เคมีสีเขียว

GREEN CHEMISTRY

ภิเษก รุ่งโรจน์ชัยพร

เคมีสีเขียว

GREEN CHEMISTRY

ภิเษก รุ่งโรจน์ชัยพร

เคมีสีเขียว

โดย รศ. ดร. ภิเษก รุ่งโรจน์ชัยพร
ภาคเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พิมพ์ครั้งที่ 1

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของหอสมุดแห่งชาติ/National Library of Thailand Cataloging in Publication data

ภิเษก รุ่งโรจน์ชัยพร
เคมีสีเขียว_ 2569. หน้า 109

ISBN (e-book): 978-616-626-338-1

จัดพิมพ์โดย : ภิเษก รุ่งโรจน์ชัยพร

ราคา 80 บาท

คำนำ

หนังสือเคมีสีเขียวจัดทำขึ้นเพื่อให้นักศึกษาและผู้ที่สนใจ ใช้ประกอบการศึกษาของวิชาเคมีสีเขียว หรือ GREEN CHEMISTRY โดยมีการเรียบเรียงจากหนังสือ เอกสาร เว็บไซด์ และวารสารภาษาอังกฤษที่ได้อ้างอิงไว้ในท้ายบท การจัดทำหนังสือนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อให้นักศึกษามีหนังสือเรียนฉบับภาษาไทย ที่สอดคล้องและเหมาะสมกับเนื้อหาของหลักสูตรที่ใช้ศึกษาในระดับอุดมศึกษา และใช้อ่านประกอบควบคู่ไปกับหนังสือภาษาอังกฤษ ในเนื้อหามีการกล่าวถึงหลักการทั้งสิบสองข้อของเคมีสีเขียว การประเมินความเป็นเคมีสีเขียว และเรื่องพิษวิทยา

ผู้เขียนหวังว่าหนังสือเล่มนี้ จะเป็นประโยชน์ในการนำไปใช้ เพื่อเป็นคู่มือประกอบการเรียนการสอนในห้องเรียน และการศึกษาด้วยตัวเอง เพื่อพัฒนาความรู้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะส่งผลให้การเรียนการสอนในรายวิชานี้มีประสิทธิภาพและมีคุณภาพดียิ่งขึ้น ในการพิมพ์ครั้งนี้อาจจะยังมีส่วนที่ไม่สมบูรณ์หรืออาจจะมีข้อผิดพลาดอยู่บ้าง ทั้งนี้ผู้เขียนยินดีจะรับคำเสนอแนะจากผู้อ่าน และจะนำไปปรับปรุงแก้ไขให้หนังสือเล่มนี้สมบูรณ์มากขึ้นต่อไป ท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณครู อาจารย์ บุพการี และครอบครัว รวมทั้งผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่าน ตลอดจนขอบใจลูกศิษย์หลายคนที่ช่วยตรวจทาน ทำให้หนังสือเล่มนี้มีความสมบูรณ์และสำเร็จได้อย่างเรียบร้อย

ภิเษก รุ่งโรจน์ชัยพร

27 มกราคม 2569

สารบัญ

บทที่ 1	เคมีสีเขียว (Green Chemistry)	2
	หลักการพื้นฐาน 12 ข้อของเคมีสีเขียว	2
	คำถาม	9
	เอกสารอ้างอิง	9
บทที่ 2	การป้องกันการเกิดของเสีย (Prevent Waste)	10
	คำถาม	19
	เอกสารอ้างอิง	19
บทที่ 3	เศรษฐกิจอะตอม (Atom Economy)	21
	3.1 ปฏิกิริยาทางเศรษฐกิจอะตอม	23
	3.2 เกณฑ์สำหรับการประเมินปฏิกิริยาหรือกระบวนการ	26
	3.3 กลยุทธ์ในการปรับปรุงเศรษฐกิจอะตอม	31
	ตัวอย่าง: การสังเคราะห์ไอบูโพรเฟน	31
	ตัวอย่าง: การสังเคราะห์ลาซาบีไมด์ Lazabemide	32
	คำถาม	33
	เอกสารอ้างอิง	34
บทที่ 4	วิธีการประเมินสำหรับเคมีสีเขียว	35
	(A Method for Assessing Green Chemistry)	
	4.1 การพัฒนาวิธีการเคมีสีเขียวโดย GlaxoSmithKline และ Merck	36
	4.2 การบูรณาการ PMI และ LCA	37
	4.3 วิธีการ GCM (Green Chemistry Metrics)	37
	4.4 กลยุทธ์การจัดอันดับใน GCM	38
	คำถาม	48
	เอกสารอ้างอิง	48
บทที่ 5	ตัวทำละลายและสารช่วยที่ปลอดภัยกว่า	49
	(Safer Solvents and Auxiliaries)	
	คำถาม	54
	เอกสารอ้างอิง	55

สารบัญ

บทที่ 6 การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ (Energy Efficiency) 56

6.1 การเร่งปฏิกิริยาเคมีด้วยพลังงานกลผ่านการบดด้วยลูกบอล (Ball Milling) 56

6.2 การฉายรังสีไมโครเวฟ (Microwave Irradiation) 59

6.3 การเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalysis) 64

6.4 การสังเคราะห์โดยวิธีไฮโดรเทอร์มัล (Hydrothermal Synthesis) 66

6.5 การสังเคราะห์ด้วยโซโนเคมี (Sonochemical Synthesis) 67

6.6 การสังเคราะห์ด้วยแม่เหล็ก (Magnetic Synthesis) 69

คำถาม 70

เอกสารอ้างอิง 71

บทที่ 7 การเร่งปฏิกิริยา (Catalysis) 73

7.1 หลักการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา 73

7.2 วัฏจักรการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา 74

7.3 ความสำคัญของการเร่งปฏิกิริยาในเคมีสีเขียว 74

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์ 75

2. ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ 77

3. ตัวเร่งปฏิกิริยาชีวภาพ 78

คำถาม 79

เอกสารอ้างอิง 80

บทที่ 8 พิษวิทยา (Toxicology) 81

8.1 คำจำกัดความและขอบเขต (Definition and Scope) 81

8.2 นิยามและความหมาย 84

8.3 การแบ่งสาขาของพิษวิทยาในภาพกว้าง 85

8.4 ประวัติของพิษวิทยา 87

8.5 บทบาทของพิษวิทยาในการปกป้องชีวิตและสิ่งแวดล้อม 90

8.6 ความสำคัญของพิษวิทยา 92

สารบัญ

8.7 ระยะเวลาและความถี่ของการได้รับสารพิษสู่ร่างกายคน 92
8.8 ดัชนีการเกิดพิษและดัชนีการเกิดพิษถึงตาย 93
8.9 กลไกหลักที่ทำให้เกิดพิษจำเพาะ 99
8.10 ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงการเกิดพิษ 102
8.11 การกำจัดสารพิษออกจากร่างกาย 103
8.12 วิธีการทดสอบพิษ 104
8.13 วิธีทดสอบการกลายพันธุ์ 105
8.14 การคำนวณสภาวะการทำงานกับสารพิษ 105
คำถาม 108
เอกสารอ้างอิง 108
9. ดัชนี 109

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 แผนภาพของเคมีสีเขียวสรุปหลักการพื้นฐาน 12 ข้อ 7

ตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมลดขยะและหลักการเคมีสีเขียว 14

ตารางที่ 3.2 สมการที่เกี่ยวข้องกับเคมีสีเขียว เช่น E Factor, Mass Intensity, Atom Economy เป็นต้น 28

ตารางที่ 4.1 แสดง GCM ที่จัดกลุ่มหลักการทั้ง 12 ข้อเป็นหมวดหมู่ที่คล้ายกัน 39

ตารางที่ 4.2 ความอันตรายจากการจัดการของเสีย 40

ตารางที่ 4.3 ค่าการประเมินติดตามและเฝ้าระวังระบบการผลิตถูกกำหนดเป็นสองแบบ คือ แบบอนาล็อก และแบบดิจิตอล 43

ตารางที่ 4.4 แฟกเตอร์ความรุนแรงตามสภาวะความดัน 44

ตารางที่ 4.5 แฟกเตอร์ความรุนแรงตามสภาวะอุณหภูมิ 44

ตารางที่ 5.1 การแทนที่ตัวทำละลาย (Solvent Replacement) 51

ตารางที่ 5.2 ตัวทำละลายทดแทน 52

ตารางที่ 5.3 กลุ่มสารละลายที่ควรหลีกเลี่ยง 53

ตารางที่ 6.1 แสดงการเปรียบเทียบการให้ความร้อนระหว่างการให้ความร้อนแบบพาความร้อนและการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 62

สารบัญภาพ

รูปที่ 1.1 แสดงภาพหลักการของเคมีสีเขียวพื้นฐาน 12 ข้อ 8

รูปที่ 2.1 เคมีสีเขียวกับการจัดการขยะเพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากสารพิษ ในผลิตภัณฑ์รองและขยะ 12

รูปที่ 2.2 แผนภูมิการลดขยะผ่านวัฏจักรกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์เคมี 15

รูปที่ 2.3 แผนภูมิการเกิดขยะในห้องปฏิบัติการ 16

รูปที่ 2.4 ตัวอย่างของขั้นตอนซึ่งบริษัท DuPont ใช้มี 10 วิธี 18

รูปที่ 3.1 แสดงกระบวนการทางเคมีของเศรษฐกิจอะตอม (Atom Economy) 22

รูปที่ 3.2 แสดงภาพถ่ายยาไอบูโพรเฟน 31

รูปที่ 3.3 แสดงโครงสร้างทางเคมีของสารลาซาบีไมด์ (Lazabemide) 32

รูปที่ 6.1 แสดงภาพเครื่องบดด้วยลูกบอล (ซ้าย) และอุปกรณ์ลูกบอลและภาชนะ (ขวา) 59

รูปที่ 6.2 แสดงภาพกลไกการให้ความร้อน (a) การให้ความร้อนแบบดั้งเดิม (b) การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 61

รูปที่ 6.3 แสดงภาพเครื่องให้ความร้อนแบบไมโครเวฟ 61

รูปที่ 6.4 แสดงภาพกลไกการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง 65

รูปที่ 6.5 แสดงภาพอุปกรณ์การสังเคราะห์สารโดยวิธีไฮโดรเทอร์มัล 67

รูปที่ 6.6 แสดงภาพกลไกการเร่งปฏิกิริยาด้วยโซโนเคมีคัล 69

รูปที่ 6.7 แสดงภาพการสังเคราะห์ด้วยสนามแม่เหล็ก 70

รูปที่ 7.1 แสดงภาพกระบวนการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาเคมีที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 73

รูปที่ 7.2 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (**Δ**G) ระหว่างสารตั้งต้น A + B และผลิตภัณฑ์ P 75

รูปที่ 7.3 แสดงภาพการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียว 76

รูปที่ 7.4 แสดงภาพการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ระหว่างการเปลี่ยนสารตั้งต้นแก๊สสังเคราะห์จนเป็นผลิตภัณฑ์ไดเมทิลอีเทอร์ 78

รูปที่ 7.5 แสดงภาพการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ระหว่างการเปลี่ยนสารตั้งต้นจนเป็นผลิตภัณฑ์ 79

สารบัญภาพ

รูปที่ 8.1 แสดงแผนภูมิการรับสารพิษในร่างกาย 83

รูปที่ 8.2 แสดงแผนภูมิเส้นเวลาของพัฒนาการเกี่ยวกับพิษวิทยา 89

รูปที่ 8.3 แสดงกราฟการรับสารพิษในร่างกายต่อการตอบสนองต่อขนาดสารพิษ (Toxic Dose-Response Curve) 94

รูปที่ 8.4 แสดงกราฟดัชนีการให้ผลในการรักษา (Therapeutic Index - TI) 96

รูปที่ 8.5 แสดงกราฟการตอบสนองต่อขนาด (Dose-Response Curve) 98

บทที่ 1
เคมีสีเขียว (Green Chemistry)

ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นทั่วโลกส่งผลกระทบต่อมนุษย์อย่างรุนแรง ทำให้เกิดความตระหนักและความต้องการที่จะอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมมากขึ้น หนึ่งในวิธีการที่สำคัญคือ “เคมีสีเขียว (Green Chemistry)” ซึ่งเป็นศาสตร์ที่เน้นการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมตั้งแต่ขั้นตอนแรกของกระบวนการผลิต โดยใช้ความรู้ทางเคมีและเทคโนโลยีเพื่อสร้างความยั่งยืน เดิมทีอุตสาหกรรมมุ่งเน้นที่การเพิ่มผลผลิตและกำไรเป็นหลัก จึงทำให้เกิดปัญหาขยะและมลพิษมากมาย ทั้งจากขั้นตอนการผลิตและการกำจัดของเสีย นอกจากนี้ ยังมีการใช้สารเคมีที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ดังนั้น เคมีสีเขียวจึงเป็นทางออกที่น่าสนใจ เพราะเป็นการเปลี่ยนแปลงวิธีคิดจากการแก้ปัญหาที่ปลายเหตุ มาเป็นการป้องกันปัญหาตั้งแต่ต้นทาง โดยการออกแบบกระบวนการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ลดการใช้สารเคมีอันตราย และลดปริมาณขยะที่เกิดขึ้น

Paul T. Anastas

John Charles Warner

ในปี ค.ศ. 1991 ศาสตราจารย์พอล อนาสทัส (Paul Anastas) และ ศาสตราจารย์จอห์น วอร์เนอร์ (John Warner) ได้นำคำว่า "เคมีสีเขียว" มาใช้เป็นครั้งแรก ในโครงการพิเศษที่จัดทำขึ้นโดยหน่วยงานปกป้องรักษาสิ่งแวดล้อม ประเทศสหรัฐอเมริกา (US Environmental Protection Agency; EPA) เคมีสีเขียวมีเป้าหมายเพื่อพัฒนาวิธีการผลิตและเทคโนโลยีทางเคมีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น เพื่อให้เราสามารถใช้ชีวิตอยู่บนโลกใบนี้ได้อย่างยั่งยืน แม้ว่าคำว่า "เคมีสีเขียว" จะเพิ่งถูกนำมาใช้อย่างเป็นทางการในช่วงต้นทศวรรษ 1990 แต่ความพยายามในการพัฒนาเคมีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมนั้นมีมานานก่อนหน้านั้นแล้ว หลายประเทศ เช่น อิตาลี สหราชอาณาจักร และญี่ปุ่น ก็ได้เริ่มทำการวิจัยและพัฒนาในด้านนี้มาตั้งแต่ช่วงต้นทศวรรษ 1990 และล่าสุดเครือข่ายเคมีสีเขียวและยั่งยืนได้เริ่มต้นขึ้นในญี่ปุ่น รวมถึงการก่อตั้งวารสาร Green Chemistry ฉบับปฐมฤกษ์

สนับสนุนโดยราชสมาคมเคมี ปรากฏในปี ค.ศ. 1999 ดังนั้น เราสามารถสรุปได้ว่า แม้ว่าคำว่า "เคมีสีเขียว" จะเป็นคำที่เพิ่งถูกนำมาใช้ในช่วงหลัง แต่แนวคิดในการพัฒนาเคมีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมนั้นเป็นสิ่งที่สำคัญและจำเป็นต่อการอยู่รอดของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตบนโลก

เคมีสีเขียวมีหลักการพื้นฐาน 12 ข้อ (The 12 Principle of Green Chemistry) ที่ครอบคลุมทุกขั้นตอนของกระบวนการผลิตทางเคมี ตั้งแต่การวางแผน การผลิต ไปจนถึงการจัดการของเสีย เป้าหมายหลักของเคมีสีเขียวคือการลดการใช้สารเคมีที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม โดยทำให้กระบวนการผลิตมีความปลอดภัยและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ถ้าหากเราสามารถออกแบบและพัฒนากระบวนการผลิตทางเคมีใหม่ที่สอดคล้องกับหลักการทั้ง 12 ข้อได้อย่างครบถ้วน ก็จะถือว่าเป็นเคมีสีเขียวที่สมบูรณ์แบบ แต่ในความเป็นจริงกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมส่วนใหญ่อาจไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ทั้งหมดในทันที เนื่องจากมีข้อจำกัดด้านต้นทุนและเวลา ดังนั้นวิธีการที่เป็นไปได้ก็คือ การเลือกปรับปรุงขั้นตอนการผลิตที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุดก่อน เช่น การลดการใช้สารเคมีที่เป็นพิษ หรือการลดปริมาณของเสีย แม้ว่าจะยังไม่สามารถทำให้กระบวนการผลิตทั้งหมดเป็นเคมีสีเขียวได้อย่างสมบูรณ์แบบ แต่ก็ถือเป็นก้าวสำคัญในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยสรุปคือเคมีสีเขียวเป็นแนวคิดที่ยืดหยุ่น สามารถนำไปปรับใช้ได้กับกระบวนการผลิตต่างๆ โดยไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงทุกอย่างในทันที แต่สิ่งสำคัญคือการค่อยๆ ปรับปรุงและพัฒนาไปสู่เป้าหมายที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น

หลักการพื้นฐาน 12 ข้อของเคมีสีเขียว

1. การป้องกันการเกิดของเสีย (Prevent Waste) การป้องกันการเกิดของเสียเป็นวิธีที่ดีกว่า การปล่อยให้ของเสียเกิดขึ้นแล้วจึงต้องมีการบำบัดและกำจัดของเสียนั้น ดังนั้น การป้องกันไว้ก่อนเป็นวิธีการที่สำคัญของการแก้ปัญหาที่ต้นเหตุ ในการดำเนินงานของ

กระบวนการต่าง ๆ ทางเคมี จึงจำเป็นต้องมีการคำนึงถึงวิธีการป้องกันการเกิดของเสีย หรือการทำให้เกิดของเสียน้อยที่สุด ซึ่งจะดีกว่าการปล่อยให้เกิดของเสียมากมายและทำให้ต้องมีการนำมากำจัดอีกในภายหลัง การป้องกันนี้ควรยึดถือตามหลักการที่ว่า “กันไว้ดีกว่าแก้ แย่แล้วแก้ไม่ทัน”

2. เศรษฐกิจอะตอม (Atom Economy) คือ การใช้ทุกอะตอมอย่างคุ้มค่า หลักการข้อนี้เป็นการออกแบบวิธีการสังเคราะห์สารเคมี โดยให้ทุกสารที่ใช้ในกระบวนการเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการให้มากที่สุด ในกระบวนการสังเคราะห์สารเคมีหรือการเกิดปฏิกิริยาเคมีควรมีการออกแบบปฏิกิริยา และวางแผนให้สารเคมีที่เกี่ยวข้องได้มีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยาให้มากที่สุด ในทุกขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาจนกระทั่งได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ดังนั้น หัวใจสำคัญของหลักการข้อนี้ คือ การใช้ทุกอะตอมให้มีส่วนร่วมมากที่สุดในกระบวนการของการเกิดปฏิกิริยา

3. การสังเคราะห์ที่อันตรายน้อยกว่า (Less Hazardous Synthesis) ในกระบวนการสังเคราะห์ใดก็ตามที่มีความเป็นเคมีสีเขียวควรมีการออกแบบวิธีการสังเคราะห์ทางเคมี การใช้สารเคมีและการทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นพิษน้อย หรือไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม แนวทางปฏิบัติสำหรับการสังเคราะห์สารเคมีหรือการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ควรมีการออกแบบวิธีการหรือขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาให้อยู่บนพื้นฐานของความปลอดภัยเสมอ โดยมีการเลือกใช้กระบวนการที่ไม่เกิดปฏิกิริยารุนแรง ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน และ ไม่เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

4. การออกแบบสารเคมีที่ปลอดภัยกว่า (Designing Safer Chemicals) ควรมีการออกแบบผลิตภัณฑ์เคมีให้คงไว้ซึ่ง สมรรถภาพการทำงานในขณะที่ความเป็นพิษลดลง ควรมีการออกแบบโครงสร้างทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเหมาะสมสามารถใช้งานให้เกิดประสิทธิภาพได้สูงสุด และในขณะเดียวกันก็ต้องมีความเป็นพิษต่ำ หรือไม่เป็นอันตรายเลยจะดีที่สุด

KMITL

ซื่อสัตย์ ใฝ่รู้ สู้งาน

ISBN 978-616-62-6338-1

80 บาท

เคมีสีเขียว (GREEN CHEMISTRY)