

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การตรวจวัดปริมาณฟอสเฟตในน้ำผิวดินจังหวัดลพบุรี ด้วยระบบวิเคราะห์แบบไหลชนิดโฟลอินเจคชันอย่างง่าย

ปิยวรรณ พันสี^{1*} จันทิรา กออินทร์¹ และ ดวงใจ นาคะปรีชา²

¹ สาขาวิชาเคมี (หลักสูตรครุศาสตรบัณฑิต) คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

² ภาควิชาเคมี และศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

¹ 321 ถนนนารายณ์มหาราช ตำบลทะเลชุบศร อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี 15000

² 272 ถนนพระรามที่ 6 แขวงทุ่งพญาไท เขตราชเทวี กรุงเทพมหานคร 10400

รับบทความ 26 เมษายน 2563 แก้ไขบทความ 28 กรกฎาคม 2563 ตอรับบทความ 15 กันยายน 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบวิเคราะห์แบบไหลชนิดโฟลอินเจคชันอย่างง่ายสำหรับตรวจวัดปริมาณฟอสเฟตแบบอัตโนมัติในตัวอย่างน้ำด้วยวิธีโพลีเมอร์อินทรีย์ ในขั้นตอนการวิเคราะห์ตัวอย่างถูกฉีดเข้าสู่ระบบโดยก่อนตัวอย่างจะถูกผสมเข้ากับกระแสรีเอเจนต์ ซึ่งมีสารละลายกรดแอสคอร์บิกเป็นตัวรีดิวซ์ ทำให้เกิดเป็นสารเชิงซ้อนสีน้ำเงิน และตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารที่ 880 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ สภาวะที่เหมาะสมของระบบนี้คืออัตราการไหลของสารละลายตัวพา 2 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาตรของสารตัวอย่าง 1,000 ไมโครลิตร ความยาวท่อผสมสาร 60 เซนติเมตร และความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิก 0.020 โมลต่อลิตร ระบบนี้มีความน่าเชื่อถือ มีความไวในการวิเคราะห์สูง ใช้รีเอเจนต์ปริมาณน้อย และวิเคราะห์ได้รวดเร็ว (52 ตัวอย่างต่อ 1 ชั่วโมง) โดยขีดจำกัดของการตรวจวัด (LOD) มีค่าเท่ากับ 0.015 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร ค่าความเที่ยงตรง (% RSD) จากการฉีดสารละลายมาตรฐาน 0.50 มิลลิกรัม ฟอสฟอรัสต่อลิตรในระบบจำนวน 10 ครั้ง เท่ากับร้อยละ 1.81 ระบบนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำผิวดินในจังหวัดลพบุรีโดยจากการเทียบปริมาณวิเคราะห์ของระบบวิเคราะห์แบบไหลชนิดโฟลอินเจคชันกับวิธีมาตรฐาน พบว่าให้ผลสอดคล้องกันทางสถิติแบบ pair t-test ($t_{\text{stat}} 0.04 < t_{\text{crit}} 2.36$) ระบบวิเคราะห์แบบไหลชนิดโฟลอินเจคชันนี้ไม่มีผลการรบกวนจากอาร์เซนิตและซิลิเกตสำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำธรรมชาติ

คำสำคัญ : การวิเคราะห์แบบไหลชนิดโฟลอินเจคชัน; ฟอสเฟต; น้ำผิวดิน

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Determination of Phosphate in Surface Water of Lopburi Province Using a Simple Flow Injection Analytical System

Piyawan Phansi^{1*}, Jantira Koin¹ and Duangjai Nacapricha²

¹ Department of Chemistry (Education program), Faculty of Science and Technology,
Thepsatri Rajabhat University

² Department of Chemistry and Center of Excellence for Innovation in Chemistry, Faculty of Science,
Mahidol University

¹ 321 Naraimaharat Road, Muang District, Lopburi, 15000, Thailand

² 272 Rama VI Road, Phayathai, Ratchathewi, Bangkok, 10400, Thailand

Received 26 April 2020; Revised 28 July 2020; Accepted 15 September 2020

Abstract

A simple flow injection analytical system for an automatic determination of phosphate in water samples using the molybdenum blue method was developed. Samples were injected and mixed with ascorbic acid used as a reducing agent. The absorbance of the resulting molybdenum blue complex was measured at 880 nm by a spectrophotometer. The optimal conditions of this system were 2 mL/min of carrier flow rate, 1,000 μ L of sample volume, 60 centimeters of mixing tube length, and 0.020 mol/L of ascorbic acid. The proposed method showed reliability, high sensitivity, spend small amount of reagents and samples, and fast sample throughput (52 samples/hour). The limit of detection (LOD) was 0.015 mg P/L of phosphate. Precision obtained injecting a phosphate standard solution of 0.50 mg P/L ($n=10$) was 1.81%. This system can be applied to determination of phosphate content in surface water samples in Lopburi province by comparing with a standard method. It was found that obtained from the developed system agreed well with the standard method using the pair t -test ($t_{\text{stat}} 0.04 < t_{\text{crit}} 2.36$). This flow injection analysis system has no effect from arsenate and silicate interference for the analysis of natural water samples.

Keywords : Flow Injection Analysis; Phosphate; Surface Water

* Corresponding Author. Tel.: +668 3187 0971, E-mail Address: pphansi@gmail.com

1. บทนำ

มลพิษทางน้ำเป็นหนึ่งในปัญหาระดับโลกที่สำคัญ เนื่องจากคุณภาพน้ำส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตทุกชนิด [1] ซึ่งปัญหาของมลพิษทางน้ำมีสาเหตุหลักมาจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น สารเคมี น้ำทิ้งจากบ้านเรือน โรงงานอุตสาหกรรม หรือจากการเกษตร เป็นต้น [2], [3] นอกจากนี้ปัญหามลพิษทางน้ำยังเกิดได้เองตามธรรมชาติ เช่น การเกิดน้ำท่วมหรืออุทกภัย เป็นต้น ไม่กี่ปีที่ผ่านมาเกิดอุทกภัยครั้งใหญ่ที่สุดของประเทศไทยในรอบกว่า 50 ปีในช่วงเดือนกรกฎาคม - ธันวาคม [4]-[8] วิกฤตน้ำท่วมไม่เพียงส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของผู้นคนและสัตว์น้ำเท่านั้น แต่ยังส่งผลกระทบต่อภาคเศรษฐกิจต่าง ๆ ในประเทศไทยโดยเฉพาะการเกษตรและการประมง [5] การปนเปื้อนของน้ำเป็นผลมาจากอุทกภัยครั้งใหญ่ทำให้เกิดปัญหารุนแรง [8], [9] ดังนั้นวิธีที่รวดเร็วและเชื่อถือได้สำหรับการประเมินคุณภาพน้ำในหลาย ๆ พื้นที่ในช่วงเวลาเดียวกันจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการตรวจสอบคุณภาพน้ำได้อย่างทัน่วงที

ฟอสเฟตเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่สามารถบ่งชี้ในการประเมินคุณภาพน้ำในห้วงปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม ซึ่งฟอสฟอรัสเป็นสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชและสัตว์ ฟอสฟอรัสในรูปแบบออร์โธฟอสเฟต (PO_4^{3-}) เป็นรูปแบบที่ใช้โดยพืชที่มักพบในน้ำตามธรรมชาติ แต่หากปริมาณฟอสเฟตที่เพิ่มสูงขึ้นในน้ำช่วยกระตุ้นการเติบโตของแพลงก์ตอนและพืชน้ำ เช่น สาหร่ายเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว [10] พืชเหล่านี้ใช้ออกซิเจนจำนวนมากและป้องกันไม่ให้แสงแดดส่องลงสู่ น้ำ ทำให้ปลาและสิ่งมีชีวิตในน้ำจำนวนมากอาจตายเนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำต่ำและนำไปสู่มลพิษทางน้ำที่เรียกว่ายูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ซึ่งค่าฟอสเฟตในน้ำผิวดินไม่ควรเกิน 0.1 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร (mg P/L) [11] ดังนั้นการวิเคราะห์หาปริมาณฟอสเฟตในน้ำจึงมีความจำเป็นเพื่อสามารถนำข้อมูลมาวางแผนการในการป้องกันและแก้ไขปัญหามลพิษทางน้ำ

วิธีมาตรฐานที่นิยมนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณฟอสเฟตในน้ำคือวิธีโมลิบดีนัมบลู (Molybdenum Blue Method) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์โดยการเทียบสี (Colorimetric Method) คือการเกิดปฏิกิริยาระหว่างฟอสเฟตกับโมลิบดีนัมในสารละลายกรด เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีเหลืองของโมลิบโดฟอสเฟต จากนั้นรีดิวซ์สารประกอบดังกล่าวด้วยตัวรีดิวซ์ ได้แก่ ทิน (II) คลอไรด์ หรือ กรดแอสคอร์บิก จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีน้ำเงินและตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 660-880 นาโนเมตรด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ [12]

ปัจจุบันมีการนำเทคนิคการวิเคราะห์แบบไหลมาใช้ในการวิเคราะห์อย่างกว้างขวาง เช่น การวิเคราะห์แบบไหลชนิดฟลูอิดเจกชัน (Flow Injection Analysis, FIA) และการวิเคราะห์แบบไหลตามลำดับ (Sequential Injection Analysis, SIA) ซึ่งเป็นระบบอัตโนมัติที่ช่วยให้การวิเคราะห์มีความแม่นยำสูง ลดการใช้ปริมาณสารเคมี และสามารถวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็ว และไม่ต้องรอให้สารทำปฏิกิริยาจนถึงจุดสมดุล (Equilibrium Time) [13]-[15]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพัฒนาระบบวิเคราะห์แบบไหลชนิดฟลูอิดเจกชันอย่างง่ายสำหรับวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตในน้ำผิวดินด้วยวิธีโมลิบดีนัมบลู โดยใช้กรดแอสคอร์บิกเป็นสารรีดิวซ์ และตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร โดยสภาวะศึกษาในการทดลองนี้ได้แก่ อัตราการไหลของสารละลายตัวพา ปริมาตรของสารตัวอย่าง ความยาวท่อผสมสาร ความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิก และผลการรบกวนจากอาร์เซเนตและซิลิเกต ระบบวิเคราะห์ฟลูอิดเจกชันอย่างง่ายนี้นำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำในเขตจังหวัดลพบุรี ซึ่งเป็นชุมชนท้องถิ่นที่มีแหล่งน้ำผิวดินสำคัญหลายแห่งที่นำมาใช้การเกษตร การประมง และการดำรงชีวิตประจำวัน

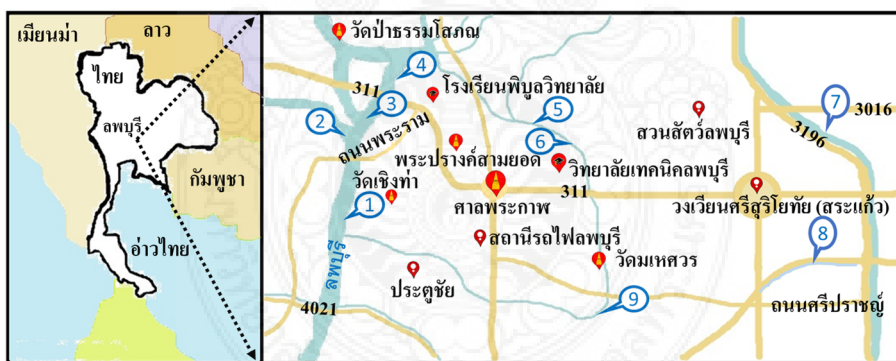
2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเกรดสำหรับวิเคราะห์ (AR grade) และน้ำปราศจากไอออน (Sartorius, arium® advance EDI, สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมัน) ในการเตรียมสารมาตรฐานและรีเอเจนต์ทั้งหมด สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต หรือ R1 เข้มข้น เท่ากับ 9.71 มิลลิโมลต่อลิตร โดยผสมระหว่างแอมโมเนียมโมลิบเดต $((NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$, Ajax Finechem, เครือรัฐออสเตรเลีย) และเติมกรดทาร์ทาริก $((CHOCHCOOH)_2$, Ajax Finechem, เครือรัฐออสเตรเลีย) 2.410 กรัมต่อลิตร ซึ่ง R1 เตรียมในสารละลายกรดซัลฟริก $(H_2SO_4$, Lab Scan, ประเทศไอร์แลนด์) เข้มข้น 0.6 โมลต่อลิตร [13] สารละลายกรดแอสคอร์บิก (R2) $(C_6H_8O_6$, Chem-supply, เครือรัฐออสเตรเลีย) 0.020 โมลต่อลิตร ซึ่งใช้เป็นสารละลายรีดิวซ์เอเจนท์ สารละลายฟอสเฟตเข้มข้นเริ่มต้น 100

มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร โดยจากโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต $(KH_2PO_4$, Ajax Finechem, เครือรัฐออสเตรเลีย) ที่ผ่านการอบที่ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงแล้ว และสารละลายฟอสเฟตเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร จะถูกนำมาเจือจางเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

ในการศึกษาตัวรบกวนในการวิเคราะห์ค่าฟอสเฟต มีการเตรียมละลายอาร์เซนิตและสารละลายซิลิเกต โดยสารละลายอาร์เซนิตเข้มข้น 50 มิลลิกรัมอาร์เซนิกต่อลิตร (mg As/L) เตรียมจากโซเดียมไฮโดรเจนอาร์เซนิตเฮปตะไฮเดรต $(Na_2HASO_4 \cdot 7H_2O$, Alfa Aesar, อินเดีย) และสารละลายซิลิเกตเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมซิลิเกตต่อลิตร (mg Si/L) เตรียมจากโซเดียมเมตาซิลิเกตเพนตะไฮเดรต $(Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$, Daejung, เกาหลี) สารละลายอาร์เซนิตและสารละลายซิลิเกตถูกนำมาเจือจางให้ได้ความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการทดลองต่อไป



รูปที่ 1 แผนที่แสดงบริเวณที่เก็บน้ำตัวอย่างในการวิเคราะห์หาปริมาณฟอสเฟต

2.2 การเก็บตัวอย่างและการเตรียมตัวอย่าง

งานวิจัยนี้ได้เก็บตัวอย่างน้ำตามแนวแม่น้ำลพบุรีและคลองในบริเวณเขตพื้นที่อำเภอเมืองลพบุรี จังหวัดลพบุรี วันที่ 7 กันยายน พ.ศ. 2562 จำนวน 9 จุด ดังแสดงในแผนที่ในรูปที่ 1 และทำการเก็บตัวอย่างแสดงในตารางที่ 1 อุณหภูมิของน้ำตัวอย่างอยู่ระหว่าง 29 - 30 องศาเซลเซียส โดยกรองตัวอย่างด้วยแผ่นเยื่อ

กรองที่มีขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร (Cellulose Acetate Membrane, Satorious Stedium Biotech, สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมัน) แล้วเก็บในขวดพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน และเก็บรักษาในตู้แช่อุณหภูมิต่ำ 4 องศาเซลเซียส ก่อนการวิเคราะห์นำตัวอย่างออกมาจากตู้แช่และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) โดยตัวอย่างเก็บไม่เกิน 2 วัน [13]

ตารางที่ 1 พิกัดของการเก็บตัวอย่างน้ำ

จุดที่	ละติจูด	ลองจิจูด
1	14° 47' 54.1" N	100° 36' 27.2" E
2	14° 48' 17.4" N	100° 36' 29.5" E
3	14° 48' 21.7" N	100° 36' 36.9" E
4	14° 48' 23.7" N	100° 36' 38.2" E
5	14° 48' 21.2" N	100° 37' 00.2" E
6	14° 48' 15.2" N	100° 37' 04.8" E
7	14° 48' 20.9" N	100° 37' 08.3" E
8	14° 47' 46.7" N	100° 38' 17.7" E
9	14° 47' 39.2" N	100° 37' 02.9" E

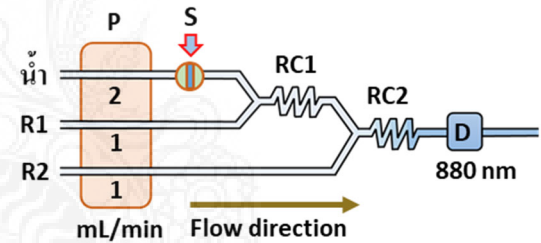
2.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

ระบบโพลินเจคชันสำหรับการวิเคราะห์ฟอสเฟตประกอบด้วยปั๊มแบบลูกกลิ้ง (Leab Fluid, BT101 S, สาธารณรัฐประชาชนจีน) โดยใช้ร่วมกับท่อปั๊มแบบไทกอน (Tygon Tube) เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.02 มิลลิเมตร โดยปั๊มตัวที่ 1 จะต่อกับวาล์วแบบ 6 ช่อง (Upchurch, Model V-450, สหรัฐอเมริกา) เพื่อใช้ในการฉีดสารละลายตัวอย่างและสารมาตรฐานเข้าไปในระบบ ในระบบเชื่อมด้วยท่อ FTFE (เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 มิลลิเมตร) เชื่อมต่อกับท่อช่วยผสม (Reaction Coil) ยาว 60 เซนติเมตร (RC1 และ RC2) ทำจากท่อขนาดเดียวกันพันขดเป็นเกลียว เพื่อช่วยผสมสารตัวอย่างกับสารรีเอเจนต์ R1 และ R2 ให้เกิดปฏิกิริยาอย่างทั่วถึง

สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะถูกตรวจวัดด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Thermo Scientific, Evolution 201 UV-Visible Spectrophotometer, สหรัฐอเมริกา) โดยใช้โพลทรูเซลล์ชนิดควอตซ์ (Quartz Flow Cell, Thermo Fisher Scientific, Model 268-857400, สหรัฐอเมริกา) ที่มีทางผ่านของแสง 10 มิลลิเมตร ปริมาตร 160 ไมโครลิตร

2.4 การปฏิบัติงานของระบบโพลินเจคชัน

สารละลายตัวอย่างหรือสารละลายมาตรฐานจะถูกฉีดเข้าสู่ระบบโดยวาล์วฉีดสารตัวอย่าง ซึ่งกำหนดปริมาตรตัวอย่างโดยใช้ที่กำหนดปริมาตร (Injection loop) ขนาด 1000 ไมโครลิตร โดยท่อนโซนของสารตัวอย่างนี้จะเข้าไปในกระแสของน้ำที่ขับเคลื่อนโดยปั๊มแบบลูกกลิ้ง ด้วยอัตราการไหลคงที่ 2 มิลลิิตรต่อนาที ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวพาสารละลายตัวอย่างไปทำปฏิกิริยากับสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต (R1) และสารละลายกรดแอสคอร์บิก (R2) ตามลำดับ ซึ่งขับเคลื่อนรีเอเจนต์ R1 และ R2 ถูกด้วยปั๊ม ด้วยอัตราการไหลคงที่ 1 มิลลิิตรต่อนาที เกิดผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำเงินและด้วยวัดค่าการดูดกลืนของสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ระบบโพลินเจคชันที่พัฒนาขึ้นสำหรับการวิเคราะห์ฟอสเฟต ประกอบด้วยปั๊ม (P) วาล์ว (V) ท่อช่วยผสม (RC1 และ RC2) สารตัวอย่างหรือสารมาตรฐาน (S) สารละลายรีเอเจนต์ (R1 และ R2) และเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (D)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

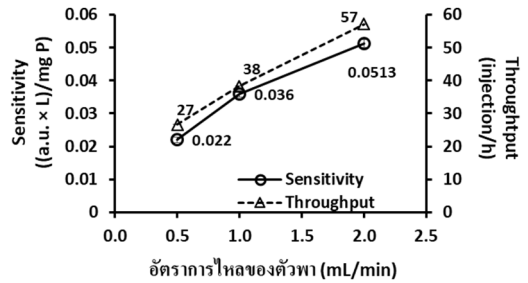
งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการวิเคราะห์ฟอสเฟตด้วยระบบโพลินเจคชัน ซึ่งพารามิเตอร์ที่ศึกษา ได้แก่ อัตราการไหลของสารละลายตัวพา ปริมาตรของสารตัวอย่าง ความยาวท่อผสมสารและความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิก หลังจากนั้นจะใช้

สภาวะที่เหมาะสมศึกษาผลของตัวรบกวน ประยุกต์ใช้ในวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำผิวดิน และการตรวจสอบการใช้ได้ของวิธี

3.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของระบบ

3.1.1 ผลของอัตราการไหลของกระแสตัวพา

ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำเป็นตัวพา (Carrier) สารละลายตัวอย่างเข้าสู่ระบบ ซึ่งการอัตราการไหลของกระแสตัวพาจะส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของสาร และความรวดเร็วในการวิเคราะห์สาร ในการทดลองนี้ศึกษาอัตราการไหลของกระแสตัวพา 0.5, 1 และ 2 มิลลิลิตรต่อนาที โดยอัตราการไหลของรีเอเจนต์คงที่ ได้แก่ สารละลายสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต (R1) และสารละลายสารละลายกรดแอสคอร์บิก (R2) มีอัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที ใช้ปริมาตรตัวอย่าง 500 ไมโครลิตร และใช้ท่อผสมสารที่ 1 (RC1) และท่อผสมสารที่ 2 (RC2) ยาว 60 เซนติเมตร โดยฉีดสารละลายมาตรฐาน 0.50–1.00 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความไวของกระแสตัวพาจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์สารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำเงินมากขึ้น ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงของสารเพิ่มขึ้น และเมื่อนำค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานมาพล็อตกราฟมาตรฐาน และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสารละลายตัวพากับค่าความไว และค่าจำนวนตัวอย่างต่อชั่วโมงในการวิเคราะห์ (Sample Throughput) พบว่าการเพิ่มความไวของกระแสตัวพาตั้งแต่ 0.5–2 มิลลิลิตรต่อนาทีนี้ จะทำให้ค่าความไวในการวิเคราะห์เพิ่มขึ้น ซึ่งความไวในการวิเคราะห์ได้จากความชันของกราฟมาตรฐาน และการเพิ่มอัตราการไหลก็ทำให้ได้จำนวนตัวอย่างต่อชั่วโมงมากขึ้น ซึ่งการเพิ่มความไวของกระแสตัวพานี้จะไปช่วยให้ตัวอย่างหรือสารละลายมาตรฐานผสมกับรีเอเจนต์ได้ดีมากขึ้น และลดการเจือจางของท่อนโซนสารตัวอย่างในกระแสตัวพา (ดังรูปที่ 3) แต่หากใช้กระแสตัวพามากกว่า 2 มิลลิลิตร



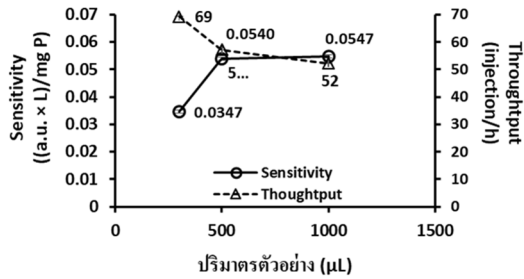
รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสารละลายตัวพากับค่าความไว และค่าจำนวนตัวอย่างต่อชั่วโมงในการวิเคราะห์

ต่อนาที จะทำให้ความไวของท่อนโซนสารละลายผ่านบริเวณตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงไวเกินไป ซึ่งทำให้การตรวจวัดคลาดเคลื่อนได้ง่ายเนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องตรวจวัด ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกความไวของกระแสตัวพาที่ 2 มิลลิลิตรต่อนาที

3.1.2 ผลของปริมาตรของสารตัวอย่าง

สำหรับการศึกษาผลของปริมาตรตัวอย่างซึ่งกำหนดโดยท่อกำหนดปริมาตร (Injection Loop) ซึ่งปริมาตรตัวอย่างที่ศึกษาได้แก่ 300, 500 และ 1,000 ไมโครลิตร โดยฉีดสารละลายมาตรฐาน 0.50–1.00 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร ในกระแสตัวพาคงที่ 2 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของสารละลายรีเอเจนต์ R1 และสารละลาย R2 1 มิลลิลิตรต่อนาที ใช้ท่อผสมสารที่ 1 (RC1) และท่อผสมสารที่ 2 (RC2) ยาว 60 เซนติเมตร

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาตรของสารตัวอย่างจะทำให้ค่าความไวในการวิเคราะห์เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเพิ่มปริมาตรตัวอย่างจาก 300 เป็น 500 ไมโครลิตร และเมื่อเพิ่มปริมาตรตัวอย่างเป็น 1,000 ไมโครลิตร ความไวในการวิเคราะห์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย และการเพิ่มปริมาตรตัวอย่างนี้จะทำให้ค่าจำนวนตัวอย่างต่อชั่วโมงในการวิเคราะห์ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4 ในการทดลองนี้เลือกปริมาตรตัวอย่าง 1,000 ไมโครลิตร



รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของสารตัวอย่างกับค่าความไว และค่าจำนวนตัวอย่างต่อชั่วโมงในการวิเคราะห์

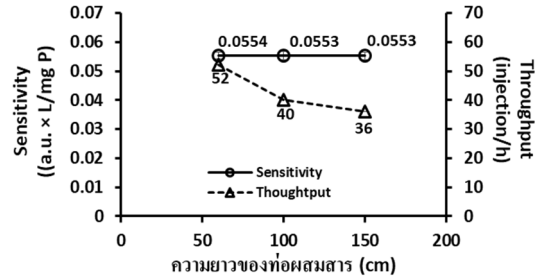
เนื่องจากให้ความไวในการวิเคราะห์มากที่สุด และเพื่อรองรับตัวอย่างที่มีความเข้มข้นของฟอสเฟตในปริมาณที่ต่ำ ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของกมลทิพย์ เสรีนนท์ชัยและคณะ (2557) ที่ได้ใช้ระบบโพลินเจคชันสำหรับการวิเคราะห์ฟอสเฟตโดยใช้ปฏิกิริยาโมลิบดีนัมบลู และใช้สแตนเนสคลอไรด์เป็นสารรีดิวซ์ [13]

3.1.3 ผลของความยาวท่อผสมสาร

จากการศึกษาผลของความยาวของท่อผสมสาร (Reaction Coil) ที่ตำแหน่ง RC1 และ RC2 ของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยมีการใช้ความยาวของท่อผสมสาร 60, 100 และ 150 เซนติเมตร โดยกำหนดให้อัตราการไหลของกระแสตัวพาเท่ากับ 2 มิลลิลิตรต่อนาที สารละลายสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต (R1) และสารละลาย สารละลายกรดแอสคอร์บิก (R2) คือ 1 มิลลิลิตรต่อนาทีและปริมาตรตัวอย่างขนาด 1,000 ไมโครลิตร ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความยาวของท่อผสมสาร ความไวในการวิเคราะห์คงที่ ในขณะที่ค่าจำนวนตัวอย่างต่อชั่วโมงในการวิเคราะห์ลดลง ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกใช้ความยาวของท่อผสมสารที่ตำแหน่ง RC1 และ RC2 เท่ากับ 60 เซนติเมตร

3.1.4 ผลของความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิก

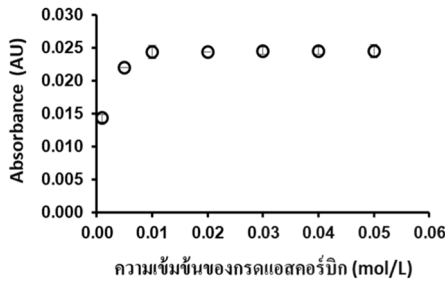
ในการทดลองนี้ใช้กรดแอสคอร์บิกเป็นสารรีดิวซ์เพื่อเปลี่ยนสารแอมโมเนียมโมลิบโดฟอสเฟต ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีเหลือง เป็นสารประกอบ



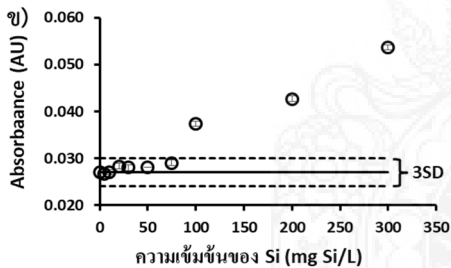
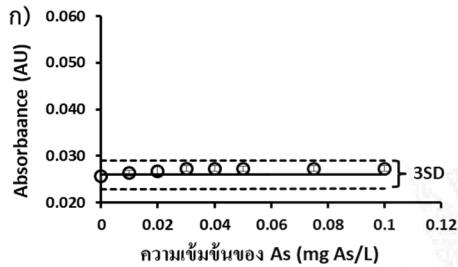
รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของท่อผสมสาร ค่าความไว และค่าจำนวนตัวอย่างต่อชั่วโมงในการวิเคราะห์

โมลิบดีนัมบลู ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีฟ้า โดยศึกษาความเข้มข้นของแอสคอร์บิกตั้งแต่ 0.001–0.050 โมลต่อลิตร โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต (R1) เท่ากับ 9.71 มิลลิโมลต่อลิตร ซึ่งเตรียมในกรดครดซัลฟูริก 0.6 โมลต่อลิตร [13] โดยในการทดลองฉีดสารละลายมาตรฐาน 0.50 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตรลงในระบบดังแสดงที่รูปที่ 1 ที่สภาวะที่เหมาะสม (Optimal Conditions) คือ อัตราการไหลของกระแสตัวพาเท่ากับ 2 มิลลิลิตรต่อนาที สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต (R1) และสารละลาย สารละลายกรดแอสคอร์บิก (R2) คือ 1 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาตรตัวอย่างขนาด 1,000 ไมโครลิตร ความยาวของท่อผสมสาร 60 เซนติเมตร ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิกตั้งแต่ 0.001–0.010 โมลต่อลิตร ค่าการดูดกลืนของผลิตภัณฑ์จะเพิ่มมากขึ้น และมีค่าคงที่ตั้งแต่ 0.010–0.050 โมลต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ชนิสรา ปัญญาธิง และคณะ (2560) ที่ศึกษาปริมาณฟอสฟอรัสในดินโดยใช้ระบบไฮโดรไดนามิกซีควนเซียลอินเจคชัน ซึ่งใช้ปฏิกิริยาโมลิบดีนัมบลูในการวิเคราะห์และใช้กรดแอสคอร์บิกเป็นสารรีดิวซ์ พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิกจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์สีฟ้าเพิ่มขึ้น และเกิดผลิตภัณฑ์ใกล้เคียงกันเมื่อความเข้มข้นของกรด

แอสคอร์บิกมีค่าระหว่าง 0.5–2.0 ร้อยละโดยมวลต่อปริมาตร (% w/v หรือ 0.028–0.011 โมลต่อลิตร) [16]



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิกและค่าการดูดกลืนแสงของสาร



รูปที่ 7 กราฟแสดงผลของการศึกษาความสามารถของระบบวิเคราะห์ที่ทนต่อการรบกวนของ ก) อาร์ซีเนต และ ข) ซิลิเกต โดยใช้ความเข้มข้นของฟอสเฟต 0.50 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร

แม้ว่าผลการทดลองงานวิจัยนี้จะพบว่าความเข้มข้นของแอสคอร์บิกที่ 0.010 และ 0.020 โมลต่อลิตร จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์สีฟ้าในปริมาณที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่เนื่องจากกรดแอสคอร์บิกเป็นสารที่ไม่เสถียรจึงเลือกใช้ความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิก 0.020 โมลต่อลิตร เพื่อให้มั่นใจว่าความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิกนั้นเพียงพอตลอดการทดลองในแต่ละวัน

ดังนั้นในการทดลองนี้ สภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตของระบบนี้คือ อัตราการไหลของสารละลายตัวพา 2 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาตรของสารตัวอย่าง 1,000 ไมโครลิตร ความยาวท่อผสมสาร 60 เซนติเมตร และความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิก 0.020 โมลต่อลิตร

3.2 การศึกษาผลของตัวรบกวน

เนื่องจากซิลิเกตและอาร์ซีเนตเป็นตัวรบกวนที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับรีเอเจนต์ได้เช่นเดียวกับฟอสเฟตและเป็นตัวรบกวนที่สำคัญในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ [14], [18] ดังนั้นในการทดลองนี้จึงศึกษาการรบกวนของซิลิเกตและอาร์ซีเนตต่อปฏิกิริยาในระบบการวิเคราะห์ฟอสเฟตโดยเตรียมตัวรบกวนที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ กัน ผสมกับสารละลายมาตรฐานความเข้มข้น 0.50 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร แล้วฉีดลงในระบบ (รูปที่ 1) ซึ่งสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต (R1) มีการเติมกรดทาร์ทาริกคลงไปเพื่อช่วยการรบกวนการวิเคราะห์ [13] ในการทดลองนี้ ศึกษาความเข้มข้นของอาร์ซีเนตตั้งแต่ 0.01–0.10 มิลลิกรัมอาร์ซีนิกต่อลิตร (mg As/L) และศึกษาความเข้มข้นของซิลิเกต 5–300 มิลลิกรัมซิลิเกตต่อลิตร (mg Si/L) ผลการทดลองพบว่าระบบสามารถทนอาร์ซีเนตได้มากกว่า 0.10 มิลลิกรัมอาร์ซีนิกต่อลิตร และทนซิลิเกตได้ถึง 75 มิลลิกรัมซิลิเกตต่อลิตร (รูปที่ 7) ซึ่งในแหล่งน้ำธรรมชาติทั่วไปมีอาร์ซีเนตและซิลิเกตไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมอาร์ซีนิกต่อลิตร [18] และ 28 มิลลิกรัมซิลิเกตต่อลิตร [19] ตามลำดับ

3.3 การศึกษาประสิทธิภาพของระบบโฟลอิน

เจกชัน

จากการฉีดสารละลายมาตรฐานลงในระบบโฟลอินเจกชันที่สภาวะที่เหมาะสม ได้ช่วงการใช้งานของกราฟมาตรฐานในช่วง 0.04–1.25 มิลลิกรัมฟอสฟอรัส

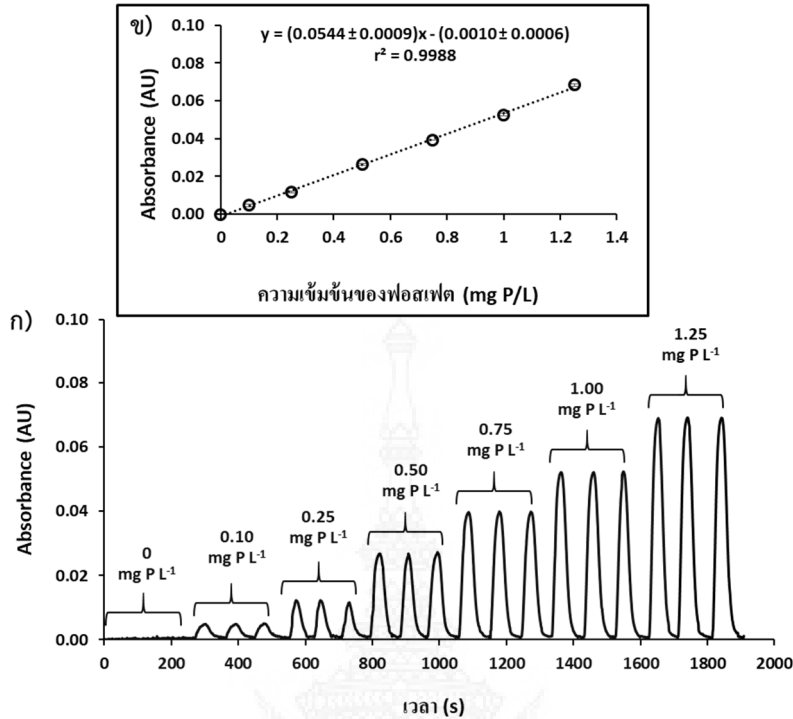
ต่อลิตร โดยลักษณะของสัญญาณ (Flow Profile) และสมการเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 8 ขีดจำกัดของการตรวจวัด หรือค่า LOD มีค่าเท่ากับ 0.015 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร และจากการศึกษาค่าความเที่ยงตรง (Precision) จากการฉีดสารละลายมาตรฐาน 0.50 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร ในระบบจำนวน 10 ครั้ง ได้ค่าความเที่ยง (% RSD) เท่ากับ 1.81 % โดยระบบมีความเร็วในการวิเคราะห์ตัวอย่าง 52 ตัวอย่างต่อ 1 ชั่วโมง

โดยปกติแล้วปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำด้วยวิธีโพลินเจกชันได้แก่ปฏิกิริยาโมลิบดีนัมบลูซึ่งได้ผลิตภัณฑ์เป็นประเภชิ่งซ้อนสีน้ำเงิน และปฏิกิริยาอานาโตโมลิเบตซึ่งได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบสีเหลือง [14] ซึ่งระบบโพลินเจกชันที่ใช้ในการวิเคราะห์ฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำในงานวิจัยนี้ใช้ปฏิกิริยาโมลิบดีนัมบลูโดยใช้กรดแอสคอร์บิกเป็นสารรีดิวซ์ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบโพลินเจกชันในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่น ๆ ที่ใช้ระบบโพลินเจกชันในการวิเคราะห์ฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำถือว่าระบบมีความคล้ายคลึงกันในแง่ของปฏิกิริยาที่ใช้ แต่มีความแตกต่างกันของรายละเอียดของการออกแบบระบบการขับเคลื่อนสารให้เกิดผลิตภัณฑ์สารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำเงินก่อนตรวจวัดด้วยตัวตรวจวัด เช่น การออกแบบระบบ การออกแบบอัตราการไหลของสารปริมาตรตัวอย่างที่ใช้ ความยาวของท่อผสมสาร ผลของความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิก เป็นต้น ซึ่งระบบที่ใช้ในงานนี้ถือว่าเป็นระบบอย่างง่าย มีความซับซ้อนน้อยกว่าระบบโพลินเจกชันอื่น ๆ ในการการตรวจวัดฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำ แต่มีประสิทธิภาพในการตรวจวัดฟอสเฟตได้ใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 2) เช่น บางระบบมีการใช้ปฏิกิริยาโมลิบดีนัมบลูโดยใช้ทิน (II) คลอไรด์ หรือกรดแอสคอร์บิกเป็นสารรีดิวซ์ซึ่งจะได้สารผลิตภัณฑ์ที่ดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตรและ

880 นาโนเมตร ตามลำดับ [20] ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้สารรีดิวซ์เป็นกรดแอสคอร์บิกเนื่องจากเป็นสารละลายที่เตรียมได้ง่ายและละลายได้ในน้ำ ในงานวิจัยอื่น ๆ ได้มีการออกแบบระบบเพิ่มเติมเพื่อวัตถุประสงค์การทดลองต่างกัน เช่น งานวิจัยของ Aufitsch, S. et al ได้ใช้ปฏิกิริยาโมลิบดีนัมบลูโดยใช้กรดแอสคอร์บิกเป็นสารรีดิวซ์ แต่ใช้ระบบแบบรีเวอร์สโพลินเจกชันอะนาลิซิส (reversed flow injection analysis, rFIA) เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาของการรบกวนการวิเคราะห์จากความแตกต่างระหว่างค่าดัชนีหักเหของแสงที่ผ่านกระแสดของตัวอย่างน้ำกร่อยและรีเอเจนต์ [17] และงานวิจัยของ Neves, M.S.A.C. et al ใช้ปฏิกิริยาอานาโตโมลิเบตตรวจวัดผลิตภัณฑ์สารสีเหลือง โดยในระบบมีการใช้ Liquid Waveguide Capillary Cell (LWCC) ซึ่งมีราคาสูงเพื่อเพิ่มความไวในการตรวจวัด (Sensitivity) [21]

3.4 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำและการตรวจสอบการใช้ได้ของวิธี

ระบบการไหลแบบโพลินเจกชันอย่างง่ายนี้ นำไปประยุกต์ใช้ในการหาปริมาณฟอสเฟตในแหล่งน้ำที่สำคัญในเขตอำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี โดยมีการเก็บตัวอย่างน้ำ 9 จุด (รูปที่ 1 และตารางที่ 1) จากผลการทดลองพบว่าตัวอย่างที่เก็บจากจุดที่ 1-4 และ 8 มีค่าฟอสเฟตไม่ค่าเกินมาตรฐานน้ำผิวดิน ส่วนตัวอย่างที่ 5-6 และ 9 มีค่าฟอสเฟตเกินมาตรฐานเนื่องจากบริเวณดังกล่าวใกล้กับแหล่งชุมชนและร้านอาหาร จึงอาจมีการปล่อยน้ำทิ้งจากครัวเรือนลงสู่แหล่งน้ำ และจากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ฟอสเฟตจากระบบการไหลแบบโพลินเจกชันกับวิธีวิเคราะห์แบบมาตรฐานโมลิบดีนัมบลูแบบแบทช์ (batch method) ของ Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA) [22]



รูปที่ 8 ลักษณะของสัญญาณที่ได้ ก) และกราฟมาตรฐาน ข) จากการวิเคราะห์ด้วยระบบโพลินเจกชันโดยการฉีดสารละลายมาตรฐานในระบบด้วยภายใต้สภาวะที่เหมาะสม

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพของระบบโพลินเจกชันของงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่ใช้ระบบโพลินเจกชันในการวิเคราะห์ฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำ

งานวิจัย	ปฏิกิริยาที่ใช้	ตัวอย่าง	LOD (mg P/L)	จำนวนตัวอย่างต่อชั่วโมง
[20]	โมลิบดีนัมบลู (รีดิซ์ด้วยทิน (II) คลอไรด์ หรือกรดแอสคอร์บิก)	น้ำธรรมชาติ น้ำดื่ม	0.01	ไม่ระบุ
[13]	โมลิบดีนัมบลู (รีดิซ์ด้วยทิน (II) คลอไรด์)	น้ำกร่อย	0.016	15
[17]	โมลิบดีนัมบลู (รีดิซ์ด้วยกรดแอสคอร์บิก)	น้ำกร่อย	0.002	ไม่ระบุ
[21]	วานาโนโมลิบดีนัม	น้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน	0.017	60
งานวิจัยนี้	โมลิบดีนัมบลู (รีดิซ์ด้วยกรดแอสคอร์บิก)	น้ำผิวดิน	0.015	52

ตามหลักสถิติแบบ paired t-test พบว่าผลการทดลองที่วิเคราะห์ได้จากทั้งสองวิธีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยค่า $t_{stat} 0.04 < t_{crit} 2.36$ นอกจากนี้ผลการศึกษาค่าร้อยละการได้กลับคืน (% Recovery) ที่ได้จากการการเติมสารละลายมาตรฐาน 0.25 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร ลงไปในแต่ละตัวอย่างแล้วนำไปวิเคราะห์และคำนวณ พบว่ามีค่า

ร้อยละการได้กลับคืนอยู่ในช่วง 97-104 % ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยหลาย ๆ งาน เช่น งานวิจัยของ S. Auflitsch et al. [17] ที่พบว่าระบบการวิเคราะห์ฟอสเฟตด้วยระบบไหลแบบโพลินเจกชันสามารถวิเคราะห์ฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพและได้ผลการทดลองสอดคล้องกับการวิเคราะห์แบบดั้งเดิม (Batch Method) [13]

ตารางที่ 3 ปริมาณฟอสเฟตในตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ด้วยระบบการไหลแบบโพลินเจคชัน เปรียบเทียบกับการวิเคราะห์แบบมาตรฐานโมลิตินัมบลูแบบแบทช์

ตัวอย่างน้ำ	ระบบการไหลแบบโพลินเจคชัน			วิธีมาตรฐาน (มิลลิกรัมฟอสฟอรัส ต่อลิตร \pm SD)
	เติมสารมาตรฐาน (มิลลิกรัมฟอสฟอรัส ต่อลิตร)	ฟอสเฟตในน้ำ (มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อ ลิตร \pm SD)	ร้อยละการได้กลับคืน (%)	
ตัวอย่างที่ 1	0	0.097 \pm 0.01	98	0.082 \pm 0.02
	0.25	0.332 \pm 0.01		
ตัวอย่างที่ 2	0	0.080 \pm 0.01	99	0.070 \pm 0.02
	0.25	0.317 \pm 0.01		
ตัวอย่างที่ 3	0	0.091 \pm 0.02	102	0.100 \pm 0.02
	0.25	0.336 \pm 0.01		
ตัวอย่างที่ 4	0	0.087 \pm 0.03	101	0.084 \pm 0.04
	0.25	0.329 \pm 0.02		
ตัวอย่างที่ 5	0	0.130 \pm 0.01	97	0.150 \pm 0.03
	0.25	0.363 \pm 0.01		
ตัวอย่างที่ 6	0	0.117 \pm 0.01	102	0.112 \pm 0.01
	0.25	0.361 \pm 0.02		
ตัวอย่างที่ 7	0	0.210 \pm 0.02	104	0.225 \pm 0.02
	0.25	0.459 \pm 0.03		
ตัวอย่างที่ 8	0	0.073 \pm 0.01	98	0.080 \pm 0.03
	0.25	0.308 \pm 0.02		
ตัวอย่างที่ 9	0	0.254 \pm 0.03	97	0.220 \pm 0.04
	0.25	0.487 \pm 0.02		

4. สรุป

ระบบการวิเคราะห์แบบไหลอย่างง่ายที่พัฒนาขึ้นมาสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำผิวดินได้พบว่าให้ผลสอดคล้องกันทางสถิติแบบ pair t-test ระบบที่พัฒนาขึ้นนี้จึงมีความน่าเชื่อถือ มีความไวในการวิเคราะห์สูง และวิเคราะห์ได้รวดเร็ว 52 ตัวอย่างต่อ 1 ชั่วโมง จึงเป็นระบบวิเคราะห์ที่เหมาะสมในการนำไปใช้ในการวิเคราะห์ควบคุมคุณภาพน้ำที่มีจำนวนตัวอย่างปริมาณมาก

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์วิทยาศาสตร์ และมหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Liu, Y.P. Cai, G.H. Huang and C. Dong, "Interval-parameter chance-constrained fuzzy multi-objective programming for water pollution control with sustainable wetland management," *Procedia Environmental Sciences*, vol. 13, pp. 2316-2335, Mar. 2012.

- [2] D.K. Tank and C.P.S. Chandel, "A hydrochemical elucidation of the groundwater composition under domestic and irrigated land in Jaipur City," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 166, no. 1-4, pp. 69-77, Jul. 2010.
- [3] P. Palma, P. Alvarenga, V.L. Palma, R.M. Fernandes, A.M.V.M. Soares and I.R. Barbosa, "Assessment of anthropogenic sources of water pollution using multivariate statistical techniques: A case study of the Alqueva's reservoir, Portugal," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 165, no. 1-4, pp. 539-552, Jun. 2010.
- [4] D. Komori, S. Nakamura, M. Kiguchi, A. Nishijima, D. Yamazaki, S. Suzuki, A. Kawasaki, K. Ok and T. Oki, "Characteristics of the 2011 Chao Phraya River flood in Central Thailand," *Hydrological Research Letters*, vol. 6, pp. 41-46, Apr. 2012.
- [5] P. Rakwatin, T. Sansena, N. Marjang and A. Rungsipanich, "Using multi-temporal remote-sensing data to estimate 2011 flood area and volume over Chao Phraya River basin, Thailand," *Remote Sensing Letters*, vol. 4, no. 3, pp. 243-250, Mar. 2013.
- [6] S. Koontanakulvong and P. Santitamnanon, "Lessons learned and information technology roles in Thailand floods 2011," in *Proceeding of Humanitarian Technology Conference (R10-HTC)*, Sendai, Japan, August 26-29, 2013, pp. 298-302.
- [7] C. Inchainri, P. Supikulpong, E. Vannameteer, S. Luengyosluechakul, S. Khanda, T. Tashnakajankorn, K. Ajariyakhajorn, J. Sasipreeyajan and M. Techakumpu, "The effect of a catastrophic flood disaster on livestock farming in Nakhon Sawan province, Thailand," *Tropical Animal Health and Production*, vol. 45, no. 4, pp. 917-922, Nov. 2013.
- [8] Y. Chaturongkasumrit, P. Techaruvichit, H. Takahashi, B. Kimura and S. Keeratipibul, "Microbiological evaluation of water during the 2011 flood crisis in Thailand," *Science of The Total Environment*, vol. 463-464, pp. 959-967, Oct. 2013.
- [9] L. Lebel, J.B. Manuta and P. Garden, "Institutional traps and vulnerability to changes in climate and flood regimes in Thailand," *Regional Environmental Change*, vol. 11, no. 1, pp. 45-58, Mar. 2011.
- [10] B.Y. Spivakov, T.A. Maryutina and H. Muntau, "Phosphorus speciation in water and sediments," *Pure and Applied Chemistry*, vol. 71, no. 11, pp. 2162-2176, Jan. 1999.
- [11] G. Hanrahan, M. Gledhill, P.J. Fletcher and P.J. Worsfold, "High temporal resolution field monitoring of phosphate in the River Frome using flow injection with diode array detection," *Analytica Chimica Acta*, vol. 440, no. 1, pp. 55-62, Aug. 2001.
- [12] L. Drummond and W. Maher, "Determination of phosphorus in aqueous solution via formation of the phosphoantimonymolybdenum blue

- complex,” *Analytica Chimica Acta*, vol. 302, no. 1, pp. 69-74, Feb. 1995.
- [13] K. Sreenonchai, S. Chan-Eam, P. Phansi and D. Nacapricha “Development of high-throughput flow-injection system for analysis of salinity and phosphate in fresh Water and brackish water,” *Thai Science and Technology Journal*, vol. 22, no. 2, pp. 158-171, Apr. 2014.
- [14] J.M. Estela and V. Cerdà, “Flow analysis techniques for phosphorus: An overview,” *Talanta*, vol. 66, no. 2, pp. 307-331, Apr. 2005.
- [15] S. Chaneam, K. Kaewyai, T. Mantim, R. Chaisuksant, P. Wilairat and D. Nacapricha, “Simultaneous and direct determination of urea and creatinine in human urine using a cost-effective flow injection system equipped with in-house contactless conductivity detector and LED colorimeter,” *Analytica Chimica Acta*, vol. 1073, pp. 54-61, May 2019.
- [16] C. Panyaying, M. Kanna and S. Somnam, “The determination of available phosphorus in soils using an economic hydrodynamic sequential injection system,” *Thai Science and Technology Journal*, vol. 25, no. 1, pp. 124-136, Jan. 2017.
- [17] S. Auflitsch, D.M.W. Peat, I.D. McKelrie and P.J. Worsfold, “Determination of dissolved reactive phosphorus in estuarine waters using a reversed flow injection manifold,” *Analyst*, vol. 122, no. 12, pp. 1477-1480, Dec. 1997.
- [18] O.V. Shuvaeva, O.S. Koshcheeva and N.F. Beisel, “Arsenic speciation in water by high-performance liquid chromatography with electrothermal atomic absorption detection,” *Journal of Analytical Chemistry*, vol. 57, no. 11, pp. 1037-1041, Jan. 2002.
- [19] J.Z. Zhang, C.J. Fischer and P.B. Ortner, “Optimization of performance and minimization of silicate interference in continuous flow phosphate analysis,” *Talanta*, vol. 49, no. 2, pp. 293-304, Jun. 1999.
- [20] ISO 15681-1 :2004 (en). “Water quality - Determination of orthophosphate and total phosphorus contents by flow analysis (FIA and CFA) - Part 1: Method by flow injection analysis (FIA)”. *British Standard*, 2009, pp. 1-19.
- [21] M.S.A.C. Neves, M.R.S. Souto, I.V. Tóth, M.C. Drumond and A.O.S.S. Rangel, “Spectrophotometric Flow System Using Vanadomolybdophosphate Detection Chemistry and a Liquid Waveguide Capillary Cell for the Determination of Phosphate with Improved Sensitivity in Surface and Ground Water Samples”. *Talanta*, vol. 77, no. 2, pp. 527-532, Mar. 2008.
- [22] E.W. Rice, R.B. Baird, A.D. Eaton and L.S. Clesceri, “Standard methods for the examination of water and wastewater”. 20th ed., *American Public Health Association, Washington, USA*, 2012, pp. 155-156.