

วิธีการตรวจวิเคราะห์โลหะหนักแคดเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำอย่างง่าย โดยเทคนิคสเปกโทรโฟโตเมตรี

คณิศร์วี เตชะเอื้อย¹ ชนัตถ์ โชคเจริญรัตน์² อรรถพล อ่างแก้ว²

วุฒินันท์ รักษาจิตร¹ สมัคร สุจิริต¹ ชนกานต์ สกกุลแก้ว³

ธริสรา จิรเสถียรพร⁴ กิตติพงศ์ ภูมิพิน¹ และชัยณรงค์ สกกุลแก้ว^{1*}

¹ภาควิชาเทคนิคการสัตวแพทย์ คณะเทคนิคการสัตวแพทย์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900;

²ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900;

³ภาควิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ นครสวรรค์ 60000;

⁴ภาควิชาพลศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

*E-mail: cvtcns@ku.ac.th

รับบทความ: 19 พฤศจิกายน 2563 แก้ไขบทความ: 10 มีนาคม 2564 ยอมรับตีพิมพ์: 30 เมษายน 2564

บทคัดย่อ

แคดเมียมที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมส่งผลกระทบต่อด้านความเป็นพิษต่อมนุษย์และระบบนิเวศ โดยวิธีการตรวจวิเคราะห์แคดเมียมแบบดั้งเดิมจำเป็นต้องมีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างที่ซับซ้อนรวมถึงมีราคาค่าตรวจวิเคราะห์สูง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการตรวจวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมอย่างง่ายโดยใช้การตรวจวัดด้วยเทคนิคสเปกโทรโฟโตเมตรี ทดสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์กับวิธีมาตรฐานด้วยเครื่องเฟลมอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ หาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ในการเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบเชิงซ้อนแคดเมียมและไดโคโนนโดยศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ เช่น ชนิดของตัวทำละลายอินทรีย์ ค่าพีเอช ชนิดของสารกำบัง ผลการรบกวนเนื่องจากไอออนอื่น ๆ ในสารละลาย และผลของสารลดแรงตึงผิว ผลการทดสอบพบว่าสารอินทรีย์ทุกชนิดที่ใช้ในการทดสอบแคดเมียมให้ผลการทดสอบเป็นผลบวกที่ pH 13 โดยเลือกใช้เอทานอลสำหรับวิธีการวิเคราะห์นี้เนื่องจากมีความเป็นพิษที่น้อยกว่าตัวทำละลายอินทรีย์อื่นที่ใช้ในการทดสอบ โดยมีค่าขีดจำกัดการตรวจวัดของวิธีที่พัฒนาขึ้นเท่ากับ 0.22 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดสอบประสิทธิภาพของสารบดบังพบว่าโซเดียมไทโอซัลเฟตมีความเสถียรของปฏิกิริยาและบดบังไอออนอื่น ๆ ในการทดสอบดีที่สุดและสารลดแรงตึงผิวเดซิเพท 160ซี ช่วยเพิ่มความไวในการวิเคราะห์ขึ้นร้อยละ 30 และเมื่อนำวิธีการที่พัฒนาขึ้นไปทดสอบวิเคราะห์แคดเมียมในน้ำตัวอย่างจริงพบว่าร้อยละการกลับคืนอยู่ในช่วง 81–99 จากผลการเปรียบเทียบทางสถิติ (F -test) พบว่าวิธีที่พัฒนาขึ้นและวิธีมาตรฐานไม่มีความแตกต่างกัน ($p > 0.05$) วิธีที่พัฒนาขึ้นใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่

เร็วกว่า โดยสรุปวิธีการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำตัวอย่างจริงได้

คำสำคัญ: แคดเมียม เฟลลอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ สเปกโทรโฟโตเมตรี สารประกอบเชิงซ้อนแคดเมียม-ไดไทโชน

Simple Method for Determination of Cadmium Contaminated in Water by Spectrophotometry

Kanidrawee Techauay¹, Chanat Chokejaroenrat², Athaphon Angkaew²,
Wuttinun Raksajit¹, Samak Sutjarit¹, Chanakarn Sakulthaew³,
Tharisara Chirasatienporn⁴, Kitipong Poomipuen¹ and Chainarong Sakulthaew^{1*}

¹Department of Veterinary Technology, Faculty of Veterinary Technology, Kasetsart University, Bangkok 10900 Thailand; ²Department of Environmental Technology and Management, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok 10900 Thailand; ³Department of Applied Science Faculty of Science and Technology, Nakhon Sawan Rajabhat University, Nakhon Sawan 60000, Thailand;

⁴Department of Physical Education, Faculty of Education, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*E-mail: cvtcns@ku.ac.th

Received: 19 November 2020 Revised: 10 March 2021 Accepted: 30 April 2021

Abstract

Cadmium is highly persistent in the environment and can cause negative effects to human and ecosystem. Conventional methods for cadmium detection require several complicated steps and, sometimes, involve high analytical costs. The objective of this research was to develop cadmium analysis method that was easy to handle and implement to use with spectrophotometry technique. Data verification was also made with flame atomic absorption spectrophotometer (FAAS). We evaluated the optimum condition that was most suitable to initiate the formation of cadmium–dithizone complex. The tested variable effects included types of organic solvent, optimum pH, and types of masking agent, interference with other constituent ions and surfactants. All tested organic solvents revealed positive results at alkaline condition (pH 13). Although chloroform provided good performance in term of color intensity at low concentration, ethanol was more environmentally friendly that resulted in the detection limit up to 0.22 mg L⁻¹. Sodium thiosulfate was selected as masking agent as it proved better performance than other agents. Deriphat 160c, tested surfactant, increased analytical sensitivity by 30%. By using it for cadmium determination in real wastewater, the recoveries were ranged between 81% and 99%. By analyzing with *F*-test, our detection method was not significantly different than the conventional method ($p > 0.05$). In conclusion, the results provided evidences

that a cadmium–dithizone complex can be developed for analytical method of cadmium contaminated water.

Keywords: Cadmium, Flame atomic absorption spectrophotometer, Spectrophotometry, Cadmium–dithizone complex

บทนำ

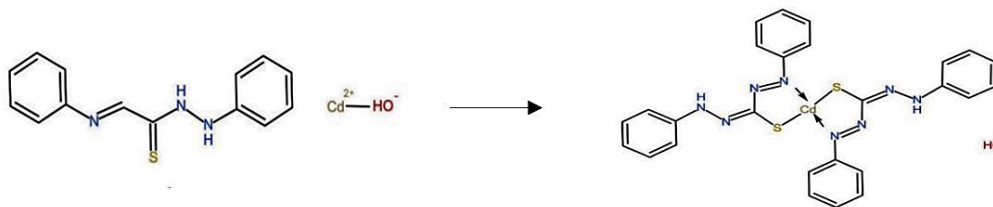
ปัญหาสารตกค้างปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมของประเทศไทยเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์และสัตว์ ซึ่งสารตกค้างในสิ่งแวดล้อมที่มีความเป็นพิษมีหลายชนิด เช่น สารปราบศัตรูพืช สารเคมี และโลหะหนัก ซึ่งการตกค้างของโลหะหนัก เช่น แคดเมียมที่เกิดจากอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมเหมืองแร่ อุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ อุตสาหกรรมผลิตสี รวมถึงโรงงานบัดกรี โดยมนุษย์และสัตว์ได้รับแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายจากอาหารและน้ำเป็นหลัก สำหรับบริเวณพื้นที่ที่มีโลหะแคดเมียมปนเปื้อนในดินปริมาณสูงและปลูกพืชในบริเวณนั้นจะทำให้มีปริมาณแคดเมียมสะสมในพืชสูงด้วย แคดเมียมมีอันตรายต่อมนุษย์และสัตว์เนื่องจากค่าครึ่งชีวิตของแคดเมียมที่สามารถสะสมอยู่ในไตได้นานถึง 38 ปี และสะสมในตับได้ถึง 19 ปี ก่อให้เกิดโรคอิไต-อิไต พบการปนเปื้อนของแคดเมียมเป็นครั้งแรกที่บริเวณแม่น้ำจินซู ประเทศญี่ปุ่น สาเหตุมาจากที่มีการขุดเหมืองแร่บริเวณใกล้แหล่งน้ำส่งผลให้เกิดขยะโลหะหนักรั่วไหลไปตามแม่น้ำ (Arao *et al.*, 2010; Yanagisawa, 1984) ขณะที่ประเทศไทยมีรายงานว่าประชาชนประมาณ 8,000 รายที่อาศัยในพื้นที่บริเวณเหมืองแร่สังกะสี อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก พบปัญหาสุขภาพจากพิษของโลหะหนักแคดเมียม (Sripachote *et al.*, 2012) ทั้งนี้จากการศึกษาการปนเปื้อนของ International Water Management In-

stitute (IWMI) (Simmons, 2002) ซึ่งเป็นองค์กรนานาชาติอิสระที่ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับทรัพยากรน้ำและดินในประเทศกำลังพัฒนาโดยในปี พ.ศ. 2545 พบแคดเมียมปนเปื้อนในปริมาณสูงในพื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก อีกทั้งยังพบปริมาณแคดเมียมปนเปื้อนในดินสูงกว่าค่าที่ยอมรับให้มีได้ (maximum permissible) ที่ระดับความเข้มข้น 3.0 มิลลิกรัม/กิโลกรัมตามมาตรฐานของ The European Economic Community (EEC) ถึง 1.13–94 เท่า (DPIM, 2004) ซึ่งปัญหาการปนเปื้อนในดินนั้นเหตุผลหลักมาจากการปนเปื้อนของแคดเมียมที่รั่วไหลลงในแหล่งน้ำที่ประชาชนใช้ในการอุปโภคบริโภคนั่นเอง นอกจากนี้ในปี 2555 พบการปนเปื้อนแคดเมียมในแม่น้ำหลงเจียง เมืองเหอฉือ ประเทศจีน ที่อยู่ใกล้โรงงานหลอมแร่ ซึ่งมีปริมาณโลหะแคดเมียมปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำตามธรรมชาติมากถึง 5,368 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการปนเปื้อนนี้นั้นส่งผลกระทบต่อแม่น้ำเป็นระยะทางมากกว่า 300 กิโลเมตร (Zhao *et al.*, 2018)

ดังนั้นเพื่อเป็นการเฝ้าระวังและติดตามปริมาณแคดเมียมที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม เช่น แหล่งน้ำตามธรรมชาติซึ่งมนุษย์และสัตว์ใช้ในการบริโภค การตรวจวิเคราะห์โลหะหนักแคดเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำจึงมีความสำคัญ แต่โดยทั่วไปการตรวจวิเคราะห์โลหะหนักแคดเมียมนั้นใช้เครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง เช่น flame atomic absorption spectrophotometer (FAAS) (Baird, 2017) ion

chromatography (IC) (Ford *et al.*, 2015) และ inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) (Takaku *et al.*, 2016) แต่การวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูงเหล่านี้มีค่าใช้จ่ายในการตรวจวิเคราะห์สูงมากเช่นกัน อีกทั้งผู้วิเคราะห์ต้องมีทั้งความรู้และทักษะทางเคมีวิเคราะห์ในการเตรียมและวิเคราะห์ตัวอย่าง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการตรวจวิเคราะห์ปริมาณโลหะแคดเมียมอย่างง่ายในน้ำตัวอย่าง โดยเป็นหลักการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของสารประกอบเชิงซ้อนและตรวจวัดด้วยเทคนิคสเปกโตรโฟโตเมตรีซึ่งเป็นวิธีการที่ง่าย สะดวก และราคาถูก โดยหลักการตรวจวิเคราะห์นั้นจะเป็นการวัดปฏิกิริยาของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารไดไทโซน (dithizone) ในตัวทำละลายอินทรีย์ในสภาวะเบส และไอออนของโลหะหนักแคดเมียม

ทำให้สารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพู โดยมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแคดเมียม 1 โมล กับไดไทโซน 2 โมลในสภาวะเบสแก่ ซึ่งในโครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนพบว่าอะตอมไนโตรเจนจะเหนี่ยวนำด้วยแรงดึงดูดระหว่างขั้ว (dipole-dipole forces) กับอะตอมของแคดเมียม นอกจากนั้นอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ไปรวมอยู่ด้านใดด้านหนึ่งของอะตอมหรือโมเลกุลทำให้เกิดสภาพขั้วชั่วคราวขึ้นในสภาพที่เป็นประจุลบ (δ^-) และตำแหน่งที่ไม่มีอิเล็กตรอนจะเกิดสภาพประจุที่เป็นบวก (δ^+) ทำให้เกิดแรงดึงดูดอ่อน ๆ กับอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของไนโตรเจนจึงเกิดเป็นพันธะโคเวเลนต์แบบโคออร์ดิเนตขึ้นได้ระหว่างไนโตรเจนและแคดเมียม (Paradkar and Williams, 1994) กลไกการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนดังในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 โครงสร้างการเกิดปฏิกิริยาสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแคดเมียม-ไดไทโซนในสภาวะเบสแก่ ที่มา: ดัดแปลงมาจาก Khan *et al.*, 2015

เนื่องจากในน้ำธรรมชาติไม่ได้มีเฉพาะไอออนของแคดเมียมเพียงชนิดเดียวเท่านั้นแต่จะมีไอออนชนิดอื่น ๆ ปะปนอยู่จึงมีการพัฒนาวิธีวิเคราะห์ด้วยการเติมสารบดบัง (masking agent) เพื่อลดการรบกวนปฏิกิริยาจากไอออนอื่น ๆ ที่ปะปนมาในสารละลาย โดยคณะผู้วิจัยมีแนวคิดในการใช้สารบดบังที่มีการใช้ในการวิเคราะห์โลหะหนักชนิดอื่นมาทดสอบ เช่น สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ฟอสฟอรัส

เดียม (Raoot and Raoot, 1986) สารละลายโพแทสเซียมไทโอไซยาเนต สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ และสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์โครเมียม (Khalifa and Ateya, 1968) นอกจากนี้ยังไม่พบงานวิจัยใดที่มีการนำสารละลายโซเดียมทาร์เทรตมาใช้เป็นสารบดบังสำหรับการวิเคราะห์แคดเมียมร่วมกับไดไทโซนมาก่อน หลังจากนั้นจะมีการทดสอบการเติมสารลดแรงดึงผิวในลงปฏิกิริยาเพื่อช่วยเพิ่มความ

เสถียรและความไวของปฏิกิริยา (Paradkar and Williams, 1994) ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการวิเคราะห์อย่างง่ายของปริมาณโลหะแคดเมียมในน้ำตัวอย่างโดยใช้เทคนิคสเปคโตรโฟโตเมตรี และทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการตรวจวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐานโดยใช้เทคนิค FAAS (Baird, 2017)

วิธีดำเนินการวิจัย

วัสดุ/อุปกรณ์และสารเคมี

เครื่อง pH meter (Mettler Toledo pH meters, FP20, USA) เครื่อง Spectrophotometer (GENESYS 30 Visible, Thermo scientific, USA) และเครื่อง Flame atomic absorption spectrophotometer (FAAS) (PerkinElmer precisely AAnalyst 200, USA) โดยใช้ความยาวคลื่น 288.8 นาโนเมตร ใช้อัตราการไหลของอากาศ 10 ลิตรต่อนาที และแก๊สอะเซทิลีน 2.5 ลิตรต่อนาที สารละลายมาตรฐานแคดเมียม โพสแทสเซียม แคลเซียม ตะกั่ว โครเมียม และทองแดงความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (PanReac AppliChem, Barcelona, Spain) สารไตโทโซน (SIGMA-ALDRICH, Australia) 95%เอทานอล (Zenith Science, Thailand) 99.8%เมทานอล (Macron Fine Chemical, USA) คลอโรฟอร์ม (ACI LabScan, Bangkok, Thailand) 99.8% ไตคลอโรมีเทน (Fisher Scientific, UK) และ 99.8% อะซีโตนไตรล (Mallinckrodt Chemical, USA) โซเดียมไทโอซัลเฟต (Central Drug House, India) โซเดียมทาร์เทรต (Ajax Finechem, Australia) โพแทสเซียมไทโอไซยาเนต (KEMAUS, Australia) แอมโมเนียมคลอไรด์ (KEMAUS, Australia) โซเดียม-N-lauryl-β-iminodipropionate

(Deriphat 160c) (VITA, Thailand) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Central Drug House, India) และ 37% กรดไฮโดรคลอริก (Carlo Erba, Italy)

การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบเชิงซ้อนแคดเมียม-ไตโทโซน

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าปฏิกิริยาการเกิดสีของโลหะเชิงซ้อนแคดเมียมโดยวิธีของ Santos *et al.* (2015) เป็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแคดเมียมและสารละลายไตโทโซนเข้มข้น 0.01% (w/v) ที่พีเอชเท่ากับ 12 และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้นเพื่อให้งานวิจัยนี้มีความเป็นเอกลักษณ์และมีการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ขึ้นจากเดิม จึงทดสอบปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนโดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ที่ใช้เป็นตัวทำละลายสารไตโทโซนที่แตกต่างกัน 5 ชนิดคือ 99.8% คลอโรฟอร์ม 99.8% ไตคลอโรมีเทน 99.8% อะซีโตนไตรล 95%เอทานอล และ 99.8%เมทานอล โดยบีเบตสารละลายแคดเมียมความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาตร 5 มิลลิลิตรลงในขวดตัวอย่างขนาด 15 มิลลิลิตร หลังจากนั้นจึงเติมสารละลายไตโทโซนความเข้มข้น 0.01% (w/v) ปริมาตร 1.0 มิลลิลิตรในตัวทำละลายอินทรีย์ที่แตกต่างกัน และปรับพีเอชของสารละลายให้ได้ 12 ด้วยสารละลาย 0.1 โมลต่อลิตรโซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาตร 0.15 มิลลิลิตร เขย่าให้สารเข้ากัน สังเกตสีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น จากนั้นตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงที่สูงสุดของตัวทำละลายแต่ละชนิดโดยใช้ความยาวคลื่นในช่วงวิสิเบิล (400–800 นาโนเมตร) เมื่อได้ชนิดของตัวทำละลายอินทรีย์แล้วจึงทำการทดสอบผลของพีเอชในช่วง 1–14 ที่มีผลต่อปฏิกิริยาการเกิดสารประ-

กอบเชิงซ้อนแคดเมียมโดยใช้สารละลาย 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร โซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลาย 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตรไฮโดรคลอริกในการปรับค่าพีเอชของสารละลาย จากนั้นทดสอบประสิทธิภาพของสารบดบั้งแต่ละชนิดเพื่อลดผลการรบกวนการวิเคราะห์เนื่องจากไอออนและโลหะหนักอื่น ๆ โดยสารบดบั้งที่นำมาทดสอบแตกต่างกัน 5 ชนิด ดังนี้ สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต สารละลายโซเดียมทาร์เทรต สารละลายโพแทสเซียมไทโอไซยาเนต สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ และสารละลายโซเดียมซิทเรต โดยสารแต่ละชนิดมีความเข้มข้น 20% (v/v) โดยทำการเติมสารบดบั้งลงไปปริมาตร 0.15 มิลลิกรัม จากนั้นสังเกตสีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นและตรวจวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่สูงสุดที่ 535 นาโนเมตรที่เวลาที่แตกต่างกันที่ 10 20 30 และ 60 นาที เพื่อศึกษาความเสถียรของปฏิกิริยา ทั้งนี้ไอออนและโลหะหนักที่ใช้ในการทดสอบการรบกวนคือ แคดเมียม แคลเซียม โพแทสเซียม ตะกั่ว โครเมียม คอปเปอร์ โดยสารแต่ละชนิดมีความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นหาค่าร้อยละการกลับคืนของวิธีที่พัฒนาขึ้นเทียบกับวิธีมาตรฐาน FAAS (Baird, 2017) นอกจากนี้เพื่อให้วิธีที่พัฒนาขึ้นมีความไวมากขึ้นคณะผู้วิจัยจึงทดสอบการเติมสารลดแรงตึงผิว sodium-N-lauryl-β-iminodi-propionate (Deriphat 160c) ความเข้มข้น 1.2% (w/v) ปริมาตร 1.0 มิลลิตรลงไป จากนั้นตรวจวัดที่ 535 นาโนเมตรเพื่อเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงก่อนและหลังการเติมสารลดแรงตึงผิว

การทดสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์

ดำเนินการทดสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ตามวิธีของ Miller and Miller (2005) โดย

การทดสอบความเป็นเส้นตรงของวิธีวิเคราะห์จากกราฟมาตรฐานแคดเมียม (0.015–5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร) ค่าขีดจำกัดการตรวจหา (limit of detection: LOD) และค่าขีดจำกัดการวัดเชิงปริมาณ (limit of quantitation: LOQ) โดยการตรวจหาทั้ง 2 นี้ใช้วิธี based on signal-to-noise ด้วยการเปรียบเทียบสัญญาณที่วัดได้จากสารละลายที่ทราบความเข้มข้นต่ำสุดของสารที่วิเคราะห์เทียบกับ blank โดยค่าที่ยอมรับได้ของ LOD คือ 3 ต่อ 1 ($LOD = \text{signal}/\text{noise ratio} = 3:1$) และค่าที่ยอมรับได้ของ LOQ คือ 10 ต่อ 1 ($LOQ = \text{signal}/\text{noise ratio} = 10:1$) จากนั้นเปรียบเทียบผลการทดสอบโดยค่าทางสถิติ (F -test) ระหว่างวิธีที่พัฒนาขึ้นกับวิธีมาตรฐานสากลของสมาคมสาธารณสุขอเมริกา (American Public Health Association) ด้วยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FAAS (Baird, 2017)

การทดสอบการตรวจวิเคราะห์แคดเมียมในน้ำตัวอย่างจริง

ทดสอบการตรวจวิเคราะห์แคดเมียมในน้ำตัวอย่างจริงโดยเปรียบเทียบวิธีที่พัฒนาขึ้นกับวิธีมาตรฐาน FAAS โดยการเตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 1 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตรในน้ำตัวอย่างที่แตกต่างกันโดยปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาตร 0.1 0.3 และ 0.5 มิลลิตรลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิตร จากนั้นทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำตัวอย่าง 4 ชนิด ได้แก่ น้ำปราศจากไอออน น้ำดื่ม น้ำประปา และน้ำธรรมชาติ (น้ำบ่อปลาในกรมประมง) และนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีการที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐานด้วยเทคนิค FAAS

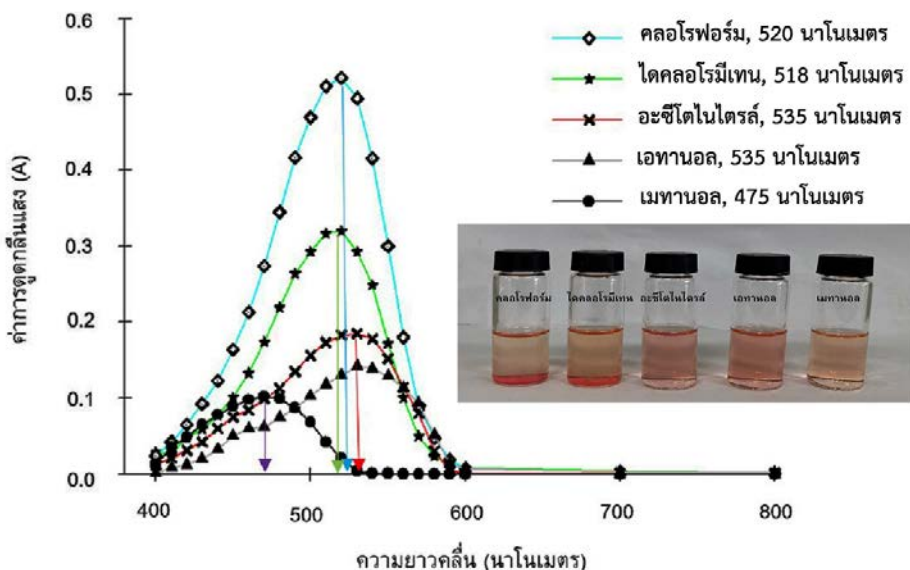
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการทดสอบชนิดตัวทำละลายอินทรีย์สำหรับไดโทโซนที่มีผลต่อปฏิกิริยาการสารประกอบเชิงซ้อนแคดเมียม

จากผลการทดสอบปฏิกิริยาการสารประกอบเชิงซ้อนแคดเมียมโดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์สำหรับสารไดโทโซนที่แตกต่างกัน 5 ชนิดพบว่าตัวทำละลายอินทรีย์คลอโรฟอร์มให้ผลการดูดกลืนที่มีค่าสูงที่สุดและให้สีชมพูของสารละลายชัดเจนที่สุดซึ่งถือว่ามีความไว (sensitivity) มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารอินทรีย์ที่ทำการทดสอบอีก 4 ชนิด โดยมีลำดับผลการทดสอบการดูดกลืนคลื่นแสงดังนี้ คลอโรฟอร์ม > ไดคลอโรมีเทน > อะซีโตไนไตรล์ > เอทานอล > เมทานอล แต่เนื่องจากเอทานอลมีความเป็นพิษที่น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวทำละลายที่ใช้ทดสอบทั้ง 5 ชนิด (IARC, 2014) และเอทานอลเป็น

สารเคมีพื้นฐานในห้องปฏิบัติการทั่วไป ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงเลือกใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายอินทรีย์สำหรับไดโทโซนทดแทนสารอินทรีย์ชนิดอื่นเพื่อใช้ในการทดสอบปฏิกิริยา อีกทั้งเป็นการลดความเป็นอันตรายต่อผู้ทดสอบและมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้คลอโรฟอร์มเป็นสารเคมีที่มีการควบคุมการใช้และต้องขออนุญาตนำเข้ามาในราชอาณาจักรไทยตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม 2556 เล่ม 130 ตอนพิเศษ 125ง (Notification of Ministry of Industry Announcement, 2013) จากตารางในไฟล์เนื้อหาเพิ่มเติมตาราง S1 แสดงค่าความยาวคลื่นที่สูงที่สุดเมื่อใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ที่แตกต่างกันและมีความเข้มข้นของสารละลายต่างกันดังแสดงในภาพที่ 2

จากภาพที่ 2 พบว่าตัวทำละลายอินทรีย์คลอโรฟอร์มและไดคลอโรมีเทนเกิดการแยกชั้นตกตะกอนไปที่ก้นขวดเนื่องจากตัวทำละลาย



ภาพที่ 2 ความยาวคลื่นสูงสุดและความเข้มสีของสารละลายของสารประกอบเชิงซ้อนแคดเมียมในตัวทำละลายอินทรีย์ที่แตกต่างกัน

คลอโรฟอร์มและไดคลอโรมีเทนเป็นสารที่ไม่มีขั้ว และมีความหนาแน่น 1.49 และ 1.43 g/cm³ ตามลำดับ ซึ่งมีความหนาแน่นที่สูงกว่าน้ำ (0.99 g/cm³) จึงเกิดการแยกชั้นแล้วตกลงไปอยู่ชั้นล่างสุดของสารละลาย (Kim *et al.*, 2011) ทำให้สีของสารละลายจะมีสีชมพูที่ชัดเจนกว่า ในขณะที่ตัวทำละลายอะซีโตน ไตรคลอโรเอทานอล และเมทานอล ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีขั้วและมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.76 0.78 และ 0.79 g/cm³ ตามลำดับ จะไม่เกิดการแยกชั้นของสารละลายเนื่องจากสามารถละลายน้ำได้และความหนาแน่นน้อยกว่า น้ำทำให้สีของสารประกอบเชิงซ้อนแคดเมียมมีสีชมพูที่อ่อนกว่าส่งผลให้ค่าการดูดกลืนของควมยาวคลื่นสูงสุดมีค่าแตกต่างกัน โดยคณะผู้วิจัยเลือกใช้ตัวทำละลายเอทานอลที่มีค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่สูงที่สุดที่ 535 นาโนเมตร (ดังแสดงในไฟล์เนื้อหาเพิ่มเติมภาพที่ S1) เพื่อนำไปศึกษาต่อในด้านผลของพีเอชที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาต่อไป

ผลของพีเอชที่มีผลต่อปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนแคดเมียม

การทดสอบผลของพีเอชที่มีผลต่อปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนในตัวทำละลายเอทานอล โดยทดสอบพีเอชของสารละลายเริ่มต้นในช่วงพีเอช 1–14 พบว่า การเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบเชิงซ้อนแคดเมียมกับสารละลายไดโทโซนจะเกิดปฏิกิริยาได้และมีความเสถียรได้ในสภาวะเบสแก่ที่พีเอช 12–14 เนื่องจากสภาวะที่เป็นเบสมีผลต่อการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (Magalhaes and Reis, 2018) โดยที่พีเอชนี้แคดเมียมแสดงสมบัติเป็นประจุลบ (Cd(OH)₃⁻) ทำให้สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไดโทโซน

ได้ (Ford *et al.*, 2007) สารละลายจะเปลี่ยนสีจากไม่มีสีเป็นสีชมพูซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาเชิงซ้อนในสารละลายโดยจากการทดลองจะพบว่าที่พีเอช 1–11 ไม่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนของแคดเมียมกับไดโทโซนเนื่องจากพีเอชที่ต่ำกว่า 12 มีความเข้มข้นของ OH⁻ น้อย ทำให้อะตอมของซัลเฟอร์ในสารไดโทโซนที่มีคุณสมบัติเป็นต่างอ่อน (soft base) ที่สามารถเกิดสภาพขั้วสูง (polarization) ได้ตามความหนาแน่นของอิเล็กตรอนนั้นไม่อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมกับการจับกับไอออนของแคดเมียมที่มีคุณสมบัติเป็นกรดอ่อน (soft acid) ตามกฎของ “กรด-เบสแบบฮาร์ด-ซอฟต์” (hard-soft acids-bases: HSAB) (Pearson, 1968) ดังนั้นพีเอชที่เหมาะสมในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแคดเมียมและไดโทโซนคือพีเอชที่มากกว่า 12 ดังแสดงในไฟล์เนื้อหาเพิ่มเติมภาพที่ S2

ผลของชนิดสารบดบัง (masking agents)

การศึกษาผลของชนิดสารบดบังเป็นทดสอบในด้านความเสถียรของปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนแคดเมียมที่มีการเติมสารบดบัง (masking agents) ที่แตกต่างกัน 5 ชนิด ได้แก่ สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (Na₂S₂O₃) สารละลายโซเดียมทาร์เทรต (Na₂C₄H₄O₆) สารละลายโพแทสเซียมไทโอไซยาเนต (NaSCN) สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH₄Cl) และสารละลายโซเดียมซิทเรต (Na₃C₆H₅O₇) จากผลการทดสอบความเสถียรของปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของแคดเมียมภายใน 60 นาที พบว่า ความเสถียรของปฏิกิริยา คือ สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต > สารละลายโซเดียมทาร์เทรต > สารละลายโพแทสเซียมไทโอไซยาเนต

> สารละลายโซเดียมซัลเฟต > สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ โดยเฉพาะในช่วง 10 นาทีแรก สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตให้ประสิทธิภาพในด้านความเสถียรของปฏิกิริยาสูงที่สุด ถึงร้อยละ 82 จากนั้นความเสถียรของปฏิกิริยาที่เติมสารบดบังทั้งหมดจะสิ้นสุดภายใน 60 นาที โดยค่าอัตราการลดลงของปฏิกิริยาสำหรับการใช้โซเดียมไทโอซัลเฟตที่มีค่าเท่ากับ 0.0104 นาที^{-1} โซเดียมทาร์เทรตมีค่าเท่ากับ 0.0284 นาที^{-1} โพแทสเซียมไทโอไซยาเนตมีค่าเท่ากับ 0.0361 นาที^{-1} แอมโมเนียมคลอไรด์มีค่าเท่ากับ 0.0644 นาที^{-1} และสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่าเท่ากับ 0.0518 นาที^{-1} ดังแสดงในไฟล์เนื้อหาเพิ่มเติมในภาพที่ S3 คณะผู้วิจัยเลือกสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตเป็นสารบดบังเนื่องจากให้ผลการทดสอบที่มีความเสถียรดีที่สุดในเมื่อเทียบกับสารบดบังชนิดอื่น ๆ ที่ใช้ทดสอบ

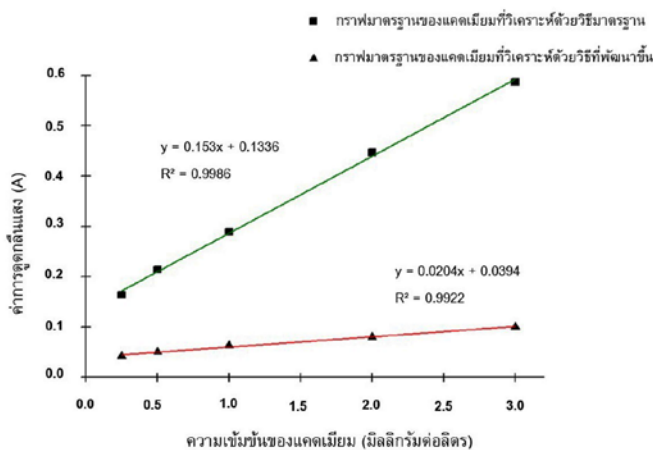
นอกจากนี้เพื่อประยุกต์ใช้วิธีการทดสอบนี้ในการตรวจวิเคราะห์แคดเมียมในตัวอย่างน้ำที่มีไอออนอื่น ๆ ปะปนอยู่จึงทำการทดสอบกับไอออนบวกและไอออนของโลหะชนิดต่าง ๆ โดยใช้สารบดบังที่แตกต่างกัน 5 ชนิดเพื่อลดผลการรบกวนจากไอออนและโลหะหนักชนิดอื่น ผลการทดสอบดังแสดงในไฟล์เนื้อหาเพิ่มเติมตาราง S2 พบว่าปฏิกิริยาการทดสอบโดยใช้สารบดบังในสภาวะเบสแก่ ($\text{pH} > 12$) สามารถลดผลการรบกวนจากไอออนของโลหะชนิดต่าง ๆ ได้โดยมีค่าร้อยละการกลับคืนการวิเคราะห์ในช่วงร้อยละ 70–95 เนื่องจากในสภาวะที่พีเอชสูง ($\text{pH} > 10$) จะเป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไดไทโชนกับไอออนบวกชนิดอื่น ๆ เช่น Cu^{2+} ($\text{pH} 1.4$) Cr^{3+} ($\text{pH} 9-10$) Cr^{6+} ($\text{pH} 1-2.5$) และ Pb^{2+} ($\text{pH} 7-8$) (Jeffery and Hutchison, 1981;

Kalidhasan *et al.*, 2011; Kumar *et al.*, 1991; Magalhaes and Reis, 2018; Mohan and Pittman, 2006; Santos *et al.*, 2015) อย่างไรก็ตามยังพบว่าประสิทธิภาพการทดสอบของสารไทโอซัลเฟตถูกรบกวนด้วยไอออน Cr^{3+} และ Cu^{2+} โดยได้ร้อยละการกลับคืนการวิเคราะห์แคดเมียมได้เท่ากับ 69 และ 73 ตามลำดับ เนื่องจาก Cr^{3+} มีประจุบวกมากกว่า Cd^{2+} ซึ่งการบดบังจะอาศัยความแข็งแรงของประจุด้วยการที่สารบดบังเข้าไปเกิดพันธะไอออนิกกับไอออนสารรบกวนที่มีประจุบวก ผลที่เกิดขึ้นคือไอออนของ Cr^{3+} ส่งผลต่อการทดลองมากที่สุดเนื่องจากสารบดบังไทโอซัลเฟตมีสมบัติเป็นเบสอ่อน ทำให้การเกิดพันธะกับ Cr^{3+} ที่มีสมบัติเป็นกรดแก่ได้ไม่ดีเท่าที่ไอออนชนิดอื่น ๆ ที่มีสมบัติเป็นกรดอ่อน จึงทำให้อัตราการกลับคืนการวิเคราะห์แคดเมียมได้เพียงร้อยละ 70 ถึงแม้ว่า Cu^{2+} สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไดไทโชนได้ (Zolotov *et al.*, 2002) แต่สารบดบังไทโอซัลเฟตสามารถลดผลการรบกวนได้เนื่องจาก Cu^{2+} มีคุณสมบัติเป็นกรดอ่อนสามารถเกิดพันธะกับไทโอซัลเฟตที่มีสมบัติเป็นเบสอ่อนได้ (Pearson, 1968) จึงทำให้ได้ร้อยละการกลับคืนของการวิเคราะห์แคดเมียมได้ถึงร้อยละ 73 นอกจากนี้เพื่อให้การทดลองมีความใหม่และเป็นเอกลักษณ์มากขึ้นคณะผู้วิจัยได้ทำการเติมสารลดแรงตึงผิวเดอริเพท 160 ซี ลงไปในปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มความไวและความเสถียรในการทดสอบเนื่องจากสารลดแรงตึงผิวสามารถช่วยเพิ่มความสามารถการละลายสารประกอบอินทรีย์ในน้ำ (Ismael, 2014) ทำให้การเติมสารลดแรงตึงผิวนี้นี้ช่วยทำให้สีของสารละลายเข้มขึ้นและมีค่าการดูดกลืนแสงมากขึ้นจากเดิมถึงร้อยละ 30 ดังแสดงในไฟล์เนื้อหาเพิ่มเติมภาพที่ S4

การทดสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์

สร้างกราฟมาตรฐานของวิธีการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นได้สมการเส้นตรงดังนี้ $y = 0.0149x + 0.0441$, $r^2 = 0.9997$ โดยมีค่า LOD = 0.22 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่า LOQ = 0.67 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่การทดสอบด้วยวิธีมาตรฐาน FAAS พบว่าสมการเส้นตรงมีค่า $y = 0.2023x + 0.1074$, $r^2 = 0.9979$ ดังแสดงในภาพที่ 3 มีค่า LOD = 0.054 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่า LOQ = 0.16 มิลลิกรัมต่อลิตร จากค่าความชันของกราฟมาตรฐาน แสดงว่า การทดสอบด้วยเทคนิค FAAS มีค่าความไว (sensitivity) ที่สูงกว่าเทคนิคของ

การเกิดปฏิกิริยาสารประกอบเชิงซ้อนแคดเมียม และเมื่อทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบระหว่างวิธีทดสอบทั้ง 2 วิธี โดยใช้สถิติ F -test ในการทดสอบพบว่าไม่มีความแตกต่างกันที่ความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ซึ่งมีค่า $P(F \leq f)$ one-tail = 0.451 เปรียบเทียบกับค่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 พบว่า ค่า $P(F \leq f)$ one-tail มากกว่าค่าระดับนัยสำคัญ นั่นคือความแปรปรวนของประชากรสองกลุ่มมีค่าเท่ากัน ซึ่งไม่ปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ($p > 0.05$) ในช่วงความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 0.25–5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการทดสอบ



ภาพที่ 3 กราฟมาตรฐานของแคดเมียม

3 ซ้ำและหาค่าเฉลี่ยรวมถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังแสดงในไฟล์เนื้อหาเพิ่มเติมในตาราง S3 และ S4 (F -test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)

การทดสอบกับน้ำตัวอย่างจริง

ทดสอบน้ำตัวอย่างจริงด้วยวิธีวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐานพบว่าวิธี

การวิเคราะห์จะให้ผลการทดสอบดีที่สุดเมื่อใช้น้ำปราศจากไอออนทดสอบ ในขณะที่ผลการวิเคราะห์ในน้ำดื่ม น้ำประปา และน้ำธรรมชาติ มีค่าการทดสอบลดลงเล็กน้อยโดยมีค่าร้อยละการกลับคืนของน้ำตัวอย่างทุกชนิดในช่วง 81–99 ดังในตาราง 1 ซึ่งใกล้เคียงกับวิธีมาตรฐาน

ตาราง 1 ความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำตัวอย่างที่ตรวจวิเคราะห์ด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐาน (n = 3)

ความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้ำปราศจากไอออน		น้ำดื่ม		น้ำประปา		น้ำธรรมชาติ	
	ร้อยละการกลับคืน		ร้อยละการกลับคืน		ร้อยละการกลับคืน		ร้อยละการกลับคืน	
	วิธีที่พัฒนาขึ้น	วิธีมาตรฐาน	วิธีที่พัฒนาขึ้น	วิธีมาตรฐาน	วิธีที่พัฒนาขึ้น	วิธีมาตรฐาน	วิธีที่พัฒนาขึ้น	วิธีมาตรฐาน
1	99.00	104.00	96.00	94.00	87.00	98.00	81.00	91.00
3	94.00	100.33	90.00	100.66	88.33	99.33	84.00	93.66
5	90.80	95.00	91.4	90.60	87.00	92.54	85.40	92.20

สรุปผล

การศึกษานี้ได้ทำการพัฒนาวิธีการตรวจวิเคราะห์โลหะหนักแคดเมียมอย่างง่ายจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแคดเมียม-ไดไทโชนและทำการตรวจวัดด้วยเทคนิคสเปคโตรโฟโตเมทรี โดยวิธีการวิเคราะห์นี้มีความใหม่และมีความแตกต่างจากงานวิจัยอื่นคือเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายอินทรีย์สำหรับไดไทโชนทดแทนตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดอื่นที่มีความเป็นพิษสูงกว่าส่งผลให้วิธีการวิเคราะห์มีความปลอดภัยต่อผู้ทำการวิเคราะห์และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยสภาวะของพีเอชที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาคือค่าพีเอชเท่ากับ 13 อีกทั้งสามารถลดผลการรบกวนการวิเคราะห์เนื่องจากไอออนอื่น ๆ ได้จากการใช้สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตเป็นสารบดบังและได้มีการเติมสารลดแรงตึงผิวเดอริเพท 160ซี เพื่อเพิ่มความไวของวิธีวิเคราะห์ได้ถึงร้อยละ 30 และตรวจวัดที่ความยาวคลื่น 535 นาโนเมตร จากรายละเอียดวิธีการวิเคราะห์ข้างต้นจึงเป็นงานวิจัยที่ใหม่และยังไม่เคยมีการตีพิมพ์เผยแพร่มาก่อนโดยวิธีที่พัฒนาขึ้นมีค่าร้อยละการกลับคืน

สำหรับการวิเคราะห์ในน้ำตัวอย่างจริงทั้งน้ำดื่ม น้ำประปา และน้ำจากธรรมชาติในช่วงร้อยละ 81–99 และมีค่าขีดจำกัดการตรวจวิเคราะห์เท่ากับ 0.22 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยสรุปวิธีการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐานพบว่าไม่มีความแตกต่างกันที่ความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 และสามารถนำวิธีที่พัฒนาขึ้นไปตรวจวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในน้ำตัวอย่างจริงได้โดยเป็นวิธีที่ง่ายและมีความรวดเร็วกว่าวิธีมาตรฐาน

เอกสารอ้างอิง

- Arao, T., Ishikawa, S., Murakami, M., Abe, K., Maejima, Y., and Makino, T. (2010). Heavy metal contamination of agricultural soil and countermeasures in Japan. **Paddy and Water Environment** 8(3): 247–257.
- Baird, R. B., Rice, E. W., and Eaton, A. D. (2017). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23rd ed. Washington, DC: American Public Health Association.

- Ford, I., Josceanu, A., Guran, C., and Minca, I. (2015). Ion chromatographic method for determination of heavy metals in water. **Revista de Chimie** 66: 1960–1964.
- Ford, R., Wilkin, R., and Puls, R. (2007). **Monitored Natural Attenuation of Inorganic Contaminants in Ground Water**. United States: Environmental Protection Agency.
- International Agency for Research on Cancer (IARC). (2014). **IARC Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risk of Chemicals to Humans**. Lyon: IARC.
- Ismael, F. J. (2014). **Surfactant Mediated Cadmium Determination with Dithizone in Aqueous Solution**. Master of Education Thesis (Science Education). Famagusta: Eastern Mediterranean University.
- Jeffery, P. G., and Hutchison, D. (1981). Chapter 17 – Chromium. In Jeffery, P. G., and Hutchison, D. (Eds.), **Chemical Methods of Rock Analysis** (3rd ed.) (pp. 145–154). Oxford: Butterworth Heinemann.
- Kalidhasan, S., KrishnaKumar, A. S., Rajesh, V., and Rajesh, N. (2011). A preliminary spectroscopic investigation on the molecular interaction of metal–diphenylthiocarbazono complex with cellulose biopolymer and its application. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy** 79(5): 1681–1687.
- Khalifa, H., and Ateya, B. (1968). Analysis of multicomponent chromium mixtures. **Microchemical Journal** 13(2): 247–252.
- Khan, S., Kazi, T. G., and Soylak, M. (2015). A green and efficient in–syringe ionic liquid–based single step microextraction procedure for preconcentration and determination of cadmium in water samples. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry** 27: 149–152.
- Kim, J. I., Park, S. J., Choi, Y. Y., and Kim, S. B. (2011). Liquid–liquid equilibrium, solid–liquid equilibrium, densities, and refractivity of a water, chloroform, and acetylacetone mixture. **Journal of Chemical & Engineering Data** 56(5): 1798–1803.
- Kumar, B., Singh, H. B., Katyal, M., and Sharma, R. L. (1991). Spectrophotometric and derivative spectrophotometric determination of copper (II) with dithizone in aqueous phase. **Microchimica Acta** 105(1): 79–87.
- Magalhaes, T. D., and Reis, B. F. (2018). A novel multicommuted flow analysis strategy for the spectrophotometric determination of cadmium in water at $\mu\text{g L}^{-1}$ levels without using a preconcentration step. **Analytical Methods** 10(8): 900–909.
- Miller, J., and Miller, J. (2005). **Statistics and Chemometrics for Analytical Chemistry**. 5th ed. Harlow: Pearson Education.
- Mohan, D., and Pittman, C. U. (2006). Activated carbons and low cost adsorbents for remediation of tri- and hexavalent chro-

- mium from water. **Journal of Hazardous Materials** 137(2): 762–811.
- Notification of Ministry of Industry Announcement. (2013). Hazardous Substances Management Division. **Royal Thai Government Gazette** 130(125): 6–7. (in Thai)
- Paradkar, R. P., and Williams, R. R. (1994). Micellar colorimetric determination of di-thizone metal chelates. **Analytical Chemistry** 66(17): 2752–2756.
- Pearson, R. G. (1968). Hard and soft acids and bases, HSAB, part 1: Fundamental principles. **Journal of Chemical Education** 45(9): 581.
- Raoot, S., and Raoot, K. N. (1986). Selective complexometric determination of palladium with thiosulphate as masking agent. **Talanta** 33(6): 544–546.
- Santos, I. C., Mesquita, R. B. R., and Rangel, A. O. S. S. (2015). Screening of cadmium and lead in potentially contaminated waters using a spectrophotometric sequential injection lab-on-valve methodology. **Talanta** 143: 359–365.
- Simmons, R. W. (2002). Accumulation of arsenic and cadmium in rice grain: Implications for human health. **Water Resources** 213: 27–35.
- Sriprachote, A., Kanyawongha, P., Ochiai, K., and Match, T. (2012). Current situation of cadmium-polluted paddy soil, rice and soy-bean in the Mae Sot District, Tak Province, Thailand. **Soil Science and Plant Nutrition** 58(3): 349–359.
- Takaku, Y., Ishizuka, K., Nagaoka, A., Minakawa, M., Morita, T., and Fujimoto, K. (2016). Determination of cadmium in sea water by ICP–MS with chelating resin preconcentration. **Bunseki Kagaku** 65: 399–402.
- Yanagisawa, M. (1984). Heavy metal pollution and methods of restoration of polluted soil in the Jinzu River basin. **Bulletin of the Toyama Agricultural Experiment Station** 15: 1–110. (in Japan)
- Zhao, X., Yao, L.A., Ma, Q., Zhou, G., Wang, L., Fang, Q. L., and Xu, Z. C. (2018). Distribution and ecological risk assessment of cadmium in water and sediment in Longjiang River, China: Implication on water quality management after pollution accident. **Chemosphere** 194: 107–116.
- Zolotov, Y. A., Ivanov, V. M., and Amelin, V. G. (2002). Test methods for extra-laboratory analysis. **TrAC Trends in Analytical Chemistry** 21(4): 302–319.
- บทความนี้ข้อมูลเสริม (supplementary information) อยู่บนเว็บไซต์ของวารสาร ได้แก่ ภาพและตารางของวิธีการตรวจวิเคราะห์โลหะหนักแคดเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำอย่างง่ายโดยเทคนิคสเปคโตรโฟโตเมตรี