# ชุดการทดลองสำเร็จรูปเรื่องสารกำหนดปริมาณโดยใช้วิธีการตกตะกอน
# Limiting Reagent Test Kit Using Precipitation Method

อาภาพร บุญมี[1*] ศิริพร ปาเชน[1,2] และ สุนิษา สุวรรณเจริญ[1]

[1]ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี จังหวัดจันทบุรี

[2]โรงเรียนบ้านฉางกาญจนกุลวิทยา จังหวัดระยอง

[*]Corresponding author, E-mail: apaporn.b@rbru.ac.th, โทร. 081-6195115

## บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างและพัฒนาชุดการทดลองสำเร็จรูปเรื่องสารกำหนดปริมาณโดยใช้วิธีการตกตะกอนด้วยอุปกรณ์พื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ที่หาได้ง่ายและราคาถูก โดยมีกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง 3 กลุ่ม ได้แก่ นักศึกษาสาขาวิทยาศาสตร์ ไม่จำกัดคณะจำนวน 10 คน นักศึกษาคณะครุศาสตร์ สาขาวิชาเคมีจำนวน 10 คน และนักเรียนระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจำนวน 25 คน ในการทดสอบประสิทธิภาพของชุดทดลองสำเร็จรูปที่สร้างและพัฒนาขึ้นตามลำดับ โดยสถิติที่ใช้ในการวิจัย คือ ร้อยละ ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ความสัมพันธ์สมการเชิงเส้นตรง และค่า t-test ผลการวิจัยพบว่า ชุดการทดลองนี้สร้างจากวัสดุอุปกรณ์ที่หาได้ง่ายและราคาถูกโดยประกอบด้วยภาชนะพลาสติกบรรจุสารเคมี คิวเวทท์พลาสติก หลอดฉีดยาพลาสติก แผ่นวางคิวเวทท์ ไม้บรรทัด ลวดคนสาร น้ำกลั่น สารละลาย $H_2SO_4$ และ $CaCl_2$ เข้มข้น 2 โมลาร์ วิธีการใช้ และตารางมวลมาตรฐาน $CaSO_4$ โดยผลการทดสอบประสิทธิภาพของนักเรียนระดับมัธยมศึกษาพบว่าสามารถระบุชนิดของสารกำหนดปริมาณได้ร้อยละ 84 และมีค่าเฉลี่ยความพึงพอใจต่อชุดทดลองนี้เท่ากับ 4.27 ซึ่งอยู่ในระดับเห็นด้วยมาก

***คำสำคัญ**: ชุดทดลอง สารกำหนดปริมาณ การตกตะกอน*

## Abstract

The purpose of this research was to create and develop the limiting reagent test kit creating and development base on precipitation reaction by using the common and inexpensive scientific equipment. Three groups of the subjects, 10 science students from different faculties; 10 chemistry students from faculty of education; 25 students from high school, selected by purposive sampling technique, were used to determine the developed test kit efficiency, respectively. The data were statistically analyzed by percentage, means, standard deviation, coefficient of determination ($R^2$) and t-test. The test kit was produced from the easy to find and low price equipments including chemical plastic containers, plastic cuvettes, plastic syringes, cuvette holding plate, ruler, wire, distilled water, 2 M $H_2SO_4$ and $CaCl_2$ solution, the method manual and the calcium sulfate standard mass table. For the efficiency results, the percentage of high school students that correctly specified the limiting reagent was 84 and the mean scores of students' opinions toward the test kit was 4.24 which was on the good level.

***Keywords:*** *test kit, limiting reagent, precipitation*

**บทนำ**

สารกำหนดปริมาณ (Limiting reagent) คือสารตั้งต้นที่เมื่อทำปฏิกิริยาแล้วเป็นสารที่หมดก่อนในปฏิกิริยาและเป็นตัวกำหนดปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งการเข้าใจถึงสารกำหนดปริมาณนั้นจะนำไปสู่การคำนวณทางปริมาณสารสัมพันธ์ในปฏิกิริยาต่าง ๆ เพื่อคำนวณหาผลได้ตามทฤษฎี ร้อยละของผลที่ได้ ปริมาณสารและพลังงานที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยาเคมี ซึ่งสำคัญอย่างยิ่งในการผลิตสารนานาชนิดในห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์และโรงงานอุตสาหกรรมเคมี สำหรับการเรียนการสอนเรื่องสารกำหนดปริมาณถูกบรรจุไว้ในรายวิชาเคมีทั้งในหลักสูตรระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย และระดับอุดมศึกษา วิธีการสอนโดยส่วนใหญ่จะใช้การยกตัวอย่างประกอบการคำนวณซึ่งการสอนวิธีนี้มีข้อจำกัดที่ต้องอาศัยความชำนาญของผู้สอนในการอธิบายเพื่อให้ผู้เรียนเข้าใจดังนั้นหากผู้สอนขาดความเชี่ยวชาญอาจส่งผลให้ผู้เรียนรับรู้ความหมายของสารกำหนดปริมาณได้อย่างคลาดเคลื่อน ทางหนึ่งของการแก้ปัญหาดังกล่าวคือการใช้สื่อการเรียนการสอนที่ช่วยเสริมให้ผู้เรียนเข้าใจในเนื้อหาที่เรียนได้มากยิ่งขึ้น สื่อการเรียนรู้ที่ใช้ในการสอนสารกำหนดปริมาณนั้นมีด้วยกันหลายรูปแบบ อาทิการสาธิตทดลองเรื่องสารกำหนดปริมาณโดยใช้ปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมคาร์ไบด์กับน้ำได้แก๊สอะเซทิลีนเป็นสารผลิตภัณฑ์ (จุฑามาศ มะลิลา, สุภาพ ตาเมือง, มลิวรรณ อมตธงไชย, ปุริม จารุจำรัส, และเสนอ ชัยรัมย์, 2559, น. 1-8) ชุดกิจกรรมสามระดับโดยอาศัยปฏิกิริยาระหว่างคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Angélica, Edgardo, & Zuleika, 2014 P. 1464-1467) ชุดทดลองหาปริมาตรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาสารประกอบโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (Nobuyoshi, Tomayasu, & Kana, 2011, P.1309-1313) การใช้โมเดลแฮมเบอร์เกอร์ในการสอนสารกำหนดปริมาณ (Liliana, Eduardo, Santiago, & Lydia, 2003, P.1021-1022) การพองของลูกโป่งโดยอาศัยปฏิกิริยาระหว่างน้ำส้มสายชูและโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (Romklao, 2003, P. 1382-1384) ชุดทดลองน้ำอัดลมแสนอร่อย (Padua, Tomayasu, & Kana, 2000, P.1608) อย่างไรก็ตามสื่อการสอนสารกำหนดปริมาณในหลายการทดลองจำเป็นต้องใช้เครื่องแก้วและอุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์ที่ราคาสูงและหาได้ยากซึ่งทำให้โรงเรียนที่ขาดแคลนอุปกรณ์วิทยาศาสตร์สูญเสียโอกาสในการนำมาประยุกต์ใช้ ประกอบกับในปัจจุบันยังไม่มีชุดทดลองสำเร็จรูปเรื่องสารกำหนดปริมาณจัดจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบและสร้างชุดทดลองสำเร็จรูปเรื่องสารกำหนดปริมาณด้วยการสังเกตความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของตะกอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีเทียบกับปริมาตรของสารตั้งต้นที่ใช้โดยชุดทดลองสร้างจากวัสดุอุปกรณ์ที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน สามารถใช้อุปกรณ์วิทยาศาสตร์พื้นฐานที่มีอยู่ในห้องเรียนโดยทั่วไป และออกแบบให้มีการใช้ตารางมวลมาตรฐานที่สร้างขึ้นทดแทนการใช้เครื่องชั่งราคาสูง ซึ่งยังไม่มีงานวิจัยใดใช้ความสูงของตะกอนบ่งบอกถึงมวลของตะกอนมาก่อน โดยมวลที่ได้จากการเทียบจากตารางมวลมาตรฐานนี้สามารถนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อให้เกิดความเข้าใจในความหมายของสารกำหนดปริมาณได้ดียิ่งขึ้น

**วัตถุประสงค์การวิจัย**

เพื่อสร้างและพัฒนาชุดทดลองเรื่องสารกำหนดปริมาณโดยใช้วิธีการตกตะกอนด้วยอุปกรณ์พื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ที่หาได้ง่ายและราคาถูก

**วิธีดำเนินการวิจัย**

**ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง**

ประชากรที่ใช้ในการวิจัยนี้แบ่งเป็นกลุ่มตัวอย่าง 3 กลุ่มดังนี้

กลุ่มตัวอย่างที่ 1 เป็นนักศึกษามหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี ระดับปริญญาตรี สาขาวิทยาศาสตร์ ไม่จำกัดคณะ

และชั้นปี จำนวน 10 คน โดยวิธีสุ่มแบบเจาะจง

กลุ่มตัวอย่างที่ 2 เป็นนักศึกษามหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี ระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 3 คณะครุศาสตร์ สาขาวิทยาศาสตร์ แขนงวิชาเคมี จำนวน 10 คน โดยวิธีสุ่มแบบเจาะจง

กลุ่มตัวอย่างที่ 3 เป็นนักเรียนระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 โรงเรียนบ้านฉางกาญจนกุลวิทยา จังหวัดระยอง จำนวน 25 คน โดยวิธีสุ่มแบบเจาะจง

**เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย**

1. ชุดทดลองสำเร็จรูปที่สร้างและพัฒนาโดยคณะผู้วิจัย
2. ใบกิจกรรมการทดลองเรื่องสารกำหนดปริมาณ
3. แบบสอบถามความพึงพอใจในการใช้ชุดทดลองสำเร็จรูป

**ขั้นตอนการออกแบบและจัดทำชุดทดลอง**

**1. ศึกษาปฏิกิริยาเคมีการเกิดตะกอนเพื่อสร้างชุดทดลอง**

ศึกษาปฏิกิริยาการเกิดตะกอน 25 ปฏิกิริยา โดยสารละลายแต่ละชนิดที่ใช้มีความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ผสมกันในหลอดทดลองขนาดเล็ก (Pyrex, 13x100 มิลลิเมตร) แล้วเติมน้ำกลั่น 1 มิลลิลิตร สังเกตความเรียบของผิวหน้าตะกอน การเกาะของตะกอนด้านข้างหลอด ความแน่นของตะกอน สีตะกอน ความสูงของตะกอน ระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดตะกอน จากนั้นเลือกปฏิกิริยาจำนวน 3 ปฏิกิริยาที่ให้ลักษณะตะกอนที่ดี ครบสามประการ คือ ผิวหน้าเรียบ จัดเรียงตัวแน่นและไม่เกาะติดข้างหลอด มาศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความสูงกับมวลของตะกอน แล้วเลือกปฏิกิริยาที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงที่ดีที่สุดมาทำการศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมเพื่อใช้สำหรับสร้างชุดทดลองสำเร็จรูป

**2. การสร้างตารางมวลมาตรฐานแคลเซียมซัลเฟต**

ผสมสารละลาย $H_2SO_4$ เข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตรคงที่ 1 มิลลิลิตร เข้ากับสารละลาย $CaCl_2$ เข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 0.1–1.5 มิลลิลิตร ในคิวเวทท์พลาสติก และเติมน้ำกลั่น 1 มิลลิลิตร ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 5 นาที วัดความสูงด้วยไม้บรรทัด จากนั้นกรองตะกอนด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ แล้วนำตะกอนไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที นำตะกอนพักไว้ที่โถดูดความชื้นจนเย็น ชั่งตะกอนด้วยเครื่องชั่งสารทศนิยม 4 ตำแหน่ง อบตะกอนซ้ำจนสามารถชั่งมวลตะกอนได้ค่าคงที่ ทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง แล้วเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงและมวลของตะกอน หาสมการเส้นตรงเพื่อนำไปสร้างตารางมวลมาตรฐานแคลเซียมซัลเฟต จากนั้นทำการเปรียบเทียบอุปกรณ์สำหรับสร้างชุดทดลองระหว่างการใช้คิวเวทท์พลาสติก และการใช้หลอดทดลองขนาดเล็ก และเปรียบเทียบระหว่างการใช้หลอดฉีดยาพลาสติกแทนการใช้ปิเปตต์ด้วยวิธีการเดียวกันดังกล่าวมาข้างต้น นำผลการทดลองมาเปรียบเทียบด้วยการทดสอบทางสถิติ t-test โดยมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (บุญศรี พรหมมาพันธุ์, 2558, น.24-40)

**3. การพัฒนาชุดทดลองสำเร็จรูปและการทดสอบประสิทธิภาพ**

สำหรับชุดทดลองสำเร็จรูปที่สร้างขึ้นในครั้งแรก ผู้วิจัยได้นำไปทดสอบกับกลุ่มตัวอย่างที่ 1 โดยกำหนดให้กลุ่มตัวอย่างใช้หลอดฉีดยาตวงสารละลายแต่ละความเข้มข้นตามปริมาตรที่กำหนดในใบกิจกรรมลงในคิวเวทท์แล้วคนสารโดยใช้ลวด จากนั้นตั้งทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 5 นาที จึงใช้ไม้บรรทัดวัดความสูงของตะกอน และนำค่าความสูงไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของสารละลาย $CaCl_2$ กับความสูงของตะกอน $CaSO_4$ ตอบคำถามเรื่องสารกำหนดปริมาณและสารเหลือ แล้วนำค่าความสูงของตะกอนไปเทียบกับตารางมวลมาตรฐานแคลเซียมซัลเฟตเพื่อหามวลของตะกอนที่ได้จากการทดลอง และประเมินผลความพึงพอใจในการใช้ชุดทดลองสำเร็จรูป จากนั้นผู้วิจัยได้นำผลการทดสอบประสิทธิภาพมาปรับปรุงแก้ไขและพัฒนาชุดการทดลอง

สำเร็จรูป โดยในการพัฒนาครั้งที่ 2 และ 3 ใช้กลุ่มตัวอย่างที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ในการประเมินประสิทธิภาพของชุดทดลอง

**การวิเคราะห์ข้อมูล สถิติที่ใช้**

ร้อยละ (Percentage) ค่าเฉลี่ย (Mean) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD) ความสัมพันธ์สมการเชิงเส้นตรงซึ่งวิเคราะห์จากค่า Coefficient of determination ($R^2$) ทั้งสี่ค่านี้ใช้โปรแกรม Microsoft office Excel 2007 ในการวิเคราะห์ผล ส่วนการหานัยสำคัญของความสัมพันธ์ของสองสิ่งใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ t–test เทียบกับตารางมาตรฐาน two-tail สำหรับค่าคะแนนเฉลี่ยของความคิดเห็นของกลุ่มตัวอย่างที่มีต่อชุดทดลองสำเร็จรูปเรื่องสารกำหนดปริมาณโดยใช้วิธีการตกตะกอนได้กำหนดเกณฑ์และการแปลความหมาย ดังนี้

| ค่าคะแนนเฉลี่ย | แปลความหมาย |
|---|---|
| 1.00-1.49 | เห็นด้วยน้อยที่สุด |
| 1.50-2.29 | เห็นด้วยน้อย |
| 2.50-3.49 | เห็นด้วยปานกลาง |
| 3.50-4.49 | เห็นด้วยมาก |
| 4.50-5.00 | เห็นด้วยมากที่สุด |

**ผลการวิจัยและอภิปรายผล**

**1. ผลการศึกษาปฏิกิริยาการเกิดตะกอนเพื่อสร้างชุดทดลอง**

ปฏิกิริยาการเกิดตะกอนที่ศึกษามีทั้งหมด 25 ปฏิกิริยา ดังตารางที่ 1 โดยการศึกษาได้สังเกตลักษณะตะกอนที่เกิดขึ้นเพื่อค้นหาตะกอนที่มีลักษณะเหมาะสมซึ่งต้องมีลักษณะที่ดีครบ 3 ประการกล่าวคือ ตะกอนต้องมีผิวหน้าเรียบเพื่อให้ง่ายต่อการวัดความสูง ตะกอนจัดเรียงตัวแน่นเพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากการวัดซึ่งหากตะกอนจัดเรียงตัวอย่างหลวม ๆ พบว่าความสูงของตะกอนจะลดลงอย่างมากเมื่อเวลาผ่านไป และตะกอนต้องไม่เกาะข้างหลอดเนื่องจากจะทำให้ความสูงของตะกอนคลาดเคลื่อนด้วยเช่นเดียวกัน จากผลการทดสอบพบว่าปฏิกิริยาการเกิดตะกอน $CaSO_4$ $PbCl_2$ และ $PbSO_4$ ในลำดับที่ 4, 5, 16 และ 17 ตามสมการที่ (1) ถึง (4) ให้ลักษณะตะกอนที่ดีครบทั้งสามข้อ

$$CaCl_2(aq) + H_2SO_4(aq) \longrightarrow 2HCl(aq) + CaSO_4(s) \quad .....(1)$$

$$CaCl_2(aq) + Pb(NO_3)_2(aq) \longrightarrow Ca(NO_3)_2(aq) + PbCl_2(s) \quad .....(2)$$

$$Pb(NO_3)_2(aq) + Na_2SO_4(aq) \longrightarrow 2NaNO_3(aq) + PbSO_4(s) \quad .....(3)$$

$$Pb(NO_3)_2(aq) + H_2SO_4(aq) \longrightarrow 2HNO_3(aq) + PbSO_4(s) \quad .....(4)$$

**ตารางที่ 1** ลักษณะตะกอนจากปฏิกิริยาการเกิดตะกอน 25 ปฏิกิริยา

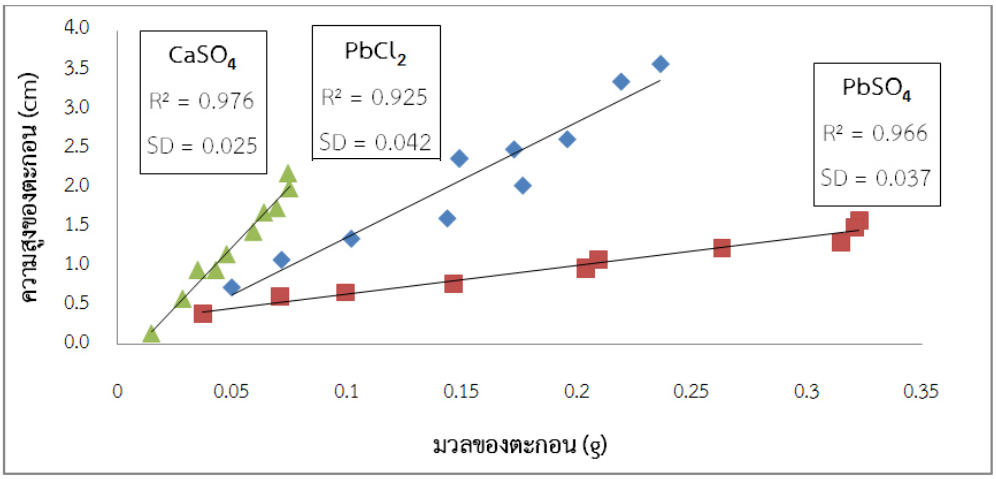
| ลำดับ | สารตั้งต้นที่ใช้ | | | ผลิตภัณฑ์ (ตะกอน) | สีตะกอน | ลักษณะตะกอน | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | ผิวหน้าเรียบ[1] | จัดเรียงตัวแน่น[2] | ไม่เกาะข้างหลอด[3] |
| 1 | $CaCl_2$ | + | $Na_2HPO_4$ | $CaHPO_4$ | ขาว | - | - | - |
| 2 | $CaCl_2$ | + | $Na_2CO_3$ | $CaCO_3$ | ขาว | - | - | - |
| 3 | $CaCl_2$ | + | $Na_2SO_4$ | $CaSO_4$ | ขาว | + | + | - |
| 4 | $CaCl_2$ | + | $H_2SO_4$ | $CaSO_4$ | ขาว | + | + | + |
| 5 | $CaCl_2$ | + | $Pb(NO_3)_2$ | $PbCl_2$ | ขาว | + | + | + |
| 6 | $MgCl_2$ | + | $Pb(NO_3)_2$ | $PbCl_2$ | ขาว | - | + | + |
| 7 | $MgCl_2$ | + | $Na_2CO_3$ | $MgCO_3$ | ขาว | - | - | - |
| 8 | $MgCl_2$ | + | $Na_2HPO_4$ | $MgHPO_4$ | ขาว | - | - | - |
| 9 | $BaCl_2$ | + | $Na_2SO_4$ | $BaSO_4$ | ขาว | + | + | - |
| 10 | $Ba(OH)_2$ | + | $H_2CO_3$ | $BaCO_3$ | ขาว | + | + | - |
| 11 | $BaCl_2$ | + | $Na_2HPO_4$ | $BaHPO_4$ | ขาว | + | + | - |
| 12 | $Al(NO_3)_3$ | + | $Na_2CO_3$ | $Al_2(CO_3)_3$ | ขาว | - | - | - |
| 13 | $Al(NO_3)_3$ | + | NaOH | $Al(OH)_3$ | ขาว | + | + | - |
| 14 | $Pb(NO_3)_2$ | + | KI | $PbI_2$ | เหลือง | + | + | - |
| 15 | $Pb(NO_3)_2$ | + | $Na_2CO_3$ | $PbCO_3$ | ขาว | + | + | - |
| 16 | $Pb(NO_3)_2$ | + | $Na_2SO_4$ | $PbSO_4$ | ขาว | + | + | + |
| 17 | $Pb(NO_3)_2$ | + | $H_2SO_4$ | $PbSO_4$ | ขาว | + | + | + |
| 18 | $Pb(NO_3)_2$ | + | $Na_2HPO_4$ | $PbHPO_4$ | ขาว | - | + | - |
| 19 | $Pb(NO_3)_2$ | + | $H_3PO_4$ | $Pb_3(PO_4)_2$ | ขาว | + | + | - |
| 20 | $Pb(NO_3)_2$ | + | $Ba(OH)_2$ | $Pb(OH)_2$ | ขาว | - | - | - |
| 21 | $Pb(NO_3)_2$ | + | KOH | $Pb(OH)_2$ | ขาว | - | + | - |
| 22 | $Pb(NO_3)_2$ | + | NaOH | $Pb(OH)_2$ | ขาว | - | + | - |
| 23 | $Pb(NO_3)_2$ | + | $K_2Cr_2O_7$ | $PbCr_2O_7$ | เหลือง | + | + | - |
| 24 | $FeCl_3$ | + | $Ba(OH)_2$ | $Fe(OH)_3$ | น้ำตาล | + | + | - |
| 25 | $FeCl_3$ | + | NaOH | $Fe(OH)_3$ | น้ำตาลแดง | + | + | - |

[1]ผิวหน้าเรียบ +, ผิวหน้าขรุขระ -, [2]ตะกอนจัดเรียงตัวแน่น +, ตะกอนจัดเรียงตัวไม่แน่น -, [3]ตะกอนไม่เกาะข้างหลอด +, ตะกอนเกาะข้างหลอด –

เป็นที่น่าสังเกตว่าตะกอนที่เกิดขึ้นแม้เป็นตะกอนชนิดเดียวกันแต่อาจมีลักษณะที่แตกต่างกันได้เมื่อใช้สารตั้งต้นไม่เหมือนกัน ตัวอย่างเช่น ตะกอน $CaSO_4$ ในลำดับที่ 3 และ 4 เมื่อใช้ $Na_2SO_4$ พบว่ามีตะกอนเกาะด้านข้างหลอด ในขณะที่การใช้กรด $H_2SO_4$ กลับไม่พบตะกอนเกาะด้านข้างหลอดแต่อย่างใด ทั้งนี้อาจเกี่ยวข้องกับแรงยึดติด (Adhesive force) แรงเชื่อมแน่น (Cohesive force) และความแรงของไอออนในสารละลาย (Ionic strength) ที่มีผลต่อความตึงผิวของสาร ทำให้การเกาะติดหลอดทดลองของตะกอนไม่เท่ากัน สำหรับตะกอนของ $PbCl_2$ ในลำดับที่ 5 และ 6 พบว่าเมื่อใช้ $MgCl_2$ แทนการใช้ $CaCl_2$ กลับทำให้ผิวหน้าตะกอนขรุขระ เหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเกี่ยวข้องกับขนาดของตะกอนที่เกิดขึ้น ซึ่งแม้จะเป็นตะกอนชนิดเดียวกันแต่

อาจมีขนาดต่างกัน เนื่องจากอัตราการเกิดตะกอนของแต่ละปฏิกิริยาไม่เท่ากันจึงส่งผลให้ขนาดของตะกอนที่เกิดขึ้นแตกต่างกันด้วย ตะกอนที่ขนาดเล็กจะรวมตัวกันแน่นและให้ผิวหน้าที่เรียบกว่าตะกอนที่มีขนาดใหญ่ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ผิวหน้าตะกอนขรุขระได้

เมื่อได้ตะกอนจากปฏิกิริยาที่เหมาะสมแล้ว ผู้วิจัยได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความสูงและมวลของตะกอน เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบตารางมวลมาตรฐาน โดยได้ศึกษาปฏิกิริยาการเกิดตะกอนเฉพาะปฏิกิริยาที่ (1), (2) และ (3) ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาที่ (3) และ (4) ให้ตะกอน $PbSO_4$ ชนิดเดียวกัน ผู้วิจัยจึงเลือกใช้เพียงปฏิกิริยาเดียวคือปฏิกิริยาที่ (3) เนื่องจากการใช้ $Na_2SO_4$ จะมีความปลอดภัยมากกว่าการใช้กรด $H_2SO_4$ ผลการศึกษากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงและมวลตะกอนทั้งสามชนิดแสดงดังรูปที่ 1 โดยทั้ง 3 ปฏิกิริยาให้กราฟความสัมพันธ์ที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงโดยมีค่า $R^2$ ของปฏิกิริยาการเกิดตะกอน $CaSO_4$ $PbCl_2$ และ $PbSO_4$ เท่ากับ 0.976 0.925 และ 0.966 ตามลำดับ และค่า SD เท่ากับ 0.025 0.042 และ 0.037 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าการเกิดตะกอน $CaSO_4$ ในปฏิกิริยาที่ (1) ให้กราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงดีที่สุด ($R^2$ เข้าใกล้ 1) และมีค่าความคลาดเคลื่อน (SD) น้อยที่สุด ประกอบกับข้อดีของปฏิกิริยานี้ที่ใช้สารตั้งต้นราคาไม่แพง และไม่เป็นโลหะหนักที่เป็นอันตราย อีกทั้งตะกอนของ $CaSO_4$ ยังมีประโยชน์ในหลายด้านสามารถนำไปใช้ในงานอื่นต่อได้ เช่น ใช้เป็นส่วนผสมของยิปซัมทำปูนปลาสเตอร์ ใช้ปรับปรุงคุณภาพดิน (นุจรินทร์ ศิริวาลย์, 2554, น.118-126) ใช้ลดพิษอิสระจากแอมโมเนียในกุ้งก้ามกรามวัยอ่อน (สุขุม เร้าใจ และจันทร์พิมพ์ กังพานิช, 2554, น.96-107) ตลอดจนใช้สำหรับจัดการเรียนการสอนในวิชาเคมี (Gergely, 2014, P.557-559) ทำให้ไม่เป็นการเพิ่มขยะสารเคมีในสิ่งแวดล้อม ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกปฏิกิริยาการเกิดตะกอน $CaSO_4$ มาใช้ในการสร้างชุดทดลองสำเร็จรูปเรื่องสารกำหนดปริมาณ




**รูปที่ 1** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงกับมวลของตะกอน $CaSO_4$ $PbSO_4$ และ $PbCl_2$

ผู้วิจัยได้ศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการเกิดตะกอน $CaSO_4$ โดยเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารตั้งต้นทั้งสองชนิด ระหว่างความเข้มข้น 1 และ 2 โมลาร์ พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้นเป็น 2 โมลาร์ ส่งผลให้ตะกอนเกิดเร็วมากยิ่งขึ้น และช่วยเพิ่มความสูงของตะกอนเนื่องจากจำนวนโมลของ $CaSO_4$ เพิ่มสูงขึ้น ทำให้สามารถวัดความสูงของตะกอนได้ง่ายกว่าการใช้สารตั้งต้นความเข้มข้นต่ำ และยังลดการเขย่าซึ่งอาจทำให้เกิดอุบัติเหตุสารเคมีหกลงได้ โดยใช้เพียงการคนเบาๆ ก็สามารถทำให้เกิดตะกอนได้อย่างรวดเร็ว เมื่อได้ความเข้มข้นที่เหมาะสมแล้วผู้วิจัยได้ศึกษาปริมาตรของสารตั้งต้นที่เหมาะสมในช่วง 0.1-2.5 มิลลิลิตร พบว่าหากใช้ปริมาตรสารตั้งต้นมากขึ้นจะส่งผลให้ตะกอนเกิดเร็วขึ้น โดยช่วงของปริมาตรที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 0.1-1.5 มิลลิลิตร ทั้งนี้ปริมาตรที่มากกว่า 1.5 มิลลิลิตร จะส่งผลให้ตะกอนเกิดขึ้นในทันทีโดยไม่ต้องเขย่าหรือคน และ

จะเกิดการแยกชั้นของตะกอนบนผิวหน้าออกจากบริเวณก้นหลอดทดลองทำให้ไม่สามารถวัดความสูงของตะกอนได้

**2. ผลการสร้างตารางมวลมาตรฐานแคลเซียมซัลเฟต**

หลังจากได้ปฏิกิริยาที่เหมาะสมแล้ว ผู้วิจัยได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความสูงกับมวลจากการทดลองของตะกอน $CaSO_4$ โดยเทียบกับมวลของตะกอนทางทฤษฎี ดังตารางที่ 2 จากตารางจะเห็นว่ามวลของ $CaSO_4$ ที่ได้จากการทดลองโดยส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่ามวลทางทฤษฎีทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความชื้นของสารที่ยังหลงเหลืออยู่ โดยมีร้อยละความแตกต่างระหว่างมวลจากการทดลองและมวลทางทฤษฎีอยู่ในช่วง 1.75-21.95 คิดเป็นร้อยละของผลได้ในช่วง 88.38-121.95 โดยการใช้ $CaCl_2$ ปริมาตร 0.10 มิลลิลิตร พบว่ามวลจากการทดลองแตกต่างจากมวลทางทฤษฎีมากที่สุด ดังนั้นการสร้างชุดการทดลองจึงไม่ควรใช้ปริมาตรสารตั้งต้นที่ต่ำจนเกินไปเพื่อลดความคลาดเคลื่อนของมวล เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงและมวลจากการทดลองของตะกอน $CaSO_4$ พบว่าได้กราฟซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นตรง ($R^2$ เท่ากับ 0.980) โดยมีสมการเส้นตรงคือ $Y = 0.1076X$ (Y คือ มวลจากการทดลองของ $CaSO_4$ และ X คือ ความสูงของตะกอน $CaSO_4$) จากสมการเส้นตรงนี้ ผู้วิจัยได้นำมา สร้างตารางมวลมาตรฐาน $CaSO_4$ ดังตารางที่ 3 โดยตารางนี้จะมีประโยชน์ในการคำนวณเพื่อเสริมความเข้าใจของผู้เรียนในเรื่องปริมาณสารสัมพันธ์ได้ โดยสามารถนำความสูงของตะกอนไปเทียบกับตารางจะได้มวลของตะกอน $CaSO_4$ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจริง จากมวลของผลิตภัณฑ์นี้สามารถใช้ในการคำนวณเพื่อย้อนกลับไปหาสารตั้งต้นที่เหลือได้ และยังสามารถใช้คำนวณเพื่อหาผลได้ร้อยละได้อีกด้วย การใช้ตารางมวลมาตรฐานนี้จะช่วยลดขั้นตอนในการกรองตะกอน การทำให้ตะกอนแห้งด้วยตู้อบลมร้อน และไม่ต้องใช้เครื่องชั่งราคาสูงในการชั่งน้ำหนักตะกอนซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาให้กับสถานศึกษาที่ขาดแคลนเครื่องมือหรืออุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์ได้

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ศึกษาผลของการใช้หลอดทดลองเปรียบเทียบกับคิวเวทท์พลาสติก และการใช้ปิเปตต์เปรียบเทียบกับหลอดฉีดยาพลาสติก ด้วยวิธีการทดลองเดียวกัน พบว่าการใช้คิวเวทท์ ($R^2$ 0.980) ให้ค่าความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงที่ดีกว่าการใช้หลอดทดลอง ($R^2$ 0.976) เช่นเดียวกันกับการใช้หลอดฉีดยา ($R^2$ 0.925) ที่พบว่าดีกว่าการใช้ปิเปตต์ ($R^2$ 0.916) และเมื่อเปรียบเทียบข้อมูลทางสถิติ (t–test) พบว่าการใช้คิวเวทท์แทนหลอดทดลอง และการใช้หลอดฉีดยาแทนปิเปตต์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากค่า t–test จากการคำนวณต่ำกว่าค่า t–test จากตารางมาตรฐาน two-tail ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (Df เท่ากับ 24) ดังตารางที่ 4 ดังนั้นในการใช้ชุดทดลองนี้หากสถานศึกษาขาดแคลนอุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์อย่างหลอดทดลองหรือปิเปตต์ สามารถใช้คิวเวทท์พลาสติกแทนหลอดทดลองขนาดเล็ก และใช้หลอดฉีดยาพลาสติกแทนปิเปตต์ได้ แต่ผู้สอนควรแนะนำเพิ่มเติมแก่นักเรียนว่า ในความเป็นจริงแล้วไม่สามารถใช้หลอดฉีดยาแทนปิเปตต์ได้ในทุกกรณี โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานที่ต้องการความละเอียดและถูกต้องสูงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องใช้อุปกรณ์ตวงปริมาตรที่ได้มาตรฐานอย่างปิเปตต์

**ตารางที่ 2** มวล $CaSO_4$ ทางทฤษฎีกับมวลจากการทดลองเมื่อใช้กรด $H_2SO_4$ 2 โมลาร์ 1 มิลลิลิตร ทำปฏิกิริยากับ $CaCl_2$ เข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 0.1-1.0 มิลลิลิตร

| ปริมาตร $CaCl_2$ ($cm^3$) | มวล $CaSO_4$ ทฤษฎี (g) | มวล $CaSO_4$ จากการทดลอง (g ± SD) | ร้อยละความแตกต่าง (%) | ร้อยละของผลได้ (%Yield) | ความสูงของตะกอน $CaSO_4$ (cm ± SD) |
|---|---|---|---|---|---|
| 0.10 | 0.029 | 0.0354 ± 0.01 | 21.95 | 121.95 | 0.38 ± 0.06 |
| 0.20 | 0.059 | 0.0694 ± 0.00 | 17.63 | 117.63 | 0.79 ± 0.07 |
| 0.30 | 0.088 | 0.1052 ± 0.00 | 19.58 | 119.58 | 1.15 ± 0.04 |
| 0.40 | 0.118 | 0.1406 ± 0.00 | 19.15 | 119.15 | 1.42 ± 0.09 |
| 0.50 | 0.147 | 0.1686 ± 0.00 | 14.72 | 114.72 | 1.62 ± 0.12 |
| 0.60 | 0.176 | 0.1945 ± 0.01 | 10.51 | 110.51 | 1.87 ± 0.12 |
| 0.70 | 0.206 | 0.2264 ± 0.00 | 9.89 | 109.89 | 2.03 ± 0.09 |
| 0.80 | 0.235 | 0.2403 ± 0.01 | 2.27 | 102.27 | 2.18 ± 0.07 |
| 0.90 | 0.265 | 0.2604 ± 0.01 | 1.75 | 98.25 | 2.30 ± 0.13 |
| 1.00 | 0.294 | 0.2598 ± 0.01 | 11.62 | 88.38 | 2.35 ± 0.11 |

**ตารางที่ 3** ตารางมวลมาตรฐานแคลเซียมซัลเฟต

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ความสูงของตะกอน (cm) | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1.0 |
| มวลตะกอน (g) | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.08 | 0.09 | 0.10 | 0.11 |
| ความสูงของตะกอน (cm) | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 1.5 | 1.6 | 1.7 | 1.8 | 1.9 | 2.0 |
| มวลตะกอน (g) | 0.12 | 0.13 | 0.14 | 0.15 | 0.16 | 0.17 | 0.18 | 0.19 | 0.2 | 0.22 |
| ความสูงของตะกอน (cm) | 2.1 | 2.2 | 2.3 | 2.4 | 2.5 | 2.6 | 2.7 | 2.8 | 2.9 | 3.0 |
| มวลตะกอน (g) | 0.23 | 0.24 | 0.25 | 0.26 | 0.27 | 0.28 | 0.29 | 0.30 | 0.31 | 0.32 |

**ตารางที่ 4** ผลการเปรียบเทียบชนิดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างตารางมวลมาตรฐานแคลเซียมซัลเฟต

| อุปกรณ์ | ค่า $R^2$ | t–test จากการคำนวณ | t–test* จากตารางมาตรฐาน two-tail |
|---|---|---|---|
| หลอดทดลองขนาดเล็ก | 0.976 | 0.0143 | 2.0639 |
| คิวเวทท์ | 0.980 | | |
| ปิเปตต์ | 0.916 | 0.4878 | 2.0639 |
| หลอดฉีดยา | 0.925 | | |

*ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และ Df เท่ากับ 24

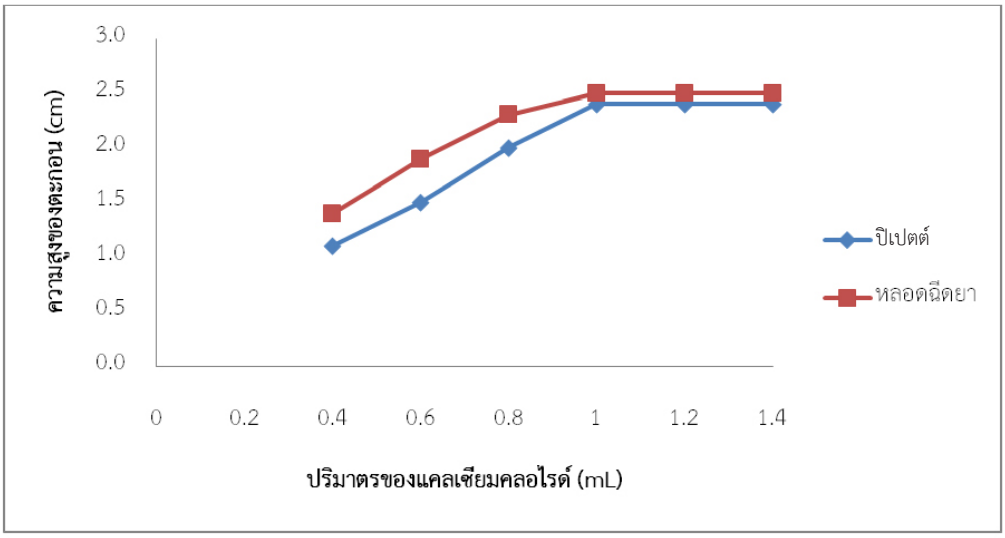
### 3. ผลการพัฒนาชุดทดลองสำเร็จรูปและการทดสอบประสิทธิภาพ

ชุดทดลองสำเร็จรูปได้ออกแบบให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้ความหมายของสารกำหนดปริมาณผ่านการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของตะกอน $CaSO_4$ และปริมาตรของ $CaCl_2$ ซึ่งเมื่อใช้สารตั้งต้น $H_2SO_4$ เข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และ $CaCl_2$ เข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 และ 1.4 มิลลิลิตร กราฟให้ลักษณะที่เป็นเส้นตรงคงที่

ตั้งแต่ปริมาตร 1.0 มิลลิลิตร เป็นต้นไป เนื่องจากสารตั้งต้นทั้งสองชนิดนี้ทำปฏิกิริยากันพอดีที่ปริมาตร 1.0 มิลลิลิตร และแม้จะเพิ่มปริมาตร $CaCl_2$ ให้มากขึ้นเท่าใดก็จะไม่มีตะกอนเกิดเพิ่มขึ้นซึ่งจะส่งผลให้ความสูงของตะกอน $CaSO_4$ คงที่ กราฟนี้จึงสามารถใช้บ่งบอกได้ว่า $CaCl_2$ เป็นสารที่เหลือ และ $H_2SO_4$ เป็นสารกำหนดปริมาณผลิตภัณฑ์ $CaSO_4$ ที่เกิดขึ้น ซึ่งชุดทดลองสำเร็จรูป 1 ชุด ที่สร้างขึ้นในครั้งแรกประกอบด้วยภาชนะพลาสติกสำหรับบรรจุสารเคมี คิวเวทท์ หลอดฉีดยา ไม้บรรทัด ลวดคนสาร น้ำกลั่น สารละลาย $H_2SO_4$ และ $CaCl_2$ ใบแสดงวิธีใช้ชุดทดลอง และตารางมวลมาตรฐาน $CaSO_4$ แสดงดังรูปที่ 2

**รูปที่ 2** ชุดทดลองสำเร็จรูปเรื่องสารกำหนดปริมาณโดยใช้วิธีการตกตะกอน

จากการทดลองใช้ชุดทดลองสำเร็จรูปโดยใช้กลุ่มตัวอย่างที่ 1 ซึ่งใช้หลอดฉีดยาในการตวงสารละลายและทำการทดลองเพียงครั้งเดียวในแต่ละความเข้มข้น พบว่ากลุ่มตัวอย่างที่ศึกษามีเพียง ร้อยละ 10 เท่านั้นที่สามารถทำการทดลองแล้วสร้างกราฟที่สามารถบ่งบอกถึงสารกำหนดปริมาณได้อย่างถูกต้อง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนของการใช้หลอดฉีดยาในการตวงปริมาตรและทำทดลองเพียงซ้ำเดียว ผู้วิจัยจึงพัฒนาชุดทดลองขึ้นใหม่อีกครั้งโดยจัดทำเป็น 2 ชุด โดยชุดที่ 1 ใช้หลอดฉีดยาดังเดิมแต่กำหนดให้ทำการทดลองซ้ำทุกความเข้มข้นจำนวน 3 ซ้ำ ในขณะที่ชุดที่ 2 ใช้ปิเปตต์แทนการใช้หลอดฉีดยาและเพิ่มการทดลองโดยทำซ้ำ 3 ซ้ำเช่นกัน แล้วนำชุดทดลองสำเร็จรูปทั้งสองชุดนี้มาทดสอบกับกลุ่มตัวอย่างที่ 2 จำนวน 10 คน พบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของตะกอนและปริมาตร $CaCl_2$ ที่สร้างขึ้นจากการใช้หลอดฉีดยาและปิเปตต์จากผู้ทำการทดลองคนเดียวกันมีลักษณะที่สามารถบ่งบอกถึงสารกำหนดปริมาณได้เป็นอย่างดีทั้งสองอุปกรณ์ ดังตัวอย่างในรูปที่ 3 โดยผู้ทดลองจำนวน 8 คนจากทั้งหมด 10 คน คิดเป็นร้อยละ 80 สามารถสร้างกราฟได้อย่างถูกต้อง และผู้ทำการทดลองทุกคนสามารถระบุสารกำหนดปริมาณ สารที่เหลือ และใช้ตารางมาตรฐานแคลเซียมซัลเฟตในการระบุมวลของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้องร้อยละ 100 และมีความพึงพอใจเฉลี่ยในการใช้ชุดทดลอง เท่ากับ 4.66 ซึ่งอยู่ในระดับเห็นด้วยมากที่สุด ดังตารางที่ 5




**รูปที่ 3** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของตะกอน $CaSO_4$ กับปริมาตรของ $CaCl_2$*

*ผลการใช้ชุดทดลองและสร้างกราฟของอาสาสมัครคนเดียวกันเพียงคนเดียวเท่านั้น

เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาในการตวงสารละลายโดยใช้ปิเปตต์และหลอดฉีดยาพบว่าการใช้หลอดฉีดยามีระยะเวลาที่สั้นกว่าการใช้ปิเปตต์ถึงสองเท่า โดยระยะเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการตวงสารละลายด้วยหลอดฉีดยาและปิเปตต์มีค่าเท่ากับ 24.9±8.65 และ 46.5±14.34 นาที ตามลำดับ และระดับความพึงพอใจในการใช้หลอดฉีดยามากกว่าการใช้ปิเปตต์โดยมีค่าคะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 4.90 อยู่ในระดับเห็นด้วยมากที่สุด โดยร้อยละ 90 ของผู้ทำการทดลองได้ให้เหตุผลว่าหลอดฉีดยาใช้ง่ายกว่าการใช้ปิเปตต์ ซึ่งแม้ปิเปตต์จะเป็นอุปกรณ์ที่สามารถตวงสารละลายได้ละเอียด ถูกต้อง และแม่นยำมากกว่า แต่หากผู้ทดลองขาดทักษะในการใช้ปิเปตต์จะใช้ระยะเวลานานมากในการทำการทดลองจึงอาจไม่เหมาะสมสำหรับนักเรียนระดับมัธยมศึกษาที่ยังไม่มีทักษะการใช้ปิเปตต์ นอกจากนี้ยังมีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมจากผู้ทำการทดลองว่าลวดที่ใช้คนสารละลายไม่แข็งแรงควรปรับเปลี่ยนให้มีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น และควรมีฐานสำหรับวางคิวเวทท์พลาสติกเพื่อป้องกันการล้ม จากผลการทดสอบประสิทธิภาพผู้วิจัยจึงได้พัฒนาชุดทดลองสำเร็จรูปใหม่อีกครั้งเป็นครั้งที่ 3 โดยออกแบบให้ใช้หลอดฉีดยาพลาสติกที่หาซื้อได้ง่ายราคาถูก และลดเวลาในการทดลอง แทนการใช้ปิเปตต์ และกำหนดในใบกิจกรรมให้ทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ปรับปรุงลวดสำหรับคนให้มีความแข็งแรง และออกแบบให้มีฐานสำหรับวางคิวเวทท์ แล้วนำชุดการทดลองนี้ไปทดสอบประสิทธิภาพโดยกลุ่มตัวอย่างที่ 3 ซึ่งเป็นนักเรียนระดับชั้นมัธยมศึกษา ปีที่ 5 จำนวน 25 คน โดยนักเรียนในกลุ่มนี้มีเกรดวิชาเคมีโดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.66 ซึ่งจัดว่ามีความรู้ทางเคมีในระดับปานกลาง และยังไม่เคยเรียนเรื่องสารกำหนดปริมาณมาก่อน ผลการทดสอบพบว่าผู้เรียนใช้เวลาในการทำการทดลองเฉลี่ย 36.03±7.70 นาที ซึ่งมากกว่าการใช้หลอดฉีดยาของนักศึกษาในกลุ่มตัวอย่างที่ 2 และผู้เรียนสามารถตอบคำถามว่าสารใดเป็นสารกำหนดปริมาณ และสารใดเหลือ ได้อย่างถูกต้อง ถึงร้อยละ 84 และ 88 ตามลำดับ ซึ่งผู้เรียนได้ให้ความเห็นว่าผลการทดลองช่วยในการตอบคำถามหลังการทดลองได้ง่ายและสามารถทำให้เข้าใจในเรื่องสารกำหนดปริมาณได้เฉลี่ยถึง 4.24 คะแนน ซึ่งอยู่ในระดับเห็นด้วยมาก และมีค่าเฉลี่ยความพึงพอใจต่อชุดการทดลองสำเร็จรูปนี้ในระดับมาก (4.27 คะแนน) ดังตารางที่ 5 อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของตะกอน $CaSO_4$ และปริมาตร $CaCl_2$ ที่นักเรียนทั้ง 25 คน เป็นผู้สร้างขึ้น พบว่ามีเพียง 12 คน ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 48 เท่านั้นที่สร้างกราฟแล้วมีลักษณะเป็นเส้นตรงตั้งแต่ปริมาตรที่ 1 มิลลิลิตร เป็นต้นไป ดังนั้นจึงควรมีการทดสอบประสิทธิภาพของชุดทดลองสำเร็จรูปนี้เพิ่มเติมกับกลุ่มตัวอย่างอื่นในจำนวนที่มากขึ้น เพื่อนำผลการทดสอบมาพัฒนาชุดทดลองสำเร็จรูปให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นต่อไป

**ตารางที่ 5** แสดงค่าเฉลี่ยความคิดเห็นของกลุ่มตัวอย่างในการใช้ชุดการทดลองสำเร็จรูป

| รายการประเมิน | ค่าเฉลี่ยความคิดเห็นของกลุ่มตัวอย่าง | | |
|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 |
| 1. รูปแบบของชุดทดลองเหมาะสมและสอดคล้องกับเนื้อหา | 4.60 | 4.70 | 4.32 |
| 2. วิธีการทดลองที่ใช้ในการปฏิบัติกิจกรรมการทดลองเข้าใจง่าย | 4.20 | 4.80 | 4.60 |
| 3. ระยะเวลาที่ใช้ในการทำการทดลองเหมาะสม | 4.40 | 4.70 | 3.88 |
| 4. ผู้ทดลองมีส่วนร่วมในการทดลอง | 4.40 | 4.70 | 4.56 |
| 5. ผู้ทดลองเกิดการเรียนรู้ในเนื้อหาด้วยตัวเอง | 4.30 | 4.60 | 4.36 |
| 6. ชุดทดลองส่งเสริมให้เกิดความคิดริเริ่มสร้างสรรค์ | 4.30 | 4.60 | - |
| 7. ผู้ทดลองเกิดความสนุกสนานในการเรียน | 4.10 | 4.40 | - |
| 8. อุปกรณ์ในชุดทดลองมีความเหมาะสม คงทน สวยงาม ใช้สะดวก | 4.50 | 4.50 | 4.08 |
| 9. หลอดฉีดยาใช้สะดวกกว่าปิเปตต์ | - | 4.90 | - |
| 10. ความเหมาะสมของแบบฝึกหัดในชุดทดลอง | 4.30 | - | - |
| 11. หลังใช้ชุดทดลองนี้ผู้เรียนเข้าใจเรื่องสารกำหนดปริมาณในระดับใด | - | - | 4.24 |
| 12. ชุดทดลองนี้สามารถทำให้ผู้เรียนเข้าใจสารกำหนดปริมาณมากขึ้น | - | - | 4.24 |
| 13. ผลการทดลองช่วยในการตอบคำถามหลังการทดลองได้ง่าย | - | - | 4.24 |
| 14. ผู้ทดลองมีความพึงพอใจในชุดการทดลองสำเร็จรูปนี้ | 4.40 | 4.70 | 4.20 |
| ระดับความพึงพอใจเฉลี่ย | 4.35 | 4.66 | 4.27 |

- หมายถึง ไม่มีคำถามข้อนั้นในแบบสอบถาม

**4. ต้นทุนในการสร้างชุดทดลองสำเร็จรูป**

ชุดทดลองสำเร็จรูปเรื่องสารกำหนดปริมาณด้วยวิธีการตกตะกอนที่พัฒนาขึ้นนี้ประกอบด้วยวัสดุอุปกรณ์ที่หาได้ง่ายเพื่อใช้ทดแทนวัสดุอุปกรณ์วิทยาศาสตร์หลายชนิด อาทิ ใช้หลอดฉีดยาพลาสติกแทนการใช้ปิเปตต์ ใช้ภาชนะพลาสติกบรรจุสารละลายขณะตวงสารแทนบีกเกอร์ ใช้ลวดแทนแท่งแก้วสำหรับคนสาร ใช้คิวเวทท์พลาสติกแทนหลอดทดลอง และใช้ไม้บรรทัดวัดความสูงเทียบตารางมวลมาตรฐานเพื่อหามวลตะกอนแทนการใช้เครื่องชั่ง ซึ่งเมื่อคำนวณต้นทุนของชุดทดลองสำเร็จรูปนี้แล้วพบว่ามีราคาโดยประมาณเท่ากับ 260 บาท และถึงแม้ว่าในปัจจุบันจะยังไม่มีชุดทดลองเรื่องสารกำหนดปริมาณจัดจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ให้เปรียบเทียบราคา แต่ถ้าทำการทดลองนี้โดยใช้วัสดุอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ทั่วไปย่อมมีต้นทุนที่สูงกว่ามากโดยมิต้องสงสัย ดังนั้นชุดการทดลองสำเร็จรูปที่สร้างขึ้นนี้จึงเป็นชุดการทดลองที่ใช้วัสดุอุปกรณ์ที่หาซื้อได้ง่ายและราคาถูกซึ่งเหมาะสำหรับโรงเรียนที่ขาดแคลนวัสดุอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ในการนำไปใช้เพื่อให้เข้าใจในเนื้อหาทฤษฎีได้ดียิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามเนื่องจากผู้เรียนที่ใช้ชุดการทดลองสำเร็จรูปนี้ไม่ได้ใช้เครื่องแก้วและอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ จึงอาจทำให้ผู้เรียนขาดทักษะในการใช้อุปกรณ์เหล่านี้ได้ และอีกประการหนึ่งคือการตวงปริมาตรของของเหลวในงานที่ต้องการความถูกต้องแม่นยำยังคงต้องใช้ปิเปตต์ที่มีความละเอียดสูงซึ่งผ่านการสอบเทียบมาตรฐาน (standardization) มาแล้วจากผู้ผลิตเพื่อให้ได้ปริมาตรที่ถูกต้องจึงไม่อาจใช้หลอดฉีดยาซึ่งมีความละเอียดต่ำทดแทนได้ แต่สำหรับชุดการทดลองสำเร็จรูปนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดลองแล้วว่าการใช้หลอดฉีดยาพลาสติกและปิเปตต์ในการตวงปริมาตรไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงและมวลของตะกอน ผู้วิจัยจึงออกแบบให้ใช้หลอดฉีดยาในการตวงปริมาตรแทนการใช้ปิเปตต์เพื่อให้สะดวกต่อการใช้งานและสามารถลดเวลาในการทดลองอันมีอยู่อย่างจำกัดในชั้นเรียนได้ ประการสุดท้ายที่ผู้ใช้ชุดทดลองสำเร็จรูปนี้พึงตะหนักคือการหามวลของสารโดยปกติแล้วจำเป็นต้องอาศัยเครื่องชั่งในการหามวลตะกอนโดยตรงจึงจะ

ได้ค่ามวลที่มีความถูกต้องอย่างแท้จริงและไม่สามารถนำความสูงของตะกอนมาหามวลได้ แต่สำหรับชุดการทดลองสำเร็จรูปนี้ได้ใช้ตารางมวลมาตรฐานในการเทียบหามวลจากความสูงของตะกอน ซึ่งมวลที่ได้นั้นไม่ใช่มวลที่แท้จริงจึงอาจมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง แต่สามารถนำมวลนี้มาใช้สำหรับการคำนวณเพื่อให้เกิดความเข้าใจในเรื่องปริมาณสารสัมพันธ์มากยิ่งขึ้นได้

**สรุป**

งานวิจัยนี้ได้สร้างและพัฒนาชุดทดลองสำเร็จรูปเรื่องสารกำหนดปริมาณโดยอาศัยหลักการเกิดตะกอน $CaSO_4$ จากปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้น $CaCl_2$ และ $H_2SO_4$ ตะกอนที่เกิดขึ้นนี้จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และคงที่เมื่อถึงจุดที่สารทำปฏิกิริยากันพอดี ซึ่งเมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของตะกอน $CaSO_4$ กับปริมาตรของ $CaCl_2$ สามารถใช้บ่งบอกถึงสารกำหนดปริมาณได้ วัสดุอุปกรณ์ที่เป็นองค์ประกอบของชุดการทดลองนี้หาได้ง่ายและราคาถูก ประกอบไปด้วย ภาชนะพลาสติกสำหรับบรรจุสารเคมี คิวเวทท์พลาสติก แผ่นพลาสติกสำหรับวางคิวเวทท์ หลอดฉีดยาพลาสติก ไม้บรรทัด ลวดคนสาร น้ำกลั่น สารละลาย $H_2SO_4$ และ $CaCl_2$ เข้มข้น 2 โมลาร์ วิธีใช้ชุดทดลอง และตารางมวลมาตรฐาน $CaSO_4$ ซึ่งสร้างจากความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างความสูงและมวลของตะกอน โดยสามารถลดขั้นตอนของการอบและชั่งตะกอนด้วยเครื่องมือวิทยาศาสตร์ราคาสูง มวลของตะกอนนี้มีประโยชน์ในการคำนวณเพื่อให้เกิดความเข้าใจในเนื้อหาปริมาณสารสัมพันธ์ ซึ่งชุดการทดลองสำเร็จรูปนี้ได้ถูกสร้างขึ้นและพัฒนาปรับปรุงเป็นลำดับโดยอาศัยกลุ่มตัวอย่างที่เป็นนักศึกษาระดับปริญญาตรี 2 กลุ่มตัวอย่าง กลุ่มละ 10 คน และนักเรียนระดับมัธยมศึกษาชั้นปีที่ 5 จำนวน 25 คน พบว่านักเรียนสามารถระบุชนิดของสารกำหนดปริมาณและสารเหลือได้อย่างถูกต้องร้อยละ 84 และ 88 ตามลำดับ เขียนกราฟที่สามารถบ่งบอกถึงสารกำหนดปริมาณได้อย่างถูกต้องร้อยละ 48 และมีค่าความพึงพอใจต่อการใช้ชุดทดลองสำเร็จรูปอยู่ในระดับมาก โดยมีค่าเฉลี่ยความพึงพอใจเท่ากับ 4.27

**ข้อเสนอแนะจากการวิจัย**

การใช้หลอดฉีดยาต้องไล่ฟองอากาศออกจากหลอดฉีดยาขณะตวงสารละลายให้หมดเพื่อลดความคลาดเคลื่อนของผลการทดลอง

**ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป**

ควรมีการทดสอบประสิทธิภาพของชุดทดลองสำเร็จรูปนี้เพิ่มเติมกับกลุ่มตัวอย่างอื่นในจำนวนที่มากขึ้น และควรมีการวิจัยเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลสัมฤทธิ์ทางการศึกษาของผู้เรียนในเรื่องสารกำหนดปริมาณเมื่อใช้ชุดการทดลองสำเร็จรูปนี้ทั้งในระดับมัธยมศึกษาและอุดมศึกษา

## บรรณานุกรม

จุฑามาศ มะลิลา, สุภาพ ตาเมือง, มะลิวรรณ อมตธงไชย, ปุริม จารุจำรัส, และเสนอ ชัยรัมย์. (2559). การสาธิตทดลองเรื่องสารกำหนดปริมาณโดยใช้ปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมคาร์ไบด์กับน้ำ. *วารสารหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้, 7*(1), 1-7.

นุจรินทร์ ศิริวาลย์. (2554). การปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้ยิปซัมเพื่อความยั่งยืนทางการเกษตร. *วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร,* 5(1), 118-126.

บุญศรี พรหมมาพันธุ์. (2558). เทคนิคการแปลผลการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยในการวิจัย. *วารสารศึกษาศาสตร์ มสธ,* 8(2), 24-40.

สุขุม เร้าใจ, และจันทร์พิมพ์ กังพานิช. (2554). ผลของเกลือโซเดียมและแคลเซียมต่อการลดพิษของแอมโมเนียอิสระในกุ้งก้ามกรามวัยอ่อน. *วารสารวิจัย*, 4(1), 96-107.

Angélica, M.G., Edgardo. L.O., & Zuleika, M. (2014). A Hands-On Activity Incorporating the Threefold Representation on Limiting Reactant. *Journal of Chemical Education,* 91(9), 1464-1467.

Gergely, S. (2014). Synthesis, Dehydration, and Rehydration of Calcium sulfate (Gypsum, Plaster of Paris). *Journal of Chemical Education, 91*(4), 557-559.

Liliana, H., Eduardo, C., Santiago, K., & Lydia, G. (2003). Learning Stoichimetry with Hamburger Sandwiches. *Journal of Chemical Education, 80*(9), 1021-1022.

Nobuyoshi, K., Tomoyasu, K., & Kana, S. (2011). Laboratory Inquiry for Determining the Chemical Composition of a Component in a Daily Use Detergent : Sodium Sesquicarbonate. *Journal of Chemical Education, 88*(10), 1309-1313.

Padua, F., Tomoyasu, K., & Kana, S. (2000). Fizzy Drinks: Stoichimetry You Can Taste. *Journal of Chemical Education*, 77(12), 1608A.

Romklao, A. (2003). A Dramatic Classroom Demonstration of Limiting Reagent Using the Vinegar and Sodium Hydrogen Carbonate Reaction. *Journal of Chemical Education*, 85(10), 1382-1384.

**Translated Thai References**

Malila, J., Tamuang, S., Amatatongchai, M., Jarujamrus, P., & Chairam, S. (2016). Experimental Demonstration of Limiting Reagent Using the Reaction between Calcium Carbide and Water. *Journal of Research Unit on Science, Technology and Environment for Learning*, 7(1), 1-7. [in Thai]

Prommapun, B. (2015). Techniques for DataInterpreting for Mean Comparison in Research. *STOU education Journal,* 8(2), 24-40. [in Thai]

Rowchai, S., & Kangpanich, C. (2011). Effects of Sodium and Calcium Salts on Un-ionized Ammonia Toxicity Reduction in Juvenule Giant Freshwater Prawn. *Rajamangala University of Technology Tawan-ok Research Journal, 4*(1), 96-107. [in Thai]

Siriwal, N. (2011). Improving Soil Quality with Gypsum for Agricultural Sustainability. *RMUTP Research Journal*, 5(1), 118-126. [in Thai]