

แนวคิดของเคมีสีเขียว

เคมีสีเขียว (Green Chemistry) หรือ เคมีเพื่อความยั่งยืน (Sustainable Chemistry) เป็นแนวคิดที่ได้รับการพัฒนาและเผยแพร่โดยสำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (US Environmental Protection Agency: EPA) ในช่วงทศวรรษ 1990 โดยมีเป้าหมายสำคัญในการออกแบบสารเคมีและกระบวนการที่ปลอดภัยยิ่งขึ้น เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ขณะเดียวกันยังคงรักษาความคุ้มค่าและความสามารถในการแข่งขันทางเศรษฐกิจอย่างยั่งยืน

เคมีสีเขียว ถูกนิยามว่าเป็น “การออกแบบผลิตภัณฑ์และกระบวนการทางเคมีเพื่อลดหรือขจัดการใช้และการเกิดของสารอันตราย” (1,2) ในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา ได้มีการจัดตั้งโครงการและนโยบายด้านเคมีสีเขียวขึ้นทั่วโลกเป็นจำนวนมาก โดยประเทศที่มีบทบาทสำคัญในระยะแรก ได้แก่ สหรัฐอเมริกา สหราชอาณาจักร และอิตาลี

โครงการสำคัญในระยะเริ่มแรกของเคมีสีเขียว ได้แก่

- US Presidential Green Chemistry Challenge Awards (1995) – รางวัลที่จัดตั้งขึ้นโดยรัฐบาลสหรัฐฯ เพื่อส่งเสริมการพัฒนาเทคโนโลยีและกระบวนการทางเคมีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
- Green Chemistry Institute (1997) – องค์กรที่ก่อตั้งขึ้นเพื่อส่งเสริมงานวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีด้านเคมีสีเขียว
- วารสาร Green Chemistry ของ Royal Society of Chemistry (1999) – การตีพิมพ์วารสารทางวิชาการที่มุ่งเน้นการเผยแพร่ผลงานวิจัยด้านเคมีสีเขียว

การออกแบบ (Design) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดของหลักเคมีสีเขียว เนื่องจากการออกแบบเป็นกระบวนการที่เกิดจากความตั้งใจของมนุษย์ ซึ่งไม่สามารถเกิดขึ้นได้โดยบังเอิญ การออกแบบมีความเกี่ยวข้องกับ ความแปลกใหม่ (Novelty), การวางแผน (Planning), และแนวคิดเชิงระบบ (Systematic Conception) หลักการ 12 ประการของเคมีสีเขียว ถือเป็น "กฎสำหรับการออกแบบ" ที่ช่วยให้นักเคมีสามารถพัฒนากระบวนการทางเคมีที่ยั่งยืนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมุ่งเน้นที่ การวางแผนอย่างรอบคอบในการสังเคราะห์สารเคมี (Chemical Synthesis) และการออกแบบโมเลกุลเพื่อลดผลกระทบที่ไม่พึงประสงค์ (Molecular Design to Minimize Adverse Effects)

ในปี 1998 Paul Anastas และ John Warner ได้ประมวลหลักการ 12 ข้อของเคมีสีเขียว ซึ่งเป็นกรอบแนวทางที่ชัดเจนสำหรับการออกแบบกระบวนการทางเคมีที่ยั่งยืน หลักการดังกล่าวให้ความสำคัญกับ เศรษฐกิจอะตอม (Atom Economy), ประสิทธิภาพด้านพลังงาน (Energy Efficiency), การใช้ วัตถุดิบที่สามารถหมุนเวียนได้ (Renewable Feedstocks) และการพัฒนาสารเคมีที่มีความปลอดภัยยิ่งขึ้น (Safer Chemical Design) เพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงสู่ความยั่งยืนในอุตสาหกรรมเคมีอย่างเป็นระบบ

หลักการ 12 ประการของเคมีสีเขียวเป็น เกณฑ์หรือแนวทางในการออกแบบ ที่ใช้เป็นการรอบสำหรับ พัฒนาศาสตร์เคมีและกระบวนการทางเคมีที่ปลอดภัยและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม หลักการเหล่านี้เป็นแนวทาง สำคัญในการลดผลกระทบทางลบที่เกี่ยวข้องกับสารเคมีและกระบวนการผลิต

การลดความเสี่ยงผ่านการออกแบบที่ปลอดภัยยิ่งขึ้น โดยทั่วไปแล้ว เคมีมักถูกมองว่าเป็นศาสตร์ที่ อันตราย และคนโดยทั่วไปมักเชื่อมโยงคำว่า "สารเคมี" (Chemical) กับ "สารพิษ" (Toxicity) แม้ว่าการป้องกัน ความเสี่ยงสามารถทำได้โดยใช้มาตรการด้านความปลอดภัย เช่น อุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล (PPE) แต่เมื่อ มาตรการเหล่านี้ล้มเหลว ความเสี่ยง (Risk) ซึ่งเป็นผลมาจาก "อันตราย (Hazard) × การรับสัมผัส (Exposure)" จะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ หากอันตรายของสารเคมีสูงและมาตรการควบคุมการได้รับสัมผัส ล้มเหลว ผลที่ตามมาอาจรุนแรง เช่น อาการบาดเจ็บหรือการเสียชีวิต ดังนั้น แนวทางของเคมีสีเขียวจึงมุ่งเน้น ไปที่ การลดอันตรายที่แท้จริงของสารเคมีและกระบวนการผลิต แทนที่จะพึ่งพาเฉพาะมาตรการควบคุมการ ได้รับสัมผัส

เป้าหมายหลักของ เคมีสีเขียว คือ การลดอันตราย (Hazard) ในทุกขั้นตอนของวัฏจักรชีวิตของสารเคมี ซึ่ง ได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามีคุณค่าทางเศรษฐกิจ อันตรายในบริบททางเคมีหมายถึง ความสามารถในการ ก่อให้เกิดผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์หรือสิ่งแวดล้อม อันตรายของสารเคมีและกระบวนการ ทางเคมีสามารถถูกออกแบบให้ลดลงได้ในทุกระดับของกระบวนการ ไม่ว่าจะเป็น

ความเป็นพิษ (Toxicity) ต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

อันตรายทางกายภาพ (Physical Hazards) เช่น การระเบิด (Explosion) และการติดไฟ (Flammability)

อันตรายระดับโลก (Global Hazards) เช่น การทำลายชั้นโอโซนในบรรยากาศสตราโตสเฟียร์ (Stratospheric Ozone Depletion) ความเสี่ยง (Risk) ที่เกี่ยวข้องกับอันตรายเหล่านี้อาจเกิดขึ้นจากลักษณะของวัตถุดิบ (Feedstock) และวัตถุดิบตั้งต้น (Raw Materials) ที่ใช้ในกระบวนการทางเคมี คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์สุดท้าย (Final Products) ที่ได้จากกระบวนการทางเคมี

หลักการทั้ง 12 ข้อ ประกอบไปด้วย

1 การป้องกันการเกิดของเสียสารเคมี (Waste prevention)

การป้องกันการเกิดของเสียดีกว่าการจัดการหรือกำจัดของเสียหลังจากที่ของเสียเกิดขึ้นแล้ว การป้องกันการเกิดของเสียตั้งแต่ต้นทางถือเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืนมากกว่าการบำบัดหรือทำ ความสะอาดของเสียหลังจากที่มันถูกสร้างขึ้นแล้ว หลักการนี้สะท้อนให้เห็นถึงแนวคิดของเคมีสีเขียวที่มุ่งเน้น การลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยการออกแบบกระบวนการและผลิตภัณฑ์ที่ไม่ก่อให้เกิดของเสียตั้งแต่ แรกเริ่ม ของเสียสามารถปรากฏในหลายรูปแบบ และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระดับที่แตกต่างกันไป

ขึ้นอยู่กับลักษณะของของเสียนั้น ความเป็นพิษ ปริมาณ หรือวิธีการปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม หากกระบวนการทางเคมีได้รับการออกแบบมาโดยสูญเสียวัตถุดิบเริ่มต้นเป็นจำนวนมากตั้งแต่ต้น ก็จะหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะเกิดของเสียตามมา ซึ่งโดยนิยามแล้วถือเป็นสิ่งไม่พึงประสงค์อย่างยิ่งในกระบวนการผลิตที่ยั่งยืน

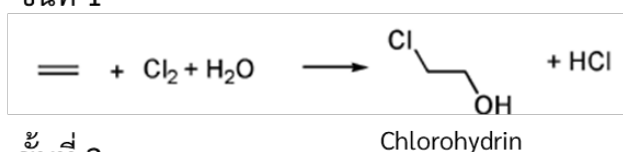
ในปี ค.ศ. 1992 โรเจอร์ เชลดอน (Roger Sheldon) ได้เสนอแนวคิดที่ในปัจจุบันเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายในชื่อว่า “E-Factor” (3) หรือ “ปัจจัยผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม” ซึ่งเป็นตัวชี้วัดที่ใช้ในการคำนวณปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นต่อการผลิต ผลิตภัณฑ์หนึ่งกิโลกรัม โดยเป็นวิธีการประเมิน “ความยอมรับได้ทางสิ่งแวดล้อม” ของกระบวนการผลิตทางเคมี ทั้งนี้ E-Factor ถือเป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญในการเปรียบเทียบและปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงสิ่งแวดล้อมของกระบวนการทางอุตสาหกรรมเคมีในบริบทของเคมีสีเขียว.

ตัวชี้วัดด้านสิ่งแวดล้อม หรือ Environmental Factor (E-Factor) ซึ่งได้รับการยอมรับและนำไปใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมเคมี สะท้อนให้เห็นถึงความไม่มีประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมเคมีบางประเภทในอดีต และได้เปิดโอกาสให้มีการคิดค้นแนวทางแก้ไขที่สร้างสรรค์ หนึ่งในตัวอย่างที่เป็นที่รู้จักอย่างดี คือ กระบวนการสังเคราะห์เอทิลีนออกไซด์ในระยะเริ่มแรก ซึ่งดำเนินการผ่านสารคลอโรไฮดรินเป็นตัวกลาง (ดังแสดงในรูปที่ 3a) โดยมีค่า E-Factor เท่ากับ 5 กล่าวคือ ในการผลิตผลิตภัณฑ์ 1 กิโลกรัม จะเกิดของเสียมากถึง 5 กิโลกรัม ซึ่งยังไม่รวมถึงน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยผลพลอยได้จากคลอรีนด้วยซ้ำ

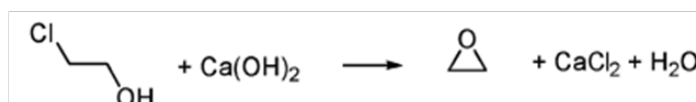
อย่างไรก็ตาม เมื่อกระบวนการสังเคราะห์ได้รับการปรับเปลี่ยนให้ใช้ก๊าซออกซิเจนในรูปโมเลกุลแทนการใช้คลอรีน ความจำเป็นในการใช้คลอรีนจึงถูกตัดออก ส่งผลให้ค่า E-Factor ลดลงเหลือเพียง 0.3 กิโลกรัมของของเสียต่อผลิตภัณฑ์ 1 กิโลกรัม ซึ่งแสดงถึงการลดปริมาณของเสียได้มากกว่ากระบวนการเดิมถึงกว่า 16 เท่า อีกทั้งยังสามารถจัดการเกิดน้ำเสียที่ปนเปื้อนคลอรีนออกไปโดยสิ้นเชิงด้วยเช่นกัน

การเตรียม ethylene oxide ด้วยวิธีทั่วไป

ขั้นที่ 1



ขั้นที่ 2



E-factor = 5 สำหรับทั้งสองขั้นตอน

การเตรียม ethylene oxide ด้วยวิธีใหม่

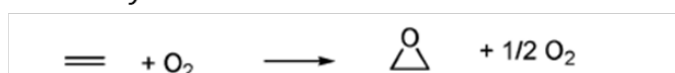


Figure 3a) การสังเคราะห์ Ethylene oxide ด้วยวิธีต่างๆ และ E-factor ที่เกิดขึ้น

อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงการเกิดผลพลอยได้หรือของเสียได้ทั้งหมด ควรพิจารณาแนวทางนวัตกรรมอื่น ๆ โดยหนึ่งในแนวทางที่มีประสิทธิภาพคือ แนวคิดนิเวศอุตสาหกรรม (industrial ecology) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนของเสียจากกระบวนการหนึ่งให้กลายเป็นวัตถุดิบใหม่ที่มีคุณค่าสำหรับอีกกระบวนการหนึ่ง โดยนำกลับเข้าสู่ระบบวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ แนวทางนี้ได้รับการนำไปประยุกต์ใช้แล้วในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ

2. เศรษฐศาสตร์ทางอะตอม (Atom economy)

ในปี ค.ศ. 1990 Barry Trost ได้เสนอแนวคิดด้านประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี ซึ่งเรียกว่า “เศรษฐศาสตร์ทางอะตอม” หรือ Atom Economy (AE) แนวคิดนี้มุ่งเน้นที่การใช้วัตถุดิบตั้งต้นให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยมีเป้าหมายให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายประกอบด้วยอะตอมจากสารตั้งต้นให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ กล่าวคือ ปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพเชิงอะตอมในอุดมคติจะต้องสามารถนำอะตอมของสารตั้งต้นทั้งหมดมาไว้ในผลิตภัณฑ์ได้อย่างสมบูรณ์

วิธีการสังเคราะห์ควรได้รับการออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการนำวัตถุดิบทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการไปสู่ผลิตภัณฑ์สุดท้ายให้ได้มากที่สุด เศรษฐศาสตร์ทางอะตอมสามารถคำนวณได้โดยใช้สูตร:

$$\text{เศรษฐศาสตร์ทางอะตอม (\%)} = \left(\frac{\text{มวลโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ}}{\text{มวลโมเลกุลรวมของสารตั้งต้นทั้งหมด}} \right) \times 100$$

หากปฏิกิริยามีเศรษฐศาสตร์เชิงอะตอม 100% หมายความว่าอะตอมทั้งหมดของสารตั้งต้นถูกใช้ไปในผลิตภัณฑ์สุดท้ายโดยไม่มีของเสียเกิดขึ้น

ตัวอย่างของปฏิกิริยาที่มีเศรษฐศาสตร์เชิงอะตอมสูงและต่ำ

1. ปฏิกิริยาที่มีเศรษฐศาสตร์เชิงอะตอมสูง ได้แก่ ปฏิกิริยาการเติม (Addition Reaction)

ตัวอย่าง: ไฮโดรจิเนชันของเอทิลีนเป็นอีเทน



-มวลรวมของสารตั้งต้น = $(28 + 2) = 30 \text{ g/mol}$

-มวลของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ = 30 g/mol

$$\text{เศรษฐศาสตร์เชิงอะตอม} = \frac{30}{30} \times 100 = 100\%$$



ข้อดี:

-ไม่มีของเสียเกิดขึ้น

-สารตั้งต้นทั้งหมดถูกใช้ในผลิตภัณฑ์สุดท้าย

2. ปฏิกิริยาที่มีเศรษฐศาสตร์เชิงอะตอมต่ำ ได้แก่ ปฏิกิริยาการแทนที่ (Substitution Reaction)

ตัวอย่าง: การสังเคราะห์โบรมออีเทนจากเอทานอล



มวลรวมของสารตั้งต้น = $(46 + 81) = 127 \text{ g/mol}$

มวลของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ = 109 g/mol

$$\text{เศรษฐศาสตร์เชิงอะตอม} = \frac{109}{127} \times 100 = 85.8\%$$

✗ ข้อเสีย:

- มีน้ำ (H_2O) เป็นผลพลอยได้ ซึ่งไม่ใช่ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ
- บางส่วนของสารตั้งต้นกลายเป็นของเสีย

3. การสังเคราะห์ที่มีอันตรายน้อยลง (Less hazardous synthesis)

“Wherever practicable, synthetic methodologies should be designed to use and generate substances that possess little or no toxicity to human health and the environment.”

วิธีการสังเคราะห์ควรถูกออกแบบให้ใช้สารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด

แนวทางสำคัญของการสังเคราะห์ที่มีอันตรายน้อยลง

- เลือกสารตั้งต้นและตัวทำละลาย ที่มีความปลอดภัยสูงกว่าหรือเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
- ใช้ปฏิกิริยาที่ลดหรือหลีกเลี่ยงสารพิษ เช่น การใช้ปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวกลางที่เป็นพิษ

เมื่อพิจารณาเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงทางเคมี มักเปรียบได้กับการมองเห็นเพียง “ยอดภูเขาน้ำแข็ง” เท่านั้น เนื่องจากในกระบวนการสังเคราะห์แบบหลายขั้นตอน หรือแม้แต่ในกระบวนการขั้นตอนเดียว อาจมีการใช้สารเคมีอันตรายและเป็นพิษแฝงอยู่ในประวัติของกระบวนการสังเคราะห์ ซึ่งถึงแม้ว่าขั้นตอนทางวิศวกรรมการผลิตจะสามารถควบคุมไม่ให้เกิดการปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้ แต่ตัวกระบวนการเองก็ยังคงมีความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องอยู่ การออกแบบใหม่เพื่อแทนที่ด้วยสารเคมีที่มีอันตรายน้อยกว่าจึงเป็นหัวใจสำคัญของแนวคิดเคมีเชิงเขียว (Green Chemistry) (4)

ตัวอย่างหนึ่งคือ รางวัล Green Chemistry Challenge Award ที่ได้รับโดย Lilly Research Laboratories ในปี ค.ศ. 1999 จากการออกแบบกระบวนการสังเคราะห์ยาแก้อาการชักชนิดใหม่ LY300164 ซึ่งเป็นตัวยาที่กำลังพัฒนาเพื่อรักษาโรคลมชักและความผิดปกติทางระบบประสาท กระบวนการใหม่นี้เริ่มต้นด้วยการใช้ยีสต์ *Zygosaccharomyces rouxii* ในระบบปฏิกิริยาแบบสามเฟส ซึ่งช่วยให้สามารถแยกองค์ประกอบอินทรีย์ของปฏิกิริยาออกจากของเสียในเฟสน้ำได้ นอกจากนี้ ขั้นตอนสำคัญอีกประการหนึ่งคือการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างเลือกจำเพาะโดยใช้อากาศอัด ซึ่งช่วยจัดการใช้โครเมียมออกไซด์ซึ่งอาจก่อให้เกิดมะเร็ง และป้องกันการเกิดของเสียที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบ

การปรับเปลี่ยนกลยุทธ์การสังเคราะห์ดังกล่าวส่งผลดีอย่างมากต่อสิ่งแวดล้อม โดยสามารถลดการใช้ตัวทำละลายได้ถึงประมาณ 34,000 ลิตร และลดของเสียที่มีโครเมียมลงได้ 300 กิโลกรัมต่อการผลิต LY300164 จำนวน 100 กิโลกรัม อีกทั้งยังลดขั้นตอนในการแยกผลิตภัณฑ์กลาง โดยแยกเพียง 3 จาก 6 ตัวกลางเท่านั้น ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงในการสัมผัสสารเคมีของผู้ปฏิบัติงานและลดต้นทุนการผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ ยิ่งไปกว่านั้น ประสิทธิภาพของกระบวนการยังดีขึ้นอย่างมาก โดยร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้เพิ่มจาก 16% เป็น 55%

ความแตกต่าง เมื่อเปรียบเทียบกับหลักการเคมีสีเขียว ข้อที่ 3 ซึ่งเน้นที่วิธีการสังเคราะห์เคมี หลักการข้อที่ 4 นี้ให้ความสำคัญกับตัวผลิตภัณฑ์เคมีโดยตรง

4. การออกแบบสารเคมีที่ปลอดภัยขึ้น (Safer chemicals)

ผลิตภัณฑ์ทางเคมีควรได้รับการออกแบบให้คงประสิทธิภาพในการทำงาน ขณะเดียวกันต้องลดความเป็นพิษลง หลักการนี้เน้นให้ นักวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรมออกแบบสารเคมีที่มีประสิทธิภาพสูง แต่ปลอดภัยต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม โดย ไม่ลดทอนคุณสมบัติของสาร ตัวอย่างเช่น การพัฒนายาที่มีฤทธิ์รักษาโรคโดยมีผลข้างเคียงน้อยลง หรือการออกแบบสารทำความสะอาดที่มีฤทธิ์ดีแต่ไม่เป็นพิษ

ผลิตภัณฑ์เคมีควรได้รับการออกแบบให้สามารถคงประสิทธิภาพของการใช้งานไว้ได้ ขณะเดียวกันต้องลดความเป็นพิษด้วย ในอุตสาหกรรมเภสัชกรรม แนวคิดนี้เรียกว่า “อัตราส่วนของประสิทธิภาพต่อความเป็นพิษ” (efficacy/toxicity ratio) ซึ่งแน่นอนว่าผลิตภัณฑ์เคมีที่ดีต้องแสดงผลการทำงานตามที่ต้องการ แต่ในหลายกรณี ผลกระทบที่ไม่ได้ตั้งใจจากปฏิกิริยาข้างเคียงกลับเป็นปัญหาที่ตามมา เช่น สีย้อมแดงที่ก่อมะเร็ง พลาสติกไฮเซอร์ที่รบกวนระบบต่อมไร้ท่อ และสารทำความสะอาดที่ทำลายชั้นโอโซน ชุมชนทางเคมีได้พัฒนาองค์ความรู้และความเชี่ยวชาญในการระบุกลไกที่ก่อให้เกิดผลกระทบในแง่ลบเหล่านี้้อย่างละเอียด เราจึงควรฝึกฝนนักเคมีสังเคราะห์ให้เข้าใจกลไกเหล่านี้ได้ลึกซึ้งยิ่งขึ้น

กองทุนสัตว์ป่าโลกสากล (World Wildlife Foundation; WWF) ได้ดำเนินแคมเปญเพื่อลดและเลิกใช้สารป้องกันการเกาะติดของสิ่งมีชีวิตในทะเลที่ใช้เคลื่อนเรือเดินทะเล โดยเรือขนาดใหญ่มักใช้สารกลุ่มออร์กาโนทิน เช่น TBT (tributyltin) เพื่อยับยั้งการเกาะของเพรียงและพืชทะเลซึ่งเพิ่มแรงต้านขณะแล่นในน้ำ อย่างไรก็ตาม WWF ได้ให้ข้อมูลว่า “สารประกอบออร์กาโนทิน เช่น TBT ถือเป็นหนึ่งในสารเคมีที่มีความเป็นพิษสูงที่สุดเท่าที่เคยถูกปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมทางทะเล แม้จะมีความเข้มข้นต่ำมากก็สามารถก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในทะเลอย่างมีนัยสำคัญ”

บริษัท Rohm and Haas ได้พัฒนาทางเลือกที่ไม่เป็นพิษแทนการใช้สารออร์กาโนทิน โดยผลิตภัณฑ์ที่ชื่อว่า Sea-Nine 2 ซึ่งได้รับรางวัล Green Chemistry Challenge Award ในปี ค.ศ. 1996 มีคุณสมบัติสามารถย่อยสลายได้เร็วในสิ่งแวดล้อม ไม่สะสมในห่วงโซ่อาหาร และไม่มีพิษเรื้อรังต่อสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศทางทะเลโดยรอบ

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา มาตรการควบคุมอุตสาหกรรมเคมีได้เปลี่ยนแปลงจากการพึ่งพากฎหมายและการฟ้องร้อง ไปสู่เครื่องมือหลากหลายรูปแบบ เช่น การเปิดเผยข้อมูลและการให้สิ่งจูงใจ อย่างไรก็ตาม แม้จนถึงปัจจุบัน ยังมีเพียง 55% ของสารเคมีในบัญชี Toxic Release Inventory ที่มีข้อมูลการทดสอบอย่างครบถ้วน ในกลุ่มสารเคมีที่ผลิตในปริมาณสูง (มากกว่า 1 ล้านปอนด์ต่อปี) จำนวน 3,000 รายการ พบว่า 43% ยังไม่มีข้อมูลการทดสอบพิษวิทยาแม้แต่ขั้นพื้นฐาน และมีเพียง 7% เท่านั้นที่มีข้อมูลครบถ้วนในชุดการทดสอบพื้นฐาน

จากสารเคมีมากกว่า 45,000 รายการที่อยู่ภายใต้การกำกับดูแลของสำนักงานคุ้มครองสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐฯ (EPA) มีเพียงประมาณ 1,000 รายการเท่านั้นที่ผ่านการทดสอบด้านผลเฉียบพลัน และมีเพียง 500 รายการที่ได้รับการทดสอบในด้านการก่อมะเร็ง ผลกระทบต่อการสืบพันธุ์ หรือการก่อการกลายพันธุ์

หากจะเติมเต็มข้อมูลพื้นฐานด้านพิษวิทยาสำหรับสารเคมีที่มีปริมาณการผลิตสูงเหล่านี้ คาดว่าจะใช้งบประมาณเพียง 427 ล้านดอลลาร์สหรัฐฯ ซึ่งคิดเป็นเพียง 0.2% ของยอดขายรวมของ 100 บริษัทเคมีชั้นนำของโลกเท่านั้น

เป้าหมายของเคมีสีเขียวยังคงมุ่งเน้นไปที่การจัดการใช้สารเคมีอันตราย โดยตัวอย่างหนึ่งคือกรณีของ Argonne National Laboratory (ANL) ซึ่งประสบความสำเร็จในการใช้เอทิลแลคเตต (Ethyl Lactate) เป็นทางเลือกที่ปลอดภัยกว่า ซึ่งสอดคล้องกับการดำเนินการตามหลักการข้อที่ 5 ของเคมีสีเขียว (หลักการว่าด้วยการใช้สารที่ปลอดภัยยิ่งขึ้น)

5. ตัวทำละลายและสารช่วยที่ปลอดภัยขึ้น (Safer solvents and auxiliaries)

การใช้สารช่วย (เช่น ตัวทำละลาย, สารช่วยแยกในการสกัดต่างๆ) ในกระบวนการทางเคมีควรถูกกำจัดออกให้มากที่สุด หรือหากจำเป็นต้องใช้ ควรเลือกสารที่ปลอดภัยไม่มีอันตรายทั้งต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม

สารช่วย (Auxiliary Substances) เป็นสารที่ใช้ในกระบวนการทางเคมีแต่ ไม่เกี่ยวข้องโดยตรงกับผลิตภัณฑ์สุดท้าย ตัวอย่างเช่น:

- ✓ ตัวทำละลาย (Solvents) – ใช้ในการละลายตัวถูกละลาย ได้แก่ สารตั้งต้นหรือควบคุมปฏิกิริยา
- ✓ สารช่วยแยก (Separation Agents) – เช่น สารสกัด (Extractants) หรือ สารตกตะกอน (Precipitants)
- ✓ สารรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst Supports) – ใช้เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น

หลักการของ เคมีสีเขียว (Green Chemistry) สนับสนุนให้ ลดหรือลด การใช้สารช่วยเหล่านี้ เพราะมักก่อให้เกิด ของเสีย และเพิ่มผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพมนุษย์

ตัวทำละลายถือเป็นหนึ่งในหัวข้อที่ได้รับความสนใจมากที่สุดในงานทางด้านเคมีสีเขียว เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพและความยั่งยืนของกระบวนการทางเคมี โดยทั่วไป ตัวทำละลายมักเป็นองค์ประกอบหลักที่ก่อให้เกิดของเสียในปริมาณมากระหว่างการสังเคราะห์และกระบวนการทางเคมี นอกจากนี้ ตัวทำละลายทั่วไปหลายชนิดยังมีความเป็นพิษ ติดไฟได้ง่าย และ/หรือมีฤทธิ์กัดกร่อน ซึ่งคุณสมบัติในการระเหยกลายเป็นไอได้ง่ายและความสามารถในการละลายของตัวทำละลายเหล่านี้มีส่วนทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ น้ำ และดิน อีกทั้งยังเพิ่มความเสี่ยงต่อการสัมผัสสารอันตรายของแรงงานอุตสาหกรรม และเป็นสาเหตุของอุบัติเหตุร้ายแรงในหลายกรณี

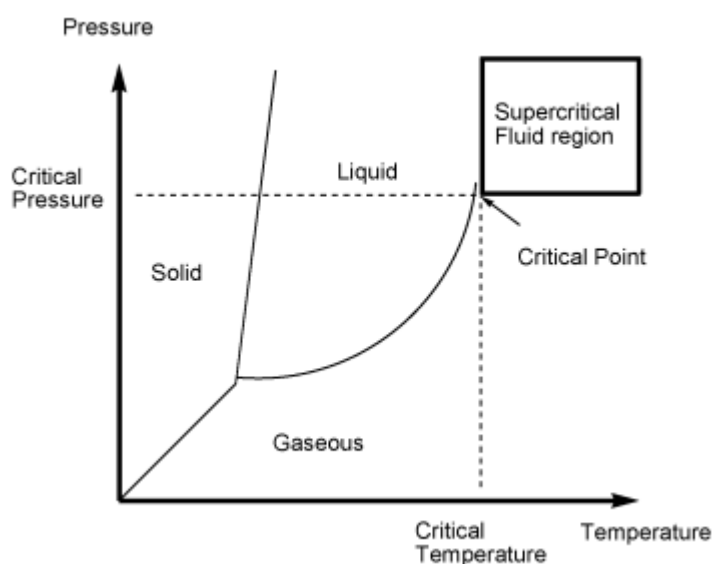
แม้ว่าการนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่จะเป็นแนวทางหนึ่งในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่กระบวนการดังกล่าวมักต้องอาศัยการกลั่นที่ใช้พลังงานสูง และอาจเกิดการปนเปื้อนข้ามชนิดของสารเคมีได้ด้วยเหตุนี้ นักเคมีจึงได้พัฒนาทางเลือกที่ปลอดภัยยิ่งขึ้นเพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าว ระบบที่ไม่ใช้ตัวทำละลาย (solventless systems) น้ำ (water) ของไหลเหนือจุดวิกฤติ (supercritical fluids, SCF) และล่าสุดของเหลวไอออนิก (ionic liquids) ได้รับความสนใจในฐานะตัวเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นแนวทางที่สอดคล้องกับหลักการของเคมีสีเขียวในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยไม่ลดทอนประสิทธิภาพของกระบวนการทางเคมี

น้ำเป็นโมเลกุลที่พบได้มากที่สุดในโลก และมักถูกกล่าวถึงว่าเป็น "ตัวทำละลายสากล" (universal solvent) ที่มีความปลอดภัยสูงและไม่ก่อให้เกิดอันตราย ดังนั้น การดำเนินปฏิกิริยาเคมีโดยใช้ตัวทำละลายเป็นน้ำจึงให้ข้อได้เปรียบอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการทางเคมีที่ต้องดำเนินการในระดับอุตสาหกรรม

คุณสมบัติของน้ำช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาได้ในบางกรณี เช่น อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ดีขึ้นอันเป็นผลจาก hydrophobic effect ซึ่งช่วยเร่งอัตราการชนกันของสารตั้งต้นที่ไม่ละลายน้ำ นอกจากนี้ น้ำยังช่วยให้

การแยกผลิตภัณฑ์เป็นไปได้ง่ายขึ้น เนื่องจากสารอินทรีย์หลายชนิดไม่ละลายในน้ำ ตัวอย่างหนึ่งที่แสดงให้เห็นถึงข้อดีของน้ำในฐานะตัวทำละลาย คือการปรับปรุงปฏิกิริยา Diels–Alder ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อดำเนินในสภาวะที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย อย่างไรก็ตาม แม้ว่าน้ำจะมีศักยภาพสูงในฐานะตัวทำละลายที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่ข้อจำกัดสำคัญที่อาจเป็นอุปสรรคต่อการประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม คือ ความเสี่ยงของการปนเปื้อนของน้ำ ซึ่งอาจต้องใช้พลังงานสูงในการบำบัดและฟื้นฟูให้กลับมาใช้งานได้อย่างปลอดภัย

ของไหลเหนือจุดวิกฤติ (Supercritical Fluids, SCF) เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่มีศักยภาพในการทดแทนตัวทำละลายอินทรีย์แบบดั้งเดิม และได้รับความสนใจในการศึกษาวิจัยอย่างกว้างขวางในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา ของไหลเหล่านี้คือสารที่ถูกทำให้ร้อนและถูกอัดแรงดันจนมีอุณหภูมิและความดันสูงกว่าจุดวิกฤติ (critical point) ซึ่งทำให้พวกมันมีคุณสมบัติทางกายภาพที่อยู่ระหว่างของเหลวและก๊าซ โดยสามารถแพร่กระจายได้ดีเหมือนก๊าซ แต่ยังคงมีความสามารถในการละลายสูงคล้ายของเหลว คุณสมบัติเฉพาะตัวเหล่านี้ทำให้ SCF เป็นตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพสูง และสามารถปรับเปลี่ยนคุณสมบัติได้โดยการควบคุมอุณหภูมิและความดัน ดังรูป



รูป phase diagram แสดงบริเวณของไหลเหนือจุดวิกฤติ (supercritical region)

ของไหลเหนือจุดวิกฤติ สามารถสังเคราะห์ได้จากสารหลายชนิด เช่น น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน เมทานอล เอทานอล และอะซิโตน โดยเฉพาะ คาร์บอนไดออกไซด์เหนือจุดวิกฤติ (supercritical carbon dioxide, scCO_2) ซึ่งเป็นหนึ่งในของไหลเหนือจุดวิกฤติ ที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากมีความปลอดภัย ใช้งานง่าย และสามารถนำมาใช้เป็นตัวทำละลายอเนกประสงค์ งานวิจัยของ Poliakoff, Leitner, Jessop, DeSimone และนักวิจัยคนอื่น ๆ (ref-10) ได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของ scCO_2 ในกระบวนการทางเคมีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ข้อได้เปรียบที่สำคัญของไหลเหนือจุดวิกฤติ โดยเฉพาะ scCO_2 คือ ความสามารถในการเปลี่ยนสถานะ เมื่ออุณหภูมิหรือความดันลดลง ซึ่งช่วยให้สามารถควบคุมกระบวนการได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่ออยู่เหนือจุดวิกฤติ คาร์บอนไดออกไซด์จะอยู่ในสถานะของเหลวที่สามารถใช้เป็นตัวทำละลายในปฏิกิริยาเคมีได้ แต่เมื่อความดันลดลง มันจะกลายเป็นก๊าซ และสามารถกำจัดออกจากระบบได้อย่างสมบูรณ์ผ่านกระบวนการกำจัดก๊าซออกไป

scCO_2 ได้รับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย โดยหนึ่งในตัวอย่างที่มีชื่อเสียงที่สุดคือ การสกัดคาเฟอีนจากเมล็ดกาแฟดิบ (decaffeination of green coffee beans) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ปลอดภัย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์แบบเดิม นอกจากนี้ scCO_2 ยังถูกใช้เป็นทางเลือกแทนเพอร์คลอโรเอทิลีนในกระบวนการซักแห้ง (dry cleaning) ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นของของไหลเหนือจุดวิกฤติ โดยเฉพาะ scCO_2 ทำให้มันเป็นทางเลือกที่มีคุณค่าในการทดแทนตัวทำละลายอินทรีย์แบบดั้งเดิม ซึ่งช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการทางเคมี

ในปี ค.ศ. 1996 บริษัท Dow Chemical ได้รับรางวัล Green Chemistry Challenge Award จากการพัฒนาวิธีการผลิตโฟมสไตรีน (Styrofoam) แบบใหม่ที่ไม่ใช้สาร CFCs ซึ่งเป็นสารทำลายชั้นโอโซน โดยกระบวนการแบบดั้งเดิมมักใช้สารเป่า (blowing agents) ที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการทำลายชั้นโอโซน การเพิ่มภาวะโลกร้อน และการก่อหมอกควัน ส่วนกระบวนการใหม่ของ Dow ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งเป็นสารที่ไม่เป็นพิษ และ CO_2 ที่ใช้ในกระบวนการนี้ได้มาจากผลพลอยได้ของแหล่งทางการค้าและแหล่งธรรมชาติเดิม จึงไม่ก่อให้เกิดการเพิ่มของปริมาณ CO_2 ในบรรยากาศโดยสุทธิ ปัจจุบันกระบวนการนี้นำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ถาดบรรจุอาหารเนื้อสัตว์ สัตว์ปีก ผักผลไม้ ภาชนะพลาสติกฟูด กล่องไข่ และภาชนะสำหรับการบริการต่าง ๆ

ในสหรัฐอเมริกา มีการใช้ตัวทำละลาย (solvents) ประมาณ 3.8 ล้านตันต่อปี โดยตัวทำละลายเหล่านี้ ซึ่งมักได้จากปิโตรเลียม ถูกใช้ในกระบวนการทำความสะอาดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การพิมพ์ สิ่งทอ และถูกผสมในผลิตภัณฑ์ เช่น กาว สี และสารเคลือบผิว ตัวทำละลายหลายชนิดมีความเกี่ยวข้องกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น CFCs และไตรคลอโรเอทิลีนที่ทำลายชั้นโอโซน สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ที่ก่อให้เกิดหมอกควัน และไตรคลอโรเอทิลีนที่ปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน นอกจากนี้ บางชนิดยังเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และถูกจัดอยู่ในรายชื่อสารพิษของ EPA เช่น เอทิลีนไกลคอลอีเทอร์ คลอโรฟอร์ม เบนซีน ไซลีน คาร์บอนเตตระคลอไรด์ และโทลูอีน บางชนิดมีความเสี่ยงต่อการก่อมะเร็งในระยะยาว เช่น เมทิลีนคลอไรด์ และอีกหลายชนิดเป็นสารไวไฟหรือสารกัดกร่อน จึงเป็นความกังวลของ OSHA

ตามที่กล่าวไว้ข้างต้น กระบวนการนวัตกรรมของ ANL ที่ลดต้นทุนของการผลิตเอทิลแลคเตท (Ethyl Lactate) อาจช่วยลดการใช้ตัวทำละลายแบบดั้งเดิมได้ถึง 25–80% ซึ่งเป็นโอกาสทางการตลาดขนาดใหญ่ที่

ดึงดูดผู้ประกอบการรายใหม่เข้ามาแข่งขัน นวัตกรรมของ Cargill Dow ในการผลิตพลาสติกชีวภาพจากกรดแลคติก (เพื่อแสดงถึงหลักการข้อที่ 7 ของเคมีสีเขียว) ยังได้เปิดทางสู่กระบวนการสังเคราะห์แบบใหม่ที่เปลี่ยนกรดแลคติกเป็นเอทิลแลคเตทเช่นกัน บริษัท Purac จากเนเธอร์แลนด์ ซึ่งเป็นผู้ผลิตกรดแลคติกที่ใหญ่ที่สุดในโลก กำลังขยายเข้าสู่ตลาดสหรัฐอเมริกา และร่วมมือกับกลุ่มพันธมิตรในประเทศ

ทั้งนี้ ต้องย้ำว่าความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจของกระบวนการใหม่ในการผลิตตัวทำละลายของ ANL มีรากฐานมาจากการประหยัดพลังงานเป็นสำคัญ

6. การออกแบบกระบวนการเพื่อใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ (Energy efficiency)

ความต้องการพลังงานในกระบวนการทางเคมีควรได้รับการตระหนักถึงทั้งในแง่ของ ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและต้นทุนทางเศรษฐกิจ ดังนั้น ควรมีการลดการใช้พลังงานให้น้อยที่สุดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการและลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม แนวทางหนึ่งที่สอดคล้องกับหลักการของเคมีสีเขียวคือ การดำเนินกระบวนการสังเคราะห์ภายใต้ *อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ (ambient temperature and pressure)* เพื่อลดการใช้พลังงานส่วนเกินที่จำเป็นสำหรับการควบคุมสภาวะปฏิกิริยา วิธีการดังกล่าวไม่เพียงช่วยลดต้นทุนด้านพลังงาน แต่ยังช่วยลดความเสี่ยงด้านความปลอดภัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้สภาวะที่รุนแรงอีกด้วย

พลังงานที่ไม่ได้ถูกนำไปใช้ (unutilized energy) อาจถือเป็นของเสียในเชิงทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม ดังนั้น การออกแบบปฏิกิริยาหรือระบบทางเคมีที่ไม่ต้องใช้พลังงานสูงจึงเป็นเป้าหมายที่สำคัญ ในการพัฒนาเคมีที่ยั่งยืน แนวทางหนึ่งที่นักเคมีสามารถนำมาใช้เพื่อลดความต้องการพลังงานคือ การลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา (activation energy) หรือการเลือกสารตั้งต้นที่เหมาะสมเพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้ที่อุณหภูมิห้อง วิธีนี้ช่วยลดการใช้พลังงานโดยตรง และยังส่งผลให้เกิดประโยชน์ทางอ้อม เช่น ลดต้นทุนพลังงาน ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการทางอุตสาหกรรมในระยะยาว

การเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานของระบบเคมีเป็นเพียงส่วนหนึ่งของแนวทางในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม พลังงานทางเลือกอื่นๆ จึงมีความจำเป็นในการพัฒนาอย่างยั่งยืน พลังงานหมุนเวียนหลายประเภทได้รับการระบุว่ามีความยั่งยืนในการนำมาใช้ เช่น เชื้อเพลิงชีวภาพ (biofuels), พลังงานแสงอาทิตย์ (ทั้งพลังงานความร้อนและเซลล์แสงอาทิตย์), พลังงานลม, พลังงานน้ำ, พลังงานความร้อนใต้พิภพ, และ เซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน นักเคมีมีบทบาทสำคัญในการรับมือกับความท้าทายใหม่นี้ โดยสามารถออกแบบกระบวนการแปลงทางเคมีที่มีประสิทธิภาพพลังงานสูง รวมถึงพัฒนา วัสดุและระบบทางเคมีที่สามารถนำไปใช้

ในการเก็บเกี่ยวและแปลงพลังงานธรรมชาติ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การบูรณาการเคมีสีเขียวเข้ากับเทคโนโลยีพลังงานทดแทนจึงเป็นกุญแจสำคัญในการสร้างระบบที่ยั่งยืนและลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล

พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar energy) ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ยั่งยืนหลักบนโลก ถือเป็นทางเลือกหนึ่งในการทดแทนการใช้ปิโตรเลียม มีความพยายามอย่างมากในการศึกษาวิจัยและออกแบบระบบเคมีที่สามารถแปลงรังสีแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า (voltaic energy) โดยเฉพาะการพัฒนา เซลล์แสงอาทิตย์อินทรีย์ (organic solar cells) ซึ่งได้รับความสนใจมากกว่าเซลล์ประเภทอื่น ๆ เนื่องจากมีประสิทธิภาพที่สูงกว่า

หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้อยู่ที่ คุณสมบัติของวัสดุ ที่ใช้ในการดูดซับพลังงานโฟตอนจากรังสีแสงอาทิตย์ ซึ่งการดูดซับนี้ทำให้เกิดสถานะกระตุ้นที่สามารถส่งต่อไปเพื่อสร้างกระแสไฟฟ้า (electronic current) ได้ การออกแบบ วัสดุก่อสร้างและโพลีเมอร์ ที่สามารถแปลงแสงให้เป็นกระแสไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพยังคงเป็นความท้าทายสำคัญ และเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อความสำเร็จของการพัฒนานวัตกรรมด้านนี้

7. วัสดุเริ่มต้น หรือสารตั้งต้นที่สามารถทดแทนได้

วัสดุเริ่มต้น (feedstock) หรือสารตั้งต้นในกระบวนการผลิต ควรเลือกใช้วัสดุที่สามารถ ทดแทนได้ (renewable) มากกว่าการใช้วัสดุที่อาจหมดไป (depleting) หากเป็นไปได้ทั้งในด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ การเลือกใช้วัสดุที่ทดแทนได้จะช่วยลดผลกระทบต่อทรัพยากรธรรมชาติ และส่งเสริมการพัฒนาอย่างยั่งยืนในระยะยาว

ได้มีการประมาณการว่า ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ในการผลิต มาจากวัสดุเริ่มต้นจากปิโตรเลียมหรือก๊าซธรรมชาติ ซึ่งการหมดไปของทรัพยากรเหล่านี้จะมีผลกระทบต่อหลายด้านของชีวิตผู้บริโภคและเศรษฐกิจโดยรวม การหันมาใช้ วัสดุเริ่มต้นที่สามารถทดแทนได้ (renewable feedstocks) ทั้งในด้านวัสดุและพลังงาน จึงกลายเป็นเรื่องเร่งด่วนในปัจจุบัน

วัสดุชีวมวล (biomass) ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากสิ่งมีชีวิต ถือเป็น วัสดุเริ่มต้นที่สามารถทดแทนได้หลัก ทั้งสำหรับการผลิตวัสดุและพลังงาน บรรดาวัสดุเหล่านี้รวมถึง ไม้, พืชผล, ของเสียจากการเกษตร, และอาหารเป็นต้น

วัสดุทดแทนอื่นๆ ที่สามารถนำมาใช้แทนผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ได้แก่ เซลลูโลส, ลิกนิน, ซูเบอร์ริน และสารประกอบจากไม้ชนิดอื่นๆ พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตส์ (polyhydroxyalkanoates), กรดแลกติก, ไคติน, แป้ง, กลีเซอรอล และน้ำมันพืช (5–7)

ลิกนิน เป็นของเสียหลักจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ ซึ่งถูกใช้เป็นแหล่งพลังงานผ่านการเผาไหม้มาเป็นเวลานาน อย่างไรก็ตาม ในช่วงที่ผ่านมา ลิกนินได้รับความสนใจในการนำมาใช้เป็นสารกระจายตัว (dispersants), สารเติมแต่ง (additives) และวัตถุดิบสำหรับผลิตสารเคมี เช่น วานิลลิน (vanillin), ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (DMSO) และกรดฮิวมิก (humic acid) (8,9)

ไคติน เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่พบได้มากในโครงสร้างภายนอกของสัตว์ขาปล้อง เช่น ครัสเตเชียน (crustaceans) และเป็นของเสียหลักจากอุตสาหกรรมอาหารทะเล ไคตินสามารถเปลี่ยนเป็น ไคโตซาน (chitosan) ได้ผ่านกระบวนการดีอะซีทิลเลชัน (deacetylation) (10) ซึ่งมีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง เช่น การบำบัดน้ำเสีย, การประยุกต์ใช้ทางชีวการแพทย์ และอุตสาหกรรมอื่น ๆ (10–12).

การนำของเสียจากอุตสาหกรรมชีวภาพกลับมาใช้ใหม่สามารถช่วยลดภาวะวิกฤติจำนวนมากเพื่อใช้แทนปิโตรเลียม ซึ่งจะช่วยลดการพึ่งพาทรัพยากรฟอสซิลและส่งเสริมการพัฒนาอุตสาหกรรมที่ยั่งยืน

8. การลดขั้นตอนการทำอนุพันธ์ที่ไม่จำเป็น ในกระบวนการทางเคมี

การใช้ อนุพันธ์ทางเคมี (derivatization) เช่น กลุ่มป้องกัน (blocking groups), การปกป้องและการกำจัดกลุ่มป้องกัน (protection/deprotection), และการดัดแปลงทางกายภาพหรือเคมีชั่วคราว ควรหลีกเลี่ยงหากไม่จำเป็น เนื่องจากกระบวนการเหล่านี้มักต้องใช้ สารเคมีเพิ่มเติม, ตัวทำละลาย, และพลังงาน ซึ่งอาจก่อให้เกิดของเสียและเพิ่มความซับซ้อนของปฏิกิริยา

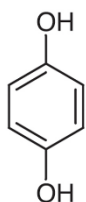
การสร้างอนุพันธ์แบบโควาเลนต์ (Covalent Derivatization) เป็นเทคนิคที่แพร่หลายในการสังเคราะห์สารอินทรีย์และการวิเคราะห์ทางเคมี อย่างไรก็ตาม ในช่วงต้นทศวรรษ 1990 ได้มีการพัฒนาแนวคิดใหม่ ที่เรียกว่า การสร้างอนุพันธ์แบบไม่อาศัยพันธะโควาเลนต์ (Non-Covalent Derivatization) ซึ่งเป็นกระบวนการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของสารโดยอาศัย ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุล (Intermolecular Interactions) แทนการสร้างพันธะโควาเลนต์

โดยปกติแล้ว ในกระบวนการทางเคมี การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสารมักทำโดยการ สร้างพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bonding) ซึ่งหมายถึงการเชื่อมต่ออะตอมเข้าด้วยกันอย่างถาวร เช่น การเพิ่ม หมู่ป้องกัน (Protecting Groups) หรือการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของสารเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการทางเคมีหรือวิเคราะห์สาร อย่างไรก็ตาม กระบวนการนี้มักต้องใช้ พลังงานสูง และ สารเคมีเพิ่มเติม เพื่อสร้างและกำจัดพันธะที่เกิดขึ้น

ในช่วงต้นทศวรรษ 1990 นักวิทยาศาสตร์ได้เสนอแนวคิดใหม่ ที่เรียกว่า การสร้างอนุพันธ์แบบไม่อาศัยพันธะโควาเลนต์ (Non-Covalent Derivatization) ซึ่งเป็นวิธีที่เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสารโดย อาศัย ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุล (Intermolecular Interactions) เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces), พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bonding) หรือ แรงผลักระหว่างไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Interactions) แทนการสร้างพันธะเคมีถาวร

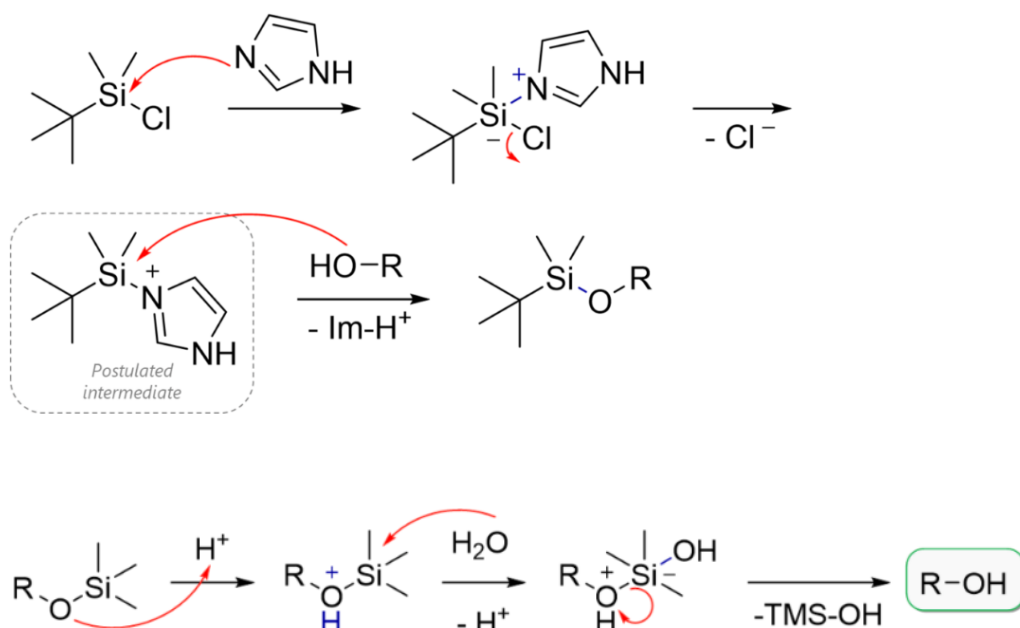
- ตัวอย่างการใช้ Non-Covalent Derivatization ในฟิล์มโพลารอยด์

หนึ่งในตัวอย่างแรก ๆ ที่แสดงถึงประสิทธิภาพของวิธีนี้ คือ ควบคุมการแพร่และความสามารถในการละลายของไฮโดรควิโนน (Hydroquinones) ในฟิล์มโพลารอยด์ (13–15)

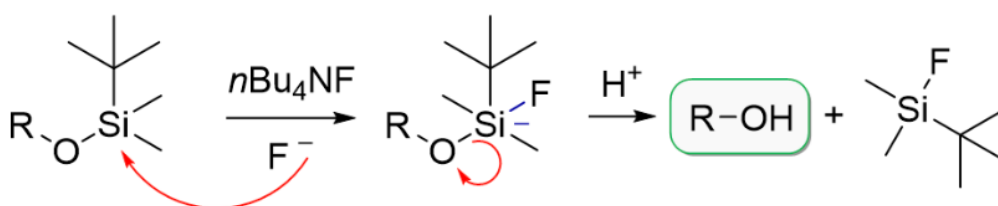


ฟิล์มโพลารอยด์มีการใช้ ไฮโดรควิโนน (Hydroquinone) ซึ่งเป็นสารรีดิวซ์ ทำปฏิกิริยากับ ซิลเวอร์โปรไมด์บนแผ่นฟิล์มที่ได้รับแสงแล้ว เปลี่ยนให้เป็นอนุภาคเงินโลหะ (Ag^0) ซึ่งทำให้เกิดภาพบนฟิล์ม แต่ทว่าสารไฮโดรควิโนนสามารถเกิดออกซิเดชันได้ง่ายกลายเป็นเบนโซควิโนน (Benzoquinone, $\text{C}_6\text{H}_4\text{O}_2$) ในสภาวะที่มีออกซิเจนและสารออกซิไดซ์ ดังนั้นเพื่อป้องกันการออกซิเดชันก่อนเวลาที่ต้องการ วิธีดั้งเดิมจะมีการใช้ base-labile protecting groups เช่น

Tert-butyldimethylsilyl (TBDMS) ether, Methoxycarbonyl (MOC) group, Phenyl carbonate protecting group ซึ่งหมู่ป้องกันเหล่านี้สามารถถูกกำจัดออกได้ในสภาวะเบส เช่น การใช้ NaOH หรือ KOH



Acidic deprotection works through protonation of the protected oxygen atom, followed by associate hydrolysis with a pentavalent silicon intermediate.



นักวิจัยของ Polaroid ได้คิดค้นวิธีใหม่โดยการ สร้างโคคริสตัล (Co-Crystal) ระหว่างไฮโดรควิโนนกับบิส-(N,N-ไดอัลคิล)เทเรฟทาลาไมด์ (Bis-(N,N-Dialkyl)Terephthalamides)

- แทนที่จะใช้พันธะโควาเลนต์ที่ต้องใช้พลังงานสูงในการสร้างและทำลาย พวกเขาเลือกใช้ แรงยึดเหนี่ยวแบบไม่โควาเลนต์ ในโคคริสตัล
- เมื่อค่า pH สูงขึ้น โครงสร้างของโคคริสตัลจะถูกทำลาย โดยไม่ต้องอาศัยปฏิกิริยาเคมี ส่งผลให้ไฮโดรควิโนนถูกปล่อยออกมาตามต้องการ
- วิธีนี้ ลดการใช้สารเคมีและพลังงาน ทำให้กระบวนการเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น

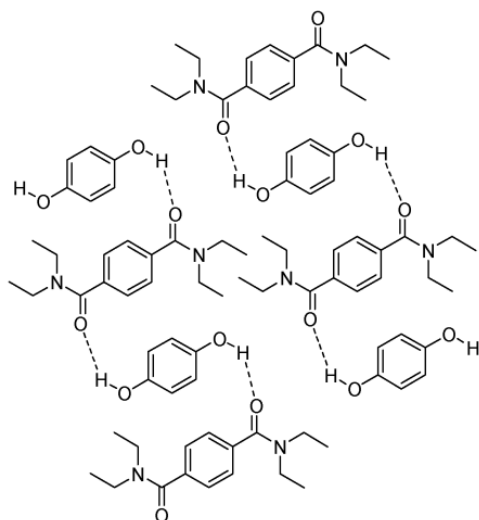


Fig. 8 Hydroquinones protected by non-covalent interactions with bis-(*N,N*-dialkyl)terephthalamides.

ข้อดีของ Non-Covalent Derivatization เมื่อเทียบกับ Covalent Derivatization

หัวข้อ	Covalent Derivatization	Non-Covalent Derivatization
ประเภทของพันธะ	พันธะโควาเลนต์ที่แข็งแรงและถาวร	ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลที่อ่อนกว่า
การใช้พลังงาน	ต้องใช้พลังงานสูงในการสร้างและทำลายพันธะ	ใช้พลังงานต่ำกว่า
การใช้สารเคมี	ต้องใช้สารเคมีเพิ่มเติมเพื่อทำปฏิกิริยา	ลดการใช้สารเคมี

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	อาจก่อให้เกิดของเสียจากปฏิกิริยาเคมี	ลดของเสียและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
ความง่ายในการควบคุม	ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือสภาวะเฉพาะ	ควบคุมได้ง่ายผ่านการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อม (เช่น pH)

9. การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดของเสียในกระบวนการทางเคมี (Catalysis)

ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Reagents) ที่มีความจำเพาะสูงสุดเท่าที่เป็นไปได้ เป็นทางเลือกที่ดีกว่าการใช้สารในการทำปฏิกิริยาด้วยสัดส่วนโมล สโตอิชิโอเมตริก (Stoichiometric Reagents) ในกระบวนการทางเคมี เนื่องจากให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (16–18).

ในหลายกรณี การเกิดของเสีย มีความสัมพันธ์กับการใช้สารตั้งต้นในปริมาณที่เท่ากับปริมาณที่ต้องการทำปฏิกิริยา (Stoichiometric Amount of Reagents) ซึ่งเป็นแนวทางดั้งเดิมของกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี การแทนที่กระบวนการสังเคราะห์สารด้วยสัดส่วนโมลแบบสโตอิชิโอเมตริกด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยา (Catalysis) ถือเป็นแนวทางสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องมือสังเคราะห์ทางเคมี เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาให้ประโยชน์หลายประการ ได้แก่

- ลดพลังงานที่ต้องใช้ในปฏิกิริยา โดยการลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา
- ลดหรือหลีกเลี่ยงการใช้สารตั้งต้นในปริมาณที่มากเกินไป ซึ่งช่วยลดการใช้ทรัพยากร
- เพิ่มการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ (Product Selectivity) ที่ต้องการ ทำให้ลดการเกิดของเสียจากผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่ไม่ต้องการ

ปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันเป็นตัวอย่างที่ชัดเจนของหลักการนี้ โดยเฉพาะในกรณีของกระบวนการรีดักชัน ที่มีการใช้สาร DIBAL-H (Diisobutylaluminium Hydride) ซึ่งเป็นตัวให้อะตอมไฮไดรด์ (Hydride Donor) ที่นิยมใช้ในเคมีอินทรีย์ ปัญหาของการใช้ DIBAL-H ในปฏิกิริยารีดักชัน คือ ต้องใช้ในปริมาณสโตอิชิโอเมตริก ซึ่งหมายถึงต้องใช้สารรีดิวซ์ในสัดส่วนเท่ากับสารตั้งต้น ก่อให้เกิดของเสียจำนวนมาก เนื่องจากสารรีดิวซ์ที่ใช้แล้วไม่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ และสุดท้ายต้องมีขั้นตอนแยกบริสุทธิ์ที่ซับซ้อน ซึ่งเพิ่มทั้งต้นทุนและของเสียจากกระบวนการ

สำหรับการเปลี่ยนมาเป็นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน ได้แก่ การทำ Noyori Hydrogenation (19) ซึ่งเป็นแนวทางที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่ามีข้อดีหลายประการ ได้แก่

- ✓ ไม่ต้องใช้สารรีดิวซ์ในปริมาณที่เป็นสัดส่วนโมลส์โตอิชิโอเมตริก เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้
- ✓ ลดปริมาณวัตถุดิบที่ต้องใช้ เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงกว่า
- ✓ ลดของเสียและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพราะปฏิกิริยานี้ใช้ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) เป็นตัวรีดิวซ์ ซึ่งไม่ก่อให้เกิดของเสียที่เป็นอันตราย

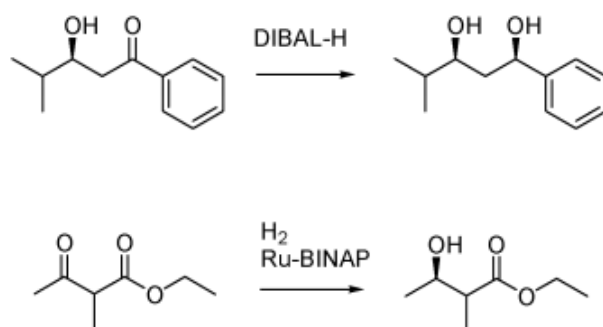


Fig. 9 Comparison between stoichiometric and catalytic reduction.

ไบโอคะทาลิซิส (Biocatalysis) เป็นอีกหนึ่งตัวอย่างของ เคมีสีเขียว (Green Chemistry) ซึ่งเป็นแนวทางที่เลียนแบบกระบวนการทางชีวภาพ โดยอาศัย เอนไซม์ธรรมชาติหรือเอนไซม์ที่ถูกดัดแปลง (16,20–22) เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการทางเคมี

ตัวเร่งปฏิกิริยาทางชีวภาพ (Biocatalysis) เป็นอีกแนวทางหนึ่งของเคมีสีเขียว ตัวเร่งปฏิกิริยาทางชีวภาพสามารถดำเนินการได้สองรูปแบบหลัก:

- การใช้เอนไซม์บริสุทธิ์โดยตรง – เช่น เอนไซม์ไลเปส (Lipase), ออกซิเดส (Oxidase) และไฮโดรเลส (Hydrolase)
- การใช้สิ่งมีชีวิตที่ได้รับการดัดแปลงพันธุกรรม – เช่น แบคทีเรียหรือยีสต์ที่ได้รับการออกแบบให้สามารถสังเคราะห์สารเคมีเป้าหมายได้

ข้อดีของตัวเร่งปฏิกิริยาทางชีวภาพ ในเคมีสีเขียว

- ✓ สภาวะปฏิกิริยาที่ไม่รุนแรง – กระบวนการนี้สามารถดำเนินการใน น้ำ ที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ ซึ่งปลอดภัยและลดการใช้พลังงาน
- ✓ มีความจำเพาะสูง (Chemo-, Regio-, Stereoselectivity) – เอนไซม์สามารถเลือกทำปฏิกิริยาเฉพาะกับสารตั้งต้นที่ต้องการได้ ลดการเกิดผลิตภัณฑ์พลอยได้
- ✓ ลดของเสียและสารพิษ – เอนไซม์ไม่จำเป็นต้องใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ที่เป็นอันตราย และช่วยลดการใช้สารตั้งต้นที่ไม่จำเป็น

ตัวอย่างของตัวเร่งปฏิกิริยาทางชีวภาพ ในอุตสาหกรรม

อุตสาหกรรมยา – ใช้เอนไซม์ในการสังเคราะห์สารออกฤทธิ์ทางยา เช่น เพนิซิลลิน G อะซิลเลส (Penicillin G Acylase)

อุตสาหกรรมอาหาร – ใช้เอนไซม์ไลเปสในการผลิตไขมันทรานส์ต่ำ หรืออะไมเลส (Amylase) ในอุตสาหกรรมแป้ง

อุตสาหกรรมพลังงานชีวภาพ – ใช้เอนไซม์เซลลูเลส (Cellulase) เพื่อย่อยสลายเซลลูโลสเป็นน้ำตาลสำหรับผลิตไบโอเอทานอล

10. การออกแบบเพื่อการย่อยสลาย (Design for Degradation)

มีความหมายถึงการออกแบบผลิตภัณฑ์เคมีให้สามารถย่อยสลายได้หลังจากสิ้นสุดการใช้งาน และไม่คงอยู่ในสิ่งแวดล้อมในรูปของสารที่เป็นอันตราย

หลักการสำคัญของการออกแบบเพื่อการย่อยสลาย

1-ผลิตภัณฑ์ต้องสลายตัวได้เมื่อหมดอายุการใช้งาน – ควรออกแบบโครงสร้างทางเคมีให้สามารถแตกตัวได้ง่ายผ่านกระบวนการทางธรรมชาติ เช่น การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) หรือ การสลายตัวด้วยแสงแดด (Photodegradation)

2-ไม่มีการตกค้างในสิ่งแวดล้อม – ผลิตภัณฑ์เคมีไม่ควรมีการสะสม (Bioaccumulation) ในห่วงโซ่อาหารหรือคงอยู่ในน้ำและดินเป็นเวลานาน

3-ผลิตภัณฑ์สลายตัวเป็นสารที่ไม่เป็นอันตราย – การออกแบบควรมุ่งเน้นให้สารเคมีสามารถเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ที่ปลอดภัย เช่น น้ำ (H_2O), คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), ไนโตรเจน (N_2) หรือสารอินทรีย์ขนาดเล็ก

● ตัวอย่างการออกแบบสารเคมีให้ย่อยสลายได้

✓ พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradable Plastics) – เช่น โพลีแลคติกแอซิด (PLA) ซึ่งผลิตจากพืชและสามารถย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์

✓ สารลดแรงตึงผิวที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม – สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในผงซักฟอกควรสามารถถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสีย

✓ สารกำจัดศัตรูพืชที่ไม่ตกค้างในสิ่งแวดล้อม – เช่น ไพรีทรอยด์ (Pyrethroids) ที่สามารถสลายตัวได้ในแสงแดด




ความท้าทายของการออกแบบเพื่อการย่อยสลาย

◆ การหาสมดุลระหว่าง เสถียรภาพของผลิตภัณฑ์ (Stability) ระหว่างการใช้งาน และ ความสามารถในการย่อยสลาย หลังจากหมดอายุการใช้งาน


- ◆ ต้นทุนการพัฒนาและการผลิตวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมยังคงสูงกว่าวัสดุทั่วไป

ปัญหาของสารเคมีที่คงอยู่ในสิ่งแวดล้อมเป็นที่ทราบกันมานานและเริ่มเห็นได้ชัดในช่วงแรกของการพัฒนาอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปี 1950 มีการใช้ Tetrapropylene Alkylbenzene Sulfonate (TPPS) เป็นสารลดแรงตึงผิวในผงซักฟอก ซึ่ง ไม่สามารถย่อยสลายได้สมบูรณ์ในน้ำ ทำให้เกิดการสะสมในแหล่งน้ำ และระบบน้ำประปา

 ปัญหาที่เกิดขึ้น: TPPS สะสมในน้ำ เนื่องจากโครงสร้างของสารเป็น สายโซ่กิ่ง (Branched Chain) ซึ่ง ทำให้จุลินทรีย์ย่อยสลายได้ยาก

เกิดปัญหา น้ำประปามีฟอง เมื่อน้ำไหลออกจากก๊อกน้ำ

สร้างความกังวลในสังคมและทำให้เกิดกระแสเรียกร้องให้หาทางแก้ไข

 การแก้ปัญหาด้วยแนวคิด "ออกแบบเพื่อการย่อยสลาย" ในทางอุตสาหกรรมจึงพัฒนาสูตรสารลดแรงตึงผิวใหม่ โดย เปลี่ยนโครงสร้างของ TPPS จาก สายโซ่กิ่ง (Branched Chain) ไปเป็น สายโซ่ตรง (Linear Chain) ซึ่งสามารถถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายได้ง่ายขึ้น

การแก้ไขปัญหามลพิษในเชิงเคมีสีเขียว คือ การเปลี่ยนจาก TPPS → Linear Alkylbenzene Sulfonate (LAS) ซึ่ง ย่อยสลายได้ดีขึ้น ในระบบบำบัดน้ำเสีย ลดปัญหาการสะสมของสารเคมีในแหล่งน้ำ (Bio persistence ต่ำลง) ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศทางน้ำ

บทเรียนที่ได้จากการพัฒนาของ TPPS สะท้อนให้เห็นถึงความสำคัญของการออกแบบผลิตภัณฑ์เคมีให้สามารถย่อยสลายได้ง่ายตั้งแต่แรกเริ่ม แนวคิดนี้นำไปสู่การพัฒนาสารลดแรงตึงผิวที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น เช่น LAS และ Sodium Lauryl Sulfate (SLS) ซึ่งช่วยลดมลพิษในระบบนิเวศทางน้ำ นักเคมีและอุตสาหกรรมเคมีควรตระหนักถึงแนวทางเคมีสีเขียว ซึ่งไม่เพียงช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่ยังสร้างความยั่งยืนให้กับอุตสาหกรรมในระยะยาว

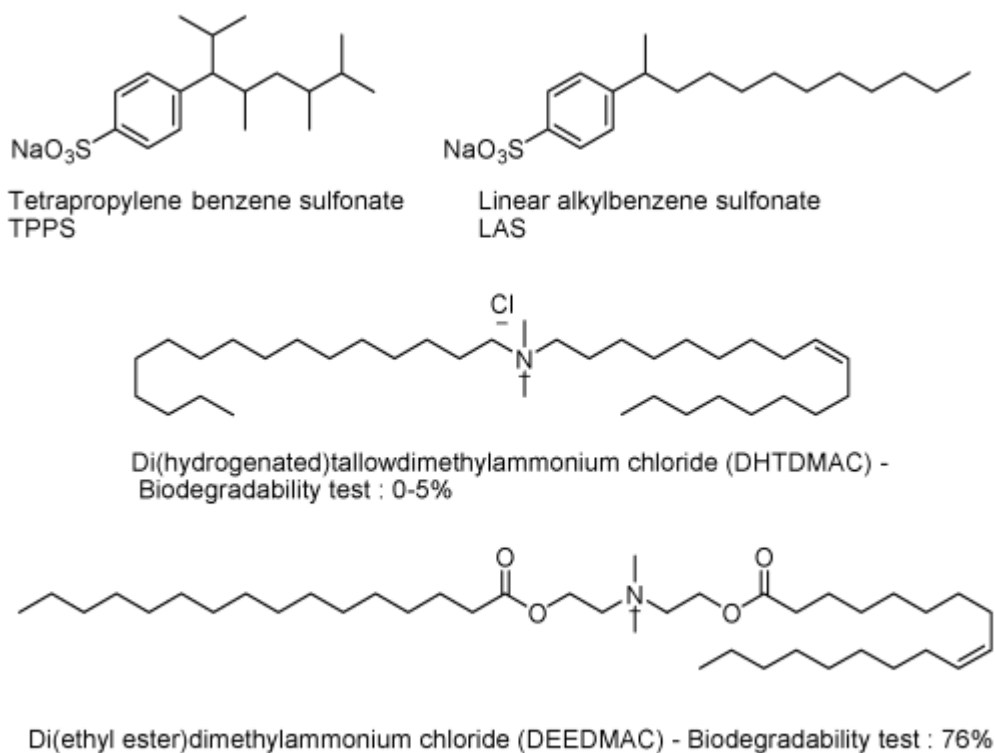


Fig. 10 Integrating biodegradability in the design of surfactants.

การออกแบบวัสดุและสารเคมีที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติไม่ใช่เรื่องง่าย ดังที่เห็นได้จากปัญหามลพิษทางสิ่งแวดล้อมที่ยังคงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม แนวโน้มของการออกแบบสารเคมีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้พัฒนาขึ้นจากข้อมูลที่เหมาะสมยาวนาน โดยพบว่าโครงสร้างทางเคมีบางประเภท เช่น หมู่ฮาโลเจน (halogenated moieties) สายโซ่กิ่ง (branched chains) คาร์บอนควอเตอร์นารี (quaternary carbons) อะมิโนตติยาภูมิ (tertiary amines) และเฮเทอโรไซเคิลบางชนิด อาจมีแนวโน้มก่อให้เกิดความคงตัวสูงในสิ่งแวดล้อมและควรหลีกเลี่ยง ในทางกลับกัน การเพิ่มหมู่ฟังก์ชัน เช่น เอสเตอร์ (esters) หรือเอไมด์ (amides) ซึ่งเป็นที่รู้จักของเอนไซม์ที่มีอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ อาจช่วยให้สารเคมีสามารถย่อยสลายได้ง่ายขึ้น

แนวทางนี้ถูกนำมาใช้กับสารลดแรงตึงผิวประเภท quaternary ammonium compounds ซึ่งนิยมใช้เป็นสารปรับผ้านุ่มในครัวเรือน ก่อนทศวรรษ 1990 สารประกอบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ di(hydrogenated)tallow dimethyl ammonium chloride (DHTDMAC) ซึ่งมีการปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมโดยตรง จากการศึกษาพบว่าอัตราการย่อยสลายในตะกอนน้ำดำและมีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมสูง ด้วยเหตุนี้ นักวิจัยจึงได้พัฒนาโครงสร้างใหม่โดยแทรกหมู่เอไมด์หรือเอสเตอร์ที่สามารถถูกไฮโดรไลซ์ได้ลงไปในโมเลกุลของสารแอมโมเนียม ผลลัพธ์ที่ได้คือ di(ethyl-ester) dimethyl ammonium chloride (DEEDMAC) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการย่อยสลายทางชีวภาพเพิ่มขึ้นถึง 70% เมื่อเทียบกับสารรุ่นก่อน

กรณีศึกษาเน้นให้เห็นถึงบทบาทสำคัญของเคมีเชิงออกแบบ (design-based chemistry) ในการสร้างสารเคมีที่มีคุณสมบัติย่อยสลายได้ง่ายและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การนำแนวทางนี้ไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมเคมีสามารถช่วยลดปัญหามลพิษและเพิ่มความยั่งยืนของกระบวนการผลิตได้

11. การวิเคราะห์แบบเรียลไทม์ (Real-time analysis) เพื่อช่วยป้องกันมลพิษตั้งแต่ต้นทางของกระบวนการทางเคมี

การวิเคราะห์แบบเรียลไทม์ (Real-time analysis) เป็นแนวทางสำคัญในเคมีสีเขียว ที่ช่วยป้องกันมลพิษตั้งแต่ต้นทางของกระบวนการทางเคมี แทนที่จะตรวจจับและจัดการกับของเสียหลังจากที่เกิดขึ้นแล้ว หลักการนี้มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์ที่สามารถเฝ้าติดตามกระบวนการผลิตทางเคมีแบบเรียลไทม์ เพื่อระบุและแก้ไขปัญหาก่อนที่จะนำไปสู่การสร้างของเสียที่ไม่พึงประสงค์

เป้าหมายของเคมีวิเคราะห์สีเขียวคือการวัดสารเคมีโดยไม่ก่อให้เกิดของเสีย ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับเคมีวิเคราะห์มักเชื่อมโยงกับวิธีการวิเคราะห์เอง การวิเคราะห์โดยตรงแบบเรียลไทม์ (real-time direct analysis) ยังไม่สามารถทำให้เป็นระบบ เนื่องจากหลายวิธีการยังคงต้องการการเตรียมตัวอย่างล่วงหน้าหรืออาจพึ่งพาวิธีที่เรียกว่า “การวิเคราะห์ภายนอกสถานที่” (ex situ analysis) เคมีวิเคราะห์กระบวนการ (Process Analytical Chemistry) ถูกนิยามว่าเป็นความสามารถในการติดตามการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและดำเนินการทันทีเพื่อป้องกันผลลัพธ์ที่ไม่พึงประสงค์ อย่างไรก็ตาม การดำเนินการดังกล่าวไม่สามารถทำได้เสมอไป และอาจทำให้เกิดของเสียเมื่อทำการวิเคราะห์ตัวอย่าง

นักเคมีจำเป็นต้องคำนึงถึงข้อกำหนดทางการทำงานของวิธีการวิเคราะห์ เนื่องจากหากวิธีที่เลือกใช้ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมเพิ่มเติมจะเป็นการขัดขวางเป้าหมายของเคมีสีเขียว เคมีวิเคราะห์สีเขียวสามารถนิยามได้ว่าเป็นการใช้กระบวนการวิเคราะห์ที่สร้างของเสียน้อยที่สุดและปลอดภัยต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม นิยามนี้ครอบคลุมทั้งการตรวจสอบและการเฝ้าระวังแบบเรียลไทม์ ของการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและข้อบกพร่องด้านสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์แบบดั้งเดิม การตรวจสอบในสถานที่ (in situ monitoring) ของปฏิกิริยามีข้อได้เปรียบที่สำคัญในแง่ของเคมีสีเขียว เมื่อสามารถดำเนินการได้ทันที จะสามารถป้องกันอุบัติเหตุ ประหยัดพลังงาน และ/หรือป้องกันการเกิดผลพลอยได้ในปริมาณมากที่อาจต้องใช้กระบวนการทำความสะอาดบริสุทธิ์เพิ่มเติม

ในส่วนของการวิเคราะห์เอง ส่วนใหญ่จะพบปัญหาสองประการที่เชื่อมโยงกับสองขั้นตอนหลักของกระบวนการ ได้แก่ การเตรียมตัวอย่าง ซึ่งรวมถึงการสกัด การแยก หรือบางครั้งการดัดแปลงทางเคมีของตัวอย่าง และขั้นตอนการรับสัญญาณ เนื่องจากขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างมักเกี่ยวข้องกับการใช้สารตัวทำละลายในปริมาณมาก ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญที่นักเคมีวิเคราะห์ต้องให้ความสนใจ หากไม่สามารถหลีกเลี่ยงการใช้สารตัวทำละลายในการสกัดได้ ควรพิจารณาทางเลือกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เช่น การสกัดด้วยสารตัวทำละลายที่เร่งด้วยความดัน (Accelerated Solvent Extraction) หรือการสกัดด้วยสารตัวทำละลายเหนือจุดวิกฤติ (Supercritical Fluid Extraction)

วัสดุที่ใช้ในการผลิตอุปกรณ์การวิเคราะห์ควรได้รับการพิจารณาเกี่ยวกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม นักเคมีและวิศวกรที่ออกแบบเซ็นเซอร์/ตัวตรวจวัดชนิดใหม่ควรตระหนักถึงความเป็นพิษและปัญหาสังแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้นจากวัสดุที่พวกเขาจัดการ ตัวอย่างเช่น ขั้วอิเล็กโทรดปรอทที่มักใช้ในการวิเคราะห์เคมีไฟฟ้าสามารถถูกแทนที่ด้วยอิเล็กโทรดที่ทำจากคาร์บอน เช่น นาโนทูบหรือนาโนไฟเบอร์ (nanotube / nanofiber) ซึ่งได้รับการพิสูจน์ว่าเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพในการลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและความเป็นพิษ

ตัวอย่างของเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบเรียลไทม์ ได้แก่ เซ็นเซอร์ทางเคมี (Chemical sensors), โครมาโตกราฟีแบบออนไลน์ (Online chromatography), สเปกโทรสโกปี (Spectroscopy), และเทคนิคการวิเคราะห์แบบอินไลน์ (In-line analysis techniques) เทคนิคเหล่านี้สามารถช่วยติดตามพารามิเตอร์ที่สำคัญของปฏิกิริยา เช่น อุณหภูมิ, ค่า pH, ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์, รวมถึงปริมาณของสารพิษที่อาจเกิดขึ้น ด้วยการตรวจสอบกระบวนการอย่างต่อเนื่อง นักเคมีสามารถทำการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขปฏิกิริยาได้แบบเรียลไทม์เพื่อลดการเกิดของเสียและเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ

หนึ่งในตัวอย่างที่ประสบความสำเร็จของการใช้การวิเคราะห์แบบเรียลไทม์ในอุตสาหกรรม คือ การผลิตยา (Pharmaceutical manufacturing) ซึ่งใช้ Process Analytical Technology (PAT) เพื่อตรวจสอบความบริสุทธิ์และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการผลิต เทคโนโลยีนี้ช่วยลดของเสีย เพิ่มความปลอดภัย และลดความจำเป็นในการใช้ตัวทำละลายและสารเคมีอันตราย นอกจากนี้ ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี การใช้เซ็นเซอร์แบบอินไลน์เพื่อตรวจสอบก๊าซไอเสียสามารถช่วยป้องกันการปล่อยสารพิษออกสู่สิ่งแวดล้อมได้

12. เคมีที่ปลอดภัยตามธรรมชาติสำหรับการป้องกันอุบัติเหตุ

เคมีที่ปลอดภัยตามธรรมชาติ (Inherently Safer Chemistry) เป็นหลักการที่มุ่งเน้นการออกแบบกระบวนการเคมีเพื่อหลีกเลี่ยงหรือบรรเทาภัยอันตรายที่อาจเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีในสภาพแวดล้อมที่ไม่พึงประสงค์ โดยการลดความเสี่ยงตั้งแต่เริ่มต้นในขั้นตอนการออกแบบผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการเคมี หลักการนี้ช่วยให้สามารถป้องกันการเกิดอุบัติเหตุหรือผลกระทบจากสารเคมีที่อาจเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ และลดอันตรายจากสารที่ใช้หรือผลิตในกระบวนการ

สารและกระบวนการที่เป็นอันตรายได้เพิ่มมากขึ้นในสภาพแวดล้อมการทำงานของเรา ตามพระราชบัญญัติการป้องกันอุบัติเหตุจากสารเคมีและการแก้ไขกฎหมายการควบคุมมลพิษทางอากาศปี 1990 การป้องกันอุบัติเหตุต้องเริ่มต้นจากการระบุและประเมินอันตรายต่างๆ ทุกประเภทไม่ว่าจะเป็นพิษภัยจากสารเคมี อันตรายทางกายภาพ เช่น การระเบิดหรือการติดไฟ และอันตรายระดับโลก ควรถูกพิจารณาในการออกแบบสารเคมีและกระบวนการเพื่อป้องกันอุบัติเหตุ เช่น อุบัติเหตุที่เกิดขึ้นที่เมืองโบลาล (Bhopal) หรือเหตุการณ์ที่ Love Canal (23).

ตัวอย่างล่าสุดและน่าตกใจเกี่ยวกับอันตรายเหล่านี้สามารถพบได้จากอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นที่ UCLA ในเดือนมกราคม 2009 (24) การจัดการกับสารเคมีที่พบได้ทั่วไปและติดไฟง่ายอย่างบิวทิลลิเทียม (butyllithium) ส่งผลให้เกิดเหตุการณ์ร้ายแรงซึ่งทำให้ผู้ช่วยวิจัยเสียชีวิต อุบัติเหตุครั้งนี้ควรเป็นเครื่องเตือนใจที่สำคัญให้กับชุมชนวิทยาศาสตร์ว่า สารเคมีหลายชนิดที่เราใช้อยู่ในปัจจุบันนั้นยังคงมีอันตรายร้ายแรงและควรได้รับการทดแทนด้วยสารทางเลือกที่ปลอดภัยกว่าเพื่อป้องกันอุบัติเหตุให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้

การใช้เคมีที่ปลอดภัยตามธรรมชาติสามารถบรรลุได้โดยการลดความเสี่ยงในหลาย ๆ ด้าน เช่น:

- ลดความเสี่ยงจากสารเคมีที่มีอันตรายสูง: เลือกใช้สารเคมีที่มีพิษน้อยกว่าหรือสารที่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาที่เสี่ยงได้ในสภาพแวดล้อมที่ใช้งาน
- ลดการใช้สารที่มีความไวต่อการเกิดการระเบิดหรือไฟ: เลือกใช้สารที่ไม่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาอย่างรุนแรงหรือไม่ก่อให้เกิดไฟหรือการระเบิด
- หลีกเลี่ยงสภาพที่เสี่ยง: ออกแบบกระบวนการเคมีให้ไม่เกิดความร้อนสูงหรือความดันที่อาจทำให้เกิดอุบัติเหตุหรือการระเบิด
- เลือกใช้เทคโนโลยีที่ไม่ทำให้เกิดผลกระทบระยะยาวต่อสิ่งแวดล้อม: การออกแบบสารเคมีและกระบวนการให้สามารถย่อยสลายได้ง่ายในสิ่งแวดล้อมหรือเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

ในทางปฏิบัติ การใช้เคมีที่ปลอดภัยตามธรรมชาติสามารถช่วยลดอุบัติเหตุจากกระบวนการเคมีได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังช่วยส่งเสริมการพัฒนาที่ยั่งยืนโดยการลดผลกระทบต่อทั้งมนุษย์และสิ่งแวดล้อมในระยะยาว

1. นิยามของการทดแทนในบริบทการจัดการสารเคมีอันตราย

การทดแทน (Substitution) นับเป็นมาตรการเชิงรุกที่มีความสำคัญในการลดผลกระทบจากสารและวัสดุที่เป็นอันตราย โดยมีบทบาทอย่างยิ่งในด้านสุขภาพและความปลอดภัยในการทำงาน แนวคิดนี้ได้รับการกำหนดไว้อย่างชัดเจนในคำสั่งที่ 540 ของกระทรวงแรงงานเดนมาร์ก ซึ่งระบุว่า **“ห้ามใช้สารหรือวัสดุที่อาจเป็นอันตรายหรือส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยหรือสุขภาพ หากสามารถหาสารหรือวัสดุอื่นที่ไม่มีอันตราย มีอันตรายน้อยกว่า หรือก่อความระคายเคือนน้อยกว่ามาทดแทนได้”**

นอกจากนี้ Directive 89/391/EEC (Framework Directive)^[1] กฎหมายของสหภาพยุโรป (EU) ระบุว่า การทดแทนสารเคมีอันตราย หมายถึง กระบวนการนำหลักการพื้นฐานของ **“การแทนที่สิ่งที่เป็นอันตรายด้วยสิ่งที่ไม่อันตรายหรือมีอันตรายน้อยกว่า”** มาปรับใช้ในการจัดการความเสี่ยงทางเคมี อีกทั้งสหภาพยุโรปยังออกกฎหมายใหม่เกี่ยวกับสารเคมี เช่น Regulation No 1907/2006 (REACH: Regulation, Evaluation, Authorization, and Restriction of Chemicals)^[2] สารที่ถือว่าเป็น สารที่น่ากังวลอย่างยิ่ง เช่น สารก่อมะเร็ง สารก่อการกลายพันธุ์ และสารมีพิษต่อการเจริญพันธุ์ รวมถึงสารที่คงตัวและสะสมในสิ่งแวดล้อม และสารที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน ต้องได้รับการวิเคราะห์ทางเลือกที่เหมาะสม โดยคำนึงถึงความเสี่ยง ความเป็นไปได้ทางเทคนิค และเศรษฐกิจ อีกทั้งยังต้องยื่นแผนการทดแทนพร้อมกำหนดการปฏิบัติ หากมีทางเลือกที่เหมาะสม



ภาพที่ 1 การทดแทนสารเคมีอันตรายด้วยสารที่ไม่อันตรายหรือมีอันตรายน้อยกว่า

เพื่อช่วยให้การนำแนวคิดการทดแทนไปใช้ในสถานการณ์จริงเป็นไปอย่างเป็นระบบ การจัดประเภทของการทดแทนออกเป็นระดับต่าง ๆ ถือเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง วิธีการนี้ไม่เพียงทำให้ความหมายของการทดแทนชัดเจนขึ้น แต่ยังช่วยสนับสนุนการตัดสินใจในกระบวนการทำงานที่เฉพาะเจาะจง

หลักการพื้นฐานที่เป็นแกนสำคัญในทุกะดับของการทดแทน คือ การกำจัดหรือแทนที่สารหรือวัสดุที่เป็นอันตรายในกระบวนการทำงานที่ระบุไว้ ทั้งนี้ Sorensen และ Styhr Petersen ได้เสนอการแบ่งประเภทของการทดแทนออกเป็นสามระดับ ซึ่งช่วยให้กระบวนการนี้มีความเป็นระบบมากยิ่งขึ้น ดังนี้

ระดับ	สารเคมี	วิธีการ	กระบวนการ
ระดับ 1	เปลี่ยนแปลง	ไม่เปลี่ยนแปลง	ไม่เปลี่ยนแปลง
ระดับ 2	เปลี่ยนแปลง	เปลี่ยนแปลง	ไม่เปลี่ยนแปลง
ระดับ 3	เปลี่ยนแปลง	เปลี่ยนแปลง	เปลี่ยนแปลง

ระดับ 1: เปลี่ยนเฉพาะสารที่ใช้ แต่วิธีการ และกระบวนการยังคงเดิม

ระดับ 2: เปลี่ยนทั้งสารและวิธีการ แต่กระบวนการยังคงเหมือนเดิม

ระดับ 3: เปลี่ยนทั้งสาร วิธีการ และกระบวนการทั้งหมด

ตัวอย่าง: กระบวนการเชื่อม

ระดับ 1: ดีบุก/ตะกั่วสำหรับการบัดกรี เปลี่ยนแปลงเป็น ดีบุก/เงินสำหรับการบัดกรี

ระดับ 2: ฟลักซ์บัดกรีแบบเรซิน เปลี่ยนแปลงเป็น ฟลักซ์บัดกรีแบบล้างน้ำได้

ระดับ 3: การเชื่อมด้วยวิธีการบัดกรี เปลี่ยนแปลงเป็น การเชื่อมด้วยวิธีเชิงกล

ในกระบวนการการทดแทน ระหว่างระดับ 1 ถึงระดับ 2 การเปลี่ยนแปลงของสารเคมีได้นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงวิธีการทำความสะอาดฟลักซ์ โดยในกรณีนี้เปลี่ยนจากการจุ่มในตัวทำลายอินทรีย์ไปสู่การล้างด้วยน้ำ แม้ว่าวิธีการจะเปลี่ยนไป กระบวนการกำจัดคราบฟลักซ์ยังคงมีความจำเป็น ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดที่ว่า สารหรือวัสดุที่ใช้ในกระบวนการเริ่มต้นจะถูกกำจัดออกจากกระบวนการทำงานในที่สุดในทุกๆระดับของการทดแทน

การพิจารณาเรื่องการทดแทนไม่ได้มีความสำคัญเฉพาะในกระบวนการที่มีอยู่แล้วเท่านั้น แต่ยังมีบทบาทสำคัญในขั้นตอนการวางแผนงานใหม่ ๆ ด้วย เป้าหมายหลักของการทดแทนในทุกกรณีคือ การกำจัดหรือลดผลกระทบจากสารหรือวัสดุที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพ

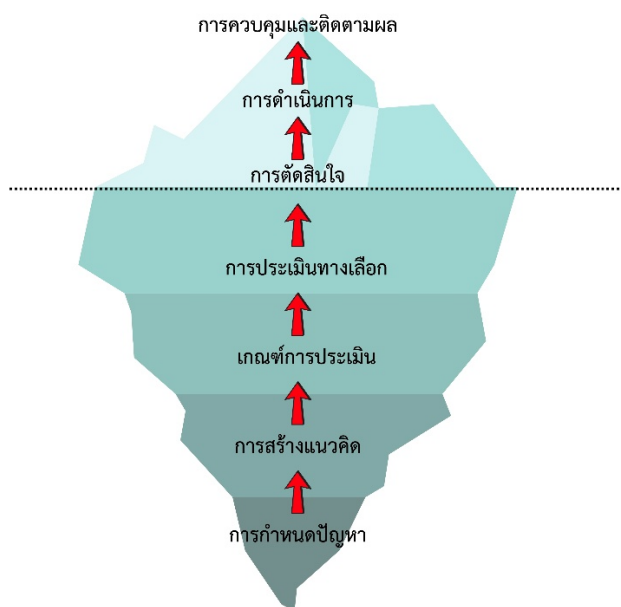
แม้ว่ามีขั้นตอนมากมายที่อาจดูเหมือนมีจุดประสงค์เดียวกันกับการทดแทน แต่ไม่ได้ถือว่าเป็นการทดแทนในเชิงนิยาม ตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนแปลงกระบวนการหรือวิธีการทำงานเพื่อปรับปรุงสภาพสุขภาพ โดยไม่ได้เปลี่ยนแปลงสารหรือวัสดุ เช่น การเปลี่ยนจากกระบวนการฉีดยามือไปสู่กระบวนการอัตโนมัติ หรือการเพิ่มการป้องกัน เช่น การติดตั้งหน้าจ่อป้องกันหรือการระบายอากาศในกระบวนการทำงาน

เราจึงได้กำหนดนิยามของการทดแทนว่า การทดแทนเริ่มต้นจากการมีสารหรือวัสดุที่เป็นอันตราย การทดแทนคือการกำจัดสารหรือวัสดุที่ก่อให้เกิดการพิจารณาการทดแทนออกจากกระบวนการทำงาน ซึ่งการกำจัดนี้อาจเกิดขึ้นในระดับใดระดับหนึ่งจากสามระดับที่กำหนดไว้

2. กระบวนการทำงานของการทดแทน

เมื่อมีการดำเนินการทดแทนหรือปฏิบัติงานใด ๆ การมีแผนการหรือกระบวนการทำงานที่ชัดเจนเป็นสิ่งสำคัญ จุดประสงค์ของกระบวนการทำงานนี้คือเพื่อให้แน่ใจว่าทุกแง่มุมของปัญหาได้รับการพิจารณาเสมอเพื่อให้สามารถบรรลุวิธีแก้ปัญหาก็เหมาะสมที่สุด

กระบวนการทำงานสำหรับการทดแทนสามารถแบ่งออกเป็นหลายระยะ (รายละเอียดในภาพที่ 2) ซึ่งแต่ละระยะครอบคลุมแง่มุมเฉพาะของงาน และลำดับของระยะต่าง ๆ นี้อธิบายถึงการทดแทนในกระบวนการอย่างมีตรรกะ อย่างไรก็ตาม ในบางกรณีนี้อาจไม่สามารถปฏิบัติตามกระบวนการดังกล่าวได้อย่างเคร่งครัด แต่สามารถใช้เป็นแผนพื้นฐานและปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมตามความจำเป็นได้ โดยผู้ที่มีความสามารถพลิกแพลงได้ตามสถานการณ์ ในทุกกรณี การทำเช่นนี้ยังช่วยให้เกิดการถ่ายทอดประสบการณ์ที่เป็นประโยชน์ในงานการทดแทนได้อีกด้วย



ภาพที่ 2 ทฤษฎีภูเขาน้ำแข็ง: กระบวนการทำงานของการทดแทน

การให้ความสำคัญในแต่ละระยะ มักมีแนวโน้มที่จะให้ความสนใจไปยังส่วนที่ปรากฏชัดเจนในกระบวนการ นั่นคือ "ระยะที่ 5: การตัดสินใจ" ซึ่งมักถือว่าเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตาม มีระยะต่าง ๆ ก่อนการตัดสินใจที่สำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่ากัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งระยะที่ 1 "การกำหนดปัญหา" ถือเป็นระยะที่สำคัญที่สุด เพราะเป็นการกำหนดขอบเขตของการทดแทน หากไม่มีการดำเนินการอย่างเป็นระบบ อาจนำไปสู่การตัดสินใจเร็วเกินไปหรือตัดสินใจว่าแนวทางแก้ไขไม่สามารถทำได้ ส่งผลให้เกิดความล้มเหลวในกระบวนการ เช่นเดียวกับเรือที่ชนเข้ากับภูเขาน้ำแข็งแล้วอาจไม่สามารถกลับมาตั้งตัวได้ก่อนที่จะจมลง

ในทุกระยะของกระบวนการ มีความสำคัญอย่างยิ่งที่จะต้องมีการติดต่ออย่างใกล้ชิดกับบริษัท และหารือปัญหากับพนักงานที่เกี่ยวข้องในกระบวนการตั้งแต่นั้น ๆ เนื่องจากพนักงานเหล่านี้มีความรู้เชิงลึกเกี่ยวกับกระบวนการทำงานและลักษณะเฉพาะของงาน อาจทราบถึงรายละเอียดที่ยากต่อการเข้าถึงของผู้ที่ไม่มีประสบการณ์ตรง อีกทั้งเป็นพนักงานเองที่ต้องใช้งานผลิตภัณฑ์ใหม่และอาจต้องเปลี่ยนแปลงวิธีการทำงาน ซึ่งการปกป้องสุขภาพของพนักงานถือเป็นเป้าหมายสำคัญของการทดแทน การให้พนักงานเข้าใจถึงการพิจารณาต่าง ๆ เป็นข้อดีอย่างยิ่ง เพราะการนำเสนอคำตอบสำเร็จรูปโดยไม่ชี้แจงเหตุผลมักไม่ส่งผลดีในเชิงจิตวิทยา

หัวหน้างานเป็นส่วนสำคัญในกระบวนการนี้ พวกเขาเข้าใจถึงจุดประสงค์และข้อกำหนดของกระบวนการทำงาน รวมถึงเงื่อนไขทั่วไปในส่วนอื่น ๆ ของบริษัท และสามารถมีส่วนร่วมในการประเมิน เช่น การพิจารณาข้อกำหนดทางเทคนิคที่จำเป็นในการทดแทน หรือพิจารณาความเป็นไปได้ในการปรับเปลี่ยนข้อกำหนดทางเทคนิคเพื่อให้เหมาะสมกับสถานการณ์

2.1 การกำหนดปัญหา

การกำหนดปัญหาอย่างเหมาะสมเปิดโอกาสให้เกิดวิธีแก้ปัญหาที่ดีที่สุด

ตัวอย่าง ในห้องปฏิบัติการเคยใช้สาร Acetone สำหรับการทำให้เครื่องแก้วแห้ง เนื่องจากทำให้เครื่องแก้วแห้งได้ค่อนข้างเร็ว แต่การทำงานกับ Acetone นั้นไม่เป็นที่พึงพอใจ สุดท้ายจึงมีการเปลี่ยนมาใช้ในการทำให้แห้งด้วยระบบลมแทน โดยเป่าลมให้เครื่องแก้วแห้งได้อย่างง่ายดาย

ตัวอย่างนี้สะท้อนถึงความสำคัญของการกำหนดปัญหา:

- การกำหนดปัญหา อาจจะระบุว่า “การทำงานกับ Acetone นั้นไม่เป็นที่พึงพอใจ เราต้องการหาสารอื่นมาแทน Acetone สำหรับการทำให้เครื่องแก้วแห้ง” แนวทางนี้อาจนำไปสู่การพิจารณาเอทานอลหรือสารทำละลายอื่น ๆ

- อีกแนวทางคือ “เราต้องการให้เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการแห้งอย่างรวดเร็ว แต่การใช้ Acetone ไม่เป็นที่พึงพอใจ เราสามารถทำให้เครื่องแก้วแห้งเร็วขึ้นด้วยวิธีอื่นได้หรือไม่?”

การกำหนดปัญหาคือการอธิบายลักษณะของปัญหาอย่างแม่นยำ: ปัญหาคืออะไร? มีพื้นหลังหรือที่มาของปัญหาอย่างไร? และควรตรวจสอบสิ่งใด?

การกำหนดปัญหาที่เหมาะสมส่งผลต่อการวางแผนแนวทางแก้ปัญหาและทางเลือกที่เป็นไปได้ ดังนั้นการกำหนดปัญหาจึงต้องคำนึงถึงข้อจำกัดของทางแก้ เช่น ความเป็นไปได้ในการพิจารณากระบวนการอื่นที่ไม่ใช้ผลิตภัณฑ์เคมีหรือไม่

เมื่อกำหนดปัญหาแล้ว จำเป็นต้องมองถึงกระบวนการทำงานทั้งหมด ไม่ใช่แค่ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ แต่รวมถึงการทำงานก่อนหน้าและหลังจากนั้นด้วย เช่น กระบวนการทำงานมีอะไรบ้าง เกิดอะไรขึ้นในแต่ละขั้นตอน และจุดมุ่งหมายของกระบวนการทำงานคืออะไร

การกำหนดปัญหาที่ดีนั้น ควรรวมไปถึงการอธิบายสภาพการทำงาน ดังนั้นการเข้าเยี่ยมชมบริษัทในขั้นตอนนี้จะเป็นสิ่งสำคัญ

ที่มาของการรับรู้ปัญหาอาจมาจากหลากหลายแหล่ง เช่น อุบัติเหตุ อาการเจ็บป่วย กลิ่นที่ระคายเคือง การรายงานข่าว หรือคำสั่งจากหน่วยงานด้านสิ่งแวดล้อมในการทำงานของทางภาครัฐ

องค์ประกอบสำคัญของการกำหนดปัญหา ได้แก่

- ปัญหาคืออะไร?
- ที่มาของปัญหาคืออะไร?
- สิ่งใดที่ควรตรวจสอบคืออะไร?
- รายละเอียดของผลิตภัณฑ์
 - a. ข้อมูลของผลิตภัณฑ์
 - b. ผลกระทบทางพิษวิทยาและสุขภาพ
 - c. ผลกระทบต่อสุขภาพในสถานการณ์จริง
- รายละเอียดของการดำเนินงาน
 - a. วัตถุประสงค์ของกระบวนการทำงาน
 - b. รายละเอียดเกี่ยวกับการดำเนินงาน
 - c. ความเชื่อมโยงกับส่วนอื่น ๆ ของงาน
- รายละเอียดเกี่ยวกับการสัมผัสสาร

ปัญหา ที่มา และเป้าหมายของการศึกษาได้อธิบายไว้ข้างต้นแล้ว ในส่วนต่อไปจะให้รายละเอียดเกี่ยวกับอีกสามองค์ประกอบที่เหลือ: รายละเอียดผลิตภัณฑ์ งาน และการสัมผัสสาร

2.1.1 รายละเอียดของผลิตภัณฑ์

2.1.1.1 ข้อมูลของผลิตภัณฑ์

การวิเคราะห์เนื้อหาผลิตภัณฑ์ควรได้รับข้อมูลและคำแนะนำจากบริษัท ผู้ผลิต หรือตัวแทนจำหน่าย และต้องแน่ใจว่าข้อมูลดังกล่าวไม่ล้าสมัย ควรติดต่อตัวแทนจำหน่ายหรือผู้ผลิตเพื่อขอรายละเอียดเชิงลึกเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ หากข้อมูลเกี่ยวกับองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ไม่ครบถ้วน จำเป็นต้องพิจารณาว่ารายละเอียดทั้งหมดนั้นสำคัญหรือไม่

นอกจากนี้ยังสามารถตรวจสอบข้อมูลเพิ่มเติมได้จากทะเบียนผลิตภัณฑ์ของหน่วยงานด้านสิ่งแวดล้อมของทางภาครัฐ

หากองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ไม่ชัดเจน จะไม่สามารถประเมินผลิตภัณฑ์ได้อย่างเหมาะสม

2.1.1.2 ผลกระทบทางพิษวิทยาและสุขภาพ

ภายในเอกสารเล่มนี้ จะให้รายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับการเปรียบเทียบสารและวัสดุต่าง ๆ หนึ่งในวิธีที่ใช้คือ "การประเมินความเป็นพิษ" ซึ่งถือเป็นพื้นฐานสำคัญของการทดแทนสารเคมี

สิ่งที่ควรพิจารณาคือ: มีข้อมูลเกี่ยวกับผลกระทบที่ก่อความระคายเคืองต่อสุขภาพของผลิตภัณฑ์หรือไม่?

2.1.1.3 ผลกระทบต่อสุขภาพในสถานการณ์จริง

ในกรณีที่ข้อมูลเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ไม่ครบถ้วน โดยเฉพาะในกรณีของผลิตภัณฑ์ใหม่หรือกระบวนการและวิธีการที่เพิ่งพัฒนา ผลกระทบต่อสุขภาพอาจไม่สามารถระบุได้ชัดเจน หากไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับผลกระทบต่อสุขภาพ ย่อมไม่สามารถประเมินความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับการใช้ผลิตภัณฑ์นั้นได้

แนวทางสำรวจผลกระทบที่เกิดขึ้นจริง:

- ระบุระยะเวลาที่เกิดอาการระคายเคืองและอาการต่าง ๆ จะหายไปหลังสิ้นสุดเวลาทำงานหรือไม่ เช่น หลังวันทำงาน ช่วงสุดสัปดาห์ หรือในวันหยุด
- วิเคราะห์จำนวนผู้ได้รับผลกระทบและการกระจายผลกระทบในงานแต่ละประเภท
- ตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของงานในกระบวนการที่ใช้ผลิตภัณฑ์และผลกระทบต่อสุขภาพ

2.1.2 รายละเอียดของการดำเนินงาน

2.1.2.1 วัตถุประสงค์ของกระบวนการทำงาน

การระบุวัตถุประสงค์ของกระบวนการทำงานให้ชัดเจนถือเป็นขั้นตอนสำคัญ เพื่อให้การทดแทนเกิดผลที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น หากเป้าหมายของกระบวนการทำงานคือการขจัดคราบน้ำมันบนวัสดุ อาจมีหลายทางเลือก ได้แก่ การใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ สารที่ออกฤทธิ์ประเภทต่าง หรือแม้กระทั่งน้ำ อย่างไรก็ตาม ควรหลีกเลี่ยงการยึดติดกับแนวทางเดิม เช่น การตั้งคำถามว่า "จำเป็นต้องขจัดคราบน้ำมันหรือไม่?"

2.1.2.2 ความเชื่อมโยงกับส่วนอื่น ๆ ของงาน

ในบางกรณี การขจัดคราบน้ำมัน อาจจำเป็นต้องหาวัสดุนั้นต้องการทาสี แต่ในบางครั้งอาจทำเพียงขั้นตอนก่อนการทาสีเท่านั้น ไม่จำเป็นต้องมีในทุกขั้นตอนของกระบวนการทำงาน การทดแทนสารเคมีในแต่ละขั้นตอนควรพิจารณาเป็นส่วนหนึ่งของภาพรวมทั้งหมดของสายการผลิต โดยเป้าหมายคือการลดความเสี่ยงด้านสุขภาพในภาพรวม

2.1.2.3 รายละเอียดของการดำเนินงาน

หากวัตถุประสงค์ของกระบวนการทำงานคือ การขจัดคราบน้ำมันบนวัสดุ จำเป็นต้องอธิบายขั้นตอนการดำเนินงาน เช่น วิธีการดำเนินงานเกิดขึ้นอย่างไร และเมื่อใดที่บุคคลเข้ามามีส่วนเกี่ยวข้อง ลักษณะของขั้นตอนการทำงานเป็นเช่นไร และมีความเสี่ยงหรือไม่ที่ปัจจัยมนุษย์จะนำไปสู่อุบัติเหตุในกระบวนการทำงาน

ปัจจัยที่ควรพิจารณา ได้แก่

- การมีส่วนร่วมของพนักงานในขั้นตอนไหนบ้าง
- ลักษณะประจำของกระบวนการทำงาน
- ความเสี่ยงจากการกระทำของมนุษย์ที่อาจนำไปสู่อุบัติเหตุ

2.1.3 รายละเอียดเกี่ยวกับการสัมผัสสาร

สภาพแวดล้อมทางกายภาพของพนักงานมีความสำคัญอย่างยิ่ง เมื่อต้องประเมินความเสี่ยงการสัมผัสสารที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ การเข้าใจระดับการสัมผัสสารจึงเป็นสิ่งจำเป็น

ปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณา:

- ระยะเวลาและความถี่: สารเคมีถูกใช้งานนานแค่ไหนในแต่ละครั้งและบ่อยเพียงใด

- ปริมาณการใช้งาน: สารเคมีถูกใช้งานในปริมาณเท่าใด
 - ความเสี่ยงต่อการสัมผัสโดยตรง: มีความเสี่ยงที่จะสัมผัสกับสารเคมีโดยตรงในระหว่างกระบวนการหรือจากอุบัติเหตุหรือไม่
 - การสัมผัสผ่านไอรระเหย ควัน หรือฝุ่น: มีความเสี่ยงต่อการสัมผัสในลักษณะนี้หรือไม่
 - สถานะของมลพิษที่ถูกปล่อยออกมา: มลพิษออกมาในรูปแบบใด เช่น ไอรระเหย ควัน ฝุ่น หยดเล็ก ๆ หรือการกระเซ็น
 - อุณหภูมิของสารในระหว่างกระบวนการ: อุณหภูมิมีผลต่อความเสี่ยงหรือไม่
 - สมบัติการติดไฟและการระเบิดของสาร: สารมีคุณสมบัติเสี่ยงต่อการติดไฟหรือการระเบิดหรือไม่
 - ขนาดของพื้นผิวที่สารเคมีเกิดการระเหย
 - ความเสี่ยงจากการสัมผัสสารประกอบที่เกิดขึ้นโดยบังเอิญ เช่น ละอองกรด/เบส ฝุ่น หรือไอรระเหย
 - ประสิทธิภาพของระบบระบายอากาศและการดูดอากาศ
 - การใช้มาตรการความปลอดภัยส่วนบุคคล เช่น หน้ากาก ถุงมือ หรืออุปกรณ์ป้องกันอื่น ๆ
 - การเกิดผลิตภัณฑ์สลายตัวจากสารเคมี
 - อุณหภูมิและความชื้นในพื้นที่ทำงาน ซึ่งส่งผลต่อการแพร่กระจายของสารเคมี
 - มาตรฐานด้านสุขาภิบาลและสุขอนามัยของพื้นที่ทำงาน
 - กระบวนการทำความสะอาดพื้นที่ทำงาน
 - ความเสี่ยงจากกระบวนการทำความสะอาดหรือซ่อมบำรุงที่อาจทำให้เกิดการสัมผัสสารเคมีเพิ่มเติม
 - ประเภทและปริมาณสารเคมีที่ถูกปล่อยออกจากแหล่งกำเนิด สามารถตรวจสอบได้ด้วยการวิเคราะห์การระเหยของสาร
 - ปริมาณสารเคมีที่เข้าสู่เขตหายใจของผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งสามารถวัดได้โดยการตรวจสอบมลพิษทางอากาศในสถานที่ทำงาน
- หากไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะการใช้งานของผลิตภัณฑ์ จะไม่สามารถประเมินความเสี่ยงในการทำงานกับผลิตภัณฑ์นั้นได้อย่างเหมาะสม

นอกจากนี้ ระดับของการออกแรงร่างกายทางกายภาพในการทำงาน เป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อระดับการสัมผัสสาร เนื่องจากเมื่อมีการใช้แรงมากขึ้น อากาศที่สูดเข้าไปก็จะเพิ่มขึ้น ทำให้สัมผัสกับมลพิษมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าขีดจำกัดการสัมผัสสารเคมี (Threshold Limit Value) มักไม่ได้คำนึงถึงความหนักของการออกแรงทางร่างกาย

สุดท้าย จำเป็นต้องมี การประเมินความเสี่ยงโดยรวมของการใช้ผลิตภัณฑ์ เพื่อให้สามารถกำหนดมาตรการควบคุมที่เหมาะสม

2.2 ขั้นตอนการสร้างแนวคิด

ขั้นตอนนี้เกี่ยวข้องกับการรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับแนวทางแก้ไขที่เป็นไปได้จากแหล่งข้อมูลต่าง ๆ โดยควรนำเสนอทุกแนวคิด ทั้งที่ดูเหมือนจะเป็นไปได้และเป็นไปไม่ได้

แนวทางที่ควรพิจารณา ได้แก่

- ความคิดเห็นของพนักงาน: พนักงานอาจมีข้อเสนอที่สามารถนำไปใช้ได้จริง
- ทะเบียนผลิตภัณฑ์: ค้นหาทางเลือกที่ได้รับการจดทะเบียนเพื่อใช้ทดแทน
- แนวทางจากอุตสาหกรรมอื่น: ตรวจสอบว่ามีแนวทางในสถานที่อื่นที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้
- ข้อมูลจากผู้ผลิตหรือตัวแทนจำหน่าย: ขอคำแนะนำเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ทางเลือก
- การคิดเชิงสร้างสรรค์: ไม่ควรจำกัดแนวคิดโดยยึดติดกับข้อจำกัดทางเทคนิคหรือค่าใช้จ่าย

ในขั้นตอนนี้ ไม่ควรปิดกั้นแนวทางใด ๆ ด้วยเหตุผลว่า "เป็นไปไม่ได้", "เกินจริง", "แพงเกินไป", หรือ "ยากเกินไป" รวมไปถึงข้อคิดเห็นที่ขึ้นต้นด้วย "มันมากเกินไปที่จะ..." ควรถูกหลีกเลี่ยงด้วยเช่นกัน

อาจใช้ตัวอย่างจากแหล่งข้อมูลต่าง ๆ รวมถึงศึกษากรณีตัวอย่างเพื่อสร้างแรงบันดาลใจ นอกจากนี้ยังควร ศึกษาว่าอุตสาหกรรมอื่นจัดการกับกรณีที่คล้ายกันอย่างไร

เป้าหมายสำคัญคือ มุ่งเน้นไปที่ การค้นหาวิธีดำเนินงานโดยหลีกเลี่ยงการใช้สารเคมีให้มากที่สุด

2.3 เกณฑ์การประเมิน

ในขั้นตอนนี้ จะมีการกำหนดเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินทางเลือกต่าง ๆ เกณฑ์อาจรวมถึงตัวอย่างต่อไปนี้:

- ทางเลือกต้องส่งเสริมสุขภาพให้ดีขึ้นอย่างแท้จริง
- ทางเลือกต้องไม่ก่อให้เกิดปัญหาใหม่ในสภาพแวดล้อมการทำงาน เช่น ปัญหาด้านการยศาสตร์
- ระดับมลพิษจากการทดแทนต้องไม่เกินกว่าค่าขีดจำกัดที่กำหนด (เช่น ไม่เกิน 1/10 ของค่าขีดจำกัด)
- ทางเลือกต้องไม่ก่อให้เกิดผลกระทบระยะยาวต่อพนักงานในทันที
- ทางเลือกต้องไม่เพิ่มความยุ่งยากในการทำงาน
- ทางเลือกต้องไม่มีสารที่ถูกสงสัยว่ามีฤทธิ์ก่อมะเร็ง ทำให้เกิดความผิดปกติทางพันธุกรรม ก่อให้เกิดอาการแพ้ หรือสร้างความเสียหายเรื้อรังต่อสุขภาพ
- ทางเลือกต้องไม่ส่งผลกระทบในทางลบต่อสิ่งแวดล้อมภายนอก

จำนวนของเกณฑ์สามารถปรับให้มากขึ้นหรือน้อยลงได้ตามความเหมาะสม และควรเรียงลำดับความสำคัญของเกณฑ์เพื่อให้สามารถมุ่งเน้นที่ประเด็นสำคัญที่สุดได้อย่างชัดเจน

นอกจากเกณฑ์ที่กำหนดแล้ว บริษัทอาจมีข้อกำหนดเกี่ยวกับทางเลือกที่ต้องนำมาพิจารณาด้วย เช่น:

- ทางเลือกต้องสามารถจัดคราบน้ำมันได้ 100%
- ต้นทุนของทางเลือกต้องไม่เพิ่มขึ้นเกิน 50%
- ทางเลือกต้องไม่ลดประสิทธิภาพการผลิต

สิ่งสำคัญที่จะต้องหารือเกี่ยวกับข้อกำหนดเหล่านี้ เช่น จำเป็นหรือไม่ที่ทางเลือกต้องมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับผลิตภัณฑ์เดิม? หรือ เพียงพอหรือไม่ที่ทางเลือกมีประสิทธิภาพในระดับที่ยอมรับได้?

ตัวอย่างเช่น ระดับประสิทธิภาพของการจัดคราบน้ำมันขึ้นอยู่กับว่าวัสดุจะถูกนำไปทาสีหรือเชื่อมต่อหลังจากนั้นหรือไม่ ดังนั้น ควรตรวจสอบว่าข้อกำหนดเหล่านี้มีเหตุผลจริง หรือเป็นเพียงแนวคิดที่เกิดจาก "การทำตามแบบเดิม"

2.4 การอธิบายและประเมินทางเลือก

ในขั้นตอนนี้ จะมีการวิเคราะห์แนวทางที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสร้างแนวคิด จำเป็นต้องมีแนวทางที่สมจริงก่อนที่จะใช้เวลาไปกับรายละเอียดเพิ่มเติม

แนวทางที่ดูเป็นไปได้มากและขาดความสมเหตุสมผลจะถูกคัดออก อย่างไรก็ตาม ไม่ควรปิดโอกาสมากเกินไป เพราะหลายครั้งผู้คนมักพบว่า สิ่งที่เคยคิดว่าเป็นไปไม่ได้ กลับสามารถทำได้จริง

กระบวนการประเมินทางเลือกควรอธิบายและประเมินทางเลือกในลักษณะเดียวกับผลิตภัณฑ์เดิม

2.4.1 การประเมินแต่ละทางเลือกโดยใช้เกณฑ์ที่กำหนดไว้

เมื่อตรวจสอบภาพรวมของทางเลือกในบริบทของสภาพแวดล้อมการทำงานแล้ว ขั้นตอนนี้จะเน้นการเปรียบเทียบทางเลือกกับเกณฑ์ที่ได้กำหนดไว้

การย้อนกลับไปยังขั้นตอนก่อนหน้า:

- ในบางกรณี อาจจำเป็นต้องปรับเกณฑ์เดิม หรือเพิ่มพารามิเตอร์ใหม่ในการประเมิน
- อาจจำเป็นต้องประเมินใหม่ว่าทางเลือกสามารถตอบสนองข้อกำหนดทางเทคนิคของบริษัทได้หรือไม่
- ความน่าเชื่อถือของข้อมูลทางเทคนิค
- การประเมินว่าทางเลือกสามารถตอบสนองข้อกำหนดทางเทคนิค ซึ่งมักต้องพึ่งพาข้อมูลจากผู้ผลิต หรือผู้เชี่ยวชาญด้านเทคนิคของบริษัท

- เพื่อหลีกเลี่ยงความเข้าใจผิด อาจให้ หน่วยงานด้านสุขภาพและความปลอดภัยในการทำงาน รับผิดชอบการตรวจสอบคุณสมบัติทางเทคนิคของผลิตภัณฑ์
- อาจให้ตัวแทนจำหน่ายติดต่อโดยตรงกับบริษัท เพื่อให้มีการสื่อสารที่ชัดเจนและไม่เกิดการคาดหวังเกินจริง

2.4.2 การประเมินทางเลือกโดยเปรียบเทียบและตามเกณฑ์ที่กำหนด

เมื่อพิจารณาตามขั้นตอนก่อนหน้านี้ การเลือกแนวทางที่เหมาะสมที่สุดจากตัวเลือกที่มี ไม่ควรเป็นเรื่องยากจนเกินไป และอาจเสนอหนึ่งหรือหลายทางเลือกที่มีความเป็นไปได้สูง

2.5 การตัดสินใจ

ขั้นตอนนี้หมายถึง การตัดสินใจร่วมกับบริษัท

เมื่อมีการตัดสินใจแล้ว อาจรู้สึว่าควรสรุปงานทันที แต่กระบวนการทดแทนที่มีประสิทธิภาพไม่สามารถถือว่าสิ้นสุดได้จนกว่าผลิตภัณฑ์ที่เลือกจะได้รับการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริงและได้รับการประเมิน

หลังจากการพิจารณาอย่างรอบคอบ มักจะเหลือเพียงหนึ่งหรือสองทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งสามารถเลือกได้ผ่านการปรึกษาหารือกับบริษัท อย่างไรก็ตาม ขั้นตอนนี้อาจใช้เวลานานและมีความซับซ้อนเนื่องจากฝ่ายต่าง ๆ ในองค์กร เช่น ผู้บริหาร พนักงาน คณะกรรมการด้านความปลอดภัย และผู้จัดการในแผนกต่าง ๆ อาจมีความคิดเห็นที่ไม่ตรงกัน

นอกจากนี้ ยังต้องตรวจสอบว่า มีปัจจัยที่ไม่ได้กล่าวถึงโดยตรงหรือไม่ ที่อาจส่งผลต่อการตัดสินใจ ในบางกรณีอาจจำเป็นต้องใช้ทักษะด้านการโน้มน้าวใจเพื่อให้ทุกฝ่ายเห็นพ้องกัน

2.6 การดำเนินการ

การมีส่วนร่วมของพนักงานที่เกี่ยวข้องเป็นสิ่งสำคัญในขั้นตอนนี้ ต้องมีการหารือกับผู้ที่ต้องปฏิบัติงานภายใต้แนวทางการทดแทนที่กำหนด

ข้อควรคำนึงถึง ได้แก่

- ไม่ใช่ทุกคนที่ต้องการให้เกิดการทดแทน ดังนั้น ควรมีการพูดคุยเกี่ยวกับข้อดีและข้อเสียของผลิตภัณฑ์ใหม่
- อธิบายถึงเหตุผลที่ผลิตภัณฑ์ใหม่นั้นมีประโยชน์และควรถูกนำมาใช้

นอกจากนี้ ควรกำหนดช่วงเวลาสำหรับการทดลองใช้ผลิตภัณฑ์ และปรึกษากับพนักงานเกี่ยวกับปัจจัยที่ต้องสังเกตในระหว่างช่วงเวลาทดสอบ

2.7 การควบคุมและติดตามผล

หลังจากสิ้นสุดระยะทดลองใช้งาน สามารถดำเนินการประเมินผลตามแนวทางต่อไปนี้:

- ผลิตภัณฑ์ตรงตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในตอนแรกหรือไม่?
- ผลกระทบต่อสุขภาพลดลงหรือไม่?
- มีสัญญาณของผลกระทบใหม่ต่อสุขภาพ จากการใช้ผลิตภัณฑ์ใหม่หรือไม่?
- มีปัญหาใหม่ในสภาพแวดล้อมการทำงานเกิดขึ้นหรือไม่ เช่น ปัญหาด้านการยศาสตร์?
- ระดับการสัมผัสสารของพนักงานเปลี่ยนแปลงไปหลังจากนำกระบวนการใหม่มาใช้หรือไม่?
 - หากมีข้อสงสัย อาจใช้การตรวจวัดมลพิษทางอากาศในสถานที่ทำงานเพื่อประเมินผล
- บริษัทและผู้ใช้งานผลิตภัณฑ์พึงพอใจต่อกระบวนการผลิตที่เกิดขึ้นหรือไม่?
- ปัญหาทั้งหมดได้รับการแก้ไขแล้วหรือไม่ หรือจำเป็นต้องมีการปรับปรุงเพิ่มเติม เช่น การติดตั้งระบบดูดอากาศ?
- มีความจำเป็นต้องทดลองใช้ผลิตภัณฑ์อื่น หรือควรเริ่มกระบวนการใหม่ตั้งแต่ต้นหรือไม่?

เครื่องมือสำหรับการประเมินความเป็นอันตรายของสารเคมี

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสารหรือวัสดุใด ๆ สิ่งสำคัญคือต้องมีการประเมินคุณสมบัติด้านสุขภาพของสารหรือวัสดุนั้นอย่างมีหลักเกณฑ์ รวมถึงการพิจารณาทางเลือกที่เกี่ยวข้องด้วย เพื่อให้มั่นใจว่าการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะส่งผลให้สภาพด้านสุขภาพดีขึ้นอย่างแท้จริง เครื่องมือจำนวนหนึ่งที่สามารถใช้ในการประเมินดังกล่าวได้ ซึ่งจะกล่าวถึงบางส่วนในหัวข้อต่อไป

การประเมินความเป็นพิษ (Toxicity Assessment) ถือว่ามีความสำคัญเป็นพิเศษ เนื่องจากไม่สามารถกล่าวถึงความเสี่ยงจากการทำงานกับผลิตภัณฑ์ใด ๆ ได้ หากยังไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับอันตรายต่อสุขภาพ หรือยังไม่ได้ดำเนินการประเมินความเป็นพิษเพื่อประกอบการพิจารณาแทนที่สารหรือวัสดุเดิม การประเมินดังกล่าวจึงเป็นพื้นฐานสำคัญที่จำเป็นสำหรับการตัดสินใจเกี่ยวกับการจัดการความเสี่ยงและการเลือกใช้สารทดแทนที่ปลอดภัยยิ่งขึ้น. สิ่งสำคัญที่ควรตระหนักคือ การแทนที่สารเคมี (Substitution) จำเป็นต้องดำเนินการบนพื้นฐานของการประเมินภาพรวมทั้งหมดของสถานการณ์การทำงาน รวมถึงสารเคมีที่เกี่ยวข้องไม่สามารถดำเนินการแทนที่ได้โดยอาศัยการนั่งวิเคราะห์เพียงอย่างเดียวหรือใช้เครื่องมือประเมินใดเพียงหนึ่งชนิดเท่านั้น ในทางปฏิบัติมักต้องอาศัยเครื่องมือหลายชนิดร่วมกัน และที่สำคัญที่สุดคือจะต้องมีการประเมินความเป็นพิษอย่างใดอย่างหนึ่งเสมอ เพื่อให้มั่นใจว่าได้ศึกษาความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการใช้สารหรือวัสดุนั้นแล้ว

1. ค่าขีดจำกัดการรับสัมผัสสาร (Threshold Limit Value: TLV): เป็นค่ามาตรฐานที่กำหนดระดับความเข้มข้นของสารเคมีในอากาศที่บุคคลสามารถสัมผัสได้ในระยะเวลาที่กำหนดโดยไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพ

ค่าขีดจำกัดการรับสัมผัสสาร เป็นมาตรฐานเชิงบริหารสำหรับการปนเปื้อนในอากาศ ซึ่งกำหนดโดยสมาคมนักสุขศาสตร์อุตสาหกรรมแห่งอเมริกา (ACGIH) ทั้งนี้ ตามคำแนะนำดังกล่าว ค่า TLV หมายถึง ค่าความเข้มข้นสูงสุดของสารเคมีที่ไม่ควรถูกเกินขีดจำกัด โดยคำนวณจากค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักตามเวลาในช่วงระยะเวลาการทำงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน ค่า TLV ถูกกำหนดขึ้นบนพื้นฐานของเอกสารข้อมูลด้านสุขภาพที่มีอยู่ และได้มีการพิจารณาทั้งในมุมมองทางเทคนิคและเศรษฐกิจ การพิจารณาเหล่านี้ดำเนินการโดยสภาสภาพแวดล้อมการทำงาน (Working Environment Council) ดังนั้น ค่า TLV จึงเป็นการสะท้อนถึงข้อตกลงระหว่างฝ่ายนายจ้างและฝ่ายลูกจ้าง ค่า TLV อาจถูกกำหนดโดยคำนึงถึงผลกระทบต่อสุขภาพ ตัวอย่างเช่น ประมาณ 40% ของค่า TLV ถูกกำหนดจากผลกระทบการระคายเคืองของสารที่เกี่ยวข้อง

อย่างไรก็ตาม รายการ TLV ของสารและวัสดุที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพยังไม่สมบูรณ์ เพื่อแก้ไขปัญหานี้ จึงได้มีการจัดทำบัญชีรายชื่อสารละลายอินทรีย์ที่มีค่า "ค่าเกณฑ์จำกัดเบื้องต้น" (tentative threshold limit values) ขึ้น ซึ่งค่านี้ยังไม่ได้รับการพิจารณาโดยสภาสภาพแวดล้อมการทำงาน และโดยทั่วไปเอกสารข้อมูลประกอบก็ยังไม่สมบูรณ์เทียบเท่ากับสารในรายการ TLV หลัก

การใช้สารทดแทนโดยพิจารณาค่า TLV

การทดแทนโดยใช้ค่าเกณฑ์ขีดจำกัด (Threshold Limit Value: TLV) หมายถึงการใช้ค่า TLV เป็นเกณฑ์หนึ่งในการตัดสินใจเลือกสารหรือวัสดุทดแทน โดยมุ่งเน้นการลดความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการสัมผัสสารอันตรายในสถานที่ทำงาน ในกระบวนการนี้ จะมีการเปรียบเทียบค่า TLV ของสารที่ใช้อยู่เดิมกับสารทดแทนที่เป็นไปได้ สารที่มีค่า TLV สูงกว่าจะบ่งชี้ว่ามีความเป็นอันตรายต่อสุขภาพน้อยกว่าเมื่อพิจารณาจากระดับความเข้มข้นที่อนุญาตให้สัมผัสได้ตลอดช่วงเวลาการทำงาน 8 ชั่วโมง ดังนั้น การเลือกสารทดแทนที่มีค่า TLV สูงกว่าจึงถือเป็นแนวทางหนึ่งในการปรับปรุงสภาพแวดล้อมการทำงานให้ปลอดภัยยิ่งขึ้น

อย่างไรก็ตาม การใช้ TLV เป็นเกณฑ์เดียวในการตัดสินใจทดแทนไม่เพียงพอ จำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยอื่น ๆ ร่วมด้วย เช่น ความสามารถในการระเหย สมบัติทางเคมีและกายภาพ ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงต้นทุนในการนำไปใช้จริง ทั้งนี้ เพื่อให้การทดแทนเกิดประโยชน์สูงสุดทั้งในด้านสุขภาพ ความปลอดภัย และประสิทธิภาพการทำงาน

ตัวอย่างเช่น การผลิตกาวพีวีซี PVC

บริษัทแห่งหนึ่งได้ติดต่อขอคำปรึกษาจากหน่วยบริการด้านอาชีวอนามัย เนื่องจากพบว่าพนักงานบางรายเกิดอาการปวดศีรษะและอ่อนเพลียขณะทำการยัดติดวัสดุที่มีการใช้กาวพีวีซี (PVC) ทางบริษัทจึงต้องการให้หน่วยบริการด้านอาชีวอนามัยช่วยจัดหาและแนะนำกาวยัดติดที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าเพื่อใช้ทดแทนวัสดุเดิม. ผลิตภัณฑ์กาวที่ใช้อยู่ในปัจจุบันประกอบด้วยสารบิวทาโนน (เมทิลเอทิลคีโตน, MEK), เตตระไฮโดรฟูแรน (THF) และไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (DMF) โดยในสถานที่ทำงานมีการใช้ถุงมือป้องกันและระบบดูดไอระเหย (exhaust box) เพื่อควบคุมการสัมผัสสารเคมีดังกล่าว.

การศึกษาผลิตภัณฑ์กาวทางเลือกพบว่ากาวที่มีองค์ประกอบหลักเป็นสารเอ็นเมทิลไพโรลิโดน (N-methyl- pyrrolidone, NMP) เป็นตัวเลือกที่เหมาะสม โดยเลือกผลิตภัณฑ์นี้จากการพิจารณาข้อมูลหลายด้าน รวมถึงการวัดอัตราการระเหยของกาวชนิดต่าง ๆ ซึ่งได้ดำเนินการโดยห้องปฏิบัติการอิสระตามคำร้องขอของผู้ผลิตรายหนึ่ง อย่างไรก็ตาม ไม่นานหลังจากการนำกาวชนิดใหม่นี้มาใช้ พนักงานคนหนึ่งเริ่มมีอาการแขนขา ส่งผลให้มีการรายงานการเจ็บป่วย นอกจากนี้ยังพบปัญหาด้านคุณภาพในการยัดติดของวัสดุ และระยะเวลาการตั้งตัวของกาวก็เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

โดยสารเคมีที่เป็นส่วนประกอบของกาวพีวีซี ประกอบไปด้วย สารต่อไปนี้

	Product-1			Product-2
	THF	MEK	DMF	NMP
ค่าขีดจำกัดการรับสัมผัสสาร Threshold limit value (ppm)	200	100 (skin)	10 (skin)	100
ปริมาณสารในผลิตภัณฑ์ (%)*	55	17	7	70

*แสดงส่วนผสมที่แสดงเป็น %v/v ของผลิตภัณฑ์ ที่เหลือของส่วนผสมเป็นของแข็งแห้ง

การเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ทั้งสองโดยใช้ค่า TLV (Threshold Limit Value) นั้นไม่ใช่เรื่องง่าย เนื่องจากไม่มีสูตรมาตรฐานที่สามารถคำนวณค่า TLV "รวม" สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ประกอบด้วยสารหลายชนิดแต่ละชนิดมีค่า TLV ของตนเอง (เช่น ผลิตภัณฑ์ที่ 1) ได้อย่างชัดเจน ตัวอย่างเช่น ปริมาณครึ่งหนึ่งของผลิตภัณฑ์ที่ 1 ประกอบด้วยสารที่มีค่า TLV สูงกว่าค่า TLV ของผลิตภัณฑ์ที่ 2 อย่างไรก็ตามในผลิตภัณฑ์ที่ 1 มีปริมาณ DMF ซึ่งเป็นสารที่มีค่า TLV ต่ำกว่าค่า TLV ของ NMP ในผลิตภัณฑ์ที่ 2 อยู่ด้วย ดังนั้น การพิจารณาโดยอิงเฉพาะค่า TLV เพียงอย่างเดียวจึงไม่สามารถชี้ชัดได้ว่าควรเลือกผลิตภัณฑ์ใด ในตัวอย่างของกาวยึดติด PVC เราได้เห็นแล้วว่า เป็นไปไม่ได้ที่จะเปรียบเทียบค่า TLV ของผลิตภัณฑ์สองชนิดได้โดยตรง เมื่อผลิตภัณฑ์เหล่านั้นประกอบด้วยสารหลายชนิดที่มีค่า TLV แยกกัน

สิ่งสำคัญที่ต้องตระหนักคือ ค่า TLV ให้ข้อมูลเฉพาะเกี่ยวกับความเข้มข้นในอากาศเท่านั้น และกล่าวถึงการสัมผัสรูปแบบอื่น ๆ ในระดับที่จำกัดมาก หมายเหตุเกี่ยวกับการดูดซึมทางผิวหนัง (skin notation) ซึ่งระบุในตาราง สำหรับสารที่สามารถดูดซึมผ่านผิวหนังได้ เป็นความพยายามในการจัดการกับประเด็นนี้ อย่างไรก็ตาม ไม่ใช่สารทุกชนิดที่สามารถดูดซึมผ่านผิวหนังได้จะได้รับการระบุ เช่น NMP ซึ่งเป็นที่ทราบกันว่าสามารถซึมผ่านผิวหนังได้

สุดท้ายยังมีความแตกต่างอย่างมากในคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสาร เช่น อัตราการระเหย ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งเนื่องจากเป็นตัวกำหนดปริมาณสารที่บุคคลหนึ่งสูดดมเข้าไป ซึ่งหมายความว่า การเปลี่ยนสารไปใช้สารที่มีค่า TLV สูงเป็นสองเท่า อาจส่งผลให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพเพิ่มขึ้นได้ หากสารดังกล่าวมีอัตราการระเหยเร็วกว่าสารเดิมถึง 10 เท่า ปัญหาดังกล่าวได้รับการแก้ไขโดยการใช้เครื่องมือ "อัตราอันตรายจากไอระเหย" (Vapor Hazard Ratio, VHR) และ "ปัจจัยการแทนที่" (Substitution Factor, SUBFAC) ซึ่ง จะได้รับการอธิบายในส่วนถัดไป

2. อัตราความเสี่ยงจากไอระเหย (Vapor Hazard Ratio: VHR): เป็นการวัดความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับการสูดดมไอระเหยของสารเคมี โดยเปรียบเทียบความเข้มข้นของไอระเหยกับค่าเกณฑ์จำกัดการสัมผัส เพื่อประเมินระดับอันตราย

เมื่อค่า TLV ทำหน้าที่เป็นเพียง “ดัชนีทางพิษวิทยา” (toxicological index) เท่านั้น VHR (Vapor Hazard Ratio) จะสะท้อนความน่าจะเป็นในการที่ความเข้มข้นของสารเคมีในอากาศจะเกินค่า TLV โดยใน VHR จะคำนึงถึงพฤติกรรมของสารเคมีที่แตกต่างกันในสภาวะแวดล้อมการทำงาน กล่าวคือ ความสามารถในการระเหยของสารเคมีแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อระดับการสัมผัสสารของผู้ปฏิบัติงาน

สำหรับสารบริสุทธิ์ อัตราส่วนอันตรายจากไอระเหย (Vapor Hazard Ratio: VHR) ถูกกำหนดให้เป็นอัตราส่วนระหว่าง ความเข้มข้นของไอระเหยที่อิ่มตัว ของสารที่อุณหภูมิห้อง กับ ค่าขีดจำกัดความเข้มข้นในอากาศ (Threshold Limit Value: TLV) ของสารนั้น

สามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้:

$$VHR = \frac{C_i}{TLV_i}$$

โดยที่: C_i = ความเข้มข้นของไอระเหยที่อิ่มตัวของสาร (โดยปกติจะแสดงในหน่วย mg/m^3)

TLV_i = ค่าขีดจำกัดความเข้มข้นของสารในอากาศ (หน่วยเป็น mg/m^3 เช่นกัน)

ดังนั้น VHR จะให้ค่าความเข้มข้นในบรรยากาศสามารถเกินค่าที่กำหนดสำหรับการสัมผัสในสถานประกอบการได้ง่ายเพียงใด ภายใต้สภาวะมาตรฐาน

การแปลความหมาย: หาก VHR มีค่าสูง แสดงว่าสารนั้นสามารถทำให้ความเข้มข้นในอากาศเกิน TLV ได้ง่าย ซึ่งหมายถึง ความเสี่ยงในการสัมผัสสูง / หาก VHR มีค่าต่ำ แสดงว่ามีโอกาสน้อยที่ความเข้มข้นจะเกิน TLV ซึ่งหมายถึง ความเสี่ยงในการสัมผัสต่ำ

C_i มักแสดงในหน่วยของความดัน (เช่น mmHg, Pa, atm) และจะเรียกในลักษณะนี้ว่า "ความดันไออิ่มตัว" (pressure of saturated vapors), ความดันไอ (vapor pressure) หรือชื่อที่คล้ายกัน

หาก C_i ถูกระบุเป็นหน่วย mmHg การแปลงค่าไปเป็นหน่วย ppm สามารถทำได้โดยใช้สูตร:

$$C_i(\text{ppm}) = \frac{P_i(\text{mmHg})}{760} \times 1000000$$

แม้ว่า VHR จะถูกกำหนดขึ้นสำหรับสารบริสุทธิ์เท่านั้น แต่ก็มักถูกนำไปประยุกต์ใช้กับสารประกอบอยู่บ่อยครั้ง

$$VHR = \frac{V_1 C_1}{TLV_1} + \frac{V_2 C_2}{TLV_2} + \dots + \frac{V_x C_x}{TLV_x}$$

สารประกอบในที่นี้ประกอบด้วยสาร x ชนิด โดยแต่ละชนิดมีค่า TLV และความดันไออิ่มตัว (ความเข้มข้นสมดุล) ของตนเอง สารแต่ละชนิดมีปริมาณอยู่ในสารประกอบตามค่าน้ำหนักร้อยละ (V)

การใช้สารทดแทนโดยพิจารณาค่า VHR

การที่ค่าระดับความเข้มข้นของสารเคมีจะสูงเกินค่าขีดจำกัด TLV หรือไม่นั้น ย่อมขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารเคมี ความสามารถในการกลายเป็นไอของสาร รวมถึงวิธีการจัดการกับผลิตภัณฑ์ดังกล่าว เนื่องจาก VHR แสดงถึงความน่าจะเป็นที่ค่า TLV จะถูกเกินขีดจำกัด ดังนั้น ผลิตภัณฑ์ที่มีค่า VHR ต่ำจะได้รับการพิจารณาให้เป็นตัวเลือกที่ดีกว่าผลิตภัณฑ์ที่มีค่า VHR สูง

ตัวอย่างการใช้ค่า VHR ในการพิจารณาความเป็นอันตราย

การใช้สารทดแทนในกรณีของ กาว PVC ในที่นี้ดำเนินการโดยอาศัยการคำนวณค่า VHR (Vapor Hazard Ratio)

	Product-1			Product-2
	THF	MEK	DMF	NMP
ค่าขีดจำกัดการรับสัมผัสสาร Threshold limit value (ppm)	200	100 (skin)	10 (skin)	100
ความเข้มข้นของสารที่สภาวะ สมดุล (ppm)	170,000	127,000	3,751	525
Quantity (%)*	55	17	7	70

*แสดงส่วนผสมที่แสดงเป็น %v/v ของผลิตภัณฑ์ ที่เหลือของส่วนผสมเป็นของแข็งแห้ง

การคำนวณค่า VHR ได้ผลการคำนวณดังนี้

$$\text{VHR (product-1)} = 710$$

$$\text{VHR (product-2)} = 4$$

$$\text{VHR (1) / VHR (2)} = 178$$

อัตราส่วนระหว่างค่า VHR แสดงถึงอัตราส่วนระหว่างจำนวนครั้งที่ค่าขีดจำกัดความเข้มข้นในอากาศ (Threshold Limit Value; TLV) อาจถูกเกินได้ในทางทฤษฎี การคำนวณค่า VHR ให้ผลเป็นประโยชน์ต่อผลิตภัณฑ์ที่ 2: การเกินค่าขีดจำกัดความเข้มข้นในอากาศสูงสุดของผลิตภัณฑ์นี้ต่ำกว่าของผลิตภัณฑ์ที่ 1 ถึง 178 เท่า

มีข้อสังเกตว่า Ci ไม่ได้บ่งบอกถึงอัตราการระเหยของสาร แต่เพียงแสดงค่าความเข้มข้นสูงสุดของสารในอากาศเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ค่า Ci และอัตราการระเหยมีความสัมพันธ์กันโดยประมาณ กล่าวคือ หากค่า Ci เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า อัตราการระเหยจะเพิ่มขึ้นประมาณสามเท่า

ตรงกันข้ามกับค่า TLV วิธีการของ VHR นั้นคำนึงถึงอัตราการระเหยที่แตกต่างกันของสารเคมี

VHR ใช้ค่า Threshold Limit Values (TLVs) เป็นตัวบ่งชี้ผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ ดังนั้นข้อจำกัดของ TLV จึงถูกส่งผ่านมาสู่ VHR ด้วย วิธีการนี้อาจนำไปสู่ผลลัพธ์ที่คลาดเคลื่อน หากเป็นการเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบต่างกันอย่างมาก ความแตกต่างอาจเกี่ยวข้องกับควมมีขั้ว (polarity) ขององค์ประกอบ ซึ่งสะท้อนถึงสมบัติการละลายเข้ากันได้ เช่น เบนซีนเป็นตัวทำละลายไม่มีขั้ว ในขณะที่น้ำและเอทานอลเป็นตัวทำละลายที่มีขั้ว ดังนั้นจึงสมเหตุสมผลที่จะต้องกำหนดให้มีความแตกต่างของค่า VHR อย่างมาก เพื่อให้มั่นใจได้ว่าการแทนที่ด้วยสารใหม่จะได้ผลดี

ผลลัพธ์จากการคำนวณ VHR ของผลิตภัณฑ์ "ประเภทน้ำ" ที่มีสารตัวทำละลายอินทรีย์ตกค้าง เช่น โทลูอินและเบนซีน จะเบี่ยงเบนจากสภาพจริงอย่างมาก

VHR จึงไม่สามารถใช้เป็นเครื่องมือเพียงอย่างเดียวในการตัดสินใจแทนที่สารได้ เนื่องจากไม่ได้คำนึงถึงการดูดซึมผ่านผิวหนัง หรือการสูดดมในรูปแบบละอองลอย (aerosols) รวมถึงความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากการสัมผัสดังกล่าวด้วย

คำถามที่ชัดเจนก็คือ: ค่า VHR ต้องต่ำกว่าค่าเดิมกี่เท่าเพื่อให้การแทนที่สำเร็จ? การแทนที่ด้วยผลิตภัณฑ์ที่มีค่า VHR เพียงครั้งหนึ่งนั้น "เพียงพอ" หรือไม่? หรือจำเป็นต้องมีอัตราส่วนที่มากกว่า 100 เท่า? จำเป็นต้องตระหนักว่า VHR เป็นค่าทางทฤษฎี ซึ่งไม่ได้คำนึงถึงลักษณะการใช้งานของผลิตภัณฑ์ในสภาพแวดล้อมการทำงานจริง

การประเมินความเป็นพิษ

ในขณะที่ค่า VHR SUBFAC และ MAL ขึ้นอยู่กับค่าขีดจำกัด (TLV) ซึ่งเป็นดัชนีชี้วัดของผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ แต่การประเมินความเป็นพิษขึ้นอยู่กับข้อมูลผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ

การประเมินความเป็นพิษเป็นกระบวนการสำคัญในการหาสารเคมีทดแทนที่ปลอดภัยกว่าในที่ทำงาน โดยการประเมินนี้จะพิจารณาข้อมูลที่เกี่ยวข้องถึงผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพจากสารเคมีต่างๆ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถมาจากการทดลองในห้องปฏิบัติการกับสัตว์และจุลินทรีย์ หรือจากการศึกษาเชิงระบาดวิทยา

วัตถุประสงค์หลักของการประเมินความเป็นพิษคือการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อประเมินผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ การประเมินนี้มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากช่วยให้เราทราบถึงความเสี่ยงและผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้สารเคมี และสามารถหาทางเลือกที่ปลอดภัยกว่าได้

กล่าวโดยสรุป การประเมินความเป็นพิษเป็นขั้นตอนที่จำเป็นในการหาสารเคมีทดแทนที่ปลอดภัยกว่า โดยต้องรู้ถึงผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพจากสารเคมีต่างๆ เพื่อให้สามารถทำการทดแทนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.6.1 เครื่องมือ การประเมินความเป็นพิษอาจแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน: การประเมินสารเคมี

- การรวบรวมและประมวลผลข้อมูลทางพิษวิทยาของสารเคมี ขั้นตอนนี้จะส่งผลให้มีการประเมินความเป็นพิษของสาร
- การกำหนดความเสี่ยงของอันตรายต่อสุขภาพจากการใช้สารเคมี โดยพิจารณาจากข้อมูลทางพิษวิทยาดังต่อไปนี้
 1. การดูดซึมและการขับถ่าย, การเปลี่ยนแปลง (เมแทบอลิซึม), การสะสม
 2. ความเป็นพิษเฉียบพลัน
 3. ผลกระทบต่อผิวหนังและดวงตา
 4. ผลกระทบที่ทำให้เกิดการกลายพันธุ์
 5. มะเร็ง
 6. ความเสียหายที่มีผลต่อการสืบพันธุ์ (ความเสียหายต่อไข่และเซลล์อสุจิ, ผลกระทบที่ทำให้เกิดความพิการแต่กำเนิด, ความเสียหายจากการส่งผ่านโดยตรงหรือสารโดยนัยผ่านแม่ เป็นต้น)
 7. ภูมิแพ้
 8. ความเสียหายเรื้อรังอื่นๆ ต่อสุขภาพ

3.6.1.1 การดูดซึมและการขับถ่าย, การเปลี่ยนแปลง (เมแทบอลิซึม), การสะสม

สารเคมีสามารถถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้สามวิธี:

- ผ่านปอด (โดยการสูดดม)
- ผ่านทางเดินอาหาร
- ผ่านผิวหนังและเยื่อเมือก

ถึงแม้ว่าสารเคมีที่ใช้ในการทำงานจะไม่ถูกกินหรือดื่มโดยตรง แต่สารหลายชนิดมักถูกดูดซึมผ่านทางเดินอาหาร ตัวอย่างเช่น ผุ่นและละอองลอย ซึ่งเมื่อติดอยู่ในเยื่อเมือกของทางเดินหายใจจะถูกขนส่งขึ้นไปยังหลอดอาหารเพื่อกลืนลงไป มีการศึกษาพบว่าตะกั่วซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมมักถูกดูดซึมผ่านทางเดินอาหาร สาเหตุไม่เพียงแต่ที่กลืนมาข้างต้น แต่ยังรวมถึงการที่ตะกั่วติดอยู่ที่นิ้วมือและเสื้อผ้าเมื่อรับประทานอาหารกลางวันและถูกกินเข้าไป

โครงสร้างของสารเคมีมีความสำคัญในการดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย ขนาดของอนุภาคผุ่นและละอองแขวนลอยจะเป็นตัวกำหนดว่าพวกมันจะไปถึงปอดหรือสะสมอยู่ในทางเดินหายใจส่วนบน

สุดท้าย โครงสร้างทางเคมีของสารจะเป็นตัวกำหนดวิธีที่ร่างกายเปลี่ยนแปลงพวกมันก่อนที่จะถูกขับออก ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ช้าหรือเร็ว สารบางชนิดอาจสะสม (เก็บไว้) ในร่างกาย เช่น ตะกั่ว ฟลูออรีน และสตรอนเทียม ซึ่งทั้งหมดนี้สะสมอยู่ในเนื้อเยื่อกระดูก

ตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิดสะสมได้ง่ายในเนื้อเยื่อไขมัน (เช่น ไตรคลอโรเอเทน) มีเนื้อเยื่อไขมันมากในสมองและเส้นประสาท

ค่าครึ่งชีวิต (half life) หมายถึง ระยะเวลาที่ปริมาณของสารสลายจนเหลือครึ่งหนึ่งของปริมาณเริ่มต้น

3.6.1.2 ความเป็นพิษเฉียบพลัน

ความเป็นพิษเฉียบพลันหรือ "ผลกระทบที่เกิดขึ้นทันที" ปรากฏหลังจากการสัมผัสสารในระยะสั้น ในหลายกรณีหมายถึงปริมาณที่เป็นพิษถึงตายซึ่งแสดงโดยค่าที่เรียกว่า LD แต่สิ่งสำคัญคือต้องเข้าใจว่ามีผลกระทบหลายอย่าง เช่น ปวดศีรษะและเวียนศีรษะ อาจเป็นผลกระทบเฉียบพลันได้เช่นกัน สิ่งนี้แสดงให้เห็นโดยตัวเลขต่อไปนี้ที่แสดงผลกระทบของแต่ละปริมาณ

มีข้อมูล LD50 จำนวนมากที่กำหนดโดยการทดลองกับสัตว์ โดยปกติคือหนู สัตว์จะถูกแบ่งออกเป็นกลุ่ม และแต่ละกลุ่มจะได้รับปริมาณสารที่กำหนด ปริมาณที่ฆ่าสัตว์ทดลองตาย 50% ในกลุ่มเรียกว่าค่า LD50 ค่าที่ใช้

บ้อยที่สุดคือ LD50 ทางปาก (สารถูกให้ผ่านทางปาก); LD ย่อมาจาก "lethal dose" และให้ในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อกิโลกรัมน้ำหนักตัว

LC50 เป็นค่าอีกค่าหนึ่งที่ใช้: หมายความว่าสารนั้นถูกสูดดมเข้าไป (C ย่อมาจาก "concentration" หรือความเข้มข้น) ค่า LD50 ไม่ได้บอกเกี่ยวกับผลกระทบที่เป็นอันตรายหรือระคายเคืองที่สารอาจก่อให้เกิดขึ้นได้ทันที เช่น ปวดศีรษะ เวียนศีรษะ เจ็บป่วยเล็กน้อย ระคายเคืองทางเดินหายใจ และอื่นๆ สิ่งสำคัญคือต้องค้นหาข้อมูลเพื่ออธิบายผลกระทบอื่นๆ ที่ไม่ใช่การเสียชีวิตต่อมนุษย์

3.6.1.3 ผลกระทบต่อผิวหนังและดวงตา

ผลกระทบต่อผิวหนังและดวงตาเป็นแบบเฉียบพลัน (ผื่นแพ้จะถูกจำแนกในผลกระทบอื่นๆ)

3.6.1.4 ผลกระทบที่ก่อให้เกิดการกลายพันธุ์

ผลกระทบเหล่านี้เรียกอีกอย่างว่าความเสียหายทางพันธุกรรมและอาจนำไปสู่การแท้งบุตร ความพิการแต่กำเนิด และมะเร็ง หากยีนถูกเปลี่ยนแปลง จะเรียกว่าการกลายพันธุ์ หากการกลายพันธุ์เกิดขึ้นในเซลล์สืบพันธุ์ (เช่น ในเซลล์ไข่) ผลของการกลายพันธุ์อาจทำให้อ่อนของเซลล์นี้ผิดปกติและอาจจบลงด้วยการแท้งบุตรในระยะแรก หากการกลายพันธุ์เกิดขึ้นในเซลล์ร่างกาย ผลลัพธ์อาจเป็นมะเร็ง

3.6.1.5 มะเร็ง

ประเภทของมะเร็งที่เกิดจากสารเคมีส่วนใหญ่เกิดจากการที่ยีนของเซลล์ถูกเปลี่ยนแปลง (ยีนกลายพันธุ์) สารก่อมะเร็งบางชนิด มีผลต่อบริเวณที่สัมผัสเอง

การจัดกลุ่มสารก่อมะเร็งของ IARC แบ่งออกเป็น 5 กลุ่มหลัก

1. มีหลักฐานเพียงพอเกี่ยวกับการก่อมะเร็งในมนุษย์
2. ความเป็นไปได้ที่สารอาจก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ (ข้อมูลจำกัด)
 - 2A. สารอาจก่อมะเร็งในมนุษย์ เช่น มีหลักฐานจำกัดเกี่ยวกับการก่อมะเร็งในมนุษย์ และมีหลักฐานเพียงพอเกี่ยวกับการก่อมะเร็งในสัตว์ทดลอง
 - 2B. สารอาจก่อมะเร็งในมนุษย์ เช่น มีหลักฐานจำกัดในมนุษย์ แต่ไม่มีหลักฐานเพียงพอในสัตว์ทดลอง
3. ไม่สามารถจัดประเภทตามผลกระทบที่ก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ได้
4. อาจไม่ก่อมะเร็งในมนุษย์

3.6.1.6 ความเสียหายที่มีผลต่อการสืบพันธุ์

ความเสียหายเหล่านี้รวมถึงความเสียหายต่อเซลล์ไข่ เซลล์อสุจิ ตัวอ่อน และเด็ก (โดยการให้นมบุตร)

สารจะถูกประเมินว่าเป็นสารก่อความพิการแต่กำเนิด (teratogenic) ตามเกณฑ์ดังนี้:

1. ลดความสามารถในการเจริญพันธุ์
2. ทำลายไข่
3. ทำลายตัวอ่อน

3.6.1.7 ภูมิแพ้

สารเคมีก่อให้เกิดโรคภูมิแพ้ทางเดินหายใจและโรคภูมิแพ้ผิวหนัง

3.6.1.8 ความเสียหายเรื้อรังอื่น ๆ ต่อสุขภาพ

ความเสียหายต่อปอด ตับ และสมอง

3.6.2 การทดแทนโดยการประเมินความเป็นพิษ

การประเมินความเป็นพิษมักไม่สามารถเปรียบเทียบค่าเชิงตัวเลขได้โดยตรงเพื่อพิจารณาว่าการทดแทนสำเร็จหรือไม่ จำเป็นต้องเปรียบเทียบข้อมูลดั้งเดิมจากการทดลองที่ดำเนินการภายใต้เงื่อนไขต่างๆ บางวิธีจะกำหนดตัวเลขให้กับความเป็นพิษ (เช่น ค่า LD50, ดัชนีการระคายเคืองผิวหนังและตา เป็นต้น)

3.6.3 ตัวอย่าง

ข้อมูลของกาวพีวีซี มาจาก Sax ซึ่งเป็นเอกสารอ้างอิงที่มีการใช้อย่างแพร่หลาย เป็นที่ชัดเจนว่าค่า LD50 ไม่ใช่ตัวบ่งชี้ที่ดีของผลกระทบอันตรายของกาวพีวีซี นอกจากนี้ ตารางยังแสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ 1 มีสารที่อาจมีผลต่อระบบประสาทและทำให้เกิดความผิดปกติในทารกแรกเกิด ยิ่งไปกว่านั้น ตับและไตอาจได้รับความเสียหาย ผลิตภัณฑ์ 2 ไม่มีผลกระทบต่อสุขภาพเหล่านี้ตามเอกสารอ้างอิงที่ใช้จากข้อมูลเหล่านี้ จึงควรเลือกผลิตภัณฑ์ 2

3.6.4 การอภิปราย

การประเมินความเป็นพิษไม่สามารถลดทอนให้เป็นเพียงการเปรียบเทียบตัวเลข เช่น ค่า LD50 และดัชนีการระคายเคืองผิวหนัง ในแต่ละกรณี ข้อมูลที่ได้มาต้องถูกนำมาเปรียบเทียบและประเมิน ซึ่งมักจะยากมาก ตัวอย่างเช่น จะประเมินผลิตภัณฑ์ที่ระคายเคืองผิวหนังเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายถาวรต่อสมองอย่างไร? ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องรู้กระบวนการทำงานอย่างแม่นยำ: หากไม่มีความเสี่ยงที่ผลิตภัณฑ์จะสัมผัสกับผิวหนัง การประเมินอาจทำได้ง่ายขึ้น

เงื่อนไขหนึ่งในการทำการประเมินความเป็นพิษที่ดีคือ ผลิตภัณฑ์ที่จะประเมินต้องได้รับการอธิบายโดยใช้การประกาศส่วนประกอบที่ครบถ้วน ซึ่งเป็นเรื่องยากที่จะได้มา ดังที่ผู้ปฏิบัติงานด้านอาชีวอนามัยหลายคนทราบดี เช่น จำเป็นหรือไม่ที่ต้องขอข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณต่ำกว่าปริมาณหนึ่ง (เช่น 0.1%)? และสิ่งเจือปน? สารก่อมะเร็งและสารก่อภูมิแพ้ก็ทำลายสุขภาพได้แม้ว่าปริมาณในผลิตภัณฑ์จะน้อยก็ตาม

การประเมินความเป็นพิษอย่างละเอียดต้องใช้เวลา ดังนั้นจึงควรพิจารณาว่าเมื่อใดจำเป็นต้องทำการประเมินด้วยตนเอง และเมื่อใดที่สามารถใช้ผลการประเมินของหน่วยงานอื่นได้ - และหน่วยงานใดที่อาจเชื่อถือได้ นอกจากนี้ นอกจากนี้ โดยเฉพาะในกรณีของสารใหม่มักจะขาดข้อมูลทางพิษวิทยา เกี่ยวกับผลกระทบระยะยาว ความเสียหายต่อระบบสืบพันธุ์ มะเร็ง ฯลฯ เป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องศึกษาเงื่อนไขของการทดลอง - ใช้สัตว์ชนิดใด มีการให้ปริมาณสารเท่าใดแก่สัตว์ (และเป็นระยะเวลานานเท่าใด) ในการศึกษาทางระบาดวิทยา เป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องรู้ระดับการสัมผัสของบุคคล อายุ นิสัยการสูบบุหรี่และการดื่มแอลกอฮอล์ ฯลฯ

Substance	LD , oral, rat,,50	Toxicological information ^a	Code ^a
THF	3,000 mg/kg	ระคายเคืองต่อดวงตา เยื่อเมือก ผลกระทบที่เป็นพิษระดับปานกลาง ผ่านการกินและทางหายใจ อาจเกิดผลกระทบต่อดับและไต	2
DMF	2,800 mg/kg	ส่งผลกระทบต่อระบบประสาทส่วนกลางของมนุษย์ ก่อให้เกิดความผิดปกติในตัวอ่อน (teratogenic) ในการทดลองกับสัตว์ มีผลกระทบที่เป็นพิษระดับปานกลางถึงต่ำในสัตว์หลายชนิด	3
MEK	3,400 mg/kg	ผลกระทบที่เป็นพิษระดับปานกลางจากการบริโภค ผลกระทบที่เป็น	3

		พิษระดับต่ำจากการดูดซึมผ่านผิวหนัง การระคายเคืองรุนแรง (ต่อดวงตาและเยื่อเมือก) ส่งผลกระทบต่อระบบประสาทส่วนปลายและระบบประสาทส่วนกลาง ก่อให้เกิดความผิดปกติในตัวอ่อน (teratogenic) ในการทดลองกับสัตว์	
NMP	4,200 mg/kg	ผลกระทบที่เป็นพิษระดับปานกลางจากการดูดซึมโดยตรงผ่านกระแสเลือด (ทางหลอดเลือดดำ) และจากช่องท้อง ผลกระทบที่เป็นพิษระดับต่ำจากการให้ทางปากหรือการดูดซึมผ่านผิวหนัง	2 หรือ 1

a ในเอกสารอ้างอิงนี้ มีการกำหนดรหัสให้กับสารต่างๆ (มีรหัส: U = ไม่มีข้อมูล, ไม่ทราบถึงผลกระทบที่เป็นพิษ, 0 = ไม่มีผลกระทบที่เป็นพิษ, 1 = ผลกระทบที่เป็นพิษต่ำ, 2 = ผลกระทบที่เป็นพิษปานกลาง, 3 = ผลกระทบที่เป็นพิษสูง) การกำหนดรหัสนี้ดำเนินการโดยพิจารณาทั้งผลกระทบเฉพาะที่เฉียบพลันและผลกระทบต่ออวัยวะ รวมถึงผลกระทบเฉพาะที่เรื้อรังและผลกระทบต่ออวัยวะ การแบ่งประเภทสารเคมีเช่นนี้อาจมีประโยชน์ในการประเมินความเป็นพิษ แต่ก็อาจมีปัญหาเช่นกัน ตัวอย่างเช่น ผลกระทบระยะยาวมีการถ่วงน้ำหนักเท่าใดเมื่อเทียบกับผลกระทบเฉียบพลันต่อผิวหนังและดวงตา

3.7 แนวปฏิบัติปัจจุบัน

- การเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ที่ใช้ตัวทำละลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้น้ำ เช่น ในหมวดหมู่ของสี สารทำความสะอาดและขจัดคราบ และสารหล่อลื่น
- การเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ที่มีไฮโดรคาร์บอนสายสั้นเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีไฮโดรคาร์บอนสายยาว

- การทดแทนที่หลีกเลี่ยงกลุ่มสารเคมีหลายกลุ่ม เช่น อีพ็อกซี, เอมีน, ตะกั่วและโลหะหนักอื่นๆ, แอสเบสตอส และอื่นๆ

แนวปัจจุบันมักเกิดจากการศึกษาที่ละเอียดถี่ถ้วน สารที่ทดแทนอาจทำงานได้ดี แต่ในกระบวนการทำงานพิเศษบางอย่าง อาจทำงานได้ไม่ดี เช่น หากมีพื้นผิวร้อนใกล้ที่ทำงาน หรือหากมีการเชื่อม อาจจำเป็นต้องตรวจสอบว่าส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ใหม่สามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซพิษเมื่อถูกความร้อนหรือแสงอัลตราไวโอเลตหรือไม่ ซึ่งอาจเกี่ยวข้องหากตัวทำละลายอะโรมาติกถูกแทนที่ด้วยตัวทำละลายคลอรีน-ฟลูออรีน เนื่องจากสิ่งเหล่านี้สามารถเปลี่ยนเป็นสารเช่นฟอสจีนและสารคล้ายฟอสจีน

แม้ว่าการทดแทนจะประสบความสำเร็จ แต่ต้องจำไว้ว่าผลิตภัณฑ์ใหม่อาจไม่ปลอดภัยทั้งหมด แต่มีความอันตรายน้อยกว่า ดังนั้นควรจัดการด้วยความระมัดระวัง

3.9 เบ็ดเตล็ด นอกเหนือจากเครื่องมือที่กล่าวถึงข้างต้นแล้ว ยังมีเครื่องมืออื่นๆ ที่เฉพาะเจาะจงมากหรือน้อยสำหรับการประเมินสารและผลิตภัณฑ์ รายการต่อไปนี้ไม่ครบถ้วนสมบูรณ์; นอกจากนี้ยังมีเครื่องมือหลายอย่างสำหรับการประเมินคุณสมบัติทางเทคนิคที่ไม่ได้รวมอยู่ ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้มักเป็นตัวกำหนดว่าการทดแทนจะประสบความสำเร็จหรือไม่

3.9.1 การจัดประเภทลวดเชื่อม

ลวดเชื่อมเคลือบสำหรับงานเชื่อมถูกจัดประเภทตามคำสั่งเลขที่ 407 จากปี 1979 ที่ออกโดยกระทรวงแรงงาน การจัดประเภทยังเกี่ยวข้องกับวันที่เกิดจากการเชื่อม มีทั้งหมดเจ็ดประเภท; ประเภท 1 เกิดคว้นน้อยที่สุด ประเภท 7 เกิดคว้นมากที่สุด

ผู้นำเข้า/ผู้ผลิตมีหน้าที่รับผิดชอบให้ลวดเชื่อมมีหมายเลขประเภทคว้นที่ถูกต้อง การจัดประเภทต้องดำเนินการโดยสถาบันทดสอบที่ได้รับอนุญาต สำหรับวัตถุประสงค์ของการทดแทน ประเภทที่ต่ำที่สุดเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุด

3.9.2 การตรวจวัดสารเคมีในอากาศ แทนที่จะคำนวณความเสี่ยงในการเกินค่าขีดจำกัด (โดยใช้ TLV และ SUBFAC เป็นต้น) สารเคมีในอากาศอาจถูกตรวจวัด ดังตัวอย่างของกาว PVC การเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ 1 ด้วยผลิตภัณฑ์ 2 ได้พิจารณาจากการตรวจวัดดังกล่าว ในกรณีนี้ การตรวจวัดสารเคมีในสถานที่ทำงานให้ข้อมูลที่ถูกต้องกว่าการวัดความเข้มข้นของสารเคมีในห้องปฏิบัติการและการคำนวณ แต่มีความไม่แน่นอนมากกว่าเนื่องจากความแปรปรวนในการทำงาน สภาพความร้อน เป็นต้น ในตัวอย่างที่กล่าวถึง การคำนวณจะให้ผลลัพธ์เดียวกันและไม่จำเป็นต้องมีการวัด

3.9.3 กลิ่น

การทดแทนอาจได้รับแรงจูงใจจากกลิ่นที่ไม่ดีหรือระคายเคืองของสาร อย่างไรก็ตาม "คุณภาพ" ของกลิ่น และขีดจำกัดของกลิ่นไม่ได้เชื่อมโยงกับคุณสมบัติที่เป็นอันตรายของสาร เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ไม่สามารถได้กลิ่นแม้ในความเข้มข้นที่สูงกว่าค่าขีดจำกัด ในขณะที่ขีดจำกัดกลิ่นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่ำกว่าค่าขีดจำกัดมาก

3.9.4 ข้อมูลความปลอดภัยของสารเคมี (Safety Data Sheet หรือ SDS) เป็นเอกสารสำคัญที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับสารเคมีและวิธีการจัดการอย่างปลอดภัย

ข้อมูลความปลอดภัยของสารเคมี มักใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการทดแทน โดยมีข้อมูลเกี่ยวกับ:

องค์ประกอบหลักของเอกสาร SDS

1. การระบุสารเคมี

- ชื่อผลิตภัณฑ์และผู้ผลิต
- ตัวระบุผลิตภัณฑ์ (เช่น CAS number)
- การใช้งานที่แนะนำและข้อห้าม

2. การระบุอันตราย

- การจำแนกประเภทอันตราย
- ฉลากและสัญลักษณ์เตือนภัย
- ข้อความแสดงความเป็นอันตราย

3. องค์ประกอบและข้อมูลเกี่ยวกับส่วนผสม

- สารเคมีที่ใช้ในผลิตภัณฑ์
- ความเข้มข้นหรือช่วงความเข้มข้น

4. มาตรการปฐมพยาบาล

- วิธีการปฐมพยาบาลสำหรับแต่ละเส้นทางการสัมผัส (การสูดดม การสัมผัสผิวหนัง การสัมผัสดวงตา การกลืนกิน)

5. มาตรการผจญเพลิง

- สารดับเพลิงที่เหมาะสม
- อันตรายเฉพาะที่เกิดจากสารเคมี

- อุปกรณ์ป้องกันสำหรับนักผจญเพลิง
6. มาตรการจัดการเมื่อมีการหกรั่วไหล
- ข้อควรระวังส่วนบุคคล
 - ข้อควรระวังด้านสิ่งแวดล้อม
 - วิธีการและวัสดุสำหรับกักเก็บและทำความสะอาด
7. การขนถ่ายและการจัดเก็บ
- ข้อควรระวังในการขนถ่ายอย่างปลอดภัย
 - สภาพการจัดเก็บที่ปลอดภัย
8. การควบคุมการสัมผัสและการป้องกันส่วนบุคคล
- ค่าขีดจำกัดการสัมผัส (เช่น TLV, PEL)
 - การควบคุมทางวิศวกรรม
 - อุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล (PPE)
9. คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี
- ลักษณะ สี กลิ่น
 - จุดเดือด จุดหลอมเหลว จุดวาบไฟ
 - ความหนาแน่น ความสามารถในการละลาย
10. ความเสถียรและความว่องไวต่อปฏิกิริยา
- ความเสถียรทางเคมี
 - ปฏิกิริยาที่เป็นอันตราย
 - สภาพที่ควรหลีกเลี่ยง
11. ข้อมูลด้านพิษวิทยา
- ข้อมูลเกี่ยวกับผลกระทบทางพิษวิทยา
 - ผลกระทบเฉียบพลันและเรื้อรัง
12. ข้อมูลด้านนิเวศวิทยา

- ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศ
- ความคงทนและการย่อยสลาย
- ศักยภาพในการสะสมทางชีวภาพ

13. ข้อพิจารณาในการกำจัด

- วิธีการกำจัดที่แนะนำ

14. ข้อมูลการขนส่ง

- หมายเลข UN
- ชื่อที่เหมาะสมสำหรับการขนส่ง
- ประเภทความเป็นอันตรายในการขนส่ง
- กลุ่มการบรรจุ

15. ข้อมูลด้านกฎข้อบังคับ

- กฎระเบียบด้านความปลอดภัย สุขภาพ และสิ่งแวดล้อม

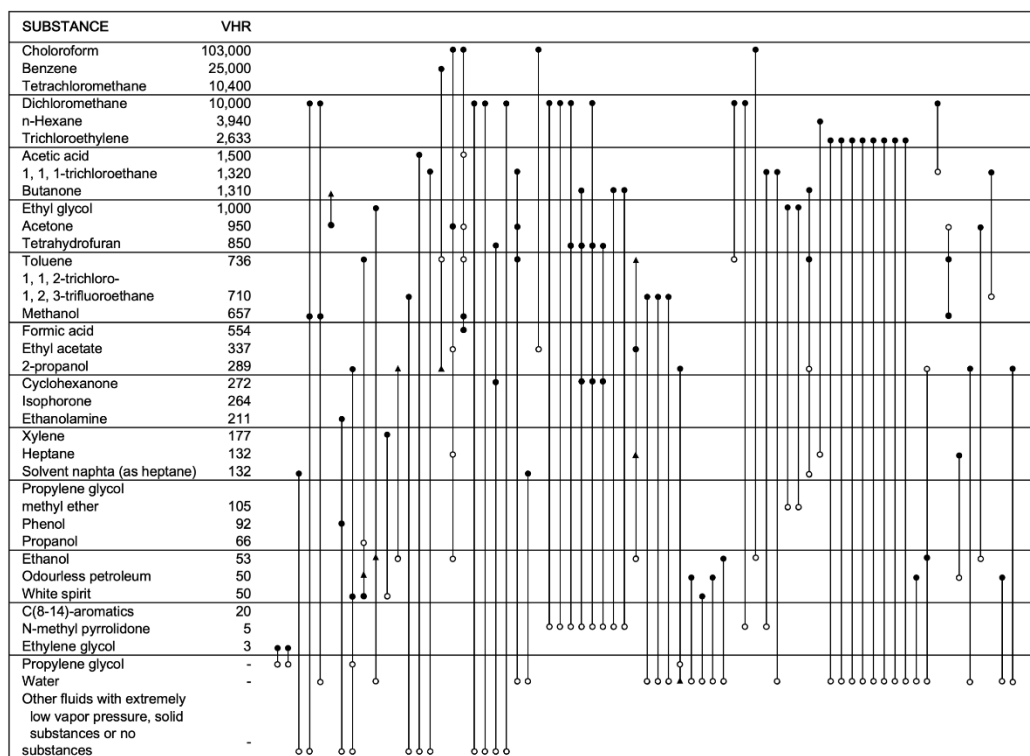
16. ข้อมูลอื่นๆ

- วันที่ปรับปรุงข้อมูลล่าสุด
- ข้อมูลเพิ่มเติมที่เกี่ยวข้อง

ความสำคัญของ SDS

- **การจัดการความเสี่ยง:** ช่วยในการระบุอันตรายและการประเมินความเสี่ยงในสถานที่ทำงาน
- **ความปลอดภัยของพนักงาน:** ให้ข้อมูลที่จำเป็นเพื่อปกป้องพนักงานจากอันตรายทางเคมี
- **การปฏิบัติตามกฎระเบียบ:** จำเป็นต้องมีในหลายประเทศเพื่อให้เป็นไปตามกฎหมายความปลอดภัยในสถานที่ทำงาน
- **การตอบสนองต่อเหตุฉุกเฉิน:** ให้ข้อมูลสำคัญสำหรับการตอบสนองต่อเหตุฉุกเฉินเกี่ยวกับสารเคมี

Chart



○ : "to" substance ● : "from" substance ▲ : both "to" and "from" substance

References:

1. Anastas PT, Warner JC. Green Chemistry: Theory and Practice. In: Anastas PT, Warner JC, editors. Green Chemistry: Theory and Practice [Internet]. Oxford University Press; 2000 [cited 2025 Apr 23]. p. 0. Available from: <https://doi.org/10.1093/oso/9780198506980.002.0001>
2. Anastas PT, Breen JJ. Design for the environment and Green Chemistry: The heart and soul of industrial ecology. *Journal of Cleaner Production*. 1997 Jan 1;5(1):97–102.
3. Sheldon RA. The E Factor: fifteen years on. *Green Chem*. 2007 Nov 22;9(12):1273–83.
4. Warner JC, Cannon AS, Dye KM. Green chemistry. *Environmental Impact Assessment Review*. 2004 Oct 1;24(7):775–99.
5. Monomers, Polymers and Composites from Renewable Resources [Internet]. 2008 [cited 2025 Apr 23]. Available from: <https://shop.elsevier.com/books/monomers-polymers-and-composites-from-renewable-resources/belgacem/978-0-08-045316-3>
6. Gandini A. Polymers from Renewable Resources: A Challenge for the Future of Macromolecular Materials. *Macromolecules*. 2008 Dec 23;41(24):9491–504.
7. Meier MAR, Metzger JO, Schubert US. Plant oil renewable resources as green alternatives in polymer science. *Chem Soc Rev*. 2007 Oct 2;36(11):1788–802.
8. Hofrichter M, editor. Lignin, Humic Substances and Coal. Volume 1 edition. Weinheim: Wiley-Blackwell; 2001. 523 p.
9. Hu TQ, editor. Chemical Modification, Properties, and Usage of Lignin [Internet]. Boston, MA: Springer US; 2002 [cited 2025 Apr 23]. Available from: <https://link.springer.com/10.1007/978-1-4615-0643-0>

10. Uragami T, Tokura S. Material Science of Chitin and Chitosan. Springer Berlin Heidelberg; 2010. 284 p.
11. Renault F, Sancey B, Badot PM, Crini G. Chitosan for coagulation/flocculation processes – An eco-friendly approach. European Polymer Journal. 2009 May 1;45(5):1337–48.
12. Chitosan Chemistry and Pharmaceutical Perspectives | Chemical Reviews [Internet]. [cited 2025 Apr 23]. Available from: <https://pubs-acsc-org.ejournal.mahidol.ac.th/doi/10.1021/cr030441b>
13. Cannon AS, Warner JC. Noncovalent Derivatization: Green Chemistry Applications of Crystal Engineering. Crystal Growth & Design. 2002 Jul 1;2(4):255–7.
14. Warner JC. Entropic control in green chemistry and materials design. Pure and Applied Chemistry. 2006 Jan 1;78(11):2035–41.
15. Trakhtenberg S, Warner JC. Green Chemistry Considerations in Entropic Control of Materials and Processes. Chem Rev. 2007 Jun 1;107(6):2174–82.
16. Anastas PT, Crabtree RH, editors. Handbook of Green Chemistry: Green Catalysis. 1st edition. Weinheim: Vch Pub; 2009. 1082 p.
17. Sheldon RA, Arends I, Hanefeld U. Green Chemistry and Catalysis. 1st edition. Weinheim: Wiley-VCH; 2007. 448 p.
18. Wiley.com [Internet]. [cited 2025 Apr 24]. Catalysis: Concepts and Green Applications | Wiley. Available from: <https://www.wiley.com/en-us/Catalysis%3A+Concepts+and+Green+Applications-p-9783527802609>
19. Noyori R, Ohkuma T, Kitamura M, Takaya H, Sayo N, Kumobayashi H, et al. Asymmetric hydrogenation of .beta.-keto carboxylic esters. A practical, purely chemical access to .beta.-hydroxy esters in high enantiomeric purity. J Am Chem Soc. 1987 Sep 1;109(19):5856–8.
20. Organic Chemistry of Enzyme-Catalyzed Reactions, Revised Edition: 9780126437317: Medicine & Health Science Books @ Amazon.com [Internet]. [cited 2025 Apr 24]. Available

from: <https://www.amazon.com/Organic-Chemistry-Enzyme-Catalyzed-Reactions-Revised/dp/0126437319>

21. Biocatalysis [Internet]. 2025 [cited 2025 Apr 24]. Available from: <https://shop.elsevier.com/books/biocatalysis/tischler/978-0-443-31788-0>
22. Wiley.com [Internet]. [cited 2025 Apr 24]. Biocatalysis: Fundamentals and Applications | Wiley. Available from: <https://www.wiley.com/en-us/Biocatalysis%3A+Fundamentals+and+Applications-p-9783527303441>
23. The ILO Encyclopaedia of Occupational Health and Safety: a multidisciplinary challenge - International Labour Organization [Internet]. [cited 2025 Apr 24]. Available from: <https://researchrepository.ilo.org/esploro/outputs/journalArticle/The-ILO-Encyclopaedia-of-Occupational-Health/995218942502676>
24. LEARNING FROM UCLA. Chem Eng News Archive. 2009 Aug 3;87(31):29–34.

References เพิ่มเติม

[1] Council Directive 89/391/EEC of 12 June 1989 on the introduction of measures to encourage improvements in the safety and health of workers at work. Available at: http://eur-lex.europa.eu/smartapi/cgi/sga_doc?smartapi!celexapi!prod!CELEXnumdoc&numdoc=31989L0391&model=guichett&lg=en

[2] Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and the Council of 18 December 2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH), establishing a European Chemicals Agency, amending Directive 1999/45/EC and repealing Council Regulation (EEC) No 793/93 and Commission Regulation (EC) No 1488/94 as well as Council Directive 76/769/EEC and Commission Directives 91/155/EEC, 93/67/EEC, 93/105/EC and 2000/21/EC, Official Journal of the European Union L 396/1 of 30 December 2006. Available at: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=ojl:2006:396:0001:0849:en:pdf>