทพร้อมกับการสังเกตภาพของพีคที่ปรากฏทางจอกภาพ เมื่อความสูงของพีคเริ่มลดลงจึงยุติการไหลของสารละลายรีดิวซ์ทำการบันทึกค่าการดูดกลืนแสงที่แสดงเป็นตัวเลขทางจอกภาพ เทคนิคการวิเคราะห์นี้จึงต้องใช้สารละลายรีดิวซ์มากเกินไป ดังนั้น ถึงจะใช้สารละลายรีดิวซ์ที่มีความเข้มข้นต่างกัน แต่สารรีดิวซ์ที่ใช้งานได้สัญญาณมีค่าสูงที่สุดจึงมีปริมาณไม่ต่างกันมาก เมื่อพิจารณาถึงความแม่นยำจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ จึงเลือกใช้ 2% NaBH_4

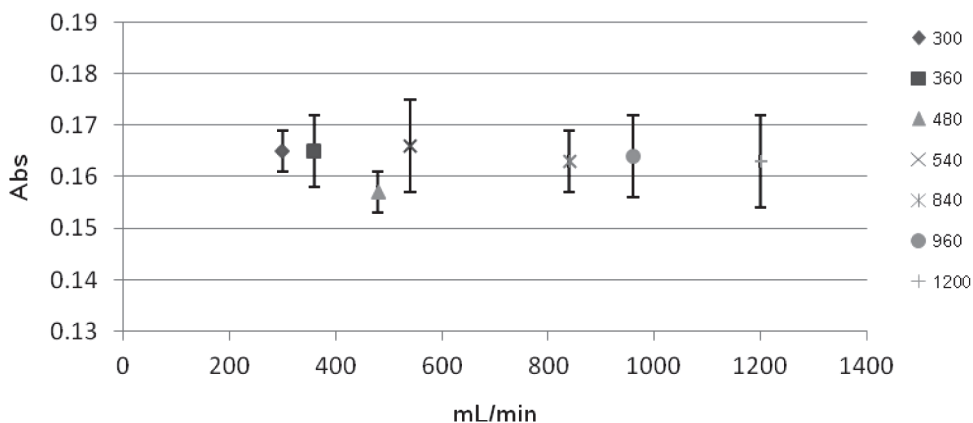


รูปที่ 6 แสดงค่าการดูดกลืนแสง (mean ± SD) เนื่องจากผลของความเข้มข้นของสารละลาย NaBH_4

จากนั้นทำการปรับอัตราการไหลของสารละลาย 2% NaBH_4 ระหว่าง 30-60 mL/min ทำการเปิดปล่อยสารละลาย 2% NaBH_4 ที่อัตราการไหลต่างๆ เข้าทำปฏิกิริยากับสารละลายปรอท แล้วสังเกตความสูงของพีคตามภาพสัญญาณที่ปรากฏทางจอภาพ ช่วงที่ปล่อยสารละลายรีดิวซ์ไหลอยู่ประมาณ 5-10 วินาที ผลที่ได้ไม่แตกต่างกัน เนื่องจากผู้วิเคราะห์ต้องเปิดปล่อยสารละลาย 2% NaBH_4 ให้มากเกินไปในแต่ละอัตราการไหล จะยุติการไหลของสารละลาย NaBH_4 เมื่อสัญญาณที่เป็นพีคเริ่มลดตัวลง จึงทำให้ปริมาณของ NaBH_4 ที่เข้าทำปฏิกิริยาไม่ต่างกันมาก ซึ่งโดยทั่วไปวิธีการตรวจวิเคราะห์หาปรอทโดยเทคนิคโคลเวเพอร์จะใช้ NaBH_4 ให้มากเกินไป เพื่อให้ปรอทในสารละลายแยกตัวออกมาให้หมด เพื่อเพิ่มความไวของการตรวจวิเคราะห์และเพื่อความปลอดภัยของผู้ทำการวิเคราะห์จากสารปรอทที่ตกค้างอยู่ในสารละลายที่ถูกวิเคราะห์แล้วกลายเป็นไอปรอท เมื่อพิจารณาถึงราคาการวิเคราะห์ต่อหน่วยการตรวจวัดจึงเลือก และเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ จึงเลือกอัตราการไหลที่ 30 mL/min

ผลของชนิดของแก๊สตัวพาและอัตราการไหลของแก๊สตัวพา

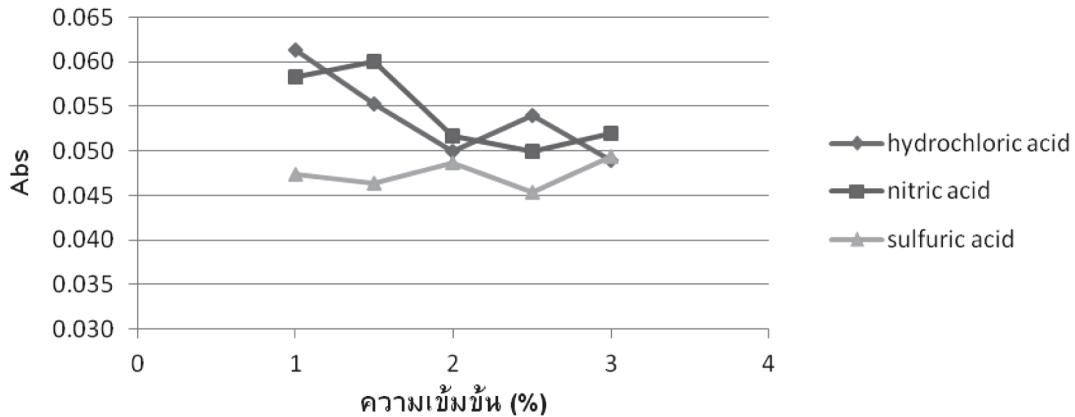
เมื่อเปรียบเทียบสัญญาณการตรวจวิเคราะห์ทั้งความไวและความแม่นยำของแก๊สตัวพาไนโตรเจนและอาร์กอนพบว่าไม่แตกต่างกัน จึงเลือกใช้แก๊สไนโตรเจนเนื่องจากมีราคาถูกกว่า จากนั้นทำการปรับอัตราการไหลของแก๊สตัวพาไนโตรเจนระหว่าง 300-1200 mL/min ได้รูปที่ 7 เดิมคาดว่าเมื่ออัตราการไหลของแก๊สต่ำ สัญญาณการตรวจวิเคราะห์ควรจะสูง และเมื่ออัตราการไหลของแก๊สสูง สัญญาณการตรวจวิเคราะห์ควรจะน้อย เพราะไอปรอทถูกเจือจาง เมื่อทำการปรับอัตราการไหลต่ำกว่า 300 mL/min สัญญาณการตรวจวิเคราะห์สูงขึ้นแต่ไม่มาก ใช้เวลานานเพื่อรอสัญญาณ กลับทำให้สิ้นเปลืองสารละลายรีดิวซ์ไม่คุ้มทุน จึงเริ่มต้นที่ 300 mL/min เมื่ออัตราการไหลของแก๊สสูงขึ้น ค่าสัญญาณกลับไม่ต่างกันมากนัก คาดว่าเกิดจากปริมาณของ NaBH_4 ที่มากเกินไป จึงเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว เกิดแก๊สไฮโดรเจนจำนวนมาก ไอปรอทถูกพาเข้าสู่แอมบอร์บชันเซลล์อย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงเลือกใช้ที่ 300 mL/min ซึ่งประหยัดแก๊สมากกว่า



รูปที่ 7 แสดงค่าการดูดกลืนแสง (mean \pm SD) เนื่องจากผลของอัตราการไหลของแก๊สตัวพาไนโตรเจนเมื่อปรอทมีปริมาณ 150 ng/mL

ผลของชนิดกรดและความเข้มข้น

ทำการศึกษาผลของชนิดกรด HCl, HNO₃ และ H₂SO₄ และความเข้มข้นที่มีผลต่อสัญญาณการตรวจวิเคราะห์ในช่วง 1-3% ซึ่งกรด HCl และ HNO₃ จะถูกเลือกใช้ในการหาปริมาณปรอทมากกว่า [3-16] ได้ผลดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แสดงผลของชนิดและความเข้มข้นกรด 1%-3%

จากผลที่ได้ตามรูปที่ 8 จึงเลือกใช้กรด HNO₃ ที่ความเข้มข้น 1.5% แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าเมื่อความเข้มข้นของกรดสูงสัญญาณการตรวจวิเคราะห์ลดลง คาดว่าน่าจะเกิดจากกรดที่เข้มข้นสูงขึ้นทำปฏิกิริยากับสารละลายรีดิวซ์ได้ดีขึ้น ให้แก๊สไฮโดรเจนมากขึ้น ไอของปรอทจึงถูกเจือจางลง

ประสิทธิภาพของเครื่องมือและการนำไปประยุกต์ใช้

เมื่อได้สถานะที่เหมาะสมแล้ว จึงนำไปหาช่วงการตอบสนองของสัญญาณต่อความเข้มข้นในช่วง 25-150 ng/mL จำนวน 7 ครั้ง (n=7) แต่แต่ละครั้งทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ (triplicate) พบว่าที่ความเข้มข้น 150 ng/mL เริ่มไม่อยู่ในช่วงที่เป็นเส้นตรง จึงเลือกใช้ช่วงที่เป็นเส้นตรง ซึ่งอยู่ในช่วง 25-125 ng/mL มีค่าสมการ $Y = 0.0011X + 0.0014$, $r^2 = 0.998$ มีค่า LOD ที่ 2.4 ng/mL (S/N = 3) ที่ค่า LOD ค่อนข้างสูง เนื่องจากที่ความเข้มข้นต่ำ มีสัญญาณรบกวนค่อนข้างมาก จากนั้นจึงนำไปตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อศึกษาร้อยละของการคืนกลับของตัวอย่างแต่ละชนิด ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์เป็นของเหลวที่ไม่ได้ผ่านวิธีการเตรียมตัวอย่าง แต่ละตัวอย่างทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

ตารางที่ 1 แสดงผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณปรอทในตัวอย่าง 7 ชนิด พร้อมแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และร้อยละของการคืนกลับ (% recovery)

ชนิดของตัวอย่าง	ตัวอย่างที่ไม่เติมปรอท	เติมปรอท 50 ng/mL (1 mL)		เติมปรอท 100 ng/mL (1 mL)	
		ค่าเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ร้อยละของการคืนกลับ	ค่าเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ร้อยละของการคืนกลับ
น้ำประปา	ตรวจไม่พบ	51.8 \pm 1.9	103.5	94.2 \pm 4.5	94.2
น้ำปลาผสม	ตรวจไม่พบ	51.5 \pm 2.3	103.0	103.3 \pm 3.1	103.3
ซีอิ๊วขาว	ตรวจไม่พบ	43.5 \pm 4.2	87.1	81.2 \pm 5.7	81.2
ชาเขียวพร้อมดื่ม	ตรวจไม่พบ	37.4 \pm 2.4	74.7	78.7 \pm 2.6	78.7
น้ำดื่มบรรจุขวด	ตรวจไม่พบ	50.6 \pm 2.1	101.1	99.9 \pm 2.5	99.9
น้ำเก๊กฮวยพร้อมดื่ม	ตรวจไม่พบ	44.1 \pm 2.3	88.3	92.8 \pm 3.1	92.8
น้ำกระเจียบพร้อมดื่ม	ตรวจไม่พบ	45.7 \pm 3.3	91.3	87.3 \pm 5.1	87.3

ในตัวอย่างน้ำประปาและน้ำดื่มมีค่าร้อยละของการคืนกลับเข้าใกล้ 100 ในขณะที่ซีอิ๊วขาว ชาเขียวพร้อมดื่ม และน้ำเก๊กฮวยพร้อมดื่ม มีค่าร้อยละของการคืนกลับอยู่ที่ประมาณ 80-90 น้อยกว่าตามที่คาด เนื่องจากมีสารรบกวนอาจจะหน่วงเวลาการเป็นไอปรอทของไอออนปรอท การเตรียมตัวอย่างด้วยการย่อยสลายตัวอย่างด้วยกรด จะเป็นการกำจัดสารอินทรีย์ที่รบกวน ซึ่งจะช่วยเพิ่มค่าร้อยละของการคืนกลับให้สูงขึ้น ส่วนน้ำปลาผสมมีค่าร้อยละของการคืนกลับสูง คาดว่าน่าจะเป็นน้ำเกลือปรุงแต่งกลิ่นรสปริมาณสารอินทรีย์มีน้อยมาก จึงไม่มีการรบกวน

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการหาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพของเครื่องพบว่า รูปร่างของขวดทำปฏิกิริยาที่ดีควรมีก้นขวดเป็นรูปทรงกรวย ทำให้ฟองแก๊สตัวพาที่ปล่อยออกจากปลายท่อที่ก้นขวดช่วยผสมสารละลายให้เข้าทำปฏิกิริยากันได้เร็วขึ้น สารรีดิวซ์ NaBH_4 ให้ผลที่ดีกว่า SnCl_2 ไม่จำเป็นต้องใช้แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สตัวพา สามารถใช้แก๊สไนโตรเจนซึ่งมีราคาถูกกว่าได้ ซึ่งเคยมีผู้นำมาใช้ในการวิเคราะห์ปรอทตัวอย่างสิ่งแวดล้อมและชีววัตถุ [5] มาแล้ว เมื่อใช้ 2% NaBH_4 โดยใช้อัตราการไหลของแก๊สเป็น 300 mL/min เป็นจุดที่ประหยัดสารเคมีมากที่สุด กรด 1.5% HNO_3 เป็นสารที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดโดยไม่ต้องกังวลว่าไอออนของปรอทจะตกตะกอน ช่วงการตอบสนองของสัญญาณการตรวจวิเคราะห์ต่อความเข้มข้นเป็นเส้นตรงอยู่ที่ 25-125 ng/mL ซึ่งโดยทั่วไปเครื่องโคลเลกเซอร์ที่มีจำหน่ายสามารถใช้งานในช่วงประมาณ 5-30 ng/mL เคยมีการตรวจปรอทในแก๊สโซลีนใช้สารมาตรฐานปรอทที่ 0.6-3 ng [16] แต่ต้องใช้ทองคำในการจับไอปรอทสะสมให้เข้มข้นแล้วจึงใช้ความร้อนขับปรอทออกไปวัดที่แอมป์ซอร์บชันเซลล์พร้อมกัน ผลจากการนำไปทดสอบการวิเคราะห์ตัวอย่างโดยไม่มีการเตรียมตัวอย่างเฉพาะ ตัวอย่างที่ไม่มีองค์ประกอบที่รบกวน เช่น

น้ำดื่ม น้ำประปา มีค่าร้อยละของการคืนกลับเข้าใกล้ร้อย ตัวอย่างทั่วไปที่มีองค์ประกอบซับซ้อนจำเป็นต้องผ่านการเตรียมตัวอย่างก่อนนำไปวิเคราะห์ทั้งสิ้น จากสถานะที่เหมาะสมที่ได้เป็นสถานะสำหรับตัวเครื่องต้นแบบเครื่องนี้เท่านั้น ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดของท่อ นำแก๊ส รวมทั้งความยาวของท่อ รูปร่างของขวดที่ทำปฏิกิริยารวมถึงการจัดวางตำแหน่งของแอบซอร์บชันเซลล์ เป็นต้น จะเห็นได้ว่า จากข้อมูลเบื้องต้น เครื่องที่จัดสร้างมานี้มีความไวต่อปริมาณปรอทน้อยกว่าเครื่องที่จัดซื้อมา สาเหตุประการหนึ่งน่าจะมาจากตัวเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชันของ Perkin Elmer ตรวจสอบไม่พบอุปกรณ์เสริมที่เป็นเครื่องไฮโดรด์เจเนเรเตอร์ รุ่น FIAS จึงไม่อนุญาตให้ใช้โปรแกรม ผู้วิเคราะห์จึงต้องใช้สายตาอ่านค่าสูงสุด (ความสูงของพีค) ไม่สามารถใช้โปรแกรมบันทึกข้อมูลทั้งความสูงของพีคและพื้นที่พีค จากสถานะที่เหมาะสมที่ได้จะเห็นว่า การปรับค่าใดค่าหนึ่ง เช่น ค่าอัตราการไหลของแก๊สตัวพาร้อยละของ NaBH_4 รวมทั้งอัตราการไหล เป็นต้น จะเห็นว่ามีความแตกต่างน้อย เนื่องจากถูกสารที่เข้าทำปฏิกิริยารวมทั้งแก๊สตัวพามีมากเกินไป ต่างกับระบบที่ไหลแบบต่อเนื่อง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสถานะการทดลองจะมีผลกับสัญญาณการตรวจวิเคราะห์อย่างมาก แต่จากข้อมูลที่ได้นี้จะเห็นเป็นแนวทางในการวิจัยเพื่อปรับปรุงเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องต่อไป เช่น ขนาดของท่อ นำไอปรอทออกจากขวดทำปฏิกิริยา ต้องมีการศึกษาหาขนาดที่เหมาะสม ซึ่งควรมีขนาดกว้างกว่าเดิม ความยาวของท่อ นำไอปรอท ตลอดจนถึงออกแบบที่ตรงแอบซอร์บชันเซลล์เดิมเคเวงบนตัวจับยึดที่วางบนหัวเตา (burner) ของเครื่อง AA จำเป็นต้องมีการปรับตำแหน่งทุกครั้ง แต่ครั้งปรับได้ไม่เท่าเดิม และตัวจับยึดมีการบังแสงที่ใช้ในการวิเคราะห์ปรอทบางส่วน ดังนั้น ที่ตรงแอบซอร์บชันเซลล์แบบใหม่ต้องเป็นอิสระไม่จำเป็นต้องวางบนหัวเตา จัดตำแหน่งแอบซอร์บชันเซลล์ง่าย และได้ตำแหน่งเดิมทุกครั้ง วัสดุที่ใช้ควรจะมีการบังแสงน้อยที่สุด

ประสิทธิภาพของเครื่องโคลเวเพอร์ที่จัดสร้างขึ้นมา แสดงให้เห็นว่าสามารถตรวจหาปริมาณปรอทได้ในระดับส่วนในพันล้านส่วน (ppb) ปริมาณของปรอทที่น้อยขนาดนี้ไม่สามารถหาได้โดยใช้เทคนิคเฟลมอะตอมมิคแอบซอร์บชัน (FAAS) นอกจากนั้น ตัวเครื่องจัดสร้างจากวัสดุภายในประเทศ จัดสร้างและซ่อมบำรุงง่าย มีชิ้นส่วนทดแทนตลอดเวลา ทำการปรับเปลี่ยนตามวัสดุที่มีได้ง่าย และที่สำคัญมีราคาไม่แพง ตัวเครื่องมีคุณภาพเพียงพอสามารถนำไปใช้ประกอบในการเรียนการสอน ทำให้นิสิตมีความเข้าใจหลักการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโคลเวเพอร์ได้ดีขึ้น และเพิ่มโอกาสในการสมัครเข้าทำงานหลังจบการศึกษา

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่สนับสนุนทุนการวิจัย ขอบคุณภาควิชาเคมี ที่สนับสนุนเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชัน อุปกรณ์อื่นๆ และเครื่องแก้วที่จำเป็น อาจารย์เกรียงศักดิ์ ส่งศรีโรจน์ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ต่างๆ และนิสิตทั้งหลายที่ช่วยเหลืองานวิจัยนี้ทั้งทางตรงและทางอ้อมจนงานนี้สำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

1. จิราภรณ์ อ่ำพันธ์. 2543. อันตรายจากปรอท: หนังสือความรู้สิ่งเป็นพิษ ตอนที่ 14. นนทบุรี. กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข. หน้า 9-13.
2. แม้น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. 2534. อะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโตรสโคปี: หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. กรุงเทพฯ. ชวนพิมพ์. หน้า 322-379.
3. Ferrúa, N., Cerutti, S., Salonia, J. A., Olsima, R. A., and Martinez, L. D. 2007. On-Line Preconcentration and Determination of Mercury in Miological and Environmental Samples by Cold Vapor-Atomic Absorption Spectrometry. *Journal of Hazardous Materials* 141: 693-699.
4. Murphy, J., Jones, P., and Hill, S. J. 1996. Determination of Total Mercury in Environmental and Biological Samples by Flow Injection Cold Vapour Atomic Absorption Spectrometry. *Spectrochimica Acta Part B* 51: 1867-1873.
5. Ríeo-Segade, S., and Bendicho, C. 1999. Determination of Total and Inorganic Mercury in Biological and Environmental Samples with On-Line Oxidation Coupled to Flow Injection-Cold Vapor Atomic Absorption Spectrometry. *Spectrochimica Acta Part B* 54: 1129-1139.
6. Wuilloud, J. C. A., Wuilloud, R. G., Silva, M. F., Olsina, R. A., and Martinez, L. D. 2002. Sensitive Determination of Mercury in Tap Water by Cloud Point Extraction Pre-Concentration and Flow Injection-Cold Vapor Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry. *Spectrochimica Acta Part B* 57: 365-374.
7. Ertas, O. S., and Tezel, H. 2004. A Validated Cold Vapour-AAS Method for Determining Mercury in Human Red Blood Cells. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis* 36: 893-897.
8. Duan, T., Song, X., Gou, P., Chen, H., and Li, H. 2006. Determination of Hg(II) in Water by On-Line Preconcentration Using Cyanex 923 as a Sorbent-Cold Vapor Atomic Absorption Spectrometry. *Spectrochimica Acta Part B* 61: 1069-1073.
9. Silva, M. J., Paim, A. P. S., Pimentel, M. F., Cervera, M. L., and Guardia, M. 2010. Determination of Mercury in Rice by Cold Vapor Atomic Fluorescence Spectrometry after Microwave-Assisted Digestion. *Analytica Chimica Acta* 667: 43-48.
10. Wu, L., Long, Z., Zhou, Q., Lee, Y., and Zheng, C. 2012. Microwave-Enhanced Cold Vapor Generation for Speciation Analysis of Mercury by Atomic Fluorescence Spectrometry. *Talanta* 94: 146-151.
11. Serra, A. M., Estela, J. M., and Cerdá, V. 2008. MSFIA System for Mercury Determination by Cold Vapour Technique with Atomic Fluorescence Detection. *Talanta* 77: 556-560.

12. Pourreza, N., and Ghanemi, K. 2009. Determination of Mercury in Water and Fish Samples by Cold Vapor Atomic Absorption Spectrometry after Solid Phase Extraction on Agar Modified with 2-Mercaptobenzimidazole. *Journal of Hazardous Materials* 161: 982-987.
13. Tuzen, M., Karaman, I., Citak, D., and Soylak, M. 2009. Mercury (II) and Methyl Mercury Determinations in Water and Fish Samples by Using Solid Phase Extraction and Cold Vapour Atomic Absorption Spectrometry Combination. *Food and Chemical Toxicology* 47: 1648-1652.
14. Shah, A. Q., Kazi, T. G., Baig, J. A., Afridi, H. I., Kandhro, G. A., Arain, M. B., Kolachi, N. F., and Wadhwa, S. K. 2010. Total Mercury Determination in Different Tissues of Broiler Chicken by Using Cloud Point Extraction and Cold Vapor Atomic Absorption Spectrometry. *Food and Chemical Toxicology* 48: 65-69.
15. Voegborlo, R. B., and Adimado, A. A. 2010. A Simple Classical Wet Digestion Technique for the Determination of Total Mercury in Fish Tissue by Cold-Vapor Atomic Absorption Spectrometry in a Low Technology Environment. *Food Chemistry* 123: 936-940.
16. Torres, D. P., Dittert, I. M., Höhn, H., Frescura, V. L. A., and Curtius, A. 2010. Determination of Mercury in Gasoline Dilute in Ethanol by GF AAS after Vapor Generation, Pre-Concentration in Gold Column and Trapping on Graphite Tube. *Microchemical Journal* 96: 32-36.

ได้รับบทความวันที่ 5 มิถุนายน 2555
ยอมรับตีพิมพ์วันที่ 4 ตุลาคม 2555