

**บทความปริทัศน์****แนวคิดเคมีสีเขียวกับการจัดการเรียนการสอน****Concepts of green chemistry and instructional management**

สายรุ้ง ชาวสุภา

Sairoong Saowsupa

ภาควิชาหลักสูตรและการสอน คณะครุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

Department of Curriculum and Instruction, Faculty of Education, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

## ARTICLE INFO

*Article history:*

Received 1 August 2014

Received in revised form 17 March 2016

Accepted 25 March 2016

*Keywords:*

basic education curriculum,

green chemistry concept,

higher education

## ABSTRACT

This article aims to present and analyze teaching and learning situations using the concept of green chemistry along with the expected obstacles and also the interest in teaching and learning based on this concept to provide maximum benefits to students and generations of chemists. A practical approach to the successful teaching of green chemistry includes four aspects: 1) designing courses by interpolating green chemistry concepts in basic subjects; 2) using real-world case studies; 3) qualitative and quantitative measuring by focusing assessment and decision-making skills; and 4) providing the availability of learning resources such as instructors, textbooks, and laboratories. The teaching situations based on the concept of green chemistry occur mainly in higher education. However, there are some limitations such as the lack of accessible information for teachers or students on the concept of green chemistry. The concept of green chemistry to describe chemical synthesis is not included in textbooks and is invisible in the undergraduate curriculum. For basic education such as secondary school level in the USA, the development of green chemistry is apparent in teaching at the K-12 levels. Nevertheless, this concept has still not been explicitly recognized in the basic education curriculum in Thailand. Most teaching of the green chemistry concept comes from a partnership between government agencies and private organizations through various projects.

**บทคัดย่อ**

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอและวิเคราะห์สถานการณ์วิธีการจัดการเรียนการสอนโดยใช้แนวคิดเคมีสีเขียวพร้อมทั้งปัญหาและอุปสรรคที่คาดว่าจะเกิดขึ้น ตลอดจนประเด็นที่น่าสนใจในการจัดการเรียนการสอนโดยใช้แนวคิดเคมีสีเขียวเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อผู้เรียนและนักเคมีรุ่นหลัง แนวทางปฏิบัติสู่การจัดการเรียนการสอนเคมีสีเขียวให้ประสบความสำเร็จประกอบด้วย ปัจจัย 4 ประการ ได้แก่ 1)

การออกแบบรายวิชาโดยมีการบูรณาการหรือสอดแทรกแนวคิดเคมีสีเขียวในรายวิชาพื้นฐาน 2) การใช้สถานการณ์จริงเป็นกรณีศึกษา 3) การวัดและประเมินเชิงปริมาณควบคู่กับเชิงคุณภาพ เน้นทักษะการประเมินและการตัดสินใจ และ 4) ความพร้อมของแหล่งเรียนรู้ เช่น ผู้สอน ตำราเรียนและห้องปฏิบัติการเคมีโดยพบว่า สถานการณ์การจัดการเรียนการสอนโดยใช้แนวคิดเคมีสีเขียวในปัจจุบันส่วนใหญ่จะจัดขึ้นในระดับอุดมศึกษา แต่ก็ยังมีข้อจำกัดต่างๆ อาทิ ขาดฐานข้อมูลเบื้องต้นแก่ผู้สอนหรือผู้เรียนในการนำแนวคิดเคมีสีเขียวไปใช้ ตำรา

เรียนที่ใช้ไม่ปรากฏแนวคิดเคมีสีเขียวสอดแทรกในการอธิบาย การสังเคราะห์ทางเคมี และหลักสูตรระดับปริญญาบัณฑิตยังไม่มีการบรรจุแนวคิดเคมีสีเขียวไว้อย่างชัดเจน ส่วนการนำแนวคิดเคมีสีเขียวลงสู่ระดับการศึกษาขั้นพื้นฐาน เช่น ระดับมัธยมศึกษา พบว่าในต่างประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา มีการพัฒนาหลักสูตรเคมีสีเขียวขึ้นมาสำหรับการเรียนการสอนระดับ K-12 สำหรับประเทศไทย การนำแนวคิดนี้บรรจุไว้ในหลักสูตรนั้นยังไม่ชัดเจนโดยมักจะเป็นในรูปแบบโครงการต่างๆ ซึ่งเป็นความร่วมมือของหน่วยงานภาครัฐและเอกชน

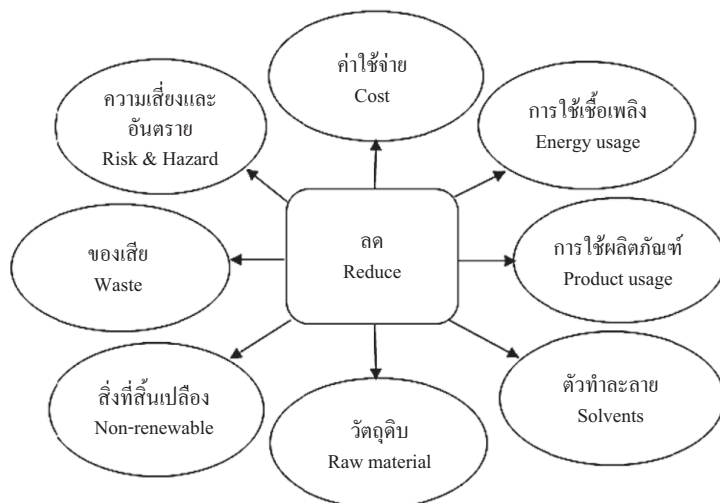
**คำสำคัญ:** หลักสูตรการศึกษาขั้นพื้นฐาน แนวคิดเคมีสีเขียว การศึกษาระดับอุดมศึกษา

**บทนำ**

โลกในยุคปัจจุบันเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็วเนื่องจากหลายปัจจัย อาทิ การแลกเปลี่ยนข้อมูลการค้า การติดต่อสื่อสารตลอดจนการคมนาคม ทั้งนี้เป็นเพราะมนุษย์ได้พัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ อย่างต่อเนื่องทำให้เกิดรูปแบบใหม่ๆ ในการเปลี่ยนแปลงด้านต่างๆ เทคโนโลยีเป็นศาสตร์แห่งการสร้างเครื่องมือหรือสิ่งอำนวยความสะดวกในการดำเนินชีวิตของมนุษย์ นอกจากนี้เทคโนโลยีจะเป็นวิทยาการใหม่ที่ช่วยให้วิถีชีวิตของมนุษย์เป็นไปอย่างสะดวกสบายมากขึ้นแล้วในทางกลับกันวิทยาการเหล่านี้ก็สร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของเราไม่น้อย เช่น การเดินทางโดยรถยนต์ รถยนต์เป็นยานพาหนะที่อำนวยความสะดวกในการเดินทางซึ่งนับได้ว่าเป็นสิ่งที่จำเป็นในชีวิตประจำวันของมนุษย์ในยุคปัจจุบัน ผู้บริโภค

ที่มีกำลังซื้อจำนวนมากไม่น้อยที่เลือกซื้อและขับรถยนต์ส่วนตัวแทนการใช้บริการรถประจำทาง เมื่อมีความต้องการซื้อรถยนต์ในปริมาณมากก็ย่อมมีการผลิตมาก เทคโนโลยีการผลิตรถยนต์ตลอดจนการใช้รถยนต์และเชื้อเพลิงเป็นหนึ่งตัวอย่างที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากมายตามมาด้วยเหตุนี้จึงเกิดแนวคิดเกี่ยวกับการบริโภคที่ยั่งยืน (Sustainable Consumption) และเกิดแนวคิดการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development) ขึ้นในหลายภาคส่วนทั้งส่วนการบริหาร ส่วนนโยบาย ส่วนการผลิต และส่วนการศึกษาโดยทุกภาคส่วนต่างให้ความสำคัญกับการพัฒนาที่ยั่งยืน นับได้ว่าเป็นเรื่องที่ทำอย่างต่อเนื่องสำหรับนักเคมี นักชีวเคมี วิศวกรและผู้ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตหรือสร้างนวัตกรรมที่มีส่วนประกอบของสารเคมีหรือผลิตภัณฑ์ทางเคมี ดังนั้นเพื่อตอบสนองแนวคิดการพัฒนาที่ยั่งยืนและกระตุ้นให้ผู้บริโภคได้ตระหนักถึงการบริโภคผลิตภัณฑ์ต่างๆ อย่างยั่งยืน แนวทางปฏิบัติสำคัญที่นักเคมี ชีวเคมี วิศวกร และผู้ที่เกี่ยวข้องควรตระหนักและให้ความสำคัญอย่างยิ่ง คือ การลด (Reduction) ปริมาณของเสียที่เกิดจากการผลิตหรือใช้นวัตกรรมนั้นๆ ลดการใช้วัตถุดิบ เชื้อเพลิง ตัวทำละลาย ค่าใช้จ่าย ความเสี่ยง และตระหนักถึงความคุ้มค่าในการใช้ประโยชน์จากผลิตภัณฑ์ให้สูงสุด (ภาพที่ 1) (Doble & Kruthiventi, 2007)

ต้นกำเนิดของแนวคิดเคมีสีเขียวก็เช่นกันเริ่มจากการตระหนักถึงความต้องการในการลดหรือหยุดการทำลายสิ่งแวดล้อมอันเกิดจากผลิตภัณฑ์หรือนวัตกรรมที่มนุษย์สร้างขึ้น รวมถึงกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการผลิตหรือสร้างนวัตกรรมเหล่านั้น เคมีสีเขียวจึงมีจุดประสงค์เพื่อพัฒนา



ภาพที่ 1 การลดปัจจัยต่างๆ เพื่อนำไปสู่การพัฒนาที่ยั่งยืน

เทคโนโลยีและกระบวนการผลิตทางเคมีให้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอันเป็นแนวทางการพัฒนาที่ยั่งยืนโดยใช้หลักการพื้นฐานของการออกแบบการผลิตตลอดจนการใช้ผลิตภัณฑ์ที่สร้างผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุดหรือไม่สร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งคำว่าเคมีสีเขียวหรือ “Green Chemistry” ปรากฏขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1991 ในการนี้ Anastas ได้ร่วมกับ Warner เสนอหลักการพื้นฐานตามแนวคิดเคมีสีเขียว 12 ประการขึ้นในปี ค.ศ. 1998 (Wardencki, Curylo, & NamieŚnik, 2005)

### หลักการพื้นฐานตามแนวคิดเคมีสีเขียว 12 ประการ (The 12 Principles of Green Chemistry)

เคมีสีเขียว (Green Chemistry) เป็นศาสตร์ที่เกี่ยวกับการลด หลีกเลียง หรือกำจัดสารก่อให้เกิดอันตรายกับสิ่งแวดล้อม ในการออกแบบผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการสังเคราะห์สาร รวมทั้งการใช้ผลิตภัณฑ์ทางเคมีต่างๆ ดังนั้นหัวใจสำคัญของเคมีสีเขียวจึงเป็นการวางแผนการปฏิบัติในกระบวนการหรือขั้นตอนทางเคมีเพื่อให้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

หลักการพื้นฐานตามแนวคิดเคมีสีเขียวทั้ง 12 ประการ ประกอบด้วยแนวคิดและแนวปฏิบัติในการใช้สารเคมี การสังเคราะห์และกระบวนการทางเคมีต่างๆ ที่นักเคมีต้องตระหนักเพื่อลดผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและสุขภาพเศรษฐกิจแนวคิดหลักๆ ที่นักเคมีควรยึดถือและตระหนักเสมอ เช่น การใช้สารเคมีทุกอะตอมอย่างคุ้มค่า (Atom Economy) ป้องกันการเกิดของเสียหรือไม่สร้างของเสีย (Toxicity) ออกแบบผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการสังเคราะห์ที่ไม่เป็นพิษ การใช้พลังงานในกระบวนการทางเคมีอย่างมีประสิทธิภาพ (Energy Consumption) การเลือกใช้วัตถุดิบจากแหล่งที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Renewable Source) การใช้ตัวทำละลายและสารช่วยที่ปลอดภัย (Safer Solvents and Auxiliaries) และผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้เมื่อสลายตัวแล้วควรเป็นสารที่ไม่ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม (Chemical Product Degradation) เป็นต้น (Wardencki et al., 2005; วิบูลย์, 2554) โดยหลักการพื้นฐานดังกล่าวมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การป้องกันการเกิดของเสีย (Prevention) คือการหลีกเลี่ยงการทำให้เกิดของเสียจากการสังเคราะห์หรือกระบวนการต่างๆ ซึ่งเป็นสิ่งที่ดีกว่าการบำบัดหรือกำจัดของเสียในภายหลัง

2. การใช้สารเคมีทุกอะตอมให้คุ้มค่า (Atom Economy)

ในกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีจำเป็นต้องมีการออกแบบให้สารตั้งต้นถูกใช้อย่างคุ้มค่าโดยสามารถออกแบบวิธีสังเคราะห์ให้สารทุกชนิดที่ใช้ในกระบวนการสามารถรวมเข้าไประหว่างกันได้มากที่สุดในการผลิตผลิตภัณฑ์สุดท้าย ซึ่งการประเมินการใช้สารเคมีทุกหน่วยอะตอมหรือเรียกว่าการหาประสิทธิภาพการมีส่วนร่วมทุกอะตอมของสารสามารถคำนวณได้ดังสูตรดังนี้

$$\text{ร้อยละการใช้สารเคมีทุกอะตอมให้คุ้มค่า} = \frac{\text{มวลโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ}}{\text{มวลโมเลกุลของสารตั้งต้นทั้งหมด}} \times 100$$

3. กระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีที่เป็นอันตรายน้อยลง (Less Hazardous Chemical Syntheses) คือ การออกแบบกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีที่ไม่เป็นอันตรายและลดความเป็นพิษลงโดยส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมให้น้อยที่สุด

4. สารเคมีที่สังเคราะห์ได้ไม่เป็นพิษและมีประสิทธิภาพ (Designing Safer Chemicals) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมีเป็นสารที่ใช้งานได้ดีมีประสิทธิภาพตามวัตถุประสงค์ของการสังเคราะห์และในขณะเดียวกันก็มีความเป็นพิษน้อยหรือไม่สร้างผลเสียที่กระทบต่อชีวิตมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

5. การเลือกใช้ตัวทำละลายและตัวช่วยที่ปลอดภัย (Safer Solvents and Auxiliaries) การใช้ตัวทำละลายและตัวช่วยที่ปลอดภัย เช่น น้ำ ตัวทำละลายมีประจุ หรือคาร์บอนไดออกไซด์เหลว (Supercritical Carbon dioxide) และเลือกใช้สภาวะการทดลองที่ไม่รุนแรง เช่น ไม่ใช้สภาวะที่เป็นกรดหรือเบสที่รุนแรง เป็นต้น ผู้ใช้ควรพิจารณาหลีกเลี่ยงหรือเลือกใช้ตัวทำละลายหรือกระบวนการที่ปลอดภัยมากกว่า เช่น บางปฏิกิริยาก็ไม่ใช้ตัวทำละลายในการสังเคราะห์สารเลย

6. การออกแบบการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ (Design for Energy Efficiency) ควรออกแบบการใช้พลังงานในขั้นตอนการสังเคราะห์ทางเคมีอย่างมีประสิทธิภาพโดยตระหนักถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจควรลดการใช้เชื้อเพลิง หากเป็นไปได้พิจารณาวิธีการใช้พลังงานที่สามารถควบคุมระดับอุณหภูมิและความดันให้เป็นปกติได้ กล่าวคือ สามารถใช้ความดัน ณ สภาวะปกติและความร้อนที่อุณหภูมิห้องได้ หรือใช้อุณหภูมิห้อง แต่ใช้ความดันสูง ก็จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาเคมีบางชนิดได้

7. การใช้วัตถุดิบหรือสารที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Use

of Renewable Feedstocks) วัตถุดิบหรือสารที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีควรเป็นสารที่สามารถนำมาใช้ใหม่ได้อีก ซึ่งรวมถึงวัตถุดิบหรือสารที่เหลือใช้หรือทิ้งจากกระบวนการอื่นๆ ทั้งนี้ผู้ใช้ควรพิจารณาเลือกสารที่มาจากแหล่งผลิตทดแทนได้อย่างต่อเนื่องโดยพิจารณาความเป็นไปได้ทั้งทางเทคนิคการใช้สารและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ประกอบกัน

8. ลดการทำสารอนุพันธ์ (Reduce Derivatives) คือ การลดการสังเคราะห์สารอนุพันธ์ที่ไม่จำเป็น เช่น การใส่หมู่ป้องกัน (Blocking Group) โดยการใส่หมู่ป้องกันและการนำหมู่ป้องกันออกในขั้นตอนการสังเคราะห์สารเคมี (Protection/Deprotection) อาจเกิดสารที่เป็นของเสียขึ้นมาได้

9. การเร่งปฏิกิริยา (Catalysis) ในการสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ควรใช้สารทำปฏิกิริยาแบบเร่งปฏิกิริยาที่มีความเฉพาะเจาะจงสูง ซึ่งจะมีประสิทธิภาพดีกว่าปฏิกิริยาแบบเดียวกันที่มีการใช้สารตั้งต้นในปริมาณมากแบบปริมาณสัมพันธ์ (Stoichiometric Reagent) ซึ่งจะให้ของเสียในปริมาณที่มาก

10. การออกแบบผลิตภัณฑ์ทางเคมีที่สลายได้ (Design for Degradation) ควรออกแบบให้ผลิตภัณฑ์เมื่อถูกย่อยสลายแล้วไม่มีการตกค้างหรือสะสมในสิ่งแวดล้อมหรือสลายตัวไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นพิษ ซึ่งขึ้นอยู่กับขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างทางเคมีของผลิตภัณฑ์นั้นด้วย

11. การตรวจวิเคราะห์ติดตามผลอย่างต่อเนื่องเพื่อป้องกันหรือควบคุมการเกิดมลภาวะตลอดเวลา (Real-time Analysis for Pollution Prevention) คือการพัฒนาขั้นตอนการตรวจสอบหรือวิธีวิเคราะห์แบบเรียลไทม์เพื่อติดตามว่าระหว่างกระบวนการทางเคมีตั้งแต่เริ่มต้น ระหว่างกระบวนการและได้ผลิตภัณฑ์ออกมา ตลอดจนการใช้ผลิตภัณฑ์จนหมดอายุการใช้งานนั้นทำให้เกิดมลภาวะหรือเป็นเหตุให้มีสารซึ่งเป็นอันตรายเกิดขึ้นหรือไม่ โดยกำกับดูแล

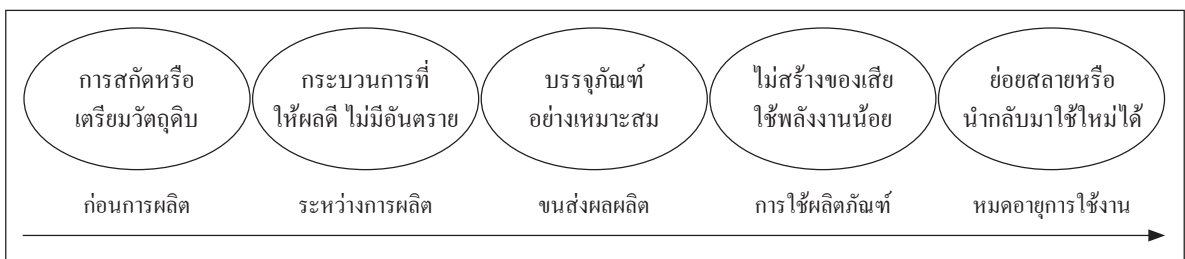
หรือประเมินทุกระยะ เพื่อปรับเปลี่ยนแก้ไขได้ทันทีก่อนเกิดอันตรายหรือมลภาวะ (ภาพที่ 2) (Doble & Kruthiventi, 2007)

12. คุณสมบัติด้านความปลอดภัยของสารและรูปแบบของสารที่ใช้ในกระบวนการทางเคมีเพื่อลดหรือป้องกันการเกิดอุบัติเหตุ (Inherently Safer Chemistry for Accident Prevention) สารที่ใช้ในกระบวนการทางเคมีควรเลือกชนิดและสถานะของสารให้เหมาะสมเพื่อลดอุบัติเหตุทางเคมีที่อาจเกิดขึ้นได้ เช่น การรั่วไหล (Releases) การระเบิด (Explosions) และการลุกไหม้ จึงควรเลือกใช้สารเคมีที่มีความปลอดภัยสูงและควรฝึกป้องกันและแก้ไขสถานการณ์ที่เป็นเหตุให้เกิดอุบัติเหตุได้

หลักการพื้นฐาน 12 ข้อนี้นี้มีแนวคิดสำคัญ คือ การทำให้กระบวนการและผลิตภัณฑ์ที่ได้เกิดผลกระทบต่อมนุษย์และสร้างสารพิษสู่ธรรมชาติให้น้อยที่สุด โดยใช้การออกแบบกระบวนการผลิตทางเคมีที่มีประสิทธิภาพ ใช้วัตถุดิบสารเคมีตัวเร่งปฏิกิริยาตัวทำละลายและพลังงานอย่างคุ้มค่าเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ดังการนำเอาหลักการทั้ง 12 ข้อมารวมเป็นคำได้ว่า “PRODUCTIVELY” ซึ่งหมายถึง “ก่อให้เกิดผลอย่างมีประสิทธิภาพ” ตามภาพที่ 3 (วินูลย์, 2554)

**แนวโน้มการนำแนวคิดเคมีสีเขียวมาประยุกต์ใช้ในการเรียนการสอนและงานวิจัยทดลอง**

Andraos and Dicks (2012) ได้รวบรวมเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำแนวคิดเคมีสีเขียวไปใช้ใน Journal of Chemical Education (JCE) พบว่า แนวโน้มการตีพิมพ์เอกสารและงานวิจัยสูงขึ้น โดยพบเอกสารและงานวิจัยกว่า 110 ฉบับ ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2004 – 31 ธันวาคม 2011 มีการตีพิมพ์เอกสารอย่างน้อย 1 ฉบับต่อเดือน ซึ่งเอกสารส่วนใหญ่นำเสนอประเด็นเรื่องการเข้าถึงแหล่งข้อมูลในการศึกษาแนวคิดเคมีสีเขียว แนวทางการปฏิบัติที่นำแนวคิดและหลักการพื้นฐานไปใช้ การนำแนวคิดสู่การปฏิบัติที่ประสบความสำเร็จ



ภาพที่ 2 การประเมินผลิตภัณฑ์ตลอดวงจรการใช้งาน (Life-Cycle Assessment)

สำเร็จ การใช้เทคนิคการสอนที่ประสบผลสำเร็จตามแนวคิด และแนวทางปฏิบัติเคมีสีเขียว และความท้าทายในการ ประยุกต์แนวคิดเคมีสีเขียวกับการสอนวิชาเคมีในระดับ มัธยมศึกษาตอนปลาย ซึ่งมีลักษณะของแนวโน้มตลอดระยะเวลา 17 ปี แสดงดังภาพที่ 4 (Andraos, 2012)

ตัวอย่างเอกสารการตีพิมพ์ที่ประยุกต์ใช้แนวคิดเคมีสีเขียวในการวิจัยทดลองในห้องปฏิบัติการและการประยุกต์ใช้ อุตสาหกรรมการผลิตตามการศึกษารวบรวมโดยสืบย้อนไปใน ช่วงปลายศตวรรษที่ 19 –ต้นศตวรรษที่ 21ของ Andraos and Dicks (2012) และ Wardencki et al. (2005) ปรากฏตัวอย่างตาม ตารางที่ 1

P	Prevent wastes	(ข้อที่ 1)
R	Renewable materials	(ข้อที่ 7)
O	Omit derivatization steps	(ข้อที่ 8)
D	Degradable chemical products	(ข้อที่ 10)
U	Use safe synthetic methods	(ข้อที่ 3)
C	Catalytic reagents	(ข้อที่ 9)
T	Temperature, pressure ambient	(ข้อที่ 6)
I	In-process monitoring	(ข้อที่ 11)
V	Very few auxiliary substances	(ข้อที่ 5)
E	E-factor, maximize feed in product	(ข้อที่ 2)
L	Low toxicity of chemical products	(ข้อที่ 4)
Y	Yes, it is safe	(ข้อที่ 12)

ภาพที่ 3 สรุปหลักการพื้นฐาน 12 ข้อของเคมีสีเขียว

**สถานการณ์การนำแนวคิดเคมีสีเขียวมาใช้ในการเรียนการสอน**

ปัจจุบันการนำแนวคิดเคมีสีเขียวไปประยุกต์ใช้ในการ สอนยังคงมีความเข้าใจที่คลาดเคลื่อน ในส่วนเนื้อหาที่ สอดคล้องกับวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (Environmental Science) เนื่องจากแนวคิดเคมีสีเขียวเน้นมีการควบคุม กระบวนการทางเคมีที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม หรือสร้างของเสีย ยึดหลักการลดการใช้สารเคมี เลือกใช้สาร หรือวัตถุดิบที่น่ากลับมาใช้ใหม่ นอกจากนี้การสอนในระดับ มัธยมศึกษาผู้เรียนได้เรียนวิชาเคมีในชั้นพื้นฐาน ใช้เวลาเรียน ในห้องเรียนผ่านการบรรยายเป็นส่วนใหญ่และการปฏิบัติการ ทดลองนั้นได้เรียนรู้ตามคู่มือหรือแบบเรียนที่กำหนด ดังนั้น การสอนโดยแทรกแนวคิดเคมีสีเขียวอาจทำได้ในขั้นตอนการ กำจัดสารเมื่อเสร็จสิ้นการทดลองซึ่งให้นักเรียนรู้จักวิธีแยก หรือบำบัดสารก่อน ไม่ทิ้งสารรวมกันอย่างไม่คำนึงถึงผลที่เกิด ตามมา หรืออาจสอดแทรกแนวคิดเคมีสีเขียวง่ายๆ หนึ่งหรือ สองแนวคิดแก่ผู้เรียน เช่น การใช้น้ำเป็นตัวทำละลายหรือการ ใช้อุณหภูมิและความดันปกติ เป็นต้น

การนำแนวคิดเคมีสีเขียวมาสู่กระบวนการจัดการเรียน การสอนนั้น หัวใจสำคัญอยู่ที่การฝึกปฏิบัติให้นักเคมีรุ่นใหม่ นอกจากจะมีความรู้และทักษะทางเคมีแล้วจะต้องตระหนักรู้ ถึงความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยยึดหลักการพื้นฐานตาม แนวคิดเคมีสีเขียว การจัดการศึกษาจึงเป็นเครื่องมือสำคัญที่ ทำให้แนวคิดนี้แพร่ขยายออกไปสู่นักเคมีและผู้เกี่ยวข้องรุ่น ใหม่ๆ Wardencki et al. (2005) เสนอแนะให้มีการสร้างความ เข้าใจแนวคิดหรือหลักการพื้นฐานในระดับมัธยมศึกษา โดยให้ ผู้เรียนรู้จักการสังเคราะห์สารประกอบอินทรีย์และใช้เทคนิค การวิเคราะห์ข้อมูลทางเคมีรูปแบบใหม่ พร้อมทั้งเปิดโอกาส ให้ผู้เรียนได้มีส่วนร่วมในการประเมินการก่อให้เกิดของเสีย



ภาพที่ 4 ค่าเฉลี่ยจำนวนการตีพิมพ์เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการเรียนการสอนเคมีสีเขียวต่อปีตั้งแต่ ค.ศ.1995 – 2011

**ตารางที่ 1** ตัวอย่างการนำแนวคิดเคมีสีเขียวไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยทดลองและอุตสาหกรรม

ลำดับที่	หลักการพื้นฐาน	ตัวอย่าง
1	การป้องกันการเกิดของเสีย (Prevention)	การเตรียมสารโดยปราศจากตัวทำละลายหรือใช้ในปริมาณน้อย (NamieŚnik & Wardencki, 2000)
2	การใช้สารเคมีทุกอะตอมให้คุ้มค่า (Atom Economy)	การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดของแข็งสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันของกรดคาร์บอกซิลิก
3	กระบวนการสังเคราะห์ที่เป็นพิษน้อย (Less Hazardous Chemical Syntheses)	การสังเคราะห์กรดอะดิปิก (Adipic Acid Synthesis) โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันของไซโคลเฮกซีนและไซโซโครเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วย (Sato, Aoki, & Noyori, 1998)
4	ออกแบบสารเคมีที่ปลอดภัย (Designing Safer Chemicals)	การสังเคราะห์ยูเรียจากแอมโมเนียมไซยาเนตโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (Wöhler, 1828)
5	การเลือกใช้ตัวทำละลายและตัวช่วยในปฏิกิริยาที่ปลอดภัย (Safer Solvents and Auxiliaries)	- การแยกสลายซิลเวอร์เฮไลด์โดยวิธีกล (Lea, 1892) - การเกิดและการใช้อิออนิกลิควิด (Walden, 1914)
6	การออกแบบการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ (Design for Energy Efficiency)	- การสังเคราะห์พอลิโพลีเอทิลีนโดยใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ (Romano & Garbassi, 2000) - โซโนเคมี – การเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูง (Richards & Loomis, 1927)
7	การใช้วัตถุดิบหรือสารป้อนที่น่ากลับมาใช้ใหม่ได้ (Use of Renewable Feed stocks)	- ผลิตภัณฑ์ของสารลดแรงตึงผิว (Nicolas, Benvegna, & Plusquellec, 2002) - การสังเคราะห์เฟอร์ฟูรัลและกรดลิวลินิก จากซังข้าวโพดและน้ำตาลทราย (Adams & Voorhees, 1921)
8	ลดการสร้างสารอนุพันธ์ (Reduce Derivatives)	การเตรียมสารโดยการทำให้เกิดสารอนุพันธ์โดยใช้ไฟเบอร์กับการทำให้เกิดสารอนุพันธ์ในสารละลาย (Stashenko, Puertas, Salga, Delgado, & Martinez, 2000)
9	การเร่งปฏิกิริยา (Catalysis)	- การสังเคราะห์ <i>b</i> -enaminones จากสารประกอบของ 1,3-dicarbonyl และเอมีน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะทองคำ Au(III) (Acadi, Bianchi, Giuseppe, & Marinelli, 2003) - การใช้วิตามิน บี 1 (ไทอะมีน) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาคอนเดนเซชัน (Breslow, 1958)
10	การออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ (Design for Degradation)	การสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ (Biodegradable Polymers) (Scott, 2000)
11	การตรวจวิเคราะห์ติดตามผลเพื่อป้องกันการเกิดมลภาวะตลอดเวลา (Real-time Analysis for Pollution Prevention)	การใช้ in-line analyzers ในการสังเกตการณ์น้ำเสีย
12	การป้องกันการเกิดอุบัติเหตุ (Inherently Safer Chemistry for Accident Prevention)	การใช้ไมมิลคาร์บอนเนต (ซึ่งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม) แทนเมทิลเฮไลด์ในปฏิกิริยามทิลเลชัน (Tundo, Selva, & Memoli, 2000)

ในแต่ละขั้นตอนการสังเคราะห์ อันจะส่งผลให้เกิดนักเรียนรุ่นใหม่ที่ตระหนักต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นผู้สอนจึงมีบทบาทสำคัญในการกำหนดแนวทางการเรียนรู้ของผู้เรียนผ่านการออกแบบหลักสูตร โดยให้เกิดการเรียนรู้สู่การพัฒนาที่ยั่งยืนต่อไป การนำแนวคิดเคมีสีเขียวสู่การเรียนการสอนนั้นพบว่าส่วนใหญ่ มักจะเป็นการเรียนการสอนในระดับสูง (Higher Education) หรือระดับอุดมศึกษา โดยพบในสาขาวิชาเคมีอินทรีย์ (Organic Chemistry) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาเคมีที่ศึกษาซึ่งเป็นประโยชน์ในการศึกษาด้านต่างๆ เช่น ทางด้านเภสัชศาสตร์ เป็นต้น (Andraos, 2012) นอกจากนี้เคมีสีเขียวยังเป็นศาสตร์ที่สอดคล้องกับอนินทรีย์เคมี (Inorganic Chemistry) เคมีชีวภาพ (Chemical Biology) ชีวเคมี (Biochemistry) เคมีวิเคราะห์ (Analytical Chemistry) รวมทั้งเคมีฟิสิกส์ (Physical Chemistry) (วิบูลย์, 2554; Andraos, 2012)

### **ปัญหาและอุปสรรคที่พบในการนำเคมีสีเขียวสู่การจัดการเรียนการสอน**

ปัญหาและอุปสรรคที่พบในการนำเคมีสีเขียวสู่การจัดการเรียนการสอนในระดับอุดมศึกษา ประกอบด้วย 4 ประเด็นหลัก ดังนี้

1. การขาดฐานข้อมูลเบื้องต้นแก่ผู้สอนหรือผู้เรียนในการนำแนวคิดเคมีสีเขียวไปใช้ (Andros & Sayed, 2007; Laird, 2012) ในที่นี้หมายถึงการขาดแหล่งอ้างอิงมาตรฐานในการนำแนวคิดนี้ไปใช้งานได้จริง
2. ตำราเรียนที่ใช้ในการเรียนการสอนไม่ได้นำแนวคิดเคมีสีเขียวเข้าไปสอดแทรกในการอธิบายการสังเคราะห์ทางเคมีอย่างชัดเจนหรืออธิบายเป็นหัวข้อหลักให้ผู้เรียนได้เรียนรู้และตระหนักถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ส่วนใหญ่มักเน้นผลลัพธ์จากการสังเคราะห์โดยไม่คำนึงถึงผลกระทบต่อจากปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้น (Andraos, 2012)
3. หลักสูตรระดับปริญญาบัณฑิต ยังไม่ได้บรรจุแนวคิดเคมีสีเขียวไว้อย่างชัดเจนเพื่อให้เกิดการเรียนการสอนที่มีความหมายกับผู้เรียน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับหลักสูตรหรือพัฒนาหลักสูตร ซึ่งองค์ประกอบหนึ่งในการพัฒนาหลักสูตร คือ การออกแบบกระบวนการเรียนการสอนที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งควรต้องคำนึงถึงปัจจัย 4 ประการ ดังต่อไปนี้
  - 1) การออกแบบรายวิชา เมื่อผู้สอนมีความประสงค์จะนำเนื้อหาเคมีสีเขียวบรรจุในหลักสูตรปริญญาบัณฑิต สิ่งหนึ่งที่ต้องคำนึงถึง คือ การสร้างเป็นรายวิชาใหม่ หรือการบูรณาการความรู้ร่วมกับรายวิชาเดิมที่มีอยู่แล้ว จากการศึกษาของ

Andraos (2012) พบว่าการออกแบบหลักสูตรทั้งสองรูปแบบนั้นสามารถนำไปปฏิบัติได้โดยพบข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันไป นั่นคือการสร้างเป็นรายวิชาใหม่สามารถกำหนดชื่อรายวิชาเพื่อกระตุ้นความสนใจของผู้เรียนได้ โดยใช้สถานการณ์สิ่งแวดล้อมและความยั่งยืนเป็นประเด็นหลักสามารถนำสถานการณ์ปัจจุบันเป็นกรณีศึกษาซึ่งจะทำให้ผู้เรียนพัฒนาแนวความคิดและแนวทางปฏิบัติเพื่อแก้ปัญหาทำให้เกิดกระบวนการเรียนรู้ที่มีประสิทธิภาพ นอกจากนี้การสร้างเป็นรายวิชาใหม่นั้นจะทำให้ผู้เรียนสามารถลงมือปฏิบัติได้อย่างเต็มที่ทำให้พัฒนาทักษะการวิเคราะห์ การสังเคราะห์ โดยยึดหลักการพื้นฐาน 12 ข้อ เกิดความเข้าใจและตัดสินใจเลือกใช้แนวทางในการป้องกันการเกิดสารพิษได้มากกว่าหนึ่งแนวทางได้ ในทางกลับกันข้อด้อยที่ปรากฏคือ เนื่องจากเป็นรายวิชาที่สร้างขึ้นใหม่ดังนั้นอาจต้องเป็นรายวิชาเลือกเสรีให้กับผู้เรียน โดยอาจกระทบกับจำนวนหน่วยกิตที่มากขึ้นของผู้เรียน นอกจากนี้ผู้สอนจำเป็นต้องออกแบบวิธีวัดและสร้างเกณฑ์ประเมินที่ครอบคลุม เนื่องจากผลการเรียนรู้ของผู้เรียนเป็นแนวคิดและแนวทางปฏิบัติที่ไม่มีคำตอบที่ตายตัวและถูกต้องที่สุดแต่เป็นลักษณะคำตอบที่ดีที่สุด ส่วนการบูรณาการแนวคิดเคมีสีเขียวร่วมกับรายวิชาอื่น ช่วยให้ประหยัดเวลาและจำนวนหน่วยกิตของผู้เรียน โดยที่ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม ผู้เรียนได้รับประสบการณ์ทั้งการเรียนแบบบรรยายและปฏิบัติ โดยไม่จำเป็นต้องมีตำรา แบบเรียนเพิ่มเติม แต่อย่างไรก็ตามจำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้สอนต้องออกแบบการเรียนการสอนให้มีความกลมกลืนไม่ตัดแบ่งสาระพื้นฐานที่ผู้เรียนต้องเรียนออกในขณะที่เดียวกันอาจขาดความพร้อมของเครื่องมือ สื่อ อุปกรณ์ และสารเคมี นั่นคืออาจต้องมีการจัดซื้อวัสดุอุปกรณ์ ตลอดจนจัดจ้างบุคลากรเพื่อให้เกิดการดำเนินการสอนต่อไปได้อย่างราบรื่น

2) การใช้สถานการณ์จริงเป็นกรณีศึกษาการสอนโดยการใช้กรณีศึกษาที่เป็นสถานการณ์ปัจจุบัน นับเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสู่ความสำเร็จของการจัดกระบวนการเรียนรู้ Cann (1999) และ Marteel-Parrish (2007) ได้ยกตัวอย่างสถานการณ์ที่เป็นความสนใจ เช่น งานประกาศรางวัล The United States Presidential Green Chemistry Challenge Award ซึ่งประกอบไปด้วยรางวัล 5 สาขา ได้แก่ การสังเคราะห์ทางเคมีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (The Greener Synthetic Pathways Award) สภาวะของปฏิกิริยาเคมีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (The Greener Reaction Conditions Award) การออกแบบผลิตภัณฑ์เคมีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (The Designing Greener

Chemicals Award) ธุรกิจขนาดเล็ก (The Small Business Award) และด้านวิชาการ (The Academic Award) โดยปรากฏว่างานวิจัยที่ได้รับรางวัลเป็นผลงานของนักศึกษาในระดับปริญญาบัณฑิต โดยผลงานเหล่านั้นเป็นแหล่งข้อมูลที่เหมาะสมสำหรับผู้เรียนและผู้สอน เนื่องจากสถานการณ์และภาษาที่ใช้ในรายงานผลวิจัย เป็นสถานการณ์ที่สามารถศึกษาและทำความเข้าใจได้ง่าย ผู้สอนสามารถนำมาเป็นตัวอย่างในการศึกษาหรือต่อยอดการศึกษาได้ ผลผลิตที่เกิดจากงานวิจัยที่ได้รับรางวัลไม่เพียงเป็นที่รู้จักมากขึ้น ยังเป็นการกระตุ้นให้เกิดความสนใจและให้ความสำคัญกับแนวคิดเคมีสีเขียวส่งผลให้เกิดการตีพิมพ์บทความวิชาการและบทความวิจัยในวารสารหรือเอกสารปริทรรศน์ทั้งในระดับชาติและนานาชาติเพื่อให้ผู้เรียนได้ค้นคว้าเพิ่มขึ้นต่อไปอีกด้วย (Cann, 1999; Marteel-Parrish, 2007)

3) การวัดและประเมินเชิงปริมาณควบคู่กับเชิงคุณภาพ แนวคิดเคมีสีเขียวมีเนื้อหาที่เป็นข้อมูลเชิงคุณภาพมากกว่าเชิงปริมาณ แต่เดิมผู้สอนใช้วิธีการสอนแบบบรรยายและสาธิต ต่อมาเพื่อให้การวัดและการประเมินความรู้ ความเข้าใจมีความเป็นปรนัยมากขึ้น ผู้สอนจำเป็นต้องเปลี่ยนวิธีการสอนและกำหนดลักษณะผลงานให้เป็นเชิงการวิเคราะห์เพื่อตัดสินใจ โดยใช้ข้อมูลเชิงปริมาณเป็นฐาน การมอบหมายงานควรเป็นการเขียนเชิงวิพากษ์ และวิเคราะห์แบบแผนการสังเคราะห์ทางเคมีให้สอดคล้องกับหลักการความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและความยั่งยืน โดยเลือกใช้หลักการพื้นฐาน 12 ข้อเป็นแนวทางปฏิบัติหลัก ตัวอย่างผลงานที่ผู้เรียนจะได้รับมอบหมาย เช่น การให้ผู้เรียนเขียนประเมินผลการสังเคราะห์ทางเคมีโดยเลือกสารประกอบจากรายการที่กำหนดให้ พร้อมทั้งเชื่อมโยงทฤษฎีและอธิบายขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการสังเคราะห์ นั่นคือผู้เรียนจะได้รับการฝึกทักษะการตัดสินใจโดยประยุกต์ใช้เกณฑ์ต่างๆ ในการเลือกใช้สารเคมี ตลอดจนปฏิกิริยาที่ยอมรับได้ว่าไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ปฏิกิริยาที่ได้อาจไม่ใช่ปฏิกิริยาที่ดีที่สุดในการสังเคราะห์สารที่ต้องการ ซึ่งได้มาจากกระบวนการที่ถูกต้องที่สุด ผู้เรียนจึงมีโอกาพัฒนาหรือค้นคว้าหาวิธีการสังเคราะห์ประกอบกับการเลือกสารตั้งต้นในปฏิกิริยาที่ให้ผลการสังเคราะห์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

4) ความพร้อมของแหล่งเรียนรู้ Andraos and Dicks รายงานว่ากระบวนการเรียนรู้ของผู้เรียนจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์และมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อเรียนรู้ผ่านการทดลองในห้องปฏิบัติการทางเคมี Martin, Schmidt, and Soniat (2011)

รายงานว่าการเรียนรู้ของผู้เรียนผ่านการทดลองนั้นถึงแม้ว่าจะสามารถลดและกำจัดของเสียจากการสังเคราะห์ได้จำนวนมาก แต่แนวทางการปฏิบัติเพื่อความปลอดภัยและความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมยังไม่มีการนำเสนอมากเท่าที่ควร ดังนั้นหากนำแนวคิดเคมีสีเขียวสอดแทรกในขั้นตอนการปฏิบัติการทางเคมี ผู้เรียนจะได้รับประสบการณ์ที่เป็นประโยชน์ได้มากกว่า (Martin et al., 2011) ตามที่ Kitchens et al. (2006) รายงานว่า นักศึกษาเคมีจำนวนหนึ่งมีความเห็นว่าการนำแนวคิดดังกล่าวเข้ามาเป็นส่วนสำคัญในการสอนในห้องปฏิบัติการทางเคมีมีความสำคัญอย่างมาก อีกทั้งนักศึกษาเหล่านั้นยังตระหนักถึงการแสดงความรับผิดชอบต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย (Kitchens et al., 2006) ตัวอย่างการเรียนรู้ของผู้เรียนตามแนวคิดเคมีสีเขียวที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีในห้องปฏิบัติการ เช่น ผู้สอนอาจให้ผู้เรียนคัดเลือกตัวทำละลายที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในปฏิกิริยาเคมีบางชนิดตามข้อมูล อุปกรณ์และสารเคมีที่ผู้เรียนมีอยู่ เป็นต้น

4. การออกแบบหน่วยการเรียนรู้ ผู้สอนสามารถนำแนวคิดเคมีสีเขียวสอดแทรกในรายวิชาที่เป็นพื้นฐาน (Introductory Course) แล้วออกแบบกิจกรรมในชั้นเรียนและในห้องปฏิบัติการ โดยอาศัยหลักการความคุ้มค่าของสารเคมีทุกอะตอม (Atom Economy) ออกแบบปฏิกิริยาและวางแผนให้สารเคมีที่เกี่ยวข้องได้มีส่วนในการเกิดปฏิกิริยาให้มากที่สุด ในทุกขั้นตอนของปฏิกิริยาจนกระทั่งได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

สำหรับหลักสูตรระดับมัธยมศึกษาในประเทศไทยยังไม่ปรากฏว่ามี การบรรจุแนวคิดเคมีสีเขียวไว้ชัดเจน ปัจจุบันการจัดการเรียนการสอนระดับมัธยมศึกษาโดยเฉพาะในรายวิชาวิทยาศาสตร์ ยังปรากฏการนำแนวคิดนี้มาใช้บ้าง โดยตัวอย่างที่พบได้ชัดเจน คือ โครงการ “ห้องเรียนเคมีดาว” (DOW Chemistry Class) เป็นโครงการที่นำปฏิบัติการเคมีแบบย่อส่วนมาใช้ในการเรียนการสอนในโรงเรียนเพื่อส่งเสริมให้นักเรียนได้เกิดการเรียนรู้อย่างมีความหมายและมีประสิทธิภาพในการเรียนวิทยาศาสตร์ อีกทั้งสร้างแรงจูงใจในการเรียนได้เป็นอย่างดี โดยโครงการนี้เป็นความร่วมมือระหว่างกลุ่มบริษัทดาว เคมีคอล ประเทศไทยกับสมาคมเคมีแห่งประเทศไทยในพระอุปถัมภ์ของ ศาสตราจารย์ ดร.สมเด็จพระเจ้าลูกเธอเจ้าฟ้าจุฬาภรณวลัยลักษณ์ อัครราชกุมารี โดยปฏิบัติการเคมีแบบย่อส่วนนั้นจะเน้นการให้ครูและนักเรียนได้รู้จักการใช้อุปกรณ์ขนาดเล็กที่สามารถหาได้ง่าย และการใช้เทคนิคต่างๆ ด้วยแนวคิดเคมีสีเขียว คือ การใช้สารเคมีในปริมาณน้อยในการทำปฏิบัติการซึ่งจะเป็นการลดโอกาสการ



เกิดพิษหรืออันตรายจากสารเคมีที่ใช้หรือของเสียที่เกิดขึ้น อีกทั้งปฏิกริยาที่ทำได้ยาก ใช้สารเคมีที่เป็นอันตรายมากๆ หรือต้องใช้อุปกรณ์ที่สลับซับซ้อน พบว่าการใช้ปฏิบัติการเคมีแบบย่อส่วนสามารถแก้ปัญหานี้ได้เป็นอย่างดีและยังทำให้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย โดยโครงการนี้ได้เริ่มดำเนินการตั้งแต่เมื่อปี พ.ศ. 2556 จนถึงปัจจุบัน ซึ่งเริ่มต้นจากโรงเรียนในระดับมัธยมศึกษา จ.ระยอง จำนวน 21 โรงเรียน และจะขยายต่อไป ในโรงเรียนทั่วภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคอื่นๆ ของประเทศต่อไป (ชิงชัย, 2557) นอกจากนี้งานวิจัยของศักดิ์ศรี (2556) ซึ่งรายงานการใช้ชุดปฏิบัติการเคมีแบบย่อส่วนที่สร้างขึ้นในการเสริมทักษะการสืบเสาะทางวิทยาศาสตร์และความเข้าใจเชิงนิเวศสำหรับนักเรียนมัธยมศึกษาตอนปลาย โดยนำเสนอชุดปฏิบัติการเคมีแบบย่อส่วนจำนวน 4 ชุด คือ ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกริยาเคมีจากสารในชีวิตประจำวัน กรด-เบสในชีวิตประจำวัน การทดสอบโปรตีน คาร์โบไฮเดรตและไขมันในอาหารพื้นบ้าน และการทดสอบหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบคาร์บอนในชีวิตประจำวัน ซึ่งเป็นแนวทางให้ครูวิทยาศาสตร์สามารถที่จะนำแนวทางหรือปฏิบัติการเคมีแบบย่อส่วนมาประยุกต์ใช้ในการจัดการเรียนการสอนของตนเองเพื่อพัฒนาและส่งเสริมพฤติกรรมการเรียนรู้ของผู้เรียนทั้งสามด้าน ได้แก่ พุทธิพิสัย ทักษะพิสัยและจิตพิสัย ดังนั้นแนวคิดเคมีสีเขียวยังคงไม่ได้มีการบรรจุลงในหลักสูตรการศึกษาขั้นพื้นฐานของไทยอย่างชัดเจน ซึ่งถ้าครู นักการศึกษา ผู้บริหาร โรงเรียน ตลอดจนผู้เกี่ยวข้องในวงการศึกษามองเห็นความสำคัญและตระหนักถึงแนวคิดเคมีสีเขียวนี้ ดังนั้นการนำแนวคิดดังกล่าวสู่หลักสูตรการศึกษาอย่างเป็นรูปธรรมก็จะสำเร็จได้ซึ่งจะทำให้ผู้สอนสามารถออกแบบการเรียนการสอนให้สามารถพัฒนาและส่งเสริมพฤติกรรมการเรียนรู้ที่ดีกับนักเรียนได้ดียิ่งขึ้น และนอกจากนี้แนวคิดเคมีสีเขียวยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังทำให้ผู้เรียนเกิดความตระหนักในคุณค่าของสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

## บทสรุป

การนำแนวคิดเคมีสีเขียวสู่ระดับการศึกษาก่อให้เกิดประโยชน์ต่อผู้เรียนหลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งต่อการพัฒนาการเรียนรู้และทักษะปฏิบัติของผู้เรียน ผู้เรียนเกิดการคิดวิเคราะห์ และได้ร่วมวิพากษ์เกี่ยวกับการสังเคราะห์ทางเคมีสามารถประเมินถึงอันตราย และผลเสียของกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีนั้น อีกทั้งสามารถระบุวิธีการป้องกันหรือ

แก้ไขอันตรายนั้นๆ โดยใช้แนวคิดเคมีสีเขียวได้

นอกจากผู้สอนจะออกแบบกระบวนการจัดการเรียนรู้ที่สอดคล้องแนวคิดเคมีสีเขียวควบคู่กับการฝึกทักษะ และการสร้างมโนทัศน์พื้นฐานให้กับนักเรียนรุ่นใหม่แล้ว สิ่งที่ต้องระมัดระวังและควรมีการพัฒนาต่อไปในการออกแบบการจัดการเรียนรู้ คือ ผู้สอนต้องตระหนักถึงการใช้อย่างปลอดภัยที่นำเชื่อถือในการประยุกต์แนวคิด และวิธีการที่หลากหลายในกระบวนการทางเคมีที่พบในงานวิจัยที่เผยแพร่ในวารสารวิชาการต่างๆ เพื่อนำมาบูรณาการในการเรียนการสอน เช่น ผู้สอนมักจะนำประเด็นการวิจัยที่นำเสนอในวารสารวิชาการมาเป็นตัวอย่างในการเรียนการสอน โดยการสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ใหม่ในทางเคมีมักจะนำหลักการเคมีสีเขียวมาประยุกต์เพียงแนวทางปฏิบัติเดียว มากกว่าเลือกประยุกต์หลายแนวทางปฏิบัติเข้าด้วยกัน ดังนั้นการนำแนวคิดเคมีสีเขียวสู่ระดับการศึกษา ส่วนใหญ่จะพบในระดับอุดมศึกษา โดยบางรายวิชาการจัดการเรียนการสอนโดยสอดคล้องแนวคิดเคมีสีเขียว แต่ก็ปรากฏข้อจำกัดบางประการ เช่น การขาดแหล่งข้อมูลที่นำเชื่อถือในการอ้างอิง เช่น หนังสือหรือเอกสารประกอบการสอน ความพร้อมของแหล่งเรียนรู้ เป็นต้น สำหรับหลักสูตรระดับมัธยมศึกษา บางประเทศ เช่น ประเทศสหรัฐอเมริกา มีการพัฒนาหลักสูตรเคมีสีเขียวขึ้นมาสำหรับการเรียนการสอนระดับ K-12 โดยมีการอบรมและติดตามผลการฝึกอบรมผู้สอนในการนำเคมีสีเขียวสู่การจัดการเรียนการสอน สำหรับประเทศไทยนั้นยังไม่พบการนำแนวคิดเคมีสีเขียวบรรจุในหลักสูตรอย่างชัดเจน แต่จะพบในลักษณะการจัดเป็นกิจกรรมโครงการต่างๆ อาทิ โครงการเยาวชนเรียนรู้เคมีสีเขียว ซึ่งเป็นความร่วมมือของบริษัทฟลูโอคาร์ลอร์โธ 123 กับสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ หรือโครงการห้องเรียนเคมีดาวซึ่งเป็นโครงการที่นำปฏิบัติการเคมีแบบย่อส่วนมาใช้ในการเรียนการสอนใน โรงเรียนเพื่อส่งเสริมให้นักเรียนได้เกิดการเรียนรู้ที่มีประสิทธิภาพและสามารถสร้างแรงจูงใจในการเรียน โดยโครงการนี้ได้เริ่มฝึกอบรมครูผู้สอนระดับมัธยมศึกษาในเขตจังหวัดระยองเกี่ยวกับปฏิบัติการเคมีแบบย่อส่วนเพื่อนำความรู้และทักษะที่ได้ไปออกแบบการจัดการเรียนการสอนในห้องเรียน โดยการติดตามประเมินผลการปฏิบัติ ซึ่งโครงการนี้เป็นความร่วมมือระหว่างกลุ่มบริษัทดาว เคมีคอล ประเทศไทยกับสมาคมเคมีแห่งประเทศไทยในพระอุปถัมภ์ของ ศาสตราจารย์ ดร.สมเด็จพระเจ้าลูกเธอเจ้าฟ้าจุฬาภรณวลัยลักษณ์ อัครราชกุมารี และยังพบงานวิจัยที่แสดงให้เห็นประจักษ์ว่า การนำชุดปฏิบัติการเคมีแบบย่อส่วนมาใช้ใน

การจัดการเรียนการสอนของครูสามารถส่งเสริมพฤติกรรมการเรียนรู้ของนักเรียนได้เป็นอย่างดี เป็นต้น

## เอกสารอ้างอิง

- ชิงชัย เชิดกลิ่น. (2557). ผุดห้องเรียนเคมีดาวในสถานศึกษา สอนเด็กเข้าใจวิทยาศาสตร์มากขึ้น. *เดลินิวส์* (27 สิงหาคม 2557).
- วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ. (2554). เคมีวิเคราะห์สีเขียว. *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*, 20(2), 29–44.
- ศักดิ์ศรี สุภายธ. (2556). ชุดปฏิบัติการเคมีย่อส่วนเพื่อเสริมทักษะการสืบเสาะทางวิทยาศาสตร์และความเข้าใจเชิงมโนมติสำหรับนักเรียนระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย .  
อุบลราชธานี: คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- Acadi, A., Bianchi, G., Di Giuseppe, S., & Marinelli, F. (2003). Gold catalysis in the reaction of 1, 3-dicarbonyls with nucleophiles. *Green Chemistry*, 5(1), 64.
- Adams, R., & Voorhees, V. (1921). Furfural. *Organic Syntheses*, 1, 49–52.
- Andraos, J. (2012). Designing a green organic chemistry lecture course. In A. P. Dicks (Ed.), *Green organic chemistry in lecture and laboratory*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Andraos, J., & Dicks, A. P. (2012). Green chemistry teaching in higher education: A review of effective practices. *Chemistry Education Research and Practices*, 13(2), 69–79.
- Andros, J., & Sayed, M. (2007). On the use of “green” metrics in the undergraduate organic reactions. *Journal of Chemical Education*, 84, 1004–1010.
- Breslow, R. (1958). Mechanism of thiamine action IV. Evidence from studies on model systems. *Journal of the American Chemical Society*, 80, 3719–3726.
- Cann, M. C. (1999). Bringing state-of-the-art, applied, novel, green chemistry to classroom by employing the presidential green chemistry challenge awards. *Journal of Chemical Education*, 76, 1639–1641.
- Doble, M., & Kruthiventi, A. K. (2007). *Green Chemistry & Engineering*. London, UK: Elsevier.
- Kitchens, C., Charney, R., Naistat, D., Farrugia, J., Clarens, A., O’Neil, A., Lisowski, C., & Braun, B. (2006). Completing our education: Green chemistry in the curriculum. *Journal of Chemical Education*, 83(8), 1126–1129.
- Laird, T. (2012). Green chemistry is good process chemistry. *Organic Process Research & Development*, 16, 1–2.
- Lea, M. C. (1892). Disruption of silver halides by mechanical force. *American Journal of Science*, 43, 527–531.
- Marteel-Parrish, A. E. (2007). Toward the greening of our minds: New special topics course. *Journal of Chemical Education*, 84(2), 245–247.
- Martin, C. B., Schmidt, M., & Soniat, M. (2011). A survey of the practices, procedures, and techniques in undergraduate organic chemistry teaching laboratories. *Journal of Chemical Education*, 88, 1630–1638.
- Namieśnik, J., & Wardencki, W. (2000). Use of solvent-less sample preparation techniques in environmental analysis. *Journal of High Resolution of Chromatography*, 23(4), 297–303.
- Nicolas, N., Benvegnu, T., & Plusquellec, D. (2002). Surfactants from renewable resources. *Actualite Chimique Journal*, 70, 11–12.
- Richards, W. T., & Loomis, A. L., (1927). The chemical effects of high frequency sound waves I. A preliminary survey. *Journal of the American Chemical Society*, 49, 3086–3100.
- Romano, U., & Garbassi, F. (2000). The environmental issue: A challenge for new generation polyolefins. *Pure and Applied Chemistry*, 72(7), 1383–1388.
- Sato, K., Aoki, M., & Noyori, R. (1998). A green route to adipic acid: Direct oxidation of cyclohexene with 30 percent hydrogen peroxide. *Science*, 281, 1646–1647.
- Scott, G. (2000). Green polymers. *Polymer Degradation and Stability*, 68(1), 1–7.
- Stashenko, E. E., Puertas, A. M., Salga, W., Delgado, W., & Martinez, J. R. (2000). Solid phase micro extraction with on fibre derivatization applied to the analysis of volatile carbonyl compounds. *Journal of Chromatography A*, 886(1-2), 175–182.
- Tundo, P., Selva, M., & Memoli, S. (2000). Dimethyl carbonate as a green reagent. *ACS Symposium Series*, 767, 87–99.
- Walden, P. (1914). Molecular weights and electrical conductivity of several fused salts. *Bulletin de l’Academie Imperiale des Sciences de Saint-Petersbourg*, 405–422.

- Wardencki, W., Curylo, J., & Namieśnik, J. (2005). Green chemistry – current and future issues. *Polish Journal of Environmental Studies*, 14(4), 389–395.
- Wöhler, F. (1828). Water as the solvent for urea synthesis from ammonium cyanate. *Annals of Physics*, 88, 253–256.
- Praditweangkum, W. (2011). Green chemistry. *Journal of Science Ladkrabang*, 20(2), 29–44. [in Thai]
- Supasorn, S. (2013). *Small-scale chemistry experimental kits to promote scientific inquiry and conceptual understanding for high school students*. Ubon Ratchathani, Thailand: Faculty of Science, Ubon Ratchathani University. [in Thai]

### **Translated Thai References**

- Cherdkrin, C. (2014). Rising star chemistry class in school: Teaching to understand science more. *Daily News* (August 27, 2014). [in Thai]