เคมีวิเคราะห์สีเขียว

Green Analytical Chemistry

วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ

Wiboon Praditweangkum

สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

บทคัดย่อ

ในบทความนี้รวบรวมและนำเสนอเกี่ยวกับแนวคิดของเคมีสีเขียวและแนวทางปฏิบัติของเคมีวิเคราะห์สีเขียว แนวคิดของเคมีสีเขียวประกอบไปด้วยหลักการพื้นฐาน 12 ข้อ ซึ่งเป็นแนวทางสำหรับการคิดวางแผนออกแบบ การพัฒนา และการนำไปปฏิบัติ เพื่อทำให้กระบวนการผลิตทางเคมีลดหรือเลิกการใช้และการผลิตสารที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ส่วนแนวทางปฏิบัติของเคมีวิเคราะห์สีเขียวนั้นมีความสอดคล้องกับแนวคิดของเคมีสีเขียว โดยสามารถพัฒนาวิธีวิเคราะห์ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและการตรวจวัดให้เป็นระบบที่มีขนาดเล็กลง มีการดำเนินงานเป็นแบบอัตโนมัติ และมีความจำเพาะเจาะจงกับสารที่วิเคราะห์ ซึ่งช่วยลดปริมาณการใช้สารตัวอย่าง รีเอเจนต์ และตัวทำละลาย อีกทั้งยังช่วยลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังสามารถพัฒนาวิธีวิเคราะห์ให้มีการลดหรือหลีกเลี่ยงรีเอเจนต์และตัวทำละลายเป็นพิษ เปลี่ยนไปใช้สารที่ไม่เป็นอันตรายแทน และพัฒนาให้มีขั้นตอนการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้นพร้อมไปด้วย

คำสำคัญ: เคมีวิเคราะห์สีเขียว เคมีสีเขียว

Abstract

This article presents the concept of green chemistry and the practical practice of green analytical chemistry. The idea of green chemistry is commonly presented as a set of twelve principles. Green chemistry is the design, development and implementation of chemical products and processes to reduce or eliminate the use and generation of substances hazardous to human health and the environment. The practical practice of green analytical chemistry is directly related to the fundamental

---

E-mail address: kprwiboo@kmitl.ac.th

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

of green chemistry. The special attention is paid to the strategies and the tools available to make sample-pretreatment and measurement step greener. The main principles are to miniaturize, to automate methods and to have the analytical specificity, making it possible to reduce dramatically the amounts of samples, reagents and solvents consumed and wastes generated. The reduction or replacement of toxic reagents and solvents is furthermore considered in method development process. The decontamination or passivation of wastes can be also together intended.

Keywords: Green analytical chemistry, Green chemistry

1. บทนำ

ในยุคปัจจุบันที่นักวิทยาศาสตร์สามารถพัฒนาวิทยาการและเทคโนโลยีได้อย่างรวดเร็ว ทำให้มนุษย์มีสิ่งอำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวันมากมาย ท่ามกลางความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและสังคมที่รุดหน้าแบบก้าวกระโดดนี้ มีกิจกรรมต่าง ๆ จำนวนมากที่เกิดขึ้นโดยไม่ได้คำนึงถึงสิ่งแวดล้อมและส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตความเป็นอยู่ของมนุษย์โดยรวมแล้ว ในวงการเคมีก็กำลังประสบปัญหานี้เช่นเดียวกัน โดยส่วนของเคมีวิเคราะห์นั้นมีกระบวนการพัฒนาวิธีวิเคราะห์และตรวจสอบความถูกต้องของวิธี ซึ่งปกติจะมีการตัดสินใจเลือกใช้วิธีวิเคราะห์นั้นหรือไม่ ต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ความถูกต้อง (accuracy) สภาพไว (sensitivity) ความเที่ยง (reproducibility) ความยากง่าย (simplicity) ค่าใช้จ่าย (cost effectiveness) ความสะดวก (flexibility) และความรวดเร็ว (speed) นอกจากปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงเหล่านี้แล้วยังมีปัจจัยที่มักจะถูกมองข้ามและไม่ได้นำมาใช้ในการตัดสินใจเลือกวิธีวิเคราะห์อีก คือ ความปลอดภัยของผู้ทดลอง (operator safety) และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (environmental impact) ซึ่งเมื่อนำวิธีวิเคราะห์ที่ได้พัฒนาขึ้นโดยไม่ได้คำนึงถึงปัจจัยด้านความปลอดภัยและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมไปใช้งานจริง พบว่าวิธีวิเคราะห์บางวิธีใช้สารเคมีที่เป็นอันตราย และยังทำให้เกิดของเสียที่มีความเป็นพิษมากกว่าสปีชีส์ที่ต้องการวิเคราะห์ (analyte) เสียอีก ดังนั้นห้องปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ต่าง ๆ ควรมีมาตรการในการควบคุมกระบวนการวิเคราะห์ ตั้งแต่การพัฒนาวิธีวิเคราะห์จนกระทั่งถึงกระบวนการจัดการของเสียที่เกิดขึ้น ให้เป็นกระบวนการวิเคราะห์ที่มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งเป็นที่มาของคำว่า “เคมีวิเคราะห์สีเขียว (Green Analytical Chemistry; GAC)” ในบทความนี้ได้รวบรวมแนวคิด วิธีการปฏิบัติ และตัวอย่างของวิธีการวิเคราะห์ที่มีการพัฒนาได้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของเคมีวิเคราะห์สีเขียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

2. จากจุดเริ่มต้นแนวคิดของเคมีสีเขียว [1-4]

เคมีวิเคราะห์สีเขียวมีแนวทางปฏิบัติที่พัฒนาขึ้นมาจากรากฐานแนวความคิดของเคมีสีเขียว (Green Chemistry) โดยในปี ค.ศ. 1991 Anastas ได้เสนอการใช้คำว่า "Green Chemistry" เป็นครั้งแรก ในโครงการพิเศษที่จัดทำขึ้นโดยหน่วยงานปกป้องรักษาสิ่งแวดล้อม ประเทศสหรัฐอเมริกา (US Environmental Protection Agency; EPA) เคมีสีเขียวมีจุดประสงค์เพื่อการพัฒนากระบวนการและเทคโนโลยีทางเคมีให้มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอันเป็นแนวทางพัฒนาแบบยั่งยืน

Anastas และ Warner เสนอแนวความคิดของเคมีสีเขียว ประกอบด้วยหลักการพื้นฐาน 12 ข้อ (The 12 Principle of Green Chemistry) ซึ่งเป็นแนวคิดแบบครบวงจร เริ่มตั้งแต่การคิดออกแบบวางแผนการพัฒนาในขั้นตอนต่าง ๆ และการจัดการกระบวนการเคมีทั้งระบบ มีการพิจารณาถึงผลิตภัณฑ์และผลผลิตข้างเคียงที่จะเกิดขึ้นด้วย เพื่อให้มีการใช้สารเคมีลดลงและพยายามหลีกเลี่ยงไม่ใช้สารเคมีที่เป็นพิษหรืออันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ทำให้กระบวนการผลิตทางเคมีนั้นมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีความประหยัดและเกิดความคุ้มค่ามากที่สุด ถ้ามีการพัฒนากระบวนการผลิตทางเคมีแบบใหม่และสามารถดำเนินการตามหลักการพื้นฐาน 12 ข้อนี้ได้ จะทำให้กระบวนการเคมีที่พัฒนาขึ้นนั้นเป็นเคมีสีเขียวอย่างสมบูรณ์แบบซึ่งเป็นวิธีการที่ดีที่สุด แต่โดยส่วนใหญ่แล้วในขณะที่กระบวนการผลิตทางเคมีที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรมซึ่งผลิตเพื่อการค้านั้นยังต้องดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง ก็สามารถที่จะเลือกทำการปรับปรุงกระบวนการบางขั้นตอนเพื่อให้เป็นเคมีสีเขียวได้ก่อน โดยควรจะเลือกขั้นตอนที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุดมาปรับปรุงก่อนซึ่งก็เป็นทางเลือกที่ปฏิบัติได้เช่นกัน แต่ก็จะเป็นเคมีสีเขียวในบางขั้นตอนเท่านั้น ถ้าต้องการให้เป็นเคมีสีเขียวแบบสมบูรณ์ครบวงจรก็ต้องพัฒนาขั้นตอนอื่น ๆ ทั้งหมดด้วย

หลักการพื้นฐาน 12 ข้อ ของเคมีสีเขียว มีดังนี้

1. ป้องกันการเกิดของเสีย (Prevent waste) การป้องกันการเกิดของเสียเป็นวิธีที่ดีกว่าการปล่อยให้ของเสียเกิดขึ้นแล้วต้องมีการบำบัดและกำจัดของเสียนั้น

การป้องกันไว้ก่อนเป็นวิธีที่ดีกว่าการแก้ปัญหาที่ปลายเหตุ ในการดำเนินกระบวนการต่าง ๆ ทางเคมี ควรต้องมีการคำนึงถึงวิธีป้องกันการเกิดของเสีย หรือให้เกิดของเสียน้อยที่สุด ซึ่งจะดีกว่าการปล่อยให้เกิดของเสียมากมายแล้วก็ต้องกำจัดอีกในภายหลัง การป้องกันนี้ควรยึดถือตามหลักการ "กันไว้ดีกว่าแก้ แย่แล้วแก้ไม่ทัน"

2. ใช้ทุกอะตอมอย่างคุ้มค่า (Atom Economy) ควรจะออกแบบวิธีการสังเคราะห์สารเคมีให้ทุกสารที่ใช้ในกระบวนการมีส่วนร่วมมากที่สุดไปสู่ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ในกระบวนการสังเคราะห์สารเคมีหรือการเกิดปฏิกิริยาเคมี ควรมีการออกแบบปฏิกิริยาและวางแผนให้สารเคมีที่เกี่ยวข้องได้มีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยาให้มากที่สุดในทุกขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาจนกระทั่งได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ในหลักการข้อนี้ต้องการใช้ทุกอะตอมให้มีส่วนร่วมมากที่สุดในกระบวนการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งสามารถหาประสิทธิภาพการมีส่วนร่วมของอะตอมได้จากสมการ คือ

$$\%\ \text{atom economy} = \frac{\text{มวลโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ}}{\text{มวลโมเลกุลของสารตั้งต้นทั้งหมด}} \times 100$$

3. กระบวนการสังเคราะห์ที่อันตรายน้อยกว่า (Less Hazardous Synthesis) ไม่ว่าจะเป็นการปฏิบัติในที่ใดก็ตาม ควรมีการออกแบบวิธีการสังเคราะห์ให้ใช้และทำให้เกิดสารที่มีความเป็นพิษน้อยหรือไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

แนวทางปฏิบัติสำหรับการสังเคราะห์สารเคมีหรือการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ควรมีการออกแบบวิธีดำเนินการหรือขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาให้อยู่บนพื้นฐานของความปลอดภัยเสมอ เลือกใช้กระบวนการที่ไม่เกิดปฏิกิริยารุนแรง ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน ไม่เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

4. ผลิตภัณฑ์ที่ปลอดภัยกว่า (Safer Chemicals) ควรออกแบบผลิตภัณฑ์เคมีให้คงไว้ซึ่งสมรรถภาพการทำงานในขณะที่ความเป็นพิษลดลง

ควรมีการออกแบบโครงสร้างทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเหมาะสม สามารถใช้งานให้เกิดประสิทธิภาพได้สูงสุด และในขณะเดียวกันก็ต้องมีความเป็นพิษต่ำหรือไม่เป็นอันตรายเลยจะดีที่สุด

5. ตัวทำละลายและสารช่วยที่ปลอดภัยกว่า (Safer Solvents and Auxiliaries) ในทุกครั้งที่เป็นไปได้ควรจะไม่จำเป็นต้องมีการใช้สารช่วย (เช่น ตัวทำละลาย รีเอเจนต์ช่วยในการแยก เป็นต้น) แต่ถ้าจำเป็นต้องใช้ควรจะเป็นสารที่ไม่เป็นอันตราย

ควรมีการลด ละ เลิกใช้ตัวทำละลายอินทรีย์และสารช่วยต่าง ๆ ที่มีความเป็นพิษและอันตราย หรือเลือกเปลี่ยนไปใช้ตัวทำละลายและสารช่วยที่มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมแทน เช่น การใช้ของเหลวไอออนิก (ionic liquid) หรือใช้ระบบสารละลายน้ำสองวัฏภาค (aqueous two-phase system) เพื่อสกัดสารที่สนใจ

6. ความมีประสิทธิภาพของพลังงาน (Energy Efficiency) ความต้องการใช้พลังงานควรจะต้องตระหนักเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมและผลกระทบด้านเศรษฐศาสตร์ และควรจะลดการใช้พลังงานลง กระบวนการสังเคราะห์สารควรจะจัดการที่สภาวะอุณหภูมิและความดันปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ในกระบวนการผลิตทางเคมีส่วนใหญ่มีความจำเป็นต้องใช้พลังงานเป็นตัวขับเคลื่อนให้เกิดปฏิกิริยาเคมี โดยเฉพาะพลังงานความร้อนซึ่งได้มาจากการเปลี่ยนรูปจากพลังงานไฟฟ้า การลดการใช้พลังงานในกระบวนการทางเคมีเป็นการช่วยให้ไม่ต้องสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลดีต่อสภาพแวดล้อม ช่วยให้เกิดการประหยัดในแง่ของเศรษฐศาสตร์ และเป็นการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพด้วย ถ้าเป็นไปได้ควรออกแบบกระบวนการทางเคมีให้มีการเกิดปฏิกิริยาได้ที่สภาวะอุณหภูมิห้องและใช้ความดันบรรยากาศปกติ ไม่ต้องใช้พลังงานความร้อนช่วยในการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นการช่วยประหยัดพลังงานได้

7. สารตั้งต้นที่เกิดใหม่ทดแทนได้เร็ว (Renewable Feedstocks) ไม่ว่าจะปฏิบัติในที่ใดก็ตามในแง่เศรษฐศาสตร์และด้านเทคนิค วัตถุดิบของสารตั้งต้นควรจะเกิดใหม่ทดแทนได้เร็วดีกว่าการใช้แล้วหมดไป

วัตถุดิบหรือสารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการผลิตทางเคมีควรพิจารณาเลือกใช้จากแหล่งทรัพยากรที่สามารถเกิดใหม่ทดแทนได้เร็ว เช่น วัตถุดิบจากพืชพันธุ์ตามธรรมชาติ จะดีกว่าการใช้วัตถุดิบจากแหล่งทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไปซึ่งต้องใช้เวลานานมากในการเกิดขึ้นใหม่ทดแทน ตัวอย่างการใช้สารตั้งต้นจากแหล่งธรรมชาติได้แก่ การใช้เมล็ดปาล์มซึ่งเป็นพืชที่สามารถให้น้ำมันได้นำมาใช้สำหรับการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล

8. ลดสารอนุพันธ์ (Reduce Derivatives) เมื่อใดก็ตามที่เป็นไปได้ ควรหลีกเลี่ยงการทำอนุพันธ์ที่ไม่จำเป็น (กลุ่มกีดขวาง การป้องกัน/การเลิกป้องกัน และการดัดแปลงชั่วคราวด้วยกระบวนการทางเคมีหรือฟิสิกส์)

การเกิดปฏิกิริยาเคมีบางครั้งต้องมีกระบวนการทำอนุพันธ์เพื่อบังคับให้เกิดผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ ตัวอย่างการทำอนุพันธ์ได้แก่ การใช้หมู่ฟังก์ชันเพื่อป้องกันหรือบังคับให้เกิดปฏิกิริยาตรงตำแหน่งที่ต้องการในโครงสร้างของสารเคมี การทำอนุพันธ์นี้จำเป็นต้องใช้รีเอเจนต์ซึ่งก็เป็นการใช้สารเคมีเพิ่มมากขึ้นในกระบวนการ และทำให้เกิดของเสียที่ไม่ต้องการเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นการออกแบบปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องควรคำนึงให้มีกระบวนการทำอนุพันธ์ลดลงหรือไม่มีการทำอนุพันธ์เลยจะดีที่สุด

9. การเร่งปฏิกิริยา (Catalysis) ตัวเร่งปฏิกิริยา (จำเพาะที่สุดเท่าที่เป็นไปได้) เป็นสิ่งที่ช่วยให้ผลดีกว่าการใช้รีเอเจนต์ตามปริมาณสัมพันธ์เท่านั้น

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดได้เร็วขึ้นและช่วยบังคับให้ได้ผลิตภัณฑ์มีโครงสร้างตามที่ต้องการได้ หลังจากปฏิกิริยาเคมีสิ้นสุดแล้วตัวเร่งปฏิกิริยาจะกลับคืนสู่สภาพเดิมซึ่งเป็นข้อดีของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา การวางแผนสำหรับการเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพจะช่วยให้กระบวนการเคมีต่าง ๆ ดำเนินก้าวหน้าไปได้ จึงควรพิจารณาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาให้เหมาะสมด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. ออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ (Design for Degradation) ควรจะออกแบบผลิตภัณฑ์เคมีเพื่อให้ไม่มีการตกค้างในสิ่งแวดล้อมเมื่อหมดอายุการใช้งานแล้ว และเสื่อมผุพังเป็นผลิตภัณฑ์ที่ย่อยสลายแล้วไม่เป็นพิษ

หลังจากการใช้งานให้เกิดประโยชน์เต็มที่แล้ว ผลิตภัณฑ์ควรที่จะต้องถูกย่อยสลายได้เพื่อกลับคืนสู่ธรรมชาติอย่างเป็นมิตรและไม่เหลือความเป็นพิษตกค้างอยู่ให้เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นควรมีการออกแบบโครงสร้างทางเคมีของผลิตภัณฑ์ให้สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางธรรมชาติ เช่น การผลิตถุงพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติด้วยแสงแดด

11. ตรวจวิเคราะห์ติดตามผลตลอดเวลาเพื่อเฝ้าระวังการเกิดมลภาวะ (Real-time analysis for Pollution Prevention) จำเป็นต้องพัฒนาวิธีวิเคราะห์เพิ่มเข้ามาเพื่อให้มีการติดตามกระบวนการแบบทันทีตลอดเวลาและกำกับดูแลก่อนที่จะมีสารซึ่งเป็นอันตรายเกิดขึ้น

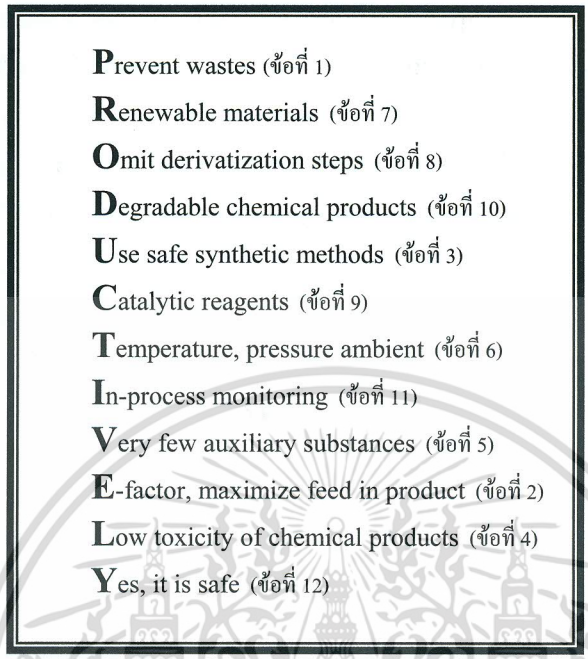
ควรมีการเฝ้าระวังด้วยระบบที่สามารถตรวจวิเคราะห์อย่างตลอดเวลา เพื่อตรวจสอบการเกิดความผิดปกติของกระบวนการผลิตทางเคมีที่กำลังดำเนินอยู่ เพื่อจะได้แก้ไขสถานการณ์ที่ไม่ปกติได้ทันเวลาก่อนที่จะก่อให้เกิดสารมลพิษต่าง ๆ ในสิ่งแวดล้อม

12. ระวังความปลอดภัยทางเคมีเป็นปกติวิสัยเพื่อป้องกันการเกิดอุบัติเหตุ (Inherently Safer Chemistry for Accident Prevention) ควรจะเลือกสารและสถานะของสารที่ใช้ในกระบวนการเคมีให้เหมาะสม ทั้งนี้เพื่อลดอุบัติเหตุทางเคมีที่อาจเกิดขึ้นอันได้แก่ การรั่วไหล การระเบิด และไฟไหม้

ในกระบวนการผลิตทางเคมีมีความเสี่ยงต่ออุบัติเหตุตลอดเวลา ควรมีการฝึกป้องกันและพร้อมแก้ไขสถานการณ์ ควรเลือกใช้สารเคมีที่มีความปลอดภัยสูง ไม่ก่อให้เกิดอุบัติเหตุได้ง่าย ไม่เกิดการรั่วไหลของสารเคมี ไม่เกิดการระเบิด และไม่เป็นวัตถุไวไฟ

แนวคิดของเคมีสีเขียวตามหลักการพื้นฐาน 12 ข้อนี้ มุ่งเพื่อออกแบบกระบวนการผลิตทางเคมีให้มีประสิทธิภาพ ใช้วัตถุดิบ สารเคมี รีเอเจนต์ ตัวทำละลาย สารช่วย และพลังงานอย่างคุ้มค่า เพื่อให้เกิดประสิทธิผลสูงสุด ปกป้องรักษาสุขภาพของมนุษย์และมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมให้มากที่สุด หลักการพื้นฐาน 12 ข้อของเคมีสีเขียวสามารถรวบรวมสรุปเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 1 เมื่อนำอักษรตัวแรกสุดของแต่ละบรรทัดมาประกอบกันจะได้คำว่า “PRODUCTIVELY” ซึ่งหมายถึง “ก่อให้เกิดผลอย่างมีประสิทธิภาพ”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1. แผนภาพสรุปหลักการพื้นฐาน 12 ข้อ ของเคมีสีเขียว [4]

3. สู่แนวทางปฏิบัติของเคมีวิเคราะห์สีเขียว [5-6]

กระบวนการทางเคมีวิเคราะห์ประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ได้แก่ การเก็บและรักษาตัวอย่าง การเตรียมตัวอย่าง การตรวจวัด และการประมวลผล ในขั้นตอนการเก็บตัวอย่างต้องคำนึงว่าตัวอย่างที่เก็บต้องสามารถเป็นตัวแทนที่ดีของประชากรทั้งหมดได้ เมื่อเก็บตัวอย่างแล้วต้องเก็บรักษาสารตัวอย่างในสภาวะที่เหมาะสมด้วย อาจมีการเติมสารเคมีลงในตัวอย่างเพื่อเป็นการรักษาสภาพไว้หรือเก็บรักษาไว้ในสภาพอุณหภูมิที่เหมาะสม ในขั้นตอนของการเตรียมตัวอย่างเป็นการแยกเอาสปีชีส์ที่สนใจออกจากส่วนอื่น ๆ ของตัวอย่าง ซึ่งมีหลากหลายวิธีการให้เลือกใช้ขึ้นกับสภาพธรรมชาติของสารตัวอย่างโดยพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของสารตัวอย่าง เมื่อเตรียมตัวอย่างแล้วก็จะเข้าสู่ขั้นตอนของการตรวจวัดซึ่งอาจใช้วิธีวิเคราะห์แบบเดิมได้แก่ การวิเคราะห์เชิงปริมาตร (หรือการไทเทรต) และการวิเคราะห์เชิงน้ำหนัก หรืออาจใช้วิธีวิเคราะห์เชิงเครื่องมือโดยอาศัยอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อสารได้รับพลังงานรูปต่าง ๆ ได้แก่ รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า ไฟฟ้าเคมี ความร้อน หรือรังสีเคมี หลังจากตรวจวัดแล้วก็จะเป็นขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลให้ทราบถึงคุณลักษณะของสารตัวอย่างได้ทั้งในแง่ของคุณภาพวิเคราะห์และปริมาณวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

การดำเนินงานของห้องปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์โดยเฉลี่ยแล้วมีค่า E-factor (อัตราส่วนของผลิตภัณฑ์อื่นข้างเคียงต่อผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ) อยู่ในช่วง 25-100 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีผลิตภัณฑ์อื่นข้างเคียงเกิดขึ้น 25 ถึง 100 เท่าของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ผลิตภัณฑ์อื่นข้างเคียงนี้เป็นสิ่งที่ไม่ต้องการหรือของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการวิเคราะห์นั่นเอง การนำแนวคิดของเคมีสีเขียวมาประยุกต์ใช้เป็นแนวทางปฏิบัติสำหรับกระบวนการต่าง ๆ ในเคมีวิเคราะห์นั้นจะช่วยทำให้ค่า E-factor ลดลงไปได้ การนำแนวคิดของเคมีสีเขียวมาใช้อาจทำได้โดยพัฒนาปรับปรุงกระบวนการวิเคราะห์นั้นทั้งระบบแบบครบวงจรหรือปรับปรุงเพียงบางขั้นตอนก่อน การพัฒนาปรับปรุงทั้งระบบแบบครบวงจรเป็นการดำเนินงานเพื่อทำให้เคมีวิเคราะห์เป็นเคมีสีเขียวที่สมบูรณ์แบบซึ่งในทางปฏิบัติจะทำได้ค่อนข้างยาก โดยทั่วไปมักจะเริ่มจากการปรับปรุงเพียงบางขั้นตอนก่อนเพราะการดำเนินงานของกระบวนการทางเคมีวิเคราะห์มีลักษณะแยกเป็นขั้นตอนอยู่แล้ว การพยายามปรับปรุงวิธีวิเคราะห์ในบางส่วนให้ดีขึ้นก็สอดคล้องกับแนวคิดของ “เคมีสีเขียว” มาตั้งแต่ก่อนเริ่มมีการใช้คำนี้อย่างจริงจังในปี ค.ศ. 1991 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการพัฒนาวิธีวิเคราะห์มีความล้ำหน้าไปก่อนที่จะมีทฤษฎีแนวคิดสีเขียวขึ้นมา ต่อมาในปี ค.ศ. 1995 เป็นครั้งแรกที่ de la Guardia และ Ruzicka เสนอการใช้คำว่า “Green Analytical Chemistry (GAC)” หรือ “เคมีวิเคราะห์สีเขียว” หรือบางครั้งเรียกว่าเคมีวิเคราะห์แบบสะอาด (clean analytical chemistry) หรือเคมีวิเคราะห์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (environmentally-friendly analytical chemistry)

ขั้นตอนของกระบวนการทางเคมีวิเคราะห์ได้แก่ ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและขั้นตอนการตรวจวัดเป็นขั้นตอนหลักที่สามารถนำแนวคิดของเคมีสีเขียวมาปฏิบัติใช้เพื่อปรับปรุงวิธีการวิเคราะห์ให้เป็นเคมีวิเคราะห์สีเขียวได้ ซึ่งสามารถทำได้ดังนี้

1. ลดปริมาณการใช้สารตัวอย่าง รีเอเจนต์ และตัวทำละลายลง โดยพัฒนาวิธีเตรียมตัวอย่างและวิธีวิเคราะห์ให้เป็นระบบที่มีขนาดเล็กลง เป็นระบบอัตโนมัติ และมีความจำเพาะเจาะจงกับสารที่ต้องการวิเคราะห์ ซึ่งจะทำให้ของเสียที่เกิดจากกระบวนการวิเคราะห์มีปริมาณลดลงตามไปด้วย หรือพัฒนาวิธีวิเคราะห์ให้เป็นแบบตรวจวัดสารที่สนใจได้โดยตรงไม่ต้องมีการเตรียมตัวอย่างซึ่งทำให้ไม่ต้องมีการใช้ตัวทำละลายและรีเอเจนต์เลย

2. ลดความเป็นพิษของตัวทำละลายและสารรีเอเจนต์ หรือหลีกเลี่ยงการใช้ตัวทำละลายและสารรีเอเจนต์ที่มีความเป็นพิษ เปลี่ยนไปใช้สารที่ไม่เป็นอันตรายและมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมแทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. มีการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้นโดยเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่เป็นพิษลดลงหรือไม่เป็นพิษเลย ซึ่งอาจเป็นการบำบัดแบบออนไลน์ต่อเนื่องหลังจากการเตรียมตัวอย่างหรือการตรวจวัด เมื่อผ่านการบำบัดแล้วอาจนำตัวทำละลายหรือรีเอเจนต์นั้นกลับมาใช้ซ้ำได้อีก

4. วิธีการเตรียมตัวอย่างด้วยการสกัดแบบสีเขียว [5]

การเตรียมตัวอย่างแบบดั้งเดิมมีการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ปริมาณมากเพื่อสกัดสารที่สนใจ เป็นการเพิ่มความเข้มข้นก่อนนำไปตรวจวัด ตัวทำละลายอินทรีย์มีความเป็นพิษสูงและเป็นอันตรายต่อสุขภาพ จึงมีการพัฒนาวิธีเตรียมตัวอย่างเพื่อลดการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ ในปี ค.ศ. 1975 Abu-Samra และคณะ [7] ได้ประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อใช้ในการย่อยสลายสารตัวอย่างเป็นครั้งแรก การเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีการสกัดโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave-assisted extraction; MAE) ทำให้ประหยัดกว่าวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์แบบดั้งเดิม เพราะใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ลดลงและควบคุมการใช้พลังงานจากคลื่นไมโครเวฟได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้พลังงานความร้อนจากเตาให้ความร้อนแบบเดิม ในช่วงกลางทศวรรษที่ 1980 ทางคริสตศักราช มีการพัฒนาวิธีการสกัดโดยใช้ของไหลเหนือวิกฤต (Supercritical fluid extraction; SFE) [8] ซึ่งเหมาะกับการสกัดสารตัวอย่างที่มีสถานะเป็นของแข็ง การใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยปรับสภาวะอุณหภูมิและความดันให้อยู่ในสภาพของไหลเหนือวิกฤตเพื่อสกัดสารอินทรีย์ ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ได้ การสกัดโดยใช้ของไหลภายใต้สภาวะความดัน (Pressurized fluid extraction; PFE) มีลักษณะเดียวกับการสกัดแบบใช้ซอห์คเลท (Soxhlet) แต่ใช้ตัวทำละลายที่อยู่ในสถานะใกล้กับบริเวณที่เป็นของไหลเหนือวิกฤต ซึ่งในสภาวะที่อุณหภูมิสูงทำให้สารที่สนใจหรือตัวถูกละลายมีอัตราการแพร่สูงและเกิดการละลายเข้าไปสู่ตัวทำละลายได้มาก ในขณะที่สภาวะความดันสูงช่วยรักษาสภาพของตัวทำละลายให้อยู่ต่ำกว่าจุดเดือดซึ่งจะช่วยทำให้ตัวทำละลายแทรกซึมผ่านเข้าไปในตัวอย่างได้ดี การสกัดด้วยวิธี PFE นี้ให้ประสิทธิภาพการสกัดสูง ใช้ตัวทำละลายปริมาณน้อย (15-40 มิลลิลิตร) และใช้เวลาในการสกัดสั้น (15-20 นาที) วิธีการสกัดนี้เป็นที่รู้จักกันในอีกชื่อหนึ่งคือ การสกัดโดยใช้ตัวทำละลายในสภาวะเร่ง (Accelerated solvent extraction; ASE) ซึ่งพัฒนาขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1996 [9] โดยบริษัท Dionex และได้ผลิตออกจำหน่ายเป็นระบบการสกัดแบบอัตโนมัติ

การสกัดโดยอาศัยการเกิดจุดขุ่นตัว (Cloud-point extraction; CPE) เป็นวิธีการเตรียมตัวอย่างแบบสีเขียวอีกทางเลือกหนึ่งซึ่งได้มีการอาศัยพื้นฐานของการเกิดจุดขุ่นตัวและลักษณะการแยกเฟสของสารลดแรงตึงผิวในสารละลาย โดยความสามารถของการเกิดไมเซลล์และการแยกเฟสของไมเซลล์ที่เกิดจากสารลดแรงตึงผิวกับเฟสของน้ำเป็นฟังก์ชันขึ้นกับอุณหภูมิ วิธี CPE เสนอโดย Watanabe และ Tanaka

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[10] ใช้สำหรับการเพิ่มความเข้มข้นของไอออนโลหะจากตัวอย่างน้ำ ต่อมาวิธี CPE ขยายผลไปใช้สำหรับสกัดโปรตีน เอนไซม์ และสารอินทรีย์ที่เป็นมลพิษในสิ่งแวดล้อมด้วย

การสกัดสเกลเล็กด้วยเฟสของเหลว (Liquid-phase microextraction; LPME) เป็นวิธีการสกัดแบบใหม่ที่ใช้ตัวทำละลายปริมาณน้อยมาก มี 2 วิธีคือ วิธีการสกัดสเกลเล็กด้วยเฟสของเหลวหยดเดียว (Single-drop microextraction; SDME) และวิธีการสกัดสเกลเล็กด้วยเฟสของเหลว-ของเหลว-ของเหลว (Liquid-liquid-liquid microextraction; LLLME) วิธี SDME พัฒนาขึ้นโดย Liu และ Dasgupta ในปี ค.ศ. 1996 [11] อาศัยหลักการสกัดเอาสารวิเคราะห์ออกมาจากตัวอย่างน้ำเข้าสู่หยดของเหลวขนาดเล็กซึ่งเป็นตัวทำละลายอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำแขวนเกาะอยู่ที่ปลายเข็มฉีด ส่วนวิธี LLLME พัฒนาขึ้นโดย Ma และ Cantwell ในปี ค.ศ. 1998 [12] อาศัยหลักการสกัดสารวิเคราะห์จากตัวอย่างที่ปรับสภาพ pH เป็นสารละลายผู้ให้ (donor solution) เข้าสู่ตัวทำละลายอินทรีย์ที่อยู่ในโพรงของเส้นใย แล้วสกัดสารวิเคราะห์จากในโพรงนี้กลับเข้าสู่สารละลายผู้รับ (acceptor solution) ที่อยู่ในโพรงของเส้นใยอีกต่อหนึ่ง

การสกัดด้วยเฟสของแข็ง (Solid-phase extraction; SPE) เป็นวิธีที่หลีกเลี่ยงการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ปริมาณมากได้ในขั้นตอนการสกัดและเพิ่มความเข้มข้น ส่วนมากแล้ววิธีนี้ใช้เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสนใจที่มีปริมาณน้อยในตัวอย่างน้ำซึ่งมีข้อดีกว่าการสกัดแบบของเหลว-ของเหลว (Liquid-liquid extraction; LLE) คือใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ในปริมาณที่ลดลง ไม่มีอุปสรรคจากการเกิดอิมัลชันในระหว่างที่ทำการสกัด มีประสิทธิภาพในการสกัดสูง และทำการสกัดแบบอัตโนมัติได้สะดวก ในปี ค.ศ. 1989 Belardi และ Pawliszyn [13] ได้พัฒนาวิธีการสกัดสเกลเล็กด้วยเฟสของแข็ง (Solid-phase microextraction; SPME) ซึ่งเป็นวิธีการเตรียมตัวอย่างทางเคมีวิเคราะห์แบบสีเขียวที่สำคัญอีกวิธีหนึ่ง อาศัยหลักการดูดซับของสารที่ต้องการวิเคราะห์จากตัวอย่างโดยตรงหรือจากบริเวณที่ว่างเหนือตัวอย่างในขวดแก้วปิดสนิท (vial) โดยเฟสของสารที่สกัดได้มีลักษณะเป็นฟิล์มบางเกาะติดบนผิวของเส้นใย fused-silica แล้วทำการปลดปล่อยสารที่สกัดได้โดยให้ความร้อนหรือใช้ตัวทำละลายปริมาณน้อยมากละลายออกมา

ในปี ค.ศ. 1999 Baltussen และคณะ [14] ได้พัฒนาวิธีการสกัดโดยใช้การดูดซับบนแท่งหมุน (Stir-bar sorptive extraction; SBSE) เป็นวิธีการสกัดด้วยเฟสของแข็งอีกวิธีหนึ่งที่อาศัยอันตรกิริยาระหว่างสารที่จะวิเคราะห์กับ polydimethylsiloxane (PDMS) ที่เคลือบไว้บนแท่งแม่เหล็กขนาดเล็ก แล้วทำการปลดปล่อยสารที่จะวิเคราะห์จากแท่งแม่เหล็กเข้าสู่ตัวทำละลายที่เหมาะสมปริมาณน้อย หรือสำหรับสารวิเคราะห์ที่ระเหยได้จะทำการปลดปล่อยโดยให้ความร้อนซึ่งหลีกเลี่ยงการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ได้ วิธี SBSE มีชั้นของโพลีเมอร์เคลือบที่หนากว่าวิธี SPME ทำให้มีค่าการเพิ่มความเข้มข้นที่สูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

การสกัดด้วยเฟสของแข็งที่ปรับสภาพแบบโมเลกุลจำรูป (Molecularly-imprinted solid phase extraction; MISPE) เป็นวิธีการสกัดแบบสีเขียวอีกวิธีหนึ่งที่พัฒนาจากวิธี SPE โดยทำการปรับสภาพพื้นผิวของเฟสของแข็งด้วยโพลีเมอร์ที่เตรียมให้เป็นโมเลกุลจำรูปเฉพาะกับสารวิเคราะห์ ซึ่งทำให้เกิดการดูดซับที่มีความจำเพาะเจาะจง

5. วิธีวิเคราะห์แบบสีเขียว [5,15-16]

เมื่อพิจารณาในขั้นตอนของการตรวจวัดแล้วพบว่าวิธีการวิเคราะห์ที่อาศัยพื้นฐานของการไหลแบบอัตโนมัติเป็นวิธีทางเคมีวิเคราะห์ที่เป็นแบบสีเขียวอยู่แล้ว เพราะเป็นวิธีที่สามารถปรับลดปริมาณการใช้รีเอเจนต์และตัวทำละลายลง และมีความเป็นไปได้สำหรับการเชื่อมต่อกับระบบการกำจัดของเสียแบบออนไลน์ต่อเนื่อง วิธีวิเคราะห์แบบฉีดไหล (Flow-injection analysis; FIA) เสนอเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1974 โดย Ruzicka และ Hansen [17] อาศัยหลักการฉีดสารละลายตัวอย่างระดับไมโครลิตรเข้าสู่กระแสตัวพาซึ่งไหลอย่างต่อเนื่องภายในระบบท่อขนาดจิ๋ว และไหลไปบรรจบทำปฏิกิริยากับสารละลายรีเอเจนต์ ไหลผ่านเซลล์เพื่อตรวจวัด ต่อมาก็มีพัฒนาการของวิธีวิเคราะห์ที่อาศัยพื้นฐานของการไหลมาเป็นลำดับ โดยมุ่งเพื่อลดปริมาณการใช้รีเอเจนต์ลงอีก วิวัฒนาการของระบบวิเคราะห์แบบไหลนี้ได้รวมไปถึงการใช้รีเอเจนต์ในรูปแบบที่เป็นเฟสของแข็งและการใช้รีเอเจนต์ยึดเกาะเอาไว้บนเฟสของแข็งนั้นอีกด้วยซึ่งปรากฏในวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรีที่ใช้เฟสของแข็ง (Solid-phase spectrophotometry; SPS) ที่พัฒนาขึ้นโดย Yoshimura และคณะ ในปี ค.ศ. 1976 [18] วิธี SPS นี้นำเอาเฟสของแข็งที่มีรีเอเจนต์อยู่ด้วยบรรจุใส่ไว้ในเซลล์ ให้สารตัวอย่างไหลผ่านเซลล์นี้ สารที่สนใจวิเคราะห์จะถูกกักไว้โดยเกิดอันตรกิริยากับรีเอเจนต์เป็นการเพิ่มความเข้มข้นแล้วตรวจวัดตามลำดับ วิธี SPS นี้ช่วยเพิ่มความไวและความจำเพาะเจาะจงของการวิเคราะห์และลดปริมาณการใช้รีเอเจนต์

วิธีวิเคราะห์แบบฉีดเป็นลำดับ (Sequential-injection analysis; SIA) [19] เป็นการพัฒนายุคที่ 2 ของวิธี FIA โดยที่วิธี SIA นี้สามารถปรับเปลี่ยนวิถีการไหลได้โดยไม่ต้องดัดแปลงระบบท่อของการไหล ใช้ปั๊มแบบหลอดฉีดยา (syringe pump) เพื่อดูดสารละลายต่าง ๆ ผ่านวาล์วเลือก ให้ไหลไปรวมกันในท่อขนาดจิ๋ว ผลักดันสารละลายไป-มาด้วยปั๊มเพื่อให้เกิดการผสมกัน แล้วผลักให้ไหลผ่านเซลล์เพื่อตรวจวัด วิธี SIA สามารถลดปริมาณการใช้รีเอเจนต์ลงได้มากกว่าวิธี FIA อีก ซึ่งก็ทำให้ลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นด้วย

วิธีวิเคราะห์ด้วยระบบการไหลที่พัฒนาต่อมาคือ การสับเปลี่ยนหลายช่องทาง (multicommutation) [20] เทคนิคนี้มีการใช้อุปกรณ์สับเปลี่ยนช่องทางหลายชิ้น เช่น วาล์วสามทางบังคับด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า หรือปั๊มขนาดเล็ก เพื่อสร้างระบบการไหลแบบต่อเนื่องและใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมให้สามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบการไหลได้ โดยทั่วไปใช้อุปกรณ์สับเปลี่ยนช่องทางหนึ่งชิ้นสำหรับควบคุมสารละลายหนึ่งชนิด ทำให้มีการใช้ปริมาตรของรีเอเจนต์เท่าที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์แต่ละครั้งได้

วิธีวิเคราะห์แบบแล็ปออนวาล์ว (Lab-on-valve; LOV) จัดเป็นการพัฒนายุคที่ 3 ของวิธี FIA เป็นวิธีที่พัฒนาต่อยอดจากวิธี SIA เรียกรวมกันเป็นวิธีซีเควนเชียลอินเจคชันแล็บออนวาล์ว (Sequential injection lab-on-valve; SI-LOV) วิธี SI-LOV นี้เสนอโดย Ruzicka [21] จัดเป็นระบบวิเคราะห์แบบเบ็ดเสร็จสเกลเล็ก (micro-total analytical system; μ-TAS) หรือระบบ FIA แบบสเกลเล็ก (μ-FIA) ใช้หลักการเดียวกับวิธี SIA แต่ผนวกรวมระบบทางไหลของสารละลายและช่องตรวจวัดเอาไว้บนชิ้นส่วนวาล์วเลือกที่ทำจากแผ่นพลาสติกโปร่งใส (Perspex) มีขนาดอยู่ในระดับตารางเซนติเมตร วิธี SI-LOV นี้ใช้ปริมาณของรีเอเจนต์ลดลงกว่าวิธี SIA อีก

เทคนิคโครมาโทกราฟีแบบของเหลว (liquid chromatography; LC) ก็สามารถพัฒนาลดขนาดระบบวิเคราะห์ให้เล็กลงได้โดยการลดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของคอลัมน์ (วิธี capillary HPLC) หรือลดขนาดอนุภาคของเฟสนิ่ง (วิธี ultra performance liquid chromatography; UPLC)

เมื่อใช้วิธีการแปรผลข้อมูลหลายตัวแปรด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์และสถิติโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการประมวลผลวิเคราะห์ (วิธี chemometrics) ทำให้สามารถพัฒนาวิธีวิเคราะห์ที่ไม่ต้องมีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างได้ เป็นวิธีวิเคราะห์สารตัวอย่างที่เป็นของแข็งหรือของเหลวแบบตรวจวัดโดยตรงไม่ต้องใช้ตัวทำละลายในการเตรียมตัวอย่าง การประมวลผลด้วยวิธี chemometrics นี้มักใช้กับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดสารตัวอย่างด้วยเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีได้แก่ อินฟราเรดย่านใกล้ (near infrared; NIR) อินฟราเรดย่านกลาง(mid-infrared; mid-IR) หรือรามานสเปกโทรเมทรี (Raman spectrometry) วิธีวิเคราะห์ที่ไม่ต้องมีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างนี้เป็นการประหยัดรีเอเจนต์และตัวทำละลายด้วยเช่นกัน

6. การแทนที่ตัวทำลายและรีเอเจนต์ที่เป็นพิษ [5]

ตัวอย่างที่น่าสนใจของการใช้สารอื่นทดแทนตัวทำละลายและรีเอเจนต์ที่มีอันตรายได้แก่ การแทนที่ตัวทำละลายอินทรีย์ที่ใช้เป็นเฟสเคลื่อนที่ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค HPLC มีรายงานการใช้สารละลายของสารลดแรงตึงผิวเป็นเฟสเคลื่อนที่แทนตัวทำละลายอินทรีย์ในวิธี HPLC สำหรับวิเคราะห์สารให้สีในอาหาร [22] น้ำที่ปรับสภาวะเป็นกรดโดยไม่ผสมตัวทำละลายอินทรีย์สามารถใช้เป็นเฟสเคลื่อนที่สำหรับการแยกและหาปริมาณของสารกรองรังสียูวี (UV filters) ในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง [23]

มีการนำสารสกัดที่ได้จากพืชมาใช้เป็นรีเอเจนต์ที่ได้จากธรรมชาติด้วย เช่น การนำคลอโรฟิลล์ที่สกัดได้จากใบของพืชตระกูลถั่วใช้เป็นฟลูออเรสเซนต์รีเอเจนต์สำหรับการวิเคราะห์ปรอท [24] ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาศัยหลักการเกิดแสงฟลูออเรสเซนต์ลดลงหรือการเกิดเควนชิง (quenching) โดยไอออน Hg^{2+} ในสารละลายคลอโรฟิลล์ มีการนำเอาสารสกัดจากใบฝรั่งโดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการทำบริสุทธิ์มาใช้เพื่อเป็นรีเอเจนต์แบบธรรมชาติสำหรับการวิเคราะห์เหล็กโดยวิธี FIA [25]

การใช้ขั้วปรอทหยดเป็นขั้วไฟฟ้ามีอันตรายที่เกิดขึ้นได้จากการใช้ปรอท จึงมีการปรับปรุงพัฒนาขั้วไฟฟ้าที่ใช้สารอื่นทดแทนปรอท เช่น ขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนคาร์บอน ขั้วไฟฟ้าฟิล์มบางบิสมัท ขั้วไฟฟ้าฟิล์มบางโบรอนโดปไดมอนด์

7. การกำจัดของเสียแบบออนไลน์ต่อเนื่อง [5]

ในปี ค.ศ. 1994 มีการพัฒนาเพิ่มเติมหน่วยกำจัดของเสียหรือหน่วยลดความเป็นพิษของของเสียโดยต่อเข้ากับส่วนท้ายของระบบวิเคราะห์ที่อาศัยพื้นฐานของการไหล เพื่อเป็นการบำบัดของเสียแบบออนไลน์ต่อเนื่องหลังจากผ่านขั้นตอนการตรวจวัดแล้ว กระบวนการบำบัดของเสียแบบออนไลน์อาจใช้หลักการ เช่น การสลายตัวด้วยความร้อน (thermal degradation) การลดความเป็นพิษด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidative detoxification) การสลายตัวด้วยแสง (photodegradation) การสลายตัวด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (biodegradation)

ตัวอย่างเช่น วิธีวิเคราะห์หาปริมาณ formetanate โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยากับพาราอะมิโนฟีนอล (p-aminophenol; PAP) [26] มีการลดความเป็นพิษของเสียด้วยกระบวนการสลายตัวด้วยแสงแบบออนไลน์ โดยใช้ TiO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หลังจากผ่านขั้นตอนการตรวจวัดแล้วของเสียที่เกิดขึ้นจะไหลไปรวมกับตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 (รูป anatase) ที่อยู่ในลักษณะข้น (slurry) แล้วผ่านการฉายด้วยแสงยูวี เป็นการลดความเป็นพิษของของเสียลง และสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำได้โดยใช้กระบวนการตกตะกอนแบบ flocculation

ไอออนโลหะเป็นสารมลพิษที่ไม่สามารถสลายตัวได้ จึงไม่สามารถหลีกเลี่ยงการปนเปื้อนของไอออนโลหะได้ แต่อย่างไรก็ตามสามารถที่จะบำบัดของเสียที่มีไอออนโลหะอยู่ด้วยโดยการทำให้ไอออนโลหะนั้นอยู่ในรูปที่เฉื่อย ไม่เป็นพิษ ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา และทำให้ขนาดของของเสียมีปริมาตรลดลงอย่างมาก เช่น ในการวิเคราะห์หาปริมาณปรอทในนมโดยเทคนิค AFS (Atomic fluorescence spectroscopy) [27] มีการบำบัดของเสียโดยให้ไหลไปรวมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้วผสมกับสารละลาย Fe(III) เกิดตะกอน $Fe(OH)_3$ และปรอทจะตกตะกอนร่วมด้วย เป็นการทำให้ปรอทมีสภาพเสื่อมฤทธิ์ลง สามารถลดขนาดของเสียที่เป็นพิษลงจากปริมาตรหลายลิตรเหลือเพียงน้อยกว่า 1 กรัมในรูปตะกอนไฮดรอกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

8. สรุป

การพัฒนาวิธีวิเคราะห์ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและขั้นตอนการตรวจวัดให้เป็นระบบที่มีขนาดเล็กลง เป็นระบบอัตโนมัติ และมีความจำเพาะเจาะจงกับสารที่ต้องการวิเคราะห์ ช่วยทำให้ลดปริมาณการใช้สารตัวอย่าง รีเอเจนต์ และตัวทำละลายได้ นอกจากนี้ยังลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นด้วย การพัฒนาวิธีวิเคราะห์แบบตรวจวัดโดยตรงไม่ต้องมีขั้นตอนเตรียมตัวอย่างทำให้ไม่ต้องใช้รีเอเจนต์และตัวทำละลาย เป็นการลดปริมาณสารเคมีที่ใช้ลงเช่นกัน เมื่อผนวกรวมกับการพยายามแทนที่รีเอเจนต์และตัวทำละลายที่เป็นพิษด้วยการเปลี่ยนไปใช้สารที่ไม่เป็นอันตราย และการพัฒนาระบบออนไลน์ต่อเนื่องเพื่อบำบัดของเสียที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ด้วยแล้ว ทำให้การพัฒนาวิธีวิเคราะห์ด้วยวิถีทางนี้สอดคล้องกับแนวคิดของ "เคมีสีเขียว" และวิธีวิเคราะห์ที่พัฒนาได้ก็จะเป็น "เคมีวิเคราะห์สีเขียว"

เอกสารอ้างอิง

[1] Wardencki, W., Curylo, J. and Namieśnik, J., 2005. Green chemistry – current and future Issues. *Pol. J. Envir. Stud.*, 14 (4), 389-395.

[2] Warner, J.C., Cannon, A.S. and Dye, K.M., 2004. Green chemistry. *Env. Imp. Ass. Rev.*, 24, 775-799.

[3] Manley, J.B., Anastas, P.T. and Cue Jr., B.W., 2008. Frontiers in green chemistry: meeting the grand challenges for sustainability in R&D and manufacturing. *J. Cleaner Prod.*, 16, 743-750.

[4] Tang, S.L.Y., Smith, R.L. and Poliakoff, M., 2005. Principles of green chemistry: productively. *Green Chem.*, 7 (11), 761-762.

[5] Armenta, S., Garrigues, S. and de la Guardia, M., 2008. Green analytical chemistry. *Trends Anal. Chem.*, 27 (6), 497-511.

[6] Koel, M. and Kaljurand, M., 2006. Application of the principles of green chemistry in analytical Chemistry. *Pure Appl. Chem.*, 78 (11), 1993-2002.

[7] Abu-Samra, A., Morris, J.S., and Koityohann, S.R., 1975. Wet ashing of some biological samples in a microwave oven. *Anal. Chem.*, 47, 1475-1477.

[8] Louque de Castro, M.D. and Jiménez-Carmona, M.M., 2000. Where is supercritical fluid extraction going?. *Trends Anal. Chem.*, 19 (4), 223-228.

[9] Richter, B.E., Jones, B.A., Ezzell, J.L., Porter, N.L. Avdalovic, N. and Pohl, C., 1996. Accelerated solvent extraction: a technique for sample preparation. *Anal. Chem.*, 68, 1033-1039.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[10] Watanabe, H. and Tanaka, H., 1978. A non-ionic surfactant as a new solvent for liquid-liquid extraction of Zn(II) with 1-(2-pyridylazo)-2-naphthol. *Talanta*, 25 (10), 585-589.

[11] Liu, H. and Dasgupta, P.K., 1996. Analytical chemistry in a drop. Solvent extraction in a microdrop. *Anal. Chem.*, 68, 1817-1821.

[12] Ma, M. and Cantwell, F.F., 1998. Solvent microextraction with simultaneous back-extraction for sample cleanup and preconcentration: Quantitative extraction. *Anal. Chem.*, 70, 3912-3919.

[13] Belardi, R.P. and Pawliszyn, J.B., 1989. The application of chemically modified fused silica fibers in the extraction of organics from water matrix samples and their rapid transfer to capillary columns. *Water Pollut. Res. J. Can.*, 24, 179-191.

[14] Baltussen, E., Sandra, P., David, F. and Cramers, C.J., 1999. Stir bar sorptive extraction (SBSE), a novel extraction technique for aqueous sample: theory and principles. *J. Microcolumn Sep.*, 11, 737-747.

[15] Mesquita, R.B.R. and Rangel, A.O.S.S., 2009. A review on sequential injection methods for water analysis. *Anal. Chim. Acta*, 648, 7-22.

[16] Louque de Castro, M.D., Ruiz-Jiménez, J. and Pérez-Serradilla, J.A., 2008. Lab-on-valve: a useful tool in biochemical analysis. *Trends Anal. Chem.*, 27 (2), 118-126.

[17] Ruzicka, J. and Hansen, E.H., 1988. Flow Injection Analysis, Wiley, New York.

[18] Yoshimura, K., Waki, H. and Ohashi, S., 1976. Ion-exchanger colorimetry-I: Micro determination of chromium, iron, copper and cobalt in water. *Talanta*, 23 (6), 449-454.

[19] Ruzicka, J. and Marshall, G.D., 1990. Sequential injection: a new concept for chemical sensors, process analysis and laboratory assays. *Anal. Chim. Acta*, 237, 329-343.

[20] Reis, B.F., Giné, M.F., Zagatto, E.A.G., Lima, J.L.F.C. and Lapa, R.A., 1994. Multicommutation in flow analysis. Part 1. Binary sampling: concepts instrumentation and spectrophotometric determination of iron in plant digests. *Anal. Chim. Acta*, 293, 129-138.

[21] Ruzicka, J., 2000. Lab-on-valve: universal microflow analyzer based on sequential and bead injection. *Analyst*, 125, 1053-1060.

[22] Vidotti, E.C., Costa, W.F. and Oliveira, C.C., 2006. Development of a green chromatographic method for determination of colorants in food samples. *Talanta*, 68 (3), 516-521.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

[23] Salvador, A. and Chisvert, A., 2001. Determination of the UV filters worldwide authorised in sunscreens by high-performance liquid chromatography: Use of cyclodextrins as mobile phase modifier. *J. Chromatogr. A*, 921, 207-215.

[24] Gao, S., Tan, G., Yuan, H., Xiao, D. and Choi, M.M.F., 2006. A simple fluorometric method using chlorophyll a for determination of Hg^{2+} ion. *Microchim. Acta*, 153, 159-162.

[25] Settheeworrarit, T., Harwell, S.K., Lapanatnoppakhun, S., Jakmunee, J., Christian, G.D. and Grudpan, K., 2005. Exploiting guava leaf extract as an alternative natural reagent for flow injection determination of iron. *Talanta*, 68 (2), 262-267.

[26] Escuriola, M.J., Morales-Rubio, A. and de la Guardia, M., 1999. A clean analytical method for the spectrophotometric determination of formetanate incorporating an on-line microwave assisted hydrolysis step. *Anal. Chim. Acta*, 390, 147-154.

[27] Cava-Montesinos, P., Ródenas-Torralba, E., Morales-Rubio, Á., Cervera, M.L. and de la Guardia, M., 2004. Cold vapour atomic fluorescence determination of mercury in milk by slurry sampling using multicommutation. *Anal. Chim. Acta*, 506, 145-153.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า