

## การพัฒนาวิธีวิเคราะห์สำหรับการวัดปริมาณคลอไรด์ในน้ำปลาโดยใช้รีเอเจนต์ในปริมาณน้อยระดับไมโครลิตร

สุจิตรา แก้วสระ\*, จวงจันทร์ วุฒิพันธุ์, สกกลวรรณ เพชรประกอบ, กนกอร ศรีจันทร์ และ ธนวัฒน์ จันทร์หนู

สาขาวิทยาศาสตร์กายภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

\*อีเมลผู้ประพันธ์บรรณกิจ: sujitra.k@psu.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและทดสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ในน้ำปลาโดยใช้รีเอเจนต์ปริมาณน้อยระดับไมโครลิตร และเพื่อศึกษาผลสัมฤทธิ์ของการพัฒนาวิธีวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ในน้ำปลาโดยใช้รีเอเจนต์ปริมาณน้อยระดับไมโครลิตร ในการลดปริมาณการใช้สารเคมีและของเสียจากสารเคมีอันตราย ตลอดจนลดต้นทุนในการดำเนินการทดลอง โดยยังคงใช้หลักการไทเทรตตกตะกอนของสารแบบฟาแจน การดำเนินการวิจัยประกอบด้วย การปรับปรุงกระบวนการวิเคราะห์ให้สามารถใช้รีเอเจนต์ในระดับไมโครลิตร พร้อมทั้งศึกษาความแม่นยำและความถูกต้องของวิธีการที่พัฒนาขึ้น โดยเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐาน ผลการทดลองได้รับการวิเคราะห์เชิงสถิติเพื่อประเมินความน่าเชื่อถือของเทคนิคดังกล่าว ผลการวิจัยพบว่าวิธีที่พัฒนาขึ้นให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องและแม่นยำ โดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากวิธีมาตรฐานที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อประยุกต์ใช้สำหรับการเรียนการสอนของนักศึกษาประมาณ 440 คนต่อภาคการศึกษาพบว่า วิธีดังกล่าวสามารถลดค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อสารเคมีลงได้ 98.98% และลดต้นทุนในการกำจัดของเสียจากสารเคมีอันตรายได้ 99.30% จากผลการวิจัยสรุปได้ว่า วิธีการวิเคราะห์ที่ได้รับการพัฒนาในงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในห้องปฏิบัติการสำหรับการเรียนการสอนด้านเคมีวิเคราะห์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในด้านความแม่นยำ ความถูกต้อง ต้นทุนที่ลดลง และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่ลดน้อยลง

**คำสำคัญ:** การตกตะกอนได้ของฟาแจน; ใช้รีเอเจนต์ปริมาณน้อยระดับไมโครลิตร; คลอไรด์; น้ำปลา

## Development of an Analytical Approach for Chloride Measurement in Fish Sauce with Minimal Reagent Consumption at the Microliter Scale

Sujitra Kaewsara<sup>\*</sup>, Juangjan Wudtipan, Sakonwan Petprakob, Kanokon Srijan and Tanawat Jannoo

*Division of Physical Science, Faculty of Science, Prince of Songkhla University, Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand*

<sup>\*</sup>Corresponding author's e-mail: [sujitra.k@psu.ac.th](mailto:sujitra.k@psu.ac.th)

### Abstract

This research aimed to develop and validate a chloride analysis method for fish sauce using a minimal reagent volume at the microliter level, with the objectives of reducing chemical consumption, minimizing hazardous waste generation, and lowering experimental costs. The method was based on the Fajans precipitation titration principle, with optimization focused on minimizing reagent usage. The study involved refining the analytical procedure to function effectively with microliter-scale reagent volumes and assessing the accuracy and precision of the developed method in comparison with the standard technique. Statistical analysis was conducted to evaluate the validity and reliability of the proposed approach. The results demonstrated that the developed method produced accurate and precise outcomes, with no statistically significant differences from the standard method at a 95% confidence level. Furthermore, its implementation in laboratory instruction for approximately 440 students per semester resulted in a 98.98% reduction in chemical procurement costs and a 99.30% decrease in hazardous waste disposal expenses. In conclusion, the developed method represents a cost-effective, environmentally sustainable, and reliable alternative for chloride analysis in fish sauce. Its successful integration into analytical chemistry laboratory courses underscores its potential for broader adoption in both educational and research contexts.

**Keywords:** Fajan's precipitation; Use microliter reagents; Chloride; Fish sauce

## บทนำ

การวิเคราะห์ปริมาณไอออนคลอไรด์ในน้ำปลาเป็นกระบวนการสำคัญ ซึ่งไอออนคลอไรด์จะอยู่ในรูปของโซเดียมคลอไรด์เป็นองค์ประกอบหลัก ที่ส่งผลต่อรสชาติ คุณภาพ และมาตรฐานของผลิตภัณฑ์น้ำปลา (เมธาพร ขจรจรัสกุล และคณะ, 2563) ซึ่งวิธีการวิเคราะห์ที่ปัจจุบันยังคงใช้สารเคมีในปริมาณมาก ทำให้ต้นทุนที่สูงและเกิดของเสียอันตรายจำนวนมาก ซึ่งกลายเป็นปัญหาในการบริหารจัดการภายในห้องปฏิบัติการ เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นการพัฒนาแนวทางใหม่ในการวิเคราะห์ที่ใช้สารเคมีในปริมาณน้อยเพื่อลดต้นทุนการทดลอง ลดของเสียอันตราย และเพิ่มความปลอดภัยภายในห้องปฏิบัติการ โดยยึดหลักการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีเป้าหมายเพื่อลดความสูญเปล่า ใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า และเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการทำงาน เช่น การลดเวลาการทดลอง ลดขั้นตอนที่ซ้ำซ้อน ลดการใช้สารเคมี และลดของเสียอันตราย ปรับกระบวนการทำงานโดยคำนึงถึงคุณค่า (value) และกระบวนการไหล (flow) อย่างต่อเนื่อง เพื่อให้เกิดผลลัพธ์ที่ปลอดภัย รวดเร็ว และยั่งยืน งานวิจัยด้าน Small-scale reaction ยังเน้นการปรับขนาดปฏิกิริยาให้เล็กลง เช่น การลดปริมาณตัวอย่าง หรือรีเอเจนต์ให้อยู่ในระดับไมโครลิตร ช่วยลดทั้งต้นทุนและความเสี่ยงด้านความปลอดภัย อีกทั้งยังช่วยให้เกิดการจัดการสารเคมีอันตรายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ให้ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพไม่แตกต่างกัน ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาวิธีวิเคราะห์ปริมาณไอออนคลอไรด์ในน้ำปลา โดยใช้หลักการไทเทรตแบบเกิดตะกอน (Precipitation Titration) ด้วยสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรต ( $\text{AgNO}_3$ ) และปรับกระบวนการวิเคราะห์ให้ใช้รีเอเจนต์ในระดับไมโครลิตร เพื่อลดการใช้สารเคมี ลดของเสียอันตราย เพิ่มความปลอดภัย และส่งเสริมแนวทางการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ วิธีที่พัฒนายังมีความเรียบง่าย ใช้อุปกรณ์พื้นฐานที่มีต้นทุนต่ำ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ทั้งในการเรียนการสอนและงานวิจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงถือเป็นแนวทางที่แม่นยำ ประหยัด และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยสอดคล้องกับแนวทางการจัดการทรัพยากรอย่างยั่งยืนภายในห้องปฏิบัติการ

## วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อพัฒนาวิธีวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ในน้ำปลาโดยใช้รีเอเจนต์ปริมาณน้อยระดับไมโครลิตร
2. เพื่อทดสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ในน้ำปลาโดยใช้รีเอเจนต์ปริมาณน้อยระดับไมโครลิตร
3. เพื่อศึกษาผลสัมฤทธิ์ของการพัฒนาวิธีวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ในน้ำปลาโดยใช้รีเอเจนต์ปริมาณน้อยระดับไมโครลิตร

## ระเบียบวิธีวิจัย

### 1. วัสดุและอุปกรณ์

1.1 สารเคมี ที่ใช้เป็นเกรดสำหรับวิเคราะห์ (Analytical grade) และใช้น้ำปราศจากไอออน (DI Water) ตลอดการศึกษา ได้แก่ สารละลายมาตรฐาน 0.01 M ซิลเวอร์ไนเตรต ( $\text{AgNO}_3$ ) เตรียมจากการละลายซิลเวอร์ไนเตรตบริสุทธิ์ สารละลายมาตรฐาน 0.0100 M โซเดียมคลอไรด์ ( $\text{NaCl}$ ) อบแห้ง  $\text{NaCl}$  ที่  $\sim 120^\circ\text{C}$  ก่อนนำมาชั่งและเตรียมสารละลาย โพแทสเซียมโครเมต ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ) และโพแทสเซียมไดโครเมต ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) ใช้เป็นอินดิเคเตอร์ใน Mohr's method เดกซ์ตรินและไดคลอโรฟลูออเรสซิน ใช้เป็นอินดิเคเตอร์ดูดซับใน Fajan's method

### 1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

วิธีมาตรฐาน บิวเรตขนาด 25 mL , ปิเปตทรานส์เฟอร์ขนาด 10 mL , ขวดรูปกรวยขนาด 250 mL , ปีกเกอร์, ขวดน้ำกลั่น, หลอดหยดพร้อมลูกยาง และขวดพร้อมมือจับบิวเรต

วิธีที่พัฒนา ไมโครเวลเพลต (Microwell Plate 96 ช่อง), ไมโครปิเปตขนาด 10 - 100  $\mu\text{L}$ , ไม้จิ้มฟันสำหรับคนสารละลายและหยอดหยดพลาสติก เครื่องชั่งดิจิทัล (0.0001 g) ใช้สำหรับชั่งสารเคมีอย่างแม่นยำในการเตรียมสารมาตรฐานทั้ง 2 วิธี

## 2. การเก็บตัวอย่างน้ำปลา

วิธีการสุ่มตัวอย่าง ตัวอย่างน้ำปลาถูกสุ่มเลือกซื้อจาก 5 แบรินด์ที่มีจำหน่ายของร้านค้าต่างๆ ในตำบลท่าข้าม อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา โดยใช้วิธี Simple Random Sampling (SRS) โดยการใช่วิธีจับฉลาก เขียนชื่อแบรินด์ทั้งหมดลงในกระดาษชิ้นเล็กๆ ใส่ในกล่อง ทำการจับฉลากเลือกแบรินด์ที่ต้องการสุ่มตัวอย่าง แต่ละแบรินด์มีโอกาสถูกเลือกเท่าๆกัน เพื่อให้ได้ตัวแทนที่หลากหลายของผลิตภัณฑ์ในท้องตลาด การเตรียมตัวอย่างน้ำปลา ปิเปิดตัวอย่างน้ำปลา 1.00 mL ด้วยไมโครปิเปตลงในปิเก็ตเตอร์ เติมน้ำปราศจากไอออนเจือจาง 50 เท่า และเตรียมสารละลายสำหรับไทเทรตทั้งในวิธีมาตรฐานและวิธีที่พัฒนา

## 3. การพัฒนาวิธีวิเคราะห์โดยใช้รีเอเจนต์ปริมาณน้อยระดับไมโครลิตร

### 3.1 การทำมาตรฐานสารละลาย 0.01 M $\text{AgNO}_3$ ของวิธีมาตรฐาน (Mohr's Method)

การเตรียมและสอบเทียบความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน 0.01 M  $\text{AgNO}_3$  ทำได้โดยการไทเทรตกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ทราบความเข้มข้นแน่นอนตามวิธีของ Mohr (Vogel, 1989) โดยใช้ปริมาตร 10.00 mL ของสารละลาย 0.0100 M NaCl ปิเปิดใส่ลงในขวดรูปกรวย จากนั้นเติมสารละลายอินดิเคเตอร์โพแทสเซียมโครเมต ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ) จำนวน 10 หยด แล้วไทเทรตด้วยสารละลาย 0.01 M  $\text{AgNO}_3$  จากบิวเรต จนเกิดตะกอนสีแดงอิฐของซิลเวอร์โครเมต ( $\text{Ag}_2\text{CrO}_4$ ) ซึ่งแสดงถึงจุดยุติ ทำซ้ำจำนวน 6 ครั้ง เพื่อความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของผลการไทเทรต (Vogel, 1989)

## 4. การวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ในน้ำปลาตัวอย่าง วิธีมาตรฐาน (Fajans' Method)

การวิเคราะห์ปริมาณไอออนคลอไรด์ในน้ำปลาทำได้โดยใช้หลักการไทเทรตแบบเกิดตะกอนตามวิธีของ Fajans ซึ่งใช้ซิลเวอร์ไนเตรต ( $\text{AgNO}_3$ ) เป็นสารละลายมาตรฐานและอินดิเคเตอร์เป็นตัวบ่งชี้จุดยุติ โดยปิเปิดน้ำปลา 1.00 mL ลงในขวดรูปกรวย เติมนิอินดิเคเตอร์ไดคลอโรฟลูออเรสเซิน 3 หยด และเติกซ์ทรินเล็กน้อยช่วยให้สารละลายผสมกัน จากนั้นไทเทรตด้วย 0.01 M  $\text{AgNO}_3$  เขย่าตลอดเวลาสังเกตจุดยุติที่สารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพูถ้ำนมนมเย็น ทำซ้ำทั้งหมด 6 ครั้งเพื่อประเมินความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของผลการวิเคราะห์ (Vogel, 1989)

### วิธีที่พัฒนา (Microliter Reagent Method)

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ลดการใช้สารเคมี และลดของเสียอันตราย ได้มีการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์โดยใช้ปริมาณตัวอย่างและสารเคมีในระดับไมโครลิตร โดยหยดน้ำปลาจำนวน 2 หยด (ประมาณ 40  $\mu\text{L}$ ) ลงในหลุมของไมโครเวลเพลต เติมนิไดคลอโรฟลูออเรสเซิน 1 หยด และเติกซ์ทรินเล็กน้อย (2 - 3 เกล็ด) จากนั้นเติมสารละลาย 0.01 M  $\text{AgNO}_3$  ทีละหยดพร้อมคนให้เข้ากันจนสังเกตจุดยุติที่สารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพู ทำการทดลองซ้ำ 6 ครั้งเช่นเดียวกับวิธีมาตรฐาน

การออกแบบการทดลองให้ใช้สารเคมีในปริมาณน้อยและวิเคราะห์ตัวอย่างพร้อมกันได้หลายชุด ช่วยให้กระบวนการวิเคราะห์มีประสิทธิภาพสูง ประหยัดด้านเวลาและทรัพยากร โดยยังคงให้ผลการทดลอง มีความแม่นยำด้วย ทั้งในแง่ของการประหยัดทรัพยากร ลดระยะเวลา และลดการสูญเสียเปล่า การใช้ไมโครเวลเพลตทำให้สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างหลายชุดพร้อมกันได้สะดวก เพิ่มความรวดเร็วในการทดลอง โดยไม่ลดความแม่นยำของผลการทดลอง เน้นคุณค่าของผลการทดลอง ด้วยการใช้ทรัพยากรให้น้อยที่สุด กระบวนการไทเทรตคลอไรด์ในน้ำปลาเป็นไปอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพจะช่วยลดการสูญเสียด้านเวลาและทรัพยากรในกระบวนการทดลองได้

## 5. การวิเคราะห์ทางสถิติ

การเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างวิธีมาตรฐานและวิธีที่พัฒนา

เพื่อประเมินความแตกต่างของผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีมาตรฐานและวิธีที่พัฒนา ใช้วิธีการทางสถิติดังนี้

5.1 คำนวณค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD) ของผลการทดลองจากทั้งสองวิธี

5.2 คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative Standard Deviation: RSD) เพื่อประเมินความเที่ยงของผลการ

ทดลอง

5.3 ทดสอบความแตกต่างทางสถิติระหว่างวิธีมาตรฐานและวิธีที่พัฒนาโดยใช้ t-Test: Paired Two Sample for

Means

5.4 ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของการทดลองครั้งนี้ ได้กำหนด ระดับนัยสำคัญทางสถิติ (Significance Level)

เท่ากับ  $\alpha = 0.05$  ซึ่งเป็นค่าที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปในงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์และสังคมศาสตร์ เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจว่าผลลัพธ์จากการทดสอบสมมติฐานมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ใช้ค่า  $p$ -value เป็นเกณฑ์ตัดสิน โดยหาก  $p > 0.05$  จะสรุปว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

## 6. สรุปแนวทางการดำเนินการ

งานวิจัยนี้พัฒนาวิธีวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ในน้ำปลาโดยใช้รีเอเจนต์ระดับไมโครลิตร ลดการใช้สารเคมีโดยคงหลักการไทเทรตแบบ Fajans และนำแนวคิด Lean Principles มาปรับปรุงกระบวนการให้กระชับ มีประสิทธิภาพ และลดขั้นตอนที่ซ้ำซ้อน โดยทดสอบเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐานผ่านการวิเคราะห์ทางสถิติ (Paired t-test,  $\alpha = 0.05$ ) พร้อมประเมินความแม่นยำ (RE) และความเที่ยงตรง (RSD < 2%)

6.1 ความคาดหวัง

ลดการใช้สารเคมี > 99%, ลดต้นทุน, ลดของเสียอันตราย และเพิ่มความยั่งยืนในการทดลอง

6.2 ผลที่ได้รับ

6.2.1 ได้วิธีวิเคราะห์ที่แม่นยำ เที่ยงตรง ไม่ต่างจากวิธีมาตรฐานทางสถิติ

6.2.2 กระบวนการทดลองรวดเร็ว ใช้ทรัพยากรน้อย เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

6.2.3 เหมาะสำหรับการเรียนการสอนและวิจัยเชิงวิเคราะห์อย่างยิ่ง

## ผลการวิจัย

เพื่อพัฒนาวิธีวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ในน้ำปลาโดยใช้รีเอเจนต์ปริมาณน้อยระดับไมโครลิตร ได้ทำการเปรียบเทียบความถูกต้องและความแม่นยำของวิธีมาตรฐานกับวิธีที่พัฒนาขึ้น โดยใช้ Mohr's method

### 1. ผลการทดลอง

1.1 ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบในการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (AOAC) กับวิธีการพัฒนาขึ้นในเชิงปริมาตรเพื่อหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย 0.01 M  $\text{AgNO}_3$  ด้วย 0.0100 M NaCl โดยวิธีของมอร์ (Mohr's method) ซึ่งปริมาตร 1 มิลลิลิตร (mL) เท่ากับ 1,000 ไมโครลิตร ( $\mu\text{L}$ ) และได้สอบเทียบมาตรฐานของหลอดหยดพลาสติกปลายตีบ ด้วยสายเดี่ยวมาตรฐาน โดย 20 หยด เท่ากับ 400 ( $\mu\text{L}$ ) /1 หลุม แสดงว่า 1 หยด เท่ากับ 20 ( $\mu\text{L}$ )

เปรียบเทียบผลทั้งสองวิธีในการหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐาน 0.01 M AgNO<sub>3</sub> ด้วย 0.0100 M NaCl โดยวิธีของมอร์ (Mohr's method) ของวิธีมาตรฐานและวิธีการพัฒนาใช้รีเอเจนต์ปริมาณน้อยระดับไมโครลิตร ซึ่งวิธีมาตรฐานใช้สารละลาย 0.0100 M NaCl ปริมาตร 10.00 mL และใช้สารละลาย 0.01 M AgNO<sub>3</sub> ปริมาตร 9.95 – 10.00 mL ส่วนวิธีพัฒนาที่ใช้รีเอเจนต์ปริมาณน้อยระดับไมโครลิตรใช้ 0.0100 M NaCl ปริมาตร 40 µL และใช้ 0.01 M AgNO<sub>3</sub> ปริมาตร 40 µL คงที่ทุกครั้ง ทำการทดลองซ้ำ 6 ครั้ง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 1

### เปรียบเทียบความแม่นยำและความเที่ยง

ความแม่นยำ (Accuracy) ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของ AgNO<sub>3</sub> ที่ได้จากทั้งสองวิธีมีค่าเท่ากัน (0.0100 M) แสดงให้เห็นว่าทั้งสองวิธีให้ค่าผลลัพธ์ที่ถูกต้องตรงกับค่าทางทฤษฎี

ความเที่ยง (Precision) วิธีมาตรฐานมีค่า SD = ±0.02 ซึ่งบ่งบอกถึงความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยจากการใช้ปริมาตรสารละลายในระดับมิลลิลิตร วิธีพัฒนามีค่า SD = ±0.00 แสดงให้เห็นว่ามีความสม่ำเสมอและความเที่ยงสูงมาก เนื่องจากการใช้ปริมาตรรีเอเจนต์ที่แม่นยำยิ่งขึ้นได้ผลการทดลองดังตารางที่ 1

**ตารางที่ 1** การเปรียบเทียบปริมาตรของสารละลายที่ใช้ในการไทเทรตและคำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย 0.01 M AgNO<sub>3</sub> ด้วย 0.0100 M NaCl โดยวิธีของมอร์ (Mohr's method) ด้วยวิธีมาตรฐานและวิธีการพัฒนาใช้รีเอเจนต์ปริมาณน้อยระดับไมโครลิตร (n = 6)

ครั้งที่	วิธีมาตรฐาน			วิธีพัฒนาขึ้น		
	ปริมาตร 0.01 M NaCl ที่ใช้ (mL)	ปริมาตร 0.01 M AgNO <sub>3</sub> ที่ใช้ (mL)	ความเข้มข้น AgNO <sub>3</sub> คำนวณได้ (M)	ปริมาตร 0.01 M NaCl ที่ใช้ (µL)	ปริมาตร 0.01 M AgNO <sub>3</sub> ที่ใช้ (µL)	ความเข้มข้น AgNO <sub>3</sub> คำนวณได้ (M)
1	10.00	10.00	0.0100	40	40	0.0100
2	10.00	9.95	0.0101	40	40	0.0100
3	10.00	10.00	0.0100	40	40	0.0100
4	10.00	10.00	0.0100	40	40	0.0100
5	10.00	10.00	0.0100	40	40	0.0100
6	10.00	10.00	0.0100	40	40	0.0100
AgNO <sub>3</sub> (M)		0.0100			0.0100	
SD		± 0.02			± 0.00	
RSD		2.00			0.00	

ได้จากสูตรของวิธีมาตรฐาน

$$\begin{aligned}
 M \text{ AgNO}_3 \text{ (mol/dm}^3\text{)} &= M \text{ NaCl (mol/dm}^3\text{)} \cdot V \text{ NaCl (mL)} / V \text{ AgNO}_3 \text{ (mL)} \\
 &= 0.0100 \text{ NaCl (mol/dm}^3\text{)} \times 10.00 \text{ NaCl (mL)} / 9.98 \text{ AgNO}_3 \text{ (mL)} \\
 &= 0.0100 \text{ M AgNO}_3
 \end{aligned}$$

จากสูตรของวิธีการพัฒนาใช้รีเอเจนต์ปริมาณน้อยระดับไมโครลิตร

$$\begin{aligned}
 M \text{ AgNO}_3 \text{ (mol/dm}^3\text{)} &= M \text{ NaCl (mol/dm}^3\text{)} \cdot V \text{ NaCl (}\mu\text{L)} / V \text{ AgNO}_3\text{(}\mu\text{L)} \\
 &= 0.0100 \text{ NaCl (mol/dm}^3\text{)} \times 40 \text{ NaCl (}\mu\text{L)} / 40 \text{ AgNO}_3\text{(}\mu\text{L)} \\
 &= 0.0100 \text{ M AgNO}_3
 \end{aligned}$$

1.2 เพื่อทดสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ในน้ำปลาโดยใช้รีเอเจนต์ปริมาณน้อยระดับไมโครลิตรในน้ำปลาดตัวอย่าง โดยใช้วิธีของฟาแจน (Fajan's method) แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลเปรียบเทียบการวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ในน้ำปลาดตัวอย่าง และการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในน้ำปลาดตัวอย่างต่าง ๆ (ตัวอย่างเจือจาง 50 เท่า) จำนวนในรูปของเกลือ NaCl %<sub>w/v</sub> เพื่อศึกษาความแม่นยำของวิธีการทดสอบ ทำซ้ำ 6 ครั้ง (n = 6) โดยค่าจริงมีค่า 30, 27, 29, 30, 30 M ตามลำดับ

ตัวอย่าง	วิธีมาตรฐาน					วิธีพัฒนาขึ้น				
	ปริมาตรตัวอย่างที่ใช้ 10.0 (mL)					ปริมาตรตัวอย่างที่ใช้ 20 (μL)				
	AgNO <sub>3</sub> (mL)	ตัวอย่าง จำนวนได้ (M)	±SD	RE	RSD	AgNO <sub>3</sub> (μL)	ตัวอย่าง จำนวนได้ (M)	±SD	RE	RSD
A	11.15	32.58	±0.26	0.09	0.80	5545	32.41	±0.04	0.08	0.12
B	10.05	29.37	±0.17	0.09	0.58	5000	29.22	±0.09	0.08	0.31
C	10.90	31.85	±0.12	0.10	0.38	5450	31.85	±0.19	0.10	0.60
D	11.20	32.73	±0.34	0.09	1.04	5550	32.14	±0.16	0.07	0.50
E	11.20	32.73	±0.34	0.09	1.04	5650	33.02	±0.17	0.10	0.51

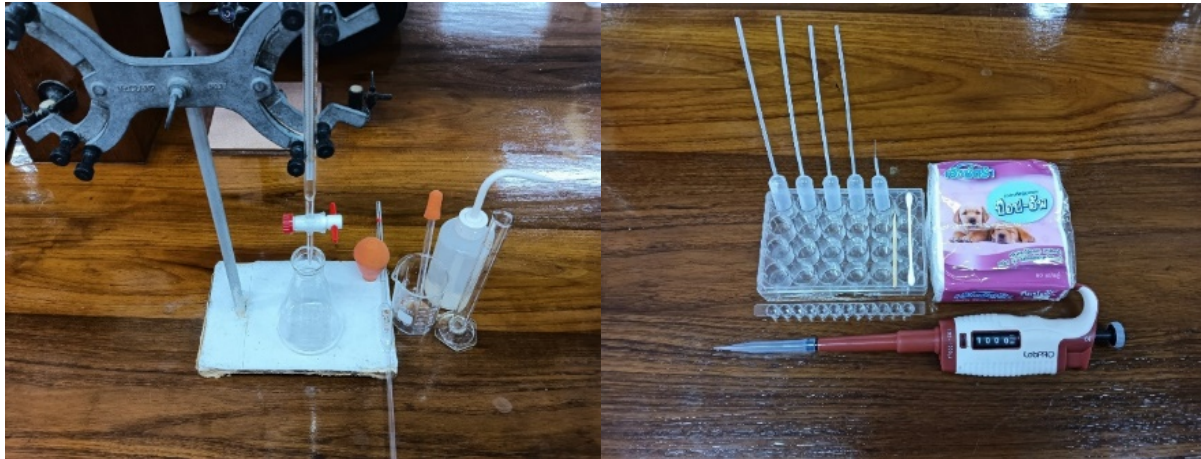
1.3 เพื่อศึกษาผลสัมฤทธิ์ของการพัฒนาวิธีวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ในน้ำปลาโดยใช้รีเอเจนต์ปริมาณน้อยระดับไมโครลิตร ได้เปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างวิธีมาตรฐานกับวิธีพัฒนาขึ้น จำนวน ค่าเฉลี่ย (Mean), ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD), และค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (RSD) ทดสอบความแตกต่างทางสถิติระหว่างสองวิธีโดยใช้ t-Test: Paired Two Sample for Means (McClave et al., 2017) เพื่อตรวจสอบว่าค่าเฉลี่ยของทั้งสองวิธีแตกต่างกันหรือไม่ (α = 0.05) ค่า p-value ใช้ตัดสินความแตกต่างที่ระดับนัยสำคัญ 95% (p > 0.05 หมายถึงไม่มีความแตกต่าง) การวิเคราะห์ความแม่นยำและความเที่ยง จำนวน Relative Error (RE) เพื่อเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับค่าจริง จำนวน Relative Standard Deviation (RSD) < 2% เพื่อยืนยันความเที่ยงของวิธีที่พัฒนา (Skoog et al., 2017)

ตารางที่ 3 ผลการคำนวณ t-Test: Paired Two Sample for Means เพื่อตรวจสอบว่าค่าเฉลี่ยของทั้งสองวิธีแตกต่างกันหรือไม่ (α = 0.05) ค่า p-value ใช้ตัดสินความแตกต่างที่ระดับนัยสำคัญ 95% (p > 0.05 หมายถึงไม่มีความแตกต่าง)

เปรียบเทียบผลการทดลอง ระหว่างวิธีมาตรฐานกับวิธีพัฒนาขึ้น	วิธีมาตรฐาน		วิธีพัฒนา		t	p
	X-Bar	S.D.	X-Bar	S.D.		
	31.852	1.43	31.728	1.46		

1.4 การวิเคราะห์ต้นทุนและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ผลการเปรียบเทียบการใช้อุปกรณ์และการใช้สารเคมีทั้ง 2 วิธี ด้านอุปกรณ์ ที่จำเป็นต้องใช้ในการทดลองด้วยวิธีมาตรฐานเปรียบเทียบวิธีการพัฒนาใช้รีเอเจนต์ปริมาณน้อยระดับไมโครลิตร ลดการใช้อุปกรณ์ราคาแพง หาซื้อได้ง่าย ใช้งานสะดวก



อุปกรณ์ของวิธีมาตรฐาน

อุปกรณ์ของวิธีพัฒนาขึ้น

ภาพที่ 1 เปรียบเทียบอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้ในการทดลองด้วยวิธีมาตรฐานและวิธีการพัฒนาใช้รีเอเจนต์ปริมาณน้อยระดับไมโครลิตร (ภาพถ่ายโดยผู้เขียน, 2025)

ด้านสารเคมีที่จำเป็นต้องใช้ในการทดลองด้วยวิธีมาตรฐานเปรียบเทียบวิธีการพัฒนาใช้รีเอเจนต์ปริมาณน้อยระดับไมโครลิตร ทำให้สามารถลดปริมาณการใช้สารเคมี ได้เท่ากับ 99.30% ลดยอดการสั่งซื้อสารเคมีประจำปีได้เท่ากับ 98.98% ต่อภาคการศึกษา ดังผลการเปรียบเทียบทั้ง 2 วิธีดังตารางที่ 4

ลดปริมาณของเสียและค่าใช้จ่ายในการส่งกำจัด จากการศึกษาเปรียบเทียบปริมาณของเสียและค่าใช้จ่ายในการส่งกำจัดของเสีย สารเคมีอันตรายจากการทดลอง (1 เทอม = 220 กลุ่ม)

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบปริมาณสารเคมีที่ใช้ (1 เทอม = 220 กลุ่ม)

สารเคมีที่ใช้	ปริมาณสารเคมีที่ใช้ (mL)		ประหยัดสารเคมี (mL)	ราคาสารเคมี (บาท)		ประหยัดงบประมาณการสั่งซื้อสารเคมี (บาท)
	วิธีมาตรฐาน	วิธีพัฒนา		วิธีมาตรฐาน	วิธีพัฒนา	
	เทอม	เทอม	ปี	เทอม	เทอม	ปี
โซเดียมคลอไรด์	22,000	100	21,900	336	8.96	327
ซิลเวอร์ไนเตรด	55,000	250	54,750	10,800	25.92	10,774.08
ไดคลอโรฟลูออเรสซิน	1,000	100	900	1,150	23	1,127
เดกซ์ตริน	100	10	90	250	25	225
โพแทสเซียมโครเมต+โพแทสเซียมไดโครเมต	2,000	100	1,900	480	48	432
เฉลี่ยรวม	80,100	560	79,540	13,016	130.88	12,885.12
คิดเป็น (%)		99.30			98.98	



ตารางที่ 5 เปรียบเทียบปริมาณของเสียและค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสีย (1 เทอม = 220 กลุ่ม)

ของเสียสารเคมีอันตราย	ปริมาณของเสียประเภทโลหะหนัก (mL)				ค่าใช้จ่ายในการส่งกำจัดของเสีย (1 L = 40 บาท)				ประหยัดค่าใช้จ่าย ในการกำจัดของเสีย
	วิธีมาตรฐาน		วิธีพัฒนา		วิธีมาตรฐาน		วิธีพัฒนา		
	กลุ่ม	เทอม	กลุ่ม	เทอม	กลุ่ม	เทอม	กลุ่ม	เทอม	1 ปี
ตะกอนซิลเวอร์	364.09	80,100	2.55	560	14.56	3,204	0.11	22.40	3,181.60
		(100%)		(0.70%)		(100%)		(0.70%)	
คิด (%)	ปริมาณของเสียลดลง 99.30				ค่าใช้จ่ายในการส่งกำจัดเหลือ 0.70				99.30

ที่มา: Recycle Engineering (2024)

### สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและพัฒนาวิธีวิเคราะห์หาปริมาณไอออนคลอไรด์ในน้ำปลา โดยใช้รีเอเจนต์ในปริมาณน้อยระดับไมโครลิตร โดยยังคงใช้หลักการไทเทรตแบบ Fajans ซึ่งเป็นวิธีการตกตะกอนด้วยสารละลายมาตรฐาน  $\text{AgNO}_3$  และใช้อินดิเคเตอร์ไดคลอโรฟลูออเรสเซินบ่งบอกจุดยุติของปฏิกิริยา ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ความแม่นยำและความเที่ยงของวิธีที่พัฒนาขึ้นให้ผลการวิเคราะห์คลอไรด์ในน้ำปลาได้ถูกต้อง (Accuracy) ตรงกับค่าทางทฤษฎีและไม่แตกต่างจากวิธีมาตรฐานทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $p > 0.05$ ) ความเที่ยง (Precision) ของวิธีที่พัฒนาขึ้นมีค่า RSD < 2% ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ดีมากในเชิงเคมีวิเคราะห์ และให้ค่าความเบี่ยงเบนน้อยกว่าวิธีมาตรฐาน ส่วนทางด้านประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากร วิธีที่พัฒนาขึ้นสามารถลดปริมาณการใช้สารเคมีโดยรวมได้ถึง 99.30% ลดต้นทุนค่าจัดซื้อสารเคมีในการทดลองได้ถึง 98.98% ต่อภาคการศึกษา (1 เทอม = 220 กลุ่ม) ลดของเสียสารเคมีอันตรายได้ถึง 99.30% ส่งผลให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียสารเคมีอันตรายได้ ความเหมาะสมในการใช้งานจริง วิธีที่พัฒนามีขั้นตอนง่าย ใช้อุปกรณ์พื้นฐานที่มีต้นทุนต่ำ เช่น ไมโครเวลเพลตแทนขวดรูปกรวย และ ไมโครปิเปตแทนการใช้ปิเปตทรานส์เฟอร์ ซึ่งมีราคาแพงกว่าและมีข้อกำหนดการใช้มากกว่า สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างหลายชุดได้พร้อมกันในไมโครเวลเพลตเพียงอันเดียว เพิ่มความรวดเร็วและลดระยะเวลาในการทดลอง เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการเรียนการสอนเชิงปฏิบัติการในรายวิชาเคมีวิเคราะห์ รวมถึงการวิจัยขนาดเล็ก (Small-Scale Research) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ผลการวิจัยที่ได้มีความสอดคล้องกับหลักการไทเทรตแบบ Fajans ที่ใช้สารละลาย  $\text{AgNO}_3$  ทำปฏิกิริยากับไอออนคลอไรด์ และใช้ไดคลอโรฟลูออเรสเซินเป็นอินดิเคเตอร์บ่งบอกจุดยุติของปฏิกิริยา (Vogel, 1989; Skoog et al., 2017) ซึ่งเป็นแนวทางที่ได้รับการยอมรับในทางเคมีวิเคราะห์ และเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐาน พบว่าวิธีที่พัฒนาขึ้นมี ความแม่นยำ (accuracy) และ ความเที่ยง (precision) ในระดับดีมาก โดยค่าความเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ (RSD) ต่ำกว่า 2% และไม่แตกต่างกันทางสถิติจากวิธีมาตรฐานที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยเดิมที่ใช้วิธีวิเคราะห์คลอไรด์ด้วยเทคนิคอื่น เช่น spectrophotometry หรือ flow analysis (Bohrer et al., 2011; Nishida & Yamamoto, 2014)

จุดเด่นสำคัญของวิธีที่พัฒนาขึ้นคือการใช้สารเคมีในปริมาณน้อยระดับไมโครลิตร ซึ่งช่วยลดการใช้สารเคมีได้มากถึง 99.30% และลดต้นทุนค่าใช้จ่ายรวมทั้งของเสียอันตรายอย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับแนวคิด “Green Chemistry” (American Public Health Association, 2017) และแนวทางของงานวิจัยที่เน้นการลดของเสียและการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ ในด้านการใช้งานจริง วิธีนี้มีขั้นตอนง่าย ใช้อุปกรณ์ราคาถูก อย่างเช่น ไมโครเวลเพลตและไมโครปิเปต เหมาะสำหรับการทดลองในห้องเรียนหรือการวิจัยขนาดเล็ก เพราะสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างหลายชุดพร้อมกันได้ในเวลาอันสั้น (Christian, 2004) เพิ่มความสะดวกและประสิทธิภาพในการเรียนการ

สอน ซึ่งวิธีที่พัฒนาขึ้นสอดคล้องกับทฤษฎีเดิม มีความถูกต้องแม่นยำ และเหมาะสมสำหรับการใช้งานจริง ทั้งยังส่งเสริมแนวทางการวิเคราะห์เชิงอนุรักษ์ทรัพยากรอย่างชัดเจน

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนโครงการพัฒนาคนพัฒนางาน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เลขที่สัญญารับทุน วท. 68004 สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัยชิ้นนี้ สามารถเสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

### เอกสารอ้างอิง

- เมธาพร ขจรจรัสกุล, ขนิษฐา หาญจนวงศ์, วิศัลย์ศยา ศรีทองกลาง, กอบเกียรติ สอนใจ, และ กมลทิพย์ เสรีนนท์ชัย. (2563). การวิเคราะห์ปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์ในผลิตภัณฑ์น้ำปลาไทย. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 28(2), 209-218.
- แสงโสม สีนะวัฒน์. (2552). *รายงานการสำรวจปริมาณการบริโภคโซเดียมคลอไรด์ของประชากรไทย* (พิมพ์ครั้งที่ 1). นนทบุรี: สำนักโภชนาการ, กรมอนามัย, กระทรวงสาธารณสุข, ประเทศไทย
- <https://nutrition2.anamai.moph.go.th/th/book/download/?did=194019&id=46341&reload=>
- กมลทิพย์ เสรีนนท์ชัย. (2566). *เกลือในน้ำปลา : พระเอกหรือผู้ร้าย*. กรุงเทพฯ: สืบค้นจาก <https://www.bangkokbiznews.com/health/well-being/1082883>
- Bohrer, D., do Nascimento, P. C., & de Carvalho, L. M. (2011). Microscale Volhard titration for chloride determination in table salt. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 401(7), 2277–2282.
- Christian, G. D. (2004). *Analytical chemistry* (6th ed.). New York, USA: John Wiley & Sons.
- ESPreL Checklist. (2025). *Environmental and Safety Priority Ranking for Experimental Laboratory chemicals*. Retrieved from <https://www.nite.go.jp/en/chem/espel.html>
- McClave, J. T., Benson, P. G., & Sincich, T. (2017). *Statistics for business and economics* (13th ed.). Boston, USA.
- Nishida, Y., & Yamamoto, H. (2014). Precipitation titration using eosin indicator for chloride determination in waste water (pp. 423–424). In *Proceedings of the Annual Meeting of the Japan Society of Material Cycles and Waste Management*. Tokyo, Japan: Japan Society of Material Cycles and Waste Management.
- Recycle Engineering (2024). *About us*. Retrieved from <https://www.recycleengineering.co.th/about-us>
- Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2017). *Fundamentals of analytical chemistry* (10th ed.). Boston, MA: Cengage Learning.
- Vogel, A. I. (1989). *Vogel's textbook of quantitative chemical analysis* (5th ed.). Harlow, England: Longman Scientific & Technical.