

การยกระดับความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการเคมีทั่วไปโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคปฏิบัติการย่อยส่วน: กรณีศึกษาการทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลาย

ธนิษฐ ศุภเกียรติกร* และ อธิป อนุพันธ์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

*อีเมลผู้ประพันธ์บรรณกิจ: Thaninthorn.S@chula.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและปรับเปลี่ยนกิจกรรมการทดลองจากการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปสู่การทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วนสำหรับรายวิชาปฏิบัติการเคมีทั่วไป รวมทั้งประเมินผลของการปรับเปลี่ยนในด้านการใช้สารเคมี การเกิดของเสีย ระยะเวลาในการดำเนินงาน และความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน การศึกษานี้เป็นการวิจัยเชิงประเมินผลในบริบทของการจัดการเรียนการสอนจริง โดยเปรียบเทียบการทดลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาแบบเดิมกับการทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วน ข้อมูลรวบรวมจากบันทึกการใช้สารเคมี ปริมาณของเสีย ระยะเวลาในการดำเนินงาน ข้อมูลด้านความปลอดภัย และแบบประเมินความคิดเห็นของอาจารย์ผู้สอน ผู้ช่วยสอน และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ จำนวน 25 คน แบบประเมินมีค่าความเชื่อมั่น (Cronbach's alpha) เท่ากับ 0.863 วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติเชิงพรรณนาและสถิติ One-sample t-test ผลการศึกษพบว่า การประยุกต์ใช้เทคนิคปฏิบัติการย่อยส่วนช่วยลดการใช้สารเคมีต่อคู่ปฏิบัติการจาก 314.00 เป็น 11.85 มิลลิลิตร คิดเป็นร้อยละ 96.23 ลดปริมาณสารเคมีที่ต้องเตรียมจาก 91.3 เหลือ 9.7 ลิตรต่อปี การศึกษา แม้ว่าจำนวนนิสิตจะเพิ่มขึ้นจาก 510 คน เป็น 1,400 คน นอกจากนี้ยังช่วยลดปริมาณของเสีย ระยะเวลาในการเตรียมสารเคมี ระยะเวลาปฏิบัติการ และความเสี่ยงจากการสัมผัสสารเคมี การถ่ายเทสาร การรั่วไหลของสารเคมี และการใช้เครื่องแก้ว ผลการประเมินความคิดเห็นอยู่ในระดับมาก (4.46 ± 0.61) และมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าค่าเกณฑ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) สรุปได้ว่าการประยุกต์ใช้เทคนิคปฏิบัติการย่อยส่วนเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการยกระดับความปลอดภัย ลดการใช้ทรัพยากรและการเกิดของเสีย เพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการห้องปฏิบัติการ และสนับสนุนการดำเนินงานตามแนวทาง Green Laboratory และมาตรฐาน ESPReL โดยสามารถใช้เป็นต้นแบบในการพัฒนากิจกรรมปฏิบัติการเคมีอื่นในระดับอุดมศึกษาต่อไป

คำสำคัญ: การลดของเสีย, ความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการ, ปฏิบัติการย่อยส่วน, มาตรฐาน ESPReL, หลักเลอะชาเตอเลียร์

Enhancing Safety in the General Chemistry Laboratory by Applying Small-Scale Laboratory Techniques: A Case Study of Chemical and Solubility Equilibrium Experiments

Thaninthorn Supakriangkrai* and Athip Anupun

Department of Chemistry Faculty of Science Chulalongkorn University, Pathum Wan, Bangkok 10330, Thailand

*Corresponding author: Thaninthorn.S@chula.ac.th

Abstract

This study aimed to develop and implement a small-scale laboratory approach by replacing a conventional reaction rate experiment with chemical equilibrium and solubility equilibrium activities in a General Chemistry Laboratory course. The study also evaluated the effects of the modification on chemical consumption, waste generation, operational efficiency, and laboratory safety. An evaluation research design was conducted under real educational implementation by comparing the conventional experiment with the newly developed small-scale laboratory experiment. Data were collected from records of chemical consumption, chemical waste generation, operational time, laboratory safety, and questionnaires completed by 25 instructors, teaching assistants, and laboratory staff. The questionnaire demonstrated good reliability (Cronbach's alpha = 0.863). Data were analyzed using descriptive statistics and a one-sample t-test. The results showed that the small-scale laboratory approach reduced chemical consumption from 314.00 mL to 11.85 mL per student pair, representing a 96.23% reduction. The total volume of prepared chemicals decreased from 91.3 L to 9.7 L per academic year despite an increase in student enrollment from 510 to 1,400 students. The modified experiment also reduced chemical waste, reagent preparation time, laboratory operation time, and risks associated with chemical exposure, chemical transfer, and the use of laboratory glassware. Participants rated the modified experiment at a high level (4.46 ± 0.61), with the mean score being significantly higher than the predetermined criterion ($p < 0.001$). In conclusion, applying small-scale laboratory techniques effectively enhanced laboratory safety, reduced resource consumption and chemical waste, improved laboratory management efficiency, and supported Green Laboratory practices and the Enhancement of Safety Practice of Research Laboratory (ESPreL) standards. The proposed approach can serve as a model for improving other chemistry laboratory activities in higher education.

Keywords: ESPreL Standards, Laboratory Safety, Le Chatelier's Principle, Small-scale Laboratory, Waste Minimization

บทนำ

ห้องปฏิบัติการเคมีทั่วไปเป็นองค์ประกอบสำคัญของการจัดการเรียนการสอนทางเคมีในระดับอุดมศึกษา เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่เปิดโอกาสให้นักศึกษาได้พัฒนาความรู้ความเข้าใจเชิงทฤษฎีควบคู่กับการฝึกทักษะปฏิบัติ การสังเกต การวิเคราะห์ข้อมูล และการใช้เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์อย่างถูกต้อง โดยเฉพาะสำหรับนิสิตชั้นปีที่ 1 ซึ่งอยู่ในช่วงเริ่มต้นของการเรียนปฏิบัติการทางเคมี ห้องปฏิบัติการยังเป็นพื้นที่สำคัญในการปลูกฝังความตระหนักรู้ด้านความปลอดภัย การจัดการสารเคมี และความรับผิดชอบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการเรียนปฏิบัติการในรายวิชาขั้นสูงต่อไป อย่างไรก็ตาม กิจกรรมในห้องปฏิบัติการเกี่ยวข้องกับการใช้สารเคมี เครื่องแก้ว และอุปกรณ์ที่อาจก่อให้เกิดอันตรายจากการสัมผัสสารเคมี การหกหรือไหล การเกิดเพลิงไหม้ หรือการแตกหักของเครื่องแก้ว ดังนั้น การพัฒนาห้องปฏิบัติการให้มีความปลอดภัยจึงเป็นประเด็นสำคัญที่ได้รับความสนใจจากสถาบันการศึกษาทั่วโลก โดยแนวคิดด้านการบริหารจัดการความเสี่ยงในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Risk Assessment) ได้รับการยอมรับว่าเป็นแนวทางสำคัญในการลดโอกาสเกิดอุบัติเหตุและสร้างวัฒนธรรมความปลอดภัยในการเรียนการสอน (Hill & Finster, 2016; Hensley et al., 2024) ทั้งนี้ ความสำเร็จของการจัดการเรียนการสอนในห้องปฏิบัติการไม่ควรพิจารณาเพียงผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนรู้เท่านั้น แต่ควรคำนึงถึงการลดความเสี่ยงและการสร้างสภาพแวดล้อมที่ปลอดภัยควบคู่กัน เนื่องจากการเรียนรู้ที่มีประสิทธิภาพย่อมตั้งอยู่บนพื้นฐานของความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน

เทคนิคปฏิบัติการย่อยส่วน (Small-scale Laboratory Technique) เป็นแนวทางในการจัดกิจกรรมปฏิบัติการที่มุ่งลดปริมาณสารเคมี ขนาดของระบบทดลอง และการเกิดของเสียให้น้อยที่สุดเท่าที่จำเป็น โดยยังคงหลักการทางวิทยาศาสตร์และคุณภาพของกิจกรรมการเรียนรู้ไว้ แนวคิดดังกล่าวได้รับการนำมาประยุกต์ใช้ในการเรียนการสอนปฏิบัติการเคมีอย่างต่อเนื่อง และมีรายงานว่าสามารถลดการใช้สารเคมี ลดปริมาณของเสีย ลดความเสี่ยงจากการสัมผัสสารเคมี และลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Singh et al., 1999; Rogat et al., 2025) ในระยะหลัง แนวโน้มของการประยุกต์ใช้เทคนิคปฏิบัติการย่อยส่วนได้ขยายจากการลดขนาดของการทดลองเดิมไปสู่การออกแบบหรือปรับเปลี่ยนกิจกรรมการทดลองใหม่ (Laboratory Experiment Redesign) โดยบูรณาการหลักการของ Green Chemistry เข้ากับการจัดการเรียนการสอน เพื่อให้สามารถลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและความเสี่ยงในการปฏิบัติงาน ขณะเดียวกันยังคงผลลัพธ์การเรียนรู้ที่สำคัญของรายวิชาไว้ได้ (Armstrong et al., 2019; Cabrera-Franco et al., 2026) แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการของ Green Chemistry ที่มุ่งป้องกันการเกิดของเสียตั้งแต่ต้นทาง (Waste Prevention) และลดอันตรายผ่านการออกแบบกระบวนการ (Source Reduction) (Anastas & Warner, 1998; Anastas & Eghbali, 2010) อีกทั้งยังสนับสนุนแนวคิดการจัดการศึกษาเคมีเพื่อความยั่งยืน (MacKellar et al., 2020) และสามารถประยุกต์ใช้เพื่อสนับสนุนการดำเนินงานตามแนวทาง Green Laboratory และมาตรฐาน ESPReL ซึ่งมุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ การลดการใช้สารเคมี การลดปริมาณของเสีย และการยกระดับความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการอย่างเป็นระบบ (ESPReL, 2558; O'Neil et al., 2021)

การทดลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นหนึ่งในกิจกรรมพื้นฐานของรายวิชาปฏิบัติการเคมีทั่วไป โดยใช้ปฏิกิริยา Iodine Clock Reaction (Creary & Morris, 1999) เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ผ่านการวัดระยะเวลาตั้งแต่เริ่มเกิดปฏิกิริยาจนกระทั่งเกิดการเปลี่ยนแปลงของระบบเป็นตัวแปรหลักในการเปรียบเทียบผลการทดลอง ดังนั้น ปริมาณสารที่ใช้ การผสมสาร การเริ่มต้นจับเวลา และการกำหนดช่วงความเข้มข้นของสารจึงมีความสำคัญต่อความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของผลการทดลอง นอกจากนี้ การทดลองยังต้องอาศัยการตรวจและถ่ายเทสารหลายขั้นตอน ใช้เครื่องแก้วหลายชนิด และใช้เวลาปฏิบัติการค่อนข้างนาน ส่งผลให้มีโอกาสสัมผัสสารเคมี การใช้ทรัพยากร และการเกิดของเสียในระดับสูง แม้ว่าจะมีรายงานการประยุกต์ใช้เทคนิคปฏิบัติการย่อยส่วนกับการทดลองดังกล่าว โดยพัฒนาอุปกรณ์และรูปแบบการทดลองสำหรับการใช้สารละลายในระดับหยด ซึ่งสามารถคงผลลัพธ์การเรียนรู้ด้านจลนพลศาสตร์เคมีไว้ได้ (Sattasangi, 2011) อย่างไรก็ตาม แนวทางดังกล่าวยังต้องอาศัยการดัดแปลงและสอบเทียบอุปกรณ์เพื่อควบคุมความสม่ำเสมอของปริมาตรสาร รวมถึงความแม่นยำในการตวงสาร การผสมสาร และการจับเวลา ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อความน่าเชื่อถือของผลการทดลอง ในบริบทของรายวิชาปฏิบัติการเคมีทั่วไปที่มีผู้เรียนจำนวนมากและผู้เรียนส่วนใหญ่อยู่ในช่วงเริ่มต้นของการฝึกทักษะปฏิบัติการ การประยุกต์ใช้เทคนิคปฏิบัติการย่อยส่วนกับการทดลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยการลดขนาดของระบบทดลองเดิมจึงอาจมีข้อจำกัดต่อการประยุกต์ใช้จริง ทั้งในด้านการเตรียมอุปกรณ์ การควบคุมคุณภาพของการทดลอง และการจัดการเรียนการสอน ด้วยเหตุนี้ นอกเหนือจากการลดขนาดของระบบทดลองเดิมแล้ว การออกแบบหรือปรับเปลี่ยนกิจกรรมการทดลองใหม่ที่ยังคงผลลัพธ์การเรียนรู้ตามวัตถุประสงค์ของรายวิชาไว้ได้ จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการประยุกต์ใช้เทคนิคปฏิบัติการย่อยส่วนเพื่อยกระดับความปลอดภัยและความยั่งยืนของห้องปฏิบัติการเคมี

ภายใต้แนวคิดดังกล่าว การทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายสามารถเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการจัดกิจกรรมปฏิบัติการในรายวิชาเคมีทั่วไปที่ยังคงส่งเสริมผลลัพธ์การเรียนรู้เกี่ยวกับผลของความเข้มข้นของสารต่อพฤติกรรมของระบบเคมีได้

เช่นเดียวกับการทดลองอัตราการเกิดปฏิกิริยา แม้ว่าทั้งสองกิจกรรมจะอธิบายปรากฏการณ์ทางเคมีที่ต่างกัน แต่ต่างมุ่งพัฒนาความเข้าใจของผู้เรียนเกี่ยวกับอิทธิพลของความเข้มข้นของสารต่อระบบเคมี ควบคู่กับการฝึกทักษะการสังเกต การวิเคราะห์ และการแปลผลการทดลอง โดยการทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายอาศัยหลัก Le Châtelier's Principle เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารต่อพฤติกรรมของระบบ (Brown et al., 2018) ขณะที่การทดลองสมดุลการละลายศึกษาพฤติกรรมของการละลายของสารในตัวทำละลายที่แตกต่างกัน ซึ่งทั้งสองกิจกรรมประเมินผลจากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีของระบบ ลักษณะดังกล่าวเอื้อต่อการประยุกต์ใช้เทคนิคปฏิบัติการย่อยส่วน เนื่องจากสามารถลดปริมาณสารละลายจากระดับหลายมิลลิลิตรเป็นระดับหยดบนแผ่นปฏิกิริยาได้ โดยไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนชนิดหรือความเข้มข้นของสารเคมี ทั้งยังสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของระบบได้อย่างชัดเจน โดยไม่ส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์การเรียนรู้ของกิจกรรม นอกจากนี้ การประยุกต์ใช้เทคนิคปฏิบัติการย่อยส่วนยังช่วยลดการใช้สารเคมีและอุปกรณ์เครื่องแก้ว ลดระยะเวลาที่ผู้เรียนต้องปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการ ลดความเสี่ยงจากการสัมผัสสารเคมี และลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นได้อย่างมาก

จากเหตุผลดังกล่าว การปรับเปลี่ยนกิจกรรมการทดลองให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้เทคนิคปฏิบัติการย่อยส่วนจึงเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการยกระดับความปลอดภัย ควบคู่กับการคงไว้ซึ่งคุณภาพของการเรียนรู้ในห้องปฏิบัติการเคมีทั่วไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งประเมินผลของการปรับเปลี่ยนกิจกรรมการทดลองจากการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปสู่การทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายที่ได้รับการออกแบบใหม่ในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วน โดยประเมินผลในด้านการใช้สารเคมี ปริมาณของเสีย ระยะเวลาในการดำเนินงาน และความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน เพื่อพัฒนาแนวทางการจัดการเรียนการสอนที่สอดคล้องกับหลักการ Green Chemistry สนับสนุนการดำเนินงานตามแนวทาง Green Laboratory และมาตรฐาน ESPReL เพื่อเป็นต้นแบบสำหรับการออกแบบกิจกรรมปฏิบัติการเคมีที่สามารถยกระดับความปลอดภัย ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และส่งเสริมการจัดการเรียนการสอนที่มีคุณภาพควบคู่กับการพัฒนาห้องปฏิบัติการอย่างยั่งยืนในสถาบันอุดมศึกษาของประเทศไทย

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อพัฒนาและปรับเปลี่ยนกิจกรรมการทดลองจากการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปสู่การทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วนสำหรับรายวิชาปฏิบัติการเคมีทั่วไป
2. เพื่อศึกษาผลของการประยุกต์ใช้เทคนิคปฏิบัติการย่อยส่วนต่อการลดการใช้สารเคมีและปริมาณของเสียจากการทดลอง
3. เพื่อประเมินความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้การทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วนเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการเคมีทั่วไป

ระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษานี้เป็นการวิจัยเชิงประเมินผล (Evaluation Research) ในบริบทของการจัดการเรียนการสอนจริง (Real-world Educational Implementation) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลของการปรับเปลี่ยนกิจกรรมการทดลองในรายวิชาปฏิบัติการเคมีทั่วไป จากการทดลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปสู่การทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายที่ได้รับการออกแบบใหม่ในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วน (Small-scale Laboratory) การประเมินครอบคลุมผลด้านการใช้สารเคมี การเกิดของเสีย ระยะเวลาในการดำเนินงาน และความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน ภายใต้สภาพการจัดการเรียนการสอนจริงของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การปรับเปลี่ยนกิจกรรมการทดลองครั้งนี้ไม่ได้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการทดลองอัตราการเกิดปฏิกิริยากับการทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายโดยตรง แต่เป็นการประเมินผลของการออกแบบกิจกรรมการทดลองใหม่ที่ยังคงผลลัพธ์การเรียนรู้ด้านผลของความเข้มข้นต่อระบบเคมี ขณะเดียวกันสามารถประยุกต์ใช้เทคนิคปฏิบัติการย่อยส่วนได้อย่างเหมาะสมในบริบทของการจัดการเรียนการสอนที่มีผู้เรียนจำนวนมาก ทั้งนี้ การทดลองอัตราการเกิดปฏิกิริยามีข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้เทคนิคปฏิบัติการย่อยส่วน เนื่องจากผลการทดลองขึ้นอยู่กับการวัดเวลาและต้องใช้อุปกรณ์วัดปริมาตรที่มีความแม่นยำสูง ส่วนการทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายแม้จะสามารถประยุกต์ใช้เทคนิคปฏิบัติการย่อยส่วนได้เหมาะสมกว่า แต่การทดลองแบบดั้งเดิมก็ยังใช้สารเคมีในปริมาณมาก ดังนั้นจึงมีการออกแบบกิจกรรมการทดลองใหม่ทั้งระบบก่อนนำมาใช้ในการศึกษา

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วยข้อมูลการดำเนินกิจกรรมการทดลองในรายวิชาปฏิบัติการเคมีทั่วไปของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งครอบคลุมข้อมูลการใช้สารเคมี ปริมาณของเสีย ระยะเวลาในการ

ดำเนินงาน และข้อมูลด้านความปลอดภัยของการทดลองทั้งรูปแบบเดิมและรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วนตลอดปีการศึกษาที่ทำการศึกษาศึกษาครั้งนี้ใช้ข้อมูลจากประชากรทั้งหมด โดยไม่มีการสุ่มตัวอย่าง เนื่องจากมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลของการดำเนินงานจริงในภาพรวมของรายวิชา จึงรวบรวมข้อมูลจากการดำเนินกิจกรรมทั้งหมดที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่ศึกษา

1. กลุ่มที่ใช้การทดลองอัตราการเกิดปฏิกิริยา (รูปแบบเดิม)
 - ภาคการศึกษาที่ 1 จำนวน 340 คน จาก 3 ตอนเรียน
 - ภาคการศึกษาที่ 2 จำนวน 170 คน จาก 2 ตอนเรียน
2. กลุ่มที่ใช้การทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วน (รูปแบบใหม่)
 - ภาคการศึกษาที่ 1 จำนวน 750 คน จาก 7 ตอนเรียน
 - ภาคการศึกษาที่ 2 จำนวน 650 คน จาก 6 ตอนเรียน

โดยนิตปฏิบัติทดลองเป็นคู่ (2 คนต่อ 1 ชุดการทดลอง)

สำหรับการประเมินความคิดเห็น ผู้วิจัยเก็บข้อมูลจากอาจารย์ผู้สอน ผู้ช่วยสอน และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องจำนวน 25 คน ซึ่งตอบแบบประเมินความคิดเห็นเกี่ยวกับความเหมาะสมของการปรับเปลี่ยนกิจกรรมการทดลอง

เครื่องมือวิจัย

1. ชุดกิจกรรมการทดลองอัตราการเกิดปฏิกิริยา (รูปแบบเดิม)
2. ชุดกิจกรรมการทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วน (รูปแบบใหม่)
3. บันทึกปริมาณการใช้สารเคมีและปริมาณของเสียที่เกิดจากการทดลอง
4. บันทึกข้อมูลด้านความปลอดภัย ประกอบด้วยข้อมูลการเกิดอุบัติเหตุ การตกหล่นหรือแตกหักของเครื่องแก้ว และการรั่วไหลของสารเคมี
5. บันทึกระยะเวลาในการปฏิบัติงาน ได้แก่ การเตรียมสารเคมี การเตรียมอุปกรณ์ การดำเนินการทดลอง และการจัดการหลังการทดลอง
6. แบบประเมินความคิดเห็นเป็นแบบมาตราประมาณค่า 5 ระดับ (Likert Scale) ของอาจารย์ผู้สอน ผู้ช่วยสอน และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเกี่ยวกับความเหมาะสมของการปรับเปลี่ยนกิจกรรมการทดลองและมีค่าความเชื่อมั่น (Cronbach's Alpha) เท่ากับ 0.863 จัดอยู่ในระดับดี (Good Reliability)

การเก็บรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลจากการดำเนินการทดลองจริงในรายวิชาปฏิบัติการเคมีทั่วไป โดยเปรียบเทียบระหว่างการทดลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาและการทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วน

ข้อมูลที่เก็บรวบรวมประกอบด้วย

1. ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมและดำเนินการทดลองต่อคู่ปฏิบัติการ
2. ปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นจากการทดลอง
3. ระยะเวลาในการเตรียมการทดลอง การดำเนินการทดลอง และการจัดการหลังการทดลอง
4. ข้อมูลด้านความปลอดภัยที่เกี่ยวข้องกับการปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการ
5. ผลการประเมินความเหมาะสมของการปรับเปลี่ยนกิจกรรมการทดลองจากอาจารย์ผู้สอน ผู้ช่วยสอน และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ

การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) ได้แก่ ความถี่ (Frequency) ร้อยละ (Percentage) ค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) นำเสนอผลในรูปแบบตารางและการพรรณนาวิเคราะห์ สำหรับแบบประเมินความคิดเห็น ตรวจสอบความเชื่อมั่นด้วยค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค (Cronbach's Alpha) และทดสอบค่าเฉลี่ยด้วยสถิติ One-sample t-test ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05

ผลการวิจัย

1. ผลการพัฒนาและปรับเปลี่ยนกิจกรรมการทดลอง

การศึกษานี้ได้พัฒนาและปรับเปลี่ยนกิจกรรมการทดลองในรายวิชาปฏิบัติการเคมีทั่วไป จากการทดลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปสู่การทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วน (Small-scale Laboratory) โดยยังคงวัตถุประสงค์การเรียนรู้เกี่ยวกับผลของความเข้มข้นต่อพฤติกรรมของระบบเคมี แต่ปรับลดขนาดของระบบทดลอง ปริมาณสารเคมี จำนวนขั้นตอนการปฏิบัติงาน และประเภทของเครื่องแก้วที่ใช้ เพื่อยกระดับความปลอดภัยและเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการห้องปฏิบัติการ เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของกิจกรรมการทดลองทั้งสองรูปแบบ พบว่าการทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วนมีขั้นตอนการดำเนินงานที่กระชับกว่า ใช้เครื่องแก้วและอุปกรณ์น้อยลง ลดการถ่ายเทสารเคมี และไม่จำเป็นต้องอาศัยการจับเวลาในการเก็บผลการทดลอง ส่งผลให้การดำเนินการทดลองมีความสะดวกและลดโอกาสการเกิดความผิดพลาดระหว่างการปฏิบัติงาน ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบลักษณะกิจกรรมการทดลองของการทดลองทั้งสองรูปแบบ

รายการ	การทดลองอัตราการเกิดปฏิกิริยา	การทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายแบบย่อยส่วน
การใช้สารเคมี (1 คู่ทดลอง)	314.00 mL	11.85 mL
การถ่ายเทสารเคมี	หลายขั้นตอน	หยดลงแผ่นการทดลองและหลอดทดลอง
การจับเวลา	ต้องจับเวลา	ไม่ต้องจับเวลา
ประเภทเครื่องแก้ว	5 ประเภท	ใช้หลอดทดลองเพียงชนิดเดียว
ความซับซ้อนของขั้นตอน	มาก	น้อย

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารเคมีที่กำหนดไว้ในคู่มือปฏิบัติการต่อกู่ปฏิบัติการ พบว่าการทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วนใช้สารเคมีรวมเพียง 11.85 mL ดังแสดงในตารางที่ 2 ขณะที่การทดลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาใช้สารเคมีรวมถึง 314.00 mL ต่อกู่ปฏิบัติการ ดังแสดงในตารางที่ 3

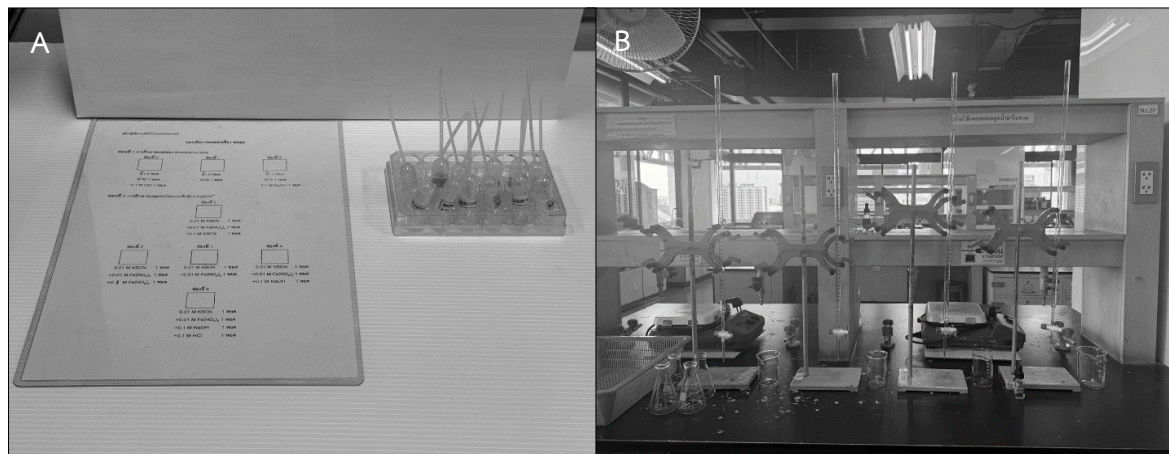
ตารางที่ 2 สารเคมีตามคู่มือการทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายต่อกู่ปฏิบัติการ

สารเคมี	ความเข้มข้น	ปริมาณ (mL)
Hydrochloric acid (HCl)	0.1 M	0.30
Hydrochloric acid (HCl)	0.001 M	6.15
Sodium hydroxide (NaOH)	0.1 M	0.45
Iron (III) nitrate [Fe(NO ₃) ₃]	0.01 M	0.75
Iron (III) nitrate [Fe(NO ₃) ₃]	0.1 M	0.15
Potassium thiocyanate (KSCN)	0.01 M	0.75
Potassium thiocyanate (KSCN)	0.1 M	0.15
Saturated calcium hydroxide solution in water	อิ่มตัว (Saturated)	0.75
Saturated calcium hydroxide solution in calcium nitrate solution	อิ่มตัว (Saturated)	0.75
Saturated calcium hydroxide solution in sodium sulfate solution	อิ่มตัว (Saturated)	0.75
Bromothymol Blue (BTB)	0.05%	0.90
รวม		11.85

ตารางที่ 3 ปริมาณสารเคมีตามคู่มือการทดลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อปฏิบัติการปริมาณ

สารเคมี	ความเข้มข้น	ปริมาณ (mL)
Potassium iodide (KI)	0.2 M	125.00
Ammonium persulfate ((NH ₄) ₂ S ₂ O ₈)	0.1 M	104.00
Sodium thiosulfate (Na ₂ S ₂ O ₃)	0.005 M	70.00
Starch solution	2%	14.00
Copper (II) sulfate (CuSO ₄)	0.1 M	1.00
รวม		314.00

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารเคมีที่กำหนดในคู่มือการทดลอง พบว่าการทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วนใช้สารเคมีลดลง 302.15 mL ต่อปฏิบัติการ หรือคิดเป็น ร้อยละ 96.23 เมื่อเทียบกับการทดลองอัตราการเกิดปฏิกิริยา แสดงให้เห็นว่าการออกแบบกิจกรรมการทดลองในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วนสามารถลดการใช้สารเคมีได้ตั้งแต่ระดับการออกแบบกิจกรรม (source reduction) ก่อนนำไปใช้จริงในการจัดการเรียนการสอน



รูปที่ 1 การทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วน (A) และชุดการทดลองอัตราการเกิดปฏิกิริยา (B)

จากรูปที่ 1 พบว่า การทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วนใช้ภาชนะและอุปกรณ์ขนาดเล็กลง เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองอัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยลดการใช้เครื่องแก้วและปริมาณสารเคมีที่ใช้ต่อการทดลอง

2. ผลของการประยุกต์ใช้กิจกรรมการทดลองต่อการลดการใช้สารเคมีและของเสีย

ภายหลังการนำกิจกรรมการทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วนไปใช้ในการจัดการเรียนการสอน ได้มีการคำนวณปริมาณสารเคมีที่ต้องเตรียมจากจำนวนปฏิบัติการ ปริมาณสารเคมีตามคู่มือการทดลอง และสำรองสารเคมีเพิ่มเติมร้อยละ 10 ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4 และตารางที่ 5

ตารางที่ 4 ปริมาณสารเคมีที่ต้องเตรียมสำหรับการจัดการเรียนการสอนของการทดลองอัตราการเกิดปฏิกิริยา

สารเคมี	เทอม 1 (340 คน) (L)	เทอม 2 (170 คน) (L)	รวม (L)
0.2 M KI	24.0	12.0	36.0
0.1 M ((NH ₄) ₂ S ₂ O ₈)	20.0	10.0	30.0
0.005 M (Na ₂ S ₂ O ₃)	13.0	7.0	20.0
2% Starch	3.0	2.0	5.0
0.1 M CuSO ₄	0.2	0.1	0.3
รวม	60.2	31.1	91.3

ตารางที่ 5 ปริมาณสารเคมีที่ต้องเตรียมสำหรับการจัดการเรียนการสอนของการทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลาย

สารเคมี	เทอม 1 (750 คน) (L)	เทอม 2 (650 คน) (L)	รวม (L)
0.1 M HCl	0.2	0.2	0.4
0.001 M HCl	2.6	2.2	4.8
0.1 M NaOH	0.2	0.2	0.4
0.01 M $[\text{Fe}(\text{NO}_3)_3]$	0.4	0.3	0.7
0.1 M $[\text{Fe}(\text{NO}_3)_3]$	0.1	0.1	0.2
0.01 M KSCN	0.4	0.3	0.7
0.1 M KSCN	0.1	0.1	0.2
Saturated calcium hydroxide solution in water	0.4	0.3	0.7
Saturated calcium hydroxide solution in calcium nitrate solution	0.4	0.3	0.7
Saturated calcium hydroxide solution in sodium sulfate solution	0.4	0.3	0.7
0.05% BTB	0.4	0.4	0.8
รวม	5.0	4.7	9.7

*สารเคมีแต่ละชนิดคงเหลือไม่เกิน 100 มิลลิลิตร

จากตารางที่ 4 และตารางที่ 5 พบว่า การทดลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาต้องเตรียมสารเคมีรวม 91.3 ลิตร ต่อปีการศึกษา ขณะที่การทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วนต้องเตรียมสารเคมีรวมเพียง 9.7 ลิตร แม้ว่าการทดลองรูปแบบใหม่จะรองรับนิสิตมากกว่าการทดลองรูปแบบเดิม ส่งผลให้ปริมาณสารเคมีที่ต้องเตรียมลดลง 81.6 ลิตร หรือคิดเป็นประมาณร้อยละ 89.4

ภายหลังเสร็จสิ้นการจัดการเรียนการสอน ได้มีการบันทึกปริมาณสารเคมีคงเหลือเพื่อนำมาคำนวณปริมาณสารเคมีที่ใช้จริง ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ปริมาณสารเคมีที่ใช้จริงจากการจัดการเรียนการสอน

รายการ	อัตราการเกิดปฏิกิริยา (L)	สมดุลเคมีและสมดุลการละลายในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วน (L)
ปริมาณสารเคมีที่เตรียม	91.3	9.7
ปริมาณสารเคมีคงเหลือ	10.6	1.1*
ปริมาณสารเคมีที่ใช้จริง	80.7	8.6

พบว่า การทดลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาใช้สารเคมีจริง 80.7 ลิตร โดยมีสารเคมีคงเหลือรวม 10.6 ลิตร ขณะที่การทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วนมีสารเคมีคงเหลือของแต่ละชนิดน้อยกว่า 100 มิลลิลิตร หลังสิ้นสุดการเรียนการสอน นอกจากนี้ได้มีการเปรียบเทียบปริมาณและประเภทของเสียที่เกิดขึ้นจากการจัดเรียนการสอน ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ปริมาณและประเภทของเสียที่เกิดขึ้นจากการจัดการเรียนการสอน

รายการ	อัตราการเกิดปฏิกิริยา	สมดุลเคมีและสมดุลการละลายในรูปแบบปฏิบัติการ ย่อยส่วน
ภาคการศึกษาที่ 1	Miscellaneous Aqueous Waste 60 L	Miscellaneous Aqueous Waste 6.4 L Combustible Waste 5 kg
ภาคการศึกษาที่ 2	Miscellaneous Aqueous Waste 30 L	Miscellaneous Aqueous Waste 5.5 L Combustible Waste 5 kg
รวมตลอดปีการศึกษา	Miscellaneous Aqueous Waste 90 L	Miscellaneous Aqueous Waste 11.9 L Combustible Waste 10 kg

พบว่า การทดลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาก่อให้เกิดของเสียประเภท Miscellaneous Aqueous Waste รวม 90 ลิตร ตลอดปีการศึกษา ขณะที่การทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วนก่อให้เกิด Miscellaneous Aqueous Waste รวม 11.9 ลิตร และ Combustible Waste รวม 10 กิโลกรัม ตลอดปีการศึกษา

3. ผลการประเมินความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้การทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วนเพื่อยกระดับความปลอดภัยในการปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการเคมีทั่วไป

ภายหลังการนำกิจกรรมการทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วนไปใช้ในการจัดการเรียนการสอน ได้มีการประเมินความเหมาะสมของกิจกรรมจากผลการดำเนินงานจริงในด้านความปลอดภัยและประสิทธิภาพการปฏิบัติงาน รวมทั้งประเมินความคิดเห็นของผู้สอนและเจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงานต่อการประยุกต์ใช้กิจกรรมการทดลอง

3.1 ผลการประเมินด้านความปลอดภัย

ผลการเปรียบเทียบลักษณะด้านความปลอดภัยของกิจกรรมการทดลองระหว่างการทดลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาและการทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วนแสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบด้านความปลอดภัยของกิจกรรมการทดลอง

ปัจจัยด้านความปลอดภัย	อัตราการเกิดปฏิกิริยา	สมดุลเคมีและสมดุลการละลายแบบย่อยส่วน
ปริมาณสารเคมีที่ใช้จริง**	80.7 L/ปี	8.6 L/ปี
ปริมาณของเสียเคมี	90 L/ปี	ของเสียเคมีเหลว 11.9 L ของเสียติดไฟ 10 kg ต่อปี
ระยะเวลาปฏิบัติการ	2 - 2.5 ชั่วโมง	30 นาที
โอกาสในการสัมผัสสารเคมี	สูงกว่า	ลดลง
การพบเครื่องแก้วแตก	เกิดขึ้นระหว่างปฏิบัติการ	ไม่พบ
การรั่วไหลของสารเคมี	เกิดขึ้นระหว่างปฏิบัติการ	ไม่พบ
อุบัติเหตุในห้องปฏิบัติการ	ไม่พบ	ไม่พบ

จากตารางที่ 8 พบว่า การทดลองสมดุลเคมีในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วนมีการใช้สารเคมีและเกิดของเสียน้อยกว่าการทดลองอัตราการเกิดปฏิกิริยา อีกทั้งยังลดการสัมผัสสารเคมี ลดความเสี่ยงจากการหกหรือไหล และลดความเสี่ยงเครื่องแก้วแตก ส่งผลให้การปฏิบัติงานมีความปลอดภัยมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรทดลองรูปแบบเดิม



รูปที่ 2 ตัวอย่างการรั่วไหลของสารเคมีระหว่างการปฏิบัติงาน

3.2 ผลการประเมินด้านประสิทธิภาพการปฏิบัติงาน

ผลการเปรียบเทียบระยะเวลาในการดำเนินงานของกิจกรรมการทดลองทั้งสองรูปแบบแสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบระยะเวลาในการดำเนินงานของการทดลองทั้งสองรูปแบบ

รายการ	แบบเดิม	แบบย่อส่วน	การเปลี่ยนแปลง
เวลาเตรียมสารเคมี	100%	70 - 80%	ลดลง 20 - 30%
เวลาปฏิบัติการทดลอง	120 - 150 นาที	30 นาที	ลดลง 75 - 80%
เวลาเก็บกวาดและจัดการหลังปฏิบัติการ	100%	<50%	ลดลงมากกว่า 50%

ในส่วนของการเตรียมสารเคมี พบว่าระยะเวลาในการเตรียมสารลดลงประมาณร้อยละ 20 - 30 เมื่อเทียบกับการทดลองอัตราการเกิดปฏิกิริยา แม้ว่าการทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายจะมีจำนวนสารละลายที่ใช้มากกว่า แต่การเตรียมสารในปริมาตรที่น้อยกว่าและการใช้ภาชนะขนาดเล็กช่วยให้การปรับความเข้มข้น การเตรียมสารละลาย และการจัดเตรียมอุปกรณ์ดำเนินการได้สะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้น สำหรับระยะเวลาในการปฏิบัติการทดลอง พบว่าการทดลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาใช้เวลาประมาณ 2 - 2.5 ชั่วโมงต่อรอบปฏิบัติการ ขณะที่การทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายในรูปแบบปฏิบัติการย่อส่วนใช้เวลาประมาณ 30 นาที ส่งผลให้ระยะเวลาในการทดลองลดลงประมาณร้อยละ 75 - 80 ทั้งนี้เนื่องจากขั้นตอนการทดลองมีความกระชับ ใช้ปริมาณสารเคมีน้อย และสามารถสังเกตผลการเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็ว

นอกจากนี้ ยังพบว่าระยะเวลาในการเก็บกวาดอุปกรณ์และจัดการของเสียภายหลังการทดลองลดลงมากกว่าร้อยละ 50 เนื่องจากปริมาณสารเคมีที่ใช้และปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นมีน้อยลงอย่างมาก ส่งผลให้การล้างอุปกรณ์ การรวบรวมของเสีย และการเตรียมห้องปฏิบัติการสำหรับการใช้งานครั้งถัดไปสามารถดำเนินการได้รวดเร็วยิ่งขึ้น ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้เทคนิคปฏิบัติการย่อส่วนไม่เพียงช่วยลดการใช้สารเคมีและปริมาณของเสียเท่านั้น แต่ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการเวลาและลดภาระงานของผู้สอนและเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการได้อย่างชัดเจน

3.3 ผลการประเมินความเหมาะสมของกิจกรรมการทดลอง

ภายหลังการนำกิจกรรมการทดลองไปใช้ในการจัดการเรียนการสอน ได้มีการประเมินความเหมาะสมของกิจกรรมจากผู้สอนและเจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงาน จำนวน 25 คน โดยใช้แบบสอบถามมาตรฐานประมาณค่า 5 ระดับ จำนวน 12 ข้อคำถาม ผลการตรวจสอบความเชื่อมั่นของแบบสอบถามด้วยวิธีสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค (Cronbach's alpha) พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.863 แสดงว่าแบบสอบถามมีความเชื่อมั่นอยู่ในระดับ ดี และมีความสอดคล้องภายในของข้อคำถามเพียงพอสำหรับการนำไปใช้ในการวิจัย ผลการประเมินความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้การทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายในรูปแบบปฏิบัติการย่อส่วนแสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ผลการประเมินความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้การทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วน

ด้านการประเมิน	ระดับการประเมิน	Mean $\pm$ SD
ความเหมาะสมของการทดลอง	มากที่สุด	4.51 $\pm$ 0.52
ความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน	มากที่สุด	4.54 $\pm$ 0.59
การใช้ทรัพยากรและการลดของเสีย	มาก	4.49 $\pm$ 0.66
การดำเนินการทดลอง	มาก	4.31 $\pm$ 0.75
ความพึงพอใจโดยรวม	มาก	4.46 $\pm$ 0.52
ค่าเฉลี่ยรวม	มาก	4.46 $\pm$ 0.61

จากตารางที่ 10 พบว่า ผู้ตอบแบบประเมินมีความคิดเห็นต่อการประยุกต์ใช้การทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วนอยู่ในระดับมาก (4.46 $\pm$ 0.61) เมื่อทดสอบด้วยสถิติ One-sample *t*-test เปรียบเทียบกับค่าเกณฑ์ 3.00 พบว่าค่าเฉลี่ยความคิดเห็นโดยรวมสูงกว่าค่าเกณฑ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($t(24) = 11.97, p < 0.001$) แสดงให้เห็นว่าผู้ตอบแบบประเมินมีความคิดเห็นเชิงบวกต่อการประยุกต์ใช้การทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วน

อภิปรายผลการวิจัย

ผลการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้เทคนิคปฏิบัติการย่อยส่วนโดยการปรับเปลี่ยนกิจกรรมการทดลองจากการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปสู่การทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลาย สามารถยกระดับความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการเคมีทั่วไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งลดการใช้สารเคมี ปริมาณของเสีย ระยะเวลาในการดำเนินงาน และภาระในการบริหารจัดการห้องปฏิบัติการ โดยมุ่งคงไว้ซึ่งผลลัพธ์การเรียนรู้ตามวัตถุประสงค์ของรายวิชา ผลการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดของ Singh et al. (1999) ที่ระบุว่าเทคนิคปฏิบัติการย่อยส่วนสามารถลดการใช้สารเคมี ลดของเสีย และลดความเสี่ยงจากการปฏิบัติงานได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของการเรียนรู้ อีกทั้งยังสอดคล้องกับ Armstrong et al. (2019) และ Cabrera-Franco et al. (2026) ที่เสนอว่าการออกแบบกิจกรรมการทดลองใหม่ให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้เทคนิคปฏิบัติการย่อยส่วน สนับสนุนแนวคิดการออกแบบหรือปรับเปลี่ยนกิจกรรมการทดลองให้เหมาะสมกับบริบทของการจัดการเรียนการสอนและหลักการ Green Chemistry เนื่องจากสามารถออกแบบขั้นตอนการทดลองให้สอดคล้องกับบริบทการจัดการเรียนการสอนและการบริหารจัดการห้องปฏิบัติการได้ดียิ่งขึ้น

แม้ว่าการทดลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาและการทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายจะมีเนื้อหาทางเคมีแตกต่างกัน แต่การปรับเปลี่ยนกิจกรรมการทดลองในงานวิจัยนี้ได้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการทดลองทั้งสองโดยตรง แต่เป็นการประเมินผลของการออกแบบกิจกรรมการทดลองใหม่ที่ยังคงผลลัพธ์การเรียนรู้เกี่ยวกับผลของความเข้มข้นต่อระบบเคมี การสังเกต การวิเคราะห์ และการแปลผลการทดลองไว้ ขณะเดียวกันสามารถประยุกต์ใช้เทคนิคปฏิบัติการย่อยส่วนได้อย่างเหมาะสม จึงทำให้ผลลัพธ์ที่พบสะท้อนประสิทธิภาพของการออกแบบกิจกรรมการทดลองใหม่ในบริบทของการจัดการเรียนการสอนจริง มากกว่าการเปรียบเทียบความแตกต่างของเนื้อหาการทดลองเพียงอย่างเดียว

ในด้านการใช้สารเคมี ผลการศึกษพบว่า การทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วนใช้สารเคมีเพียง 11.85 มิลลิลิตรต่อคู่ปฏิบัติการ เมื่อเทียบกับ 314 มิลลิลิตรของการทดลองอัตราการเกิดปฏิกิริยา คิดเป็นการลดลงร้อยละ 96.23 นอกจากนี้ แม้ว่าจำนวนนิสิตที่เข้าปฏิบัติการจะเพิ่มขึ้นจาก 510 คนเป็น 1,400 คน แต่ปริมาณสารเคมีที่ต้องเตรียมตลอดปีการศึกษายังคงลดลงจาก 91.3 ลิตร เหลือเพียง 9.7 ลิตร และปริมาณสารเคมีที่ใช้จริงลดลงจาก 80.7 ลิตร เหลือ 8.6 ลิตร ลดลงประมาณร้อยละ 89.4 แม้ว่าจำนวนนิสิตเพิ่มขึ้นเกือบ 3 เท่า แสดงให้เห็นว่าการลดการใช้สารเคมีไม่ได้เกิดจากจำนวนผู้เรียนที่ลดลง แต่เกิดจากการออกแบบกิจกรรมการทดลองให้ใช้สารเคมีในระดับย่อยส่วนตั้งแต่ต้นทาง ซึ่งสอดคล้องกับหลักการ Waste Prevention และ Source Reduction ของ Green Chemistry ที่มุ่งลดการใช้ทรัพยากรและการเกิดของเสียตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบกระบวนการ (Anastas & Warner, 1998; Anastas & Eghbali, 2010)

นอกจากการลดปริมาณสารเคมีที่ใช้แล้ว การออกแบบการทดลองในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วนยังส่งผลต่อการเตรียมสารเคมีสำหรับการจัดการเรียนการสอนจริงอย่างชัดเจน ในการจัดการเรียนการสอนรายวิชาปฏิบัติการเคมี ผู้ปฏิบัติงานจำเป็นต้องเตรียมสารเคมีเผื่อจากปริมาณที่คำนวณได้เสมอ เพื่อรองรับการสูญเสียระหว่างการชั่งสาร การถ่ายเทสาร การหกหรือไหล การดูดสารไม่หมด หรือการเติมสารระหว่างการทดลอง ดังนั้น เมื่อการทดลองใช้สารเคมีในปริมาณมาก ปริมาณสารที่ต้องเตรียมเผื่อก็เพิ่มขึ้นตาม ส่งผล

ให้มีสารเคมีคงเหลือหลังสิ้นสุดการเรียนการสอนจำนวนมาก และเพิ่มภาระในการจัดเก็บ การควบคุมคุณภาพ และการกำจัดสารเคมีที่เหลือใช้ อย่างไรก็ตาม การทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วนใช้ปริมาณสารเคมีต่อการทดลองน้อยมาก ทำให้ปริมาณสารที่ต้องเตรียมเพื่อทดลองอย่างมากเช่นเดียวกัน ผลการศึกษาพบว่าสารเคมีคงเหลือของแต่ละชนิดหลังสิ้นสุดการเรียนการสอนมีปริมาณไม่เกิน 100 มิลลิลิตร สะท้อนให้เห็นถึงการใช้สารเคมีได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดการสูญเสียทรัพยากร และลดภาระในการจัดการสารเคมีคงเหลือ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการบริหารจัดการห้องปฏิบัติการในระยะยาว

ผลการศึกษาายังแสดงให้เห็นว่าการลดปริมาณสารเคมีตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบกิจกรรม ส่งผลโดยตรงต่อการลดปริมาณของเสียเคมี โดยของเสียประเภท Miscellaneous Aqueous Waste ลดลงจาก 90 ลิตร เหลือเพียง 11.9 ลิตรต่อปีการศึกษา แม้ว่า การทดลองรูปแบบใหม่จะมีของเสียประเภท Combustible Waste จากวัสดุสิ้นเปลืองบางส่วน ซึ่งเป็นของเสียคนละประเภทกับของเสียสารละลาย และจำเป็นต้องจัดการตามแนวทางการจัดการของเสียที่กำหนด ผลการศึกษานี้จึงสอดคล้องกับแนวคิด Green Chemistry และ Green Laboratory ที่ให้ความสำคัญกับการลดของเสียที่แหล่งกำเนิด มากกว่าการมุ่งจัดการของเสียหลังเกิดขึ้นแล้ว

ในด้านความปลอดภัย ผลการศึกษาพบว่า การทดลองรูปแบบใหม่ช่วยลดความเสี่ยงจากการสัมผัสสารเคมี การถ่ายเทสารเคมี และการใช้เครื่องแก้วหลายชนิดได้อย่างชัดเจน การทดลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาจำเป็นต้องตวงสารหลายครั้ง ใช้เครื่องแก้วหลายประเภท และต้องอาศัยความรวดเร็วในการผสมสารและการจับเวลา ซึ่งอาจทำให้ผู้เรียน โดยเฉพาะนิสิตชั้นปีที่ 1 ที่ยังมีประสบการณ์จำกัด เกิดความผิดพลาดระหว่างการปฏิบัติงานได้ง่าย ส่งผลให้เกิดการหกหรือไหลของสารเคมีหรือการแตกหักของเครื่องแก้ว ในทางตรงกันข้าม การทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วนใช้เพียงการหยดสารลงบนแผ่นปฏิกิริยาและหลอดทดลองขนาดเล็ก ไม่ต้องจับเวลา และมีขั้นตอนการทดลองที่เรียบง่ายกว่า ทำให้ไม่พบเหตุการณ์การรั่วไหลของสารเคมีหรือการแตกหักของเครื่องแก้วตลอดระยะเวลาที่ศึกษา แม้ว่าทั้งสองรูปแบบจะไม่พบอุบัติเหตุร้ายแรง แต่การลดปัจจัยเสี่ยงตั้งแต่ต้นทางถือเป็นหัวใจสำคัญของการบริหารความเสี่ยงในห้องปฏิบัติการ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิด Laboratory Risk Assessment ของ Hill และ Finster (2016)

ในด้านประสิทธิภาพการดำเนินงาน พบว่าการทดลองรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วนช่วยลดระยะเวลาในทุกขั้นตอนของการดำเนินงาน โดยระยะเวลาในการเตรียมสารเคมีลดลงประมาณร้อยละ 20 - 30 ระยะเวลาปฏิบัติการลดลงจาก 120 - 150 นาที เหลือประมาณ 30 นาที และระยะเวลาในการเก็บกวาดอุปกรณ์และการจัดการของเสียลดลงมากกว่าร้อยละ 50 แม้ว่า การทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายจะใช้สารละลายหลายชนิด แต่การเตรียมสารในปริมาณที่น้อยกว่า การลดจำนวนเครื่องแก้ว และการลดขั้นตอนการถ่ายเทสาร ทำให้การดำเนินงานมีความรวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดภาระงานของอาจารย์ผู้สอนและเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ทำให้สามารถบริหารจัดการรายวิชาที่มีนิสิตจำนวนมากได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ผลการประเมินจากอาจารย์ผู้สอน ผู้ช่วยสอน และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการยังสนับสนุนผลการศึกษาดังกล่าว โดยมีค่าเฉลี่ยความเหมาะสมโดยรวมอยู่ในระดับมาก (4.46 ± 0.61) และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเกณฑ์โดยใช้สถิติ One-sample t-test พบว่าค่าเฉลี่ยความคิดเห็นสูงกว่าค่าเกณฑ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) แสดงให้เห็นว่าผู้ปฏิบัติงานยอมรับการปรับเปลี่ยนกิจกรรมการทดลองในเชิงบวก ทั้งในด้านความปลอดภัย การใช้ทรัพยากร ความสะดวกในการดำเนินงาน และความเหมาะสมของกิจกรรมการเรียนการสอน สะท้อนให้เห็นว่าการทดลองรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วนมีศักยภาพในการนำไปใช้จริงและสามารถขยายผลไปสู่กิจกรรมปฏิบัติการอื่นได้

โดยสรุป การประยุกต์ใช้เทคนิคปฏิบัติการย่อยส่วนในการออกแบบกิจกรรมการทดลองครั้งนี้ไม่ได้เป็นเพียงการลดขนาดของการทดลองหรือการลดการใช้สารเคมีเท่านั้น แต่เป็นการปรับเปลี่ยนระบบการจัดการห้องปฏิบัติการทั้งกระบวนการ ตั้งแต่การวางแผน เตรียมสาร การใช้ทรัพยากร การลดของเสีย การบริหารเวลา การลดความเสี่ยงในการปฏิบัติงาน ตลอดจนการเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการเรียนการสอน ซึ่งสอดคล้องกับแนวทาง Green Laboratory และมาตรฐาน ESPReL และสามารถใช้เป็นต้นแบบในการพัฒนา กิจกรรมปฏิบัติการเคมีอื่น ๆ เพื่อยกระดับความปลอดภัยและความยั่งยืนของห้องปฏิบัติการในสถาบันอุดมศึกษาต่อไป

สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการประเมินผลการปรับเปลี่ยนกิจกรรมการทดลองจากการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปสู่การทดลองสมดุลเคมีและสมดุลการละลายในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วนสำหรับรายวิชาปฏิบัติการเคมีทั่วไป ผลการศึกษพบว่า การออกแบบกิจกรรมการทดลองใหม่สามารถลดการใช้สารเคมีต่อปฏิบัติการได้ร้อยละ 96.23 ลดปริมาณสารเคมีที่ต้องเตรียมและปริมาณของเสียจากการทดลองได้อย่างชัดเจน แม้ว่าจะรองรับจำนวนนิสิตมากกว่ารูปแบบเดิม อีกทั้งยังช่วยลดระยะเวลาในการเตรียมสารเคมี การดำเนินการทดลอง และการจัดการหลังการทดลอง ส่งผลให้การบริหารจัดการห้องปฏิบัติการมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ในด้านความปลอดภัย การทดลองรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วนช่วยลดการสัมผัสสารเคมี ลดขั้นตอนการถ่ายเทสาร ลดการใช้เครื่องแก้ว และไม่พบการรั่วไหลของสารเคมีหรือการแตกหักของเครื่องแก้วตลอดระยะเวลาการศึกษา ขณะเดียวกัน ผู้สอน ผู้ช่วยสอน และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการมีความคิดเห็นต่อการประยุกต์ใช้กิจกรรมการทดลองในระดับมาก และยอมรับว่าการทดลองรูปแบบใหม่มีความเหมาะสม ปลอดภัย และเอื้อต่อการดำเนินงานในห้องปฏิบัติการ

โดยสรุป การประยุกต์ใช้เทคนิคปฏิบัติการย่อยส่วนร่วมกับการออกแบบกิจกรรมการทดลองใหม่ เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการยกระดับความปลอดภัย ลดการใช้ทรัพยากร ลดของเสีย และเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการห้องปฏิบัติการ สอดคล้องกับแนวทาง Green Laboratory และมาตรฐาน ESPReL และสามารถใช้เป็นต้นแบบในการพัฒนากิจกรรมปฏิบัติการเคมีอื่น ๆ ในระดับอุดมศึกษาต่อไป

ข้อเสนอแนะ

1. ควรขยายการประยุกต์ใช้เทคนิคปฏิบัติการย่อยส่วนไปยังการทดลองอื่นในรายวิชาปฏิบัติการเคมีทั่วไป เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลดการใช้สารเคมี ลดปริมาณของเสีย และยกระดับความปลอดภัยในภาพรวมของห้องปฏิบัติการ
2. ควรพัฒนาแนวปฏิบัติหรือคู่มือการออกแบบการทดลองในรูปแบบปฏิบัติการย่อยส่วน เพื่อใช้เป็นต้นแบบสำหรับการปรับปรุงกิจกรรมการทดลองในรายวิชาอื่น รวมถึงสนับสนุนการดำเนินงานตามแนวทาง Green Laboratory และมาตรฐาน ESPReL อย่างเป็นระบบ
3. ควรมีการศึกษาผลลัพธ์ในมิติอื่นเพิ่มเติม เช่น ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน ความคงอยู่ขององค์ความรู้ ความพึงพอใจของผู้เรียน และทักษะการปฏิบัติการทางเคมี เพื่อประเมินผลกระทบของการปรับเปลี่ยนกิจกรรมการทดลองต่อการเรียนรู้ของนิสิตอย่างรอบด้าน
4. ควรศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ (Cost-benefit Analysis) และผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม เช่น Carbon Footprint หรือ Life Cycle Assessment (LCA) เพื่อสนับสนุนการขยายผลของเทคนิคปฏิบัติการย่อยส่วนในระดับหลักสูตรหรือระดับสถาบัน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และการสนับสนุนทางวิชาการอันเป็นประโยชน์ต่อการดำเนินโครงการในครั้งนี้ ขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอน เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมีทั่วไป และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่าน ที่ให้ความร่วมมือในการจัดเตรียมข้อมูล การดำเนินกิจกรรมการทดลอง และการประเมินผลการปรับเปลี่ยนกิจกรรมการทดลอง จนทำให้การศึกษาค้นคว้าสำเร็จลุล่วงด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงเกิดจากการศึกษาค้นคว้านี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นส่วนหนึ่งในการพัฒนาการจัดการเรียนการสอนและการยกระดับความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการเคมีต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- Anastas, P. T., & Eghbali, N. (2010). Green chemistry: Principles and practice. *Chemical Society Reviews*, 39(1), 301-312. <https://doi.org/10.1039/B918763B>
- Anastas, P. T., & Warner, J. C. (1998). *Green chemistry: Theory and practice*. Oxford University Press.
- Armstrong, L. B., Rivas, M. C., Zhou, Z., Irie, L. M., Kerstiens, G. A., Robak, M. T., Douskey, M. C., & Baranger, A. M. (2019). Developing a green chemistry focused general chemistry laboratory curriculum: What do students understand and value about green chemistry? *Journal of Chemical Education*, 96(11), 2410-2419. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00277>
- Brown, T. L., LeMay, H. E., Bursten, B. E., Murphy, C. J., Woodward, P. M., & Stoltzfus, M. W. (2018). *Chemistry: The central science* (14th ed.). Pearson.
- Cabrera-Franco, J., Rivas, H., Cruz, R., Jin, Z., & Cui, J. (2026). Small changes, big impact: Integrating green chemistry into the organic chemistry laboratory through optimized experimental methods. *Journal of Chemical Education*, 103(6), 3227-3234. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.5c01111>
- Creary, X., & Morris, K. M. (1999). A new twist on the iodine clock reaction: Determining the order of a reaction. *Journal of Chemical Education*, 76(4), 530. <https://doi.org/10.1021/ed076p530>

- Hensley, M. S., Burrows, N. L., Galerneau, A. J., Bekkala, A. P., & Hungwe, K. N. (2024). Investigating the impact of RAMP-based safety instruction on student learning in an organic chemistry lab course. *Journal of Chemical Education*, 101(6), 2203-2214. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.3c00955>
- Hill, R. H., Jr., & Finster, D. C. (2016). *Laboratory safety for chemistry students* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- MacKellar, J. J., Constable, D. J. C., Kirchhoff, M. M., Hutchison, J. E., & Beckman, E. (2020). Toward a green and sustainable chemistry education road map. *Journal of Chemical Education*, 97(8), 2104-2113. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00288>
- O'Neil, N. J., Scott, S., Relph, R., & Ponnusamy, E. (2021). Approaches to incorporating green chemistry and safety into laboratory culture. *Journal of Chemical Education*, 98(1), 84-91. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00134>
- Rogat, C., Barnes, C., & Gallant, S. K. (2025). Implementation of a green chemical hygiene and safety experiment in the General Chemistry I laboratory. *Journal of Chemical Education*, 102(1), 311-315. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.4c00634>
- Sattsangi, P. D. (2011). A microscale approach to chemical kinetics in the general chemistry laboratory: The potassium iodide hydrogen peroxide iodine-clock reaction. *Journal of Chemical Education*, 88(2), 184-188. <https://doi.org/10.1021/ed100140w>
- Singh, M. M., Szafran, Z., & Pike, R. M. (1999). Microscale chemistry and green chemistry: Complementary pedagogies. *Journal of Chemical Education*, 76(12), 1684-1686. <https://doi.org/10.1021/ed076p1684>