วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา ปีที่ 26 (ฉบับที่ 2) พฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2564
BURAPHA SCIENCE JOURNAL Volume 26 (No.2) May – August 2021
บทความวิจัย

การพัฒนาชุดทดสอบสำหรับพาราควอตด้วยอุปกรณ์วัดสีแบบพกพา

Development of Test Kit for Paraquat Using Hand-Held Photometer

ชนากานต์ แสงสุ่ม และ พูนทวี แซ่เตีย*

Chanakarn Sangsum and Phoonthawee Saetear*

ภาควิชาเคมีและศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

Department of Chemistry and Center of Excellence for Innovation in Chemistry,

Faculty of Science, Mahidol University

Received : 26 June 2020

Revised : 23 August 2020

Accepted : 13 October 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เสนอการพัฒนาชุดทดสอบสำหรับพาราควอตด้วยอุปกรณ์วัดสีแบบพกพาซึ่งประกอบด้วยเครื่องโฟโตเมตรีแบบพกพา ทำงานร่วมกันกับเครื่องคนสารแบบแม่เหล็ก ผ่านการควบคุมระบบการทำงานด้วยโปรแกรมที่เขียนลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ ผู้วิจัยเลือกปฏิกิริยารีดักชันของพาราควอตกับโซเดียมไดไธโอไนต์เป็นตัวรีดิวซ์ภายใต้สภาวะเบส ให้ผลิตภัณฑ์เกิดเป็นเรดิคอลไอออนสีน้ำเงินของพาราควอต การทดสอบเริ่มจากเติมตัวอย่างปริมาตร 10.0 มิลลิตร ลงในขวดทำปฏิกิริยาที่อยู่บนเครื่องคนสารแบบแม่เหล็ก จากนั้นเติมสารรีเอเจนท์ (สารละลายโซเดียมไดไธโอไนต์เข้มข้น 1.0 %(w/v) ในโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลต่อลิตร ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร หรือ ผงของแข็งโซเดียมไดไธโอไนต์ขนาดเท่าหัวไม้ขีดไฟ) โดยสีน้ำเงินของเรดิคอลไอออนจะเกิดขึ้นและทำการตรวจวัดความเข้มสีที่อุณหภูมิห้องได้ภายใน 1 นาที จากการวิเคราะห์ พบว่า ชุดทดสอบนี้ให้กราฟเส้นตรงมาตรฐานที่ช่วงความเข้มข้น 0.5 – 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่แสดงค่าความเป็นเส้นตรงที่ดี (r^2 = 1) และให้ความเข้มข้นต่ำสุดในการตรวจวัด (limit of detection, LOD) 0.022 มิลลิกรัมต่อลิตร ชุดทดสอบพาราควอตที่พัฒนาขึ้นนี้มีการใช้งานง่าย ให้ผลการวัดที่รวดเร็ว และนำไปประยุกต์ในการวิเคราะห์ปริมาณพาราควอตในตัวอย่างจากแหล่งน้ำธรรมชาติและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างนอกห้องปฏิบัติการ

คำสำคัญ : พาราควอต ; โซเดียมไดไธโอไนต์ ; ชุดทดสอบ ; โฟโตมิเตอร์ ; เครื่องคนสารแบบแม่เหล็ก

Abstract

This work presents a development of a quantitative portable test kit for accurate determination of paraquat in natural water and agricultural products. The developed portable test kit consists of a hand-held photometer incorporated with a magnetic stirrer via program command wrote on print-circuit board. The detection method is based on a reduction of paraquat and sodium dithionite, as a reducing agent, in alkaline condition to produce a blue free-radical of paraquat. For analysis of paraquat, a 10 mL of sample is transferred to reaction cell placed in a sample holder of photometer, placed on the magnetic stirrer. A color-forming agent (liquid form: 0.5 mL of 1-%(w/v) sodium dithionite in 0.06-mol L^{-1} sodium hydroxide, solid form: powder of sodium dithionite in head-match size) is then added to reaction cell. The blue free-radical ion of paraquat is immediately produced and detected at room temperature within 1 min. A linear calibration of 0.5-10 mg L^{-1} with high coefficient of determination (r^2 = 1). A limit of detection of 0.022 mg L^{-1} was obtained. The proposed method is simple, rapid, and conveniently applied to paraquat analysis in natural water and agricultural samples for on-site analysis.

Keywords : paraquat ; sodium dithionite ; test kit ; photometer ; magnetic stirrer

***Corresponding author. E-mail** : phoonthawee.sae@mahidol.edu

บทนำ

พาราควอต (1,1'- dimethyl – 4,4'- bipyridinium dichloride) เป็นสารเคมีที่ใช้สำหรับกำจัดวัชพืชประเภทไม่เลือกทำลายชนิดสัมผัส (non-selective contact herbicide) มีความสามารถกำจัดและควบคุมวัชพืชโดยเฉพาะวัชพืชใบกว้างหรือหญ้าอย่างรวดเร็ว ด้วยเหตุนี้ พาราควอตจึงเป็นสารกำจัดวัชพืชที่นิยมนำมาใช้ในการเกษตรอย่างแพร่หลายมากกว่า 130 ประเทศ นับตั้งแต่ปี ค.ศ. 1962 เป็นต้นมา (Dinis-Oliveira *et al*., 2008) พาราควอตสามารถสลายตัวผ่านกระบวนการจุลชีววิทยา (microbiological process) และกระบวนการเคมีเชิงแสง (photochemical process) อย่างไรก็ตาม กระบวนการสลายตัวดังกล่าวเกิดขึ้นได้ช้าโดยมีครึ่งชีวิต (half-life, $t_{1/2}$) อยู่ในดินได้นานถึง 13 ปี (Rashidipour *et al*., 2019) ในปัจจุบันพาราควอตถูกนำมาใช้ในปริมาณที่มากเกินความจำเป็น จึงทำให้เกิดการตกค้างและปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม แม้จะมีความเข้มข้นของพาราควอตปนเปื้อนในระดับ 3 - 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Roberts & Reigart, 2013) แต่ก็ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ เช่น ความเป็นพิษที่รุนแรงต่อผิวหนัง ปอดและไต รวมทั้งมีส่วนในการก่อโรคพาร์กินสัน (Nasir *et al*., 2018; Zou, He, Cao, & Li, 2015) นอกจากนี้ พาราควอตยังมีความเป็นพิษต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมและสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำ เช่น สาหร่าย ปลาและสัตว์น้ำชนิดต่าง ๆ ด้วยเหตุนี้ องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมอเมริกา หรือ United State Environmental Protection Agency (US EPA) จึงกำหนดความเข้มข้นสูงสุดของพาราควอตสำหรับน้ำดื่มอยู่ที่ 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร และกำหนดค่าความปลอดภัยของวัตถุเจือปนอาหาร หรือ Acceptable Daily Intake (ADI) เท่ากับ 0.0045 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมต่อวัน สำหรับประเทศไทย กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ได้กำหนดความเข้มข้นสูงสุดของพาราควอตที่สามารถพบได้ในแหล่งน้ำธรรมชาติสำหรับสัตว์น้ำจืดอยู่ที่ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และสำนักงานการอาหารและยา กระทรวงสาธารณสุข ได้ประกาศในราชกิจจานุเบกษาโดยกำหนดความเข้มข้นสูงสุดของพาราควอตอยู่ในช่วง 0.005 – 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ขึ้นอยู่กับประเภทและชนิดของอาหารหรือผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ("Government Gazette," 2017, 18th September)

งานวิจัยก่อนหน้า ได้รายงานเทคนิคการวิเคราะห์พาราควอตอยู่หลากหลายวิธี เช่น สเปกโตรเมตรี (spectrometry) (Dominguez, Insausti, Ilari, & Zanini, 2019; Dong *et al*., 2018; Sha *et al*., 2017), ไฟฟ้าเคมี (electrochemistry) (de Figueiredo-Filho, Baccarin, Janegitz, & Fatibello-Filho, 2017; Nasir *et al*., 2018; Pacheco, Barbosa, Quadrado, Fajardo, & Dias, 2019; Zhang *et al*., 2019), ระบบการไหลโฟลอินเจคชันอะนาไลซิส (flow injection analysis, FIA) (Chuntib & Jakmunee, 2015; dos Santos, Infante, & Masini, 2010; Infante, Morales-Rubio, de la Guardia, & Rocha, 2008) และเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (high performance liquid chromatography, HPLC) (Ou, Wang, Chen, Chen, & Chen, 2018; Wen *et al*., 2018; Zou *et al*., 2015) ถึงแม้ว่า เทคนิคการวิเคราะห์เหล่านี้จะมีประสิทธิภาพสูงและมีความจำเพาะเจาะจงต่อการวิเคราะห์ปริมาณพาราควอต อย่างไรก็ตาม กระบวนการในการวิเคราะห์นั้นใช้เวลานาน มีความยุ่งยากในการใช้งานเครื่องมือวิเคราะห์ ค่าใช้จ่ายสำหรับการวิเคราะห์ค่อนข้างสูง และกระบวนการวิเคราะห์จะต้องดำเนินการภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ดังนั้น วิธีการวิเคราะห์แบบภาคสนาม ที่ใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่สั้น รู้ผลเร็ว น่าจะมีความเหมาะสมสำหรับการตรวจสอบการตกค้างและเจือปนพาราควอตในสิ่งแวดล้อมได้ดี

เทคนิคการวิเคราะห์อาศัยการวัดสี (colorimetric analysis) เป็นเทคนิคที่สามารถพัฒนาเป็นวิธีการวิเคราะห์แบบภาคสนามได้ เนื่องจากเป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่ง่าย และสามารถแสดงผลได้อย่างชัดเจน ซึ่งการแสดงผลของสีจะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาและสารเคมีที่เลือกใช้เพื่อให้เกิดความจำเพาะเจาะจงต่อสารที่ต้องการวิเคราะห์ สำหรับการวิเคราะห์

พาราควอตนั้น นิยมใช้ปฏิกิริยารีดักชันที่อาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่างพาราควอตกับตัวรีดิวซ์ (reducing agent) เช่น กรดแอสคอร์บิค (ascorbic acid) (Chang, Tung, Gu, Yen, & Cheng, 2018; Infante *et al.*, 2008; Maya, Estela, & Cerda, 2011; Shivhare & Gupta, 1991), โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (sodium borohydride, $NaBH_4$) (Rai, Das, & Gupta, 1997; Siangproh, Somboonsuk, Chailapakul, & Songsrirote, 2017), และโซเดียมไดไธโอไนต์ (sodium dithionite, $Na_2S_2O_4$) (Chuntib & Jakmunee, 2015; Kuan, Lin, Yen, Wang, & Cheng, 2016; Lima *et al.*, 2018) ภายใต้สภาวะเบส เกิดเป็นไอออนเรดิคอลอิสระ (free radical ion) ของพาราควอตที่มีสีน้ำเงินซึ่งให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) ที่ 603 นาโนเมตร สำหรับการเลือกใช้ตัวรีดิวซ์แต่ละชนิดนั้น ก็มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไปที่ต้องคำนึง อาทิเช่น เวลาในการทำปฏิกิริยา ระดับความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์ รวมถึงความไวในการทำปฏิกิริยา (reaction time) และความไวในการวิเคราะห์ (sensitivity) เป็นต้น

ในปัจจุบัน เริ่มมีชุดทดสอบพาราควอต (commercial paraquat test kit) ถูกวางจำหน่ายและนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย ซึ่งส่วนใหญ่จะมีการแสดงผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (qualitative analysis) ได้แก่ ชุดทดสอบพาราควอตจาก Syngenta® และ ชุดทดสอบพาราควอตจากศูนย์วิทยาศาสตร์การแพทย์เชียงใหม่ กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข โดยจะแปรผลเป็นสองแนวทาง คือ ผลเชิงลบ (negative result) หมายถึง ไม่พบพาราควอตในตัวอย่าง และผลเชิงบวก (positive result) หมายถึง พบพาราควอตเป็นองค์ประกอบในตัวอย่าง ชุดทดสอบประเภทนี้ เป็นแบบการคัดกรองเบื้องต้น (screening) เพื่อระบุว่าพบ/ไม่พบพาราควอตเท่านั้น ไม่สามารถระบุระดับความเข้มข้นที่ตกค้างได้

ชุดทดสอบพาราควอตแบบกึ่งปริมาณวิเคราะห์ (semi-quantitative analysis) ได้ถูกพัฒนาต่อมาสำหรับการรายงานผลของพาราควอตเป็นช่วงปริมาณที่ตรวจพบจากความเข้มสีของตัวอย่างหลังการทำปฏิกิริยาเปรียบเทียบกับชุดแถบสีมาตรฐานด้วยตาเปล่า ตัวอย่างชุดทดสอบที่ได้มีการพัฒนา เช่น ชุดทดสอบพาราควอตจากอนุสิทธิบัตรเลขที่ 5136 โดย วิภารัตน์ เชื้อชวด และคณะ โดยสามารถอ่านระดับความเข้มข้นของพาราควอตได้ตั้งแต่ 0.2 ถึง 40 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาชุดทดสอบโดยกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข อีกด้วย (Leuprasert, Boonsathorn, & Kaewbutdee, 2016) อย่างไรก็ตาม ชุดทดสอบแบบกึ่งปริมาณวิเคราะห์นี้ จะยังมีข้อด้อยอยู่ คือ ความผิดพลาดจากการอ่านสีของตัวอย่างเทียบกับแถบสีมาตรฐาน และส่งผลต่อความถูกต้องและแม่นยำในการวิเคราะห์อีกด้วย

งานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาชุดทดสอบภาคสนามสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ (quantitative analysis) ของพาราควอตที่ปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร แนวคิดการพัฒนาชุดทดสอบแบบการวิเคราะห์ปริมาณนี้ ได้มีการเสนอขอจดอนุสิทธิบัตรโดย วิภารัตน์ เชื้อชวด และคณะ (เลขที่คำขอ 1703001553, เลขที่อนุสิทธิบัตร 14975) อย่างไรก็ตาม ชุดทดสอบที่พัฒนาขึ้นนี้เป็นแบบ “ขั้นตอนเดียวเบ็ดเสร็จ หรือ all-step-in-one” ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก คือ (1) การสกัดพาราควอต (2) การคนเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมี และ (3) การวัดความเข้มสีเพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้น โดยชุดทดสอบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย เครื่องโฟโตเมตรีแบบพกพา (hand-held photometer) ซึ่งทำงานร่วมกันกับเครื่องคนสารแบบแม่เหล็ก (magnetic stirrer) ผ่านการควบคุมระบบการทำงานด้วยโปรแกรมที่เขียนลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ (printed-circuit board) ในงานนี้ ผู้วิจัยเลือกปฏิกิริยารีดักชันของพาราควอตกับโซเดียมไดไธโอไนต์สำหรับการวัดสีน้ำเงินของไอออนเรดิคอลอิสระของพาราควอต ตัวอย่างแหล่งน้ำธรรมชาติและตัวอย่างน้ำสกัดของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรจะถูกบรรจุ

ในขวดทำปฏิกิริยาที่วางอยู่ในเครื่องโฟโตมิเตอร์ ซึ่งสามารถเกิดการสกัด (ในกรณีของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร) และสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ทันทีเมื่อมีการผสมกับโซเดียมไดไธโอไนต์ และอ่านค่าการดูดกลืนแสงได้ทันทีภายในเวลา 1 นาที ชุดทดสอบที่พัฒนาขึ้นนี้ สามารถแสดงผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณ ให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว มีความสะดวกและสามารถนำไปประยุกต์ในการวิเคราะห์ตัวอย่างในภายนอกห้องปฏิบัติการหรือการวิเคราะห์แบบภาคสนามได้

วิธีดำเนินการวิจัย

1. สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเกรดสำหรับวิเคราะห์ (analytical reagent, AR, grade) และถูกเตรียมเป็นสารละลายด้วย deionized water ตลอดการศึกษา สารละลายมาตรฐานพาราควอตเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เตรียมโดยชั่ง paraquat dichloride hydrate ($C_{12}H_{14}Cl_2N_2 \cdot xH_2O$, Sigma Aldrich, Germany) 0.1381 กรัม ละลายน้ำแล้วปรับปริมาตรเป็น 100.0 มิลลิลิตร เก็บในขวดพลาสติกที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส สารละลายมาตรฐานใช้งาน (working standard solution) สำหรับการสร้างกราฟมาตรฐาน เตรียมจากการเจือจางสารละลายมาตรฐานพาราควอตเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.5 – 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

สารละลายรีเอเจนท์ที่ใช้สำหรับการเกิดสี (color-forming reagent) เตรียมโดยการชั่ง sodium dithionite ($Na_2S_2O_4$,Sigma Aldrich, Germany) 0.1 กรัม จากนั้นละลายในสารละลาย sodium hydroxide (NaOH, Merck, Germany) ความเข้มข้น 0.06 โมลต่อลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 10.00 มิลลิลิตร (คำแนะนำ: สารละลาย sodium dithionite ไม่เสถียร จึงควรนำมาใช้ภายใน 3 ชั่วโมง หลังจากการเตรียม)

2. ตัวอย่าง

ตัวอย่างน้ำธรรมชาติ จำนวน 2 ตัวอย่าง ได้เก็บมาจากพื้นที่บริเวณที่มีการทำเกษตรกรรมจากจังหวัดนนทบุรี ซึ่งเป็นตัวอย่างน้ำจากสวนผักกาดหอม เมื่อเก็บตัวอย่างแล้ว ได้นำขวดตัวอย่างน้ำดังกล่าวเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ในการวิเคราะห์ปริมาณพาราควอต นำตัวอย่างน้ำออกมาให้มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง จากนั้นดูดตัวอย่างน้ำปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร เติมลงในขวดทำปฏิกิริยาเพื่อทำการทดลองตามหัวข้อ 4 ต่อไป

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร คือ ตัวอย่างหัวไชเท้าที่ซื้อจากตลาดสดจำนวน 2 ตัวอย่าง ในการวิเคราะห์ปริมาณพาราควอต เตรียมตัวอย่างโดยการหั่นผักให้มีขนาดเล็ก จากนั้นชั่งตัวอย่างหัวไชเท้าที่หั่นแล้ว 10.0 กรัม เติมน้ำ 100 มิลลิลิตร และคนเพื่อทำการสกัดเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นรอให้หัวไชเท้าตกลงไปก้นภาชนะแล้วดูดน้ำสกัดปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร เติมลงในขวดทำปฏิกิริยาเพื่อทำการทดลองตามหัวข้อ 4 ต่อไป

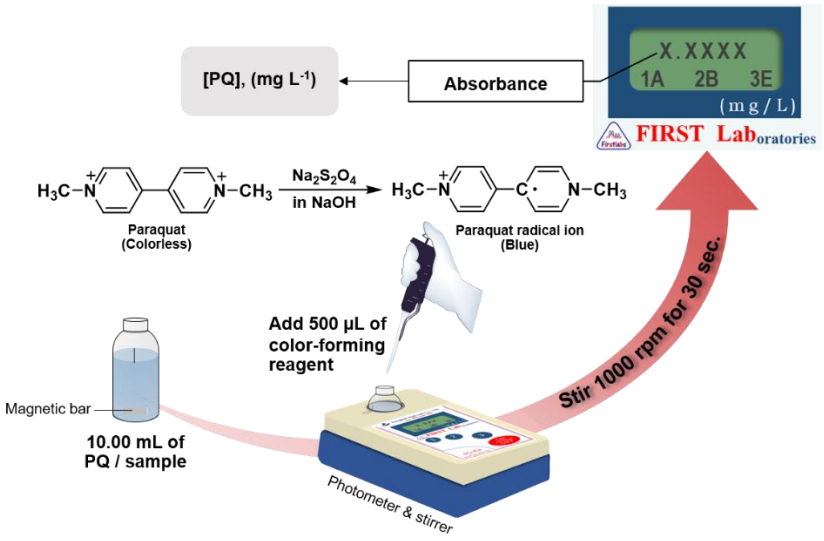
3. อุปกรณ์ตรวจวัดสีแบบพกพา

อุปกรณ์ตรวจวัดสีเป็นเครื่องโฟโตมิเตอร์แบบพกพา (hand-held photometer) ที่มีหลอดไดโอดเปล่งแสง (แอลอีดี) หรือ light-emitting diode (LED) ความยาวคลื่น 590 นาโนเมตร เป็นแหล่งกำเนิดแสง และมีโฟโตไดโอด (photodiode) เป็นตัววัดความเข้มแสง เครื่องโฟโตมิเตอร์แบบพกพานี้ ถูกเชื่อมต่อกับเครื่องคนสารแบบแม่เหล็ก และมีการควบคุมระบบการทำงานผ่านโปรแกรมด้วยแผ่นวงจรพิมพ์ (printed circuit board) ทำให้สามารถคนสารละลายเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีและวัด

ความเข้มสีแสดงออกมาในรูปของค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ได้ทันที ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสีแบบพกพานี้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท บางกอกไฮแล็บ จำกัด

4. วิธีการตรวจวัดปริมาณพาราควอตด้วยชุดทดสอบ

กระบวนการวิเคราะห์แสดงดังในภาพที่ 1 โดยเริ่มจากการเติมสารละลายมาตรฐานพาราควอตหรือตัวอย่าง ปริมาตร 10.0 มิลลิลิตร ลงในขวดแก้วทำปฏิกิริยา จากนั้นเติมสารละลายรีเอเจนท์ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร แล้วคนสารละลายให้เข้ากันโดยใช้ความเร็วการหมุนของเครื่องคนสารแบบแม่เหล็กที่ 1000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นเครื่องโฟโตมิเตอร์แบบพกพาจะอ่านค่าการดูดกลืนแสงในขณะที่สารละลายหยุดนิ่งหลังจากการคนสารที่เวลา 10 วินาที นำค่าการดูดกลืนแสงที่อ่านได้จากสารละลายมาตรฐานไปสร้างกราฟมาตรฐาน เพื่อใช้ในการคำนวณหาปริมาณพาราควอตในตัวอย่างต่อไป



ภาพที่ 1 กระบวนการวิเคราะห์ปริมาณพาราควอตด้วยชุดทดสอบพาราควอตด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดสีแบบพกพา

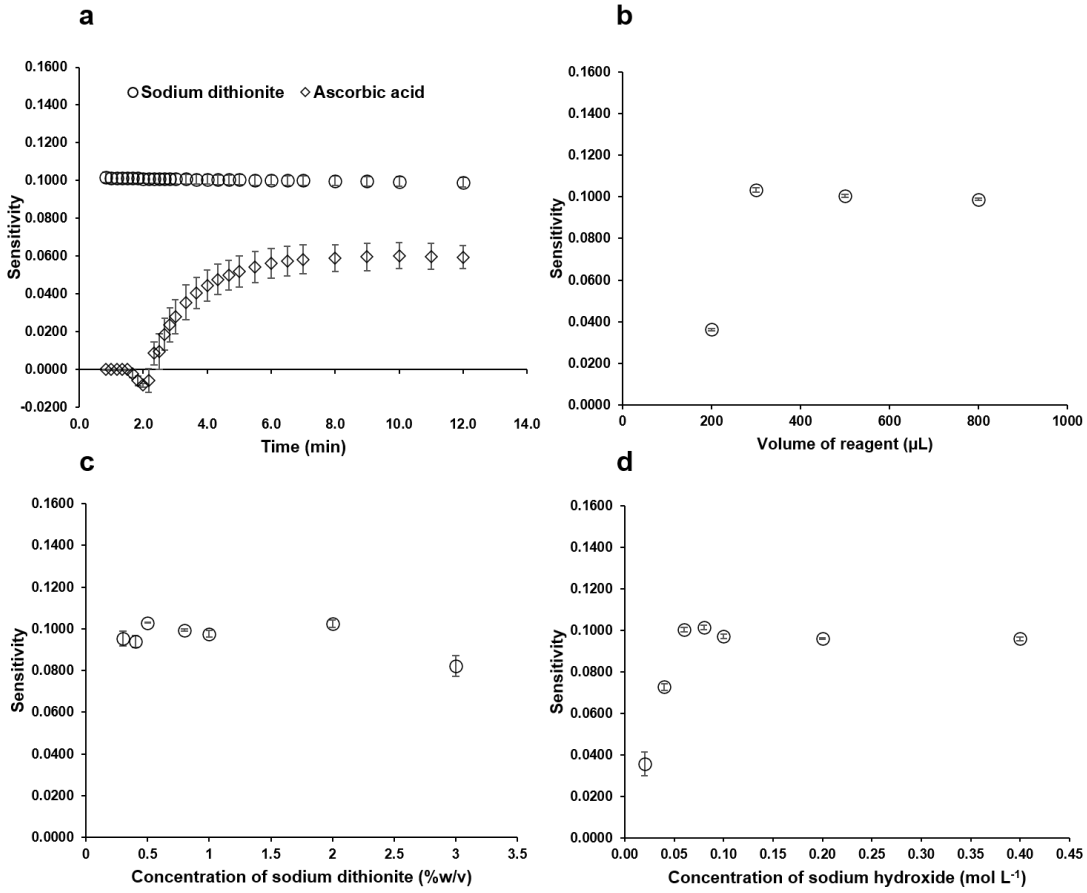
ผลการวิจัย

1. สภาวะที่เหมาะสมสำหรับชุดทดสอบพาราควอตด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดสีแบบพกพา

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยทางกายภาพและปัจจัยทางเคมีบางประการ ที่ส่งผลต่อความไวในการวิเคราะห์ปริมาณพาราควอต ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 2

การเกิดปฏิกิริยารีดักชันของพาราควอตนั้น ต้องอาศัยตัวรีดิวซ์ซึ่งเป็นสารละลายรีเอเจนท์สำหรับการเกิดสีน้ำเงินของไอออนเรดิคอลอิสระของพาราควอต ในงานนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาชนิดของตัวรีดิวซ์ 2 ชนิด คือ โซเดียมไดไธโอไนต์และกรดแอสคอร์บิคที่ระดับความเข้มข้น 0.2 %w/v ภายใต้สภาวะเบสของโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3.0 โมลต่อลิตร ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 2a

ปัจจัยถัดมาที่ศึกษา คือ ปริมาตรสารละลายรีเอเจนท์ หรือ สารละลายโซเดียมไดไธโอไนต์ ที่มีผลต่อความไวในการวิเคราะห์ ได้ทำการศึกษาปริมาตรสารละลายรีเอเจนท์ในช่วง 0.2 ถึง 0.8 มิลลิลิตร โดยทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานพาราควอตปริมาตร 10.0 มิลลิลิตร ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 2b



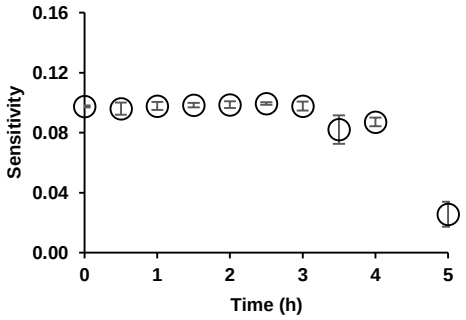
ภาพที่ 2 อิทธิพลของปัจจัยทางกายภาพ: (ก) ชนิดของตัวรีดิวซ์ และ (ข) ปริมาตรของสารละลายรีเอเจนท์ และปัจจัยทางกายภาพทางเคมี : (ค) ความเข้มข้นของสารละลาย sodium dithionite และ (ง) ความเข้มข้นของสารละลาย sodium hydroxide ที่ส่งผลต่อความไวในการวิเคราะห์ปริมาณพาราควอต

อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไดไธโอไนต์ที่เหมาะสมสำหรับการรีดิวซ์พาราควอตไอออนให้เกิดเป็นไอออนเรดิคอลอิสระของพาราควอตที่มีสีน้ำเงิน แสดงในภาพที่ 2c ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไดไธโอไนต์ตั้งแต่ 0.3 ถึง 3.0 %(w/v) พบว่าความไวในการวิเคราะห์จากการใช้ความเข้มข้นที่ 0.3 ถึง 2.0 %(w/v) มีความไวในการวิเคราะห์ที่ไม่แตกต่างกัน

การเกิดปฏิกิริยารีดักชันของพาราควอตนั้น ต้องอาศัยสารละลายโซเดียมไดไธโอไนต์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์พาราควอตไอออนเป็นไอออนเรดิคอลอิสระภายใต้สภาวะเบสของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ช่วงความเข้มข้น 0.02 – 0.40 โมลต่อลิตร ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 2d

2. ความเสถียรของสารละลายรีเอเจนท์

ผู้วิจัยได้ศึกษาความเสถียรของสารละลายรีเอเจนท์ คือ สารละลายโซเดียมไดไธโอไนต์ที่ความเข้มข้น 1.0 %(w/v) ว่าสามารถใช้งานได้นานเพียงใดหลังจากการเตรียมและใช้งานที่อุณหภูมิห้อง ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 3 พบว่าสารละลายโซเดียมไดไธโอไนต์ที่เตรียมขึ้นใหม่ (ที่ชั่วโมงที่ 0) จนถึงชั่วโมงที่ 3 หลังจากการเตรียมนั้น มีค่าความไวในการวิเคราะห์ใกล้เคียงกันและคงที่ แต่เมื่อเวลาผ่านไปมากกว่า 3 ชั่วโมงเป็นต้นไป ความไวในการวิเคราะห์จะค่อยๆ ลดลง และเห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนเมื่อตั้งทิ้งไว้นานถึงชั่วโมงที่ 5 หลังจากการเตรียม ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากโซเดียมไดไธโอไนต์ในรูปของสารละลายนั้นไม่เสถียรและสามารถเกิดการออกซิไดซ์กับออกซิเจนในอากาศได้ ดังนั้น ผู้วิจัยแนะนำให้ใช้สารละลายโซเดียมไดไธโอไนต์ภายใน 3 ชั่วโมง หลังจากการเตรียมในแต่ละวัน (Chuntib & Jakmunee, 2015)



ภาพที่ 3 การศึกษาความเสถียรของสารละลายรีเอเจนท์ sodium dithionite หลังจากการเตรียมตั้งแต่ชั่วโมงที่ 0 ถึง 5

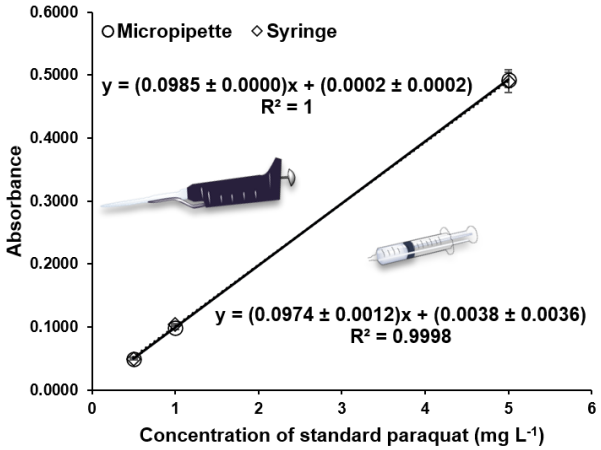
3. รูปแบบการใช้งานของสารรีเอเจนท์ sodium dithionite

สืบเนื่องจาก ความเสถียรของสารละลายโซเดียมไดไธโอไนต์ที่ต้องใช้ภายใน 3 ชั่วโมง (ภาพที่ 3) หลังจากการเตรียมในแต่ละครั้ง ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาการใช้โซเดียมไดไธโอไนต์ในรูปของของแข็ง (น้ำหนักประมาณ 5 มิลลิกรัม โดยมีขนาดเทียบเท่ากับหัวไม้ขีดไฟขนาดเล็ก) แทนรูปแบบสารละลาย เพื่อการใช้งานที่ง่ายและหมดกังวลกับระยะเวลาหลังจากการเตรียมเป็นสารละลาย จากการศึกษาพบว่า การใช้โซเดียมไดไธโอไนต์ในรูปของของแข็งแทนรูปแบบสารละลายนั้น ยังคงให้ค่าการดูดกลืนแสงที่แต่ละความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานของพาราควอตที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยทดสอบด้วยวิธีทางสถิติ paired *t*-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (t_{stat}: 0.97 < $t_{critical}$: 3.18)

4. อุปกรณ์สำหรับการถ่ายเทสารตัวอย่างและสารรีเอเจนท์

การพัฒนาชุดทดสอบสำหรับการใช้งานภายนอกห้องปฏิบัติการ หรือ งานภาคสนามนั้น ควรคำนึงถึงการใช้งานที่ง่ายและต้นทุนการผลิตที่ต่ำ อุปกรณ์สำหรับการถ่ายเทสารตัวอย่างและสารละลายรีเอเจนท์เป็นปัจจัยหนึ่งที่ผู้ใช้งานควรใช้งานได้สะดวก และหาง่ายในท้องตลาด ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาการใช้หลอดฉีดยาพลาสติกขนาด 10 มิลลิลิตร สำหรับการถ่ายเทและควบคุมปริมาตรของสารตัวอย่าง สารละลายมาตรฐาน และการใช้หลอดฉีดยาพลาสติกขนาด 1 มิลลิลิตร สำหรับการถ่ายเท

สารละลายรีเอเจนท์แทนอุปกรณ์ไมโครปิเปตที่มีราคาแพง ผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 4 พบว่าการใช้อุปกรณ์ทั้ง 2 ประเภท คือ หลอดฉีดยาพลาสติกทั้งสองขนาดและไมโครปิเปตนั้น ให้ค่าการดูดกลืนแสงที่แต่ละความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานพาราควอตที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยทดสอบด้วยวิธีทางสถิติ paired *t*-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (t_{stat}: 1.12 < $t_{critical}$: 2.78)



ภาพที่ 4 การเปรียบเทียบอุปกรณ์ในการถ่ายเทและควบคุมปริมาตรสารตัวอย่างและสารละลายรีเอเจนท์

5. การศึกษาการรบกวนจากของไอออนบางชนิดต่อการวิเคราะห์ปริมาณพาราควอต

ตัวอย่างน้ำอาจมีไอออนบางชนิดที่รบกวนผลการวิเคราะห์ปริมาณพาราควอตด้วยการใช้ชุดทดสอบที่พัฒนาขึ้นนี้ ผู้วิจัยจึงได้ทดสอบการรบกวนของไอออนบางชนิด โดยการเติมไอออนที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ลงในสารละลายมาตรฐานพาราควอตความเข้มข้น 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 1 โดยแสดงขีดจำกัดการรบกวน (tolerance limit) ของไอออนชนิดต่าง ๆ ซึ่งความเข้มข้นที่แสดงในตารางนั้น พิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดกลืนแสงไม่มากกว่าหรือน้อยกว่า 5% (± 5%) ระหว่างสารละลายมาตรฐานพาราควอตบริสุทธิ์และสารละลายมาตรฐานพาราควอตที่มีไอออนเจือปนอยู่

ตารางที่ 1 ขีดจำกัดการรบกวนของไอออนบางชนิดในการวิเคราะห์พาราควอตเข้มข้น 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร

Foreign species	Tolerance limit (mg L^{-1})	Normal found in natural (mg L^{-1})
Cl^-	200	220 [a]
NO_3^-	2,000	17 [a]
CO_3^{2-}	1,500	958 [a]
SO_4^{2-}	2,500	233 [a]
PO_4^{3-}	800	0.11 - 0.37 [b]
Na^+	700	274 [a]
K^+	700	59 [a]

[a] Wetzel, 2001 [b] Fadiran, Dlamini, & Mavuso, 2008

6. คุณลักษณะในการวิเคราะห์ของชุดทดสอบสำหรับพาราควอตด้วยอุปกรณ์วัดสีแบบพกพา

ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม คุณลักษณะในการวิเคราะห์ของชุดทดสอบพาราควอตด้วยอุปกรณ์วัดสีแบบพกพา พบว่ากราฟเส้นตรงมาตรฐานที่ช่วงความเข้มข้น 0.5 – 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยตัวอย่างสมการเส้นตรง คือ ค่าการดูดกลืนแสง = [(0.0968 ± 0.0001)ความเข้มข้นของพาราควอต] – (0.0057 ± 0.0007) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, r^2) เท่ากับ 1 ชุดทดสอบนี้มีขีดจำกัดของการวิเคราะห์ (LOD: 3SD/slope) อยู่ที่ 0.022 มิลลิกรัมต่อลิตร ขีดจำกัดในการวัดเชิงปริมาณ (LOQ: 10SD/slope) อยู่ที่ 0.075 มิลลิกรัมต่อลิตร ชุดทดสอบนี้มีความเที่ยงในการวิเคราะห์ที่ดี (2.67 %RSD และ 0.78 %RSD เมื่อทำการทดลองจำนวน 10 ครั้ง โดยใช้สารละลายมาตรฐานพาราควอตเข้มข้น 1.0 และ 5.0 มิลกรัมต่อลิตร ตามลำดับ)

7. การหาปริมาณพาราควอตในตัวอย่าง

ผู้วิจัยได้ทดสอบการใช้งานของชุดทดสอบพาราควอตที่พัฒนาขึ้นในการวิเคราะห์พาราควอตในตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ซึ่งมีการเก็บตัวอย่างน้ำจากบริเวณที่มีการทำการเกษตรและตัวอย่างหัวไชเท้าจากตลาดสด ผลการทดลองพบว่า ไม่พบสารตกค้างพาราควอตในตัวอย่าง อาจเนื่องจากตัวอย่างทั้งหมดมีปริมาณพาราควอตที่ต่ำกว่าขีดจำกัดของการวิเคราะห์

ผู้วิจัยจึงได้ทดสอบความแม่นของวิธีที่พัฒนาขึ้น จากการศึกษาร้อยละการกลับคืน (% recovery) โดยการเติมสารละลายมาตรฐานพาราควอตเข้มข้น 5.00 มิลลิกรัมต่อลิตรลงไปในตัวอย่าง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์จากการใช้ชุดทดสอบ ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์พบว่าร้อยละการกลับคืนของตัวอย่างน้ำอยู่ในช่วง 102-114% และตัวอย่างหัวไชเท้าในช่วง 90-128%

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณพาราควอตในตัวอย่าง

ตัวอย่าง	Spiked PQ (mg L^{-1})	Found PQ b (mg L^{-1}, n=3)	RSD (%, n=3)	Recovery (%)
แหล่งน้ำเพาะปลูก 1	5.00	5.36 ± 0.21	3.9	114
แหล่งน้ำเพาะปลูก 2	5.00	5.17 ± 0.34	6.6	102
หัวไชเท้า 1	5.00	5.42 ± 0.12	2.2	90
หัวไชเท้า 2	5.00	6.86 ± 0.49	7.1	128

วิจารณ์ผลการวิจัย

1. สภาวะที่เหมาะสมสำหรับชุดทดสอบพาราควอตด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดสีแบบพกพา

จากผลการทดลองในภาพที่ 2a พบว่าการใช้โซเดียมไดไธโอไนต์เป็นตัวรีดิวซ์สามารถทำปฏิกิริยารีดักชันเกิดเป็นไอออนเรดิคอลอิสระสีน้ำเงินสูงสุดได้ภายใน 1 นาที ในขณะที่กรดแอสคอร์บิคใช้เวลาประมาณ 7- 8 นาที สำหรับการเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลของปฏิกิริยา นอกจากนี้ การใช้โซเดียมไดไธโอไนต์เป็นตัวรีดิวซ์นั้น ยังให้ความไวในการวิเคราะห์ที่มากกว่าการใช้

กรดแอสคอร์บิคเป็นตัวรีดิวซ์อีกด้วย ถึงแม้ว่าจะมีรายงานก่อนหน้านี้ (Maya *et al*., 2011) ระบุว่าในสภาวะที่เหมาะสมของการใช้กรดแอสคอร์บิคเป็นตัวรีดิวซ์จำเป็นต้องมีโพแทสเซียมไอโอเดต (potassium iodate, KIO_3) และกรดเอทิลีนไดอามีนเตตราอาเซติก (Ethylenediaminetetraacetic acid, EDTA) ร่วมด้วยนั้น ผู้วิจัยเล็งเห็นว่า การใช้โซเดียมไดไธโอไนต์เป็นตัวรีดิวซ์สำหรับการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของพาราควอตนั้น จะเหมาะสมกับการพัฒนาชุดทดสอบพาราควอตนี้ เนื่องจากใช้ชนิดสารเคมีที่น้อยกว่านั่นเอง

ผลการทดลองในภาพที่ 2b พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาตรของสารละลายรีเอเจนท์จาก 0.2 มิลลิลิตร เป็น 0.3 มิลลิลิตร ส่งผลให้ความไวในการวิเคราะห์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และมีความไวในการวิเคราะห์ค่อนข้างคงที่เมื่อใช้ปริมาตรสารละลายรีเอเจนท์ตั้งแต่ 0.3 ถึง 0.8 มิลลิลิตร โดยพิจารณาจากแถบความคลาดเคลื่อนมีค่าไม่แตกต่างกัน ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากอัตราส่วนจำนวนโมลของโซเดียมไดไธโอไนต์นั้นมากเกินพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยาตามสมการเคมี ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สารละลายรีเอเจนท์ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร เนื่องจากให้ความไวในการวิเคราะห์ที่เพียงพอและง่ายต่อการกำหนดปริมาตรสำหรับการประยุกต์ในชุดทดสอบพาราควอตนี้

ผลการทดลองในภาพที่ 2 c ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไดไธโอไนต์ตั้งแต่ 0.3 ถึง 3.0 %(w/v) พบว่าความไวในการวิเคราะห์จากการใช้ความเข้มข้นที่ 0.3 ถึง 2.0 %(w/v) มีความไวในการวิเคราะห์ที่ไม่แตกต่างกัน ความไวในการวิเคราะห์จะลดลงเล็กน้อยเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไดไธโอไนต์ที่ 3.0 %(w/v) อาจจะเนื่องมาจากความไม่เสถียรที่ความเข้มข้นสูง โดยที่ความเข้มข้นนี้ ผู้วิจัยจะได้กลิ่นไอระเหยอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม เพื่อให้มั่นใจว่าปริมาณของโซเดียมไดไธโอไนต์จะมากเกินพอสำหรับการรีดิวซ์พาราควอตไอออนในตัวอย่าง ในงานวิจัยนี้ จึงเลือกความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไดไธโอไนต์ที่ 1.0 %(w/v) เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสม

อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แสดงในภาพที่ 2d พบว่าความไวในการวิเคราะห์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 0.02 โมลต่อลิตรเป็น 0.04 และ 0.06 โมลต่อลิตรตามลำดับ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นตั้งแต่ 0.08 ถึง 0.40 โมลต่อลิตร พบว่าความไวในการวิเคราะห์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญจากการใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 0.06 โมลต่อลิตร ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.06 โมลต่อลิตร

นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังพบว่า ความเร็วในการคนสารตัวอย่างและสารละลายรีเอเจนท์ให้เป็นเนื้อเดียวกันนั้น ไม่มีผลต่อความไวในการวิเคราะห์ กล่าวคือ ทุก ๆ ความเร็วรอบที่ศึกษาตั้งแต่ 100 – 1,250 รอบต่อนาที (rpm) ให้ความไวในการวิเคราะห์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในงานนี้ ผู้วิจัยได้เลือกความเร็วในการคนสารละลายที่ 1,000 รอบต่อนาที เนื่องจากสามารถช่วยให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกันอย่างรวดเร็วโดยไม่เกิดการล้นกระฉอกออกนอกขวดแก้วทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ความเร็วที่ 1,000 รอบต่อนาที ยังสามารถลดระยะเวลาของกระบวนการหลังการเติมตัวอย่างและสารละลายรีเอเจนท์ในขวดทำปฏิกิริยาได้อีกด้วย

3. รูปแบบการใช้งานของสารรีเอเจนท์ sodium dithionite

จากการศึกษาการใช้โซเดียมไดไธโอไนต์ในรูปของของแข็งแทนรูปแบบสารละลายนั้น ผู้วิจัยแนะนำการใช้งานสารรีเอเจนท์ sodium dithionite เป็น 2 กรณี คือ (1) หากทำการวิเคราะห์ในภาคสนาม และมีจำนวนตัวอย่างที่น้อย ควรใช้เป็นผงของแข็งโซเดียมไดไธโอไนต์ ตามด้วยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.06 โมลต่อลิตร ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร เนื่องจากการใช้งานที่สะดวกและมีความเสถียรที่มากกว่าเมื่ออยู่ในรูปของสารละลายโซเดียมไดไธโอไนต์ และ (2) หากทำการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการและมีจำนวนตัวอย่างที่มาก ควรเตรียมเป็นสารละลายโซเดียมไดไธโอไนต์ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะเหมาะสมกว่า

4. อุปกรณ์สำหรับการถ่ายเทสารตัวอย่างและสารรีเอเจนท์

การใช้อุปกรณ์ทั้ง 2 ประเภท คือ หลอดฉีดยาพลาสติกทั้งสองขนาดและไมโครปิเปตนั้น ให้ผลทดสอบที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญด้วยวิธีทางสถิติ paired *t*-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงให้เห็นว่า การใช้หลอดฉีดยาพลาสติกมีความเที่ยงในการวิเคราะห์เพียงพอสำหรับการถ่ายเทและควบคุมปริมาตรในชุดทดสอบนี้

5. การศึกษาการรบกวนจากของไอออนบางชนิดต่อการวิเคราะห์ปริมาณพาราควอต

จากตารางที่ 1 จะพบว่า ไอออนเกือบทุกชนิดมีขีดจำกัดการรบกวนที่สูงกว่าความเข้มข้นปกติที่สามารถพบได้ในน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติไม่มีผลรบกวนสำหรับการวิเคราะห์พาราควอตด้วยชุดทดสอบที่พัฒนาขึ้นนี้

6. คุณลักษณะในการวิเคราะห์ของชุดทดสอบสำหรับพาราควอตด้วยอุปกรณ์วัดสีแบบพกพา

จากคุณลักษณะในการวิเคราะห์ดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าชุดทดสอบที่สำหรับพาราควอตด้วยอุปกรณ์วัดสีแบบพกพาที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถใช้วิเคราะห์ปริมาณพาราควอตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ครอบคลุมระดับความเข้มข้นสูงสุดที่กำหนดให้พบไม่เกินในแหล่งน้ำธรรมชาติ อาหารและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร

7. การหาปริมาณพาราควอตในตัวอย่าง

ถึงแม้ว่าผลการทดลองพบว่า ไม่พบสารตกค้างพาราควอตในตัวอย่าง อาจเนื่องจากตัวอย่างทั้งหมดมีปริมาณพารา-ควอตที่ต่ำกว่าขีดจำกัดของการวิเคราะห์ อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยได้แสดงผลการวิเคราะห์พบว่าร้อยละการกลับคืนของตัวอย่างน้ำอยู่ในช่วง 102-114% และตัวอย่างหัวไชเท้าในช่วง 90-128% ซึ่งบ่งชี้ว่าชุดทดสอบสารพาราควอตนี้มีความแม่นยำ

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาชุดทดสอบสำหรับวิเคราะห์ปริมาณพาราควอตจากแหล่งน้ำธรรมชาติและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรโดยเครื่องโฟโตมิเตอร์แบบพกพาที่เชื่อมต่อกับเครื่องคนสารแบบแม่เหล็ก การวิเคราะห์อาศัยการดูดกลืนแสงของสารละลายภายใต้ปฏิกิริยารีดักชั่นของพาราควอตกับโซเดียมไดไธโอไนต์เข้มข้น 1.0 %(w/v) ในสภาวะเบสจากโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.06 โมลต่อลิตร ผลิตภัณฑ์เกิดเป็นเรดิคอลไอออนที่มีสีน้ำเงิน จากผลการวิจัย พบว่าชุดทดสอบที่ได้พัฒนาขึ้นนี้มีประสิทธิภาพในการนำไปใช้วิเคราะห์ปริมาณพาราควอต สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็วภายใน 1 นาที โดยมีขีดจำกัดการวิเคราะห์ที่ต่ำ (0.022 มิลลิกรัมต่อลิตร) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจวัดพาราควอตที่เกิดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนการศึกษาจากทุนเสริมสร้างนักวิจัยรุ่นใหม่ จากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล และขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี (PERCH-CIC) กระทรวงอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม และภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท บางกอกไฮแล็บ จำกัด สำหรับการอนุเคราะห์ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสีแบบพกพา

เอกสารอ้างอิง

Chang, T. H., Tung, K. H., Gu, P. W., Yen, T. H., & Cheng, C. M. (2018). Rapid Simultaneous Determination of Paraquat and Creatinine in Human Serum Using a Piece of Paper. *Micromachines (Basel), 9*(11).

Chuntib, P., & Jakmunee, J. (2015). Simple flow injection colorimetric system for determination of paraquat in natural water. *Talanta, 144*, 432-438.

de Figueiredo-Filho, L. C. S., Baccarin, M., Janegitz, B. C., & Fatibello-Filho, O. (2017). A disposable and inexpensive bismuth film minisensor for a voltammetric determination of diquat and paraquat pesticides in natural water samples. *Sensors and Actuators B: Chemical, 240*, 749-756.

Dinis-Oliveira, R. J., Duarte, J. A., Sanchez-Navarro, A., Remiao, F., Bastos, M. L., & Carvalho, F. (2008). Paraquat poisonings: mechanisms of lung toxicity, clinical features, and treatment. *Crital Reviews in Toxicology, 38*(1), 13-71.

Dominguez, M. A., Insausti, M., Ilari, R., & Zanini, G. P. (2019). Fluorescence enhancement novel green analytical method for paraquat herbicide quantification based on immobilization on clay. *Analyst, 144*(10), 3357-3363.

Dong, H., Zou, F., Hu, X., Zhu, H., Koh, K., & Chen, H. (2018). Analyte induced AuNPs aggregation enhanced surface plasmon resonance for sensitive detection of paraquat. *Biosensors and Bioelectronics, 117*, 605-612.

dos Santos, L. B., Infante, C. M., & Masini, J. C. (2010). Development of a sequential injection-square wave voltammetry method for determination of paraquat in water samples employing the hanging mercury drop electrode. *Analytical and Bioanalytical Chemistry, 396*(5), 1897-1903.

Fadiran, A. O., Dlamini, S. C., & Mavuso, A. (2008). A comparative study of the phosphate levels in some surface and ground water bodiesof Swaziland. *Bulletin of Chemical Society of Ethiopia, 22*(2), 197-206.

Ministry of Public Health Notification No. 387 B.E. 2560 (2017) Re: Food Containing Pesticide Residues (Pesticide Residues in Food). (2017, 18th September). *Government Gazette, 134*, 288. 8-33. (in Thai)

Infante, C. M., Morales-Rubio, A., de la Guardia, M., & Rocha, F. R. (2008). A multicommuted flow system with solenoid micro-pumps for paraquat determination in natural waters. *Talanta, 75*(5), 1376-1381.

Kuan, C. M., Lin, S. T., Yen, T. H., Wang, Y. L., & Cheng, C. M. (2016). Paper-based diagnostic devices for clinical paraquat poisoning diagnosis. *Biomicrofluidics, 10*(3), 034118.

Leuprasert, L., Boonsathorn, N., & Kaewbutdee, S. (2016). *Innovation Thailand 4.0 Research and Development of Insecticide and Herbicide Test Kits*. Bangkok: Department of Medical Sciences. (in Thai)

Lima, T. L., Nicoletti, M. A., Munhoz, C., Abreu, G. R. D., Magalhães, J. Z., Ricci, E. L. R., Fukushima, A. R. (2018). Determination of Paraquat in Several Commercially Available Types of Rice. *Food and Nutrition Sciences, 09*(12), 1368-1375.

Maya, F., Estela, J. M., & Cerda, V. (2011). Improved spectrophotometric determination of paraquat in drinking waters exploiting a Multisyringe liquid core waveguide system. *Talanta, 85*(1), 588-595.

Nasir, T., Herzog, G., Hebrant, M., Despas, C., Liu, L., & Walcarius, A. (2018). Mesoporous Silica Thin Films for Improved Electrochemical Detection of Paraquat. *ACS Sensors, 3*(2), 484-493.

Ou, S., Wang, Y., Chen, X.-B., Chen, J., & Chen, L. (2018). Determination of Paraquat in Environmental Water by Ionic Liquid-Based Liquid Phase Extraction with Direct Injection for HPLC. *Journal of Analytical Chemistry, 73*(9), 862-868.

Pacheco, M. R., Barbosa, S. C., Quadrado, R. F. N., Fajardo, A. R., & Dias, D. (2019). Glassy carbon electrode modified with carbon black and cross-linked alginate film: a new voltammetric electrode for paraquat determination. *Analytical and Bioanalytical Chemistry, 411*(15), 3269-3280.

Rai, M. K., Das, J. V., & Gupta, V. K. (1997). A sensitive determination of paraquat by spectrophotometry. *Talanta, 45*(2), 343-348.

Rashidipour, M., Maleki, A., Kordi, S., Birjandi, M., Pajouhi, N., Mohammadi, E., Davari, B. (2019). Pectin/Chitosan/Tripolyphosphate Nanoparticles: Efficient Carriers for Reducing Soil Sorption, Cytotoxicity, and Mutagenicity of Paraquat and Enhancing Its Herbicide Activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 67*(20), 5736-5745.

Roberts, J. R., & Reigart, J. R. (2013). Paraquat and Diquat. In *Recognition and Management of Pesticide Poisonings* (6th ed., pp. 110-116). Washington, DC: Office of Pesticide Programs U.S. Environmental Protection Agency.

Sha, O., Wang, Y., Yin, X., Chen, X., Chen, L., & Wang, S. (2017). Magnetic Solid-Phase Extraction Using Fe3O4@SiO2 Magnetic Nanoparticles Followed by UV-Vis Spectrometry for Determination of Paraquat in Plasma and Urine Samples. *Journal of Analytical Methods in Chemistry, 2017*, 8704639.

Shivhare, P., & Gupta, V. K. (1991). Spectrophotometric Method for the Determination of Paraquat in Water, Grain and Plant Materials. *Analyst, 116*, 391-393.

Siangproh, W., Somboonsuk, T., Chailapakul, O., & Songsrirote, K. (2017). Novel colorimetric assay for paraquat detection on-silica bead using negatively charged silver nanoparticles. *Talanta, 174*, 448-453.

Wen, D., Yang, Y., Xiang, P., Yu, F., Zheng, F., Liu, T., Ma, C. (2018). A novel approach for determination of paraquat based on dried blood spot (DBS) extraction and UHPLC-HRMS analysis. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 159*, 11-17.

Wetzel, R. G. (2001). 10 - SALINITY OF INLAND WATERS. In R. G. Wetzel (Ed.), *Limnology (Third Edition)* (pp. 170). San Diego: Academic Press.

Zhang, J., Lin, Z., Qin, Y., Li, Y., Liu, X., Li, Q., & Huang, H. (2019). Fabricated Electrochemical Sensory Platform Based on the Boron Nitride Ternary Nanocomposite Film Electrode for Paraquat Detection. *ACS Omega, 4*(19), 18398-18404.

Zou, T., He, P., Cao, J., & Li, Z. (2015). Determination of paraquat in vegetables using HPLC-MS-MS. *Journal of Chromatographic Science, 53*(2), 204-209.